

## MODÜLER ÇOK SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLERİN İNCELENMESİ

Ayhan DÜNDAR<sup>1</sup>, Mehmet UÇAR<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Düzce Üniversitesi, FBE, Elektrik Elektronik ve Bilg. Müh. ABD, 81620, Düzce, TÜRKİYE

<sup>2</sup>Düzce Üniversitesi, Mühendislik Fak., Elektrik Elektr. Müh. Böl., 81620, Düzce, TÜRKİYE  
mehmetucar@duzce.edu.tr

**Özet-** Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler (MÇSD), farklı gerilim ve güç seviyesi gerektiren uygulamalar için modüler tasarımı ve kolay adaptasyonu ile son yıllarda endüstride oldukça ilgi çekmektedir. Bu çalışmada, MÇSD yapıları, alt modüllerin çalışma prensipleri ve anahtarlama işaretlerini üretmek için kullanılan çok taşıyıcı darbe genişlik modülasyonu (PWM) yöntemleri incelenmiştir. Ayrıca üç fazlı beş seviyeli MÇSD denetimine ilişkin sonuçları değerlendirmek için MATLAB/Simulink benzetim sonuçları sunulmuştur.

**Anahtar Kelimeler-** Modüler çok seviyeli dönüştürücü, çok taşıyıcı darbe genişlik modülasyonu, alt modül.

## INVESTIGATION OF A MODULAR MULTILEVEL CONVERTERS

**Abstract-** Modular Multilevel Converters (MMC) have received a lot of attention in industry in the recent years due to its modular design and simple adaption for applications that require different voltage and power level. In this study, MMC structures, operating principles of sub-modules and multi-carrier pulse width modulation (PWM) methods for generating switching signals have been studied. In addition, MATLAB/Simulink simulation results are presented in order to evaluate the results of the three-phase five-level MMC control.

**Key Words-** Modular multilevel converters, multi-carrier pulse width modulation, sub-module.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

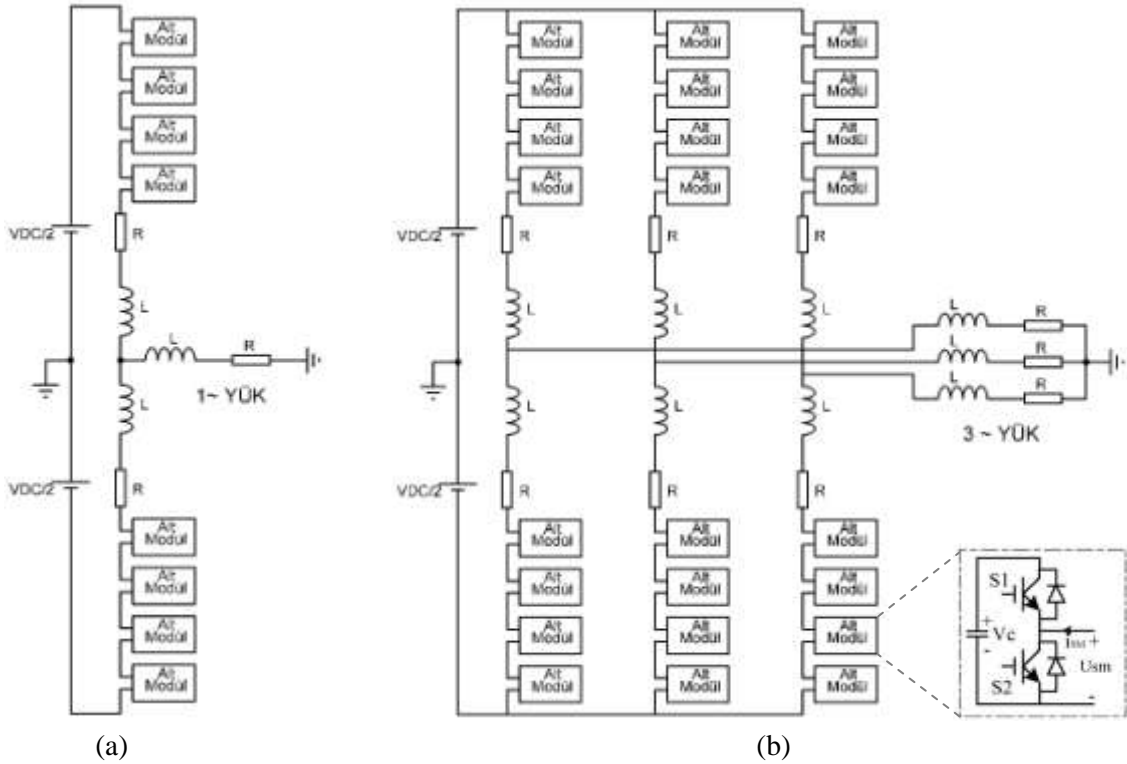
Son yıllarda gerek ülkemizde gerek dünyada ekonominin gelişmesi ile refah düzeyinin artması elektrik enerjisine olan ihtiyacı artırmıştır. Dolayısıyla artan talebi karşılamak adına yenilenebilir enerji kaynaklarına olan yönelim önem kazanmıştır. Özellikle de bu tür enerji kaynaklarının üretilmesinden son tüketiciye ulaştırılmasına kadar olan süreçte enerji verimliliği en önemli kıstas olmuştur. Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler (MÇSD), yüksek gerilim doğru akım (HVDC) uygulamaları, orta gerilim motor sürücüler, rüzgâr enerjisi sistemleri ve statik kompanzasyon (STATCOM) gibi yüksek güçte ve yüksek gerilimde AC/DC veya DC/AC dönüşümü için güç elektroniği dönüştürücüsü olarak son yıllarda ön plana çıkmıştır [1-2]. Çok seviyeli dönüştürücü yapılarının tarihi 1970'lere kadar uzanmaktadır. Baker ve Bannister

