

Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücülerde Taşıyıcı Temelli DGM ile Anahtarlama ve Kondansatör Gerilimi Dengeleme Yöntemleri

Switching and Capacitor Voltage Balancing Methods with Carrier-Based PWM in Modular Multilevel Converters

Barış ÇİFTÇİ, Feyzullah ERTÜRK, Ahmet M. HAVA

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü

Orta Doğu Teknik Üniversitesi

baris.ciftci@metu.edu.tr, feyzullah.erturk@metu.edu.tr, hava@metu.edu.tr

Özet

Sanayide uygulamaların güç gereksinimi arttıkça daha fazla ihtiyaç duyulan çok seviyeli dönüştürücüler farklı topolojik yapılarda arz edilmektedir. Belirli özellikleri itibariyle diğer çok seviyeli topolojilere göre öne çıkan modüler çok seviyeli dönüştürücüler (MÇSD), devre yapıları itibariyle farklılaşan ve dallanan çeşitli anahtarlama yöntemleriyle sürülebilir. Bu çalışmada MÇSD için anahtarlama, kontrol ve özellikle kondansatör gerilim dengeleme yöntemlerindeki seçenekler ele alınacak; başarımlar kıstasları bilgisayar benzetimleri yoluyla karşılaştırılacaktır. Yöntemlerin belirli kıstaslar bakımından birbirlerine üstünlük sağladığı görülmüştür.

Abstract

The multilevel converters, which are required extensively as the power requirements of industrial applications rise, are proposed in different topological structures. Modular multilevel converters (MMC) stand out among other multilevel topologies and they can be driven by several differentiating and branching switching methods due to their circuit structure. In this study, various MMC switching strategies, control and in particular capacitor voltage balancing methods are discussed; performance criteria are compared by computer simulations. It is seen that methods showed superiority to each others in specific criteria.

1. Giriş

Dünyada ekonomik gelişim ve refah düzeyinin artışı ile birlikte, genel olarak elektrik enerjisine gereksinim, dolayısıyla enerji sistemlerinin güç kapasitesi artış göstermektedir. Bu enerji sistemleri içinde, yüksek gerilim dc iletim sistemleri (HVDC), orta gerilim motor sürücüler, STATCOM uygulamaları, rüzgâr enerji sistemleri, vb. yüksek güçte ve yüksek gerilimde ac-dc ve/veya dc-ac dönüşüm için güç elektroniği eviricileri kullanılır. Onlarca MW ve kV seviyesinde güç ve gerilim gereksinimi olan bu uygulamaların geleneksel iki seviyeli güç dönüştürücüleriyle gerçekleştirilmesi; yarıiletken sınırları, güvenilirlik, verimlilik, güç kalitesi ve maliyet kıstasları nedeniyle bazı sorunları

beraberinde getirmektedir. Çok seviyeli dönüştürücüler, geniş güç ve gerilim aralıklarına sahip olmaları itibariyle, bahsedilen sanayi uygulamalarında iki seviyeli dönüştürücülere seçenek olarak geliştirilmiştir. Çok seviyeli dönüştürücülerin iki seviyeli dönüştürücülere göre temel üstünlükleri şöyle sıralanabilir: Basamaklandırılmış çıkış gerilim dalga şekilleri sayesinde çıkış harmonik bozulmaları daha azdır. Basamaklandırılmış çıkış gerilimi, aynı zamanda çıkış dv/dt gerilim değişim hızının düşmesini ve böylece elektromanyetik uyumluluk sorunlarının azalmasını sağlar. Çok seviyeli dönüştürücüler düşük hızlarda (hatta temel frekansta) anahtarlanaarak, anahtarlama kayıpları azaltılıp dönüştürücü verimi artırılabilir ve yarıiletken ısı kontrolü daha kolay yapılabilir. Ayrıca, iki seviyeli dönüştürücülere kıyasla giriş akım dalga şekli bozulmaları ve çıkışta ürettikleri ortak-kip gerilimi daha azdır. Bunlarla birlikte, çok seviyeli dönüştürücüler iki seviyeli dönüştürücülere göre daha fazla sayıda yarıiletken ve devre elemanından oluşurlar. İki seviyeli dönüştürücülere göre karmaşık yapıları nedeniyle anahtarlama ve kontrol yöntemleri de daha zordur.

