

MODÜLER ÇOK SEVİYELİ DÖNÜŞTÜRÜCÜLER: TOPOLOJİLER VE DONANIMSAL ÖZELLİKLER

Modular Multilevel Converters: Topologies and Hardware Properties

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. MÇSD yapıları kendi içlerinde farklı topolojilere ayrılmakta ve uygulama alanları farklılaşmaktadır. Bununla birlikte devre parametrelerinin belirlenmesi ve boyutlandırılması da önem arz etmektedir. Bu çalışmada MÇSD ailesi topolojik yapıları ve donanımsal özellikleri açıklanacak, uygulama örnekleri verilecektir. Bu çalışma ile MÇSD alanında yapılacak olan Ar-Ge ve tasarım çalışmalarına yardımcı olabilecek donanımsal bilgilerin aktarılması amaçlanmıştır.*

Anahtar kelimeler: *modüler çok seviyeli dönüştürücü, topoloji, alt modül, benzetim*

I. Giriş

Elektrik enerjisinin üretiminden son tüketiciye ulaşmasına kadar olan süreçte verimi artırıp maliyetleri düşürmek, bunları mevcut elektrik şebekesini olumsuz yönde etkilemeden ve çevreyi kirletmeden yapabilmek; her geçen gün daha da artan talebi karşılamaya çalışan günümüz elektrik enerjisi sektörünün başlıca amaçlarından biri olmuştur. Sektörün serbestleşmesi, merkezi ve büyük ölçekte elektrik üretiminin yanında dağıtım ve daha küçük ölçekte üretim yapılmaya başlanması ve dağıtımın özelleşmesi de gelişmiş güç elektroniği sistemlerine olan ihtiyacı artırmıştır. Son on yılda ortaya çıkmış ve gelişim kaydetmiş olan Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücüler (MÇSD'ler, Modular Multilevel Converters, MMLC, M2LC, M2C) [1] bu amaçları gerçeklemeye yönelik temel yapılardan biridir.

Çok seviyeli dönüştürücü yapılarının geçmiş 1970'lerin ortalarına kadar uzanır. Baker ve Bannister, yapının ilk örneklerini vermiştir [2]. 1980'lerde nötr noktası bağlantılı (NPC) [3],

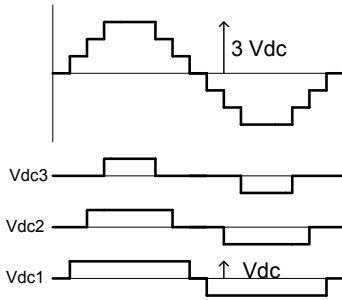
1990'ların başında da uçan kondansatörlü çok seviyeli dönüştürücüler [4] yazında yerini almıştır. 1990'ların ortalarında ticari ürün olarak ardışıl bağlı H-köprü hücreleri ilkesine dayanan orta gerilim motor sürücüsü piyasaya sürülmüştür. MÇSD yapısı ise 2003 yılında Lesnicar ve Marquardt tarafından tanıtılmıştır. Daha sonra birçok araştırmacı bu yapılar üzerine çalışmalar yapmıştır. Geniş güç ve gerilim aralığında çalışabilmeleri, çıkış gerilim dalga şekillerinin ideal sinüse yaklaşması ve dolayısıyla düşük harmonik bozulmaya sahip olmaları araştırmacıların ilgisini çekmiştir. Yüksek enerji verimleri, modüler yapıları, hızlı ve hassas olarak elektrik enerjisinin şartlandırılmasını sağlamaları sayesinde, özellikle megavat ve üstü güçlerde ve onlarca kilovolt ve üstü gerilim seviyelerinde kullanım bulmaya ve yaygınlaşmaya başlamışlardır. MÇSD'ler son yıllarda özellikle HVDC iletim, orta gerilim motor sürücü uygulamaları, STATCOM uygulamaları, güneş/rüzgâr enerjisi güç kontrolü uygulamalarında kullanımlarını artırmıştır. Görece yeni ve uygulanmamış topolojiler olmaları nedeniyle, yapıların başka uygulamalarda kullanımına yönelik çalışmalar devam etmektedir [5], [6].

