

# Beş Seviyeli Diyot Tutmalı Eviricide Darbe Genişlik Modülasyonu Anahtarlama Tekniği İle Harmoniklerin Azaltılması

Engin Özdemir<sup>1</sup>

Şule Özdemir<sup>2</sup>

<sup>1,2</sup>Elektrik Eğitimi Bölümü, Kocaeli Üniversitesi, Umuttepe Kampusu, 41380, Kocaeli

<sup>1</sup>e-posta: eozdemir@kou.edu.tr

<sup>2</sup>e-posta: sozaslan@kou.edu.tr

## Özet

Çok seviyeli eviriciler, yüksek güçlü ve orta gerilim uygulamalarında geleneksel eviricilere alternatif olarak geliştirilmektedir. Bu çalışmada, beş-seviyeli diyot-tutmalı eviricinin Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) anahtarlama tekniği ile harmoniklerinin azaltılması gerçekleştirilmektedir. Matlab-Simulink ve PSIM yazılımları üzerinden yapılan bilgisayar benzetimi sonuçları ve 10 kW'lık diyot tutmalı çok seviyeli evirici üzerinde yapılan deneysel uygulama sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmektedir.

## 1. Giriş

Geçtiğimiz yıllarda bazı endüstriyel uygulamalarda daha yüksek güçlü cihazlara ihtiyaç duyulmaya başlandı. Bazı orta gerilim motor sürücüler ve şebeke uygulamaları, megawat güç seviyelerine gereksinim duymaktadır. Bir orta gerilim şebekesine, sadece bir güç yarı iletken anahtarın doğrudan bağlanması mümkün değildir. Bunun sonucunda, çok-seviyeli güç dönüştürücüler, yüksek güç ve orta gerilim uygulamalarında alternatif olarak kullanılmaktadır. Yüksek güçlü uygulamalarda, foto-voltaik, rüzgar türbini ve yakıt pili gibi yenilenebilir enerji kaynakları, kolayca çok-seviyeli dönüştürücü sistemine bağlanabilmektedir.

Çok seviyeli eviriciler, çok sayıda yarı iletken ve kondansatörlü gerilim kaynağını kullanarak basamak biçiminde çıkış gerilim dalga şekli üretmektedir. Çok-seviyeli dönüştürücü kavramı ilk olarak üç seviyeli dönüştürücü ile 1975 yılında ortaya çıkmıştır [1]. Daha sonra birkaç çok-seviyeli dönüştürücü topolojisi geliştirilmiştir. Yüksek güç seviyelerine ulaşabilen çok-seviyeli dönüştürücülerin temel biçimi; basamak gerilim dalga şeklinin sentezini yaparak güç dönüşümünü oluşturmak için, birkaç adet daha düşük seviyeli doğru gerilim kaynağı ile birlikte çok sayıda güç yarıiletkenlerinin kullanılmasından oluşmaktadır.

Kondansatörler, bataryalar ve yenilenebilir enerji kaynakları, çok sayıdaki güç kaynağı olarak kullanılabilir. Çok seviyeli eviricilerin bazı önemli uygulama alanları; orta gerilim ayarlanabilir hızlı motor sürücüler, statik var kompanzasyonu, dinamik gerilim regülasyonu, harmonik filtreleme ve yüksek doğru gerilim ile enerji nakli olarak sayılabilir. Yakın gelecekte, enerji üretim ve dağıtımında merkezi uygulamalar yerine dağıtılmış enerji kaynaklarının kullanımının artması beklenmektedir. Çok seviyeli eviricilerin, yenilenebilir enerji kaynaklarından üretilen enerjinin dönüştürülmesinde önemli rol alması beklenmektedir.

Çok seviyeli dönüştürücülerin, geleneksel iki seviyeli dönüştürücülere göre üstünlükleri aşağıda sıralanmaktadır [2].

1. Orta ve yüksek güç uygulamalarına uygun,
2. Basamak şeklinde çıkış dalga şekli.
3. Düşük bozunumlu giriş dalga şekli.
4. Temel veya yüksek frekanslı anahtarlama imkanı.
5. Yüksek enerji dönüşüm verimi

Bununla birlikte çok seviyeli dönüştürücülerin aşağıdaki bazı dezavantajları vardır.

