

## İki-Seviyeli SHEPWM İnverter için Genetik Algoritma Kullanılarak Anahtarlama Açılarının Belirlenmesi

Erkan DENİZ

Fırat Üniversitesi, Teknoloji Fakültesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği, Elazığ/Türkiye  
edeniz@firat.edu.tr

(Geliş/Received:12.09.2014; Kabul/Accepted:02.02.2015)

### Özet

Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu (SHE) darbe genişlik modülasyon (PWM) tekniği, lineer olmayan denklem takımlarının çözümlenerek en uygun anahtarlama açılarının belirlenmesi ve gerçek-zamanlı uygulamalarda anahtarlama zamanlarının depolandığı bir bakma-tablosu gerektirir. Bu makalede, üç-faz iki-seviyeli bir inverterin faz-nötr geriliminden düşük dereceli harmonikleri elimine etmek için 11-açılı bir SHEPWM algoritması sunulmuştur. Anahtarlama açılarının fonksiyonu olan lineer olmayan denklem takımı, çeyrek-kare dalga simetriye sahip iki-seviyeli inverter çıkış geriliminin Fourier açılımından elde edilmiştir. En uygun 11-anahtarlama açısını çevrimdışı belirlemek için denklem takımı MATLAB Genetik Algoritma (GA) Araç Kutusu kullanılarak optimize edilmiştir. Bu anahtarlama açıları kullanılarak üç-fazlı inverter MATLAB ortamında anahtarlama yapılmıştır. Bir RL yükü için, çıkış gerilimi ve yük akımının dalga şekilleri harmonik analizleri ile birlikte verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu PWM, Genetik Algoritma (GA), MATLAB GA Araç Kutusu.

## Switching Angles Determination Using Genetic Algorithm for Two-Level SHEPWM Inverter

### Abstract

Selective Harmonic Elimination pulse width modulation (SHEPWM technique) requires the determination of optimum switching angles by solving the nonlinear equation set and a look-up table stored the switching times in a real-time application. In this paper, an 11-angle SHEPWM algorithm is presented to eliminate low-order harmonics from line-to-neutral voltage waveform of three-phase two-level inverter. The nonlinear equations set which are functions of the switching angles obtained from the Fourier transform of the inverter output voltage which has a bipolar waveform with quarter-wave symmetry. The equations set is optimized by using MATLAB Genetic Algorithm (GA) Toolbox to determine offline of optimum 11-switching angles. Three-phase inverter is switched by using these switching angles in MATLAB environment. The waveforms of inverter output voltage and load current are analyzed with FFT for a RL load.

**Keywords:** Selective Harmonic Elimination (SHE), Hybrid Genetic Algorithm, MATLAB GA Toolbox.

### 1. Giriş

Endüstride çok yaygın olarak kullanılan gerilim kaynaklı inverterlerin çıkış dalga şekilleri kare veya sözde kare dalga olup bazı harmonikler içermektedir. İnverterlerde anahtarlama harmoniklerinin ortadan kaldırılması sorunu yıllardır araştırma odağı olmuş ve çözüm olarak birçok PWM tekniği geliştirilmiştir. Eğer inverter için anahtarlama kayıpları önemli değilse, yüksek anahtarlama frekanslı PWM teknikleri kullanılarak istenilen genlikte ve

düşük toplam harmonik bozulmalı (THD) çıkış gerilimi elde edilebilir. Ancak sistem için yüksek anahtarlama verimliliği çok önemli ise o zaman anahtarlama frekansının düşük tutulması gerekmektedir. Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu (SHE), gerilim kaynaklı inverterlerin çıkış gerilim dalga şeklinde ana harmoniği kontrol etmek ve istenmeyen düşük-dereceli harmonikleri elimine etmek için kullanılan bir darbe genişlik modülasyon (PWM) tekniğidir. Dalga şeklinde geriye kalan yüksek-dereceli harmonikler ise yüke veya şebekeye harmonik bozulmanın etkisini azaltmak için

küçük bir pasif filtre kullanılarak elimine edilir [1-3]. SHEPWM; aşırı modülasyonun mümkün olmasından dolayı daha yüksek gerilim elde edebilme, dc-hat geriliminde daha az dalgalanma, anahtarlama frekansının düşük olmasından dolayı daha düşük anahtarlama kaybı ve düşük dereceli harmoniklerin elimine edilmesi gibi avantajlara sahiptir [4].