Bu çalışmada MÇSD yapılarının topolojik çeşitleri ve donanımsal özellikleri açıklanacak, yazındaki uygulama alanlarından örnekler verilecektir. Ayrıca, MÇSD yapılarının çalışma ilkeleri gözden geçirilecek, devre elemanlarının boyutlandırılması konusunda bilgi verilecektir. Bilgisayar benzetimi sonuçları ile yapının temel akım ve gerilim dalga şekilleri gösterilecek, diğer dönüştürücü topolojilerine göre üstün özellikleri belirtilecektir.

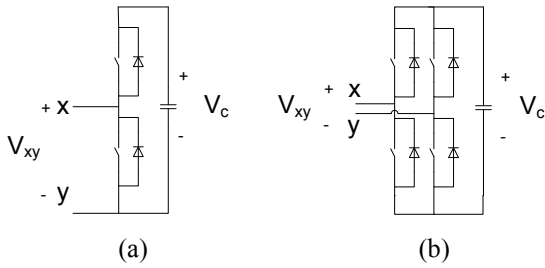
II. MÇSD Topoloji Çeşitleri, Terminoloji ve Uygulama Alanları

Temel olarak gerilim kaynaklı tip dönüştürücü olan MÇSD'lerin evirici modunda çalışması Şekil 1'de görüldüğü gibi, birden fazla dc gerilim seviyelerini ardışıl olarak birbirine ekleyerek ac gerilim oluşturma ilkesine dayanır.

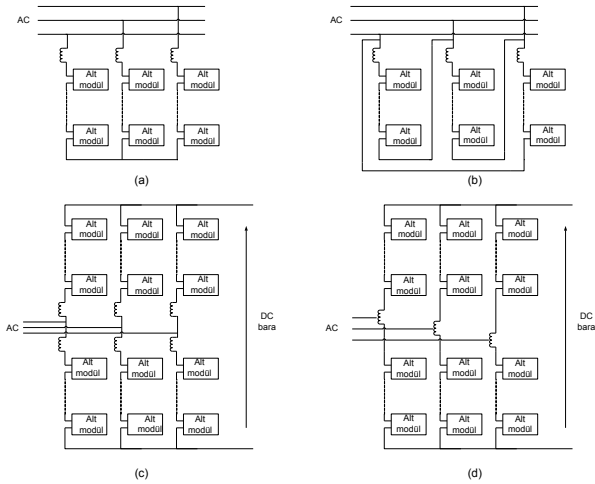
MÇSD'lerin topolojik yapılarında, dönüştürücüyü meydana getiren temel birim "alt modül"lerdir. Alt modüller Şekil 2.a'daki gibi kıyıcı hücre ya da Şekil 2.b'deki gibi köprü hücre yapısında olabilir. Alt modüller anahtarlama elemanları ve hücre kondansatöründen oluşur. Anahtarlama elemanlarının iletimde veya kesimde olmasına göre kıyıcı hücrenin çıkış gerilimi V_{xy} ; 0 ya da V_c değerini alabilirken, köprü hücrenin çıkış gerilimi V_{xy} ; 0, V_c ya da $-V_c$ değerini alabilir.



Şekil 1: MÇSD çıkış gerilimi oluşturma ilkesi



Şekil 2: MÇSD alt modül yapıları (a) kıyıcı hücre (b) köprü hücre



Şekil 3: MÇSD Topolojileri; Tek-Yıldız Köprü Hücreleri, Tek-Üçgen Köprü Hücreleri, Çift-Yıldız Kıyıcı Hücreleri ve Çift-Yıldız Köprü Hücreleri

MÇSD'ler hangi alt modülün kullanıldığına ve alt modüllerin birbirine bağlanma şekline göre farklı topolojik birleşimler oluşturabilirler. Kullanılan alt modül için kıyıcı hücre ve köprü hücre olmak üzere

iki seçenek mevcuttur. Alt modül sıralarının birbirine bağlanma şekli için yıldız bağlama ve üçgen bağlama olarak yine iki seçenek mevcuttur. Dahası, yıldız ya da üçgen bağlı sıraların da tek ya da çift kullanımına göre iki topoloji seçeneği daha ortaya çıkar. Dolayısıyla teorik olarak $2 \times 2 \times 2 = 8$ farklı birleşimli MÇSD topolojisi mevcuttur. Fakat bu sekiz seçeneğin hepsi pratik olarak anlamlı ya da uygulanabilir değildir. Tablo 1'de pratik olarak uygulanabilir topoloji birleşimleri ✓ işaretiyle, pratik uygulanabilirliği olmayan birleşimler ise x işaretiyle gösterilmiştir.