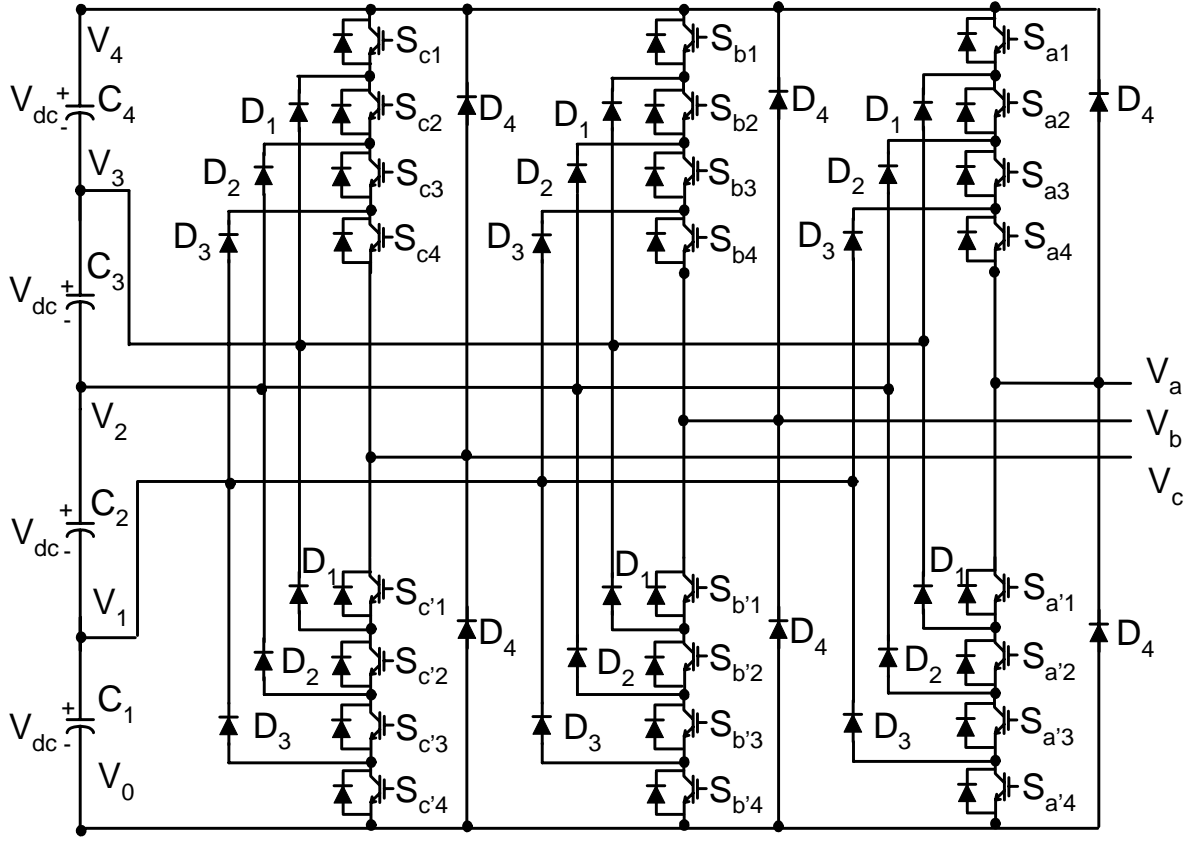
1. Çok sayıda yarı iletken anahtara ihtiyaç duymaktadır.
2. Tüm sistem karmaşık ve pahalıdır.

Birkaç farklı çok seviyeli dönüştürücü devre şekli geliştirilmiştir. Bunlardan en önemlileri, kaskat H köprü evirici, diyot tutmalı ve kondansatör bağlamalı olarak sayılabilir. Diyot tutmalı evirici, ilk olarak üç-seviyeli bir eviricide kullanıldığında, orta noktası aynı zamanda nötre bağlandığından, nötr bağlantılı evirici olarak da adlandırılmıştır. Bu çalışmada, beş-seviyeli diyot-tutmalı eviricinin DGM anahtarlama ile harmoniklerinin azaltılması bilgisayar benzetimi ve deneysel uygulama sonuçları karşılaştırılmalı olarak verilmektedir.