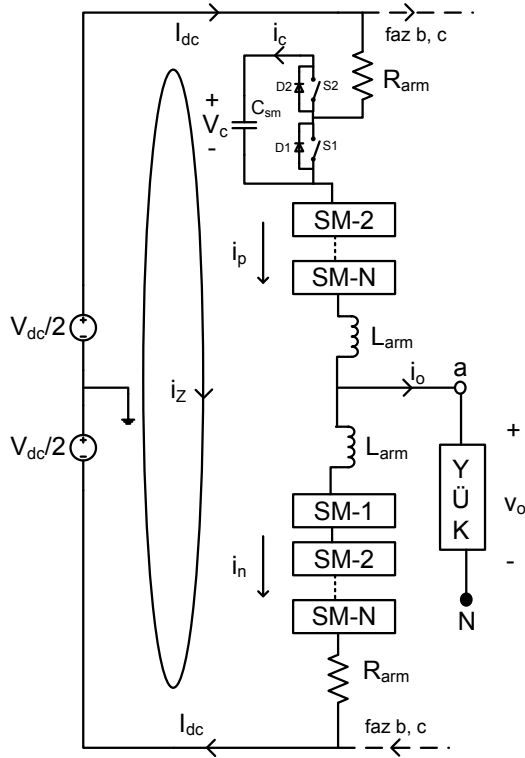
Çok seviyeli dönüştürücülerin geçmişi 1970'lerin ortalarına kadar uzanır. Yazında günümüze kadar çeşitli çok seviyeli dönüştürücü topolojileri arz edilmiştir. Bu topolojiler arasından öne çıkan temel yapılar ise nötr noktası bağlantılı (diyet bağlantılı), uçan kondansatörlü (kondansatör bağlantılı), ardışık bağlı H-köprü hücreli ve modüler çok seviyeli dönüştürücü (MÇSD) olarak sıralanabilir.

Bu çalışmada, MÇSD'lerin diğer topolojilere göre darbe genişlik modülasyonu (DGM) temelli anahtarlama yapıları itibariyle farklılaşan ve çeşitlenen seçenekleri aktarılacaktır. Benzetim sonuçları ile farklı anahtarlama tekniklerinin karakteristik özellikleri ortaya konacaktır.

2. Çok Seviyeli Dönüştürücü Topolojileri

Nötr noktası bağlantılı çok seviyeli dönüştürücü 1981'de yazında yerini almıştır [1]. Nötr noktası bağlantılı çok seviyeli dönüştürücünün bağlantı diyotlarının sınır değerleri, ters gerilime dayanabilmesi için birbirinden farklıdır; aynı diyotların kullanılması durumunda seviye sayısı arttıkça diyot sayısı karesel olarak artar. Seviye sayısı (çıkış gerilimi)

arttıkça, aynı zamanda dönüştürücünün kontrolü ve kondansatör gerilim dengelemesi karmaşıklaşır. Uçan kondansatörlü çok seviyeli dönüştürücü, aktif güç aktarımında verimsiz ve dönüştürücünün kondansatör gerilim kontrolü karmaşıktır. Kondansatör sayısı, seviye sayısı arttıkça karesel olarak artmaktadır. Yüksek gerilim/güç uygulamalarında kullanımı uygun değildir. Ardışık bağlı H-köprü hücreli çok seviyeli dönüştürücünün, her bir hücrenin ayrı dc kaynak gerektirmesi nedeniyle kullanım alanı sınırlıdır. Şekil 1'de tek faz (üç faz için bir faz bacağı) yapısı görülen MÇSD yapısı ise şu özellikleri itibarıyla öne çıkmaktadır: Modüler ve birbirinin aynı hücre yapısı sayesinde yedekleme ve esneklik bakımından üstündür. Merkezi bir enerji depolama elemanı (dc bara kondansatörü gibi) bulundurmaz. Düşük anahtarlama kaybı ve çıkış harmonik bozulma miktarına sahiptir.



Şekil 1: Tek faz (üç faz için bir faz kolu) MÇSD

3. Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücü Taşıyıcı Temelli Darbe Genişlik Modülasyonu Anahtarlama Yöntemleri

MÇSD'lerin taşıyıcı temelli DGM yöntemleri, esas olarak kullanılan taşıyıcı dalga şekline göre ikiye ayrılmaktadır: seviye kaydırmalı DGM (SKDGM) ve faz kaydırmalı DGM (FKDGM). Bu yöntemler kendi içlerinde alt kolları ayrılırlar [2], [4]. Taşıyıcı dalga şekli ile birlikte, kullanılan referans dalga şekline göre sinüzoidal DGM veya sıfır bileşen eklenmiş (uzay vektör, üçüncü harmonik eklenmiş, kesintili vb.) DGM olarak da sınıflandırılabilir. Yazında MÇSD anahtarlama yönteminde yukarıda bahsedilen temel seçeneklerin uygulamalarının açıklandığı ve bunların başarımlı karşılaştırmalarının yapıldığı kaynaklar mevcuttur [2]-[5].

MÇSD anahtarlama yöntemleri için bir başka farklılaşma, kullanılan altmodül kondansatörü gerilim dengeleme mekanizmalarında görülmektedir. Yazında çeşitli yöntemler tanımlanmıştır [6], [7]. Bu çalışmada kondansatör gerilimi dengeleme mekanizması barındırmayan geleneksel anahtarlama yöntemi ve üç farklı kondansatör gerilimi dengeleme yöntemi açıklanacak ve benzetim yoluyla başarımlı karşılaştırmaları yapılacaktır.