yapının ilk örneklerini vermiştir [3]. MÇSD yapısı ise Lesnicar ve Marquardt tarafından 2003 yılında tanıtılmıştır [4]. Geniş güç ve gerilim aralığında çalışabilmeleri, çıkış gerilim dalga şekillerinin ideal sinüse yaklaşması ve dolayısıyla düşük harmonik bozulmaya sahip olmaları araştırmacıların ilgisini çekmiştir [5]. Yüksek enerji verimleri, modüler yapıları, hızlı ve hassas olarak elektrik enerjisinin dönüşümünü sağlamaları sayesinde, özellikle megavat ve üstü güçlerde, yüksek gerilim seviyelerinde kullanım bulmaya ve yaygınlaşmaya başlamışlardır [6].

## 2. MODÜLER ÇOK SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLER (MODULAR MULTILEVEL CONVERTERS)

Temel olarak gerilim kaynaklı tip dönüştürücüler olan MÇSD'ler transformatörler olmadan yüksek veya orta gerilim güç dönüşümü için tasarlanmış yeni nesil çok seviyeli dönüştürücü türlerinden biridir [5, 7]. MÇSD'lerin ana özelliği birden fazla DC gerilim seviyelerini birbirine ekleyerek AC gerilim oluşturma ilkesine dayanır. MÇSD'ler tek yıldız köprü hücreleri (Single Star Bridge Cells, SSBC), tek üçgen köprü hücreleri (Single Delta Bridge Cells, SDBC), çift yıldız kıyıcı hücreleri (Double Star Chopper Cells, DSCC) ve çift yıldız köprü hücreleri (Double Star Bridge Cells, DSBC) olarak sınıflandırılmıştır [1].

Şekil 1(a) ve (b)'de bir fazlı ve üç fazlı beş seviyeli çift yıldız kıyıcı hücreli MÇSD yapısı görülmektedir. MÇSD'yi oluşturan her faz, faz bacağı olarak adlandırılır ve her faz bacağı iki koldan oluşmaktadır. Her kolda bulunan alt modül sayısı N adet olduğunda dönüştürücü faz-nötr çıkış gerilimi  $N+1$  ve faz-faz çıkış gerilimi  $2N+1$  seviyeden oluşmaktadır [8]. Şekil 1(a) ve (b)'de her kolda 4 alt modül, alt ve üst kollar arasında iki ayrı tampon indüktörü ile birbirine eşdeğer iki ayrı akım sınırlama direnci bulunmaktadır [8-9]. Tampon indüktörleri kısa devre ve arıza durumunda AC akımını sınırlayarak sistemi yüksek akımdan korumakta ve normal çalışma durumunda ise pasif filtre olarak çalışmaktadır [8]. Dönüştürücünün DC barası her kolun  $V_{DC}/2$  kısmını kapsayacak şekilde bağlanmaktadır.