## 2. Diyot-tutmalı Evirici

Üç fazlı beş-seviyeli bir diyot-tutmalı evirici devresi Şekil 1'de görülmektedir. Üç fazın her bir fazı, 4 ayrı kaynak ile 5 ayrı seviyeye ayrılmış ve ortak bir doğru akım devresini paylaşmaktadır. Her bir anahtarlama elemanı üzerine düşen gerilim, tutma diyotları üzerinden geçerek doğru akım (DA) kaynak gerimi ( $V_{DA}$ ) ile sınırlanmaktadır. Tablo 1'de DA bara negatif ucu  $V_0$  referans alınarak, eviricinin tek bir fazı için mümkün olan çıkış gerilim seviyeleri sıralanmaktadır. Tablo 1'de durum "1" anahtar kapalı durum "0" anahtar açık olarak belirtilmektedir. Her bir faz birbirine karşılık gelen 4 farklı anahtar çiftine sahiptir [3].

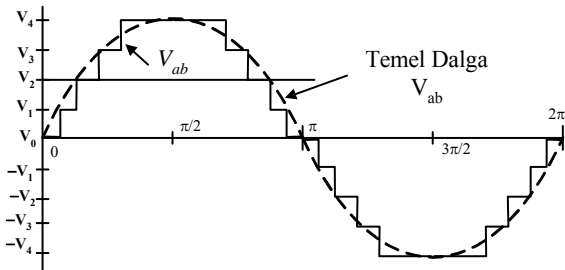
Şekil 2'de beş-seviyeli eviricinin hat gerilimi dalga şekli görülmektedir. Hat gerilimi ( $V_{ab}$ ), a ve b faz gerilimlerinin farkından oluştuğundan 9 seviyeli bir dalga şekli biçimindedir. Bunun anlamı;  $m$ -seviyeli bir diyot-tutmalı evirici,  $m$ -seviyeli çıkış faz gerilimi ve  $(2m-1)$ -seviyeli çıkış hat gerilimine sahiptir.



Şekil 1. Beş-seviyeli diyot-tutmalı evirici devresi.

Tablo 1. Beş-seviyeli diyot tutmalı evirici gerilim seviyeleri ve anahtarlama durumları.

Gerilim $V_{a0}$	Anahtarlama Durumu							
	$S_{a1}$	$S_{a2}$	$S_{a3}$	$S_{a4}$	$S_{a'1}$	$S_{a'2}$	$S_{a'3}$	$S_{a'4}$
$V_4 = 4V_{dc}$	1	1	1	1	0	0	0	0
$V_3 = 3V_{dc}$	0	1	1	1	1	0	0	0
$V_2 = 2V_{dc}$	0	0	1	1	1	1	0	0
$V_1 = V_{dc}$	0	0	0	1	1	1	1	0
$V_0 = 0$	0	0	0	0	1	1	1	1



Şekil 2. Beş-seviyeli eviricinin çıkış hat gerilimi dalga şekli.

Şekil 2’de görülen 4 farklı doğru gerilim kaynağı üzerinden beslenen basamak biçimindeki beş-seviyeli evirici çıkış dalga şekli Fourier açılımı aşağıda verilmektedir.

$$V(t) = \sum_{n=1,3,5,\dots}^{\infty} \frac{4V_{DC}}{n\pi} (\cos(n\theta_1) + \cos(n\theta_2) + \dots + \cos(n\theta_4)) \sin(n\omega t) \quad (1)$$

Eşitlik (1)’de  $V(t)$  çıkış hat gerilimini ve  $V_{DC}$  ise her bir DA kaynağı belirtmektedir.

