

# SERİ BAĞLI TAM KÖPRÜLÜ ÇOK SEVİYELİ STATCOM PROTOTİPİ TASARIMI

Cem Özgür Gerçek

TÜBİTAK-Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü 06531, ODTÜ/ ANKARA

[cem.gercek@uzay.tubitak.gov.tr](mailto:cem.gercek@uzay.tubitak.gov.tr)

**Öz:** İletim sistemlerindeki gerilim regülasyonu ve kararlılık sorunları, sistem kalitesini önemli ölçüde etkileyen iki önemli unsurdur. Son yıllarda, bahsedilen unsurların güç yarı-iletkenlerine dayalı dinamik ve esnek yapı elemanları (FACTS) kullanılarak kontrolünün, geleneksel metotlara göre hem daha ekonomik hem de daha etkili olduğu gösterilmiştir. Bu makalede Türkiye Elektrik İletim Sisteminde birincil olarak gerilim regülasyonu, ikincil olarak kararlılık sorununa çözüm olabilecek çok seviyeli STATCOM için, EMTDC/PSCAD programı ile tasarımı yapılan 154 kV,  $\pm 5$  MVar anma gücünde seri bağlı beş tam köprülü 11 seviyeli bir STATCOM prototipinin performansı incelenmiştir.

**Anahtar Kelimeler:** STATCOM, FACTS, İletim Sistemi Gerilim Regülasyonu, Çok Seviyeli Çevirgeç

## I. GİRİŞ

STATCOM sistemleri,  $\pm Q$  MVar aralığında, şebeke frekansında (50 Hz) sürekli, hem endüktif hem kapasitif reaktif güçleri üretebilmektedir. Bu açıdan rakip sistem olan Statik VAr Kompanzatorüne (SVC) üstünlük sağlamaktadır. STATCOM sisteminin SVC sistemine bir diğer üstünlüğü ise geniş bir çıkış gerilimi aralığı için maksimum reaktif güç üretiminin neredeyse sabit kalmasıdır. Bu açılardan STATCOM sistemi, dağıtım ve iletim sistemlerinin güç kalitesi problemlerinin çözümünde doğrudan kullanılabilir geleceğin teknolojisi olarak görülmektedir.

STATCOM sistemi 1990'lı yıllarda geliştirilmiş ve öncelikle elektrik iletim sistemlerinde kullanılmıştır [1]. Fakat, Türkiye Elektrik İletim Sistemi'nde şu ana kadar STATCOM bir yana herhangi bir "Transmission SVC" bile kullanılmamıştır.

Şu ana kadar gerçekleştirilmiş olan iletim STATCOM sistemleri büyük oranda çok darbeleri yapıdadır. Öte yandan, çok seviyeli yapıların çok darbelerinin yerini almak üzere olduğu literatürdeki çalışmalardan anlaşılmaktadır [2,3,4]. Çok seviyeli STATCOM' lar içerisinde, modüler yapısı ve eş anma değerli elemanlar kullanılması sebebiyle, tam köprülü çevirgeç yapısında olanlar, diğerlerine üstünlük sağlamış gibi görünmektedir [2].

Harmonik eliminasyon teknikli seri bağlı tam köprülü çok seviyeli çevirgeç veya bir diğer adıyla çok seviyeli tam köprülü merdiven tipi anahtarlamalı çevirgeç (Cascade Multilevel Inverter With Staircase Switching - CMIWSS), klasik çok darbeleri trafolu çevirgeç ve PWM tip ateşlemeli çevirgeç olan üstünlükleri yüzünden, son yıllarda sıcak bir araştırma konusu haline gelmiştir. Bu üstünlükler aşağıdaki gibi sıralanabilir:

- Kullanılan bütün yarı-iletkenlerin her periyotta yalnızca bir defa ateşlenmesi ile sinüse yakın bir çıkış gerilimi elde edilmektedir.
- Çok darbeleri çevirgeçte kullanılan manyetik devrelere olan gereksinimi ortadan kaldırmaktadır.
- OG seviyesinde, herhangi bir güç trafosuna ihtiyaç kalmaksızın paralel veya seri olarak doğrudan bağlantıya olanak sağlanmaktadır.
- Modüler devre yapısı sayesinde, bütün çok seviyeli çevirgeçler içerisinde montajı, değiştirilmesi ve yedeklenmesi en kolay topolojidir.
- Düşük ateşleme frekansı sebebiyle, kayıpları ve EMI değeri düşüktür.

