



# Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi

*Araştırma Makalesi*

## 6-Anahtarlı 3-Seviyeli Eviricide Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyon Tekniğinin Uygulaması

Ali SAYGIN <sup>a</sup>, Alper KEREM <sup>b\*</sup>

<sup>a</sup>*Elektrik Elektronik Mühendisliği Bölümü, Teknoloji Fakültesi, Gazi Üniversitesi, Ankara, TÜRKİYE*

<sup>b</sup>*Elektrik ve Enerji Bölümü, KMYO, Osmaniye Korkut Ata Üniversitesi, Osmaniye, TÜRKİYE*

\* Sorumlu yazarın e-posta adresi: alperkerem@osmaniye.edu.tr

### ÖZET

Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu (UVDGM) tekniği bu çalışma ile 6-anahtarlı 3-seviyeli evirici üzerinde denenmiştir. Evirici topolojisinde 6 adet IGBT yarıiletken anahtar kullanılarak eviricinin her bir çıkış uçlarına çift sarımlı bobinler bağlanmıştır. Bobin gerilimlerinin kullanılmasıyla 6-anahtarlı 3-seviyeli evirici elde edilmiştir. Bulanık mantık denetleyici ile yarıiletken anahtarların çalışması için gerekli sinyaller üretilmiştir. Bu sinyallerin üretilmesinde UVDGM tekniği kullanılmıştır. Kullanılan modülasyon tekniği ile çıkış akımı harmonik bileşenlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Benzetim çalışmalarında RLC yük kullanılarak evirici performansı incelenmiştir. Yükteki harmonik değerler fast fourier transform (FFT) ile analiz edilerek akımda oluşan harmonik miktarları incelenmiştir. Oluşan harmoniklerin oldukça düşük değerler içermesi istenilen sonuca başarıyla ulaşıldığını göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** *Uzay vektör darbe genişlik modülasyonu, 6-anahtarlı 3-seviyeli evirici, Çift sarımlı bobin, RLC yük*

## An Application of Space Vector Pulse Width Modulation Technique on 6-Switched 3-Level Inverter

### ABSTRACT

The space vector pulse width modulation (SVPWM) technique was tested on 6-switched 3-level inverter by this study. 6 IGBT semiconductor switches were used in inverter topology and coupled inductors were used in the output stage of the inverter. 6-switched 3-level inverter was obtained using inductors voltages. With using fuzzy logic controller the required switching signals were generated. SVPWM technique was used to produce these signals. It was aimed to reduction of output current's harmonic components with used modulation technique. The inverter performance was investigated using RLC load in simulation studies. Load harmonic values were analyzed by fast fourier transform (FFT) and it was observed the harmonic amounts in the current. The fact that the resulting harmonics contain very low values has shown that the desired result was achieved successfully.

**Keywords:** *Space vector pulse width modulation, 6-switched 3-level inverter, Coupled inductor, RLC load*

## I. GİRİŞ

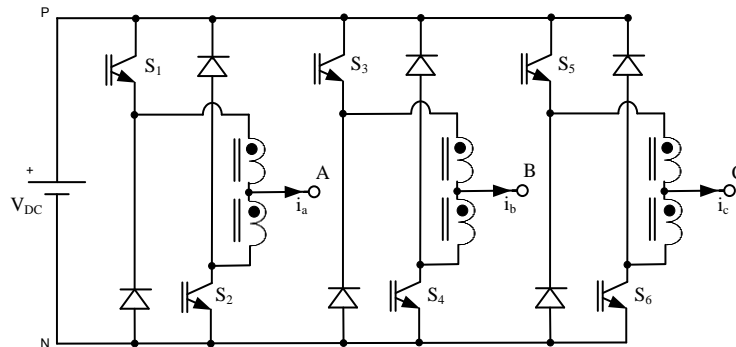
Doğru akımdan (DC) alternatif akıma (AC) dönüştürme işlemi gittikçe yaygınlaşmakta olan bir uygulamadır. Alternatif akım yüklerinin beslenmesinde çeşitli dönüşüm (DC-AC) metotları uygulanmaktadır. Bunların arasında çok seviyeli evirici kullanımı oldukça yaygınlaşmıştır. Bu çalışmalarda temel amaç evirici çıkış seviyesinin artırılmasıyla üretilen sinüs sinyalinin kalitesinin geliştirilmesidir. Böylece artan gerilim seviyesi ile ters orantılı olarak harmonik miktarı azalırken, doğru orantılı olarak verimde artış sağlanmaktadır.

Çok seviyeli evirici ilk olarak 1981 yılında Nabae ve arkadaşları tarafından nötr-nokta tutmalı evirici olarak önerilmiştir [1]. Bu evirici topolojisi ilerleyen zamanlarda üç-seviyeli evirici kavramı olarak genişletilmiştir. Sonraki yıllarda çok seviyeli evirici topolojileri üzerine çalışmalar yapılmıştır. Bu çalışmalar üç farklı model üzerinde yoğunlaşmıştır. Bunlar; diyot-tutmalı çok-seviyeli eviriciler, kondansatör-tutmalı çok-seviyeli eviriciler ve seri bağlı tam köprü çok-seviyeli eviricilerdir [2-4]. Çok seviyeli eviricilerde minimum harmonik bozulma ile istenen genlik ve frekansta gerilimler elde etmek için farklı darbe genişlik modülasyon (DGM) teknikleri kullanılmaktadır [5-9]. İki ve çok seviyeli dönüştürücüler için şu anda en yaygın modülasyon tekniklerinden biri uzay vektör darbe genişlik modülasyon (UVDGM) tekniğidir. Bu teknik aynı zamanda gerçek zamanlı modülasyon teknikleri sınıfında olup [10,11], evirici çıkışında istenilen genlik ve frekansta üç-fazlı gerilimler elde edilebilmesine imkan sağlamaktadır [12,13].

Bu çalışmanın temel amacı, UVDGM tekniğinin çok seviyeli evirici modellerine alternatif yeni bir model olan 6-anahtarlı 3-seviyeli evirici için de uygun bir teknik olabileceğini göstermektir. Bu amaçla yarı iletken anahtarların çalışması için gereken sinyaller UVDGM tekniği ile üretilmiştir. Evirici performansı farklı frekans değerlerinde RLC yük üzerinde test edilmiş ve çıkış sinyallerinin harmonik miktarları gözlemlenmiştir. Oluşan harmonik miktarlarının çok düşük değerli olması sebebiyle bu tekniğin 6-anahtarlı 3-seviyeli evirici için başarılı bir DGM tekniği olduğu görülmüştür.