SHEPWM tekniğinde başlıca problem; lineer olmayan denklem takımının farklı modülasyon indeksleri ( $M_a$ ) için çözülerek optimum  $N$ -tane anahtarlama açısının belirlenmesidir. Bu lineer olmayan denklemler anahtarlama açılarının bir fonksiyonudur ve inverter çıkış geriliminin Fourier dönüşümünden elde edilmektedir[5]. Lineer olmayan denklem takımı çözmek için literatürde; Newton-Raphson (NR), Conjugate Gradient Descent (CGD), Parçacık Sürü Optimizasyonu (PSO) ve Genetik Algoritma (GA) gibi metotlar yaygın bir şekilde kullanılmaktadır. NR ve CGD gibi geleneksel iterasyon metotlarında yakınsama başlangıç değerlerinin doğru seçilmesine bağlıdır. Ancak sabit bir formülü olmadığı için bu seçimin doğru yapılması zor bir iştir [2, 6]. Bir evrimsel algoritma olarak PSO [7]'de önerilmiştir. PSO birden fazla optimuma sahip lineer olmayan denklemlerin çözümünde güvenilir bir yöntemdir [1, 8]. Genetik algoritma ise PSO gibi evrimsel bir algoritmadır. Bu iki metot ile  $M_a$ 'nın bütün değerleri için lineer olmayan denklem takımını çözülerek düşük-dereceli harmonikler elimine edilebilir. GA evrimsel algoritma metotlarının en yaygın olarak kullanılanıdır. Daha uygulanabilir ve onun MATLAB uygulaması kolaydır [9]. GA büyük bir arama alanını örnekler ve umut verici alana doğru aramasını iletir. Ancak bazı durumlarda, GA bir yerel optimumu aramanın ince ayarında güçlü yaşamaktadır. Optimum noktanın olduğu bir tek nokta üzerinde çözümü geliştirmek yerine çoğu zaman farklı noktalar arasında zaman harcar. Bu dezavantajı ortadan kaldırmak için, yerel arama metotlarından biri ve GA birlikte kullanılarak Hibrit bir GA meydana getirilir. Hibrit GA hem daha etkin hem de daha verimli bir algoritmadır [10].

SHEPWM tekniğinde, bir optimizasyon metodu ile farklı  $M_a$ 'lar için en uygun anahtarlama açıları belirlendikten sonra, yapılması gereken şey bir bakma-tablosuna

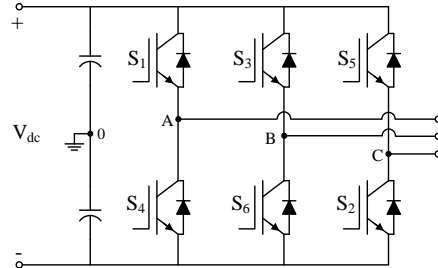
depolanan anahtarlama zamanlarının gerçek zamanlı uygulamalar için bu tablodan okunmasıdır. Ancak anahtarlama açısı arttıkça büyük bakma-tablosu oluşacaktır. Ayrıca her çalışma noktaları için bu tabloda çözümler olmayabilir [11].

Bu makale üç-faz iki-seviyeli inverterin faz-nötr geriliminden on tane düşük dereceli harmoniği (5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., 25., 29. 31.) elimine etmek ve ana harmoniği kontrol etmek amacıyla 11-anahtarlama açısının çevrim dışı belirlenmesini sağlayan bir hibrit Genetik Algoritma (GA) sunulmuştur. Çıkış geriliminin Fourier serisi açılımından elde edilen 11 bilinmeyenli 11 lineer olmayan denklem  $0,05 \leq M_a \leq 1,20$  için MATLAB GA Araç Kutusu kullanılarak optimize edilerek 11-anahtarlama açısı belirlenmiştir. Bu anahtarlama açıları ile kullanan inverterin üç-fazlı bir RL yükünü beslemesi durumunda, farklı  $M_a$  ve çıkış frekansı ( $f$ ) için çıkış gerilimi ve yük akımına ilişkin MATLAB simülasyon sonuçları THD analizleri ile verilmiştir.

Bu makale aşağıdaki şekilde düzenlenmiştir; Bölüm-2'de, SHEPWM inverterin 11-açılı faz-nötr gerilimi çeyrek kare dalga simetrisine göre formülize edilmiştir. Bölüm-3'de 11-anahtarlama açısının fonksiyonu olan lineer olmayan denklem takımı MATLAB GA-Araç Kutusu kullanılarak optimize edilmiştir. Simülasyon sonuçları Bölüm-4'te tartışılmış ve sonuçlar Bölüm-5'te verilmiştir.

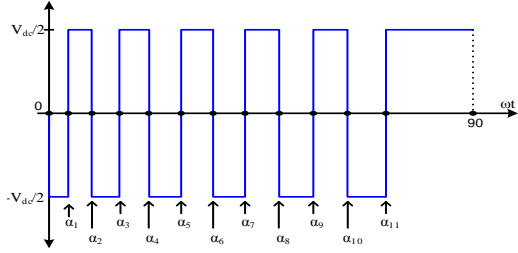
## 2. Seçilen Harmoniklerin Eliminasyonu PWM

Üç-faz iki-seviyeli gerilim kaynaklı inverterin temel devre yapısı Şekil 1'de, çeyrek ve tek dalga simetrisine sahip bipolar faz-nötr çıkış gerilim dalga şekli ise Şekil-2'de gösterilmiştir.



Şekil 1. Üç-faz iki-seviyeli gerilim kaynaklı inverter

SHEPWM, üç-faz faz-nötr (TLN) çıkış gerilim dalga şeklinde önceden belirlenen harmonikleri elimine etmek ve ana harmoniği kontrol etmek için kullanılabilir. Bunun için Şekil 2’de gösterildiği gibi kare-dalga üzerinde önceden belirlenen açılarda ( $\alpha_1, \alpha_2, \alpha_3, \dots, \alpha_N$ ) çentikler oluşturulmalıdır. Ana harmonik ve elimine edilecek harmoniklerin toplamı  $N$  olmak üzere eğer  $N$  tek sayı ise TLN1 tekniği, eğer  $N$  çift sayı ise TLN2 tekniği kullanılır [12,13].



