Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücülerin Kontrolü
Control of Modular Multilevel Converter

Feyzullah Ertürk, Barış Çiftçi, Ahmet M. Hava

Elektrik ve Elektronik Mühendisliği
Orta Doğu Teknik Üniversitesi
feyzullah.erturk@metu.edu.tr, baris.ciftci@metu.edu.tr, hava@metu.edu.tr

Özet

Bu makale, son yıllarda güç elektroniğinin yüksek güç yüksek gerilim uygulamalarında yer edinmeye başlayan modüler çok seviyeli dönüştürücülerin (MÇSD) kontrolünü ele almaktadır. Uçtan uca bir MÇSD sisteminin nasıl kontrol edileceği ayrıntılı şekilde anlatılmaktadır. Öncelikle yük akımlarının kontrolü, sonrasında bu dönüştürücüye özgü olan dolaşım akımlarının kontrolü işlenmektedir. Ardından bu iki kontrolcünün ürettiği işaretler birleştirilip darbe genişlik modülasyonuna (DGM) referans olacak hale getirilişi ve çok seviyeli DGM anlatılmaktadır. Alışılageldik iki seviyeli dönüştürücülerden farklı olarak DGM işaretleri doğrudan güç yarı iletkenlerine gitmemekte ve kondansatör gerilim dengeleme algoritması aracılığıyla iletime sokulacak altmodüller belirlenmektedir. Son olarak örnek bir sistem üzerinde MÇSD kontrolü gerçeklenmekte ve kontrolcülerin performansı gösterilmektedir.

Abstract

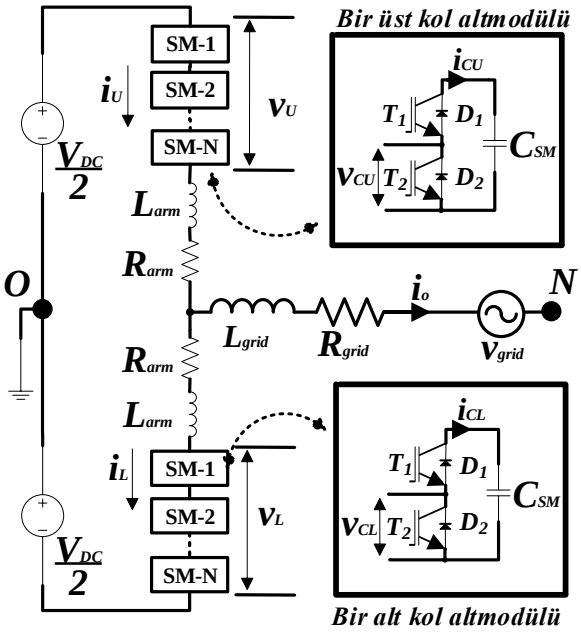
This paper examines the control of the modular multilevel converters (MMC) that become prominent in the high power high voltage applications of power electronics. It describes how to control an MMC system from end to end in detail. At first, it shows how to control the output currents and then the circulating current which is unique to this converter. Generation of reference signals for pulse width modulation (PWM) is presented by combining the two controller output. Also, multilevel PWM techniques are addressed. Different from conventional two level converter, PWM signals do not directly go to power semiconductors, but which submodules to turn on are determined by the capacitor voltage balancing algorithm. Lastly, using an example system, the control of MMC is realized and controller performances are illustrated.

1. Giriş

Son yıllarda artan yenilenebilir enerji üretimi, elektriğin üretim bölgesinden tüketim merkezlerine verimli ve ekonomik iletimi konusunda yeni çözüm arayışlarına neden olmuştur. Özellikle açık denizlerde kurulan rüzgâr çiftlikleri, tüketim merkezlerine uzak elektrik santralleri ve ülkeler arası elektrik ticareti, yüksek gerilim doğru akım iletim sistemlerine (HVDC) olan ihtiyacı artırmıştır. Yaklaşık on yıl önce ortaya atılmış olan Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücü (MÇSD)'ler artık HVDC uygulamaları için önemli bir topoloji haline gelmektedir.

Standart IGBT ve kondansatörlerden üretilen altmodül yapısıyla gelen modülerlik sayesinde istenilen gerilim seviyesine, seri bağlı altmodül sayısı arttırılarak ulaşılabilmesi ve çıkış gerilim dalgasının ideal sinüse yaklaşması ve dolayısıyla düşük harmonik bozulmaya sahip olması, MÇSD'nin özellikle megavat ve üstü güçler ile orta ve yüksek gerilim seviyelerinde yer edinmesini kolaylaştırmıştır. MÇSD filtrelemeyi yapısına entegre ettiği için ana dc baradan çekilen akımda ve çıkış terminallerindeki gerilimde harmonik bozulma düşüktür.

MÇSD sistemlerinin genel yapısı ve kondansatör gerilim dengeleme [1]-[3], dolaşım akımlarının matematiksel gösterimi [4], dolaşım akımlarının kontrolü [5]-[6], DGM [7] gibi konularda çalışmalar yapılmıştır.



Şekil 1: MÇSD bir fazının temel yapısı ve altmodül devresi.