Öte yandan, çok sayıda (kullanılan tam köprü sayısı kadar) kondansatör kullanılması sebebi ile, DC gerilim kontrolü diğer çok seviyeli topolojilere göre daha zordur.

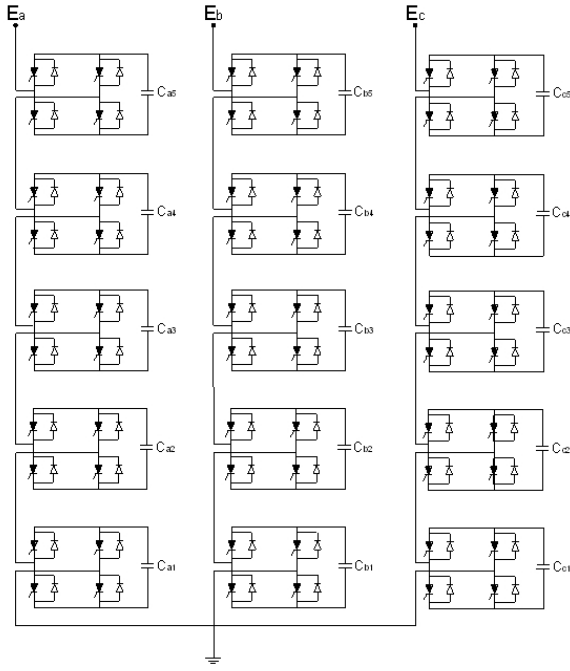
Bu çalışmada, gelecekte 380 kV veya 154 kV iletim sistemine bir adet YG/OG güç trafosu ile bağlanarak gerilim regülasyonu sağlaması planlanan,  $\pm 50$  MVar gücündeki STATCOM tasarımına hazırlık olarak, EMTDC/PSCAD programı yardımı ile oluşturulan  $\pm 5$  MVar gücünde bir CMIWSS 'nin tasarımı incelenmiş ve sistem performansı verilmiştir.

## II. CMIWSS YAPISI

### II.a. Devre Şeması

CMIWSS'nin her fazı birbirine seri bağlı tam köprülerden oluşmaktadır. Şekil.1'de verilen üç fazlı çevirgeç şemasında görüldüğü üzere, her faz için beş adet DC kondansatöre ve beş adet tam köprüye sahip CMIWSS faz-nötr gerilim seviyesi sayısı  $L = 2x5+1 = 11$  şeklinde bulunmaktadır. Faz-faz gerilimi için seviye sayısı ise  $4x5+1 = 21$  olmaktadır. Tam köprü sayısı arttıkça, elenebilen harmonik sayısı artmakta, çıkış gerilimi sinüse daha da yaklaşmakta ve gerilim THD'si azalmaktadır.

*Bu makalede sunulan çalışmalar TÜBİTAK Kamu Araştırma Projeleri Destekleme Programı (Program Kodu:1007) / 105G129 No.lu "Güç Kalitesi Millî Projesi" kapsamında yürütülmektedir.*



Şekil.1. Beş Tam Köprülü CMIWSS Şeması

Şekil.1’de görüldüğü üzere üç faz çevirgeç, tek faz çevirgeçlerin Y bağlanması sonucu elde edilmektedir. 15 adet tam köprü, 15 adet DC kondansatör, 60 adet GTO, 60 adet de diyot kullanılmıştır. Anti-paralel GTO ve diyot kullanılma sebebi akımın her hangi bir anda sistemden çevirgece de, çevirgeçten sisteme de akabilmesini sağlamaktır.

### II.b. Ateşleme Mekanizması

Şekil.1’de verilen CMIWSS şeması için, her tam köprü farklı bir açıyla ( $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$ ) ateşlenmiştir. Kullanılan beş açı ile çıkış gerilimindeki dört adet harmoniği elemek mümkündür. Her tam köprü için ateşleme sinyalleri ve oluşan faz-nötr gerilimi Şekil.2’de verilmiştir.  $E_a$ , CMIWSS tek faz çıkış gerilimini,  $E_a^*$  ise  $E_a$ ’nın ana frekans bileşenini (50 Hz) göstermektedir.