Şekil 2. TLN1 tekniği için inverterin faz-nötr çıkış gerilim dalga şekli

İnverterin çıkış faz-nötr gerilim dalga şeklinin Fourier serisi açılımı ve katsayıları aşağıdaki gibi verilir,

$$v(t) = a_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos n\omega t + b_n \sin n\omega t) \quad (1)$$

$$a_n = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \cos n\omega t \, dt \quad (2)$$

$$b_n = \frac{1}{T} \int_0^T v(t) \sin n\omega t \, dt$$

Faz-nötr geriliminin dalga şekli çeyrek periyot ve tek simetriye sahip olduğundan, Fourier serisi açılımında sadece sinüs bileşenli tek harmonikler ( $b_1, b_3, b_5, \dots, b_n$ ) olacaktır. Dolayısı ile Fourier açılımı aşağıdaki gibi olur.

$$b_n = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} v(t) \sin n\omega t \, dt \quad (3)$$

Bu çalışmada, faz-nötr geriliminin dalga şeklinde ana harmoniğin kontrol edilmesine ilave olarak 10-tane düşük dereceli harmonik (5, 7, 11, 13, 17, 19, 23, 25, 29, 31) elimine edileceği için  $N=11$  olarak alınmıştır.  $N$  tek sayı olduğu için SHEPWM’in TLN1 tekniği kullanılmıştır. Şekil 2’de TLN1 tekniği için faz-nötr geriliminin dalga

şekli gösterilmiştir. Şekil 2’de görüldüğü gibi dalga şeklinde açılar ile 11 tane çentik oluşturulmuştur. Bu dalga şekli Fourier serisi katsayısı  $b_n$  ve anahtarlama açılarına bağlı olarak aşağıdaki şekilde ifade edilebilir,

$$b_n = \frac{4}{n\pi} \left[ -1 - 2 \sum_{k=1}^N (-1)^k \cos n\alpha_k \right] \quad (4)$$

Denklem (4), 11-tane açı için ayrı ayrı genişletilirse lineer olmayan denklem takımı aşağıdaki gibi elde edilmiş olur.

$$\begin{aligned} b_1 &= \frac{4}{\pi} [-1 + 2 \cos 1\alpha_1 + \dots + 2 \cos 1\alpha_{11}] - M_a = 0 \\ b_5 &= \frac{4}{5\pi} [-1 + 2 \cos 5\alpha_1 + \dots + 2 \cos 5\alpha_{11}] = 0 \end{aligned} \quad (5)$$

$$\dots \dots \dots$$

$$b_{31} = \frac{4}{31\pi} [-1 + 2 \cos 31\alpha_1 + \dots + 2 \cos 31\alpha_{11}] = 0$$

Burada, açılar arasındaki ilişki aşağıdaki gibidir;

$$0 < \alpha_1 < \alpha_2 < \dots < \alpha_{10} < \alpha_{11} < (\pi/2) \quad (6)$$

İnverter anahtarlama frekansı ( $f_s$ ); açı sayısı ve ana harmoniğin frekansına bağlı olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir,

$$f_s = (2N + 1)f_1 \quad (7)$$

Gerilim dalga şeklinde düşük-dereceli harmonikler elimine edildikten sonra, en önemli harmonikler ( $3N+2$ ) ve ( $3N+4$ ) frekanslarda meydana ortaya çıkmaktadır [12,14].

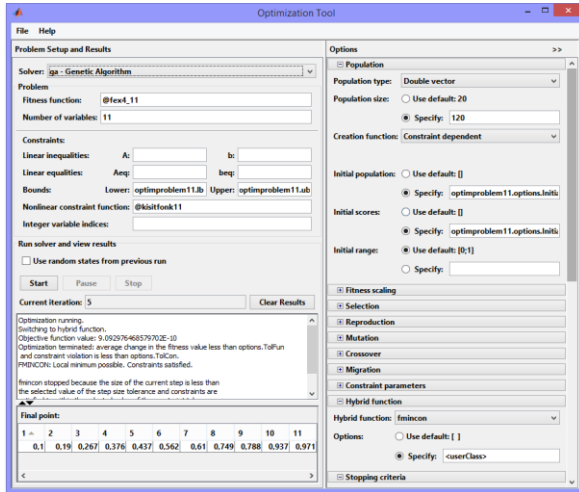
Denklem (5)’de ki lineer olmayan denklem takımı çözülerek 11 anahtarlama açısı belirlenir. Bu amaçla, MATLAB GA Araç Kutusu kullanılarak lineer olmayan denklem takımı  $0,05 \leq M_a \leq 1,20$  için optimize edilmiştir.

