

# ÇOK SEVİYELİ EVİRİCİLERDE TAŞIYICI DALGA ŞEKLİ DEĞİŞİMLERİNİN ÇIKIŞ GERİLİMİ ÜZERİNE ETKİLERİNİN İNCELENMESİ

**Servet TUNCER**

Elektronik ve Bilgisayar Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Fırat Üniversitesi, 23119 Elazığ  
[stuncer@firat.edu.tr](mailto:stuncer@firat.edu.tr)

(Geliş/Received: 25.11.2008 ; Kabul/Accepted: 15.09.2009)

## ÖZET

Bu makalede, Çok Seviyeli Eviricilerde (ÇSE) taşıyıcı dalga şekli değişimlerinin evirici çıkış gerilimi üzerine etkileri incelenmiştir. Bu amaçla, farklı genlik ve farklı frekans değerlerine göre taşıyıcı dalgalar oluşturulmuş ve referans sinüzoidal işaretler ile karşılaştırılarak eviricinin güç anahtarlarını denetleyen Darbe Genişlik Modülasyonlu (DGM) sinyaller elde edilmiştir. Bunun için, bir 5-seviyeli eviricinin prototipi gerçekleştirilmiş olup eviricinin denetimi için gerçek-zamanlı sinyaller dSPACE firmasının DS1103 denetleyici kartı ve yazılımları kullanılarak üretilmiştir. Önerilen çok seviyeli Sinüzoidal DGM (SDGM) stratejisi deneysel çalışmalar ile test edilmiş ve deney düzeneği üzerinden alınan sonuçlar verilmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Çok seviyeli evirici, sinüzoidal DGM tekniği, DS1103 denetleyici kartı.

## THE EXAMINATION OF THE EFFECT OF CARRIER WAVEFORM VARIATIONS ON OUTPUT VOLTAGE OF MULTILEVEL INVERTERS

### ABSTRACT

In this paper, the effect of carrier waveform variations on inverter output voltage in multilevel inverters is examined. For this aim, carrier waveforms with various frequency and amplitude are constructed and compared with the reference sinusoidal signals. The obtained PWM waveforms are then applied to the power switches of the inverter. A five-level inverter prototype implemented and the real-time signals are produced using dSPACE DS1103 controller board and software's. The proposed multilevel sinusoidal PWM (SPWM) strategy is tested experimentally and the results obtained are presented.

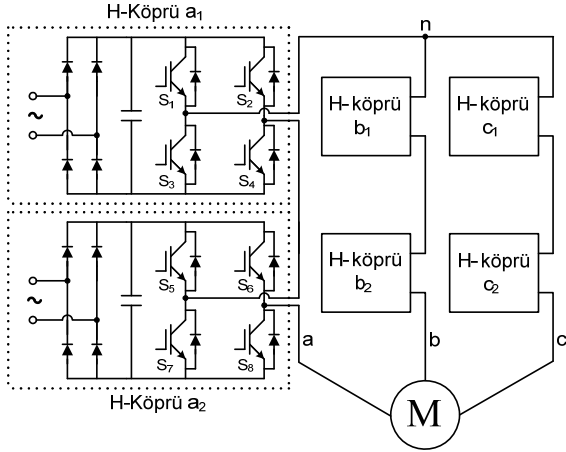
**Keywords:** Multilevel inverter, sinusoidal PWM technique, DS1103 controller board.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Son yıllarda yarı iletken anahtarlama teknolojisinde meydana gelen ilerlemeler ve bunun paralelinde farklı Darbe Genişlik Modülasyon (DGM) tekniklerinin geliştirilmesi ile yeni statik güç dönüştürücüler ortaya çıkmış ve birçok alanda kullanılmaya başlanmıştır. Çok Seviyeli Evirici (ÇSE)'ler de bunlardan biridir. Bu eviriciler girişlerine uygulanan farklı dc gerilim seviyelerini birleştirerek sinüzoidal forma yakın çıkış gerilimi oluşturmaktadırlar [1,2]. Devre yapıları nedeniyle ÇSE'ler orta ve yüksek güçlü uygulamalar için yeni bir güç dönüşüm sistemidir. Bu uygulamalarda klasik iki-seviyeli eviriciler; büyük güçlü transformatörlerin kullanılması nedeni ile yüksek fiyat,  $dV/dt$

ve  $dI/dt$ 'nin bir sonucu olarak anahtarlama elemanları üzerinde büyük akım-gerilim değerleri ve düşük verim gibi dezavantajlara sahiptirler. ÇSE'ler klasik iki-seviyeli eviricilere göre; çıkış geriliminin harmonik spektrumu, verim ve güç faktörü açısından daha iyi bir performansa sahiptirler [2,3].

Tek-fazlı köprü eviricilerin (H-köprü) seri bağlanmasından oluşan kaskad ÇSE topolojisi, diyot-kenetlemeli ve kondansatör-kenetlemeli evirici yapılarına göre daha basit yapıdadır ve daha az sayıda eleman gerektirmektedir [3]. Bu eviricilerde çıkış geriliminin seviye sayısını arttırmak için eklenen H-köprü'lerin her biri bağımsız dc kaynaklardan beslenmektedir. Şekil 1'de H-köprülerin seri bağlanmasıyla elde edil-



**Şekil 1.** 5-seviyeli kaskad evirici devresi (5-level cascade inverter circuit)

miş 5-seviyeli üç-fazlı bir kaskad ÇSE'nin güç devresi verilmiştir.

Bir ÇSE'nin performansı çıkış geriliminin harmonik bileşenleri ile ilişkilidir. ÇSE'lerde seviye sayısı arttıkça çıkış gerilimi sinüzoidal forma daha çok yaklaşacağı, dolayısıyla Toplam Harmonik Bozulmanın (THB) azalacağı ve performansın artacağı açıktır [3]. ÇSE'lerde çıkış gerilimindeki harmonikleri azaltmak için gerilim seviye sayısını artırmanın yanı sıra farklı DGM teknikleri de kullanılmakta olup bu konudaki araştırma ve uygulama çalışmaları devam etmektedir [5-14].

Sinüzoidal DGM (SDGM) tekniği kare dalga içerisindeki harmonikleri yok eden en eski tekniklerden biridir. Çok seviyeli SDGM tekniğinde referans sinüzoidal işaretler ile üst üste yerleştirilmiş aynı fazda veya faz farkına sahip üçgen taşıyıcı dalga işaretlerin her anahtarlama periyodunda karşılaştırılması ile gerekli denetim sinyalleri üretilmektedir [1,4,5]. Taşıyıcı dalgaların genlik ve anahtarlama frekans değerleri eviricinin güç kayıplarına doğrudan etki etmektedir [8,15]. Çok seviyeli SDGM tekniğinin uygulanışına yönelik bugüne kadar yapılan çalışmalarda, aynı genlik ve aynı frekansa sahip taşıyıcı dalgalar kullanılarak farklı modülasyon indekslerine göre analizler gerçekleştirilmiştir [4-7].

Son yıllarda, yüksek hızlı ve Matlab/Simulink ile uyumlu denetleyici kartlarının geliştirilmesi ile artık taşıyıcı dalga işaretlerinde de bir takım değişiklikler yapılabilmektedir. Bu çalışmada, çok seviyeli SDGM tekniğinde referans sinüzoidal işaretin yanı sıra taşıyıcı işaret kümesinde yapılan değişiklikler ile evirici çıkış geriliminin denetiminin gerçekleştirilebileceği anlatılmaktadır. Bunun için, bir 5-seviyeli kaskad ÇSE devresindeki güç anahtarlarını kontrol etmek için kullanılan SDGM tekniğinde modülasyon indeksi sabit tutularak, taşıyıcı dalgaların frekans ve genlik değerleri belli oranlarda değiştirilerek etkileri incelenmektedir. Burada; eviricinin çıkış gerilimi temel bileşeninin denetiminin yanı sıra, bu şekildeki

bir değişikliğin en önemli düşük dereceli harmonikler ile birlikte taşıyıcı frekans harmonikleri üzerine etkisi araştırılmaktadır. Yapılan analizlerden, kullanılan taşıyıcı işaret kümesine göre eviricinin çıkış geriliminin şekillendiği ve önerilen çok seviyeli SDGM tekniğinin kullanışlı olduğu görülmüştür. Makalenin organizasyonu şu şekildedir: ikinci bölüm çok seviyeli SDGM tekniğini kısaca tanıtmaktadır, üçüncü bölümünde taşıyıcı dalgaların frekans değişimlerine göre çıkış gerilim harmoniklerine etkisi araştırılmıştır. Dördüncü bölümde ise taşıyıcı dalgaların genlik değerleri değiştirilerek etkileri incelenmiştir. Makalenin deneysel sonuçları beşinci bölümde ve sonuçlar ise altıncı bölümde yer almaktadır.

## 2. ÇOK SEVİYELİ SDGM TEKNİĞİ (MULTILEVEL SPWM TECHNIQUE)

ÇSE'ler için SDGM tekniğinde referans işaretler aynı kalmak şartıyla taşıyıcı işaretlerin sayısı eviricinin seviyesine bağlı olarak artırılmaktadır. Eviricinin seviye sayısı  $m$  olarak alınırsa, genliği ve frekansı birbiri ile aynı  $m-1$  tane taşıyıcı işaret gerekir [5,15]. Çok seviyeli SDGM tekniğinde, taşıyıcı dalgaların farklı şekilde dağılımlarına söz konusudur. Klasik çok seviyeli SDGM tekniğinde, taşıyıcılar aynı genlikte ve aynı frekansa sahiptirler ve sıfır referansın üstünde ve altında farklı şekillerde dağılımı söz konusudur [5]. Şekil 2'de sıfır referans değerinin üstündeki taşıyıcı işaretlerin aynı fazda ve referans değerinin altındaki taşıyıcı işaretlerin ters fazdaki dağılımlarına göre bir 5-seviyeli evirici için SDGM tekniğinin uygulanışı görülmektedir.

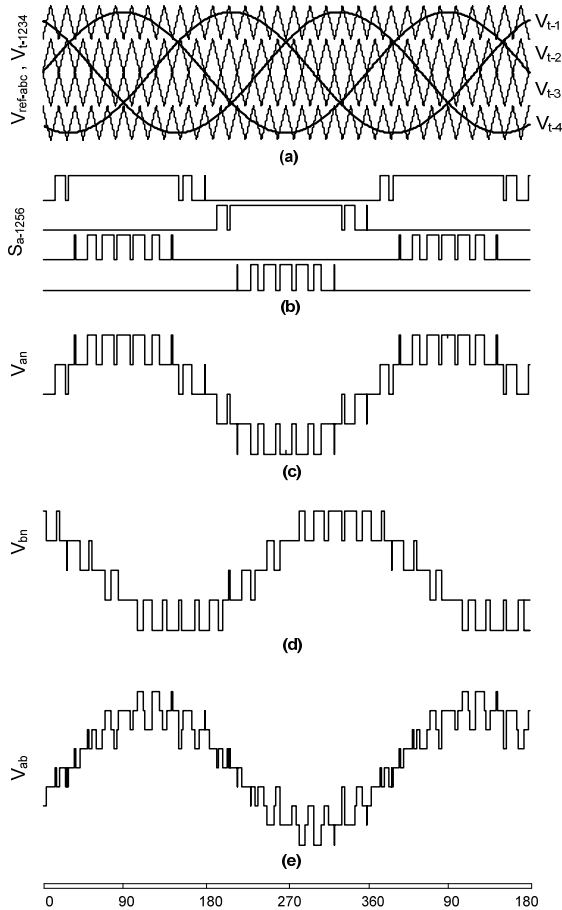
ÇSE'lerde modülasyon indeksi ( $M$ ) ve frekans indeksi ( $M_f$ ) sırasıyla şu şekilde tanımlanmaktadır [16]:

$$M = \frac{A_m}{A_s(m-1)/2} \quad (1)$$

$$M_f = \frac{f_s}{f_m} \quad (2)$$

Burada;  $A_m$  ve  $f_m$  referans işaretin genliği ve frekansını,  $A_s$  ve  $f_s$  ise taşıyıcı işaretin genliği ve frekansını belirtmektedir.

