

---

*Araştırma Makalesi / Research Article*

---

## **Fotovoltaik Sistemde Bulunan Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Eviricinin Çıkış Gerilimi Toplam Harmonik Distorsiyonunun Simulasyon ve Analizi**

Süleyman ADAK <sup>1\*</sup>, Hasan CANGİ<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Mardin Artuklu Üniversitesi, Elektrik ve Enerji Bölümü, Mardin

<sup>2</sup>Gaziantep Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Gaziantep

---

### **Özet**

R-L endüktif yükü fotovoltaik (PV) sisteme DC/DC yükseltici dönüştürücü ve tek fazlı diyot kenetlemeli evirici üzerinden bağlanılmıştır. PV sistemde kullanılan DC/DC yükseltici dönüştürücü ile DC/AC üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici birer harmonik kaynağı gibidirler. Bu makalede üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin Toplam Harmonik Distorsiyon gerilim için (THD<sub>V</sub>) değeri üzerine odaklanılmıştır. Eviricinin çıkış gerilimi THD<sub>V</sub> değerinin simulasyon çalışması, Matlab/Simulink yazılım programı ile yapılmıştır. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin THD<sub>V</sub> değeri analitik olarak hesaplanmış ve Matlab/Simulink yazılım programı ile de gösterilmiştir. Matlab/Simulink değeri analitik yolla bulunanın değerine yaklaşık olarak aynıdır.

**Anahtar kelimeler:** Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici 1, Matlab/Simulink 2, Harmonik bileşenler 3

---

## **Analysis and Simulation Total Harmonic Distortion of Output Voltage Three Level Diode Clamped Inverter in Photovoltaic System**

---

### **Abstract**

R-L inductive load is connected to the photovoltaic (PV) system via DC/DC boost converter and single phase three level diode clamped inverter. DC/DC boost converter and DC/AC three level diode clamped inverter which used in PV systems are like the source of harmonics. In this paper is particularly focuses on Total Harmonic Distortion for Voltage (THDV) of three level diode clamped inverter. Output voltage of inverter THDV simulation work is done using the MATLAB/Simulink software program. THDV of output voltage for three level diode clamped inverter is calculated by analytically and is shown via Matlab Simulink software program. Matlab Simulink value which is almost identical with the value of analytical way.

**Keywords:** Three level diode clamped inverter 1, Matlab/Simulink 2, Harmonic components 3

---

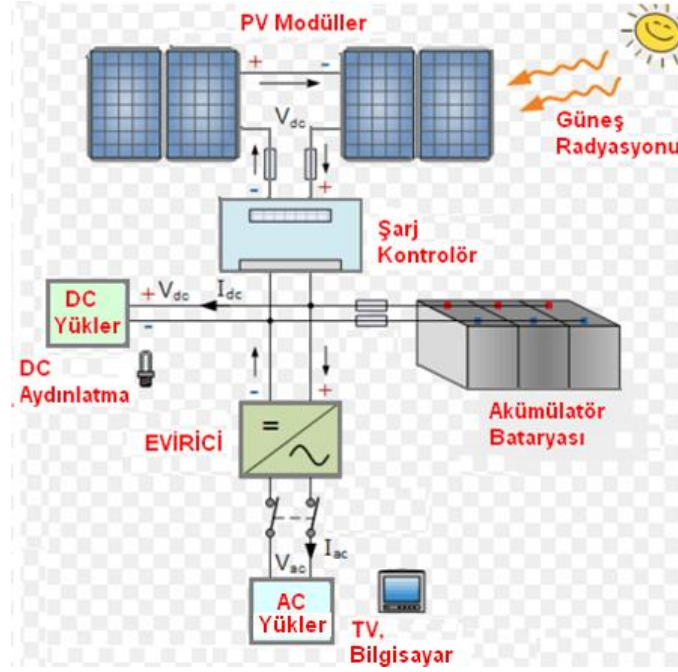
### **1. Giriş**

Yenilenebilir enerji kaynakları atık üretmediklerinden dolayı çevre dostu olup sağlık problemleri de oluşturmazlar. Günümüzde yaygın olarak kullanılmakta olan fosil yakıtlarının çevre üzerindeki olumsuz etkileri ve tükenme ihtimali nedeniyle, diğer alternatif enerji kaynakları yanı sıra fotovoltaik (PV) enerji gün geçtikçe önem kazanmaktadır. PV modüller, güneşten gelen foton enerjisini elektrik enerjisine dönüştüren yarı iletken malzemelerden imal edilen dönüştürücülerdir. Bu sistem ekipmanlarında herhangi bir hareketli aksamaya sahip değildir bundan dolayı en az bakım ile en uzun ömür kolaylığı sağlamaktadırlar.

---

\*Sorumlu yazar: [suleymanadak@gmail.com](mailto:suleymanadak@gmail.com)

Geliş Tarihi: 21/09/2016. Kabul Tarihi: 26/12/2016.



Şekil 1. Fotovoltaik sistemin prensip şeması

Bu sistemlerde birim yüzeye ulaşan güneş ışınımı azdır. Bu nedenle büyük ölçekli enerji üretimi için geniş yüzeylere ihtiyaç vardır. PV sistemlerin verimleri panellin yapıldığı kristal tipin bağlı olarak (% 15–%20) arasında değişir. Solar modüller ancak standart çalışma koşullarında nominal güçte çalışırlar. Üretilen enerji miktarını arttırmak amacıyla çok sayıda PV modüller kendi aralarında seri ve paralel bağlanırlar. Modüllerde kirlenme, güneş ışınlarının gelme açılarının dik olmaması, gölgelik ile ortam sıcaklığının çok sıcak veya çok soğuk olması modüllerin enerji üretme verimini etkiler [1].

Güç sistemlerinde DC/AC dönüştüren eviriciler nonlineer bir karakteristiğe sahiptirler. Bu özellikleri gereği ile güç sistemde akım ve gerilimin sinüzoidal olan dalga formlarını bozarlar. Bunun sonucu olarak PV sistemde harmonik bileşenler oluşur. Eviricilerin çıkış gerilimlerinin sinüzoidal dalga formunda ve toplam harmonik distorsiyonun (THD) standartlarca belirlenen aralıkta olması istenir. THD'nin düşük olması kaliteyi belirleyen ana faktörlerdendir.