MÇSD açısından DGM yöntemlerinin çeşitlendiği bir diğer nokta, alt ve üst kol altmodüllerinin anahtarlama için kullanılan taşıyıcı dalgaların sayısıdır. Alt ve üst kollar için aynı taşıyıcıların kullanılması durumunda faz gerilimi N+1 seviyeli iken; aralarında belirli bir faz farkı olması koşulu ile alt ve üst kollar için iki ayrı set taşıyıcı kullanılması durumunda ise faz gerilimi 2N+1 seviyeli olmaktadır. İkinci durum çıkış harmonik bozulması bakımından daha iyi sonuç vermekte, bununla birlikte dolaşım akımı ac bileşeni daha büyük olmaktadır [5].

Taşıyıcı temelli DGM yöntemleri, farklı kontrol algoritmalarıyla MÇSD'lere uygulanabilir. Bu topoloji için yazında kabul gören iki temel kontrol yöntemi bulunmaktadır. Kaynak [8]'de önerilen yöntem, bundan sonra "doğrudan anahtarlama" olarak anılacaktır, bir faz bacağına yer alan tüm altmodüllerin anahtarlama için aynı referans dalgayı kullanmakta, anahtarlama için tüm faz bacağına ele almaktadır. Taşıyıcı dalga olarak SKDGM ve FKDGM uygulanabilmektedir. Bununla birlikte, bu algoritma için SKDGM yönteminin *düz dizme* seçeneğinin, çıkış harmonik bozulması bakımından en düşük sonucu verdiği görülmüştür [3], [5]. Kaynak [9]'da önerilen yöntem ise, bundan sonra "faz kaydırmalı anahtarlama" olarak anılacaktır, bir faz bacağındaki her bir altmodül için ayrı referans dalga oluşturma, altmodül bazında anahtarlama yapma ilkesine dayanmaktadır. Bu yöntemde taşıyıcı dalga olarak yalnızca FKDGM yönteminin kullanımı öngörülmüştür.

Ansoft Simplerer 7.0 programı ile yapılan benzetimlerde, sırt sırta HVDC iletim sistemlerinin dc/ac çevrimi aşamasını modellemek üzere, üç-faz, faz-arası 8.66kV, 50-Hz şebekeye 1 güç katsayısı ile vektör kontrol yöntemi uygulanarak 10MW güç aktarımı yapılmıştır. Her kolda dört altmodül olmak üzere, Şekil 1'de tek faz bacağı gösterilen MÇSD yapısı kullanılmıştır. Doğrudan anahtarlama ve faz kaydırmalı anahtarlama kontrol yöntemleri ayrı ayrı değerlendirilmiştir. Modülasyon dalgası olarak sinüs DGM, taşıyıcı olarak doğrudan anahtarlama için SKDGM yönteminin *düz dizme* seçeneği, faz kaydırmalı anahtarlama için FKDGM yöntemi kullanılmıştır. Benzetim parametreleri Çizelge 1'de gösterilmektedir.

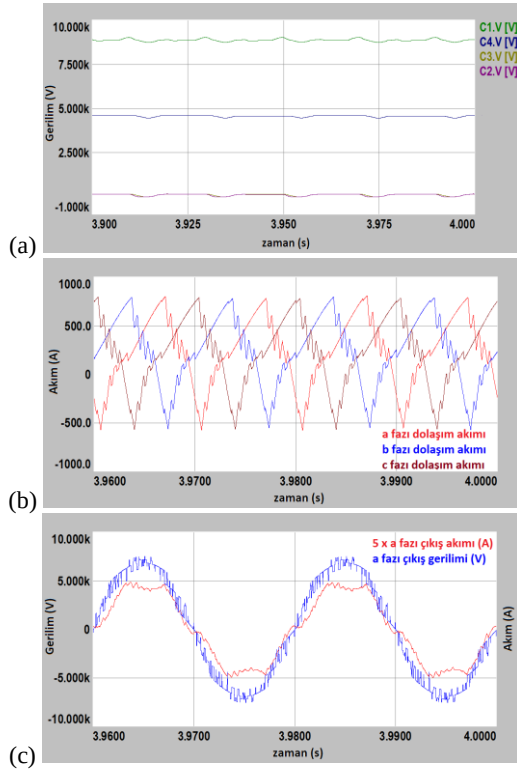
3.1. Doğrudan Anahtarlama

i. Geleneksel yöntem: Her taşıyıcı dalga bir altmodüle atanır ve değişmez. Referans dalgaının büyüklüğüne ve dalga şekline bağlı olarak, bazı altmodüller sürekli akım yolunda yer alırken bazıları hiç bir zaman akım yoluna eklenmeyebilir. Benzer şekilde altmodüllerin anahtarlama miktarları, dolayısıyla yarıiletkenlerin ısıllı zorlanmaları ve kondansatörlerin dolma/boşalma durumları birbirinden oldukça farklılaşabilir. Kondansatör gerilim dengesizliği

çıkış ve dolaşım akımlarının bozulmasına, çevircinin istikrarlı çalışmamasına sebep olur. Faz gerilimi $2N+1$ seviye üreten yöntem uygulanarak yapılan benzetim sonuçları Şekil 2'de görülmektedir. Şekilde yukarıdan aşağıya a fazı üst kol altmodül kondansatör gerilimleri (a), üç faz dolaşım akımları (b) ve çıkış a fazı gerilimi ile akımı (c) olarak gösterilmiştir. Bu sıralama Şekil 3-8 için de geçerlidir.