Ana yapısı Şekil 1'de gösterilen üç fazlı ve çift yıldız yapılı bir MÇSD 6 adet "*kol*" adı verilen yapıdan oluşur. Bu kollar iki seviyeli eviricilerdeki 6 güç yarıiletkeninin yerini almıştır ve N tane altmodülden oluşurlar. İki seviyeli eviricilerde dc bara geriliminin tamamı, anahtarlama ile ani olarak çıkış terminalinde görülürken, MÇSD yapısında kademeli şekilde çıkışa yansıtılır, böylece basamaklı gerilim üretilir ve harmonik bozulma azalır. Altmodüller MÇSD'nin temel yapı taşıdır; yarım köprü ve kondansatörden oluşurlar. Yarım köprü yapısı nedeniyle Şekil 1'de gösterilen T_1 ve T_2 transistörleri birbirlerine göre ters çalışırlar; biri iletimdeyken diğeri kesimdedir. Altmodülün iletimde olması kondansatör

geriliminin terminallere yansıması demektir; bu da T_1'in iletimde olması anlamına gelir. Altmodül kesimdeyse terminalleri kısa devre edilmiştir ve T_2 iletimdedir. Ayrıca her kolda birer indüktör vardır. İşlevi alt ve üst kol arasındaki dolaşım akımlarını sınırlamaktır. Bunun yanı sıra çıkış akımı için de filtreleme özelliği gösterir.

Bu çalışmada öncelikle MÇSD'nin yük ve dolaşım akımlarının kontrolü ele alınacak, sonrasında çok seviyeli sistemler için DGM kısmına geçilecektir. Ardından MÇSD sisteminin çalışabilmesi için gerekli olan kondansatör gerilimi dengeleme algoritması işlenecektir. Sonunda ise anlatılan uçtan uca kontrol yöntemi, örnek sistem üzerinde benzetim yoluyla gerçeklenecektir.

2. Modüler Çok Seviyeli Dönüştürücülerde Akım Kontrolü

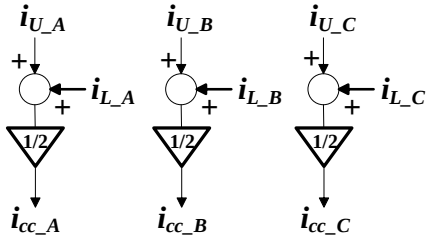
2.1. Geri Besleme için Akım Ölçülmesi

Akım ölçümleri, MÇSD yük akım kontrolü, dolaşım akım kontrolü ve kondansatör gerilim dengelenmesinde kullanılmaktadır. Bunun için kol akımlarının ölçülmesi, yeterlidir. Çünkü dolaşım ve yük akımları da bunlardan elde edilebilir. MÇSD uygulamaları genelde 3 fazlı olduğu için 6 kol akımı ölçülecektir. Kol akımlarının iki bileşeni vardır; bunlar dolaşım akımı ve yük akımıdır. Aşağıdaki (1) ve (2) numaralı eşitliklerde bu durum A fazı için gösterilmiş olup diğer fazlar için de geçerlidir.

$$i_{U_A} = i_{cc_A} + \frac{i_{o_A}}{2} \quad (1)$$

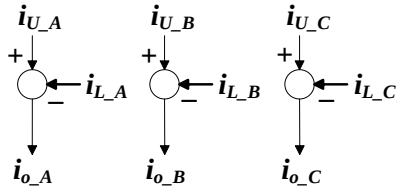
$$i_{L_A} = i_{cc_A} - \frac{i_{o_A}}{2} \quad (2)$$

Burada i_{U_A}, i_{U_B} ve i_{U_C} A, B ve C fazlarının üst kol akımlarıyken i_{L_A}, i_{L_B} ve i_{L_C} ise alt kol akımlarıdır. Alt ve üst kol akımlarının toplamını yarısı dolaşım akımlarıdır ve Şekil 2'de görüldüğü gibi A, B ve C fazları için sırasıyla i_{cc_A}, i_{cc_B} ve i_{cc_C} şeklinde ifade edilmektedir.



Şekil 2: Kol akımlarından dolaşım akımı hesaplanması.

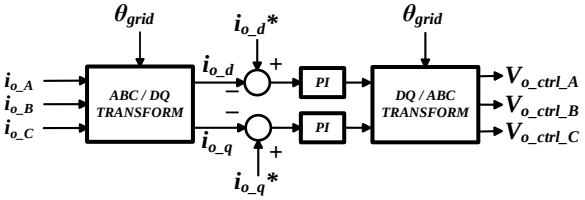
Kol akımlarının farkı olan yük akımları, Şekil 3'de görüldüğü gibi bulunup, A, B ve C fazları için sırasıyla i_{o_A}, i_{o_B} ve i_{o_C} olarak ifade edilmektedir.



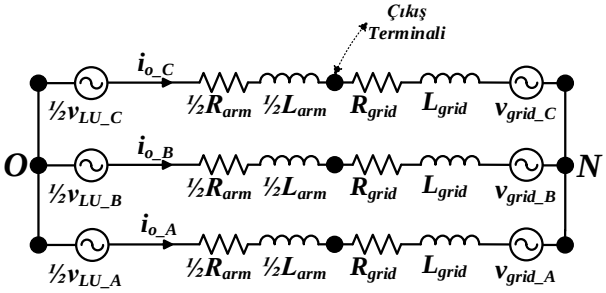
Şekil 3: Kol akımlarından yük akımı hesaplanması.

2.2. Yük Akım Kontrolü

Vektör kontrol yöntemiyle yük akımının etkin ve tepkin güç taşıyan bileşenleri ayrı ayrı denetlenir ve bu şekilde yük akımının hem şiddeti hem de fazı kontrol edilmiş olur. Şebeke gerilimini okuyan bir PLL'nin ürettiği şebeke açısı olan θ_{grid}, sistemin şebekeyle eşzamanlı olarak çalışmasını sağlar. Bu kısımda $i_{o_d}*$ ve $i_{o_q}*$ ile ifade edilen akım referansları, şebekeye bağlı sistemlerde güç kontrolcüsünden veya ana dc bara gerilim kontrolcüsünden gelmektedir.