Şekil 2'de  $M < 0.5$  seçilmesi durumunda çıkış gerilimi 3-seviyeli olmaktadır ve sadece içteki taşıyıcı dalgalar ( $V_{t,2}$  ve  $V_{t,3}$ ) kullanılarak anahtarlama sinyalleri üretilmektedir. Burada çıkış gerilimi sadece  $H_2$  köprüsünden sağlanmaktadır.  $M > 0.5$  seçilmesi durumunda ise eviricinin çıkış gerilimi 5-seviyeli olmaktadır ve anahtarlama sinyallerinin üretiminde tüm taşıyıcı dalgalar ile ilgili referans sinüs dalgalar karşılaştırılmaktadır.  $M > 0.5$  için  $H_2$  köprüsünün çıkış gerilimi kare dalga formundadır ve daha az sayıda anahtarlama gerçekleştirilmektedir. Bu durumda  $H_2$  köprüsündeki güç



**Şekil 2.** 5-seviyeli SDGM tekniğinin uygulaması ( $M=0.85$ ,  $M_f=20$ ). (a)Referans ve taşıyıcı işaretler, (b) Eviricinin a-fazı güç anahtarları için üretilmiş DGM sinyalleri, (c)Van faz gerilimi, (d)Vbn faz gerilimi, (e)Vab faz-faz gerilimi (Application of 5-level SPWM technique. ( $M=0.85$ ,  $M_f=20$ )). (a)Reference and carrier signals, (b) The produced PWM signals for phase-a power switches of the inverter, (c)Van phase voltage, (d)Vbn phase voltage, (e) Vab phase to phase voltage)

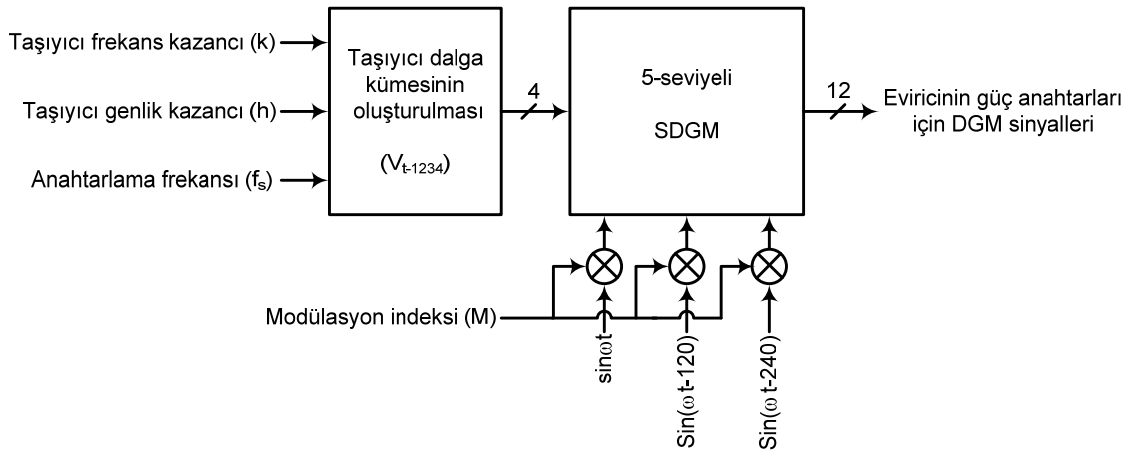
anahtarları için DGM'li sinyal üretilmesinde anahtarlama kayıplarını azaltmak için taşıyıcı dalgaların anahtarlama frekansı  $H_1$  köprüsüne göre daha düşük seçilebilir. Bu şekildeki yaklaşımlar eviricinin H-

köprülerden biri yüksek akım-gerilim değerine ve düşük anahtarlama frekansına sahip olan güç anahtarları (IGCT gibi) ve diğeri de orta güçlerde kullanılan nispeten küçük akım-gerilim değerleri ve yüksek anahtarlama frekanslı güç anahtarları (IGBT ve MOSFET gibi) ile oluşturulmuş hibrid devre yapılarına oldukça uygun olacaktır.

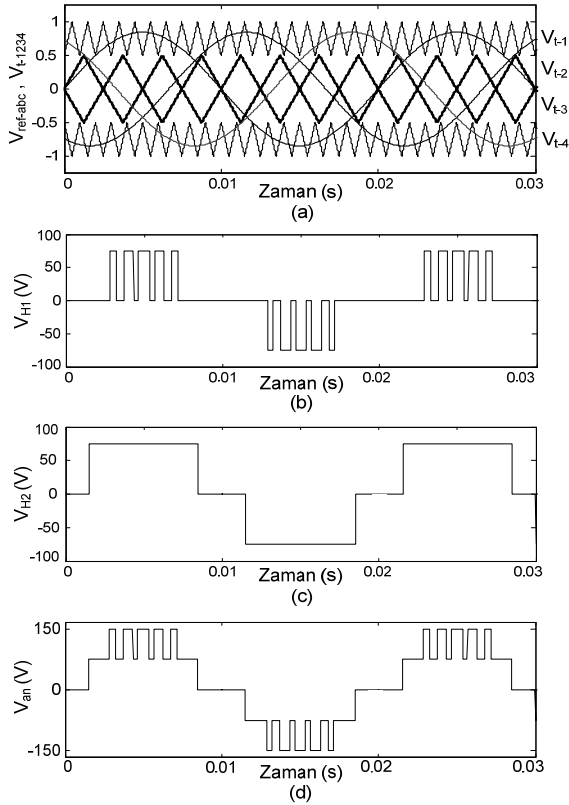
Taşıyıcı dalgalarının farklı frekanslarda dağılımlarının yanı sıra genlik değerlerinde de bir takım düzenlemeler çıkış gerilimi üzerinde olumlu ve olumsuz etkilerinin olacağı açıktır. Bununla ilgili detaylı analizler bölüm 4'de sonuçları ile birlikte tartışılacaktır. Şekil 3'de taşıyıcı dalga kümesinin genlik ve frekans ayarı için genel bir blok gösterim verilmiştir. Burada  $h$  ile belirtilen bir taşıyıcı dalganın genlik kazancı olup, değeri  $[0,1]$  aralığındadır. Taşıyıcı dalganın frekans kazanç sabiti ise  $k$  ile belirtilmiş olup, bu çalışmada  $[5,30]$  aralığı seçilmiştir (50Hz'lik temel frekansın katları şeklinde seçilmiştir ve frekans aralığı 250Hz-1500Hz'dir).

### 3. TAŞIYICI DALGALARIN FREKANS DEĞİŞİMLERİNİN ÇIKIŞ GERİLİMİNE ETKİSİ (THE EFFECT OF CARRIER WAVEFORM FREQUENCY VARIATIONS ON OUTPUT VOLTAGE)

ÇSE'lerde seviye sayısı 5 ve üstü olması durumunda taşıyıcı dalgalar için farklı anahtarlama frekanslarına göre dağılımlar oluşturabilmektedir. Bir başka deyişle, her bir H-köprü için anahtarlama frekansının seçimi diğer köprüler ile aynı veya farklı değerlerde olabilmektedir. Şekil 4 ve Şekil 5'te farklı anahtarlama frekanslarına göre oluşturulmuş taşıyıcı dalgaları kullanan çok seviyeli SDGM stratejisinin uygulaması görülmektedir. Şekil 4'de  $H_1$  köprüsü için 1kHz ve  $H_2$  köprüsü için ise 400Hz anahtarlama frekanslarına sahip taşıyıcı işaretler referans sinüs işaretler ile karşılaştırılmıştır. Şekil 5'de ise  $H_1$  köprüsü için 400Hz ve  $H_2$  köprüsü için ise 1kHz anahtarlama frekansları seçilmesi durumu için dalga şekilleri görülmektedir.



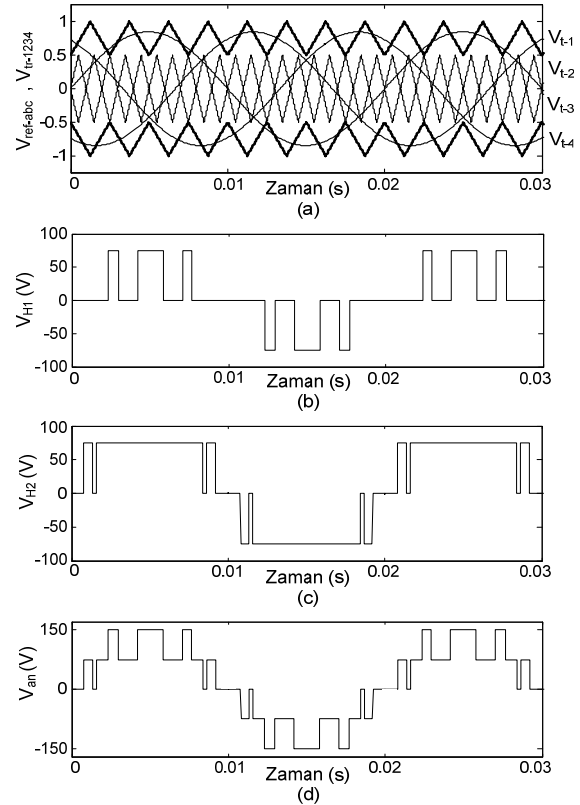
**Şekil 3.** Genlik ve frekans değişimli çok seviyeli SDGM tekniğinin blok gösterimi (The block representation of the multilevel SPWM technique with amplitude and frequency variation)



**Şekil 4.**  $M=0.85$ ,  $f_{s-H1}=1\text{kHz}$ ,  $f_{s-H2}=400\text{Hz}$  seçilmesi durumunda SDGM tekniğinin uygulanışı. (a) Referans ve taşıyıcı işaretler, (b)  $H_1$  köprüsünün çıkış gerilimi, (c)  $H_2$  köprüsünün çıkış gerilimi, (d) a-fazı çıkış gerilimi (Application of SPWM technique for  $M=0.85$ ,  $f_{s-H1}=1\text{kHz}$ ,  $f_{s-H2}=400\text{Hz}$ . (a)Reference and carrier signals, (b) The output voltage of  $H_1$ bridge, (c) The output voltage of  $H_2$  bridge, (d)Phase-a output voltage)

Bu çalışmada, taşıyıcı işaretlerin frekans değişimlerinin eviricinin çıkış gerilim harmonikleri üzerine etkilerini incelemek için H köprülerin anahtarlama frekansları 250Hz-1500Hz aralığında değiştirilmiştir. Burada temel bileşen ile birlikte 3., 5. ve 7. gibi en önemli düşük dereceden harmonikler ve taşıyıcı frekans harmoniklerinin değişimleri incelenmiştir (Şekil 6-7). Şekil 6'da  $M=0.85$  için ve taşıyıcı işaretlerin frekansları belirtilen aralıklarda seçilmesi karşılık; temel bileşen, düşük dereceli harmonikler bileşenler üzerine etkilerini gösteren dalga şekilleri verilmiştir. Şekil 7'de ise  $M=0.4$  için harmonik dağılımları görülmektedir. Aynı genlikli taşıyıcı dalgalar ( $h=0.5$ ) ve  $M<0.5$  olması durumunda  $f_{s-H1}$ 'deki değişimler çıkış gerilimine etki etmemektedir. Bu durumda çıkış dalga şekli sadece  $f_{s-H2}$ 'deki değişimlere göre şekillenir ve sadece  $f_{s-H2}$ 'deki değişimlere göre eviricinin gerilim harmoniklerini incelemek yeterli olmaktadır (Şekil 7).