Çizelge 1: Benzetim parametreleri

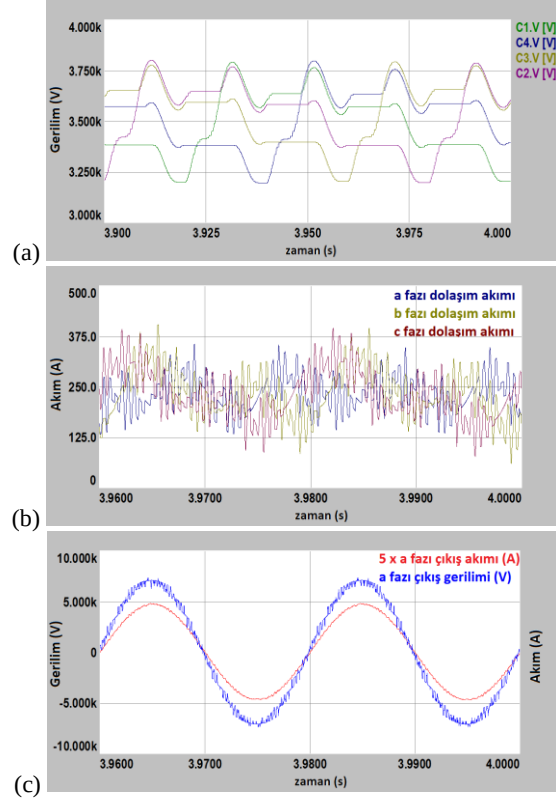
Sembol	Açıklama	Değer
N	Kol başına altmodül sayısı	4
f_g	Temel frekans	50Hz
V_g	Faz arası şebeke gerilimi	8.66kV
V_{DC}	DC bara gerilimi	14.4kV
f_c	Taşıyıcı frekansı	1800Hz (SKDGM) 450Hz (FKDGM)
L_g	Şebeke indüktansı	1.2mH (0.05pu)
L_{arm}	Kol indüktansı	3mH
R_{arm}	Kol rezistansı	50m Ω
C_{sm}	Altmodül kondansatörü	4.7mF



Şekil 2: Geleneksel yöntem, $2N+1$ seviye faz gerilimli

Şekil 2'den görüldüğü üzere, kondansatör gerilim dengeleme algoritması olmayan geleneksel yöntemde, bazı kondansatörler tamamen boşalırken bazıları da anma gerilimlerinin ($14.4 \text{ kV}/4 = 3.6 \text{ kV}$) çok üzerine doldurulmuştur. Kondansatör gerilim dengesizliğinin büyüklüğü, etkisini dolaşım akımlarının büyümesinde, çıkış akımının çökmesinde ve dolayısıyla dönüştürücünün istikrarlı çalışmamasında göstermiştir. Bu yüzden MÇSD topolojisini kondansatör gerilim dengelemesi yapan yöntemlerle çalıştırmak gerekmektedir.

ii. *Taşıyıcı dalga dönüşümlü (TDD) yöntem*: Bu yöntemde yine her taşıyıcı dalga bir altmodüle atanır; fakat atanan altmodül her temel periyot sonrası, bir faz kolundaki tüm altmodüller sırayla kullanılmak üzere değiştirilir. Böylece her altmodülün bu dönüşüm periyodu sonunda eşit sürede akım yoluna girmesi, kondansatör dolma/boşalma miktarlarının eşitlenmesi ve gerilim dengesinin kurulması mümkün olur. Faz gerilimi $2N+1$ seviye üreten yöntem uygulanarak yapılan benzetim sonuçları Şekil 3'te görülmektedir.