Şekil 1. Beş seviyeli MÇSD yapısı devre şeması, a) bir faz, b) üç faz (five-level MMC topology circuit diagram, a) single phase, b) three phase)

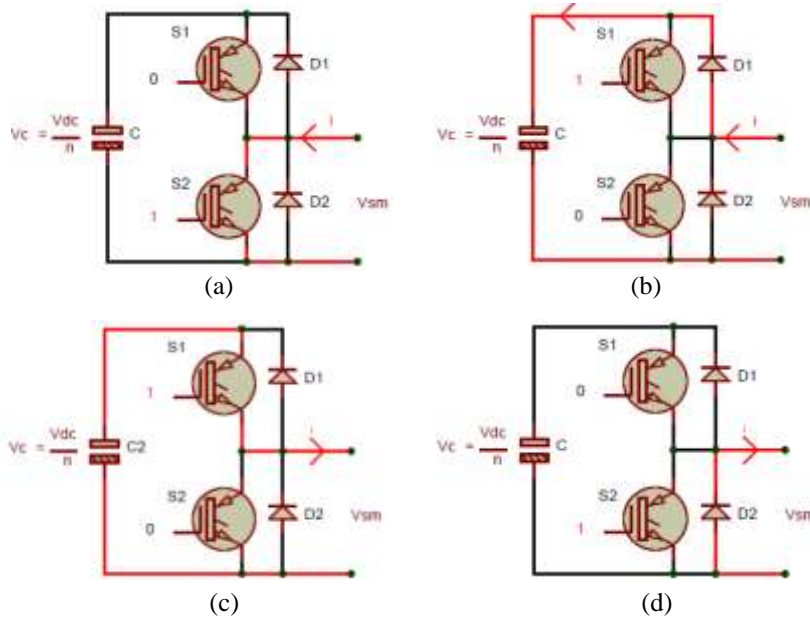
MÇSD'nin çıkış terminallerinde istenilen çıkış gerilimini oluşturmak için alt modüllerdeki anahtarların iletimde veya kesimde olması gerekir. Her bir alt modüldeki iki anahtar birbirinin tersi olan anahtarlama işaretiyle sürülmelidir [10-11]. Alt modüllerdeki yarı iletken anahtarlardan biri iletimdeyken diğersinin kesinlikle kesimde olması gerekir aksi takdirde alt modül zarar görür. Şekil 2'de alt modüllerdeki anahtarlama durumları göz önüne alınarak, akımın yönüne göre dört farklı çalışma durumu ortaya çıktığı gösterilmiştir [11].

(a) durumunda  $S_1$  kesimde ve  $S_2$  iletimde iken  $V_{SM}=0$  olur ve akım  $S_2$  üzerinden akar. Kondansatör gerilimi değişmez.

(b) durumunda  $S_1$  iletimde ve  $S_2$  kesimde iken  $V_{SM}=V_C$  olur ve akım  $D_1$  diyotu ile kondansatör üzerinden akar. Kondansatör şarj olur ve gerilimi artar.

(c) durumunda  $S_1$  iletimde ve  $S_2$  kesimde iken  $V_{SM}=V_C$  olur.  $S_1$  ikinci kez iletime girmesiyle kondansatör üzerindeki gerilim deşarj olur ve gerilimi azalır. Akım kondansatör ve  $S_1$  üzerinden akar.

(d) durumunda  $S_1$  kesimde ve  $S_2$  iletimde iken  $V_{SM}=0$  olur.  $S_2$  ikinci kez iletime girmesiyle akım  $D_2$  üzerinden akar. Kondansatör gerilimi değişmez.



