

MODÜLER ÇOK SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLER: ANAHTARLAMA YÖNTEMLERİ

Modular Multilevel Converters: Switching Methods

Barış Çiftçi^{1,3}

¹Orta Doğu Teknik Üniversitesi
Çankaya, Ankara

³Savunma Sistem Teknolojileri
ASELSAN A.Ş.

¹baris.ciftci@metu.edu.tr

Ahmet M. Hava²

²Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Orta Doğu Teknik Üniversitesi

Kuzey Kıbrıs Kampusu
Kalkanlı, Güzelyurt, KKTC

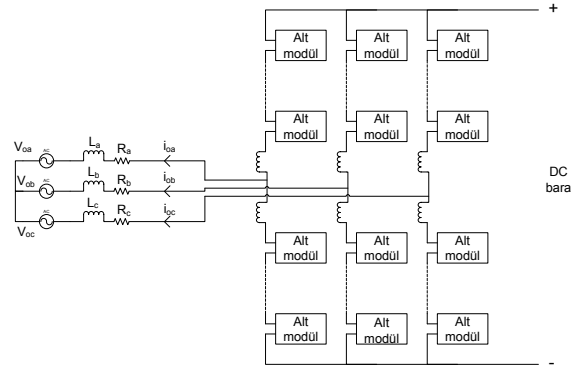
²ahava@metu.edu.tr

Özet: Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler (MÇSD'ler) son yıllarda AC/DC ve DC/AC dönüşümde kullanımlarını artırıp, yüksek enerji kalitesi ve verimliliği vadeden öncelikli yapılar olmuştur. Modüler yapıları, geniş güç ve gerilim aralığında çalışabilmeleri, çıkış gerilim ve akımında düşük harmonik bozulmaya sahip olmaları gibi özellikleri onları diğer dönüştürücü yapılarından ayırmıştır. Bu çalışmada MÇSD yapısında uygulanan darbe genişlik modülasyonu anahtarlama yöntemleri, seviye kaydırmalı yöntem ve faz kaydırmalı yöntem, açıklanacak ve uygulama teknikleri gösterilecek; bu iki yöntemin bilgisayar benzetimleri yardımıyla başarımları karşılaştırılacaktır. Bu çalışma ile MÇSD alanında yapılacak olan Ar-Ge ve tasarım çalışmalarına yardımcı olabilecek donanımsal bilgilerin aktarılması amaçlanmıştır.

Anahtar kelimeler: modüler çok seviyeli dönüştürücü, MÇSD, anahtarlama, darbe genişlik modülasyonu (DGM), seviye kaydırma, faz kaydırma, benzetim

I. Giriş:

Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler (MÇSD'ler), gerilim kaynaklı dönüştürücü türü olarak, dc gerilimden ac gerilime dönüşüm yaparlar. Yakın dönemde ortaya çıkmış ve gelişimi devam etmekte olan MÇSD'ler geniş güç ve gerilim aralığında çalışabilirler. Ayrıca çıkış gerilim dalga şekillerinin ideal sinüse yakınlığı ve dolayısıyla düşük çıkış harmonik bozulmasına sahip olmaları, yüksek enerji verimleri, modüler yapıları, hızlı ve hassas olarak elektrik enerjisinin şartlandırılmasını sağlamaları sayesinde diğer gerilim kaynaklı dönüştürücülerden ayrılırlar. Bu topolojiler özellikle HVDC iletim, orta-gerilim motor sürücü uygulamaları, STATCOM uygulamaları ve güneş/rüzgâr enerjisi güç kontrolü uygulamalarında kullanım alanı bulmaktadır. Şekil 1'de üç faz yıldız yük bağlı MÇSD yapısı görülmektedir.



Şekil 1: Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücü

Bu çalışmada kıyıcı hücre alt modüllü MÇSD anahtarlama elemanlarının sürülmesi için kullanılan darbe genişlik modülasyonu (DGM) yöntemleri; seviye kaydırmalı DGM (SKDGM) ve faz kaydırmalı DGM (FKDGM) yöntemleri ve uygulama ilkeleri açıklanacak; iki yöntemin bilgisayar benzetimleri yardımıyla başarımları karşılaştırılacaktır.