CMIWSS için, oluşan tek faz çıkış gerilimin harmonik analizi yapılacak olursa,

$$f(t) = F_0 + \sum_{h=1}^{\infty} \{a_h \cos(h\omega t) + b_h \sin(h\omega t)\}$$

Çıkış gerilimi “odd-quarter” dalga olduğu için  $a_h = 0$

$$\text{ve } h = 1,3,5,\dots \text{ için } b_h = \frac{4}{\pi} \int_0^{\pi/2} f(\theta) \sin(h\theta) d\theta$$

$$h = 2,4,6,\dots \text{ için } b_h = 0$$

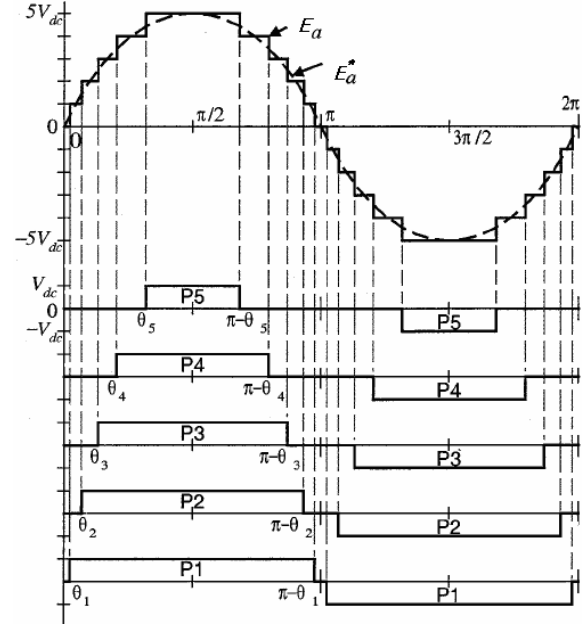
Kullanılan DC kondansatör gerilimlerinin eşit olduğu varsayılırsa ( $=V_{dc}$ ),  $h = 1,3,5,\dots$  için:

$$b_h = \frac{4V_{dc}}{\pi} [\cos(h\theta_1) + \cos(h\theta_2) + \dots + \cos(h\theta_n)]$$

ana bileşen ise:

$$b_1 = \frac{4V_{dc}}{\pi} [\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \dots + \cos(\theta_n)]$$

Faz-faz gerilimde 3üncü ve 3’ün katları olan harmonikler yer almayacağından faz çıkış gerilimdeki 5, 7, 11, ve 13üncü harmoniklerin elenmesi için aşağı-



Şekil.2. Beş Tam Köprülü CMIWSS için Ateşleme Açılımları ve Çıkış Gerilimi

daki denklemlerden faydalanılmaktadır.

$$\cos(\theta_1) + \cos(\theta_2) + \cos(\theta_3) + \cos(\theta_4) + \cos(\theta_5) = m$$

$$\cos(5\theta_1) + \cos(5\theta_2) + \cos(5\theta_3) + \cos(5\theta_4) + \cos(5\theta_5) = 0$$

$$\cos(7\theta_1) + \cos(7\theta_2) + \cos(7\theta_3) + \cos(7\theta_4) + \cos(7\theta_5) = 0$$

$$\cos(11\theta_1) + \cos(11\theta_2) + \cos(11\theta_3) + \cos(11\theta_4) + \cos(11\theta_5) = 0$$

$$\cos(13\theta_1) + \cos(13\theta_2) + \cos(13\theta_3) + \cos(13\theta_4) + \cos(13\theta_5) = 0$$

Yukarıda verilen m değeri, modülasyon endeksini belirtmektedir.

$$m = \frac{V_c^*}{V_{c\max}}, V_c^* \text{ çevirgeç faz-faz çıkış geriliminin rms}$$

değeridir.

$$V_{c\max} = \sqrt{\frac{3}{2}} \frac{4}{\pi} V_{dc} \text{ ise elde edilebilecek maksimum}$$

faz-faz çıkış geriliminin rms değeridir.

Bu durumda m, 0 ile 5 arasında değişebilmektedir.

Her bir m değeri için 5, 7, 11, ve 13üncü harmoniği

eleyen  $\theta_1, \theta_2, \theta_3, \theta_4, \theta_5$  açılarının bulunması için,

birden fazla metot literatürde verilmiştir [5,6,7]. Fakat,

çözümün m’nin belirli aralıkları için varolduğu, belirli

değerleri için herhangi bir çözüm olmadığı ve bazı m

değerleri için birden fazla çözüm bulunduğu

belirtilmiştir. En az bir çözüm bulunan aralıklar

şunlardır:  $m = [1.88, 1.89], [2.21, 3.66], [3.74, 4.23]$ .