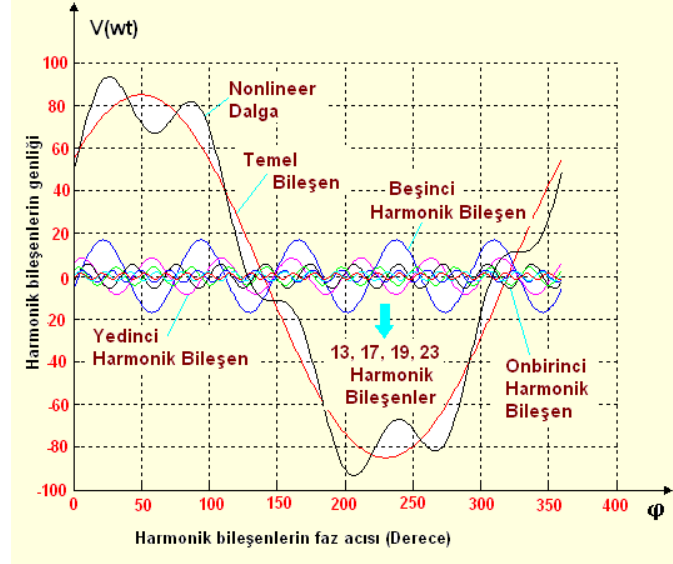
Enerji sistemlerinde THD bize güç sistemlerindeki harmonik kirlilik hakkında bir fikir verir. Güç sistemlerinde THD harmonik kirlenmeyi belirleyen önemli bir büyüklüktür. Eviricilerde THD bu bozucu etkisini gidermek için çıkış dalga şeklinin sinüs eğrisine bezemesi gerekir. Bunun için son zamanlarda çok seviyeli eviricilerin üretimine ağırlık verilmiştir. Bu yolla eviricilerde THD değerinin düşürülmesine yoluna gidilmiştir.

PV sistemde harmonik bileşenler, sistemde bulunan dönüştürücülerde kullanılan güç elektroniği temelli anahtarlama elemanlarının nonlineer özelliği sonucu akım ve gerilimin sinüzoidal olan dalga formunda bozulmaları sonucunda oluşurlar. Nonlineer özellik gösteren devre elemanların PV sistemine bağlanması harmonik bileşenler bir şekilde artmıştır. Bu artmanın temel sebebi yüksek güçlü yarı iletken anahtarların gelişimi ve onların doğrultucu, evirici ve çeşitli elektronik devrelerde uygulanmalarıdır. Bu yüklerle örnek olarak, DC/DC dönüştürücüler, kontrol devreleri, DC/AC eviriciler örnek olarak gösterilebilir. Yarı iletken elemanların yapıları gereği akım ve gerilim dalga biçimleri, periyodik olmakla birlikte sinüzoidal dalga ile frekans ve genliği farklı diğer sinüzoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalga dışındaki dalgalara “HARMONİK” adı verilir [2,3].

PV sistemlerde harmonik bileşenleri tam olarak yok etmek imkânsızdır. Harmonikleri en aza indirecek önlemler alınabilir. Harmonik üreten güç elektroniği aygıtlarında daha tasarım aşamasında gerekli tedbirler alınabilir. Örneğin doğrultucularda 6 darbe kullanılacağı yerde 12 darbeleri olarak tasarlanmalıdır. Nonlineer harmonikli bir gerilim dalgasına ait denklem aşağıda verilmiştir.

$$v(\omega t) = \sqrt{2} \begin{bmatrix} (60 \sin(\omega t + 40) + 12 \sin(5\omega - 19)) \\ 6 \sin(7\omega t + 47) + 4 \sin(11\omega - 25) \\ 3 \sin(13\omega t + 45) + 2 \sin(17\omega t - 27) \\ 1,5 \sin(19\omega t + 11) + \sin(23\omega t - 33) \end{bmatrix} \quad (1)$$

Bu nonlinear gerilim dalgası ile harmonik bileşenlerine ait değişim aşağıda verilmiştir.



Şekil 2. Nonlinear dalganın harmonik bileşenleri

Nonlinear dalgaların matematik formu Fourier serileri ile bulunur. Nonlinear periyodik bir dalganın Fourier analizinin zaman domenindeki karşılığı aşağıda verilmiştir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (2)$$

Bu denklemde;  $n=1, 2, 3$ , harmonik mertebelerini,  $A_0$ , doğru akım bileşenini,  $A_n$  ve  $B_n$  de,  $f(t)$  fonksiyonunun harmonik katsayıları olarak adlandırılır. Nonlinear dalganın doğru akım bileşeni,

$$A_0 = \frac{1}{T} \int_0^T f(t) dt \quad (3)$$

ile bulunur. Nonlinear dalganın harmonik katsayıları,

$$A_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (4)$$

diğer katsayı,

$$B_n = \frac{2}{T} \int_0^T f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (5)$$

ifadesi ile bulunur. Nonlinear dalga formu tek fonksiyon özelliğinde ise,

$$f(\omega t) = f(-\omega t) \quad (6)$$

Şartını sağlaması gerekir. Fonksiyonda sadece tek harmoniklerin bulunması durumunda,

$$f(\omega t) = f(-\omega t + \pi) \quad (7)$$

özelliğini sağlaması gerekir. Nonlineer dalgalarda THD nonlineer dalganın harmonikli bileşenlerinin temel bileşene göre durumunu tespit etmede kullanılan en önemli ölçüttür. Nonlineer dalganın bozulma miktarı hakkında bize bir fikir verir. Bu büyüklük PV sistemi tarafından üretilen enerji kalitesi ile de ilgilidir. Hem gerilim, hem de akım dalgaları için verilebilir. Gerilim için THD<sub>V</sub> değeri,

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\left(\sum_{n=2}^{\infty} U_n^2\right)}}{U_1} * 100 \quad (8)$$

şeklinde ifade edilir. Toplam harmonik distorsiyonunu efektif gerilim cinsinden karşılığı aşağıdaki gibi yazılabilir.

$$\%THD_V = \sqrt{\left(\frac{V_{eff}}{V_{1eff}}\right)^2 - 1} \quad (9)$$

olarak bulunur. Gerilimin efektif değeri,

$$V_{eff} = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T V^2(t) dt} \quad (10)$$