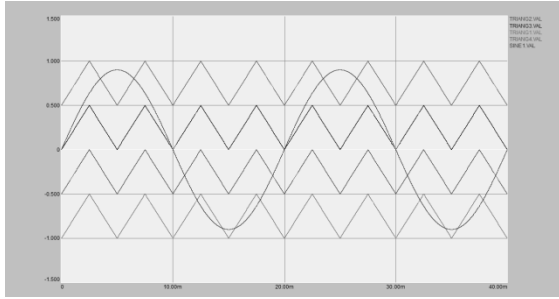
II. MÇSD Anahtarlama Yöntemleri

MÇSD alt modüllerindeki anahtarlama elemanlarının sürülmesi için DGM yöntemleri uygulanabilir. Çıkış gerilimi için referans olan (sinüs temelli) bir modülasyon işaretinin üçgen bir işaret (taşıyıcı) ile karşılaştırılıp, bu iki işaretin birbirlerinden büyüklüklerine göre anahtarlama elemanlarını sürme işaretinin üretilmesi ilkesine dayanan DGM'yi farklı yöntemlerde uygulamak mümkündür. MÇSD topolojisinde anahtarlama için temel olarak taşıyıcı tabanlı iki ayrı DGM yöntemi kullanılır: seviye kaydırmalı yöntem (carrier disposition method) ve faz kaydırmalı yöntem (sub-harmonic method) [1].

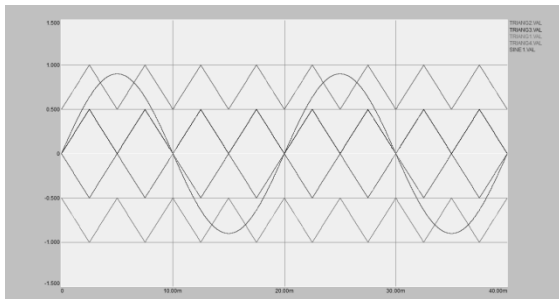
SKDGM yönteminde, N+1 seviyeli MÇSD'nin bir faz kolunda yer alan alt modül sayısı, N, kadar aynı büyüklük ve frekanstaki taşıyıcı, toplam dc bara gerilimi V_{DC} olmak üzere, her bir taşıyıcı V_{DC}/N büyüklüğündeki bandı kapsayacak şekilde alt alta yerleştirilir. Taşıyıcılar birbirini kesmez ve tümü

birlikte V_{DC} 'lik bandı kapsarlar. SKDGM, taşıyıcıların birbirlerine göre konumlarına bağlı olarak alt türlere ayrılır. Şekil 2'deki gibi tüm taşıyıcıların aynı fazda olması durumuna *düz dizme (PD)*, Şekil 3'teki gibi referans noktasının üstündeki taşıyıcılarla referans noktasının altındaki taşıyıcıların arasında 180° faz farkı olduğu duruma *ters dizme (POD)* ve son olarak, Şekil 4'teki gibi birbirine bitişik V_{DC}/N bantlarındaki taşıyıcıların arasında 180° faz farkı olduğu duruma da *düz-ters dizme (APOD)* adı verilir [2].

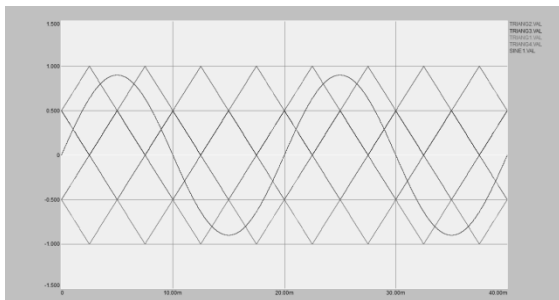
FKDGM yönteminde, MÇSD'nin bir faz bacağında yer alan alt modül sayısı ($2N$) kadar aynı büyüklük ve frekanstaki taşıyıcı, birbirleriyle aralarında $\theta=360^\circ/(2N)$ kadar faz farkı olacak ve her biri tüm V_{DC} bandını kapsayacak şekilde, Şekil 5'teki gibi yan yana yerleştirilirler.