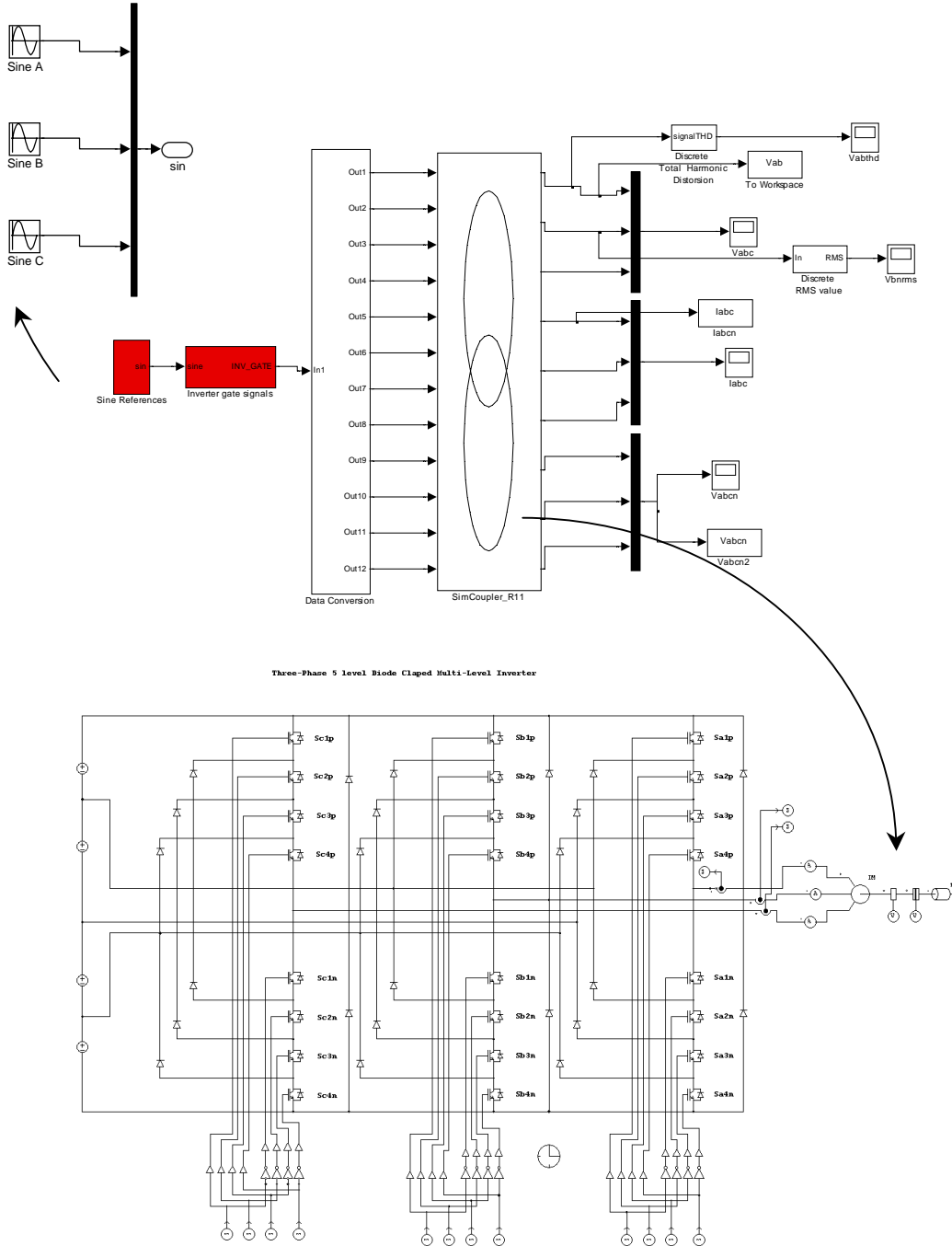
### 3. DGM Anahtarlama Benzetim Sonuçları

Beş seviyeli eviricinin DGM anahtarlama tekniği ile benzetimi için Matlab-Simulink ve PSIM yazılımları birlikte kullanılmıştır. DGM anahtarlama sinyalleri Matlab-Simulink programında üretilmiş ve SimCoupler modülü yardımıyla güç devresinin kurulduğu PSIM yazılımına gönderilmiştir [4].

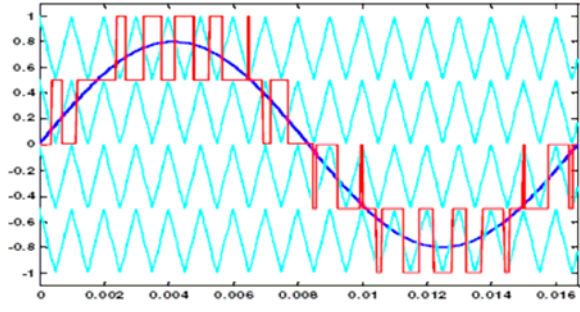
Beş-seviyeli eviricinin Matlab-Simulink ve PSIM programlarında oluşturulan benzetim devreleri blok diyagramları Şekil 3’de görülmektedir. PSIM programında oluşturulan beş-seviyeli evirici çıkışına üç fazlı bir asenkron motor bağlanmıştır.