Tablo 1: MÇSD topoloji birleşimleri

	Yıldız		Üçgen	
	Tek	Çift	Tek	Çift
Kıyıcı	x	✓	x	x
Köprü	✓	✓	✓	x

Pratik uygulanabilirliği olan 4 alt tür aşağıdaki gibi isimlendirilir [7]:

- Tek-Yıldız Köprü Hücreleri (TYKH) (Şekil 3.a)
- Tek-Üçgen Köprü Hücreleri (TÜKH) (Şekil 3.b)
- Çift-Yıldız Kıyıcı Hücreleri (ÇYKİH) (Şekil 3.c veya d, alt modül: Şekil 2.a)
- Çift-Yıldız Köprü Hücreleri (ÇYKÖH) (Şekil 3.c veya d, alt modül: Şekil 2.b)

Diğer seçeneklerin pratik uygulanabilirliğinin olmaması şöyle açıklanabilir: Şekil 3.b, TÜKH, incelendiğinde "Çift-Üçgen" birleşiminin mümkün olmadığı anlaşılır. Üçgen bağlamada yıldız bağlamadaki gibi ortak bir nötr noktası olmadığı için "Çift-Üçgen" yapısı aslında pratik olarak birbirine paralel bağlı iki "Tek-Üçgen" yapısına eşittir. Tek-Yıldız ya da Tek-Üçgen yapısı çıkışında ac gerilim üretebilmek için köprü hücre kullanımı zorunludur. Bu yüzden "Tek-Yıldız Kıyıcı Hücreleri" ya da "Tek-Üçgen Kıyıcı Hücreleri" birleşimlerinin de pratikte kullanım bulması mümkün değildir. Dolayısıyla teoride mümkün olan sekiz topolojik birleşimin dördü pratikte uygulanabilir değildir.

Şekil 3'te görülen dört alt türün ortak özelliği alt modüllerin ardışıl bağlı olması ve bu modüllere de ardışıl bağlı indüktör bulundurmalarıdır. Şekil 3.a ve b'de görülen, ardışıl bağlı 3 sıra alt modüllerin her bir sırası, bir çıkış fazını üretir ve "faz bacağı" olarak adlandırılır. Şekil 3.c ve d'de görülen pozitif ve negatif dc bara arası ardışıl bağlı üç sıra alt modüllerin her bir sırası faz bacağı olarak adlandırılırken; pozitif veya negatif dc bara ve ac terminaller arasında kalan, ardışıl bağlı üst ve alt sıra alt modüllerin her bir sırası, kendi sıralarına ardışıl bağlı indüktörlerle birlikte, "üst kol" ve "alt kol" olarak adlandırılır. Dolayısıyla üst kol ve alt kol birlikte bir faz bacağı oluşturur. Her bir faz bacağında yer alan indüktörler "tampon indüktörü" olarak adlandırılır. Tampon indüktörlerinin

ilerleyen bölümlerde açıklanacak olan dolaşım akımlarının bastırılması, çıkış akımı harmonik bileşenlerinin azaltılması, faz kolunda oluşabilecek kısa devre akımının sınırlandırılması gibi işlevleri vardır. Şekil 3.c’de her bir alt ve üst kolda ayrı ayrı tampon indüktörü kullanılırken, Şekil 3.d’de alt ve üst kollar için ortak bağlı tampon indüktörü kullanılmıştır. Ortak bağlı tampon indüktörü, ayrı ayrı kullanılan tampon indüktörlerine göre daha küçük ve hafiftir.