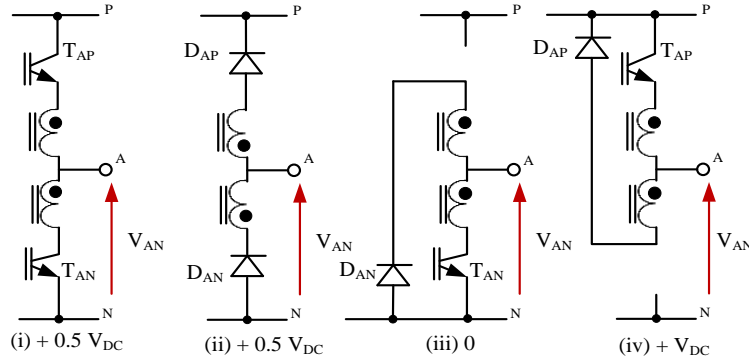
## II. 6-ANAHTARLI 3-SEVİYELİ EVİRİCİ TOPOLOJİSİ

Son zamanlarda çok seviyeli evirici topolojilerine alternatif bir topoloji geliştirilmiştir [14]. Bu evirici topolojisinde 6 adet IGBT yarıiletken anahtar kullanılmakla beraber eviricinin her bir çıkış uçlarına çift sarımlı bobinler bağlanmaktadır. 6-anahtarlı 3-seviyeli evirici Şekil 1'de verilmiştir [15].



**Şekil 1.** 6-anahtarlı 3-seviyeli evirici [15]

Bu topoloji, girişine uygulanan DCkaynak ve her bir çıkışa bağlanan 3 faz bölünmüş sargılı çift sarımlı bobinler aracılığı ile çok seviyeli çıkış gerilimleri üretmektedir. S1 ve S2 anahtarlarının her ikisinin de iletimde ya da kesimde olduğu durumlarda, çıkış terminal gerilimi olan VAN'den  $+ \frac{1}{2} V_{DC}$ 'lik bir gerilim elde edilmektedir. S1 anahtarı kesimde, S2 anahtarı iletimde olduğunda VAN negatif DC barasına bağlanmış olur ve her hangi bir gerilim üretilmez. S1 anahtarı iletimde, S2 anahtarı kesimde olduğunda ise VAN pozitif DC barasına bağlı olduğundan dolayı  $+ V_{DC}$  gerilimi üretilir. Bu durum Şekil 2'de verilmiştir [15-17].

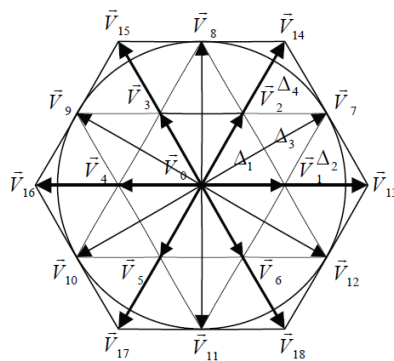


**Şekil 2.** 6-anahtarlı 3-seviyeli eviricinin tek bacağındaki anahtarlama durumları [15]

Bu evirici topolojisinde ölü-zaman koruması ihtiyacını giderilmekte ve DGM' li anahtarlama düzenlerindeki üst ve alt anahtarların aynı anda iletime geçmelerine izin verilmektedir. Böylece ölü zaman etkileri ortadan kalkmakta, ek bir orta-nokta gerilimi üretilmekte ve etkin çıkış anahtarlama frekansı ikiye katlanmaktadır. Ayrıca 3. gerilim seviyesine yükselip etkin anahtarlama frekansını ikiye katlayarak çıkış dalga şeklindeki harmonik bozunum büyük oranda giderilmektedir [15].

### III. UZAY VEKTÖR DARBE GENİŞLİK MODÜLASYON TEKNİĞİNİN EVİRİCİYE UYGULANMASI

Bu çalışmada toplam 19 vektör ile 64 farklı anahtarlama durumu üretilmektedir. Uzay vektör blok diyagramı  $60^\circ$ 'lik sektörlere (S<sub>1</sub>-S<sub>6</sub>) bölünmüş olup her bir sektör 4 adet üçgenden ( $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ ) oluşmaktadır (Şekil 3). Referans vektörünün ucu herhangi bir üçgende konumlandırılabilmekte ve her üçgenin tepesi bir anahtarlama vektörünü göstermektedir. Bu vektör, durumuna bağlı olmak üzere bir veya birden fazla anahtarlama üretebilmektedir [18].



**Şekil 3.** 3-seviyeli eviricinin gerilim uzay vektörleri [19]

Tablo 1’de görüldüğü üzere; sıfır gerilim vektörüne ( $\vec{v}_0$ ) ait toplam 10 adet, küçük gerilim vektörlerine ( $\vec{v}_1, \vec{v}_2, \vec{v}_3, \vec{v}_4, \vec{v}_5, \vec{v}_6$ ) ait toplam 36 adet, orta gerilim vektörlerine ( $\vec{v}_7, \vec{v}_8, \vec{v}_9, \vec{v}_{10}, \vec{v}_{11}, \vec{v}_{12}$ ) ait toplam 12 adet, büyük gerilim vektörlerine ( $\vec{v}_{13}, \vec{v}_{14}, \vec{v}_{15}, \vec{v}_{16}, \vec{v}_{17}, \vec{v}_{18}$ ) ait ise toplam 6 adet farklı anahtarlama durumu mevcuttur.

**Tablo 1.** Her bir gerilim vektörü için anahtarlama durumları [20]

$\vec{v}_0$	$\vec{v}_1$	$\vec{v}_2$	$\vec{v}_3$	$\vec{v}_4$	$\vec{v}_5$	$\vec{v}_6$
[00 00 00]	[00 01 01]	[10 10 00]	[01 00 01]	[00 10 10]	[01 01 00]	[10 00 10]
[00 00 11]	[11 01 01]	[10 10 11]	[01 11 01]	[11 10 10]	[01 01 11]	[10 11 10]
[00 11 00]	[10 00 00]	[00 00 01]	[00 10 00]	[01 00 00]	[00 00 10]	[00 01 00]
[00 11 11]	[10 00 11]	[00 11 01]	[00 10 11]	[01 00 11]	[00 11 10]	[00 01 11]
[11 00 00]	[10 11 00]	[11 00 01]	[11 10 00]	[01 11 00]	[11 00 10]	[11 01 00]
[11 00 11]	[10 11 11]	[11 11 01]	[11 10 11]	[01 11 11]	[11 11 10]	[11 01 11]
[11 11 00]	$\vec{v}_7$	$\vec{v}_8$	$\vec{v}_9$	$\vec{v}_{10}$	$\vec{v}_{11}$	$\vec{v}_{12}$
[11 11 11]	[10 00 01]	[00 10 01]	[01 10 00]	[01 00 10]	[00 01 10]	[10 01 00]
[01 01 01]	[10 11 01]	[11 10 01]	[01 10 11]	[01 11 10]	[11 01 10]	[10 01 11]
[10 10 10]	$\vec{v}_{13}$	$\vec{v}_{14}$	$\vec{v}_{15}$	$\vec{v}_{16}$	$\vec{v}_{17}$	$\vec{v}_{18}$
[S <sub>1</sub> S <sub>2</sub> S <sub>3</sub> S <sub>4</sub> S <sub>5</sub> S <sub>6</sub> Anahtar iletimde:1 Anahtar kesimde:0]	[10 01 01]	[10 10 01]	[01 10 01]	[01 10 10]	[01 01 10]	[10 01 10]

Küçük gerilim vektörlerini oluşturan bobin konfigürasyonları Tablo 2’de verilmiştir. Tüm anahtarlama kombinasyonlarına göre yük faz gerilim vektörleri Tablo 3’de verilmiştir.