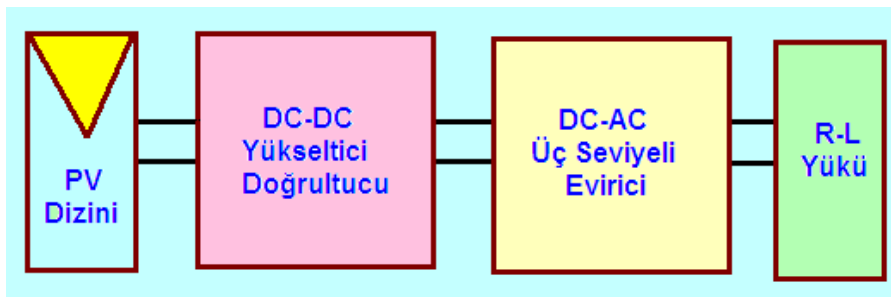
formülü ile bulunur. Harmoniklerin fotovoltaik tesislerdeki bozucu etkisinin giderilmesi için bazı önlemlerin alınması gerekir. PV sistemlerde bulunan dönüştürücüler yapılarında bulunan nonlineer anahtarlama elemanlar nedeni ile birer harmonik kaynağı olarak işlev görür. Harmonik seviyesinin hesaplanması ve daha büyük problemler oluşmadan harmoniklerin giderilmesi gerekir. Çözüm olarak evirici seçiminde çıkışları sinüs eğrisine benzediği için çok seviyeli eviricilere ağırlık vermek gerekir [4].

Günümüzde elektrik enerjisine olan talep günbegün artmaktadır. Daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji için, nonlineer elemanlar içeren PV sistemler kesintisiz güç kaynakları, motor sürücüler gibi tesislerde yılda birkaç kez harmonik ölçümü yapılmalıdır. Büyük güçlü PV sistemlerde bu sistemlerin yıllık harmonik yük eğrileri çıkarılmalı ve bu tesislerde THD'nin düşük seviyede tutulması sağlanmalıdır.

Nonliner dalgaların harmonik bileşenleri PV tesislerde ek kayıplara ve aşırı ısınmaya sebep olmaktadır. Harmonik bileşenler PV tesislerde rezonans olaylarına da sebep olmakta tesiste aşırı akımların dolaşmasına neden olurlar. Bu aşırı akımlar tesiste hasarların oluşuma neden olurlar.

## 2. Materyal ve Metot

PV sistemlerin simulink modelleri Matlab/Simulink araç kutusundaki devre elemanları kullanılarak gerçekleştirilebilir. Simulink araç kutusundan gerekli bloklar Simulink çalışma alanına sürüklenerek PV sistemin simulink benzetimi gerçekleştirilir. Makaleye konu PV sistem şebekeden bağımsız (off-grid) olarak tasarlanmıştır. Tasarlanan PV sistemde fotovoltaik modüllerin yanı sıra, DC/DC yükseltici dönüştürücü, üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici, endüktif R-L yükü ve şalt ekipmanlarından oluşmaktadır.



Şekil 3. PV sistemin blok şeması

Bu makalede PV güç sisteminde üç seviyeli diyot kenetlemeli bir evirici kullanılmıştır. Bu eviricinin çıkış gerilimi THD değeri Matlab/Simulink ile ölçülmüş ve bulunan değer doğruluğu analitik yöntem ile ispatlanmıştır. PV sistemlerde düşük ve orta güçlü uygulamalarda kare dalgaya yakın çıkış gerilim formları kabul edilebilirken, büyük güçlerde evirici çıkış geriliminin küçük distorsiyonlu harmoniklerden arınmış sinüzoidal dalga formunda olması gerekir.

Tasarlanan PV sisteminde fotovoltaik modüllerden üretilen gerilim DC/DC yükselten dönüştürücü ile 60 (V)'tan 120 (V) 'ta yükseltilir. Yükseltilecek bu gerilim üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici tarafından doğru gerilimden alternatif gerilime dönüştürülür. Bu gerilim ile evirici çıkışına bağlanan R-L endüktif yük beslenir. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricilerde anahtarlama elemanı olarak MOSFET transistörü kullanılmıştır. Sistemdeki şalt ekipmanları sistemin enerji üretimini, dağıtımını, kontrolünü ve güvenliğini sağlarlar. Tablo 1'de anahtarlama elemanı olarak verilen elemanların özellikleri verilmiştir.

Tablo 1. Anahtarlama Elemanları ve özellikleri

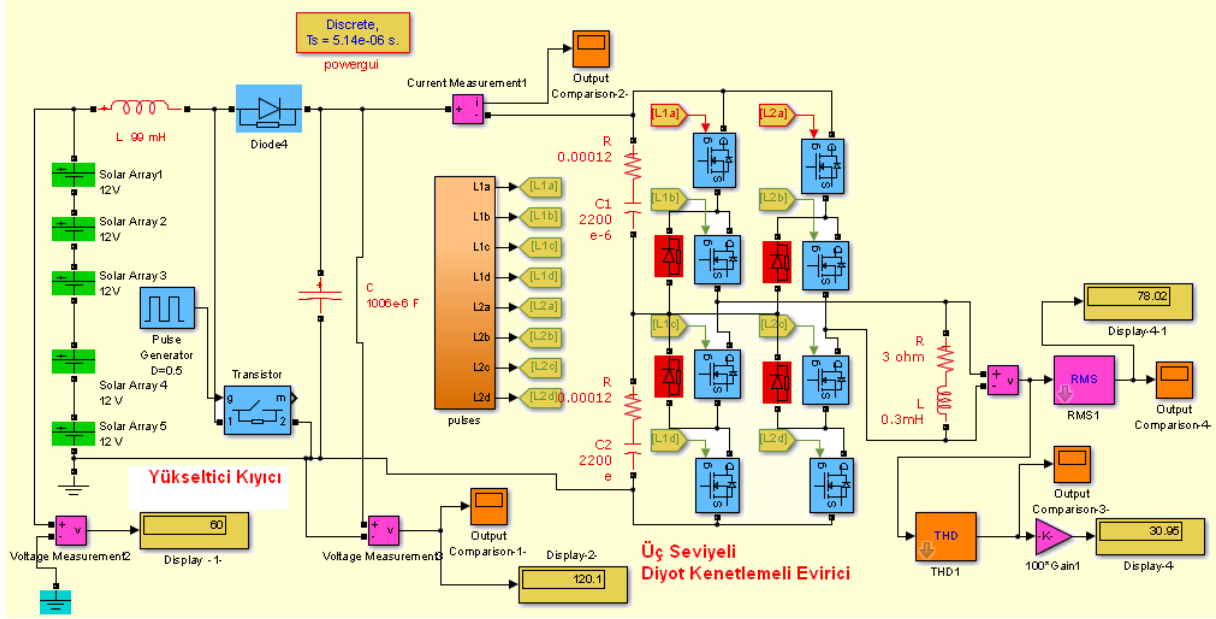
Anahtarlama Elemanları İyiden Kötüye Doğru				
Tetikleme veya Sürme Kolaylığı	MOSFET	IGBT	GTO	BJT
Söndürme Kolaylığı	MOSFET	IGBT	BJT	GTO
Gerilim Düşümü	BJT	GTO	IGBT	MOSFET
	(1,0V)	(2,0 V)	(3,5V)	(4,5V)
Anahtarlama Hızı	MOSFET	IGBT	BJT	GTO
	(100KHz)	(75KHz)	(25KHz)	(15KHz)
Akım Dayanımı	GTO	IGBT	BJT	MOSFET
	(3000 A)	(800 A)	(600A)	(100 A)
Gerilim Dayanımı	GTO	IGBT	BJT	MOSFET
	(3000 V)	(1500 V)	(1200 V)	(1000 V)
Devre Gücü	GTO	IGBT	BJT	MOSFET
	(<10M)	(<500K)	(<100K)	(10K)
Çalışma Frekansı	MOSFET	IGBT	BJT	GTO
	(<100K)	(20K)	(10K)	(1K)
Fiyat	BJT	GTO	IGBT	MOSFET