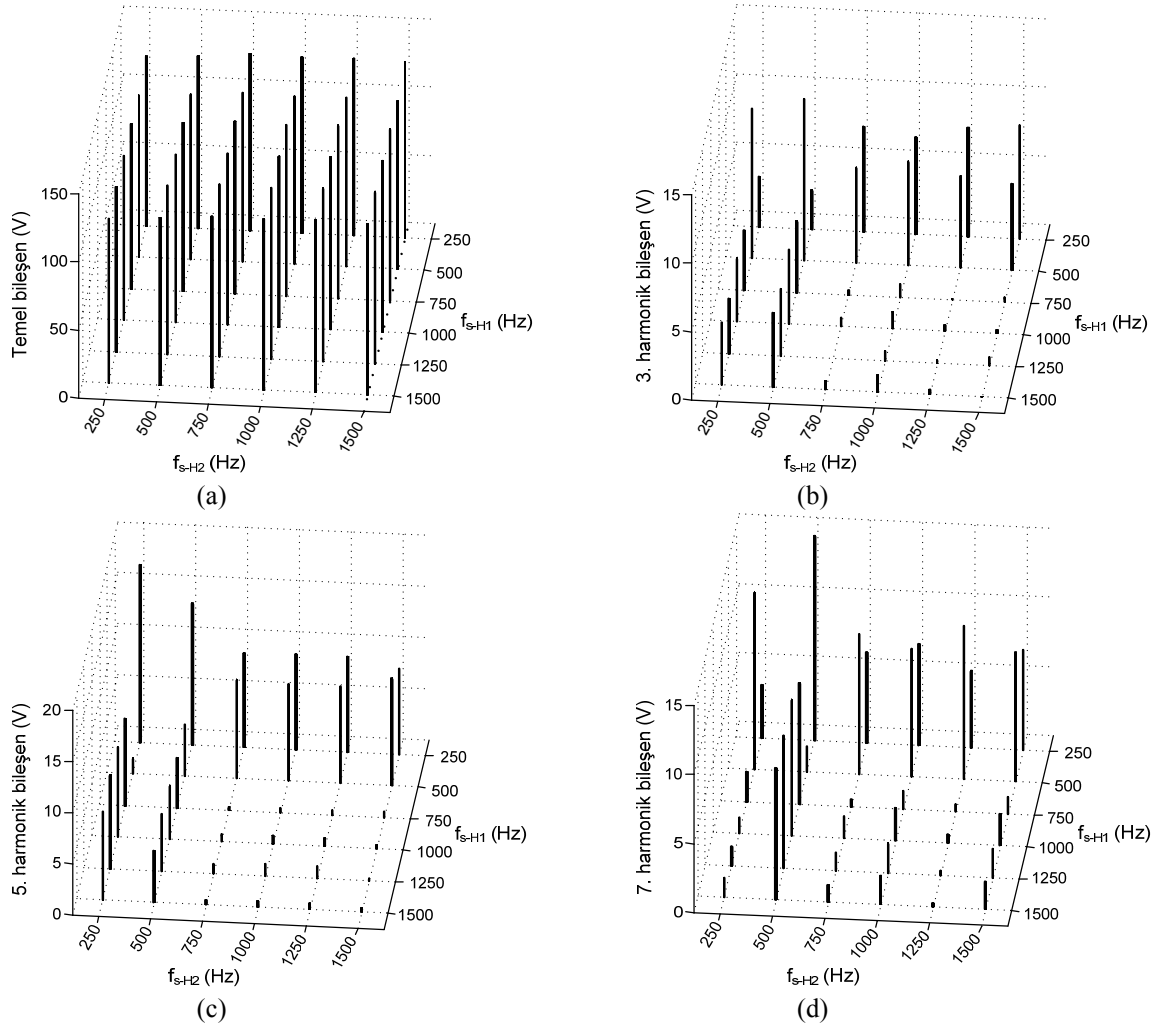
Literatürlerde çok seviyeli SDGM tekniği üzerine yapılan çalışmalarda, aynı genlikli ve aynı frekanslı taşıyıcı işaretler kullanılmaktadır [4-7].  $H_1$  ve  $H_2$  köprülerinin güç anahtarlarının denetimi için DGM'li sinyallerin üretiminde belirtilen aralıkta farklı anahtarlama frekanslarına sahip taşıyıcı işaretler kullanıl-



**Şekil 5.**  $M=0.85$ ,  $f_{s-H1}=400\text{Hz}$ ,  $f_{s-H2}=1\text{kHz}$  seçilmesi durumunda SDGM tekniğinin uygulanışı. (a) Referans ve taşıyıcı işaretler, (b)  $H_1$  köprüsünün çıkış gerilimi, (c)  $H_2$  köprüsünün çıkış gerilimi, (d) a-fazı çıkış gerilimi (The application of SPWM technique for  $M=0.85$ ,  $f_{s-H1}=400\text{Hz}$ ,  $f_{s-H2}=1\text{kHz}$ . (a)Reference and carrier signals, (b) The output voltage of  $H_1$ bridge, (c) The output voltage of  $H_2$  bridge, (d)Phase-a output voltage)

ması ile aynı genlikli ve aynı frekanslı taşıyıcı işaretlerin kullanılması durumları karşılaştırıldığında eviricinin çıkış gerilimi için elde edilen sonuçlardan bazıları şu şekildedir:

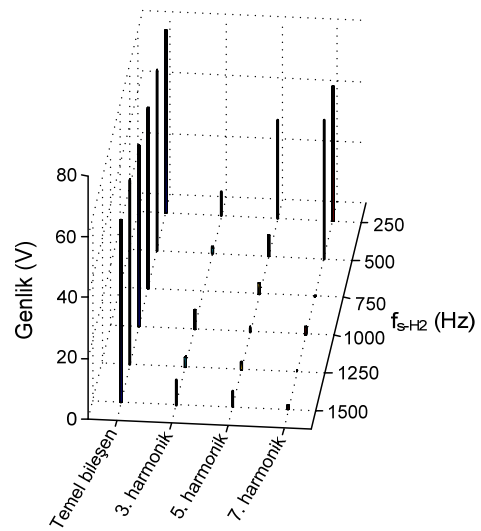
- $M=0.85$  için temel bileşenin genliği en az 119.3V ( $f_{s-H1}=250\text{Hz}$ ,  $f_{s-H2}=500\text{Hz}$ ) ve en fazla 130.5V ( $f_{s-H1}=1250\text{Hz}$ ,  $f_{s-H2}=250\text{Hz}$ ) olmaktadır.  $f_{s-H1}=1500\text{Hz}$  ve  $f_{s-H2}=1500\text{Hz}$  durumu ile kıyaslandığında %7.69'a kadar bir değişim aralığı mevcuttur (Şekil 6a).
- $M=0.85$  için seçilen anahtarlama frekanslarına bağlı olarak düşük dereceli harmonikler farklı değerler almaktadırlar (Şekil 6b, 6c ve 6d).  $f_{s-H1}=1500\text{Hz}$  ve  $f_{s-H2}=1500\text{Hz}$  durumu ile kıyaslandığında; 3. harmonik bileşende %98.5, 5. harmonik bileşende %97.3 ve 7. harmonik bileşende %86.5'e kadar değişimler olabilmektedir.
- $M=0.4$  için  $H_2$  köprüsünün anahtarlama frekansındaki değişimlerde eviricinin temel bileşeni değerini korurken, düşük dereceli harmonik bileşenler büyük oranda değişmektedirler (Şekil 7).
- SDGM tekniğinde modülasyon indeksi arttıkça %THB azalmaktadır. Literatürlerde modülasyon indeksi değişimlerine karşılık eviricinin çıkış gerilimi harmonik dağılımları ve %THB değerleri yaygın olarak incelenmiştir [2,4,15,16,17]. Burada, modülasyon



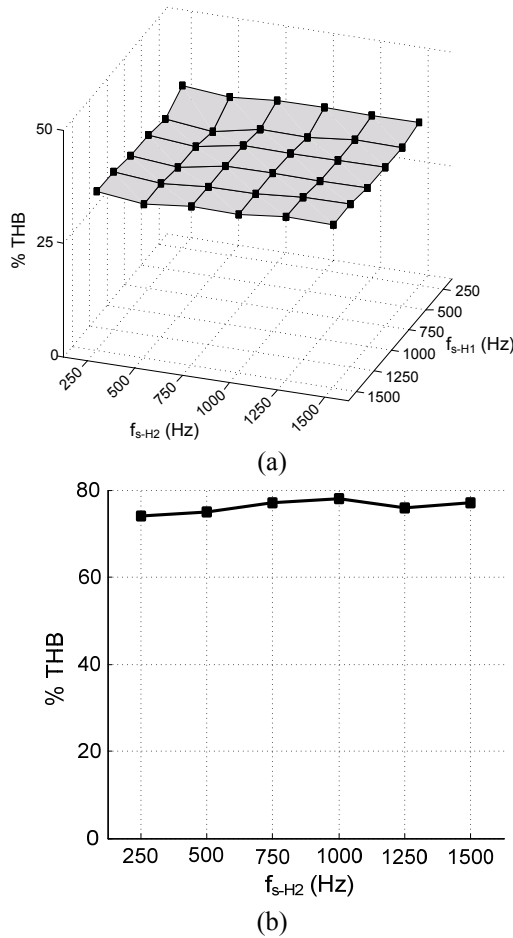
**Şekil 6.** Taşıyıcı işaret kümesindeki frekans değişimlerinin eviricinin çıkış gerilimi harmonik bileşenlerine etkileri ( $M=0.85$  ve  $M_f=30$ ). (a) Temel bileşen, (b) 3. harmonik bileşen, (c) 5. harmonik bileşen, (d) 7. harmonik bileşen (Effects on inverter output voltage harmonic components of frequency variations in the carrier signals ( $M=0.85$  and  $M_f=30$ )). (a) Fundamental component, (b) 3.harmonic component, (c) 5.harmonic component, (d) 7.harmonic component)

indeksi belirli bir değerde sabit tutulup, taşıyıcı dalgaların frekansları belirtilen aralıkta değiştirildiğinde %THB'nin değişimi incelenmiş,  $M=0.85$  ve  $M=0.4$  için elde edilen sonuçlar Şekil 8'de verilmiştir. Şekil 8a ve 8b'den görüleceği üzere, taşıyıcı dalgaların frekansları belirtilen aralıkta değiştirildiğinde %THB yaklaşık olarak sabit kalmaktadır.

Taşıyıcı dalgaların farklı anahtarlama frekanslarında oluşturulması, evirici çıkış geriliminin taşıyıcı frekans harmoniklerini de etkilemektedir. Burada, köprülerin birinin anahtarlama frekansı sabit tutulup diğerinin belirtilen aralıkta değiştirilmesi ile analizler yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar Tablo 1, Tablo 2 ve Tablo 3'de verilmiştir. Tablolarda verilen taşıyıcı frekans harmonikleri literatürlerde en çok incelenen ve en büyük genlikli taşıyıcı frekans harmonikleridir [4]. Bu harmonik genlikler  $f_{s-H1}=1500\text{Hz}$  ve  $f_{s-H2}=1500\text{Hz}$  durumu ile kıyaslandığında,  $M_f \neq 2$  ve  $3M_f \neq 2$  dereceli harmoniklerin arttığı,  $2M_f \neq 1$  ve  $4M_f \neq 1$  dereceli harmoniklerde ise düzgün bir dağılımın olmadığı gözlenmiştir. Tablo 1 ve Tablo 2  $M=0.85$  için, Tablo 4 ise  $M=0.4$  için oluşturulmuştur ( $M < 0.5$  olduğunda



**Şekil 7.**  $H_2$  köprüsü için kullanılan taşıyıcı işaret kümesindeki değişimlere karşılık eviricinin çıkış gerilim harmonikleri ( $M=0.4$ ,  $M_f=30$ ,  $f_{s-H1}=1500\text{Hz}$ ) (Harmonic components of inverter output voltage according to variations in the carrier signals used for  $H_2$  bridge ( $M=0.4$ ,  $M_f=30$ ,  $f_{s-H1}=1500\text{Hz}$ ))



**Şekil 8.** Taşıyıcı işaret kümesindeki frekans değişimleri için %THB'nin değişimi. (a) $M=0.85$ , (b) $M=0.4$  (THD % variations for frequency variations in the carrier signals. (a) $M=0.85$ , (b) $M=0.4$ )

çıkış gerilimi sadece  $f_{s-H2}$ 'nin değişimine göre şekillenmektedir).