**Tablo 2.** Küçük gerilim vektörlerini oluşturan bobin konfigürasyonları

Küçük Gerilim Vektörleri $1/3 V_{DC}$	
$\vec{V}_1$	
$\vec{V}_2$	
$\vec{V}_3$	
$\vec{V}_4$	
$\vec{V}_5$	
$\vec{V}_6$	

**Tablo 3. Her bir uzay gerilim vektörüne ilişkin anahtarlama durumları**

	Anahtar Durumları						Yük Faz Gerilimleri			Çıkış Gerilimleri	
	S <sub>1</sub>	S <sub>2</sub>	S <sub>3</sub>	S <sub>4</sub>	S <sub>5</sub>	S <sub>6</sub>	V <sub>A0</sub>	V <sub>B0</sub>	V <sub>C0</sub>	Faz	Genlik
1	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0	0
2	0	0	0	0	0	1	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	60	0.3333
3	0	0	0	0	1	0	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-120	0.3333
4	0	0	0	0	1	1	0	0	0	0	0
5	0	0	0	1	0	0	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	-60	0.3333
6	0	0	0	1	0	1	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	0	0.3333
7	0	0	0	1	1	0	0	-V <sub>dc</sub> /2	V <sub>dc</sub> /2	-90	0.5774
8	0	0	0	1	1	1	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	-60	0.3333
9	0	0	1	0	0	0	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	120	0.3333
10	0	0	1	0	0	1	0	V <sub>dc</sub> /2	-V <sub>dc</sub> /2	90	0.5774
11	0	0	1	0	1	0	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	180	0.3333
12	0	0	1	0	1	1	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	120	0.3333
13	0	0	1	1	0	0	0	0	0	0	0
14	0	0	1	1	0	1	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	60	0.3333
15	0	0	1	1	1	0	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-120	0.3333
16	0	0	1	1	1	1	0	0	0	0	0
17	0	1	0	0	0	0	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	180	0.3333
18	0	1	0	0	0	1	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	120	0.3333
19	0	1	0	0	1	0	-V <sub>dc</sub> /2	0	V <sub>dc</sub> /2	-150	0.5774
20	0	1	0	0	1	1	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	180	0.3333
21	0	1	0	1	0	0	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-120	0.3333
22	0	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0
23	0	1	0	1	1	0	-V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	2V <sub>dc</sub> /3	-120	0.6667
24	0	1	0	1	1	1	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-120	0.3333
25	0	1	1	0	0	0	-V <sub>dc</sub> /2	V <sub>dc</sub> /2	0	150	0.5774
26	0	1	1	0	0	1	-V <sub>dc</sub> /3	2V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	120	0.6667
27	0	1	1	0	1	0	-2V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	180	0.6667
28	0	1	1	0	1	1	-V <sub>dc</sub> /2	V <sub>dc</sub> /2	0	150	0.5774
29	0	1	1	1	0	0	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	180	0.3333
30	0	1	1	1	0	1	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	120	0.3333
31	0	1	1	1	1	0	-V <sub>dc</sub> /2	0	V <sub>dc</sub> /2	-150	0.5774
32	0	1	1	1	1	1	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	180	0.3333
33	1	0	0	0	0	0	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	0	0.3333
34	1	0	0	0	0	1	V <sub>dc</sub> /2	0	-V <sub>dc</sub> /2	30	0.5774
35	1	0	0	0	1	0	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	-60	0.3333
36	1	0	0	0	1	1	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	0	0.3333
37	1	0	0	1	0	0	V <sub>dc</sub> /2	-V <sub>dc</sub> /2	0	-30	0.5774
38	1	0	0	1	0	1	2V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /3	0	0.6667
39	1	0	0	1	1	0	V <sub>dc</sub> /3	-2V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	-60	0.6667
40	1	0	0	1	1	1	V <sub>dc</sub> /2	-V <sub>dc</sub> /2	0	-30	0.5774
41	1	0	1	0	0	0	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	60	0.3333
42	1	0	1	0	0	1	V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /3	-2V <sub>dc</sub> /3	60	0.6667
43	1	0	1	0	1	0	0	0	0	0	0
44	1	0	1	0	1	1	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	60	0.3333
45	1	0	1	1	0	0	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	0	0.3333
46	1	0	1	1	0	1	V <sub>dc</sub> /2	0	-V <sub>dc</sub> /2	30	0.5774
47	1	0	1	1	1	0	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	-60	0.3333
48	1	0	1	1	1	1	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	0	0.3333
49	1	1	0	0	0	0	0	0	0	0	0
50	1	1	0	0	0	1	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	60	0.3333
51	1	1	0	0	1	0	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-120	0.3333
52	1	1	0	0	1	1	0	0	0	0	0
53	1	1	0	1	0	0	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	-60	0.3333
54	1	1	0	1	0	1	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	0	0.3333
55	1	1	0	1	1	0	0	-V <sub>dc</sub> /2	V <sub>dc</sub> /2	-90	0.5774
56	1	1	0	1	1	1	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	-60	0.3333
57	1	1	1	0	0	0	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	120	0.3333
58	1	1	1	0	0	1	0	V <sub>dc</sub> /2	-V <sub>dc</sub> /2	90	0.5774
59	1	1	1	0	1	0	-V <sub>dc</sub> /3	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	180	0.3333
60	1	1	1	0	1	1	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-V <sub>dc</sub> /6	120	0.3333
61	1	1	1	1	0	0	0	0	0	0	0
62	1	1	1	1	0	1	V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /3	60	0.3333
63	1	1	1	1	1	0	-V <sub>dc</sub> /6	-V <sub>dc</sub> /6	V <sub>dc</sub> /3	-120	0.3333
64	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0

Eviriciyi üç fazlı ve dengeli kabul edersek, A, B ve C faz gerilimleri arasındaki ilişki Eş. 1' de verilmiştir:

$$V_{A0}(t) + V_{B0}(t) + V_{C0}(t) = 0 \quad (1)$$

Üç fazlı dengeli sistemler birbirine 90° faz farklı iki faz düzlemine aktarılabilir. Bu iki faz düzlemine  $\alpha$  ve  $\beta$  düzlemleri denilmektedir. DGM modülasyonu gerilimlerin  $\alpha$  ve  $\beta$  düzlemleri üzerinde uzay vektör gösterimine dayanır [15]. Bu gösterim Eş.2' de gösterilmiştir:

$$\vec{V}(t) = V_{\alpha}(t) + jV_{\beta}(t) \quad (2)$$

Üç fazlı değişkenler  $\alpha$  ve  $\beta$  değişkenlerine dönüştürülürse:

$$\begin{bmatrix} V_{\alpha}(t) \\ V_{\beta}(t) \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{A0}(t) \\ V_{B0}(t) \\ V_{C0}(t) \end{bmatrix} \quad (3)$$

Eş. 3, Eş. 2'ye aktarılırsa:

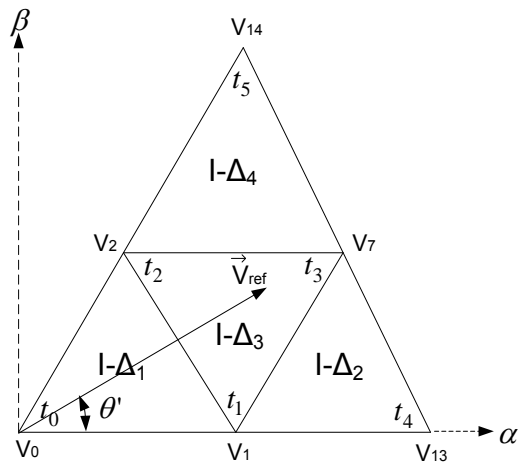
$$\vec{V}(t) = \frac{2}{3} \left( V_{A0}(t)e^{j0} + V_{B0}(t)e^{j\frac{2\pi}{3}} + V_{C0}(t)e^{j\frac{4\pi}{3}} \right) \quad (4)$$

Eş. 4 elde edilir [15].

Sektör I' e ait anahtarlama durumları Tablo 4' te verilmiştir. Sektör I' de dört bölge ( $\Delta_1, \Delta_2, \Delta_3, \Delta_4$ ) için üç fazın gerilim vektörleri Şekil 4'te gösterilmektedir. Üç fazın DGM dalga şekilleri ise Tablo 1'den yararlanarak oluşturulmuştur. Burada dalga şekilleri için simetrik dalga şekilleri kullanılmıştır.

**Tablo 4.** Sektör I' deki anahtarlama durumları sırası

SEKTÖR I							
Sektör I- $\Delta_1$		Sektör I- $\Delta_2$		Sektör I- $\Delta_3$		Sektör I- $\Delta_4$	
½ Saykıl Vektörleri		½ Saykıl Vektörleri		½ Saykıl Vektörleri		½ Saykıl Vektörleri	
$\vec{v}_0$	[ 11 00 00 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 00 01 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 00 01 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 00 01 ]
$\vec{v}_2$	[ 11 00 01 ]	$\vec{v}_{13}$	[ 10 01 01 ]	$\vec{v}_1$	[ 10 00 00 ]	$\vec{v}_{14}$	[ 10 10 01 ]
$\vec{v}_1$	[ 11 01 01 ]	$\vec{v}_1$	[ 11 01 01 ]	$\vec{v}_2$	[ 10 10 00 ]	$\vec{v}_2$	[ 10 10 11 ]
$\vec{v}_1$	[ 11 01 01 ]	$\vec{v}_1$	[ 11 01 01 ]	$\vec{v}_2$	[ 10 10 00 ]	$\vec{v}_2$	[ 10 10 11 ]
$\vec{v}_2$	[ 11 00 01 ]	$\vec{v}_{13}$	[ 10 01 01 ]	$\vec{v}_1$	[ 10 00 00 ]	$\vec{v}_{14}$	[ 10 10 01 ]
$\vec{v}_0$	[ 11 00 00 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 00 01 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 00 01 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 00 01 ]
½ Saykıl Vektörleri		½ Saykıl Vektörleri		½ Saykıl Vektörleri		½ Saykıl Vektörleri	
$\vec{v}_1$	[ 00 01 01 ]	$\vec{v}_1$	[ 00 01 01 ]	$\vec{v}_2$	[ 10 10 11 ]	$\vec{v}_2$	[ 10 10 00 ]
$\vec{v}_2$	[ 00 11 01 ]	$\vec{v}_{13}$	[ 10 01 01 ]	$\vec{v}_1$	[ 10 11 11 ]	$\vec{v}_{14}$	[ 10 10 01 ]
$\vec{v}_0$	[ 00 11 11 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 11 01 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 11 01 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 11 01 ]
$\vec{v}_0$	[ 00 11 11 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 11 01 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 11 01 ]	$\vec{v}_7$	[ 10 11 01 ]
$\vec{v}_2$	[ 00 11 01 ]	$\vec{v}_{13}$	[ 10 01 01 ]	$\vec{v}_1$	[ 10 11 11 ]	$\vec{v}_{14}$	[ 10 10 01 ]
$\vec{v}_1$	[ 00 01 01 ]	$\vec{v}_1$	[ 00 01 01 ]	$\vec{v}_2$	[ 10 10 11 ]	$\vec{v}_2$	[ 10 10 00 ]



**Şekil 4.** Sektör I' e ait uzay gerilim vektörleri



Sektör I- $\Delta_3$ 'deki gerilim vektörlerinin genlikleri,

$$\begin{aligned} V_1 &= \frac{1}{3} V_{dc} e^{j0} \\ V_7 &= \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} e^{j\pi/6} \\ V_2 &= \frac{1}{3} V_{dc} e^{j\pi/3} \\ V_{ref} &= V e^{j\theta'} \end{aligned} \quad (5)$$

$T_s$  örnekleme zamanı içerisinde gerilim vektörlerinin zaman süreleri;

$$\begin{aligned} V_{ref} T_s &= V_1 t_1 + V_7 t_3 + V_2 t_2 \\ T_s &= t_1 + t_3 + t_2 \end{aligned} \quad (6)$$

Eş. 5 Eş. 6'de yerine konulursa Eş. 7 elde edilir.

$$\begin{aligned} V_{ref} (\cos \theta' + j \sin \theta') T_s &= \\ \frac{1}{3} V_{dc} t_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} (\cos \frac{\pi}{6} + j \sin \frac{\pi}{6}) t_3 + \frac{1}{3} V_{dc} (\cos \frac{\pi}{3} + j \sin \frac{\pi}{3}) t_2 & \end{aligned} \quad (7)$$

Eş. 7'yi gerçek ve sanal kısımlarına ayırırsak Eş. 8 elde edilir.

$$\begin{aligned} \text{Gerçek: } V_{ref} \cos \theta' T_s &= \frac{1}{3} V_{dc} t_1 + \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} \cos \frac{\pi}{6} t_3 + \frac{1}{3} V_{dc} \cos \frac{\pi}{3} t_2 \\ \text{Sanal: } V_{ref} \sin \theta' T_s &= \frac{1}{\sqrt{3}} V_{dc} \sin \frac{\pi}{6} t_3 + \frac{1}{3} V_{dc} \sin \frac{\pi}{3} t_2 \end{aligned} \quad (8)$$

Gerilim vektörlerinin zaman süreleri Eş. 9'daki gibidir.

$$\begin{aligned} t_1 &= T_s (1 - 2k \sin \theta') \\ t_2 &= T_s [1 - 2k \sin(\frac{\pi}{3} - \theta')] \\ t_3 &= T_s [2k \sin(\frac{\pi}{3} + \theta') - 1] \end{aligned} \quad (9)$$

Eş. 9'daki k ifadesi  $\frac{\sqrt{3} V_{ref}}{V_{dc}}$  dir.