Bir başka yöntem de 5, 7, 11, ve 13üncü harmoniği

eleyen açılar bulmaktansa, THD değerini minimum

yapan açılar bulmaktır [8]. Fakat bu durumda düşük

frekanslı harmonikler olan 5, 7 gibi harmonikler tam

olarak elenmediğinden, sistem için sorun

yaratabilirler. Bu sebeple, bu çalışmada ilk yöntem

kullanılmıştır. Sonuç olarak, çözüm bulunan

modülasyon endeks değerleri için karşılık gelen açılar

elde edilmiş ve Tablo.1’de görüldüğü şekilde aç

okuma tablosuna kaydedilmiştir.

**Tablo.1.** Örnek Açık Okuma Tablosu

m	$\theta_1$	$\theta_2$	$\theta_3$	$\theta_4$	$\theta_5$
2.30	0.61893	0.82715	1.0355	1.2908	1.5487
2.90	0.52311	0.80334	0.89029	1.1211	1.2917
3.20	0.16254	0.60009	0.73496	1.0465	1.4248
3.66	0.078164	0.21011	0.4618	0.71238	1.5378

Tablo.1’de açılar radyan cinsinden verilmiştir. Ayrıca, verilen açılar, birden fazla çözümün olduğu durumlar için, en küçük THD’yi sağlayan açılardır. Verilen açı okuma tablosu simülasyon yapılmadan önce yaratılıp, simülasyon sırasında kullanılmak üzere kaydedilmiştir.

### II.c. Sistem Genel Kontrolü

Sistemin genel kontrolü iki döngüden oluşmaktadır. Bunlardan birincisi, STATCOM çıkış gerilimini veya reaktif güç üretimini belli bir değerde tutmaya, ikincisi ise CMIWSS için çok önemli olan, bütün DC kondansatör gerilimlerini belli bir değere ve birbirlerine eşitlemeye yöneliktir. Bahsedilen 1. kontrolde, reaktif güç üretimini belli bir değerde tutmaya yönelik olanı benimsenmiştir. Bunun sebebi sistemin reaktif güç talebi değişimlerine olan tepkisini gözlemleyebilmektir. 2. kontrol ise DC kondansatör gerilimlerinin ortalamasının ve her bir kondansatör geriliminin ayrı ayrı istenilen değere getirilmesini içermektedir. Bu da sistem gerilimine göre çevirgeç çıkış geriliminin  $\alpha$ , her bir tam köprü çıkış geriliminin ise  $\Delta\alpha$  kadar kaydırılması ile elde edilmektedir.  $\alpha$ , ve  $\Delta\alpha$  değerleri  $10^\circ$ ’nin altında kalmaktadır. Şekil.3’te sistemin genel şeması verilmiştir.