**Şekil 2.** Alt modül çalışma durumları: a)  $S_1=0$   $S_2=1$ , b)  $S_1=1$   $S_2=0$ , c)  $S_1=1$   $S_2=0$ , d)  $S_1=0$   $S_2=1$   
(Sub-module operating conditions: a)  $S_1=0$   $S_2=1$ , b)  $S_1=1$   $S_2=0$ , c)  $S_1=1$   $S_2=0$ , d)  $S_1=0$   $S_2=1$ )

Tablo 1'de beş seviyeli bir MÇSD için anahtarlama kombinasyonları gösterilmiştir [8]. Burada yarıiletken anahtar kesimde=0, iletimde=1 durumundadır.

**Tablo 1.** Beş seviyeli MÇSD için anahtarlama kombinasyonları (Switching combinations for five-level MMC)

Alt Modül	FAZ ÇIKIŞ GERİLİMİ																																		
	$V_{dc}/2$	$-V_{dc}/2$	$V_{dc}/4$								$-V_{dc}/4$																								
S <sub>1</sub>	0	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1		
S <sub>2</sub>	0	1	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	
S <sub>3</sub>	0	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
S <sub>4</sub>	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	
S <sub>5</sub>	1	0	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	
S <sub>6</sub>	1	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	
S <sub>7</sub>	1	0	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	0	1	1	1	1	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	
S <sub>8</sub>	1	0	0	0	0	0	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0	0	1	0	0

### 3. MÇSD MODÜLASYON YÖNTEMLERİ (MMC MODULATION METHODS)

MÇSD'lerde alt modüllerdeki anahtarların sürme işaretlerini oluşturmak için çok taşıyıcı PWM yöntemleri kullanılmaktadır. Çıkış gerilimi için referans sinüs dalgası ile taşıyıcı üçgen dalganın karşılaştırılmasıyla bu iki işaretin birbirine olan büyüklüklerine göre oluşturulan anahtarlama işaretlerinin üretilmesi ilkesine dayanan, farklı çok seviyeli PWM yöntemleri uygulamak mümkündür [10]. Çok seviyeli PWM yöntemleri, seviye kaydırmalı (Level Shifted, LS) PWM ve faz kaydırmalı (Phase Shifted, PS) PWM olmak üzere temelde iki farklı şekilde sınıflandırılabilir. Seviye kaydırmalı PWM yöntemleri, düz dizme (Phase Disposition, PD), ters dizme (Phase Opposition Disposition, POD), düz-ters dizme (Alternative Phase Opposition Disposition, APOD) olarak alt başlıklar altında sınıflandırılmaktadır [8, 12].

Seviye kaydırmalı PWM tekniğinde, referans sinüs dalgası tepe değerinin ( $V_R$ ), üçgen taşıyıcı dalganın tepe değerine ( $V_C$ ) oranına modülasyon indeksi denir. Modülasyon indeksi 0-1 aralığında doğrusal bölgede değer alır ve bu değer değiştirilmesi çıkış geriliminin ana harmonik genliğini ayarlar. Modülasyon indeksi ( $M_a$ ) Eş.1'de verilmiştir [13]. Seviye kaydırmalı ve faz kaydırmalı PWM yöntemleri için taşıyıcı üçgen dalga frekansının ( $f_c$ ) referans sinüs dalga frekansı ( $f_r$ ) oranına frekans modülasyon indeksi denir. Frekans modülasyon indeksi ( $M_f$ ) Eş.2'de verilmiştir [8]. Seviye kaydırmalı ve faz kaydırmalı PWM yöntemleri için modülasyon indeksleri Tablo 2'de verildiği gibi hesaplanmaktadır [13].