Not: Burada GTO tristör ailesini temsil etmektedir.

PV sistemlerde kullanılan DC/DC yükseltici dönüştürücü ile DC/AC üç seviyeli eviriciden oluşturulmasında farklı türde anahtarlama elemanları kullanılır. Bunların en önemlileri, MOSFET (Metal oksit Yarıiletken Alan Etkili Transistor), IGBT (İzole edilmiş kapılı, iki kutuplu transistor) ise MOSFET'ler gibi gerilimle kontrol edilir ve hızlı anahtarlama yapabilme özelliğine sahiptir. Yapısı gereği yüksek güçlü evirici tasarımlarında IGBT'ler tercih edilmelidir [5].

IGBT'ler düşük doluluk boşluk oranı (duty cycle), düşük frekans (20kHz küçük değerlerde) yüksek gerilim (1000V büyük değerlerde) tercih edilirken MOSFET'ler yüksek frekans (200kHz büyük frekanslarda), uzun doluluk boşluk oranları ve alçak gerilim uygulamalarında (250V küçük değerlerde) tercih edilmektedir. Bunun dışında IGBT'leri sürmek MOSFET'lere göre oldukça zordur. MOSFET'ler düşük ve orta güç uygulamalarında tercih edilirler. Hızlı anahtarlama özelliğine sahip olduğundan yüksek frekans uygulamalarında da kullanılırlar. Yüksek akım taşıma özelliğine sahip TRİSTÖR ve GTO'lar yüksek güç gerektiren evirici uygulamalarında kullanılırlar, ancak anahtarlama hızları Mosfet'lere göre oldukça düşüktür. Ekte bu anahtarlama elemanlarının karşılaştırılması verilmiştir.

Tasarlanan PV sistem Şekil 4'te gösterildiği gibi Matlab/Simulink yazılım programı modellenmiştir. Modelde R-L yükü (R=3 ohm, L=0.3 mH) olarak seçilmiştir. Çok seviyeli eviricilerde anahtarlama elemanlarının fazlalığı ve eviricide oluşan komutasyonlar sonucunda güç kayıpları oluşmaktadır. Bu kayıplar iki seviyeli eviricilerdeki kayıplara göre oldukça fazladır. Aşağıda şebekeden bağımsız bir PV sistemin Matlab/Simulink gerçekleştirilmiş eşdeğer şeması verilmiştir. Sistemin temel bileşenleri PV modüller, DC/DC yükselten dönüştürücü, DC/AC üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici ve endüktif R-L yükü. Diyot-kenetlemeli üç seviyeli evirici pratik uygulamalarda nötr noktası kenetlemeli evirici olarak ta bilinir [6,7].



Şekil 4. PV sistemin Matlab / Simulink ile modellenmesi

Üç seviyeli eviriciler genel olarak üç türlü imal edilirler, diyot kenetlemeli evirici, kondansatör kenetlemeli evirici ve kaskat evirici. Kaskat eviricilerde kenetleme diyotları ile kondansatörler kullanılmadığından bu evirici türünde daha az eleman kullanılmaktadır. Buna karşılık bu evirici türünde transformatör kullanılması evirici maliyetini artırmaktadır. PV uygulamasında diyot kenetlemeli evirici kullanılmıştır.

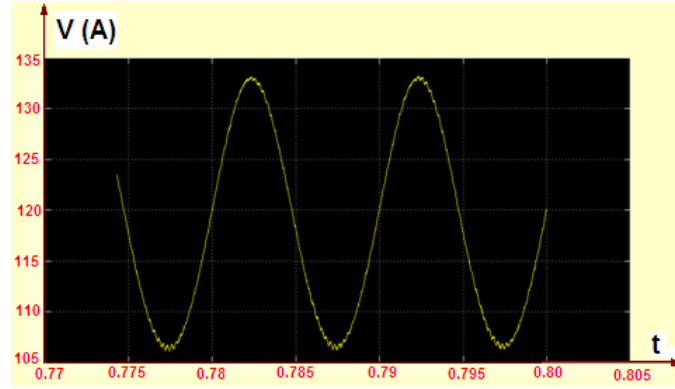
Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricilerde her bir evirici kolunda kullanılan anahtarlama elemanı sayısı eşittir. Gene bu eviricilerde az sayıda kapasite elemanı kullanılmasına karşılık kullanılan ekstrasından kenetleme diyotlarına kullanılmaktadır. Bu eviricilerde kullanılan kenetleme diyotlarının sayısı  $m=1, 2, 3$  olmak üzere,

$$\text{Kenetlemede Kullanılan Diyot Adedi} = (m - 1) * (m - 2) \quad (11)$$

İfadesi ile bulunur. Çok seviyeli eviricilerde yüksek gerilim değerlerine ve düşük THD değerleri sayesinde PV sistemlerde bu eviricilerin kullanımı gün geçtikçe artmaktadır. Bununla beraber bu eviricilerde anahtarlama esnasında oluşan gerilim dengesizlikleri bir dezavantaj olarak görülebilir. Gene bu bağlamda bu eviricilerde seviye sayısı artıkça kontrol zorluğu başlar, ancak son zamanlarda gelişen mikroişlemci teknolojisiyle beraber bu sorun halledilmiştir. Günümüzde karmaşık topolojilerin kontrol edilecek algoritmalar ve yüksek işlem gücüne ve çevre birimlerine sahip işlemciler üretilmiştir.