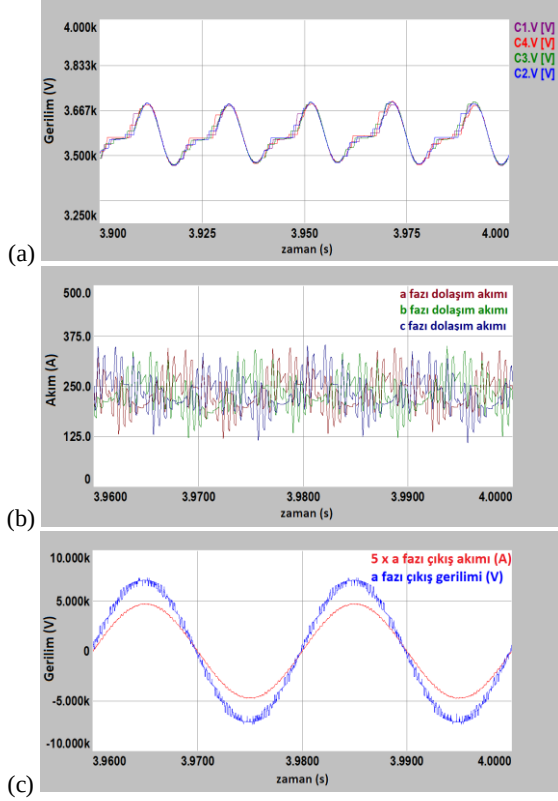


Şekil 3: TDD yöntemi, $2N+1$ seviye faz gerilimli

TDD yönteminde, her dönüşüm periyodu sonunda (benzetimde $N=4$ olduğu için $4 \times 20 \text{ ms} = 80 \text{ ms}$) altmodül kondansatörlerinin akım integralleri (dolma/boşalma miktarı) eşitlenmekte, görece dengeli bir sistem haline gelmektedir. Kondansatör gerilim dengesizliğine tepki süresi uzun olduğu için, dolaşım periyodu içinde gerilimler birbirinden farklılaşabilmektedir. Kol başına kullanılan altmodül sayısının artması durumunda, bu tepki süresi uzayacak, belirli bir kondansatör gerilim kısırtısı için kullanılması gereken kondansatör boyutu daha büyük olacaktır.

iii. *Kondansatör gerilim sıralamalı (KGS) yöntem* [10]: Bu yöntemde taşıyıcı ve altmodül eşleştirmesi yapılmaz. Taşıyıcı ve referans dalgalanının birbirine göre büyüklüğüne bağlı olarak, akım yoluna eklenmesi gereken altmodül sayısı belirlenir. Bir faz kolundaki tüm altmodül kondansatör gerilimleri sıralanır. Faz kolu akım yönü dikkate alınarak, belirlenen sayıda altmodül akım yoluna eklenir. Akım yoluna eklenmesi gereken altmodül sayısı değiştiğinde, yeni bir değerlendirme yapılır ve eklenen altmodüller güncellenir. Bu yöntem taşıyıcı dalga dönüşümlü yöntemden farklı olarak, kondansatör

gerilimlerinin sürekli izlenmesini gerektirir. Bununla birlikte, gerilim dengesizliklerine çok daha kısa sürede tepki verip, akım yoluna eklenen altmodüllerde gerekli güncellemeyi yaptığı için gerilim kırıltısı miktarı daha azdır. Faz gerilimi $2N+1$ seviye üreten yöntem uygulanarak yapılan benzetim sonuçları Şekil 4'te görülmektedir.



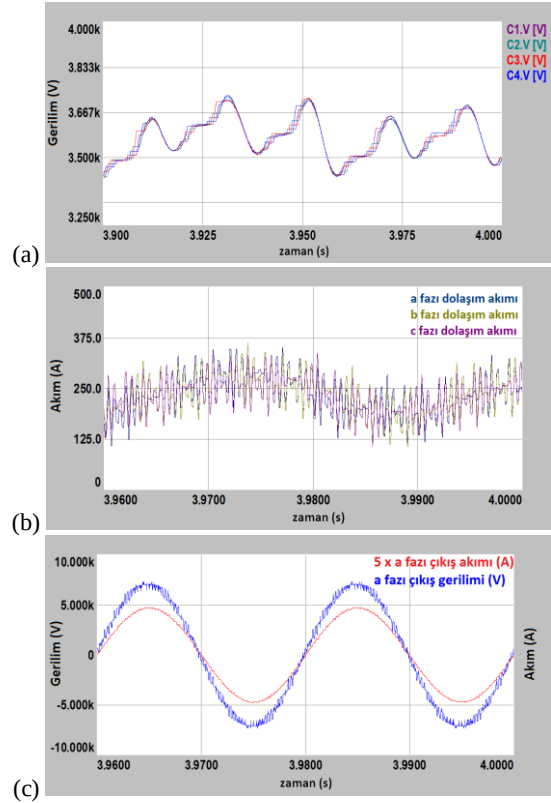
Şekil 4: KGS yöntemi, $2N+1$ seviye faz gerilimli

KGS yöntemi kullanıldığı durumda, kontrol algoritması kondansatör gerilim dengesizliklerini hızlı biçimde gidermiş, bu sayede tüm kondansatör gerilimleri birbirine yakın, dolaşım akımı ac kırıltısı da TDD yöntemine göre daha düşük gözlenmiştir.

iv. *Kondansatör gerilim sıralamalı düşük anahtarlama yöntemi (KGS-DA) [11]*: Bu yöntem temel olarak yukarıda bahsedilen KGS yöntemi ile aynıdır. KGS yönteminde, akım yoluna eklenmesi gereken altmodül sayısı değiştiğinde, tüm altmodüller değerlendirmeye alınıp eklenen altmodüller güncellenmektedir. Bu yöntemde ise akım yoluna eklenmesi gereken altmodül sayısının artması durumunda, hâlihazırda akım yolunda yer alan altmodüller değerlendirmeye dâhil edilmez ve akım yolunda yer almaya devam eder. Eklenmesi gereken fazlardan altmodüller ise akım yolunda yer almayan altmodüller arasından değerlendirme yapılarak seçilir. Akım yoluna eklenmesi gereken altmodül sayısının azalması durumunda ise tam tersi durum geçerlidir. Faz gerilimi $2N+1$ seviye üreten yöntem uygulanarak yapılan benzetim sonuçları Şekil 5'te görülmektedir.