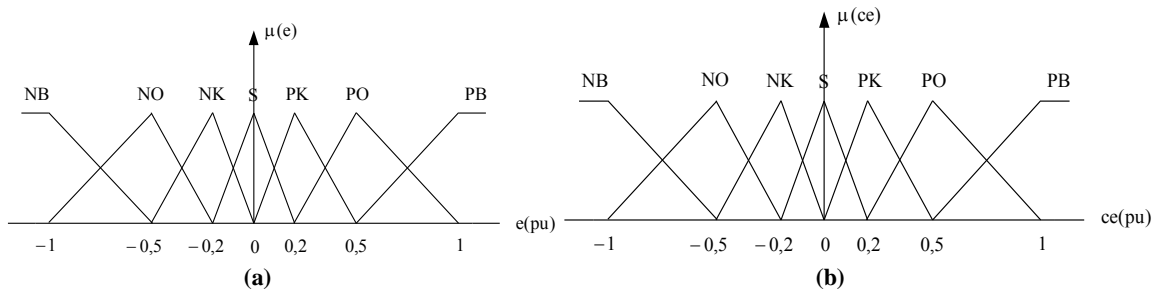
Her bir sektöre ait zaman süreleri hesaplanmış olup Tablo 5'te özetlenerek verilmiştir. Burada  $T_s$  örnekleme periyodu olup, k modülasyon indeksidir.  $\theta'$  ise 'a' gerilim vektörüne en yakın açı değeridir.

**Tablo 5.** Farklı bölgelerdeki gerilim vektörlerinin zaman süreleri

SEKTÖR	BÖLGE	ZAMAN SÜRELERİ
I-II-III-IV-V-VI	$\Delta_1$	$t_0=T_s[1-2k\sin(\theta'+\pi/3)]$ $t_1=2kT_s\sin(\pi/3-\theta')$ $t_2=2kT_s\sin\theta'$
	$\Delta_2$	$t_1=2T_s[1-k\sin(\theta'+\pi/3)]$ $t_3=2kT_s\sin\theta'$ $t_4=T_s[2k\sin(\pi/3-\theta')-1]$
	$\Delta_3$	$t_1=T_s(1-2k\sin\theta')$ $t_2=T_s[1-2k\sin(\pi/3-\theta')]$ $t_3=T_s[2k\sin(\theta'+\pi/3)-1]$
	$\Delta_4$	$t_2=2T_s[1-k\sin(\theta'+\pi/3)]$ $t_3=2kT_s\sin(\pi/3-\theta')$ $t_5=T_s(2k\sin\theta'-1)$

#### IV. BULANIK MANTIK DENETLEYİCİ

Bu uygulamada klasik PI denetleyici yerine bulanık mantık denetleyici kullanılmıştır. Bulanık mantık denetleyicide giriş ve çıkış değişkenlerine ait üyelik fonksiyonları oluşturulurken hassas denetim yapılabilmesi için değişim aralığının uygun değerlerde alınması gerekmektedir [21]. Giriş bilgilerine ait olan bulanık kümeyi/kümeleri ve üyelik derecesini tespit ederek, girilen sayısal değere negatif büyük, negatif orta, negatif küçük, pozitif büyük, pozitif orta, pozitif küçük gibi değerler atanmıştır. Referans akım ile gerçek yük akımı arasındaki akım hatası (e) ve akım hatasının değişimi (türevi) (ce) giriş değişkenleri olarak girilmiştir. Tablo 6' da ise Kural tablosu verilmiştir. Kural tablosu 7x7 boyutlarında olup toplam 49 adet kural tanımlanmıştır.



**Şekil 5 (a)** Akım hatasına ait üyelik fonksiyonu

**(b)** Akım hatası değişiminin üyelik fonksiyonu

**Tablo**

		Akım Hatası (e)						
		NB	NO	NK	S	PK	PO	PB
Akım Hatası Değişimi (ce)	NB	NB	NB	NB	NO	NO	NK	0
	NO	NB	NB	NO	NO	NK	0	PK
	NK	NB	NO	NO	NK	0	PK	PO
	S	NO	NO	NK	0	PK	PO	PO
	PK	NO	NK	0	PK	PO	PO	PB
	PO	NK	0	PK	PO	PO	PB	PB
	PB	0	PK	PO	PO	PB	PB	PB

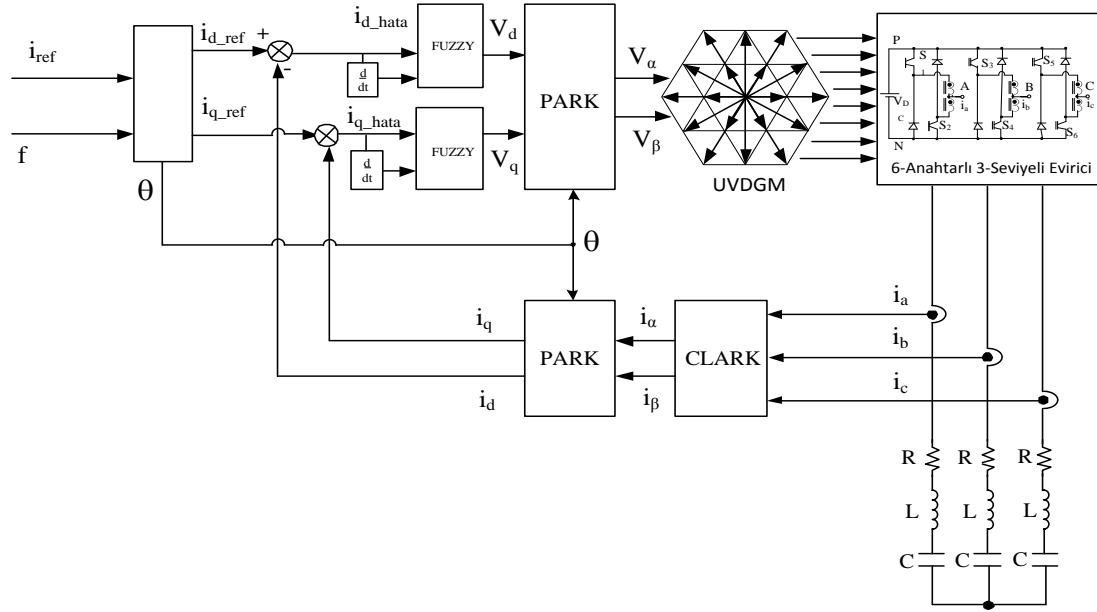
**6.Kural tablosu**

Bulanık çıkarımın sonucu bulanık bir kümedir. Bulanık mantık denetleyicinin çıkış ifadesinin sayısal değere dönüştürülmesi gerekmektedir. Bu nedenle, yapılan bu çalışmada Eş. 10'da verilen ağırlık merkezi metodu kullanılarak çıkış değeri hesaplanmıştır;

$$u_o = \frac{\sum_{i=1}^4 u_i \mu(u_i)}{\sum_{i=1}^4 \mu(u_i)} \quad (10)$$

Bu çıkış ifadesi Şekil 6' da verilen  $V_d$  ve  $V_q$  ifadelerinde kullanılmıştır.