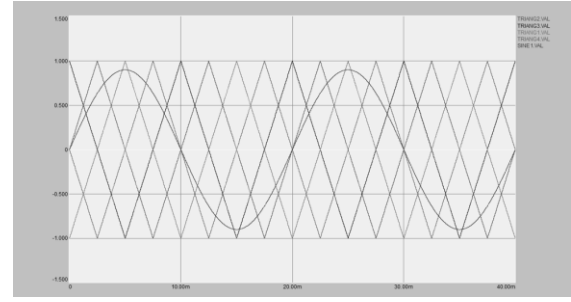
Şekil 2: Düz dizme (PD) SKDGM için taşıyıcı ve modülasyon dalgası



Şekil 3: Ters dizme (POD) SKDGM için taşıyıcı ve modülasyon dalgası



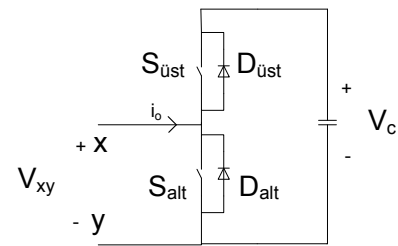
Şekil 4: Düz-ters dizme (APOD) için SKDGM taşıyıcı ve modülasyon dalgası



Şekil 5: FKDGM için taşıyıcı ve modülasyon dalgası

SKDGM ve FKDGM yöntemlerinin her ikisinde, diğer DGM yöntemlerinde de olduğu gibi, taşıyıcı ve modülasyon işaretinin birbirlerine göre büyüklüğü kıstas alınarak alt modül anahtarlama elemanlarının iletimde veya kesimde olmasını sağlayan sürme işaretleri üretilir.

MÇSD kıyıcı hücre alt modülünde, hücredeki iki anahtarlama elemanının sürme işaretleri daima birbirinin tersidir. Böylece anahtarlama elemanından biri iletim, diğeri kesim durumunda olur. Şekil 6'da görülen kıyıcı hücre anahtarlama elemanlarının iletim durumlarına ve alt modül akımının yönüne bağlı olarak, alt modülün dört farklı anahtarlama durumu ortaya çıkar. Bunlar Tablo 1'de gösterilmiştir. Görüldüğü gibi kondansatör gerilimlerinin değişimi ve dolayısıyla dengelenmesi; kıyıcı hücre anahtarlama durumlarına doğrudan bağlıdır. Önemli MÇSD kontrol parametrelerinden hücre kondansatörünün geriliminin dengelenmesi konusu bu çalışmanın kapsamı dışındadır. Tablo 1'de ve çalışmanın geri kalan kısmında "1" iletimi, "0" ise kesimi ifade etmektedir.



Şekil 6: Kıyıcı hücre alt modül yapısı

Tablo 1: Kıyıcı hücre anahtarlama durumları

S_{alt}	$S_{üst}$	V_{xy}	Akım yönü	Akım yolu	Kondansatör gerilimi
1	0	0	$i_o > 0$	S_{alt}	Değişmez
1	0	0	$i_o < 0$	D_{alt}	Değişmez
0	1	V_c	$i_o > 0$	$D_{üst}$	Artar
0	1	V_c	$i_o < 0$	$S_{üst}$	Azalar

Yukarıda anlatılan DGM uygulama ilkeleri, faz kolu başına alt modül olarak 2 kıyıcı hücre bulunduran üç seviyeli MÇSD ile açıklanacaktır.

Yöntemi daha fazla alt modüle sahip MÇSD'ye de uyarlamak mümkündür. Referans [2]'de SKDGM yöntemleri nötr noktası bağlantılı (NPC) evirici kullanılarak karşılaştırılmış, düz dizme yönteminin çıkış harmoniği bakımından diğer yöntemlerden üstün olduğunu gösterilmiştir. Bu çalışma kapsamında da düz dizme yöntemi için SKDGM açıklanacaktır.

Seviye Kaydırmalı Yöntem (Düz Dizme): Üç seviyeli dönüştürücüde faz kolu başına iki alt modül kullanıldığından, taşıyıcı olarak birbiriyle aynı frekans ve büyüklükte iki üçgen dalga kullanılır. Taşıyıcı üçgen dalgalar Şekil 2'ye benzer şekilde her biri $V_{DC}/2$ 'lik bandı kapsayacak halde; modülasyon dalgası de modülasyon indisi (m_a) göz önüne alınarak yerleştirilir. (Üç fazlı dönüştürücüde her bir faz bacağı için aralarında 120° faz farkı olan modülasyon dalgaları kullanılır.) Modülasyon dalgasının taşıyıcı üçgenlerden büyüklüğüne bağlı olarak anahtarlama işaretleri üretilir. Bu işlem için öncelikle üst faz kolundaki iki alt modülün biri bir taşıyıcıyla, diğeri de ikinci taşıyıcıyla eşleştirilir. Üst koldaki her bir alt modül için, modülasyon dalgasının kendi eşleştiği taşıyıcı üçgeninden büyüklüğüne göre, Tablo 2'de görüldüğü gibi bir anahtarlama şablonu oluşturulur. Alt faz kolundaki alt modüllerin anahtarlama elemanları için ise; üst faz kolundaki anahtarlama elemanları için üretilen işaretlerin tersi kullanılır. Yani üst faz kolundaki bir alt modül çıkış gerilimi olarak V_c verirken, bu alt modülün alt faz kolundaki eşleniği çıkış gerilimi olarak 0 verir. Seviye kaydırmalı yöntemde alt ve üst koldaki alt modüllerin anahtarlama işaretleri birbirinin tersi olduğu için bir faz bacağına akım yoluna eklenen alt modül sayısı her zaman sabittir ve 2 (N) adettir.