TYKH ve TÜKH, ÇYKIH ve ÇYKÖH’nin aksine ortak bir dc barasına sahip değildir. Dolayısıyla TYKH ve TÜKH sistemde tek bir dc barası (enerji kaynağı) olması durumunda, dc baradan yüke (veya ters yonde) aktif güç aktarımı gerektiren motor sürücüsü gibi uygulamalarda kullanılamaz. Ancak birbirinden yalıtılmış, her bir alt modül için ayrı dc baraları var olursa, bunlar her bir alt modül kondansatörlerine paralel bağlanarak, motor sürücüsü uygulaması gerçekleştirilebilir. ÇYKIH ve ÇYKÖH ise, yıldız bağlantılarının ortak noktaları tek bir dc gerilim kaynağının pozitif ve negatif dc barası olarak kullanılarak, yalıtımlı kaynaklara gerek olmadan aktif güç aktarımı gerektiren motor sürücüsü, HVDC gibi uygulamalarda kullanılabilir.

ÇYKÖH alt modül çıkış gerilimi $-V_c$ değerini alabildiği için; ÇYKIH’nin aksine, ac gerilim üretimi sırasında dc gerilimi alçaltma ve yükseltme kabiliyetine sahiptir. Dolayısıyla dc gerilimdeki dalgalanmalara karşı daha dayanıklıdır. Bu özelliği ÇYKÖH’yi rüzgâr/güneş enerjisi gibi hava koşullarına doğrudan bağlı olup, dc barasında dalgalanmalar yaşayabilen yenilenebilir enerji kaynaklı sistemler için daha uygun yapmaktadır. ÇYKIH ise orta gerilim motor sürücü ve HVDC iletim uygulamalarında yaygın olarak kullanılmaktadır.

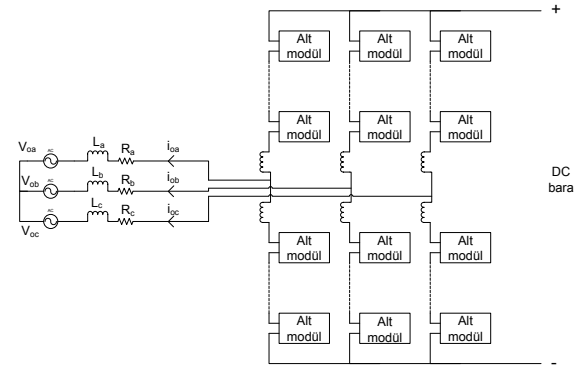
III. MÇSD Çalışma İlkeleri

MÇSD’lerin çalışma ilkeleri, yazında üzerinde en fazla çalışılmış ve genel MÇSD topolojisi olarak kabul görmüş olan ÇYKIH üzerinden açıklanacaktır.

Dönüştürücünün temel kontrol mekanizması, alt modüllerdeki anahtarlama elemanlarının kesimde veya iletimde olmasının düzenlenmesine dayanır. Her bir alt modüldeki iki anahtarlama elemanı birbirine zıt çalışır, yani biri iletimdeyken diğeri kesimdedir. Böylece alt modülün çıkış gerilimi, üst anahtarlama elemanı iletimde ve alt anahtarlama elemanı kesimdeyken hücre kondansatörünün gerilimine eşit olur ve kondansatör, alt modül akımının yönüne göre şarj ya da deşarj olur. Üst anahtarlama elemanı kesimde ve alt anahtarlama elemanı iletimdeyken ise alt modül çıkış gerilimi 0 olur ve kondansatör şarj ya da deşarj olmaz. MÇSD

kontrol amaçlarından biri alt modül kondansatörlerinin tümünün gerilimlerini tekil olarak birbirine yakın ve belirli sınırların içinde tutmaktır. Bir başka amaç ise tüm kondansatörlerin gerilimleri toplamını belirli sınırların içinde tutmaktır.

Her bir alt modülün çıkış gerilimi, dönüştürücü ac terminallerinde bir gerilim seviyesi oluşturur. Şekil 4’teki gibi üç fazlı yıldız yük bağlı, faz kolunda N adet alt modül barındıran dönüştürücünün faz-nötr arası çıkış gerilimi $N+1$, faz-faz arası çıkış gerilimi $2N+1$ seviyeden oluşur. Dolayısıyla alt modül sayısı arttıkça dönüştürücü çıkış gerilimi ideal sinüse yaklaşır. DC bara gerilimi V_{DC} ise; dönüştürücü, alt modüllerdeki hücre kondansatörlerini V_{DC}/N değerine şarj eder ki bu değer, önceki paragrafta bahsedilen sınırların içinde yer almalıdır.