RLC yük için çalışma yapısı verilen alan yönlendirmeli kontrol tekniğinin uygulama devre şeması Şekil 6'da verilmiştir.



Şekil 6. RLC yükün bulanık mantık kontrol uygulaması

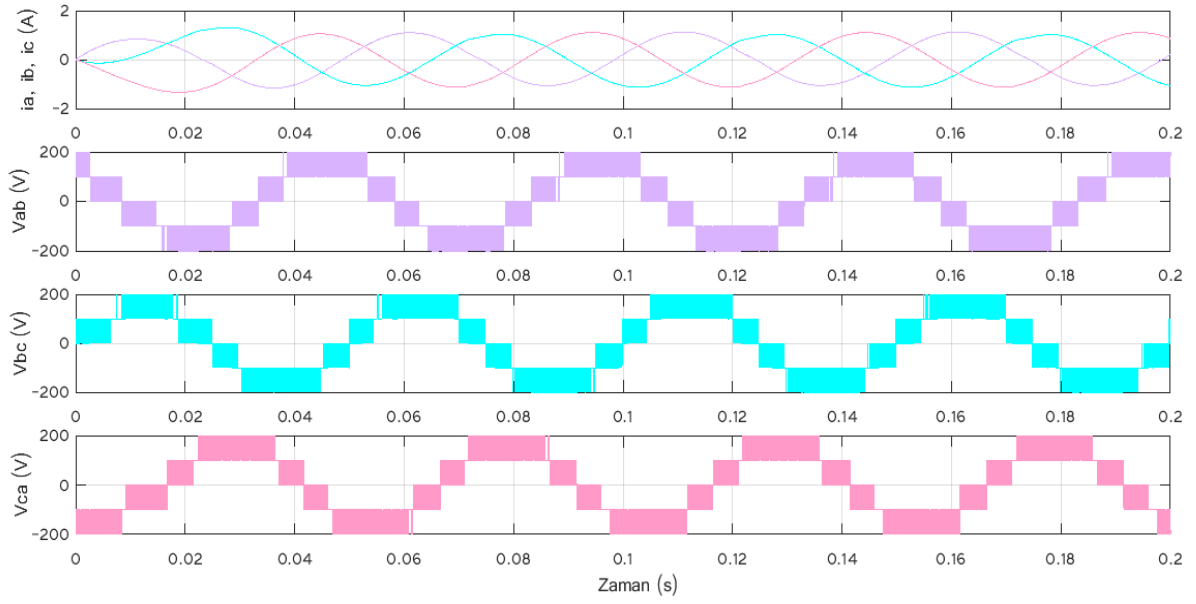
## V. BİLGİSAYARDA BENZETİM ÇALIŞMALARI

Benzetim çalışmaları Dev C++ programı kullanılarak yapılmış ve elde edilen verilere ait çizimler MATLAB programı ile gerçekleştirilmiştir. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler Tablo 7’ de verilmiştir.

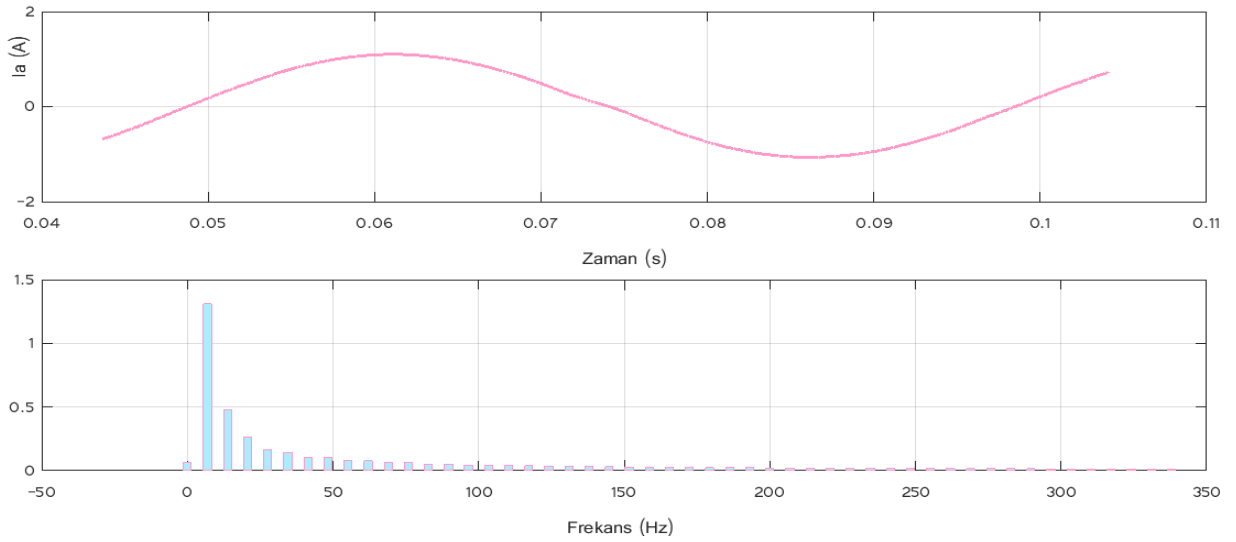
Tablo 7. Benzetim çalışmalarında kullanılan parametreler

DC Giriş Gerilimi	DGM Modeli	Yük Değerleri			Anahtarlama Frekansı
		R (Ω)	L (H)	C (F)	
200 V	Uzay Vektör DGM	15	0,7	0,01	10 kHz

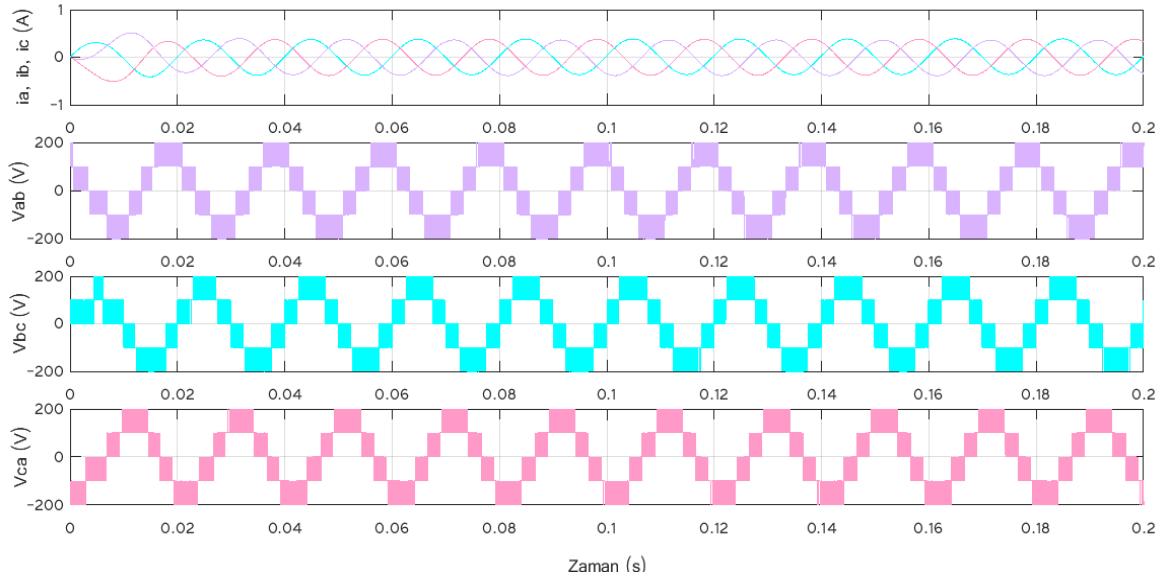
20 Hz frekans değeri için RLC yük değişkenlerinin zaman içerisinde aldığı değerler Şekil 7’de verilmiştir. 20 Hz için RLC yüke ait  $i_a$  akımı harmonik değerleri Şekil 8’ de verilmiştir. Benzer şekilde aynı yük için çalışmalar 50 Hz de tekrarlanmış olup, yük faz akımları ve fazlararası gerilim değerleri Şekil 9’ da verilmiştir. 50 Hz frekans değerinde faz akımında oluşan harmonik bileşenler Şekil 10’ da verilmiştir. Çalışmanın son adımında ise frekans 120 Hz’ e yükseltilmiştir. Bu frekans değerinde elde edilen yük faz akımları ve faz gerilimleri Şekil 11’ de verilmiştir. Faz akımına ait harmonik analiz ise Şekil 12’de verilmiştir.