$$M_a = V_R / V_C \quad (1)$$

$$M_f = f_c / f_r \quad (2)$$

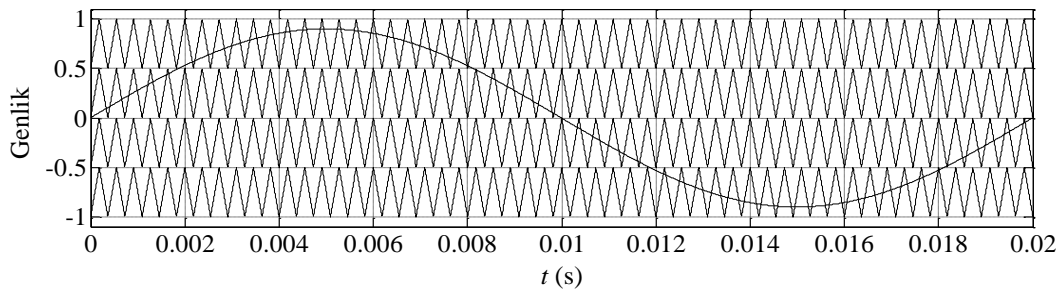
**Tablo 2.** Farklı PWM yöntemleri için modülasyon indeksi formülleri (modulation index formulas for different PWM methods)

Modülasyon	Seviye Kaydırma (PD, POD, APOD)	Faz Kaydırma (PS)
$M_a$	$\frac{V_R}{\left(\frac{n-1}{2}\right) x V_C}$	$\frac{V_R}{V_C}$

Seviye kaydırmalı PWM yönteminde, N+1 seviyeli MÇSD'nin bir faz kolunda yer alan alt modül sayısı (N) kadar eşit büyüklükte, aynı fazda ve frekanstaki taşıyıcı alt alta yerleştirilir. Düz dizme (PD) seviye kaydırmalı PWM yöntemi ise yük gerilimi ve akımında düşük harmonik bozulma sağladığından modüler çok seviyeli dönüştürücülerde ve geleneksel çok seviyeli eviricilerde yaygın olarak kullanılan yöntemdir [1, 14]. Seviye ve faz kaydırmalı PWM yöntemlerinin uygulamasında bazı kurallar bulunmaktadır. Dört taşıyıcı bir PWM düzeninde;

- a) Sinüs dalgası sıfır referansın üzerindeki iki taşıyıcı dalgadan daha büyük ise dönüştürücü anahtarlama işaretlerini  $+V_{dc}/2$  kısmında yapar.
- b) Sinüs dalgası sıfır referansın üzerindeki ilk taşıyıcı dalgadan büyük ve ikinci taşıyıcı dalgadan küçük ise dönüştürücü anahtarlama işaretlerini  $+V_{dc}/4$  kısmında yapar.
- c) Sinüs dalgası sıfır referansın üzerindeki ilk taşıyıcı dalgadan küçük ve sıfır referansın altındaki ilk taşıyıcı dalgadan büyük ise dönüştürücü anahtarlama işareti sıfır olur.
- d) Sinüs dalgası sıfır referansın altındaki ilk taşıyıcı dalgadan küçük ve ikinci taşıyıcı dalgadan büyük ise dönüştürücü anahtarlama işaretlerini  $-V_{dc}/4$  kısmında yapar.
- e) Sinüs dalgası sıfır referansın altındaki iki taşıyıcı dalgadan daha küçük ise dönüştürücü anahtarlama işaretini  $-V_{dc}/2$  kısmında yapar.