KGS-DA yöntemi kullanıldığı durumda, altmodül yarıiletkenleri anahtarlama sayısı yaklaşık olarak %25

azalmıştır. Anahtarlama kayıplarının azalması olarak yarar sağlayan bu durum, kondansatör gerilim kırıltısının ve dolaşım akımı ac bileşeninin bir miktar artmasına sebep olur.

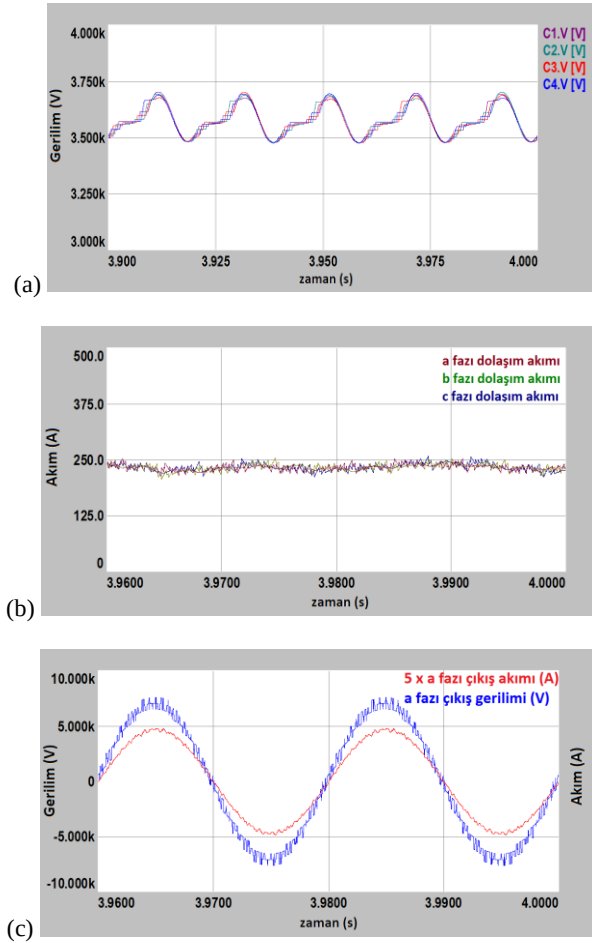


Şekil 5: KGS-DA yöntemi, $2N+1$ seviye faz gerilimli

Şekil 6'da ise KGS-DA yöntemi için $N+1$ seviyeli faz gerilimi üreten tek taşıyıcı setli benzetim sonuçları görülebilir. Alt ve üst faz kolları için aynı taşıyıcı setinin kullanılması ile, dolaşım akımı ac bileşeni çok düşük seviyelere iner. Fakat faz gerilimi $N+1$ seviyeye indiği için çıkış gerilim ve akım harmoniği görece yükselir.

3.2. Faz Kaydırmalı Anahtarlama

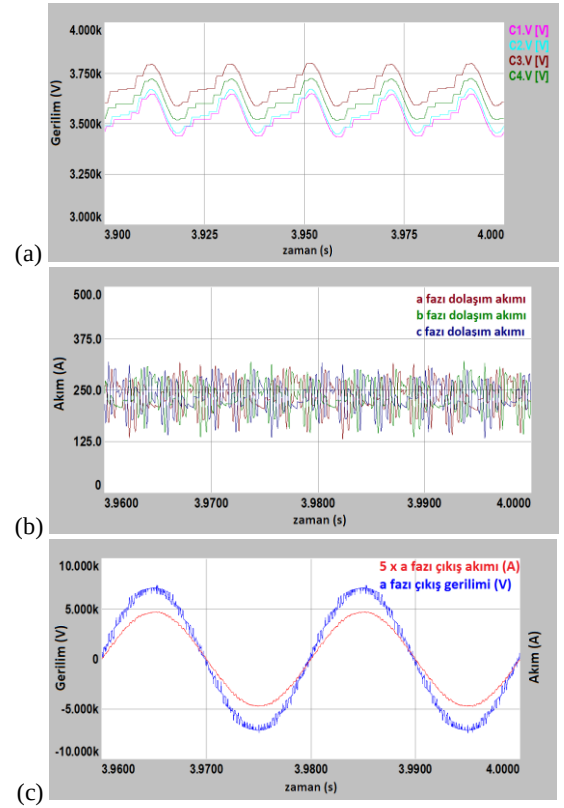
Faz kaydırmalı anahtarlama kontrol yönteminde her altmodül için ayrı referans dalgaları üretilir. FKDGGM taşıyıcı dalgaları kullanılarak altmodül bazında anahtarlama yapılır. Doğrudan anahtarlama yönteminde olduğu gibi altmodül kondansatör gerilim dengelerinin korunması için taşıyıcı dalga dönüşümü ya da kondansatör gerilim sıralaması gibi ayrı algoritmalar gerekmez. Bunun yanında, bu dengelerin sağlanması için, referans dalga üretilirken, farklı fazlar arası dengeyi sağlayan "ortalama kontrol" ve her bir altmodül kondansatörünün tekil dengesini sağlayan "denkleme kontrol" algoritmaları kullanılır [9]. Şekil 7'de faz kaydırmalı anahtarlama yöntemi için $2N+1$ seviyeli faz gerilimi üreten çift taşıyıcı setli benzetim sonuçları görülebilir. Kondansatör gerilimlerinin kırıltısı, doğrudan anahtarlama yöntemlerine göre bir miktar düşük olmakla birlikte, kendi aralarında daha fazla farklılaşmaktadır. Dolaşım akımı ac bileşeni $2N+1$ seviye faz gerilimi üreten doğrudan anahtarlama yöntemlerine göre daha düşüktür.