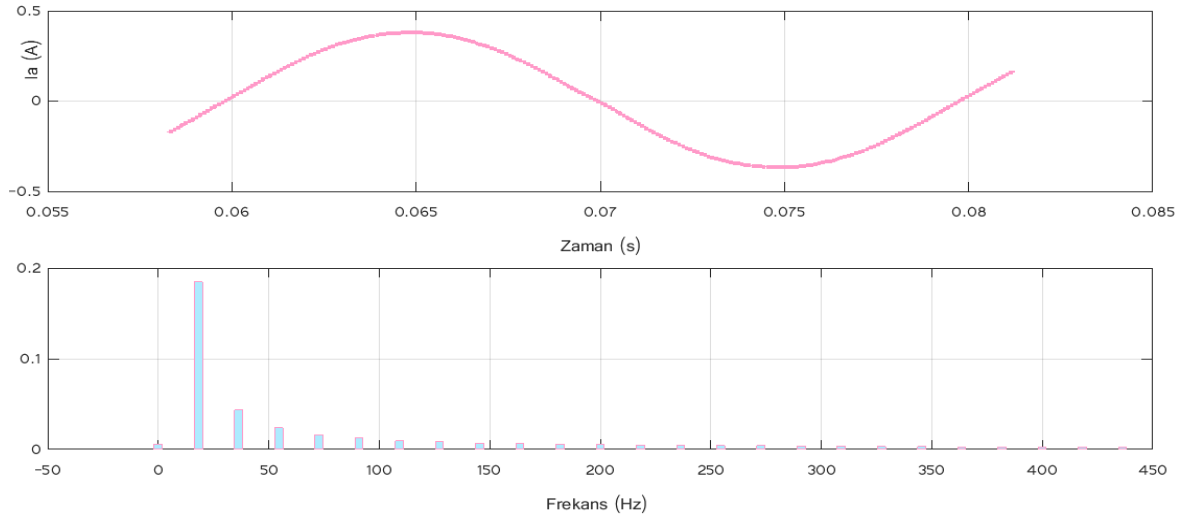
*Şekil 7. 20 Hz için RLC yük değişkenleri*



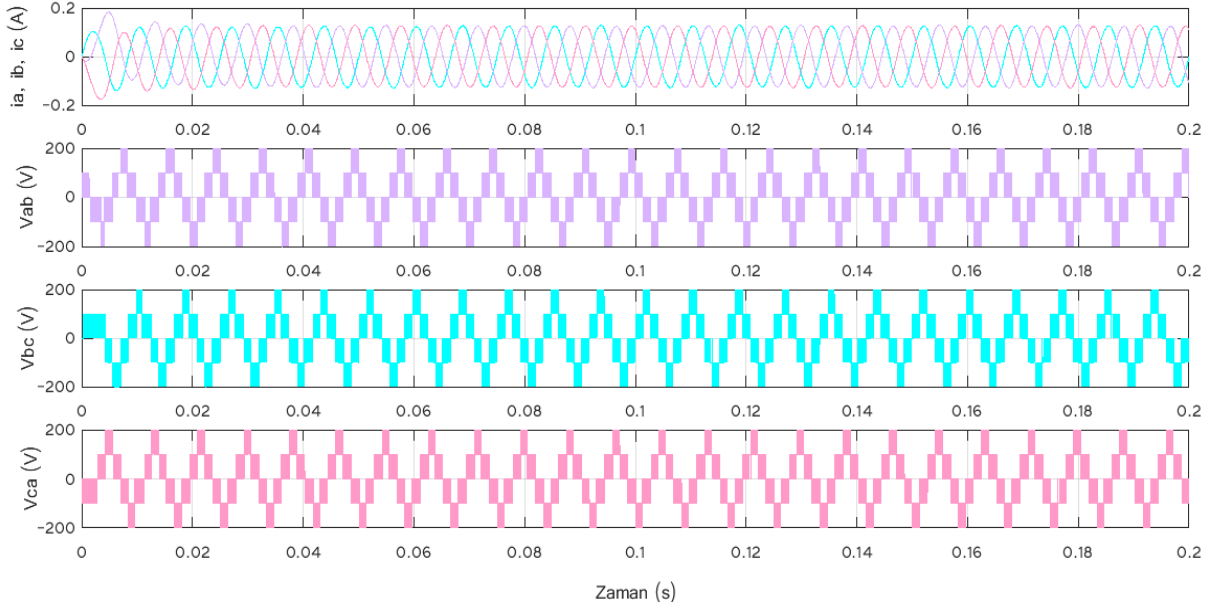
*Şekil 8. 20 Hz için RLC yüke ait  $i_a$  akımı harmonik değerleri*