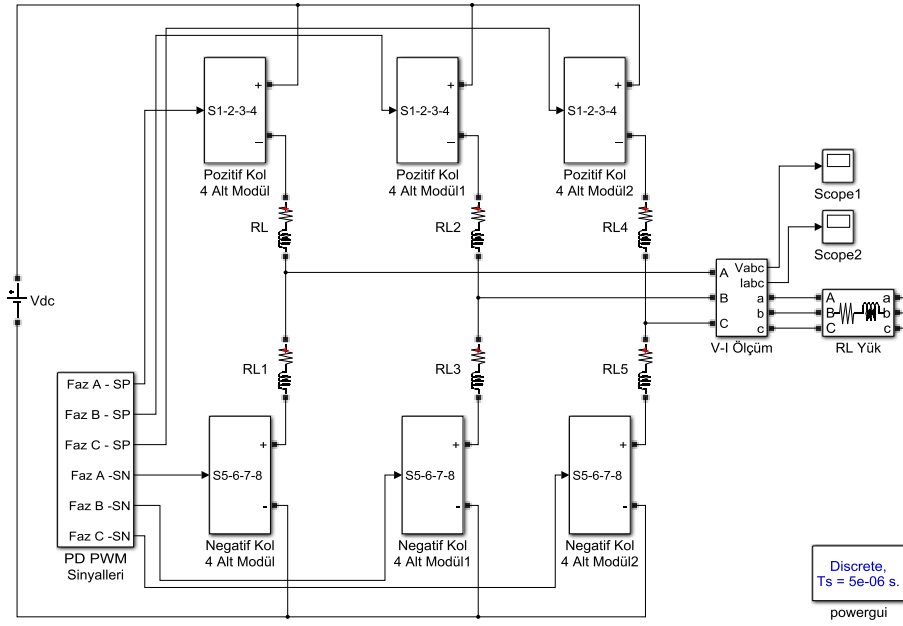
Düz dizme seviye kaydırmalı PWM yöntemine ait dört taşıyıcı üçgen ve bir referans sinüs dalga şekilleri Şekil 3'de gösterilmiştir.



Şekil 3. Düz dizme (PD) seviye kaydırmalı PWM yöntemi ( $M_a=0.9$ ) (Phase disposition (PD) level shifted PWM method ( $M_a=0.9$ ))

#### 4. 3-FAZLI 5-SEVİYELİ MÇSD BENZETİMİ (3-PHASE 5-LEVEL MMC SIMULATION)

Bu çalışmada ortak DC baradan beslenen ve faz kolu başına  $N=4$  alt modül bulunan çift yıldız kıyıcı hücre yapısına sahip üç fazlı beş seviyeli MÇSD'nin MATLAB/Simulink yazılımı kullanılarak bilgisayar benzetimi yapılmıştır. Şekil 4'de benzetimi yapılan üç fazlı çift yıldız kıyıcı hücreli MÇSD'ye ait MATLAB/Simulink devresi görülmektedir. Benzetim devre parametreleri Tablo 3'te verilmiştir.

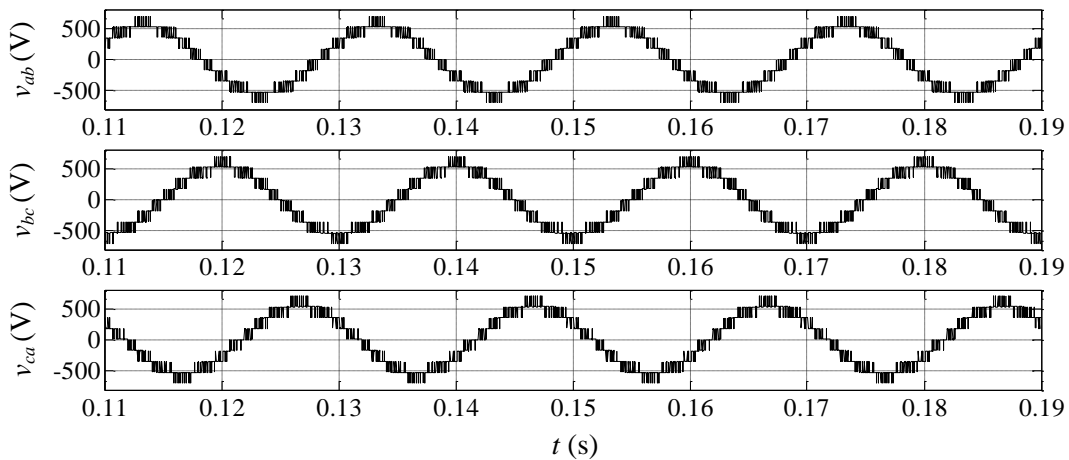


Şekil 4. MÇSD MATLAB/Simulink benzetim devresi (MMC MATLAB/Simulink simulation circuit)