Taşıyıcı işaretin frekansı temel frekanstan oldukça yüksek olduğunda taşıyıcı frekans harmonikleri çıkış geriliminde büyüklük açısından önem arz etmemekle

**Tablo 1.**  $f_{s-H1}$ 'nin değişimine karşılık taşıyıcı frekans harmonikleri ( $f_{s-H2}=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.85$ ,  $M_f=30$ ) (Carrier frequency harmonic components according to  $f_{s-H1}$  variations ( $f_{s-H2}=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.85$ ,  $M_f=30$ ))

	$M_f-2$	$M_f+2$	$2M_f-1$	$2M_f+1$	$3M_f-2$	$3M_f+2$	$4M_f-1$	$4M_f+1$	%THB
$f_{s-H1}=250\text{Hz}$	0.22	2.58	0.58	1.92	0.57	0.58	0.18	0.38	35.09
$f_{s-H1}=500\text{Hz}$	0.00	0.00	0.69	2.80	0.00	0.00	0.07	0.01	34.25
$f_{s-H1}=750\text{Hz}$	1.58	2.98	1.72	0.43	1.88	0.35	1.34	1.35	35.93
$f_{s-H1}=1000\text{Hz}$	0.00	0.00	1.93	4.12	0.00	0.00	1.46	1.21	35.69
$f_{s-H1}=1250\text{Hz}$	5.76	3.00	3.30	2.80	1.19	1.07	0.73	1.01	36.04
$f_{s-H1}=1500\text{Hz}$	0.00	0.00	1.61	4.51	0.00	0.00	1.96	2.00	36.23

**Tablo 2.**  $f_{s-H2}$ 'nin değişimine karşılık taşıyıcı frekans harmonikleri ( $f_{s-H1}=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.85$ ,  $M_f=30$ ) (Carrier frequency harmonic components according to  $f_{s-H2}$  variations ( $f_{s-H1}=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.85$ ,  $M_f=30$ ))

	$M_f-2$	$M_f+2$	$2M_f-1$	$2M_f+1$	$3M_f-2$	$3M_f+2$	$4M_f-1$	$4M_f+1$	%THB
$f_{s-H2}=250\text{Hz}$	3.40	2.35	3.13	1.27	1.26	0.59	1.71	3.63	36.90
$f_{s-H2}=500\text{Hz}$	0.25	0.25	2.62	0.96	0.25	0.25	2.17	4.00	34.97
$f_{s-H2}=750\text{Hz}$	3.01	2.03	0.20	4.22	0.17	1.57	1.95	3.81	35.78
$f_{s-H2}=1000\text{Hz}$	0.25	0.25	1.67	4.15	0.25	0.25	4.64	1.96	35.80
$f_{s-H2}=1250\text{Hz}$	8.77	6.34	5.77	1.75	1.93	2.46	2.25	4.12	36.28
$f_{s-H2}=1500\text{Hz}$	0.00	0.00	1.61	4.51	0.00	0.00	1.96	2.00	36.23

birlikte gerekli görüldüğü takdirde küçük bir filtre devresi ile bu yüksek dereceden harmonikler yok edilebilmektedir [18].

#### 4. TAŞIYICI DALGALARIN GENLİK DEĞİŞİMLERİNİN ÇIKIŞ GERİLİMİNE ETKİSİ (THE EFFECT OF CARRIER WAVEFORM AMPLITUDE VARIATIONS ON OUTPUT VOLTAGE)

Çok seviyeli SDGM tekniğinde tüm taşıyıcı işaretlerin frekansları sabit tutulup, genlik değerleri değiştirildiğinde çıkış gerilimi de aynı zamanda değiştirilebilmektedir. Taşıyıcı işaretin genlik değişimlerinin çıkış gerilimi üzerine etkilerini incelemek için  $h$  olarak belirtilen taşıyıcı işaret genlik kazancı tanımlanmıştır. Şekil 9 ve Şekil 10'da taşıyıcı işaretlerin genliklerinin değiştirilmesi ile elde edilmiş dalga şekilleri görülmektedir. Şekil 9'da  $h_1=0.25$  ve  $h_2=0.75$  için köprü çıkış gerilimleri ve a-faz çıkış gerilimi verilmiştir. Şekil 10'da ise  $h_1=0.75$  ve  $h_2=0.25$  seçilmesi durumunda elde edilen dalga şekilleri görülmektedir. Burada  $h_1$ ,  $H_1$  köprüsüne ait taşıyıcı işaretlerin ( $V_{t-1}$  ve  $V_{t-4}$ ) genlik değerini ve  $h_2$  ise  $H_2$  köprüsüne taşıyıcı işaretlerin ( $V_{t-2}$  ve  $V_{t-3}$ ) genlik değerlerini belirtmektedir. Buradan:

$$\begin{aligned} h_1 &= h, & h_1 &\in [0,1] \\ h_2 &= 1 - h, & h_2 &\in [0,1] \end{aligned} \quad (3)$$

olarak tanımlanabilir.

Taşıyıcı dalganın genlik değişimlerinin çıkış gerilimi harmonikleri üzerine etkisini incelemek için  $h_1 + h_2 = 1$  koşulu ile 0.25'lik artış/azalmaya karşılık, elde edilen harmonik genlikler ve %THB'nin değişimi Şekil 11-13'de verilmiştir.

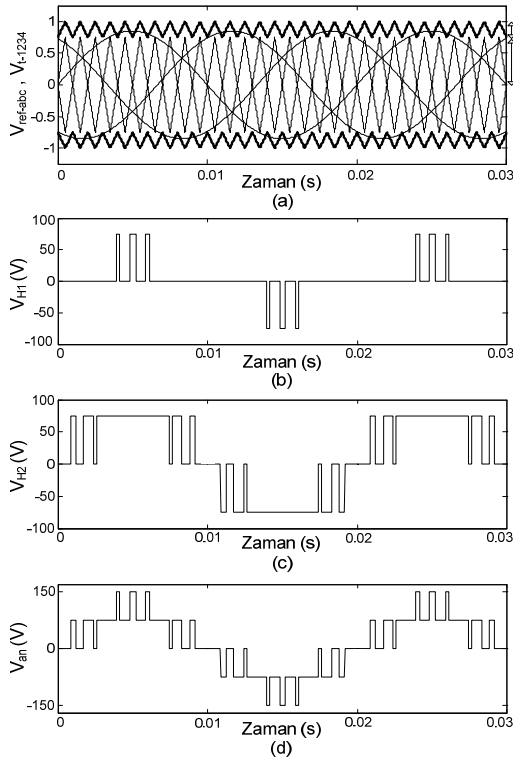
Eviricinin çıkış gerilimi incelendiğinde elde edilen bazı sonuçlar şu şekildedir:

**Tablo 3.**  $f_{s-H2}$ 'nin değişimine karşılık taşıyıcı frekans harmonikleri ( $f_{s-H1}=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.4$ ,  $M_f=30$ ) (Carrier frequency harmonic components according to  $f_{s-H2}$  variations ( $f_{s-H1}=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.4$ ,  $M_f=30$ ))

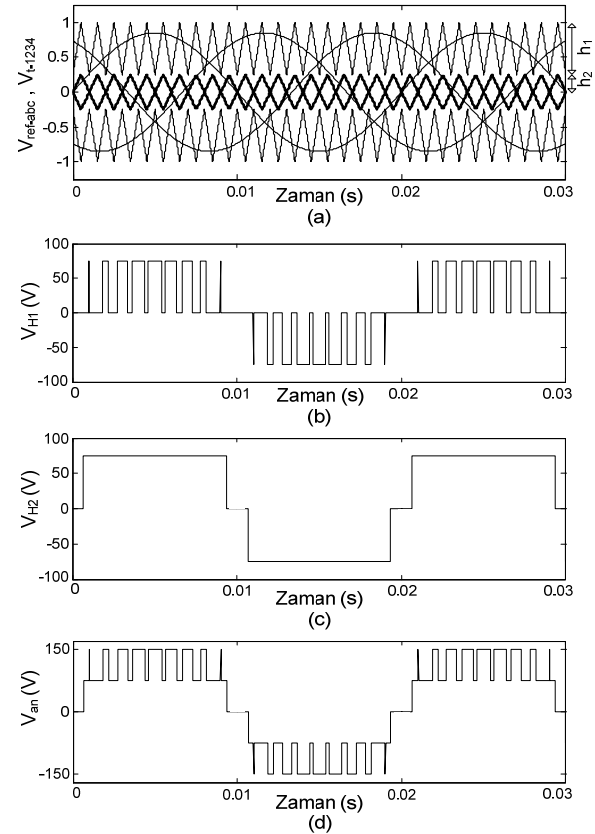
	$M_f-2$	$M_f+2$	$2M_f-1$	$2M_f+1$	$3M_f-2$	$3M_f+2$	$4M_f-1$	$4M_f+1$	%THB
$f_{s-H2}=250\text{Hz}$	0.38	5.08	1.13	0.38	0.60	0.29	0.29	0.61	72.31
$f_{s-H2}=500\text{Hz}$	0.25	0.25	0.54	2.83	0.25	0.25	0.75	0.77	74.67
$f_{s-H2}=750\text{Hz}$	0.35	0.30	0.51	0.94	0.33	0.52	0.13	0.25	77.37
$f_{s-H2}=1000\text{Hz}$	0.25	0.25	1.38	2.40	0.25	0.25	2.22	2.09	78.15
$f_{s-H2}=1250\text{Hz}$	10.2	0.64	1.03	0.22	0.06	0.28	0.27	0.02	76.45
$f_{s-H2}=1500\text{Hz}$	0.00	0.00	7.60	9.63	0.00	0.00	0.74	2.01	77.60

**Tablo 4.** Taşıyıcı frekans harmonikleri ( $f_s=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.85$ ,  $M_f=30$ ) (Carrier frequency harmonic components ( $f_s=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.85$ ,  $M_f=30$ ))

	$M_f-2$	$M_f+2$	$2M_f-1$	$2M_f+1$	$3M_f-2$	$3M_f+2$	$4M_f-1$	$4M_f+1$	%THB
$h_1=0, h_2=1$	0.00	0.00	7.42	8.50	0.00	0.00	1.95	1.41	70.43
$h_1=0.25, h_2=0.75$	0.00	0.00	3.64	1.65	0.00	0.00	1.71	2.16	45.95
$h_1=0.5, h_2=0.5$	0.00	0.00	1.61	4.51	0.00	0.00	1.96	2.00	36.23
$h_1=0.75, h_2=0.25$	0.00	0.00	4.33	7.70	0.00	0.00	0.79	1.63	34.24
$h_1=1, h_2=0$	0.50	0.50	8.99	6.98	0.50	0.50	2.64	0.73	39.77