### 3. MATLAB Genetik Algoritma Araç Kutusu

Genetik Algoritma doğadaki biyolojik evrimi taklit ederek sınırlamalı veya sınırlamasız optimizasyon problemlerini çözmek için kullanılan bir metottur. Geleneksel yöntemler ile çözümü zor olan problemlerin çözümünde

kullanılmaktadır. Problemin çözümünde ilk adım, problemin büyüklüğüne bağlı olarak başlangıç popülasyonunun belirlenmesidir. GA mevcut popülasyondan rastgele seçilen bireyler ile oluşturulan çiftleri kullanarak gelecek neslin bireylerini oluşturur. Gelecek neslin bireyleri oluşturulurken üç ana kural olan seçim, çaprazlama ve mutasyon kurallarını kullanılır. [15,16]. Başlangıç popülasyonu sürekli evrim geçirerek zayıf bireyler elenir ve problemin çözümü için en iyi özellikleri taşıyan uygun bireyler varlığına devam ettirilir. En son nesildeki en uygun birey olası iyi çözüm olarak alınır. [17].

MATLAB Genetik Algoritma Araç Kutusu (GA-Toolbox), komut satırları yazmadan Genetik Algoritmayı kullanmayı mümkün kılan bir grafik kullanıcı ara yüzüdür. Bu kullanıcı ara yüzün görünüşü Şekil 3’te gösterilmiştir.



Şekil 3. MATLAB GA Araç-Kutusundan bir görünüş

Şekil 3’te görüldüğü gibi bu araç kutusunu kullanmak için aşağıda verilen bazı bilgilerin girilmesi gerekmektedir. Bunlar;

*Fitness function:* Minimize edilmesi gereken amaç fonksiyonudur. Lineer olmayan denklem takımından elde edilir.

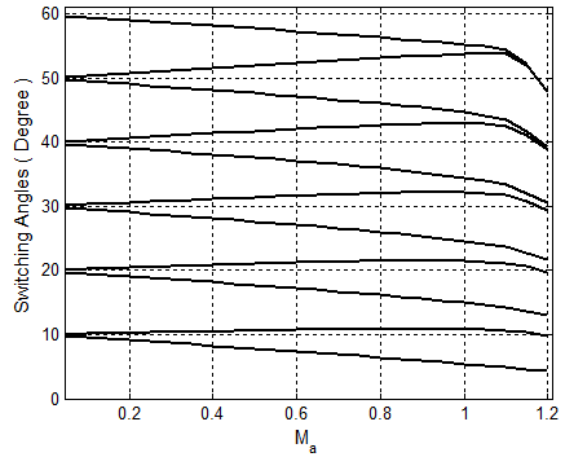
*Nonlinear constraint function:* Amaç fonksiyonu çözdürülürken açılar arasındaki ilişkiyi gösteren fonksiyondur.

*Lower and Upper bounds constraints:* Amaç fonksiyonu çözdürülürken açılarının alacağı en küçük ve en büyük değerlerdir.

Bu bilgilere ilave olarak, Optimizasyon seçeneklerinin de (*Options*) ayarlanması

gerekmektedir. Bu makalede, Popülasyon türü “*Double Vector*” ve Popülasyon boyutu “120” olarak seçilmiştir. Yeni nesil üretimi ve mutasyon fonksiyonları “*Constraint dependent*” olarak yani sınırlama fonksiyonuna bağlı olarak seçilmiştir. Bu makalede optimizasyon sorununu çözmek için hibrit fonksiyon olarak “*fmincon Constrained nonlinear minimization*” kullanılmıştır. GA durduğunda, Hibrit fonksiyon optimizasyona GA tarafından döndürülen son noktadan başlamaktadır.

Amaç fonksiyonunun modülasyon indeksinin  $0,05 \leq M_a \leq 1,20$  değerleri için, GA Araç Kutusu ile yapılan optimizasyonu sonucu elde edilen 11 tane açının modülasyon indeksi ile değişimi Şekil 4’te gösterilmiştir.



Şekil 4. Hesaplanan 11-açının  $M_a$ ’ya göre değişimi

İlave olarak  $M_a$ ’nın bazı değerleri için 11 anahtarlama açısının; optimizasyondan elde edilen sayısal değerlerinin bir kısmı Tablo 1.’de verilmiştir.

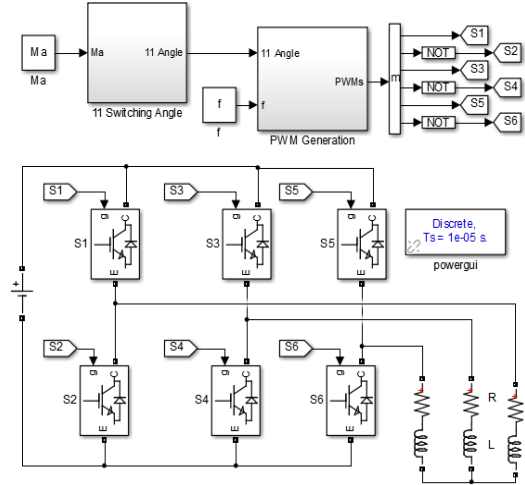
**Tablo 1.** Bazı  $M_a$ 'lar için açılarının sayısal değerleri