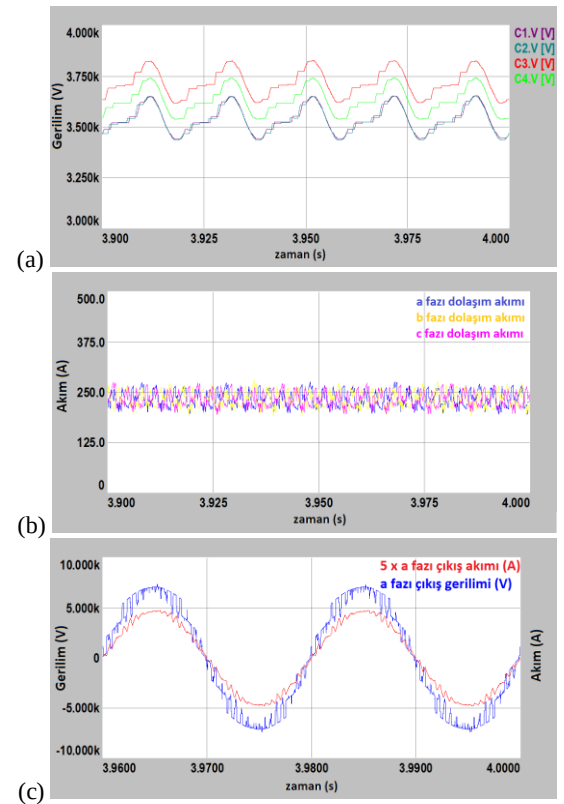
Şekil 6: KGS-DA yöntemi, N+1 seviye faz gerilimli

Şekil 8'de faz kaydırmalı anahtarlama yönteminde tek taşıyıcı seti kullanılarak N+1 seviye faz gerilimi üreten anahtarlama yönteminin benzetim sonuçları görülebilir. Çizelge 2'de benzetim sonuçları nicel değerleri listelenmiştir.

Şekiller ve Çizelge 2 incelendiğinde yukarıda açıklanan yöntemlerle ilgili şu sonuçlar çıkartılabilir: Geleneksel yöntemin kararlı bir devre yapısı oluşturamadığı, MÇSD için kondansatör gerilimi dengelemenin vazgeçilmez olduğu anlaşılmıştır. TDD yöntemi ile görece kararlı bir devre yapısı kurulsa da belirli bir kondansatör gerilim kırıltısı için kondansatör sığasının çok büyümesi gerektiği görülmüştür. Aynı toplam yarıiletken anahtarlama sayısı için, N+1 seviyeli KGS-DA yönteminin diğer doğrudan anahtarlama yöntemlerine göre en düşük kondansatör gerilim kırıltısı ve tüm yöntemlere göre en düşük dolaşım akımı ac bileşeni içermesi itibarıyla öne çıktığı değerlendirilmektedir. Çıkış gerilim seviyesinin yarıya inmesi nedeniyle yükselen harmonik bozulmasının düşürülmesi için süzgeç kullanılabilir. Bununla birlikte, 2N+1 seviyeli faz kaydırmalı anahtarlama yönteminin çıkış harmonik bozulması ve kondansatör gerilim kırıltısının düşük olması itibarıyla N+1 seviyeli KGS-DA yöntemine seçenek olabileceği değerlendirilmektedir. Bu yöntemde N+1 seviyeli KGS-DA yöntemine göre daha yüksek olan dolaşım akımı ac kırıltısı, iletim kayıplarının artmasına sebep olur. Bu durum, soğutucu boyutunun görece büyütülmesini gerektirir.