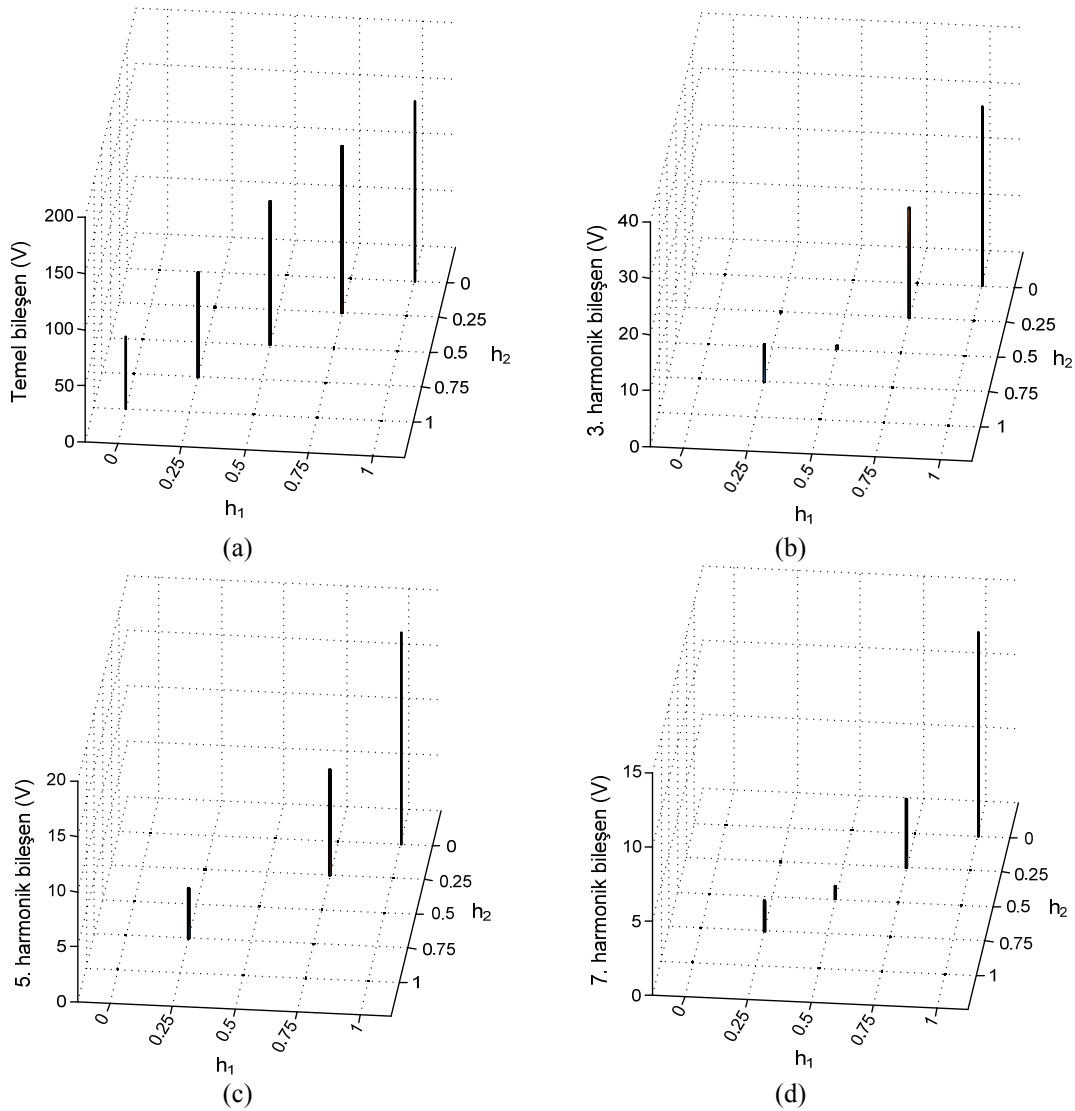
**Şekil 9.**  $M=0.85$ ,  $f_s=1\text{kHz}$ ,  $h_1=0.25$  ve  $h_2=0.75$  seçilmesi durumunda SDGM tekniğinin uygulanışı. (a)Referans ve taşıyıcı işaretler, (b) $H_1$  köprüsünün çıkış gerilimi, (c) $H_2$  köprüsünün çıkış gerilimi, (d)Van faz gerilimi (Application of SPWM technique for  $M=0.85$ ,  $f_s=1\text{kHz}$ ,  $h_1=0.25$  and  $h_2=0.75$ . (a) Reference and carrier signals, (b) The output voltage of  $H_1$  bridge, (c) The output voltage of  $H_2$  bridge, (d) Van phase voltage)

- $h_1=0$  ve  $h_2=1$  seçilmesi durumunda sadece  $H_1$  köprüsü devrede kalarak eviricinin çıkış gerilimini oluşturmaktadır. Bu durumda bu köprüsünün çıkış gerilimi 3-seviyeli bir çıkış dalga formunda

**Şekil 10.**  $M=0.85$ ,  $f_s=1\text{kHz}$ ,  $h_1=0.75$  ve  $h_2=0.25$  seçilmesi durumunda SDGM tekniğinin uygulanışı. (a)Referans ve taşıyıcı işaretler, (b) $H_1$  köprüsünün çıkış gerilimi, (c) $H_2$  köprüsünün çıkış gerilimi, (d)Van faz gerilimi (Application of SPWM technique for  $M=0.85$ ,  $f_s=1\text{kHz}$ ,  $h_1=0.75$  and  $h_2=0.25$ . (a) Reference and carrier signals, (b) The output voltage of  $H_1$  bridge, (c) The output voltage of  $H_2$  bridge, (d) Van phase voltage)

olmaktadır.  $h_1=1$  ve  $h_2=0$  seçilmesi durumunda ise hem  $H_1$  ve hem de seri bağlı  $H_2$  köprüsü beraber





**Şekil 11.** Taşıyıcı işaret kümesindeki genlik değişimlerinin eviricinin çıkış gerilimi harmonik bileşenlerine etkileri ( $M=0.85$ ,  $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) Temel bileşen, (b) 3. harmonik bileşen, (c) 5. harmonik bileşen, (d) 7. harmonik bileşen (Effects on inverter output voltage harmonic components of amplitude variations in the carrier signals ( $M=0.85$ ,  $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) Fundamental component, (b) 3.harmonic component, (c) 5.harmonic component, (d) 7.harmonic component)

çıkış gerilimini oluşturmaktadır. Böyle bir durumda ise  $H_1$  köprüsünün çıkış gerilimi kare dalga formunda ve  $H_2$ 'nin çıkış gerilimi ise 3-seviyeli dalga formunda olmaktadır.

- $h_1$  ve  $h_2$ 'nin 0 veya 1'den farklı bir değerde seçilmesi durumunda eviricinin çıkış dalga şekli 5-seviyeli olmaktadır. Bu durumda her bir H-köprünün çıkışı 3-seviyeli gerilim dalga formuna sahiptir. Literatürlerde,  $h_1=h_2=0.5$  seçilerek farklı  $M$  değerleri için çok seviyeli SDGM tekniği uygulanmaktadır [4-7]. Buradaki analizlerde  $M$  belirli bir değerde sabit tutularak,  $h_1$  ve  $h_2$ 'nin ayarlanması ile temel bileşen kolaylıkla azaltılıp/artırılabilir (Şekil 11 ve Şekil 12). Ancak bu şekilde ayarlama yapılırken düşük dereceli harmoniklerin değişimleri göz ardı edilmemelidir.
- Şekil 13'de  $M=0.85$  ve  $M=0.4$  değerleri için %THB'nin değişimleri verilmiştir. Şekilden de görüleceği üzere her iki durum için en düşük

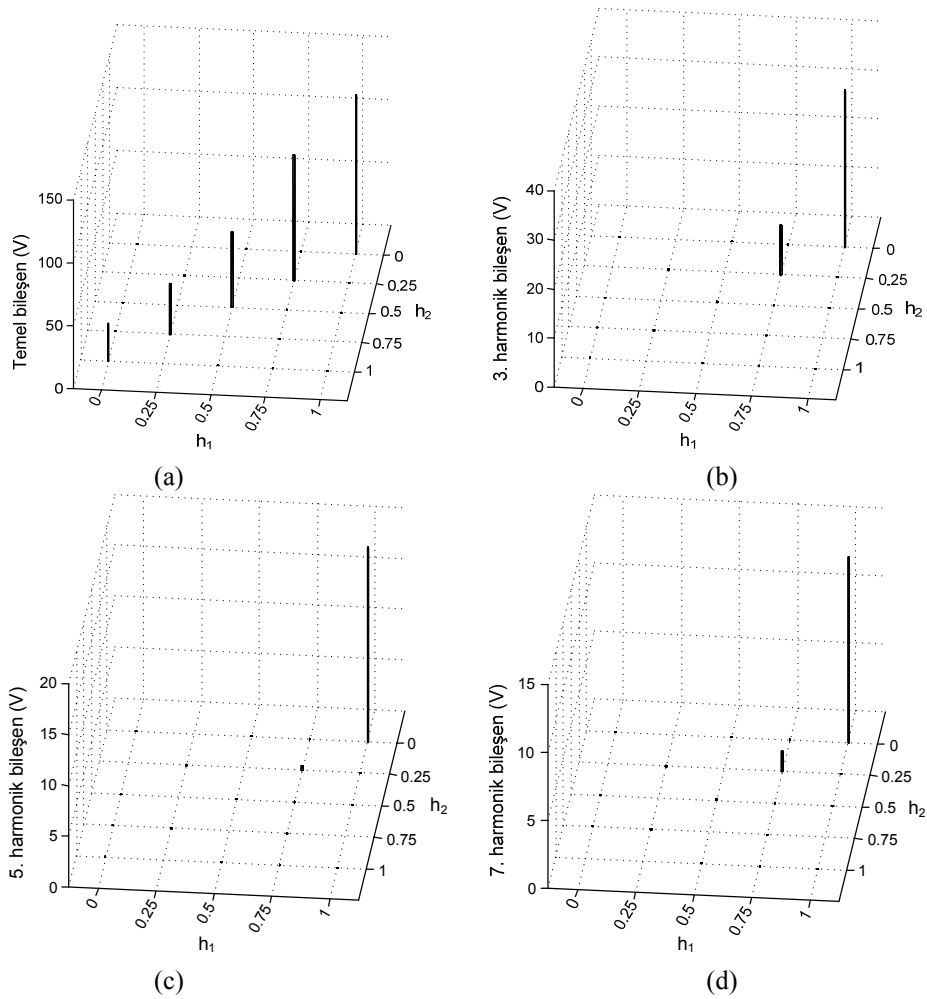
%THB değeri  $h_1=0.75$  ve  $h_2=0.25$  seçilmesi durumunda oluşmaktadır. Bu durum,  $h_1=h_2=0.5$  seçilmesi durumu ile karşılaştırıldığında,  $M=0.85$  için %5.2 ve  $M=0.4$  için ise %49.0 gibi daha düşük bir %THB'yi ifade etmektedir.

Taşıyıcı işaretlerin genlik değişimlerinin taşıyıcı frekans harmoniklerine etkisi incelendiğinde ve  $h_1=h_2=0.5$  durumu ile karşılaştırıldığında;  $M_f \neq 2$  ve  $3M_f \neq 2$  dereceli harmonik genlikler yaklaşık aynı değerlerde olmalarına karşılık,  $2M_f \pm 1$  ve  $4M_f \pm 1$  dereceli harmonik genliklerde büyük oranda değişimler söz konusudur. Analizlerden elde edilen sonuçlar Tablo 4 ve Tablo 5'de  $M=0.85$  ve  $M=0.4$  için verilmiştir.