	0,10	0,30	0,50	0,70	0,90	1,10	1,20
$\alpha_1$	9,571	8,704	7,819	6,909	5,955	4,889	4,352
$\alpha_2$	10,129	10,381	10,613	10,799	10,882	10,658	10,001
$\alpha_3$	19,560	18,661	17,723	16,727	15,620	14,197	13,125
$\alpha_4$	20,225	20,661	21,061	21,390	21,558	21,186	19,922
$\alpha_5$	29,549	28,621	27,646	26,592	25,377	23,639	21,979
$\alpha_6$	30,301	30,886	31,434	31,909	32,207	31,757	29,716
$\alpha_7$	39,544	38,608	37,625	36,561	35,316	33,340	30,902
$\alpha_8$	40,360	41,067	41,749	42,378	42,867	42,536	39,288
$\alpha_9$	49,549	48,629	47,675	46,657	45,486	43,489	39,829
$\alpha_{10}$	50,404	51,209	52,007	52,791	53,526	53,837	48,386
$\alpha_{11}$	59,566	58,690	57,798	56,879	55,892	54,443	48,534

#### 4. Simülasyon Sonuçları

Anahtarlama açıları bir hibrit GA ile belirlenen 11-açılı SHEPWM algoritması, üç-fazlı bir RL yükünü besleyen iki-seviyeli bir inverter üzerinde *MATLAB/SimpowerSystem* blokları kullanılarak test edilmiştir. Simülasyon modeli Şekil 5'te verilmiştir. Simülasyonun örnekleme zamanı  $10\mu s$  olarak alınmıştır. GA araç kutusu ile optimizasyondan elde edilen açılar kullanılarak, 11-anahtarlama açısı için  $M_a$ 'ya bağlı denklemler uydurulmuştur. Modülasyon indeksinin  $0,05 \leq M_a \leq 1,20$  aralığında girilen herhangi bir değeri için Şekil 5'ten görüldüğü gibi hesaplanan 11-anahtarlama açısı ve çıkış frekansı kullanılarak PWM sinyalleri üretilmiş ve RL yükünü besleyen inverter anahtarlama yapılmıştır. Simülasyonda R ve L değerleri sırasıyla  $10\Omega$  ve  $30mH$  olarak alınmıştır. Ayrıca dc-hat gerilim değeri;  $M_a=0,95$  değeri için inverter 220V faz-nötr gerilimi üretecek şekilde  $655V$  olarak alınmıştır.

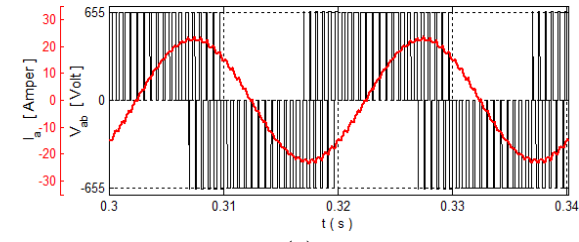
Farklı  $M_a$  ve  $f$  için inverterin çıkış faz-faz gerilimi ve RL yük akımı harmonik analizleri ile birlikte Şekil 6-8'de verilmiştir.  $M_a=0,95$  ve  $f=50Hz$  için simülasyon sonuçları Şekil 6'da verilmiştir. 11-açılı SHEPWM için  $50Hz$ 'deki anahtarlama frekansı  $f_s=1150Hz$  tir. Şekil 6(b) ve Şekil 6(c)'deki harmonik spektrumlarından görüldüğü gibi seçilen düşük dereceli harmonikler (5., 7., 11., 13., 17., 19., 23., 25., 29., 31.), gerilim ve dolayısı ile akım dalga şekillerinden elimine edilmiştir. Bununla birlikte üçüncü katı harmonikler ise üç fazlı dengeli sistemden dolayı elimine olmuştur.

**Şekil 5.** MATLAB Simülasyon Modeli

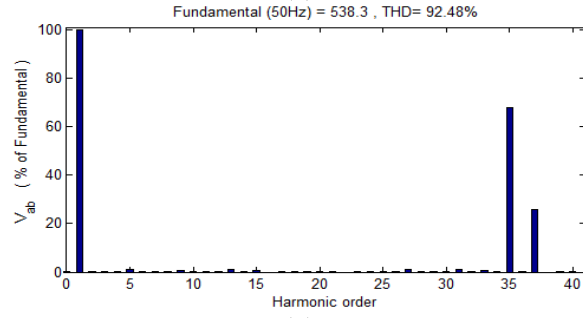
Gerilim ve akımın THD'si sırasıyla %92,48 ve %3,16 olarak hesaplanmıştır. Düşük dereceli ilk on harmonik elimine olduktan sonra beklenildiği üzere gerilim dalga şeklinde en önemli 35. ve 37. harmonikler Şekil 6(d) ve Şekil 6(e)'de görüldüğü gibi oluşmuştur.

11-açılı SHEPWM anahtarlama inverterin aşırı modülasyon bölgesindeki ( $M_a=1,15$ ) performansını gösteren simülasyon sonuçları Şekil 7'de verilmiştir. 11-açılı SHEPWM için  $50Hz$ 'deki anahtarlama frekansı  $f_s=1150Hz$  tir. Şekilden görüldüğü gibi faz-faz geriliminin ana harmoniği  $632,8V$  olarak ölçülmüştür. Şekil 7'den görüldüğü gibi düşük dereceli ilk on harmonik elimine edildikten sonra en önemli harmonikler beklenildiği üzere  $1750Hz$  ve  $1850Hz$ 'te oluşmuştur. İverter aşırı modülasyon bölgesinde çalıştırıldığı halde gerilim ve akımın THD'si sırasıyla %65,10 ve %2,14 olarak hesaplanmıştır. Bu sonuçların bir önceki sonuçlara göre daha düşük olduğu açıktır.