Tablo 2: Seviye ve faz kaydırmalı DGM için alt modül anahtarlama elemanları sürme işaretleri

	S_{alt}	$S_{üst}$
$V_{ref} > V_{üçg}$	1	0
$V_{ref} < V_{üçg}$	0	1

Faz Kaydırmalı Yöntem: Faz kaydırmalı yöntemde üç seviyeli MÇSD'nin bir faz bacağına yer alan alt modül sayısı kadar, 4 adet, birbiriyle aynı büyüklük ve frekansta taşıyıcı kullanılır. Dolayısıyla (seviye kaydırmalı yöntemin aksine) faz kaydırmalı yöntemde faz bacağındaki her alt modüle karşılık farklı bir taşıyıcı kullanılır. Taşıyıcılar $\theta=360^\circ/4=90^\circ$ faz farkıyla dizilir. Modülasyon dalgasının taşıyıcıyla karşılaştırılması sonrası anahtarlama elemanları için sürme işaretleri oluşturulur. Her alt modüle farklı taşıyıcı kullanıldığı için, faz kaydırmalı yöntemde akım yoluna eklenen alt modül sayısı, seviye kaydırmalı yöntemde olduğu gibi sabit değildir, değişebilir. Her alt modül için aynı olan anahtarlama yöntemi Tablo 2'de gösterilmiştir. Bu anahtarlama

yönteminde kondansatör gerilim dengelemesi için, ortalama denetim (averaging control) ve dengeleyici denetim (balancing control) yöntemleri uygulanabilir [3].

III. Benzetimler

Bu çalışma kapsamında sabit gerilimde ve birbirinden yalıtımlı dc baralara sahip Çift-Yıldız Kıyıcı-Hücreli MÇSD yapısı ile Ansoft Simpler 7.0 programı kullanılarak bilgisayar benzetimi yapılmış, düz dizmeli SKDGM ve FKDGM yöntemleri karşılaştırılmıştır. Her iki yöntem için yukarıda açıklanan anahtarlama şablonları kullanılmıştır. Benzetim çalışmasında faz kolu başına $N=2$ alt modül kullanılmış, devre parametreleri Tablo 3'te, modülasyon indisi hesaplamaları Tablo 4'te, benzetim devresi Şekil 9'da gösterilmiştir.

Tablo 3: MÇSD benzetim devresi parametreleri

Çıkış gerilim frekansı (f_o)	50Hz
Faz başına yük direnci	10Ω
Faz başına yük indüktansı	18mH
Alt modül dc bara gerilimi	15kV
Kol başına hat direnci	$50m\Omega$
Kol başına tampon indüktansı	10mH
* $m_f (=f_c/f_o)$	9 (SKDGM) 5 (FKDGM)
** m_a	0.95

* Aynı taşıyıcı frekansı (dolayısıyla aynı m_f değeri) için alt modüllerde yer alan anahtarlama elemanlarının ortalama anahtarlama frekansı, SKDGM yönteminde FKDGM yöntemindeki sayının yaklaşık yarısı olarak ölçülmüştür. Benzetimlerde anahtarlama elemanlarının mümkün olduğunca eşit ortalama anahtarlama frekansına sahip olmalarına dikkat edilmiştir. Buna göre SKDGM yönteminde taşıyıcı frekansı FKDGM yöntemindeki değer iki katı, $m_f=10$, olması gerekirken, çift sayı olan bu m_f değeri akım dalgalarında çift harmoniklerin oluşmasına neden olmuştur. Bunu engellemek için SKDGM yönteminde m_f değeri 9 olarak belirlenmiştir.