Ek olarak üç seviyeli eviricide anahtarlama elemanı olarak kullanılan MOSFET ve diyotların üzerindeki  $dv/dt$  zorlanması daha da azdır. Sonuç olarak üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricide güvenilirlik ve uygulamanın toplam verimliliği iki seviyeli klasik eviricilere nazaran daha da artmış olur. PV sistemde kullanılan dönüştürücünün kısa ölü zaman (dead-time), sistemdeki lineersizlikleri ve sistemin kontrolörün kolaylaştırır. Böylelikle sürücülerde ve koruma konseptlerinde iyileşmeler sağlanır.

PV sistemde kullanılan üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricide alt ve üst kollarda kullanılan MOSFET'ler sıralı olarak anahtarlanır. Bundan dolayı eviricide köprü kısa devresi gözükmez. Köprünün dış kollarda kullanılan MOSFET'lerin sürücü devrelerinin izleme özelliğine sahip olması gerekirken, köprünün iç kollarında kullanılan sürücü devrelerinin basit yapıda olmaları yeterlidir. Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici çıkış gerilimi harmonik analizi analitik ve Matlab/Simulink ile gerçekleştirilmiştir.

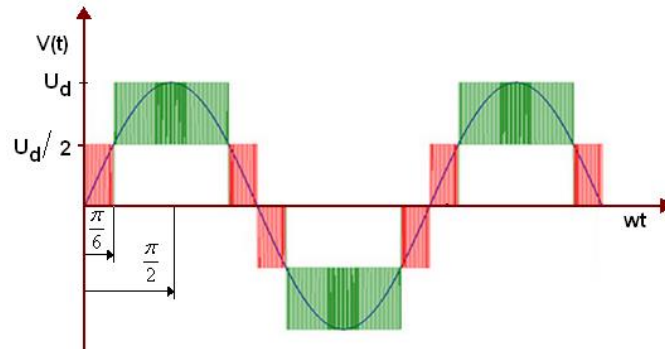


Şekil 5. DC/DC yükselten dönüştürücü çıkış gerilim

### 2.1. Üç Seviyeli Diyot Kenetlemeli Eviricinin Çıkış Gerilimi Fourier Serisi

PV tesislerde DC gerilimi AC gerilime dönüştürmede çok seviyeli eviriciler kullanılmalıdır. Evirici çıkış geriliminin THD' değeri minimuma yaklaşması oranında üretilen enerji kalitesi artar. PV tesislerde kullanılan dönüştürücülerden kaynaklanan harmonik bileşenlerin yok edilmesi gerekir. Bu da yüksek darbeli dönüştürücüler ile çok seviyeli eviriciler kullanılarak sağlanır.

Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici çıkış gerilimi dalga (6) denklem koşulunu sağladığından tek bir fonksiyondur. Fourier serisine açılımında kosinüslü terimler bulunmaz. Gene bu bağlamda (7) denklemi şartını sağladığından dolayı evirici çıkış geriliminin Fourier serisine açılımında sadece tek harmonik bileşenler bulunur. PV tesislerin güvenilir ve kararlı olarak çalışmasını sağlamak için harmonik bileşenlerin standartlarda belirtilen değerleri aşmaması gerekir. Bu da nonlinear devre elemanları ile nonlinear kaynakların meydana getirdiği harmonik büyüklüklerinin kontrolü ile mümkündür. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin çıkış gerilim değişimi aşağıda verildiği gibidir.



Şekil 6. Üç seviyeli diyot kenetlemeli çıkış gerilimi

Şekil 6'daki çıkış dalga formunu Fourier serisini açalım. (5) denkleminde hareketle,

$$B_n = \frac{4}{\pi} \left( \int_0^{\frac{\pi}{6}} \frac{U_d}{2} \sin(n\omega t) d\omega t + \int_{\frac{\pi}{6}}^{\frac{\pi}{2}} U_d \sin(n\omega t) d\omega t \right) \quad (12)$$

Entegral değerleri hesaplandığında,

$$B_n = \begin{cases} 0 & ; n = 2,4,6 \dots \\ \frac{2U_d}{n\pi} (1 + \cos \frac{n\pi}{3}) & ; n = 1,3,5 \dots \end{cases} \quad (13)$$

şeklinde bulunur. Üç seviyeli evirici çıkış gerilim ifadesinin genel şekli,

$$V(\omega t) = \sum_{n=1,3,5}^{\infty} \frac{2U_d}{n\pi} (1 + \cos \left( \frac{n\pi}{3} \right)) \sin(n\omega t) \quad (14)$$

olarak bulunur. PV sistemde kullanılan üç seviyeli diyot kenetlemeli eviriciler klasik kullanılan iki seviye çıkışlı eviricilere göre; çıkış geriliminin ve akımının harmonik spektrumu, verim ve güç faktörü açısından daha iyi bir performansa sahiptirler. Çok seviyeli eviriciler genel olarak üçüncü seviye ile başlamaktadırlar. Eviricilerde çıkış seviye sayısındaki artma ile orantılı olarak çıkış eğrisi sinüs eğrisine benzer.

Dalga şeklinin sinüs eğrisine benzemesi oranında THD azalmaktadır. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin çıkış gerilim dalga şekli, iki seviyeli klasik eviricilere nazaran sinüzoidal dalgaya daha fazla benzediği için THD' değeri iki seviyeli eviriciye göre daha düşüktür. Bu bağlamda üç seviyeli eviricilerde kullanılacak filtrelerde düşük güçte olur. Bu da seçilecek filtrelerin düşük maliyette olması demektir [8,9].