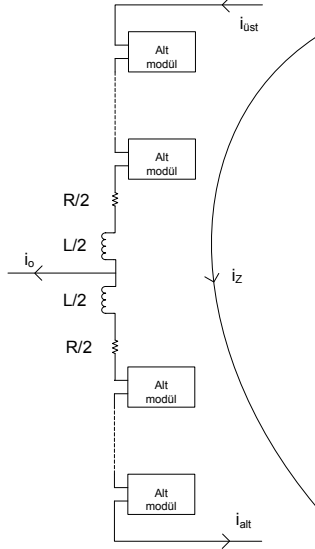


Şekil 4: Üç fazlı yıldız yük bağlı MÇSD

Faz kollarında yer alan alt modül sayısı, N, belirlenirken şu noktalar göz önünde bulundurulmalıdır: çıkış gerilim dalga şekli ve toplam harmonik bozulma, dc bara gerilimi, yarıiletkenlerin sınırları ve maliyet. Teknik açıdan en önemli kistas çıkış geriliminde beklenen dalga şekli ve toplam harmonik bozulmadır. Modül sayısı arttıkça çıkış gerilimi ideal sinüse yaklaşır. Hücre kondansatörlerinin gerilim sınırı V_{DC}/N değerini kapsmalıdır, dolayısıyla bu sınırın altında kalabilmek için alt modül sayısını artırmak gerekebilir. Anahtarlama yarıiletkenleri kesimdeyken V_c değerinde gerilime maruz kalırlar ve iletimde kaldıkları süre boyunca, ki bu süre alt modül sayısına bağlı olarak değişir, faz kolu akımlarını taşırlar. Bu yarıiletkenlerin gerilim ve akım sınırlarının altında kalabilmek için alt modül sayısını artırmak gerekebilir. Elbette alt modül sayısının artması, dönüştürücünün maliyetinin artmasına neden olur. İdeal N sayısı uygulamaya göre, analiz, benzetim çalışmaları ve deneysel çalışmalar yapılarak belirlenmelidir.

Alt modüllerde yer alan enerji depolama birimlerinin, tampon indüktörü ve hücre

kondansatörleri, değerlerinin belirlenmesi; dönüştürücü devresinin akım ve gerilim dinamiklerine bağlıdır. Şekil 5'te MÇSD'lerin bir faz bacağında dönen akımlar gösterilmektedir. Bunlar üst kol akımı, $i_{üst}$; alt kol akımı, i_{alt} ; çıkış akımı, i_o ve üst koldan alt kola doğru akan akım olan "dolaşım akımı", i_z 'dir.



Şekil 5: MÇSD'nin bir faz bacağında dolaşım akımı

Faz kolu akımları, çıkış akımının yarısı ve dolaşım akımının toplamından oluşur:

$$i_{üst} = i_o/2 + i_z \quad (1)$$

$$i_{alt} = -i_o/2 + i_z \quad (2)$$

Dolaşım akımı, dc ve ac bileşenlerden oluşur. DC bileşenler yüke aktif güç iletiminde bulunurken; ac bileşenler hücre kondansatörü gerilim dalgalanmalarından ve fazlar arası gerilim farkından kaynaklanır:

$$i_z = i_{zdc} + i_{zac}(t) \quad (3)$$

Dolaşım akımları, alt modül elemanlarının anma değerleri, I^2R kayıpları ve dönüştürücünün verimi gibi parametreleri olumsuz yönde etkilediği için bu akımları mümkün olduğunca azaltmak gerekir. Dolaşım akımının ac bileşeni, devre parametrelerine göre değişen frekanslarda rezonansa girer. Dönüştürücünün rezonansa girip büyük dolaşım akımlarına sahip olmaması için, rezonans frekansını etkileyen enerji depolama birimlerinin (tampon indüktörü ve hücre kondansatörü) seçimi aşağıdaki formüle göre yapılmalıdır [8] (w_o , rad/s olarak çıkış gerilimi temel frekansdır):

$$LC > \frac{5N}{24w_o^2} \quad (4)$$

Yukarıdaki formül tampon indüktörü ve hücre kondansatörünün çarpımları için bir kıstas vermektedir. Bu birimlerin ayrı ayrı değerlerini belirlemek için ise öncelikle hücre kondansatörünün değerini üzerindeki gerilim dalgalanmalarını kıstas olarak belirlemek mümkündür:

$$C = \frac{i_{o_tepe}}{2N * w_o * \Delta V_{am}} \quad (5)$$

i_{o_tepe} : çıkış akımı tepe değeri

ΔV_{am} : hücre kondansatörü en yüksek gerilim dalgalanması

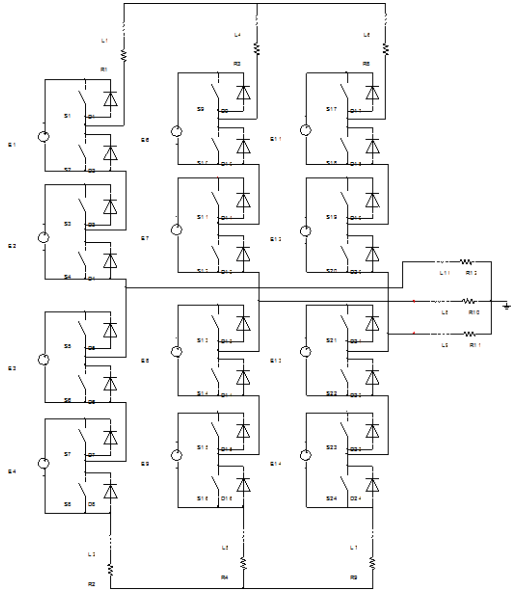
MÇSD alt modüllerindeki anahtarlama elemanlarının sürülmesi için, temel olarak taşıyıcı tabanlı iki ayrı darbe genişlik modülasyonu yöntemi kullanılır: seviye kaydırmalı yöntem ve faz kaydırmalı (alt-harmonik) yöntem. Anahtarlama yönteminin ve hücre kondansatörlerinin gerilim dengesinin sağlanması MÇSD teknolojisinin önemli kavramlarından olup bunların ayrıntıları başka bir çalışmada kapsanacaktır.

Donanımsal özellikleri göz önüne alındığında, MÇSD'ler aşağıda sıralanan özellikleri itibariyle geleneksel 2/3 seviyeli gerilim kaynaklı soydaşlarından ayrılırlar: (i) Modüler yapıları sayesinde geniş bir aralıkta farklı güç ve giriş/çıkış gerilim seviyelerine uyarlanabilirler. (ii) Çok seviyeli çıkış gerilimine sahip olmaları çıkış harmonik bozulmalarını ve süzgeç boyutunu azaltır. (iii) DC baradan ve dönüştürücü faz bacağından sürekli olarak akım çekilmesi sebebiyle dc bara kondansatörü küçülür. (iv) Anahtarlama frekansı görece düşüktür, yarıiletkenlerdeki anahtarlama güç kayıpları daha azdır. (v) DC bara kısa devre durumunda, kısa devre akımı dönüştürücü faz bacağındaki indüktör tarafından sınırlanır, sistem daha kısa sürede yeniden kullanılabilir hale gelir. (vi) Anahtarlama elemanlarının maruz kaldığı gerilim seviyeleri daha düşüktür, böylece standart ve kabul görmüş elemanlar kullanılarak maliyet azaltılıp, hızla gelişen yarıiletken teknolojisinden görece bağımsız bir yapı oluşturulabilir. (vii) Alt modüllerden herhangi bir veya birkaçının kullanılamaması durumunda dönüştürücü çalışmasına devam edebilir (sistem yedeklemelidir).