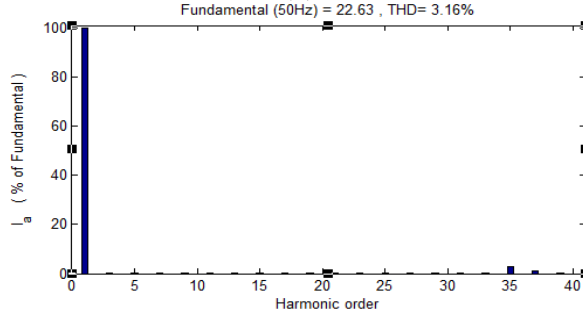
Düşük çıkış frekansı ve gerilimin üretildiği bir durum ( $M_a=0,25$ ,  $f=10Hz$ ) için inverter performansını gösteren benzetim sonuçları ise Şekil 8'de verilmiştir. 11-açılı SHEPWM için  $10Hz$ 'deki anahtarlama frekansı  $f_s=230Hz$  tir. Gerilim ve akımın THD'si sırasıyla %233,72 ve %22,70 olarak hesaplanmıştır. Şekil 8(d) ve Şekil 8(e)'de görüldüğü gibi düşük dereceli harmonikler elimine olduktan sonra gerilim dalga şeklinde en önemli 35. ve 37. harmonikler oluşmuştur.



(a)



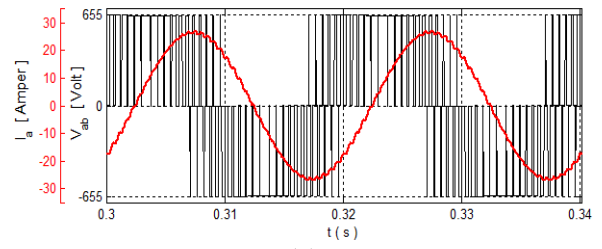
(b)



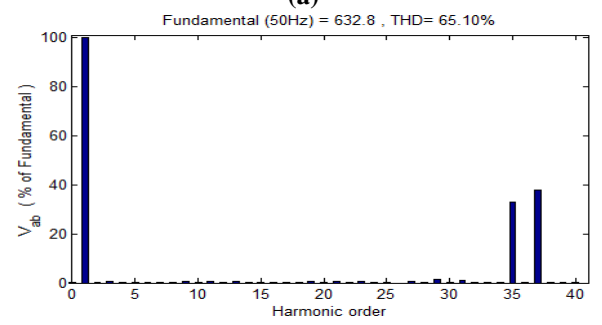
(c)

Harmonic order	Frequency (Hz)	Amplitude (% of Fundamental)	Phase (°)
0	0 Hz (DC)	0.00%	270.0°
1	50 Hz (Fnd)	100.00%	29.6°
3	150 Hz (h3)	0.32%	166.9°
5	250 Hz (h5)	1.03%	219.3°
7	350 Hz (h7)	0.05%	89.9°
9	450 Hz (h9)	0.57%	-16.4°
11	550 Hz (h11)	0.37%	235.2°
13	650 Hz (h13)	0.88%	-18.8°
15	750 Hz (h15)	0.71%	3.0°
17	850 Hz (h17)	0.12%	-50.3°
19	950 Hz (h19)	0.10%	247.3°
21	1050 Hz (h21)	0.24%	114.8°
23	1150 Hz (h23)	0.28%	-79.2°
25	1250 Hz (h25)	0.28%	132.8°
27	1350 Hz (h27)	0.92%	-35.2°
29	1450 Hz (h29)	0.13%	89.4°
31	1550 Hz (h31)	0.75%	161.5°
33	1650 Hz (h33)	0.57%	209.5°
35	1750 Hz (h35)	67.65%	137.5°
37	1850 Hz (h37)	25.76%	197.0°
39	1950 Hz (h39)	0.39%	-83.8°
40	2000 Hz (h40)	0.00%	202.9°

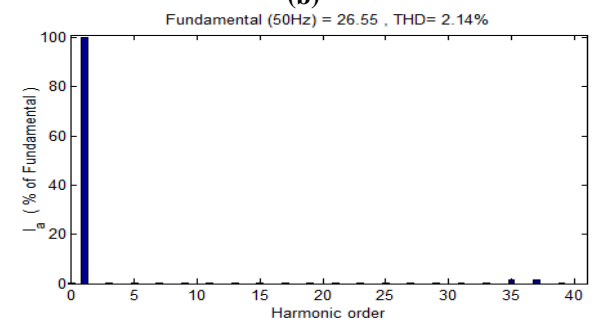
(d)



(a)



(b)



(c)