DGM anahtarlama yönteminde, referans sinüs sinyalleri her bir doğru gerilim seviyesinde kazanca sahip 4 farklı yüksek frekanslı üçgen sinyalin karşılaştırılması ile üretilen anahtarlama sinyalleri Şekil 4'de görülmektedir. Bu yöntemde, her bir gerilim seviyesinin darbe boşluk oranı referans sinüs sinyali genliği ve taşıyıcı üçgen dalga sinyali genliğinin oranı tarafından belirlenmektedir. Bu çalışmada, 50 Hz çıkış gerilimi üretmek üzere, 1050 Hz anahtarlama frekansı kullanılmaktadır. Oldukça düşük anahtarlama frekansında bile %12 düzeyinde harmonik dağılımı elde edilmektedir.

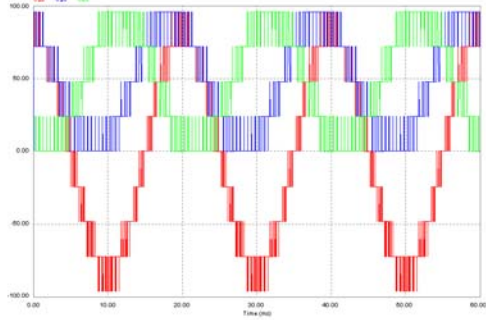
Üç fazlı çıkış gerilimini oluşturan faz ve hat gerilim dalga şekilleri Şekil 5'de verilmektedir. Hat gerilimi dalga şeklinin faz gerilimlerinin farkından meydana geldiği açıkça görülmektedir. Üç fazlı evirici çıkış hat gerilimi dalga şekli ve harmonik dağılımı 50 Hz için Şekil 6'da verilmektedir. Çıkış gerilimi toplam harmonik bozulma oranı %12 civarındadır. Harmonik dağılımdan da görüldüğü gibi çıkış gerilimi küçük bir filtre ile kolayca yok edilebilen yüksek dereceli harmoniklere sahiptir. Yük akım toplam harmonik dağılımı %2 olarak ölçülmüştür.



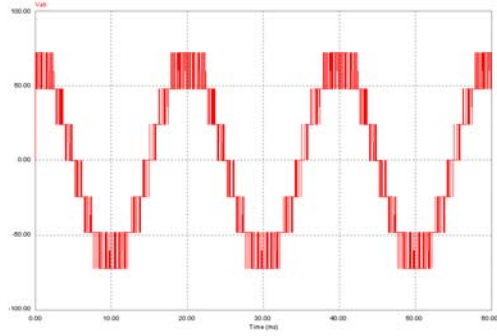
Şekil 3. Beş-seviyeli evirici benzetim blok diyagramları.



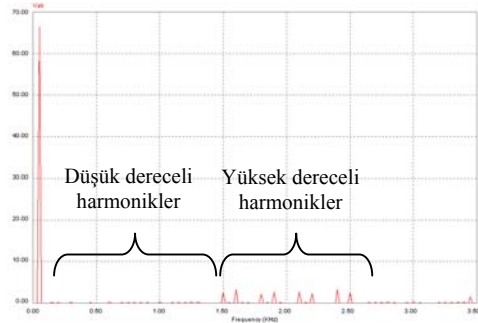
Şekil 4. DGM anahtarlama sinyalleri.



Şekil 5. Evirici çıkışı faz ve hat gerilimi dalga şekilleri.



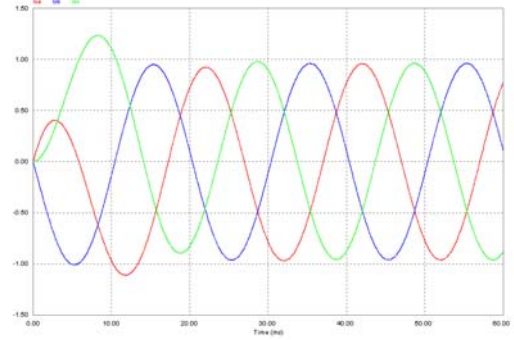
(a)



(b)

Şekil 6. Beş-seviyeli evirici a) çıkış gerilimi dalga şekli ve b) harmonik dağılımı.