Şekil 4: Yük akımı kontrolü.



Şekil 5: MÇSD yük akımı için eşdeğer model.

Yük açısından MÇSD'nin eşdeğer modeli Şekil 5'te verilmiştir. Burada alt ve üst kol gerilimleri farkının yarısı (A fazı için $\frac{1}{2}v_{LU_A} = (v_{L_A} - v_{U_A})/2$) yük akımlarına neden olur. Buna MÇSD'nin ürettiği gerilim denilebilir. Kontrolcünün amacı ise bu gerilimi büyüklük ve faz olarak istenilen akımı oluşturacak şekilde sentezlemektir.

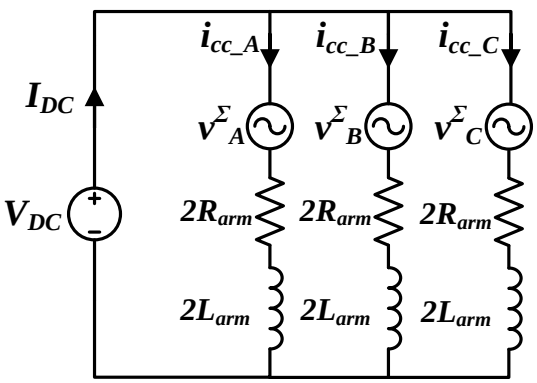
Yük akımı kontrolcüsünden çıkan işaretlere ($V_{o_ctrl_A}$, $V_{o_ctrl_B}$ ve $V_{o_ctrl_C}$) sıfır sıralı bileşen (3, 9, 15 gibi harmonikler) eklenerek dönüştürücünün üretebildiği gerilim arttırılabilir. Bu çalışmada, uzay vektör modülasyonunun sıfır sıralı bileşeni kullanılacaktır [8].

2.3. Dolaşım Akımının Kontrolü

Alt ve üst kol gerilimleri toplamı, v^{Σ}, sabit değildir çünkü altmodül kondansatörlerinin üzerinden, iletime sokulduklarında kol akımı geçmektedir. Elektriksel eşitliği olan $i = C \cdot dV/dt$ gereği, kondansatör akımı, kondansatör gerilimini etkilemektedir. Bu durumun ayrıntılı matematiksel incelemesi [4]'te bulunmaktadır.

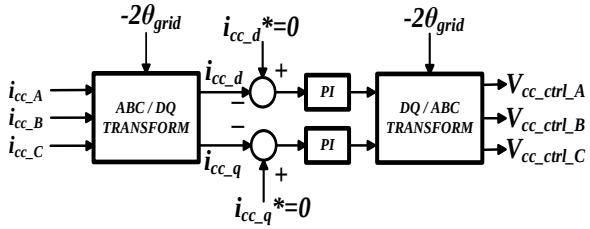
Dolaşım akımındaki dc bileşen, yüke etkin güç transferi sonucunda oluşmaktadır. Bu haliyle sistemin çalışması için gereklidir.

Alt ve üst kol gerilimleri toplamındaki (A fazı için $v^{\Sigma}{}_A = v_{L_A} + v_{U_A}$) periyodik değişimler 2, 4, 6 gibi çift harmoniklerde dolaşım akımlarına neden olmaktadır. Bunların büyüklüğü yük akımıyla doğru orantılıyken, altmodül kondansatör sığası ile ters orantılıdır. Ancak 2. harmonik diğerlerinden baskındır; bu yüzden bunun bastırılmasına değinilecektir.



Şekil 6: Dolaşım akımı incelemesi için eşdeğer devre.

İkinci harmonik dolaşım akımı gereksiz güç kayıplarına neden olarak verimi düşürmekte, soğutma sistemi kapasitesini ve soğutma masraflarını arttırmakta ve daha yüksek akım anma değerli malzeme kullanma gereği yaratmaktadır. Bu yüzden 2. harmoniğin yok edilmesi yerinde olacaktır. Yazında bunun için çeşitli çalışmalar mevcuttur [5] – [6]. Temel amaç, 2. harmonikte dolaşım akımı oluşmaması için, bu akıma sebep olan v^{Σ} 'deki 2. harmonik gerilimini yok etmektir. Bu çalışmada [5]'teki yöntem uygulanacaktır.



Şekil 7: Dolaşım akımı kontrolü işlevsel blok şeması.

Dolaşım akım kontrolü etkin değilken alt ve üst kolda toplam $2N$ altmodülden N tanesi iletimdedir. Dolaşım akım kontrolü etkinleştirildiğinde iletimdeki altmodül sayısı sabit kalmayacak; bir periyot içinde N sayısından az veya çok olduğu zamanlar olacaktır.

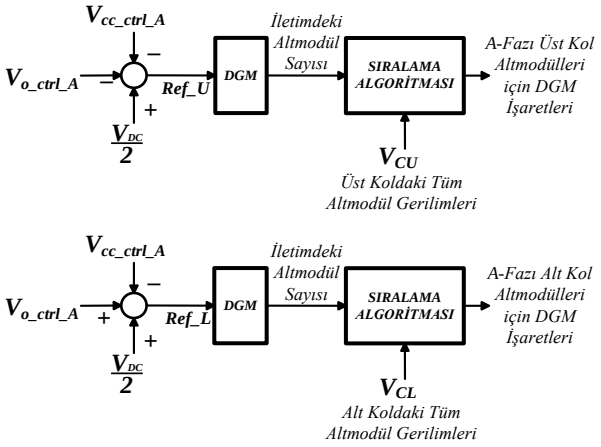
Dolaşım akımı kontrolü için de yük akım kontrolü gibi vektör akım kontrolü yöntemi kullanılmaktadır. Akımın senkron referans düzlemine göre DQ dönüşümü yapılmakta ve i_{cc_d} ve i_{cc_q} şeklinde sabit bileşenler elde edilmektedir. Ancak burada dönüşümlerde kullanılan açı $-2\theta_{grid}$ 'tir. Çünkü 2. harmonik kontrol edilmek istendiğinden açısı şebeke açısının 2 katıdır ve bu harmonik, negatif sıralı bileşen olduğu için başında $(-)$ işareti vardır.