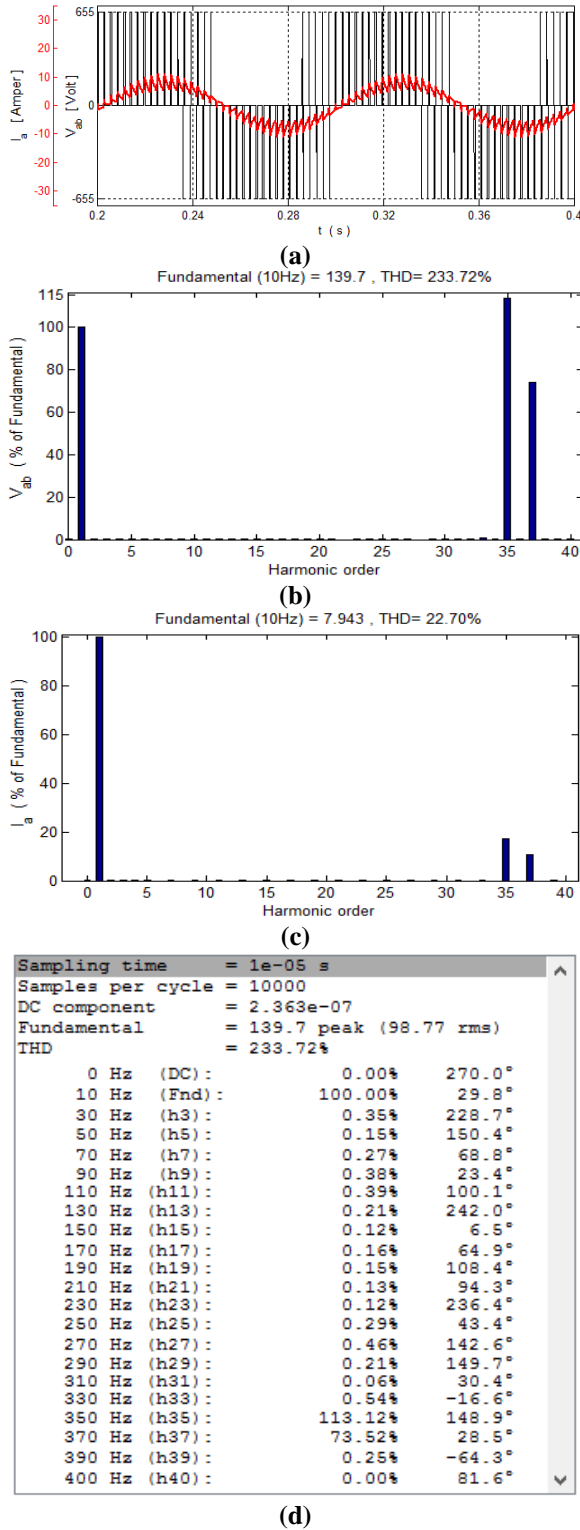
Harmonic order	Frequency (Hz)	Amplitude (% of Fundamental)	Phase (°)
0	0 Hz (DC)	0.00%	270.0°
1	50 Hz (Fnd)	100.00%	29.8°
3	150 Hz (h3)	0.56%	152.1°
5	250 Hz (h5)	0.31%	-68.3°
7	350 Hz (h7)	0.35%	119.7°
9	450 Hz (h9)	0.50%	223.4°
11	550 Hz (h11)	0.47%	171.7°
13	650 Hz (h13)	0.45%	-22.2°
15	750 Hz (h15)	0.15%	-16.5°
17	850 Hz (h17)	0.32%	196.6°
19	950 Hz (h19)	0.42%	20.3°
21	1050 Hz (h21)	0.50%	189.0°
23	1150 Hz (h23)	0.53%	172.2°
25	1250 Hz (h25)	0.37%	69.8°
27	1350 Hz (h27)	0.73%	217.1°
29	1450 Hz (h29)	0.63%	162.6°
31	1550 Hz (h31)	0.90%	-29.7°
33	1650 Hz (h33)	0.09%	37.7°
35	1750 Hz (h35)	32.90%	137.8°
37	1850 Hz (h37)	37.82%	196.9°
39	1950 Hz (h39)	0.37%	18.5°
40	2000 Hz (h40)	0.00%	23.9°

(d)

Şekil 6.  $M_a=0.95$  ve  $f=50\text{Hz}$  için; (a) çıkış hat gerilimi ve yük akımı, (b) gerilimin harmonik spektrumu, (c) akımın harmonik spektrumu, (d) çıkış geriliminin FFT analizi.

Şekil 7.  $M_a=1.15$  ve  $f=50\text{Hz}$  için; (a) çıkış hat gerilimi ve yük akımı, (b) gerilimin harmonik spektrumu, (c) akımın harmonik spektrumu, (d) çıkış geriliminin FFT analizi.





Şekil 8.  $M_a=0.25$  ve  $f=10\text{Hz}$  için; (a) çıkış hat gerilimi ve yük akımı, (b) gerilimin harmonik spektrumu, (c) akımın harmonik spektrumu, (d) çıkış geriliminin FFT analizi.