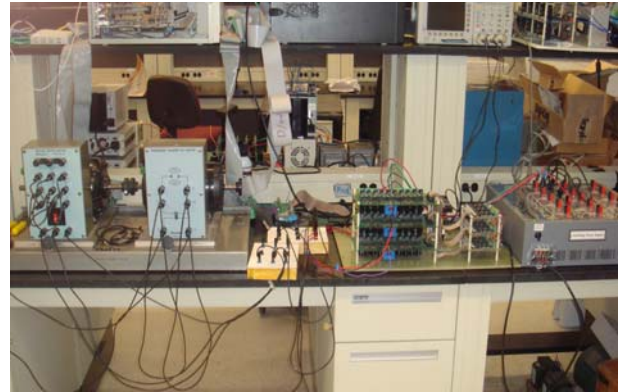
Üç fazlı evirici devresi çıkışına bağlanan motor akımı değişimi Şekil 7'de görülmektedir. Motor akımı dalga şekli sinüs biçimindedir.



Şekil 7. Motor akımı dalga şekli.

#### 4. Deneysel Çalışmalar

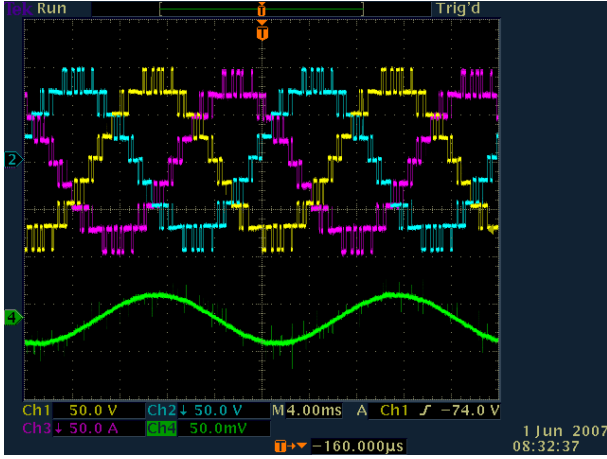
Önerilen DGM anahtarlama tekniğinin deneysel uygulaması için Şekil 8'de görülen 10 kW'lık üç fazlı beş seviyeli diyot tutmalı bir evirici devresi kurulmuştur. Beş seviyeli diyot tutmalı evirici çıkışına yük olarak 1/3 Hp gücünde üç fazlı bir asenkron motor bağlanmıştır.



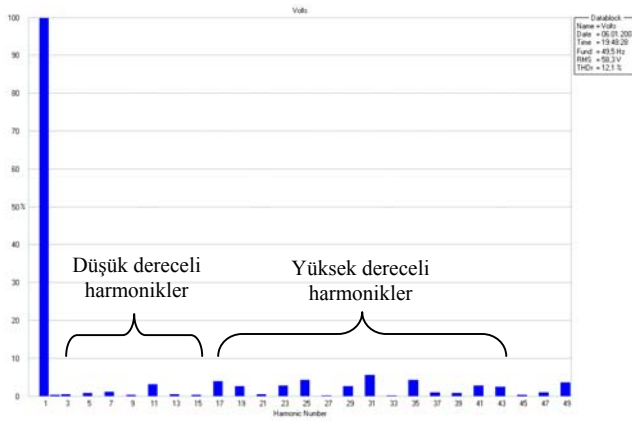
Şekil 8. Beş seviyeli diyot tutmalı evirici devresi deneysel düzenek resmi.

Deneysel uygulama düzenekinin anahtarlama sinyalleri Opal-RT-Technologies Inc. Firması [5] ürünü olan RT-LAB adlı gerçek zamanlı bilgi işleme platformu tarafından üretilmektedir. Bu sistem ile Matlab-Simulink yazılımında oluşturulan blok diyagramların C koduna dönüştürülerek gerçek zamanlı uygulamasının yapılması mümkün olmaktadır. Uygulama çalışmasında üretilen gerçek zamanlı kodların basamak süresi 10 mikro saniye olarak hesaplanmaktadır.