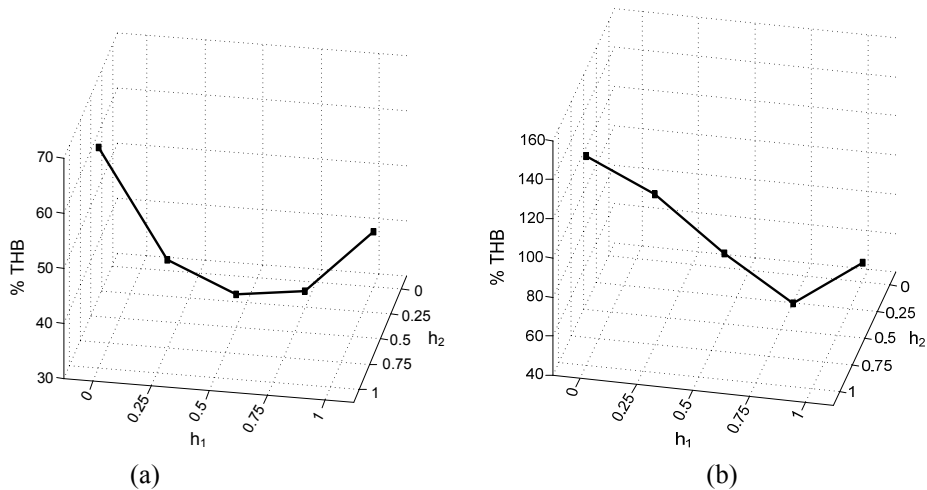
## 5. DENEYSEL SONUÇLAR (EXPERIMENTAL RESULTS)

Bölüm 3 ve bölüm 4'de önerilen çok seviyeli SDGM stratejileri deneysel çalışmalar ile test edilmiş ve





**Şekil 12.** Taşıyıcı işaret kümesindeki genlik değişimlerinin eviricinin çıkış gerilimi harmonik bileşenlerine etkileri ( $M=0.4$ ,  $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) Temel bileşen, (b) 3. harmonik bileşen, (c) 5. harmonik bileşen, (d) 7. harmonik bileşen (Effects on inverter output voltage harmonic components of amplitude variations in the carrier signals ( $M=0.4$ ,  $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) Fundamental component, (b) 3.harmonic component, (c) 5.harmonic component, (d) 7.harmonic component)



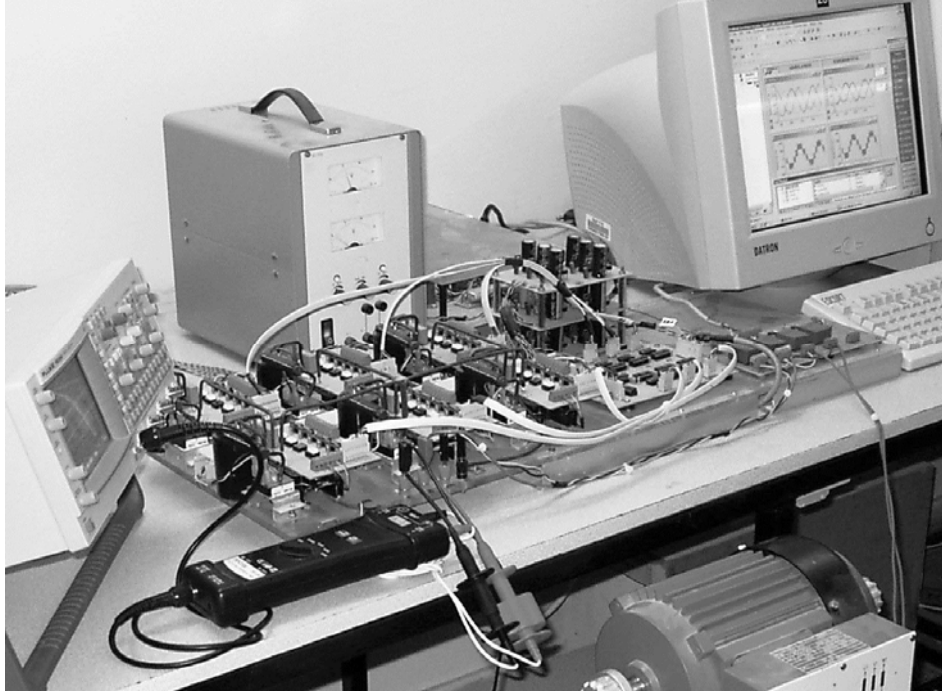
**Şekil 13.** Taşıyıcı işaret kümesindeki genlik değişimleri için %THB'nin değişimi ( $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) $M=0.85$ , (b)  $M=0.4$  (THD % variations for amplitude variations in the carrier signals ( $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) $M=0.85$ , (b)  $M=0.4$ )

deney düzeneği üzerinden alınan sonuçlar Şekil 15-20'de verilmiştir. Deneysel çalışmalar için dSPACE firmasının yüksek hızlı uygulamalar için tasarlanmış olduğu DS1103 denetleyici kartı ve yazılımları kullanılmıştır. Bu denetleyici kart, PowerPC604e-

333MHz ana işlemci ve TMS320F240-20MHZ'lik uydu durumunda olan bir sayısal işaret işlemciyi (DSP) üzerinde bulundurmaktadır. Deney düzeneği; 6 adet akıllı güç modülü (PM20CSJ060) ile oluşturulan bir 5-seviyeli kaskad evirici devresi, hall-etkili gerilim

**Tablo 5.** Taşıyıcı frekans harmonikleri ( $f_s=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.4$ ,  $M_f=30$ ) (Carrier frequency harmonic components ( $f_s=1500\text{Hz}$ ,  $M=0.4$ ,  $M_f=30$ ))

	$M_f-2$	$M_f+2$	$2M_f-1$	$2M_f+1$	$3M_f-2$	$3M_f+2$	$4M_f-1$	$4M_f+1$	%THB
$h_1=0, h_2=1$	0.00	0.00	12.4	12.9	0.00	0.00	3.82	4.76	152.3
$h_1=0.25, h_2=0.75$	0.00	0.00	4.22	5.29	0.00	0.00	0.05	1.90	117.7
$h_1=0.5, h_2=0.5$	0.00	0.00	7.60	9.63	0.00	0.00	0.74	2.01	77.60
$h_1=0.75, h_2=0.25$	0.00	0.00	6.81	7.37	0.00	0.00	4.32	5.38	39.56
$h_1=1, h_2=0$	0.50	0.50	10.9	14.4	0.50	0.50	4.52	4.08	50.81

**Şekil 14.** Deney düzeneğinin fotoğrafı (Photography of the experimental setup)

ve akım algılayıcı devreleri, ölü-zaman ayarı ve koruma devrelerinden oluşmaktadır [3]. Evirici, birbirinden izoleli 6 adet 75V'luk dc gerilim kaynağından beslenmektedir. Bilgisayarla etkileşimli dSPACE DS1103 denetleyici kartından elde edilen DGM'li sinyaller ile sürülen deney düzeneğinin fotoğrafı Şekil 14'de görülmektedir.

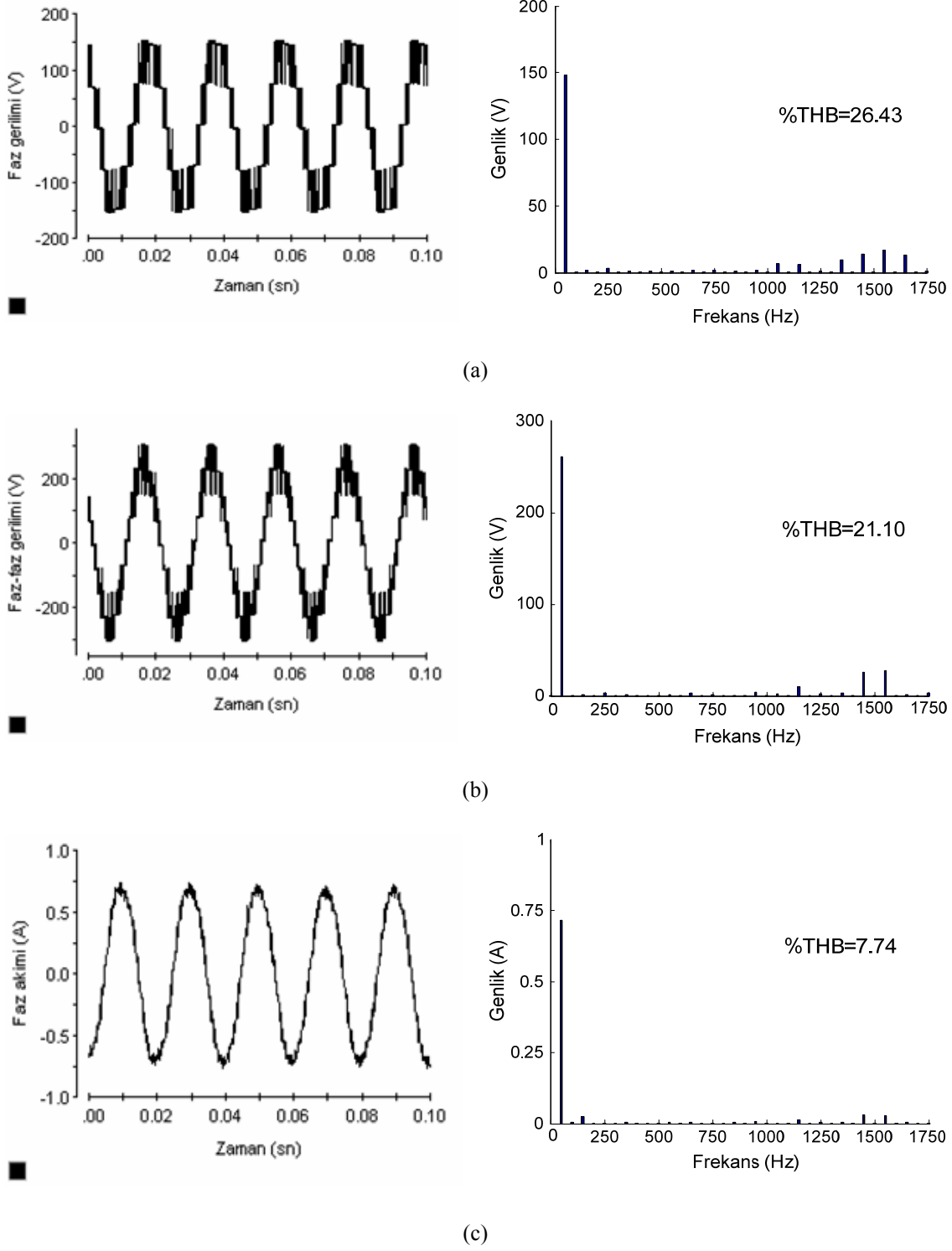
Deneyel çalışmalar Matlab\Simulink ve dSPACE'in yazılım paketleri kullanılarak gerçekleştirilmiştir. Matlab\Simulink ortamında oluşturulan deneyel bloklar Real-Time Workshop (RTW) ile C koduna dönüştürülmüş ve Real-Time Interface (RTI) yazılımı yardımıyla DS1103 sayısal işaret işlemci kartına yüklenmiştir. Deneyel sonuçların bilgisayar ortamına alınıp incelenmesi ve kaydedilmesi için dSPACE'in ControlDesk yazılımı kullanılmıştır. Burada oluşturulan bir platform üzerinde değişkenler istenilen zaman aralıkları ile alınıp \*.MAT dosyası olarak kaydedilmiş ve hızlı fourier dönüşümleri (FFT) yapılmıştır.