#### 4. Sonuç

Bu makalede, üç-fazlı iki-seviyeli gerilim kaynaklı bir inverterin çıkış faz-nötr gerilim dalga şeklinde ana harmoniğin kontrolüne ilave olarak düşük-dereceli on tane harmoniğinde elimine edilmesi sağlayacak bir SHEPWM algoritması oluşturulmuştur. Bunun için ilk olarak Fourier Serisi açılımı kullanılarak, çeyrek ve tek dalga simetrisine sahip iki-seviyeli ve 11-açılı bir faz-nötr çıkış gerilim dalga şekli için lineer olmayan denklem takımı oluşturulmuştur. Daha sonra MATLAB Genetik Algoritma araç-kutusu kullanılarak,  $0,05 \leq M_a \leq 1,20$  değerleri için bu denklem takımı optimize edilerek 11-anahtarlama açısı belirlenmiştir. Bu anahtarlama açıları kullanılarak anahtarlanan inverterin farklı  $M_a$  ve  $f$  'ler için çıkış hat gerilimi ve RL yük akımına ilişkin benzetim sonuçları verilmiştir. Çıkış hat gerilimine ilişkin simülasyon sonuçlarında 5. , 7. , 11. , 13. , 17. , 19. , 23. , 25. , 29. , 31. harmonikler elimine edilmiştir. İlave olarak üç-fazlı dengeli sistemden dolayı üçün katı harmoniklerde oluşmamıştır. Ana harmoniğe en yakın büyük harmonik olarak 35. ve 37. harmonikler oluşmuştur. Bu iki harmoniğin daha küçük bir pasif filtre ile elimine edilebilecektir. Bu durum akıma ait harmonik spektrumlarında açıkça görülmektedir. Şekil 6(c), 7(c) ve 8(c) görüldüğü gibi 35. ve 37. harmonikler indüktanstan dolayı daha küçük genlikte oluşmuştur.

#### 5. Kaynaklar

1. M. Azab, 2011, Harmonic Elimination in Three-Phase Voltage Source Inverters by Particle Swarm Optimization, Journal of Electrical Engineering & Technology, vol.6/3, pp. 334–341.
2. N. Tutkun, 2010, Improved Power Quality in a Single-Phase PWM Inverter Voltage With Bipolar Notches Through The Hybrid Genetic Algorithms, Expert Systems with Applications, vol. 37/8, pp. 5614–5620.
3. A. Hiendro, 2011, Multiple Switching Patterns for SHEPWM Inverters Using Differential Evolution Algorithms, International Journal of Power Electronics and Drive System, vol. 1/2, pp. 94–103.
4. P. S. Enjeti, P. D. Ziogas, J. M. Lindsay, 1990, Programmed PWM Techniques To Eliminate Harmonics: A Critical Evaluation, IEEE

- Transactions on Industrial Electronics, vol. 26/2, pp. 302–316.
5. C.D. Sridhar, M.J. Pasha, D. Himani, 2013, Simulation of Harmonics Elimination Using Modulation Index, International Journal of Advanced Research in Electrical, Electronics and Instrumentation Engineering, vol.2/7, pp. 3392-3399.
  6. W. Zhang, Q. Zhang, W. Chen, L. Zhang, 2011, Analyzing of Voltage-Source Selective Harmonic Elimination Inverter, International Conference on Mechatronics and Automation , vol.1/1, pp. 1888-1892.
  7. J.Kennedy, R. Eberhart, 1995, Particle Swarm Optimization, ICNN'95 IEEE International Conference on Neural Networks, vol.4/1, pp.1942-1948.
  8. M. Azab, 2010, Particle Swarm Optimization-Based Solutions for Selective Harmonic Elimination in Single-Phase PWM Inverters, International Journal of Power Electronics, vol. 2/2, pp. 125-142.
  9. A. Kavousi, B. Vahidi, R. Salehi, 2012, Application of The Bee Algorithm For Selective Harmonic Elimination Strategy in Multilevel Inverters, IEEE Transaction on Power Electronics, vol. 27/4, pp. 1689-1696, April.
  10. M. S. A. Dahidah, V. G. Agelidis, M. V. Rao, 2008, Hybrid Genetic Algorithm Approach for Selective Harmonic Control, Energy Conversion and Management, vol. 49/2, pp. 131-142, February.
  11. F. Filho, H. Z. Maia, H.A. Mateus, B. Ozpineci, L. M. Tolbert, J. O. P. Pinto, 2013, Adaptive Selective Harmonic Minimization Based on ANNs for Cascade Multilevel Inverters with Varying DC Sources, IEEE Transactions on Industrial Electronics, vol. 60/5 , pp. 1955-1962.
  12. C.B. P. Enjeti, P. D. Ziogas, and J. F. Lindsay, 1990, Programmed PWM Techniques to Eliminate Harmonics: A Critical Evaluation, IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 26/2, pp. 302-316.
  13. A. Cetin, M. Ermis, 2009, VSC-based D-STATCOM with Selective Harmonic Elimination, IEEE Transactions on Industrial Applications, vol. 45/3, pp. 1000-1015.
  14. A. Cetin, M. Ermis, 2007, VSC based D-STATCOM with Selective Harmonic Elimination, IEEE 42nd Industry Applications Conference (IAS'07), vol. 1, pp. 936-948.
  15. B. Ozpineci, L. M. Tolbert, J. N. Chiasson, 2005, Harmonic Optimization of Multilevel Converters Using Genetic Algorithm, IEEE Power Electronics Letters, vol. 3/3, pp. 92-95.
  16. J. Baskaran, S. Thamizharasan, R. Rajtilak, 2012, GA Based Optimization and Critical Evaluation, International Journal of Soft Computing and Engineering, vol. 2/3, pp. 321-326.
  17. Y. Türkkkan, 2009, Bir Fazlı Eviricilerde Selektif Harmonik Eliminasyonunun Genetik Algoritmalar Yöntemi ile Gerçekleştirilmesi, Zonguldak Karaelmas Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, sayfa 214.