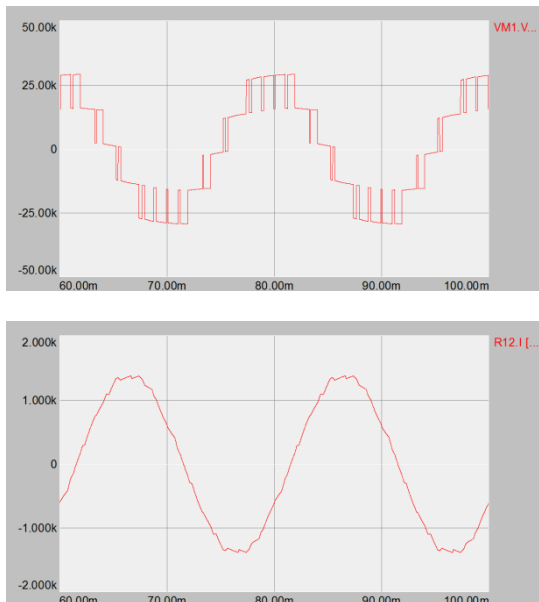
IV. Benzetim Çalışması

Bu çalışma kapsamında, orta gerilim motor sürücü uygulaması için ÇYKIH birleşimli MÇSD yapısı ile Ansoft-Simplorer yazılımı kullanılarak bilgisayar benzetimi yapılmış, devrenin temel akım ve gerilimleri kararlı hal ve dinamik davranış bakımından incelenmiştir. Anahtarlama için seviye

kaydırmalı darbe genişlik modülasyonu kullanılmış, SVPWM yöntemi uygulanmıştır. Benzetim çalışmasında faz kolu başına 2 alt modül kullanılmıştır. Benzetim devresi Şekil 6'da, faz arası gerilim ve yük akımı Şekil 7'de, devre parametreleri Tablo 2'de gösterilmiştir. Şekil 7'den görüleceği üzere, hücreler düşük frekansta anahtarlar arası çıkışta ideale yakın sinüs akım akmaktadır. Böylece MÇSD ile yüksek gerilim seviyelerinde ve düşük anahtarlama frekanslarında büyük güç seviyelerine ulaşmak olanaklıdır.



Şekil 6: ÇYKIH MÇSD benzetim devresi



Şekil 7: MÇSD faz arası gerilimi (üst) ve faz akımı (alt)

Tablo 2: MÇSD benzetim devresi parametreleri

Çıkış gücü (üç-faz)	28.98MW
Çıkış faz arası gerilimi	20.13kV _{rms}

Çıkış gerilim frekansı (f_o)	50Hz
Çıkış faz akımı	983A _{rms}
Güç katsayısı	0.845
Faz başına yük direnci	10Ω
Faz başına yük indüktansı	18mH
Alt modül dc bara gerilimi	15kV
Kol başına hat direnci	50mΩ
Kol başına tampon indüktansı	10mH
$m_f (=f_c/f_o)$	9
$m_a (=2A_m/((n-1)*A_c))$	1.1

V. Sonuçlar

MÇSD topolojisi özellikle geniş güç ve gerilim aralığında uygulanabilirliği ve çıkış gerilim/akım dalgalarının kalitesinden dolayı HVDC, orta-gerilim motor sürücüsü, STATCOM gibi uygulamalarda gün geçtikçe daha yaygın olarak yer almaktadır. Bu çalışmada MÇSD'lerin genel topolojik ve donanımsal özellikleri incelenmiş, çalışma ve devre elemanlarının boyutlandırma ilkelerinden bahsedilmiştir. Yapının temel akım/gerilim dinamikleri benzetim çalışmasıyla gösterilmiş, düşük frekansta anahtarlama yaparak yüksek gerilim seviyelerinde büyük güçlere ulaşılabilirdiği görülmüştür.

Kaynakça

- [1] A. Lesnicar and R. Marquardt, "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range," in *Proc. IEEE Power Tech Conf.*, 2003, 6pp.
- [2] R.H. Baker and L.H. Bannister, "Electric power converter," U.S. Patent 3 867 643, 1975.
- [3] A. Nabae, I. Takahashi, and H. Akagi, "A new neutral-point-clamped PWM inverter," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, pp. 518-523, 1981.
- [4] T. Meynard and H. Foch, "Multi-level conversion: high voltage choppers and voltage-source inverters," in *Record. IEEE PESC*, 1992, pp. 397-403.
- [5] J. Rodriguez, J.-S. Lai, and F. Z. Peng, "Multilevel inverters: a survey of topologies, controls, and applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 49, pp. 724-738, 2002.
- [6] L. Lambertz, R. Marquardt, and A. Mayer, "Modular converter systems for vehicle applications," in *Emobility-Electrical Power Train*, pp. 1-6, 2010.
- [7] H. Akagi, "Classification, terminology, and application of the modular multilevel cascade converter (MMCC)," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 26, pp. 3119-3130, 2011.
- [8] K. Ives, A. Antonopoulos, S. Norrga, and H.-P. Nee, "Steady-state analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 27, pp. 57-68, 2012.