Önerilen SDGM stratejisine göre 5-seviyeli evirici üzerinden elde edilen üç-fazlı gerilimler yük olarak kullanılan ve parametreleri ekte verilen bir asenkron motora uygulanarak elde edilen sonuçlardan bazıları Şekil 15-20'de görülmektedir. Gerilim ve akım

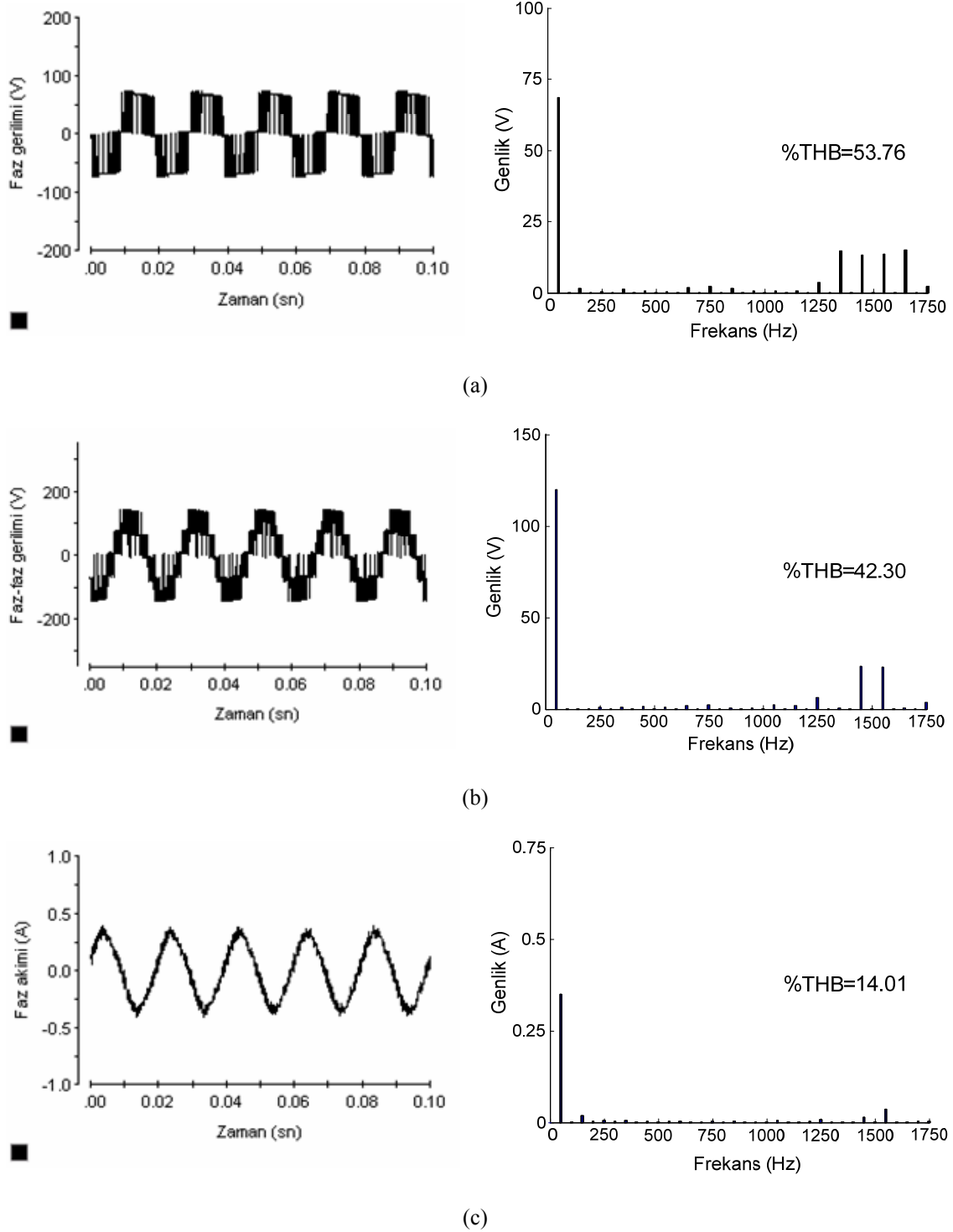
büyüklikleri için FFT analizleri kayıtlı verilerden yapılmış olup, frekans aralığı 0-1750HZ olarak sunulmuştur. Şekil 15'de aynı genlikli ve aynı frekanslı taşıyıcı işaretleri kullanan çok seviyeli SDGM stratejisi ile elde edilen dalga şekilleri görülmektedir. Şekil 16-17'de frekans değişimli taşıyıcı işaretler, Şekil 18-20'de ise genlik değişimli taşıyıcı işaretler kullanılarak elde edilen dalga şekilleri görülmektedir. Deneyel sonuçlar 50'lik temel frekansta farklı modülasyon indeksi değerlerine göre alınmış ve %THB değerleri hesaplanarak şekiller üzerinde verilmiştir.

## 6. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

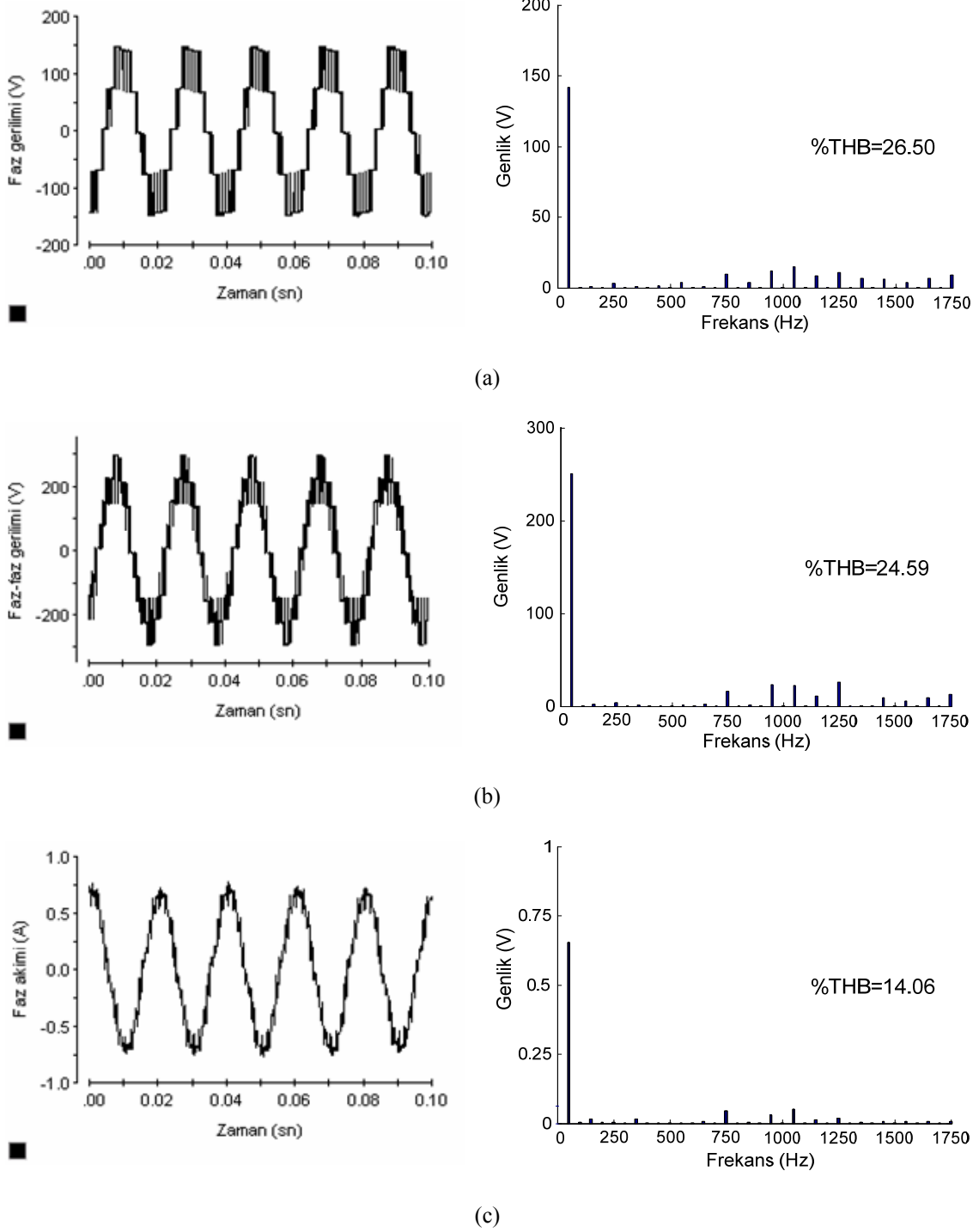
Bu çalışmada, farklı genlik ve frekans değerlerine göre oluşturulmuş taşıyıcı işaretleri içeren bir çok seviyeli SDGM stratejisi tanıtılmış ve bu şekildeki değişikliğin eviricinin çıkış gerilimi üzerine etkileri tartışılmıştır. Yapılan analizlerden; eviricinin çıkış geriliminin temel bileşeni, en önemli düşük dereceli harmonikler ve taşıyıcı frekans harmoniklerinin kullanılan taşıyıcı işaretlerin şekline oldukça bağlı olduğu görülmüştür.



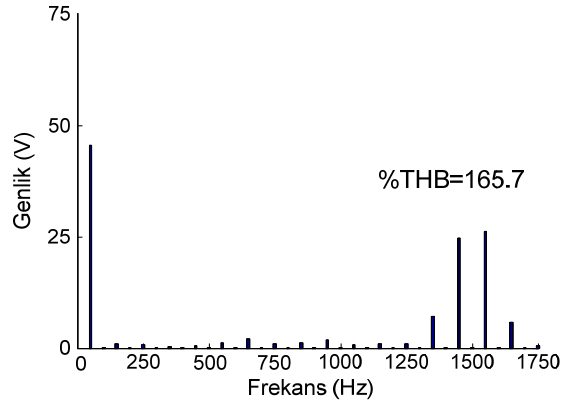
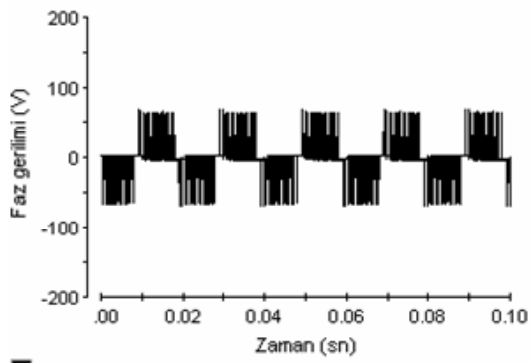
**Şekil 15.** Aynı genlikli ve aynı frekanslı taşıyıcı işaretleri kullanan çok seviyeli SDGM stratejisi ile elde edilen dalga şekilleri ve harmonik dağılımları. ( $M=1$ ,  $M_f=30$ ,  $f=50\text{Hz}$  ve  $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) Faz gerilimi, (b) Faz-faz gerilimi, (c)Faz akımı (Waveforms and their harmonic spectra obtained with multilevel SPWM technique for carrier signals with same amplitude and frequency. ( $M=1$ ,  $M_f=30$ ,  $f=50\text{Hz}$  and  $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) Phase voltage, (b) Phase to phase voltage, (c) Phase current)



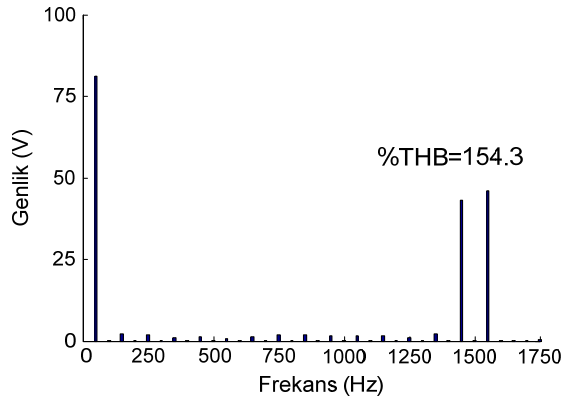
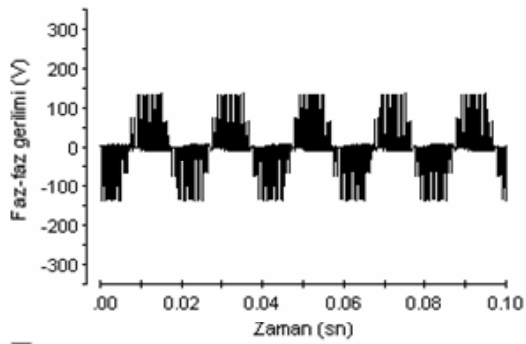
**Şekil 16.** Farklı frekanslı taşıyıcı işaretleri kullanan çok seviyeli SDGM stratejisi ile elde edilen dalga şekilleri ve harmonik dağılımları. ( $M=0.5$ ,  $f_{s-H1}=500\text{Hz}$ ,  $f_{s-H2}=1500\text{Hz}$  ve  $f=50\text{Hz}$ ). (a) Faz gerilimi, (b) Faz-faz gerilimi, (c)Faz akımı (Waveforms and their harmonic spectra obtained with multilevel SPWM technique for carrier signals with different frequency ( $M=0.5$ ,  $f_{s-H1}=500\text{Hz}$ ,  $f_{s-H2}=1500\text{Hz}$  and  $f=50\text{Hz}$ ). (a) Phase voltage, (b) Phase to phase voltage, (c) Phase current)