Dolaşım akımının 2. harmonik bileşenini yok etmek için referans değerleri olarak $i_{cc_d}{}^{*} = 0$ ve $i_{cc_q}{}^{*} = 0$ seçilmiştir.

3. Anahtarlama İşaretleri Üretilmesi ve Kondansatör Gerilim Dengelenmesi

3.1. DGM için Referans Üretilmesi

DGM'de taşıyıcı üçgen işaretle modülasyona sokulacak olan referans işareti, yük ve dolaşım akımı kontrolcü çıkışlarından üretilmesi gerekir. Burada sadece A fazı gösterilecek olup diğer fazlar bunun aynısıdır.



Şekil 8: Kontrol işaretlerinden DGM işaretleri üretilmesi.

DGM'ye girecek olan referans işaret Şekil 8'de "Ref_U" ve "Ref_L" şeklinde gösterilmiştir. Burada $V_{o_ctrl_A}$, $V_{cc_ctrl_A}$ ve $V_{DC}/2$ işaretleri birleştirilmektedir. Hem alt hem de üst kol için ana dc bara geriliminin yarısı $V_{DC}/2$ toplanırken dolaşım akımı kontrol işareti $V_{cc_ctrl_A}$ ise çıkarılmaktadır. Dikkat edilecek husus yük akımı kontrol işareti olan $V_{o_ctrl_A}$ üst kolda çıkarılırken alt kolda toplanmaktadır. DGM için üretilen referanslar (4) ve (5)'te verilmiştir.

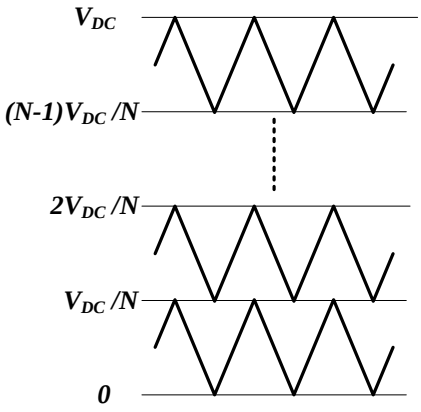
$$Ref_U = -V_{o_ctrl_A} - V_{cc_ctrl_A} + V_{DC}/2 \quad (4)$$

$$Ref_L = V_{o_ctrl_A} - V_{cc_ctrl_A} + V_{DC}/2 \quad (5)$$

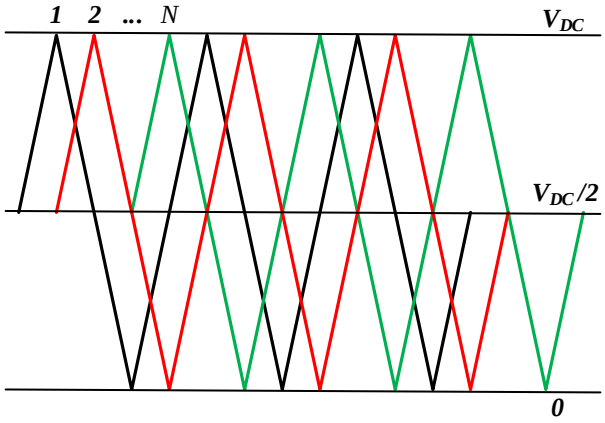
3.2. Çok Seviyeli Dönüştürücüler için DGM

Koldaki bütün altmodüller için birer DGM taşıyıcı üçgen işareti gerekmektedir. Seviye kaydırmalı yöntemlerde 0 ile V_{DC} gerilimi arasına N adet üçgen üst üste yerleştirilir ve genlikleri ise V_{DC}/N*'dir*. Faz kaydırmalı yöntemde ise periyot N parçaya bölünerek taşıyıcılar arasına $2\pi/N$ faz farkı konulur. Yazında genellikle Şekil 9 ve 10'da gösterilen iki yöntem tercih edilmektedir: faz kaydırmalı yöntem ile seviye kaydırmalı yöntemlerden düz dizme [7].

Uygulamada, koldaki altmodül sayısı olan N eğer tek sayı ise faz kaydırmalı yöntemde alt ve üst kol üçgenleri arasına (alt kolun birinci üçgeniyle üst kolun birincisi arasında v.b) π/N faz farkı konulması gerekmektedir. N'nin çift sayı olması durumda böyle bir durum yoktur. Düz dizmeli seviye kaydırma yönteminde ise N sayısının çift veya tek sayı olmasına bakmaksızın π kadardır. Bu uyarlama, sistemin $N+1$ seviye çıkış gerilimi üretmesini sağlarken dolaşım akım kontrolü yokken yalın haliyle alt ve üst kolda toplamda N adet altmodülün iletimde olmasını sağlar. Yazında $2N+1$ seviye anahtarlama da önerilmiştir [9]-[10]. Faz kaydırmalı yöntemde N çift sayı olduğu zaman π/N faz farkı konularak, tek sayı olduğunda ise faz farkı konulmayarak $2N+1$ seviye anahtarlama yapılabilir. Düz dizmeli seviye kaydırma yönteminde ise yine alt ve üst kol DGM taşıyıcı işaretleri arasına faz farkı konulmaması $2N+1$ seviye anahtarlamayı sağlar.