** Tablo 4: SKDGM ve FKDGM için modülasyon indisi hesaplamaları [4]

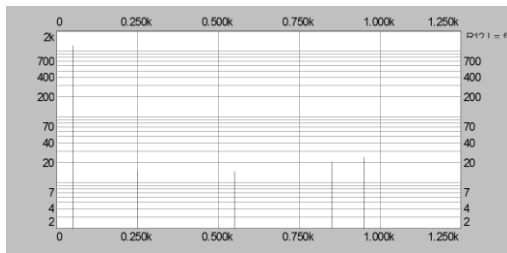
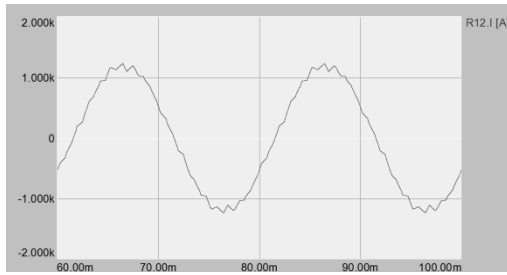
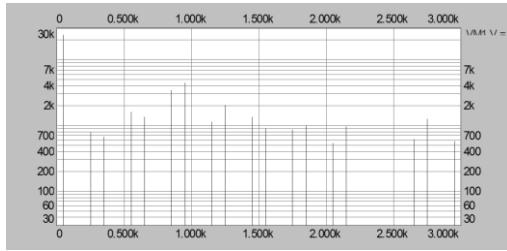
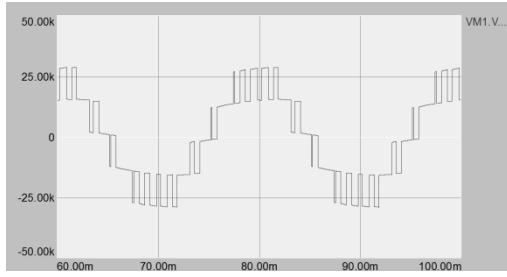
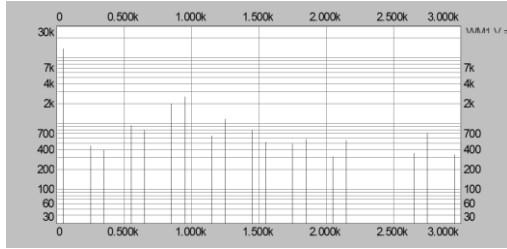
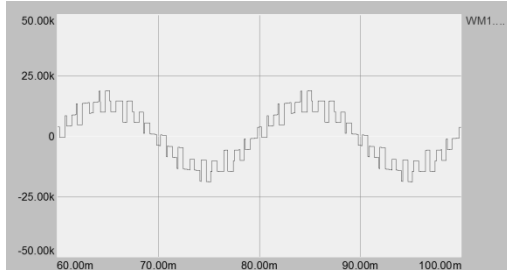
	SKDGM	FKDGM
m_a	$\frac{A_m}{\frac{n-1}{2} * A_c}$	$\frac{A_m}{A_c}$