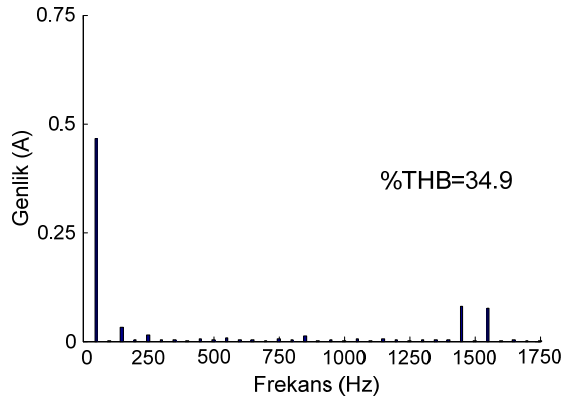
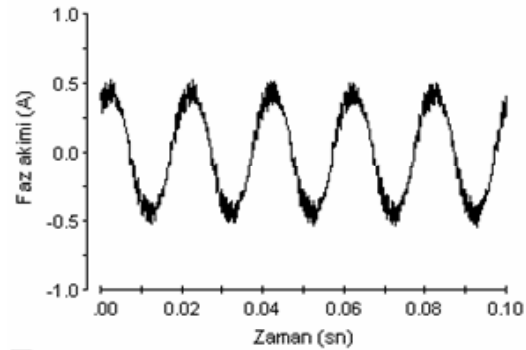
**Şekil 17.** Farklı frekanslı taşıyıcı işaretleri kullanan çok seviyeli SDGM stratejisi ile elde edilen dalga şekilleri ve harmonik dağılımları. ( $M=1$ ,  $f_{s-H1}=1000\text{Hz}$ ,  $f_{s-H2}=1500\text{Hz}$  ve  $f=50\text{Hz}$ ). (a) Faz gerilimi, (b) Faz-faz gerilimi, (c)Faz akımı (Waveforms and their harmonic spectra obtained with multilevel SPWM technique for carrier signals with different frequency ( $M=1$ ,  $f_{s-H1}=1000\text{Hz}$ ,  $f_{s-H2}=1500\text{Hz}$  and  $f=50\text{Hz}$ ). (a) Phase voltage, (b) Phase to phase voltage, (c) Phase current)



(a)

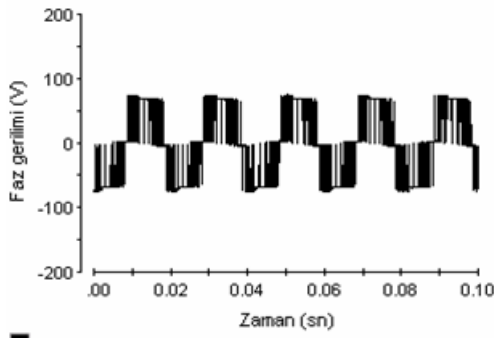


(b)

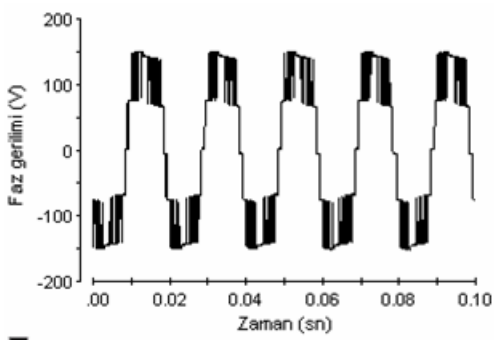


(c)

**Şekil 18.** Farklı genlikli taşıyıcı işaretleri kullanan çok seviyeli SDGM stratejisi ile elde edilen dalga şekilleri ve harmonik dağılımları. ( $M=0.25$ ,  $M_f=30$ ,  $h_1=0.25$ ,  $h_2=0.75$ ,  $f=50\text{Hz}$  ve  $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) Faz gerilimi, (b) Faz-faz gerilimi, (c) Faz akımı (Waveforms and their harmonic spectra obtained with multilevel SPWM technique for carrier signals with different amplitude ( $M=0.25$ ,  $M_f=30$ ,  $h_1=0.25$ ,  $h_2=0.75$ ,  $f=50\text{Hz}$  and  $f_s=1500\text{Hz}$ ). (a) Phase voltage, (b) Phase to phase voltage, (c) Phase current)



**Şekil 19.**  $M=0.25$ ,  $M_f=30$ ,  $h_1=0.75$ ,  $h_2=0.25$ ,  $f=50\text{Hz}$  ve  $f_s=1500\text{Hz}$  için 5-seviyeli eviricinin faz gerilimi ve harmonik dağılımı (Phase voltage and its harmonic spectra of the 5-level inverter for  $M=0.25$ ,  $M_f=30$ ,  $h_1=0.75$ ,  $h_2=0.25$ ,  $f=50\text{Hz}$  and  $f_s=1500\text{Hz}$ )



**Şekil 20.**  $M=1$ ,  $M_f=30$ ,  $h_1=0.75$ ,  $h_2=0.25$ ,  $f=50\text{Hz}$  ve  $f_s=1500\text{Hz}$  için 5-seviyeli eviricinin faz gerilimi ve harmonik dağılımı (Phase voltage and its harmonic spectra of the 5-level inverter for  $M=1$ ,  $M_f=30$ ,  $h_1=0.75$ ,  $h_2=0.25$ ,  $f=50\text{Hz}$  and  $f_s=1500\text{Hz}$ )

Farklı frekanslı taşıyıcı işaretleri kullanan çok seviyeli SDGM tekniğinde, belirli bir modülasyon indeksi değeri için temel bileşen ve %THB yaklaşık sabit kalmasına karşılık düşük dereceli ve taşıyıcı frekans harmoniklerinde düzgün bir dağılımın olmadığı gözlenmiştir. Benzer olarak, belirli bir modülasyon indeksi için taşıyıcı işaretler farklı genlik değerlerinde oluşturulursa bu şekildeki bir SDGM stratejisi ile eviricinin çıkış gerilimi temel bileşeni belirli aralıklarda değiştirilebileceği görülmüştür. Ancak bu şekildeki ayarlama yapılırken düşük dereceli harmoniklerin değişimleri de göz ardı edilmemelidir.

Önerilen çok seviyeli SDGM stratejisi deneysel çalışmalar ile test edilmiştir. Elde edilen akım-gerilim dalga şekillerinden ve harmonik profillerinden bu stratejinin kullanışlı olduğu görülmektedir. Bu şekildeki bir çok seviyeli SDGM stratejisi hibrid evirici yapıları için oldukça kullanışlı olacaktır. Çünkü bu yapılarda H-köprüler farklı akım-gerilim değerleri ve farklı anahtarlama frekanslarına sahip güç anahtarlarından oluşturulmaktadır.

#### KAYNAKLAR (REFERENCES)

1. Rodriguez, J., Lai J.S., Peng F.Z., "Multilevel Inverters: A Survey of Topologies, Controls, and Applications", **IEEE Transactions on Industrial Electronics**, Vol. 49, No. 4, 724-738, 2002.
2. Aziz, J.A., Salam Z., "A New Pulse-Width Modulation (PWM) Scheme for Modular Structured Multilevel Voltage Source Inverter", **Int. J. Electronics**, Vol. 91, No. 4, 211-226, 2004.
3. Tuncer, S., Tatar Y., "Çok Seviyeli Eviriciler için Sabit V/f Özellikli Bir UVDGM Algoritması", **Gazi Üniversitesi Mühendislik-Mimarlık Fakültesi Dergisi**, Cilt 21, Sayı 3, 509-517, 2006.
4. Wu B., **High-Power Converters and AC Drives**, John Wiley & Sons, New Jersey, USA, 2006.
5. Carrara, G., Gardella, S., Marchesoni, M., Salutari, R., Sciutto, G., "A New Multilevel PWM Method: A Theoretical Analysis", **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 7, 497-505, 1992.
6. Bowes, S.R., Holiday, D., Grewal S., "Comparison of Single-Phase Three-Level Pulse Width Modulation Strategies", **IEE Proceedings**,



- Electric Power Applications**, Vol. 151, No. 2, 205-214, 2004.
7. Walker, G., Ledwich, G., “Bandwidth Consideration for Multilevel Converters”, **IEEE Transactions on Power Electronics**, Vol. 14, No. 1, 74-81, 1999.
  8. Tolbert, L.M., Habetler, T.G., “Novel Multilevel Inverter Carrier-Based PWM Method”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 35, No. 5, 1098-1107, 1999.
  9. Hongyang, W., Xiangning, H., “Research on PWM Control of A Cascade Multilevel Converter” **Third International Power Electronics and Motion Control Conference, PIEMC 2000**, 15-18, 2000.
  10. Celanovic, N., Boroyevich, D., “A Fast Space-Vector Modulation Algorithm for Multilevel Three-Phase Converters”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 37, No. 2, 637-641, 2001.
  11. Tuncer, S., Tatar, Y. “A New Approach for Selecting the Switching States of SVPWM Algorithm in Multilevel Inverter”, **European Transactions on Electrical Power**, Vol. 17, N0. 1, 81-95, 2007.
  12. Li, L., Czarkowski, D., Liu, Y., Pillay, P., “Multilevel Selective Harmonic Elimination PWM Technique in Series-Connected Voltage Inverters”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol. 36, No. 1, 160-170, 2000.
  13. Tuncer, S., Tatar, Y., “An Application of SHEPWM Technique in a Cascade Multilevel Inverter”, **COMPEL: The International Journal For Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering**, Vol. 24, No. 1, 81-93, 2005.
  14. Massoud, A.M., Finney, S.J., Williams, B.W., “High-Power, High-Voltage IGBT Applications: Series Connection of IGBT sor Multilevel Converters” **Int. J. Electronics**, Vol. 90, No. 11-12, 763-778, 2003.
  15. Feng, C., Agelidis V.G., “On the Comparison of Fundamental and High Frequency Carrier-Based PWM Techniques for Multilevel NPC Inverters”, **Power Electronics Specialists Conference, PESC 02**, Vol. 2, No. 1, 520-525, 2002.
  16. Dehbonei H., Nayar C.V., Borle L., “A Novel Modulation Technique for A Single Phase H-Bridge Inverter”, **Int. J. Electronics**, Vol. 91, No. 1, 41-55, 2004.
  17. Tuncer, S., Tatar Y., “Çok Seviyeli Kaskad İnverterlerde SPWM Tekniğinin Kullanımı”, **Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Dergisi**, Cilt 7, Sayı 2, 56-61, 2003.

**EK: Kullanılan asenkron motorun parametreleri:**

$P=1\text{kW}$ ,  $V_{f-r}=380\text{V}$ ,  $f=50\text{Hz}$ ,  $p=2$ ,  $R_s=9.655\Omega$ ,  $R_r=6.490\Omega$ ,  $L_s=25.88\text{mH}$ ,  $L_r=25.88\text{mH}$ ,  $L_m=515\text{mH}$ ,  $J=0.00055\text{kgm}^2$ .