### 3. Bulgular ve Tartışma

Eviriciler doğru akımı istenen genlik ve frekansta alternatif akıma dönüştüren çeviricilerdir. Evirici PV sistemlerde gücünü bataryadan aldığı gibi DC/DC doğrultucudan da alabilir. Akım veya gerilim beslemeli türleri vardır. PV sistemde kullanılan anahtarlama elemanları nonlineer özelliklerinden dolayı enerji sistemindeki sinüzoidal akım ve gerilim dalga şeklini bozarlar. PV sistemde bulunan DC/DC yükseltici dönüştürücü ile üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici birer harmonik kaynağı gibi davranırlar. Bu nonlineer dönüştürücüler göz önüne alınırsa bunların sonucunda ek kayıp ve THDV değerlerinin yüksek değerlere varması kaçınılmazdır.



Şekil 7. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin çıkış gerilim THDV değişimi

PV sistemde kullanılan doğru akımı alternatif akıma dönüştüren üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici çıkış gerilim dalga şeklinin sinüs dalgasına benzediği oranda harmonik bileşenlerin değeri azalır. Üç seviyeli eviricilerin toplam harmonik distorsiyonu, iki seviyeli eviricilere göre daha düşüktür. Çünkü eviricilerde seviye sayısı arttıkça sinüs eğrisine benzeme artar buda THD azalmasını sağlar. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricide MOSFET'lerin kesime uğramaları sırası dikkatlice izlenerek doğru gerilim bara geriliminin tamamının tek bir MOSFET üzerine gelmemesine dikkat edilmelidir. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin PV uygulamalarındaki avantajları şunlardır:

- Yüksek güçlerde transformatörsüz olarak kullanılmaya elverişlidir,
- Anahtarlama elemanları (MOSFET'ler) seri bağlanarak yüksek gerilimde eviricilerin transformatörsüz kullanılmaları mümkündür,
- İhtiyaç durumuna göre üç seviyeli eviricilerin geniş bir bant aralığında kullanımları mümkündür,
- Üç seviyeli evirici iki seviyeli eviricilere göre daha düşük anahtarlama frekanslarında çalışılabilir,
- Gerilim değişim hızı (dv/dt) düşüktür.

PV enerji tesislerinde nonlineer yüklerin etkinliğinin azaltılması, harmonik distorsiyonunun giderilmesi sonucu PV sistemde kayıplar azalmakta tüketicilere sunulan enerjinin kalitesi yükselmektedir. Buna karşılık eviricinin seviye sayısı artırıldıkça anahtarlama elemanları üzerindeki gerilim zorlanması da o oranda azalmaktadır. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin çıkış harmonikli gerilim ifadesinin efektif değeri,



$$V_n = \frac{\sqrt{2}U_d}{n\pi} \left(1 + \cos\left(\frac{n\pi}{3}\right)\right) \quad (15)$$

ifadesi ile hesaplanır. Burada n, harmonik mertebesini,  $V_n$  evirici çıkış harmonikli gerilim ifadesini göstermektedir. (13) denkleminde,  $n=1, 2, 3, \dots, 2n-1$  değerleri için evirici çıkış geriliminin değerleri Tablo 2 verildiği gibidir.

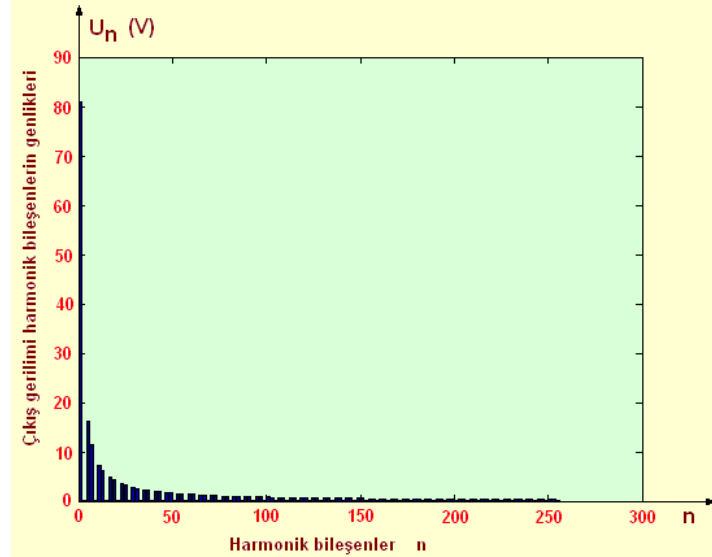
**Tablo 2.** Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricinin çıkış gerilimi harmonik bileşenleri

İnverter Çıkış Gerilimi Harmonik Bileşenleri (n)				İnverter Çıkış Gerilimi Harmonik Bileşenlerinin Genliği (V)			
1	65	129	103	81,0284	1,2466	0,0000	0,4198
3	67	131	195	0,0000	1,2094	0,6186	0,0000
5	69	133	197	16,2057	0,0000	0,6092	0,4113
7	71	135	199	11,5755	1,1413	0,0000	0,4072
9	73	137	201	0,0000	1,1100	0,5915	0,0000
11	75	139	203	7,3662	0,0000	0,5829	0,3992
13	77	141	205	6,2329	1,0523	0,0000	0,3952
15	79	143	207	0,0000	1,0257	0,5667	0,0000
17	81	145	209	4,7664	0,0000	0,5588	0,3877
19	83	147	211	4,2646	0,9763	0,0000	0,3840
21	85	149	213	0,0000	0,9533	0,5438	0,0000
23	87	151	215	3,523	0,0000	0,5366	0,3769
25	89	153	217	3,2411	0,9105	0,0000	0,3734
27	91	155	219	0,0000	0,8904	0,5228	0,0000
29	93	157	221	2,7941	0,0000	0,5161	0,3667
31	95	159	223	2,6138	0,853	0,0000	0,3633
33	97	161	225	0,0000	0,8353	0,5033	0,0000
35	99	163	227	2,3151	0,0000	0,4971	0,357
37	101	165	229	2,1899	0,8023	0,0000	0,3538
39	103	167	231	0,0000	0,7867	0,4852	0,0000
41	105	169	233	1,9763	0,0000	0,4794	0,3478
43	107	171	235	1,8844	0,7573	0,0000	0,3448
45	109	173	237	0,0000	0,7434	0,4684	0,0000
47	111	175	239	1,724	0,0000	0,4630	0,3391
49	113	177	241	1,6536	0,7171	0,0000	0,3362
51	115	179	243	0,0000	0,7046	0,4527	0,0000
53	117	181	245	1,5289	0,0000	0,4477	0,3307
55	119	183	247	1,4732	0,6809	0,0000	0,28
57	121	185	249	0,0000	0,6696	0,4380	0,0000
59	123	187	251	1,3734	0,0000	0,4333	0,3228
61	125	189	253	1,3283	0,6482	0,0000	0,3202
63	127	191	255	0,0000	0,6380	0,4243	0,0000