Şekil 9: Seviye kaydırmalı DGM – düz dizme yöntemi.



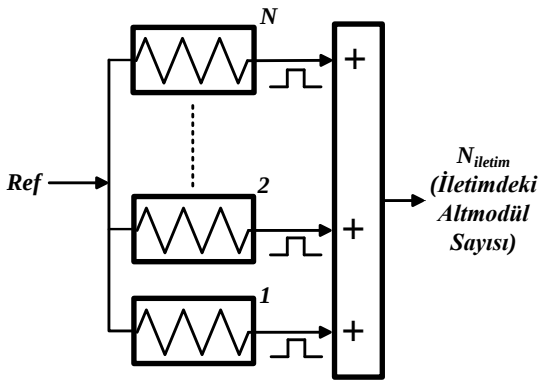
Şekil 10: Faz kaydırmalı DGM.

Her bir üçgen taşıyıcı ile referans işaretlerinin karşılaştırılması sonucu çıkan 1 ve 0 anahtarlama değerleri doğrudan yarıiletkenlere kapı işareti olarak gitmeyip kondansatör gerilim dengelenmesi için sıralama algoritmasına gider. Dolayısıyla bu 1 ve 0 değerleri toplanıp altmodüllerden kaç tanesinin iletimde kaç tanesinin kesimde olduğu belirlenir. Kısaca Şekil 11'de de gösterildiği gibi DGM bölümünün işi referansı taşıyıcı üçgen işaretiyle karşılaştırmak ve sonuçları toplayıp iletimdeki altmodül sayısını gerilim dengeleme kısmına göndermektir.

3.3. Altmodül Kondansatör Gerilim Dengelenmesi

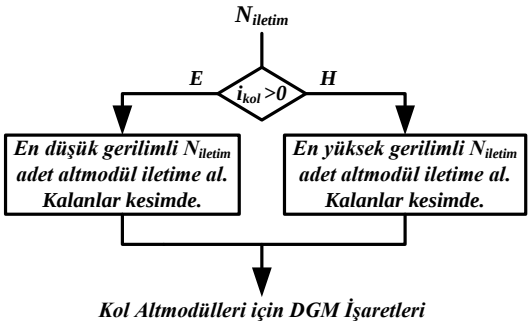
MÇSD'de altmodüller iletime girdiğinde kondansatörlerin üzerlerinden kol akımları geçtiği için gerilimleri oynayacaktır. Kondansatör gerilim dengelenmesi MÇSD için vazgeçilmezdir ve her durumda yapılmalıdır. Aksi takdirde kondansatör gerilimleri dengesizleşecek, bazılarınınki çok düşerken diğerlerininki çok artacaktır ve bunun sonucu olarak sistem çökecektir.

Yazında kondansatör gerilim dengeleme algoritmaları önerilmiştir. Bunlar, sıralama algoritması [1] – [2] ve faz kaydırmalı DGM'ye dayalı gerilim dengeleme [3] şeklinde iki ana yöntemdir.



Şekil 11: DGM yapısı ve iletimdeki altmodül sayısının belirlenmesi.

Bu çalışmada, Şekil 12'de de gösterilen sıralama algoritması kullanılacaktır. Bu yöntem, kol akımı pozitifken kondansatörleri dolduracağı için en düşük gerilime sahip altmodüller iletime sokularak onların gerilimlerinin artmasını sağlamaktadır. Kol akımı negatifken kondansatörleri boşaltacağı için en yüksek gerilimli altmodüller iletime sokularak bütün altmodül gerilimlerinin belli bir gerilim bandına yakınsaması sağlanır. Böylece koldaki bütün altmodüller neredeyse aynı dalga formunu takip ederler. Bu yöntem, altmodül kondansatör gerilimleri kol akımın yönüne göre küçükten büyüğe ve büyükten küçüğe sıralandığı için sıralama algoritması diye adlandırılmaktadır.



Şekil 12: Kondansatör gerilim dengelenmesi için sıralama algoritması – bir kol altmodülleri için.

Sıralama algoritmasının özü korunarak yarıiletken anahtarlanma sayısı azaltılması üzerine çalışılmıştır. Referans [5]'te, iletime girecek altmodül, kesimdekilerden; kesime girecek altmodül ise iletimde olanlardan seçilerek daha düşük toplam anahtarlama sayısı elde edilebilecek yöntem önerilmiştir.

4. Benzetim

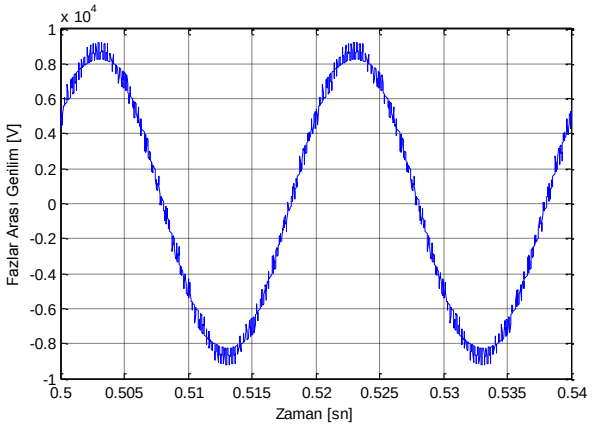
MÇSD sistemindeki yük ve dolaşım akımları kontrolü, modülasyon ve kondansatör gerilim dengelenmesi, örnek bir sistem üzerinde Matlab/Simulink benzetimi ile gösterilecektir. İncelenen sistem 6kV orta gerilim şebekeye bağlı 10 MVA gücünde bir MÇSD'dir. Benzetimde sistemin tam yükte dalga kalitesi incelenecek olup sonrasında dinamik çalışma koşullarındaki davranışı incelenecek ve sonrasında dolaşım akım kontrolü etkinleştirilip sonuçlar değerlendirilecektir.