n : çıkış faz-nötr gerilim seviyesi sayısı

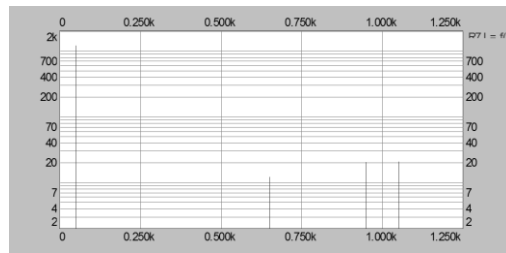
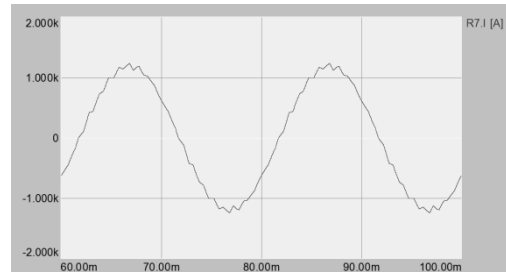
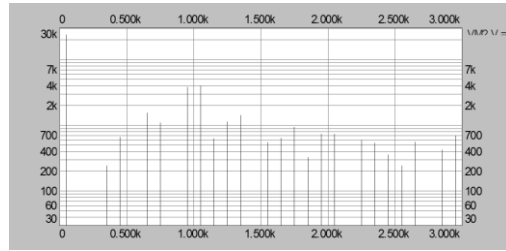
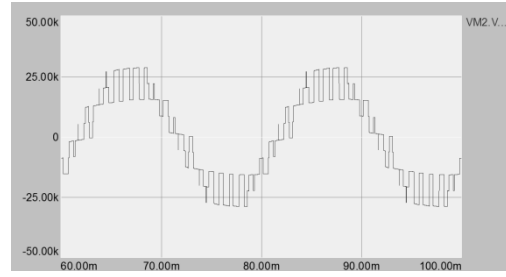
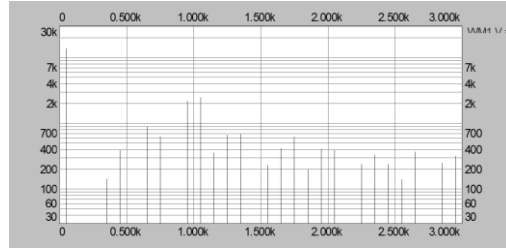
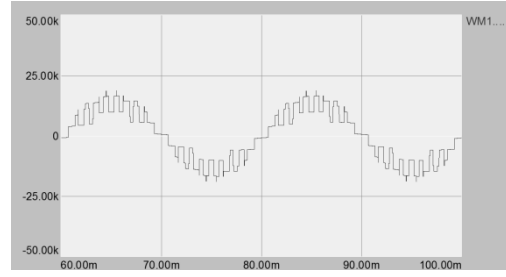
A_m : modülasyon dalgası büyüklüğü

A_c : taşıyıcı dalga büyüklüğü

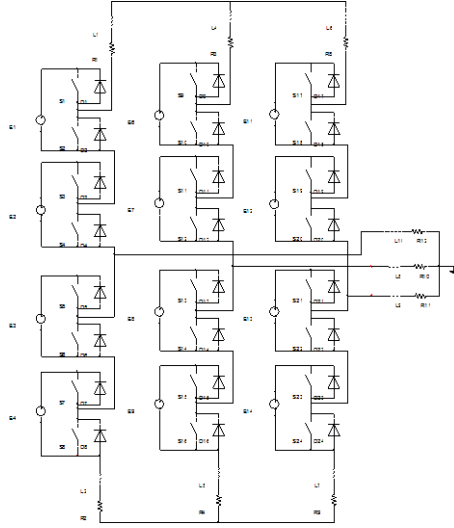
Şekil 7'de SKDGM yöntemi, Şekil 8'de FKDGM yöntemi kullanarak elde edilen grafikler yer almaktadır. Tablo 5'te çıkış gerilim, akım ve güç katsayısı değerleri, Tablo 6'da da toplam harmonik bozulma (Şekil 9'dan sonra devam etmektedir.)



Şekil 7: SKDGM yöntemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla: faz-nötr gerilimi ve harmonik spektrumu, faz arası gerilimi ve harmonik spektrumu, faz akımı ve harmonik spektrumu



Şekil 8: FKDGM yöntemi için yukarıdan aşağıya sırasıyla: faz-nötr gerilimi ve harmonik spektrumu, faz arası gerilimi ve harmonik spektrumu, faz akımı ve harmonik spektrumu