(8) denkleminde hareketle üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici çıkış gerilimi THD değeri,

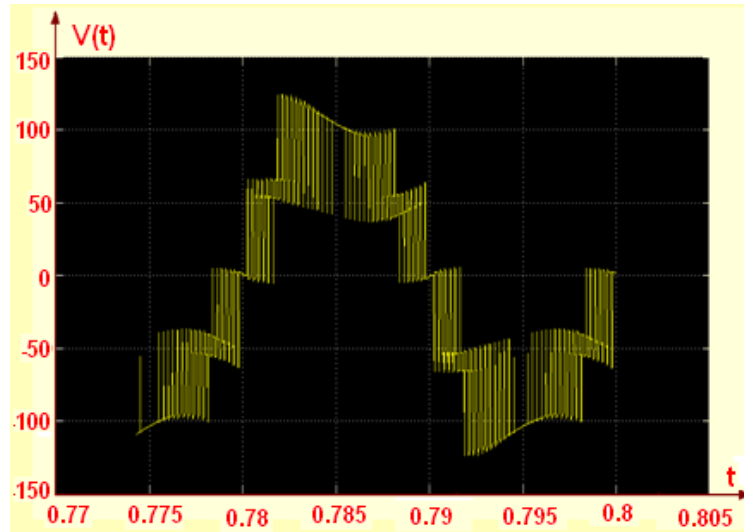
$$\%THD_V = \frac{\sqrt{16,2057^2 + 11,5755^2 + \dots + 0,3202^2}}{81,0284} * 100 = 30,87$$

olarak bulunur. Şekil 8'te Matlab/Simulink benzetim programı ile bulunan değer ile analitik olarak bulunan THD değeri hemen, hemen aynı olduğu gözlenmiştir. Sonuç olarak önerilen PV sistem için THD değeri analitik ve Matlab/Simulink yazılım programı ile ölçülmüştür. Sonuçların bağdaştığı gözlenmiştir.



Şekil 8. Üç seviyeli evirici çıkış gerilimi harmonik bileşenleri

Devrelerinde kullanılan elemanlar nedeniyle üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricilerin çıkış geriliminin ve akımının harmonik bileşenleri, verim ve güç faktörü açısından daha iyi bir performansa sahiptirler. Gene bu bağlamda anahtarlama elemanlarındaki zorlama daha da azdır. Üç seviyeli eviricilerde çıkış geriliminin oluşumunda gerilim üç seviye arasında anahtarlanır. Buda, daha üst seviyeli eviricilere göre daha düşük kayıplar oluşturur. Bu durum toplam kayıpların azalmasına ve daha küçük güçteki soğutucuların kullanılmasına olanak sağlar. Daha küçük güçlü soğutucular PV güç sisteminde toplam boyutların azalması ile birlikte maliyetlerin aşağı çekilmesine imkân verir.



Şekil 9. Üç seviyeli diyot kenetlemeli evirici çıkış gerilimi

Üç seviyeli eviriciler, girişlerine uygulanan çoklu doğru gerilim değerlerinden sinüzoidale yakın üç basamak formunda çıkış verebilen evirici türleridir. Bu eviricilerin en önemli avantajlarından biri anahtarlama frekansının geleneksel iki seviyeli köprü eviricilerden daha düşük olması, dolayısıyla anahtarlama kayıplarının daha azdır. Ancak kaynakların ve kullanılan anahtarlama elemanlarının sayısının artması nedeni ile eviriciler elektriksel kökenli arızalara açık hale gelir, eviricinin kontrollüde o oranda zorlaşmaktadır. Üç seviyeli eviricilerde ideal bir anahtarlamanın kriterleri:

- Anahtarın kapatılma anı devreden akan akımın sıfır veya sıfırdan geçtiği an olmalı,
- Anahtar açık olduğu pozisyonda uç geriliminin değeri sıfır veya sıfırdan geçiyor olmalıdır.

Bu kriterler sağlandığında yumuşak bir anahtarlama gerçekleştirilir. Böylece; akım değişimlerinden dolayı eviricideki salanımlar ile sızıntı akımları azaltılır ve kontak potansiyelleri küçük tutulmuş olunur. Sonuç olarak gerilim arkları ve harmonik etkileri azaltılmış olunur. Üç seviyeli eviricilerde seri bağlı MOSFET modüller, MOSFET'in ters tutma geriliminden daha yüksek gerilimlerde kullanılabilmesine imkân vermektedir. Buda MOSFET'lerin yüksek gerilimlerde ve yüksek güç dönüştürücülerinde kullanılabilmelerine olanak sağlar. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviriciler yüksek güçlü kesintisiz güç kaynakları ile yenilenebilir enerji sistemlerinde yoğun bir şekilde kullanılırlar.

Gene bu bağlamda, solar paneller ve benzeri alternatif enerji kaynakları arasında ideal bir ara yüz oluştururlar. Modüler yapıda olduklarından seviye sayısı anahtarlama elemanlarının müsaade ettiği ölçüde artırılabilir. PV sistemde kullanılan üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricide anahtarlama elemanı olarak MOSFET kullanılmıştır. Bu anahtarlama elemanı IGBT'lere göre daha kolay sürülebilir ve ideal sürme karakteristiğine sahiptir. Yüksek anahtarlama hızlarıyla sistem performansını arttırmaktadırlar. Bir peryot boyunca yüzlerce kez iletme girebilen MOSFET'ler, sistemde PWM kontrol tekniğinin uygulanmasına olanak sağlamaktadır [10,11].

Üç seviyeli eviriciler sinüs formunda çıkış gerilimi üretebilmenin yanında istenilen harmoniklere sahip çıkış gerilimi de üretebilmektedirler. Güç sisteminde etkin harmonik bileşene zıt yönde aynı genlikte bir harmonik bileşen üretilerek güç sistemindeki etkin harmonik bileşeni bastırırlar. Bu sayede üç seviyeli evirici aktif filtre uygulamalarında da kullanılmaktadırlar. Ek olarak çok seviyeli eviriciler istenilen genlik, frekans ve faz açısında gerilim üretme yeteneğine sahip olması nedeniyle kompanzasyon uygulamalarında da kullanılmaktadırlar.