Çizelge 1 – Benzetim sistemin özelikleri.

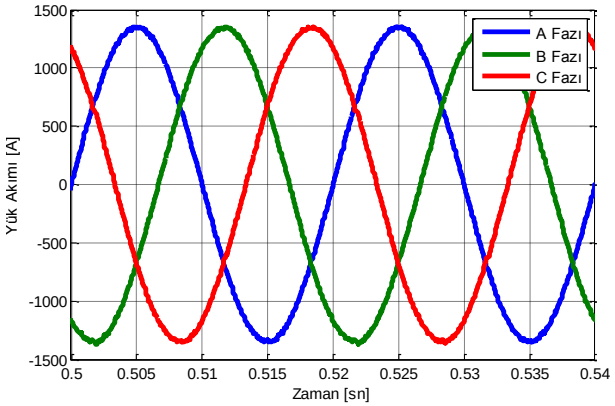
Sembol	Anlam	Değer	Birim	Ek bilgi
N	Koldaki altmodül	5	-	
f_c	DGM taşıcıyı frekansı	2250	Hz	Düz dizme
V_{DC}	DC bara gerilimi	10	kV	
R_{arm}	Kol eşdeğer direnci	50	mΩ	
L_{arm}	Kol indüktansı	2.5	mH	0.225pu
C_{SM}	Altmodül sığası	6	mF	36kJ/MVA
V_{grid}	Şebeke gerilimi (faz-faz)	6	kV	
R_{grid}	Şebeke direnci	24	mΩ	
L_{grid}	Şebeke indüktansı	1.1	mH	0.1pu
f	Şebeke frekansı	50	Hz	

4.1. Tam Yük Kararlı Hal Çalışması

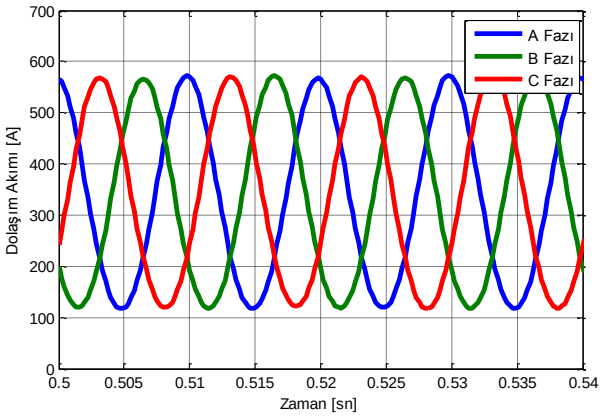
Bu kısmda yük akım kontrolü olup dolaşım akım kontrolü etkin değildir. Benzetimi yapılan sistemin fazarası gerilimi Şekil 13'te verilmiştir. Basamaklı bir çıkış gerilim dalgası yerine sinüse daha yakın dalga üretildiği görülmektedir. Bunun nedeni kol indüktansının Şekil 5'teki eşdeğer devrede de görüldüğü üzere çıkış akımına da filtreleme yapmasıdır. Yük ve dolaşım akımları Şekil 14 ve 15'te görülmektedir. Dolaşım akımı etkin olmadığı için Şekil 15'te yaklaşık 225 A genliğinde 2. harmonik bileşen vardır.



Şekil 13: A ve B fazları arasındaki gerilim – kararlı hal.



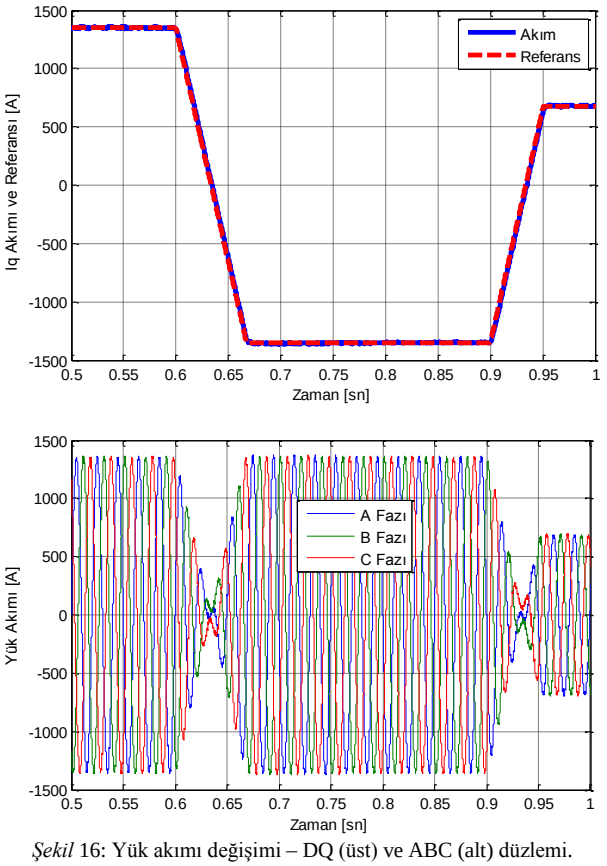
Şekil 14: Yük akımı – kararlı hal.