Şekil 7: Faz kaydırmalı anahtarlama yöntemi, 2N+1 seviye faz gerilimli



Şekil 8: Faz kaydırmalı anahtarlama yöntemi, N+1 seviye faz gerilimli

Çizelge 2: Benzetim sonuçları

		Doğrudan anahtarlama yöntemi					Faz kaydırmalı anahtarlama yöntemi	
		Geleneksel	TDD*	KGS*	KGS-DA	KGS-DA N+1 seviyeli	2N+1 seviyeli	N+1 seviyeli
Faz gerilimi (V_o) THD (%)		9.60	5.22	5.37	4.99	6.93	5.39	10.81
Faz arası gerilimi THD (%)		9.58	5.24	5.37	5.00	6.93	5.39	10.82
Akım (i_o) THD (%)		14.00	1.36	1.87	1.37	2.53	1.59	5.49
Kondansatör gerilim (V_c) kırırtısı (V_{DC}/N 'nin %si)		**	16.55	7.27	8.11	6.28	5.94	6.08
Dolaşım akımı (i_z) (DC) (A)		235.30	234.15	233.49	233.27	233.72	233.89	233.72
Dolaşım akımı (i_z) (AC) (DC'nin %si)		145.63	19.13	23.33	21.76	2.97	15.06	7.54
Kol akımı (i_u) (A_{rms})		534	417	410	410	407	408	408
A fazı üst kol altmodülleri ortalama anahtarlanma frekansı (Hz)	SM1	258	448	434	430	463	447	428
	SM2	171	444	446	430	459	452	450
	SM3	136	446	434	437	442	450	450
	SM4	585	446	443	433	443	401	401
	Kol ortalaması	288	446	439	433	452	438	432

* TDD ve KGS yöntemlerinin taşıyıcı frekansı altmodül ortalama anahtarlama frekansını 450 ± 5 Hz değerine getirmek için sırasıyla %8 artırılmış ve %25 azaltılmıştır.

** Geleneksel yöntemde kondansatör gerilimleri kararlı hal değerlerinden (V_{DC}/N) ayrıştığı için gerilim kırırtısı hesaplanamamıştır.

4. Sonuçlar

Sanayi uygulamalarının güç gereksinimleri arttıkça çok seviyeli dönüştürücülere duyulan ihtiyaç ve bunların kullanım alanları genişlemektedir. Nötr noktası bağlantılı, uçan kondansatörlü ve ardışık bağlı H-köprü hücreli çok seviyeli dönüştürücülerin çeşitli kısıtlamalar nedeniyle kullanım alanları sınırlıdır. MÇSD'ler ise daha esnek ve yedeklemeli yapısı sayesinde çok seviyeli dönüştürücüler arasında öne çıkmaktadır. Bu çalışmada MÇSD'lerin anahtarlanması için kullanılan, taşıyıcı temelli DGM yöntemleri ve çeşitlenen altmodül kondansatör gerilimi dengeleme yöntemleri; iki temel kontrol algoritması kullanılarak açıklanmış, benzetim yoluyla başarımlı kıyaslamaları yapılmıştır. Bahsedilen kontrol, anahtarlama ve kondansatör gerilimi dengeleme yöntemlerinden öncelikle N+1 seviyeli KGS-DA yönteminin, çıkış akım harmonik bozulmasına hassas uygulamalarda ise 2N+1 seviyeli faz kaydırmalı anahtarlama yönteminin kullanımının diğer yöntemlere göre daha uygun olduğu değerlendirilmektedir.

5. Kaynaklar

- [1] Nabae, A.; Takahashi, I. ve Akagi, H., "A new neutral-point-clamped PWM inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, s. 518-523, 1981.
- [2] Çiftçi, B. ve Hava, A. M., "Modüler çok seviyeli dönüştürücüler: anahtarlama yöntemleri," *V. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu*, 2013, s. 151–155.
- [3] Çiftçi, B.; Ertürk, F. ve Hava, A.M., "Selection of suitable carrier-based PWM method for modular multilevel converter," *Int. Power Electronics Conf. (IPEC)*, 2014, s. 3734-3741.
- [4] Konstantinou, G. S. ve Agelidis, V. G., "Performance evaluation of half-bridge cascaded multilevel converters operated with multicarrier sinusoidal PWM techniques," *IEEE Conf. Ind. Electron. Appl.*, 2009, s. 3399–3404.

- [5] Darus, R.; Konstantinou, G.; Pou, J.; Ceballos, S. ve Agelidis, V. G., "Comparison of phase-shifted and level-shifted PWM in the modular multilevel converter" *Int. Power Electronics Conf. (IPEC)*, 2014, s. 3764-3770.
- [6] Siemaszko, D.; Antonopoulos, A.; Ilves, K.; Vasiladiotis, L.; Angquist, L. ve Nee, H.-P., "Evaluation of control and modulation methods for modular multilevel converters" *Int. Power Electronics Conf. (IPEC)*, 2010, s. 746-753.
- [7] Debnath, S.; Qin, J.; Bahrani, B.; Saeedifard, M. ve Barbosa, P., "Operation, control, and applications of the modular multilevel converter: a review," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.30, no.1, s.37-53, 2015.
- [8] Lesnicar, A. ve Marquardt, R., "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," *Proc. IEEE Bologna Power Tech.*, vol.3, 2003.
- [9] Hagiwara, M. ve Akagi, H., "Control and experiment of pulsewidth-modulated modular multilevel converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol.30, issue 7, 2009.
- [10] Ertürk, F.; Çiftçi, B. ve Hava, A., "Modüler çok seviyeli dönüştürücülerin kontrolü," *ELECO*, 2014, (yayınlanacak).
- [11] Tu, Q.; Xu, Z. ve Xu, L., "Reduced switching-frequency modulation and circulating current suppression for modular multilevel converters," *IEEE Trans. Power Del.*, vol. 26, no. 3, s.2009-2017, 2011.