Deneysel uygulama sonuçlarında elde edilen üç fazlı beş seviyeli diyot tutmalı evirici devresinin 50 Hz frekanstaki çıkış gerilimi ve yük akımı değişimi Şekil 9'da verilmektedir. %12 toplam harmonik içeren çıkış gerilimi harmonik dağılımı ise Şekil 10'da görülmektedir.



Şekil 9. Üç fazlı evirici çıkış gerilimi ve akımı dalga şekli.



Şekil 10. Üç fazlı evirici çıkış gerilimi harmonik dağılımı.

Deneysel uygulama düzeneği üzerinden elde edilen grafiklerin ve harmonik dağılımının bilgisayar benzetimi sonuçları ile örtüştüğü görülmektedir.

## 5. Sonuçlar

Bu çalışmada beş seviyeli diyot-tutmalı eviricinin DGM anahtarlama tekniği ile harmoniklerinin azaltılması incelenmektedir. SimCoupler modülü yardımıyla Matlab/Simulink ve PSIM yazılımları ortak olarak benzetim çalışmasında kullanılmıştır. DGM anahtarlama sinyalleri Matlab üzerinden alınarak SimCoupler modülü yardımıyla güç devresinin oluşturulduğu PSIM yazılımına gönderilmiştir. Beş seviyeli diyot tutmalı eviricinin, DGM anahtarlama tekniği ile çıkış gerilimi harmoniklerinin azaltıldığı benzetim sonuçları ve deneysel olarak ortaya konmuştur. Önerilen yöntem yardımıyla, diyot tutmalı çok seviyeli evirici yapısı kullanılarak giriş kısmına güneş pilleri ve yakıt pilleri gibi yenilenebilir enerji kaynakları bağlanarak enerji üretmek mümkün gözükmemektedir. Böyle bir sistem yardımıyla yüksek güç dönüşüm verimi sağlanabilmektedir.

## 6. Teşekkür

Bu çalışmada, Engin Özdemir TÜBİTAK R2219 doktora sonrası araştırma desteği programı kapsamında desteklenmiştir.

## 7. Kaynakça

- [1] J. S. Lai, F. Z. Peng, Multilevel Converters-A New Breed of Power Converters, *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 32, No.3, p. 509-517, 1996.
- [2] L. M. Tolbert, F. Z. Peng, and T. G. Habetler, "Multilevel converters for large electric drives," *IEEE Trans. Ind. Application*, vol. 35, no. 1, p. 36-44, Jan./Feb. 1999.
- [3] S. Khomfoi and L. M. Tolbert, *Power Electronics Handbook*, Multilevel Power Converters - Chapter 17, 2nd Edition Elsevier, 2007, ISBN 978-0-12-088479-7, pp. 451-482, 2007.
- [4] Powersim Inc, *PSIM User's Guide Version 6*, Powersim Inc, 2003, <http://www.powersimtech.com>.
- [5] Opal-RT technology Inc, *RT-LAB User's manual*, Opal-RT technology Inc, Version 6, 2001, <http://www.opal-rt.com>.
- [6] D.W. Kang, Y. H. Lee, B. S. Suh, An Improved Carrier-Based SVPWM Method Using Leg Voltage Redundancies in Generalized Cascaded Multilevel Inverter Topology, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol.18, No.1, pp. 180-187, 2003.
- [7] J. Chiasson, L.M. Tolbert, K.J. Mckenzie, Z. Du, Control of a Multilevel Converter Using Resultant Theory, *IEEE Trans on Control Systems Technology*, Vol.11, No.3, p. 345-354, 2003.
- [8] K. Fujii, U. Schwarzer, Comparison of Hard-Switched Multi-Level Inverter Topologies for STATCOM by Loss-Implemented Simulation and Cost Estimation, *Power Electronics Specialists Conference, PESC '05*. p. 340 – 346, 2005.
- [9] N. Kimura, T. Morizane, T. Taniguchi, T. Oono, Study of Multi-Pulse PWM for Multi-Level BTB for Distributed Generation System, *European Conference on Power Electronics and Applications*, 2005.
- [10] Z. Du, L.M. Tolbert, J.N. Chiasson, Active Harmonic Elimination for Multilevel Converters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 21, No. 2, p. 459-469, 2006.