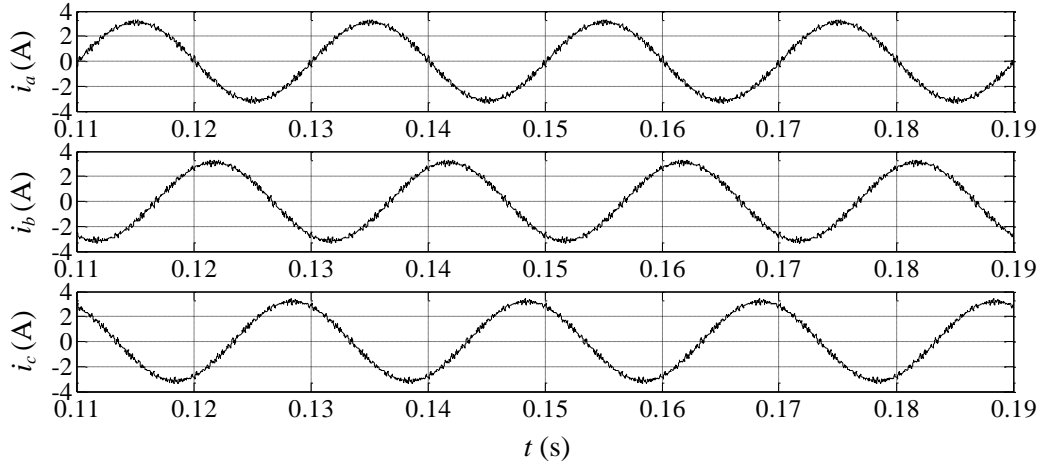
Tablo 3. MÇSD benzetim devre parametreleri (MMC simulation circuit parameters)

Parametreler	Değeri
DC bara gerilimi ( $V_{dc}$ )	700 V
Faz kolu başına alt modül sayısı ( $N$ )	4
Alt modül kondansatör kapasitesi ( $C$ )	2200 $\mu$ F
Kol tampon indüktansı ( $L$ ), kol eşdeğer direnci ( $R$ )	1 mH, 1 $\Omega$
Yük direnci ( $R_Y$ ) yük indüktansı ( $L_Y$ )	100 $\Omega$ , 10 mH
Taşıyıcı frekansı ( $f_c$ ), referans sinüs frekansı ( $f_r$ )	2750 Hz, 50 Hz
Modülasyon indeksi ( $M_a$ )	0.9

Şekil 5 ve Şekil 6'da sırasıyla fazlar arası çıkış gerilimi ve yük akımı dalga şekilleri gösterilmektedir. Faz-faz çıkış gerilimlerinde kol başına 4 alt modül bulunan MÇSD ile 9 seviye elde edilmiştir. Dolayısıyla yük akımları da sinüs forma yaklaşmıştır. Faz-faz çıkış gerilimi 383.4  $V_{rms}$  ve yük akımı 2.24  $A_{rms}$  genliğe sahiptir.

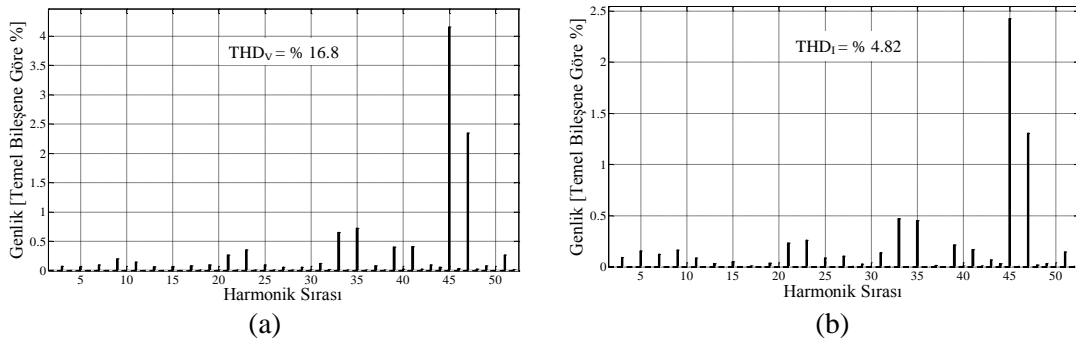


Şekil 5. Fazlar arası çıkış gerilimleri (phase to phase output voltages)



Şekil 6. Yük akımları (load currents)

Şekil 7(a)'da faz-faz çıkış gerilimi ve Şekil 7(b)'de yük akımı toplam harmonik bozulma (THD) değerleri görülmektedir. Faz-faz çıkış gerilimi THD değeri % 16.8 iken yük akımı THD değeri % 4.82 olarak ölçülmüştür.