Şekil 9: Benzetim devresi

değerleri gösterilmiştir. Alt modül anahtarlama elemanlarının ortalama anahtarlama frekansları yaklaşık olarak FKDGM yönteminde 250Hz, SKDGM yönteminde 210Hz olarak ölçülmüştür. Çıkış akımı, gerilimleri ve üç faz çıkış gücü SKDGM yönteminde; güç katsayısı ise FKDGM yönteminde çok az miktarda yüksek çıkmıştır. Bununla birlikte her iki yöntemin Tablo 5'te yer alan başarımlarını kıyaslamadan bakıldığında hemen hemen aynı sonuçlar ürettiği, birbirlerine belirgin üstünlükler kuramadıkları söylenebilir. İki yöntemin birbirinden farklılaştığı noktalar ise çıkış gerilim ve akım harmonikleri olmuştur. Her iki yöntemde de 3kHz'e kadar (SKDGM için taşıyıcı frekansın 6.6 katı, FKDGM için taşıyıcı frekansın 12 katı) gerilim harmonikleri incelenmiştir. Her iki yöntemde de taşıyıcı frekans ve taşıyıcı frekans katlarının yan bantlarında gerilim harmonikleri gözlenmiştir. FKDGM yönteminde gerilim harmonikleri SKDGM yöntemine göre daha fazla saçaklanmaya sahiptir; fakat SKDGM yönteminin alçak frekans harmonikleri FKDGM'ye göre daha büyüktür. Baskın gerilim harmonikleri SKDGM yönteminde $2f_c$; FKDGM yönteminde $4f_c$ yan bantlarında oluşmuştur. Toplam harmonik bozulmalar göz önüne alındığında FKDGM yönteminin hem faz-nötr arası hem de faz arası gerilimlerinde SKDGM yöntemine göre daha iyi sonuç verdiği görülür. Faz akımı harmonik bozulmaları incelendiğinde her iki yöntemde de baskın gerilim harmoniklerinin yer aldığı frekanslarda; bunlar dışında FKDGM yönteminde 650Hz'de; SKDGM yönteminde ise 250Hz ve 550Hz'de belirgin harmoniklerin yer aldığı görülür. Dolayısıyla FKDGM yönteminin baskın alçak frekans akım harmonikleri SKDGM'ye göre daha az ve daha küçüktür. Faz akımı toplam harmonik bozulmasında FKDGM yöntemi SKDGM'ye göre %20'den fazla daha iyi sonuç vermiştir.

Tablo 5: Çıkış gerilim, akım, güç ve güç katsayısı değerleri

	SKDGM	FKDGM
Çıkış gücü (üç faz)	21.68MW	21.54MW
Çıkış faz arası gerilimi	17.79kV _{rms}	17.58kV _{rms}
Çıkış faz-arası temel harmonik gerilimi	16.90kV _{rms}	16.84kV _{rms}
Çıkış faz-nötr arası gerilim	10.27kV _{rms}	10.16kV _{rms}
Çıkış faz akımı	850A _{rms}	847A _{rms}
Güç katsayısı	0.828	0.834

Tablo 6: Toplam harmonik bozulma değerleri

DGM Yöntemi	Toplam harmonik bozulma (%)		
	Faz-nötr gerilimi	Faz arası gerilimi	Faz akımı
SKDGM	32.80	32.80	3.55
FKDGM	30.02	29.92	2.90

IV. Sonuçlar

MÇSD alt modül anahtarlama elemanları sürme işaretlerinin üretilmesinde kullanılan, yazında en çok kullanılan ve kabul gören yöntemler SKDGM ve FKDGM'dir. Bu çalışma kapsamında SKDGM ve FKDGM anahtarlama ilkeleri ve uygulama yöntemleri açıklanmıştır. Benzetim çalışması ile her iki yöntem MÇSD alt modüllerinde sabit dc baralara sahipken başarımlarını karşılaştırılması yapılmış; çıkış gerilimi, akımı, gücü ve güç katsayısı bakımından her iki yöntemin benzer sonuçlar ürettiği, çıkış gerilim ve akım harmonikleri bakımından ise FKDGM yönteminin daha iyi sonuç verdiği görülmüştür.

Kaynakça

- [1] G. S. Konstantinou and V. G. Agelidis, "Performance evaluation of half-bridge cascaded multilevel converters operated with multicarrier sinusoidal PWM techniques," in *Industrial Electronics and Applications, 2009. ICIEA 2009. 4th IEEE Conf. on*, 2009, pp. 3399-3404.
- [2] N. O. Çetin and A. M. Hava, "Çok-düzeyle Evmicilerde Seviye Kaydırmalı PWM Anahtarlama Yöntemleri" pp. 1-5.
- [3] M. Hagiwara and H. Akagi, "Control and Experiment of Pulsewidth-Modulated Modular Multilevel Converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 24, no. 7, pp. 1737-1746, Jul. 2009.
- [4] G. Carrara, S. Gardella, M. Marchesoni, R. Salutari, and G. Sciutto, "A new multilevel PWM method: a theoretical analysis," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 7, no. 3, pp. 497-505, Jul. 1992.
- [5] G. P. Adam, O. Anaya-Lara, G. M. Burt, D. Telford, B. W. Williams, and J. R. McDonald, "Modular multilevel inverter: pulse width modulation and capacitor balancing technique," *IET power electronics*, vol. 3, no. 5, p. 702, 2010.