Şekil 15: Dolaşım akımı – karalı hal.

4.2. Geçici Rejim Çalışması

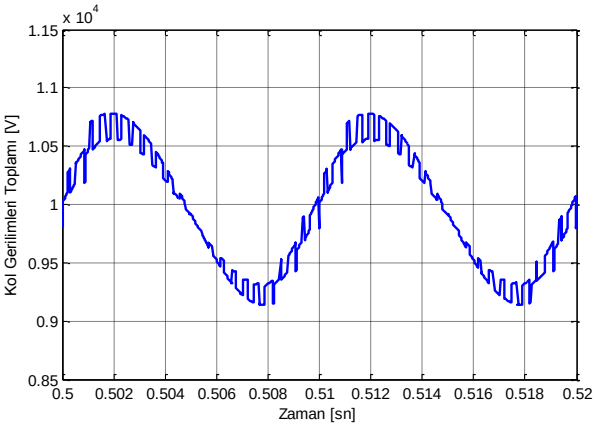
Sistemin geçici rejim çalışması ise akım referansının tam yükte evirici çalışmasından tam yükte doğrultucu çalışmasına geçmesi; sonrasında ise yarım yükte evirici şekline dönmesi şeklinde test edilmiştir. Bu kısımda yine yük akımı kontrolü olup dolaşım akım kontrolü etkin değildir. Şekil 16'da akımdaki değişimler görülmektedir. Sistem dengesi bozulmadan çıkış gücünün hızlı bir şekilde denetlendiği görülmektedir.



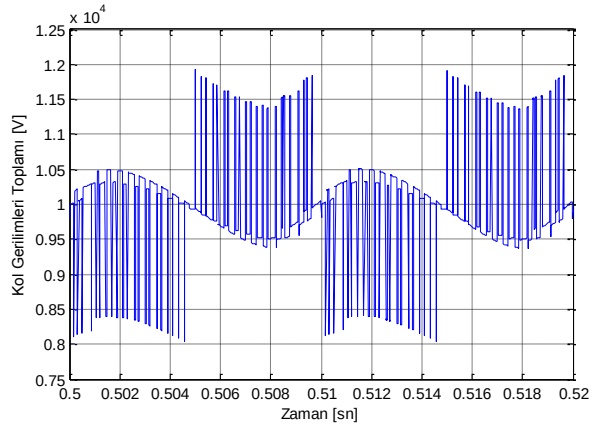
Şekil 16: Yük akımı değişimi – DQ (üst) ve ABC (alt) düzlemi.

4.3. Dolaşım Akım Kontrolünün Etkileri

Dolaşım akım kontrolü etkilerini test etmek için kontrol çalıştırılmadan ve çalıştırıldıktan sonraki veriler karşılaştırılmıştır. Dolaşım akımına neden olan kol gerilimleri toplamıdır ve kontrol çalıştırılmadan önceki hali Şekil 17'de verilmiştir. Görüldüğü üzere yaklaşık 10 kV dc gerilimin üzerine yaklaşık 0,75 kV genlikte 100 Hz frekansında (2. harmonik) gerilim vardır.

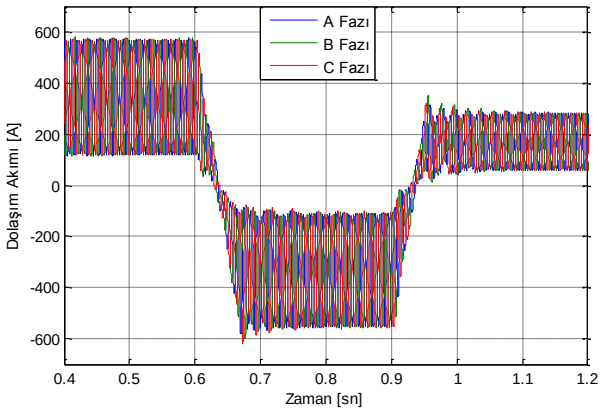


Şekil 17: Kol gerilimleri toplamı – dolaşım akımı kontrolü yok.

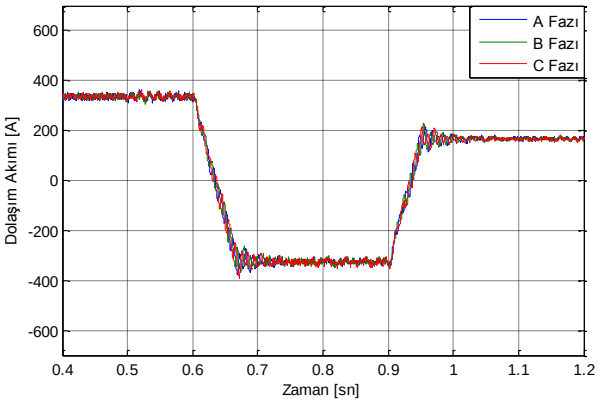


Şekil 18: Kol gerilimleri toplamı – dolaşım akımı kontrolü etkin.

Kontrol devreye alındığında, bu 100 Hz gerilim bileşenini yok edilecek şekilde anahtarlamalar yapılmaktadır. Şekil 18'de dolaşım akımı kontrolünün kol gerilimleri toplamına etkisi görülmektedir.