Şekil 7. THD değerleri, a) faz-faz çıkış gerilimi, b) yük akımı (THD values, a) phase to phase output voltage, b) load current )

## 5. SONUÇ (CONCLUSION)

MÇSD'ler yüksek güç kalitesi, yüksek kullanılabilirlik ve modülerlik gibi özellikleri nedeniyle son yıllarda yenilenebilir enerji kaynakları, DC güç iletimi, yüksek gerilim ve mikro şebeke uygulamaları gibi çok geniş kullanım alanı bulmuştur. Bu çalışmada çift yıldız kıyıcı hücre tabanlı üç fazlı beş seviyeli MÇSD'nin RL yüklü durumda seviye kaydırmalı düz dizme (PD) PWM yöntemi kullanılarak MATLAB/Simulink ortamında benzetimi yapılmıştır. PD PWM yöntemi ile yük akımlarında düşük THD değeri elde edilmiştir.

## 6. KAYNAKLAR (REFERENCES)

- [1]. Akagi, H., (2011). Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC), *IEEE Transactions on Power Electronics*, 26, 3119-3130.
- [2]. Ertürk, F., Çiftçi, B. ve Hava, A. M., (2014). Modüler çok seviyeli dönüştürücülerin kontrolü, *Elektrik-Elektronik-Bilgisayar ve Biyomedikal Mühendisliği Sempozyumu, ELECO*, 256-262.
- [3]. Baker, R. H., and Bannister, L. H., (1975). Electric power converter, *U.S. Patent 3 867 643*.
- [4]. Lesnicar, A. and Marquardt, R., (2003). An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range, *Power Tech Conference Proceedings*.

- [5]. Çiftçi, B. ve Hava, A. M., (2013). Modüler çok seviyeli dönüştürücüler: topolojiler ve donanımsal özellikler, *V. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK*, 141-145.
- [6]. Rodriguez, J., Lai, J. S., and Peng, F. Z., (2002) Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications. *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, 49(4), 724-738.
- [7]. Hagiwara, M., and Akagi, H., (2009). Control and experiment of pulse width modulated modular multilevel converters, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 24(7), 1737-1746.
- [8]. Rajan, M. S., and Seyezhai, R., (2014). Comparative study of multicarrier PWM techniques for a modular multilevel inverter”, *International Journal of Engineering and Technology (IJET)*, 5(6), 4850-4865.
- [9]. Allebrod, S., Hamerski, R., and Marquardt, R., (2008). New transformerless, scalable modular multilevel converters for HVDC-transmission, *IEEE Power Electronics Specialists Conference, PESC*, 174-179.
- [10]. Çiftçi, B., ve Hava, A. M., (2013). Modüler çok seviyeli dönüştürücüler: anahtarlama yöntemleri,” *V. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, EVK*, 151-155.
- [11]. Fard, N. R., (2013). Finite control set model predictive control in power converters, *Master of Science Thesis, Norwegian University of Science and Technology, Department of Electric Power Engineering*.
- [12]. Hagiwara, M., Nishimura, K., and Akagi, H., (2010). A medium- voltage motor drive with a modular multilevel PWM inverter, *IEEE Transactions on Power Electronics*, 25(7), 1786-1799.
- [13]. Deniz, E. ve Altun, H., (2007). Beş seviyeli izole DC kaynaklı kaskat inverterin SPWM tekniği ile kontrolü, *SAÜ Fen Bilimleri Dergisi*, 11(1), 1-9.
- [14]. Shi, X., Wang, Z., Tolbert, L. M., and Wang, F., (2013). A comparison of phase disposition and phase shift PWM strategies for modular multilevel converter, *IEEE Energy Conversion Congress and Exposition, (ECCE)*, 4089-4096.