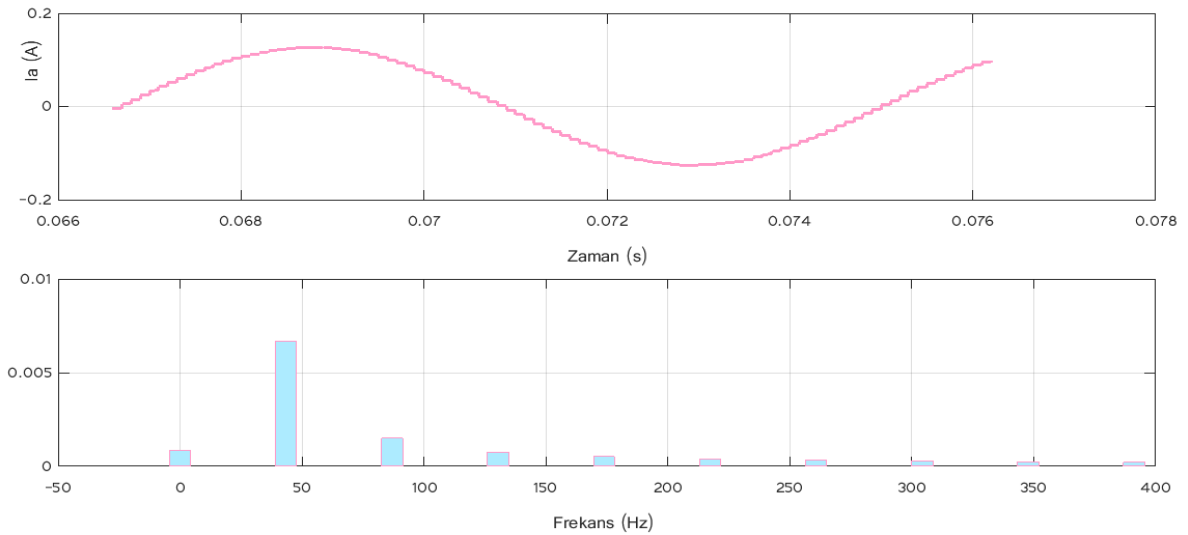
**Şekil 9.** 50 Hz için RLC yük değişkenleri



**Şekil 10.** 50 Hz için RLC yüke ait  $i_a$  akımı harmonik değerleri



**Şekil 11.** 120 Hz için RLC yük değişkenleri



**Şekil 12.** 120 Hz için RLC yüke ait  $i_a$  akımı harmonik değerleri

Elde edilen FFT grafikleri incelendiğinde, oluşan harmonik miktarlarının bir önceki çalışmada [14] (PI kontrollü RL yük) oluşan harmonik miktarlarından çok daha düşük değerler içerdiği görülmüştür. Bu başarının ardında bulanık mantık denetleyicinin büyük bir rolü olduğu fikrine varılmıştır.

## VI. SONUÇ VE ÖNERİLER

Bu çalışmada UVDGM tekniğinin başarısı RLC yük ile yüklenen bulanık mantık kontrollü 6-anahtarlı 3-seviyeli evirici üzerinde denenmiştir. Bulanık mantık denetleyici ile yarıiletken anahtarların çalışması için gereken sinyaller üretilmiştir. Bu sinyallerin üretilmesinde UVDGM tekniği kullanılmıştır. Kullanılan DGM tekniği ile çıkış akımına ait harmonik bileşenlerinin azaltılması amaçlanmıştır. Yükte oluşan harmonik değerler fast fourier transform (FFT) ile analiz edilmiştir.

Bulanık mantık kontrollü RLC yüke ait farklı frekans (20 Hz, 50 Hz, 120 Hz) değerlerinde elde edilen harmonik miktarlarının oldukça düşük olduğu gözlenmiştir. Bu durum, UVDGM tekniğinin bulanık mantık kontrollü 6-anahtarlı 3-seviyeli evirici için oldukça uygun bir teknik olduğunu göstermiştir.

## VII. KAYNAKLAR

- [1] Nabae A., Takahashi I., Akagi H. *IEEE Transactions on Industry Applications* **17(5)** (1981) 518-523.
- [2] Lai J. S., Peng F. Z. *IEEE Transactions on Industry Applications* **32(3)** (1996) 509-517.
- [3] Teodorescu R., Baabjerg F., Pedersen J. K., Cengcelci E., Sulistijo S.U. *Multilevel converters- a Survey. Proceedings of the 8<sup>th</sup> European Conference on Power Electronics and Applications (EPE'99)*, (1999).
- [4] Lewis E. A., Shakweh Y., *Assessment of medium taje PWM VSI topologies for multimegawatt variable speed drives a lications*, **IEEE 30th Annual Conference on Power Electronics Specialist, PESC'99**, (1999), 965-971.
- [5] Li L., Czarkowski D., Liu Y., Pillay P., *Multilevel Space Vector PWM Technique Based on Phase-Shift Harmonic Su rression*, **A lied Power Electronics Conference and Exposition. APEC 2000. Fifteenth Annual IEEE**, (2000), 535-541.
- [6] Hava A. M., Kerkman R. J., Lipo T. A., *IEEE Transactions on Power Electronics*, **14:** (1999), 49-61.
- [7] Tuncer S., *Uzay Vektör Darbe Genişlik Modülasyonu Kullanan Beş Seviyeli İnverter Tasarımı ve Uygulaması*, Doktora Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ-Türkiye (2004).
- [8] Celanovic N., Boroyevich D., *IEEE Transactions on Industry Applications*, **(37) 2** (2001) 637-641.
- [9] Wei S., Wu B., Li F., Liu C., *A General Space Vector PWM Control Algorithm for Multilevel Inverters*, **A lied Power Electronics Conference and Exposition. APEC'03. Eighteenth Annual IEEE** (2003) 562-568.
- [10] Bin, W. *High-Power Converters And AC Drives*, Wiley, J, Sons, I., New Jersey, (2006).
- [11] Holmes, D. G., Lipo, T. A., *Pulse Width Modulation for Power Converters*, New Jersey (2003).
- [12] Seo J. H., Choi C. H., Hyun D. S., *IEEE Transactions on Power Electronics*, (16) 4 (2001) 545-550.



- [13] Prats M. M., Carrasco J. M., Franguelo L. G., *Effective Space Vector Modulation Algorithm for Multilevel Converters*, **IECON 02, Industrial Electronic Society, IEEE 2002 28<sup>th</sup> Annual Conference**, (2002) 3129-3133.
- [14] Saygın A., Kerem A., *Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi* **22(5)** (2016) 350-353.
- [15] Vafakhah B. *Multilevel Space Vector PWM for Multilevel Coupled Inductor Inverters*. PhD Thesis, Department of Electrical and Computer Engineering, Alberta-Canada, (2010).
- [16] Ewanchuk J., Salmon J., Knight A., *Performance of a High Speed Motor Drive System Using a Novel Multi-level Inverter Topology*, **Industry Applications Society Annual Meeting, IAS'08, IEEE**, (2008) 1-8.
- [17] Salmon J., Ewanchuk J., Knight A., **Industry Applications, IEEE Transactions on Industry Applications** 45(6) (2009), 2001-2009.
- [18] Vafakhah B., Masiala M., Salmon J., and Knight A. *M.Space-Vector Pwm For Inverters With Split-Wound Coupled Inductors*, in **Electric Machines and Drives Conference, 2009. IEMDC '09. IEEE International**, (2009) 724-731.
- [19] Vafakhah B., Knight A., Salmon j., *Reducing Losses in Multilevel Coupled Inductor Inverters Using Interleaved Discontinuous SVPWM*, **Applied Power Electronics Conference and Exposition (APEC), 2010 Twenty-Fifth Annual IEEE**, (2010), 2013-2020.
- [20] Vafakhah B., Salmon J. and Knight A. M., *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. **46 (5)** (2010)2015-2024.
- [21] Dursun M., Saygın A.,*Pamukkale Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi*, Vol. **12 (2)** (2006)151-160.