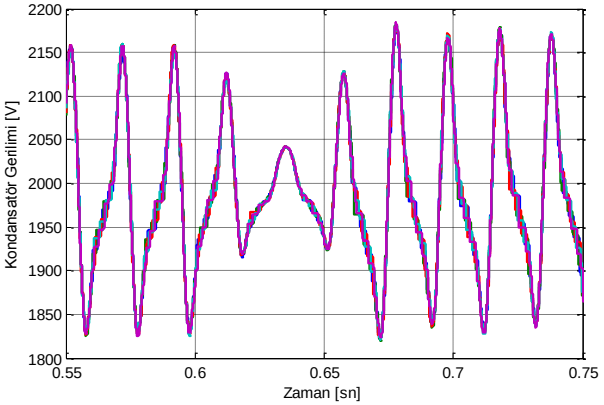


Şekil 19: Dolaşım akımları – dolaşım akımı kontrolü yok.

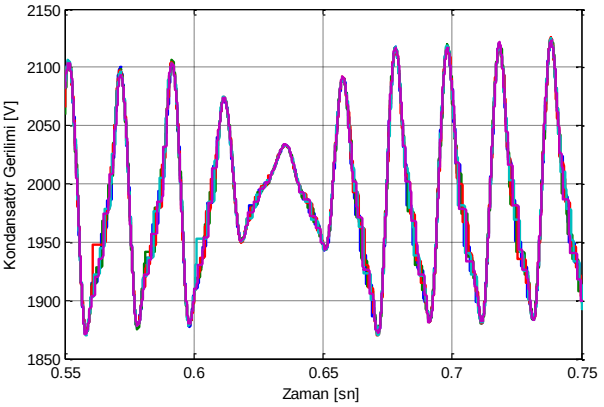


Şekil 20: Dolaşım akımları – dolaşım akımı kontrolü etkin

Dolaşım akımındaki ac bileşenin başarılı şekilde bastırıldığı Şekil 19 ile 20 karşılaştırıldığında görülebilir. Ayrıca geçici rejim süresince akımlarda kontrolsüz ve sistem bileşenlerini zorlayıcı değişimler gözlenmemektedir.



Şekil 21: A fazı üst kolundaki kondansatör gerilimleri değişimi – dolaşım akım kontrolü yok.



Şekil 22: A fazı üst kolundaki kondansatör gerilimleri değişimi – dolaşım akımı kontrolü etkin.

Dolaşım akım kontrolü altmodül kondansatör tepe gerilimini de düşürdüğü Şekil 21 ve 22 karşılaştırıldığında anlaşılmaktadır. Hızlı şekilde güç aktarım yönü değişirken bu kondansatör gerilimlerinden anlaşılacağı üzere sistem kararlılığında bozulma olmamaktadır. Ayrıca sıralama algoritması sayesinde bütün kondansatörler başarılı bir şekilde yaklaşık aynı gerilimde tutulmaktadır.

5. Sonuç

Bu makalede MÇSD yapısının uçtan uca nasıl kontrol edileceği ayrıntılı olarak anlatılmıştır. Öncelikle yük akımları ve dolaşım akımlarının kontrolü gösterilmiş; sonrasında ise DGM işaretlerinin üretilmesi ve kondansatör gerilim dengelenmesi yöntemi gösterilmiştir. Beş altmodüllü bir sistemde dahi çıkış gerilimleri oldukça düzgündür ve saf sinüse yakındır. Geçici rejim çalışmasında sıralama algoritması kondansatör gerilimlerini başarılı bir şekilde dengelemekte ve sistem kararlılığını sağlamaktadır. Ayrıca dolaşım akımı kontrolü ile bu akımdaki istenmeyen harmoniklerin büyük oranda yok edildiği ve kondansatör gerilimin tepe değerinin düştüğü benzetim çalışması sonucunda görülmüştür.

6. Kaynaklar

[1] Lesnicar, A. ve Marquardt, R., "An innovative modular multilevel converter topology suitable for a wide power range", *IEEE Power Tech Conf.*, 2003, Vol.3, s. 6.

[2] Marquardt, R., "Modular multilevel converter: An universal concept for HVDC-networks and extended dc-bus-applications", *IPEC*, 2010, s. 22B1-2.

[3] Hagiwara, M.; Maeda, R. ve Akagi , H., "Control and analysis of the modular multilevel cascade converter based on double-star chopper-cells (MMCC-DSCC)" *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.26, No.6, s. 1649-1658, 2011.

[4] Ilves, K.; Antonopoulos, A.; Norrga, S. ve Nee, H. P., "Steady-state analysis of interaction between harmonic components of arm and line quantities of modular multilevel converters", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 27, No. 1, s. 57–68, 2012.

[5] 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.

[6] Zhang, M.; Huang, L.; Yao, W. ve Lu, Z., "Circulating harmonic current elimination of a CPS-PWM based modular multilevel converter with plug-in repetitive controller", *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.29, No.4, s. 2083-2097, 2014.

[7] Çiftçi, B.; Ertürk, F. ve Hava, A. M., "Selection of suitable carrier-based PWM method for modular multilevel converter", *IPEC*, 2014, s. 3734-3741.

[8] Hava, A. M., Kerkman, R. J. ve Lipo T. A., "Simple analytical and graphical methods for carrier based PWM-VSI Drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol.14, No.1, s. 49-61, 1999.

[9] Liu, X.; Lindemann, A. ve Amiri, H., "A theoretical and experimental analysis of n+1 and 2n+1 phase-shifted carrier-based pwm strategies in modular multilevel converters", *PCIM Europe*, 2014, s. 1–6.

[10] Çiftçi, B.; Ertürk, F. ve Hava, A., " Modüler çok seviyeli dönüştürücülerde taşıyıcı temelli DGM ile anahtarlama ve kondansatör gerilimi dengeleme yöntemleri", *ELECO*, 2014, (yayınlanacak).