Seri bağlamada kullanılan seviye modüllerinde kullanılan her anahtarın üzerindeki  $dv/dt$  gerilim zorlanması değeri azdır. Bu sebeple yüksek gerilimli veya yüksek güçlü uygulamalar için çok seviyeli eviricilerde istenen bir özelliktir. Üç seviyeli diyot kenetlemeli eviriciler son yıllarda özellikle yüksek güçlü enerji sistem uygulamaları için oldukça ilgi çekmektedirler. Üç seviyeli eviricinin en önemli avantajı; anahtarlama frekansını arttırmadan veya evirici çıkış gücünü azaltmadan çıkış dalga şeklindeki harmonik bileşenlerin azaltılabilmesidir. Bu eviriciler, günümüzde birçok endüstriyel enerji uygulamalarında kullanılmaktadırlar.

#### 4. Sonuç ve Öneriler

Çok seviyeli eviriciler üç seviyeli eviriciler ile başlamaktadırlar. Eviricilerde seviye sayısı arttıkça çıkış geriliminin değişimi sinüs eğrisine benzemektedir. Bu bağlamda çıkış geriliminin sinüs eğrisine benzediği oranda çıkış geriliminin THD değeri azalmakta ve bunun sonucunda tüketicilere evirici üzerinden sunulan enerjinin kalitesi artmaktadır.

Gerilimini DC/DC yükselten dönüştürücüden alan çok seviyeli evirici topolojilerinden üç seviyeli diyot kenetlemeli eviricide her bir anahtarlama elemanının giriş geriliminin yarısına maruz kalması, özellikle yüksek giriş gerilimlerinde, iki seviyeli eviricilere göre daha düşük anahtarlama zorlanmasını sağlamaktadır. Bununla beraber topolojinin modüler yapısı sayesinde eviricinin seviyeleri arzu edildiği kadar artırılarak sinüzoidal forma daha yakın çıkış gerilim seviyeleri elde edilir. Çok seviyeli eviricilerde her bir anahtar üzerine düşen gerilim azalacağı için, anahtar zorlanmaları azalır. Eviricide çıkış gerilimi "n" adet farklı seviyede değer alabilir. Bu eviriciler sinüs eğrisine yakın çıkış gerilimi üretebilmeleri, yüksek verim ve düşük anahtar zorlanması gibi özellikleri nedeniyle bu yapılar geleneksel klasik evirici topolojilerden daha iyi performans sunmaktadırlar.

PV tesislerde kullanılan güç elektroniği temelli devre nonlineer elemanların her geçen gün artış göstermesi enerji sisteminde dolaşan nonlineer büyüklüklerin artmasına neden olmaktadır. Buda PV sistemde akım ya da gerilim için THD değerinin artmasına sebep olmaktadır. Elektrik güç

sistemlerinde harmonik distorsiyonu sıklıkla orijinal kaynaklardan büyük uzaklıkta bulunan mesafelerde tüm sistemi etkilemektedir. Şebekeden bağımsız (off-grid) fotovoltaik modüller gün boyunca ürettikleri elektrik enerjisini akümülatörlerde depolar ve yüke gerekli olan enerji akümülatör üzerinden aktarılır. PV sistemde kullanılan eviriciler modüllerin ürettiği doğru akımı alternatif akıma dönüştüren güç elektroniği tabanlı devrelerdir. Eviricilerden temelde istenen çıkış harmoniklerin düşük seviyelerde olması ve istenilen genlik ve frekansta alternatif güç sağlamalarıdır.

Harmonikler PV sistemlerindeki kirliliktir. PV sistemde Statik dönüştürücülerin kullanımının artması ile bu kirlilik oranı gün be gün artmaktadır. THD değerinin standartlarda belirtilen değerlerde tutulması PV sistemin ürettiği enerji kalitesi bakımından oldukça önemlidir. Önerilen şebekeden bağımsız PV sisteminde kullanılan evirici çıkış gerilimi THDV değeri Matlab/Simulink ve analitik yola bulunmuştur. PV sistemlerde çok seviyeli eviriciler kullanmak THDV değerinin düşürülmesini sağlar ve buna bağlı olarak tüketicilere sunulan enerjinin kalitesi artırır.

## Kaynaklar

1. Gonzalez R., Lopez J., Sanchis P., Marroyo L. 2007. Transformerless Inverter for Single-Phase Photovoltaic Systems, IEEE Transaction in Power electronics, 22(2):693-697.
2. Rüstemli S., Dinçer F., Dinçadam F. 2011. Elektrik Enerjisi Üretiminde Güneş Enerjisinin Dünü, Bugünü ve Yarını, Kaynak Elektrik Dergisi, 261:140 – 144.
3. Ciobotaru M., Kerekes T., Teodorescu R., Bouscayrol A. 2006. PV inverter simulation using MATLAB/ Simulink graphical environment and PLECS blockset IEEE Industrial Electronics, IECON 2006 - 32nd Annual Conference on, pp. 5313-5318.
4. Kocatepe C., Uzunoğlu M., Yumurtacı R. 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
5. Rashid H.M. 2014. *Power Electronics, Circuits, Devices, and Applications*, Pearson Press.
6. Colak I., Kabalci E., Bayindir R. 2011. Review of multilevel voltage source inverter topologies and control schemes, Energy Convers Manage, 52(2):1114–1128.
7. Kashif S.A.R., Saqib M.A., Zia S. 2011. Implementing the induction motor drive with four switch inverter An application of neural networks Expert Systems with Applications, An International Journal, 38(9):111-37 11148.
8. Sünter Z., Altun H., Sünter S. 2015. Tek-Darbe Modülasyonlu Bir Fazlı Evirici Sürücü Sisteminde Harmonik Eliminasyonu için Yeni Bir Yaklaşım, Journal of The Faculty of Engineering and Architecture of Gazi University, 30(2):237-247.
9. Bodur H. 2010. *Güç Elektroniği*, Birsen Yayınevi, İstanbul.
10. El Khateb A.H., Abd Rahim N., Selvaraj J., Williams B.W. 2015. DC-to-DC Converter with Low Input Current Ripple for Maximum Photovoltaic Power Extraction, IEEE Transactions on Industrial Electronics, APRIL.
11. Onur N., Hava Ç., Ahmet M. 2012. Çok-seviyeli Eviricilerde Seviye Kaydırmalı PWM Anahtarlama Yöntemleri, ELECO '2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu, 29 Kasım - 01 Aralık , Bursa.