**Tablo.2.** PSCAD simülasyon parametreleri

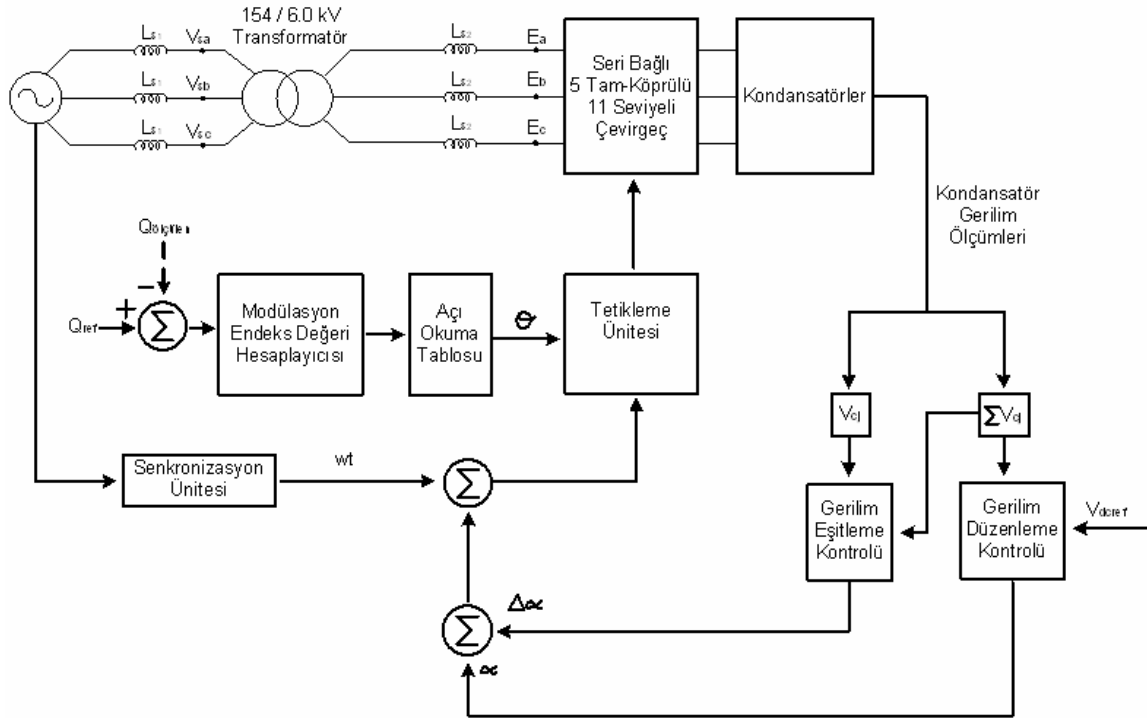
Program adı	PSCAD V3.0.8 EE
Hesap adım aralığı	5 $\mu$ s
Çizim adım aralığı	10 $\mu$ s
Simülasyon süresi	5s

Şekil.3’te görülen, 154 kV hatta, 154/6.0 kV trafoda ve 6.0 kV hatta bulunan toplam endüktansın 6.0 kV’a yansıtılmış değeri 5 mH’dir. Bu da 6.0 kV ve 5 MVA bazda %22 p.u. ‘e denk gelmektedir.  $Q_{ref}$  değeri +5 MVar ve -5 MVar aralığında simülasyon sırasında değiştirilebilmektedir.  $V_{dref}$  değeri ise 1.27 kV olarak seçilmiştir. Bu durum için  $m \approx 2.40$  iken maksimum reaktif gücün STATCOM tarafından çekilmesi,  $m \approx 3.60$  iken ise maksimum reaktif gücün STATCOM tarafından üretilmesi sağlanmaktadır.

### III. SİMÜLASYONLAR

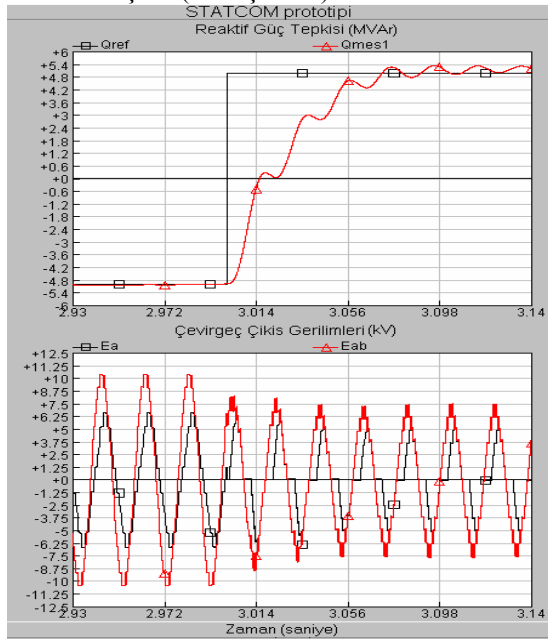
Beş tam köprülü CMIWSS’nin performansını gözlemlemek amacıyla EMTDC/PSCAD programı yardımı ile simülasyonlar yapılmıştır. Simülasyon parametreleri Tablo.2’de verilmiştir.

CMIWSS sisteme bağlanmadan önce, DC kondansatörlerin şarj edilebilmesi için ateşleme sinyallerinin bekletilmesi gerekmektedir [9]. Bu süre simülasyonda 0.2 saniye olarak seçilmiştir. Daha sonra maksimum kapasitif reaktif güç modunda CMIWSS çalışmaya başlamıştır. Üçüncü saniyede ise reaktif güç talebi maksimum kapasitiften maksimum endüktife getirilmiş ve sistemin tepkisi gözlemlenmiştir.

**Şekil.3.** Sistemin Genel Şeması

Reaktif güç talebinin kapasitif uçtan endüktif uca değiştirilmesi durumu için gözlemlenen çevirgeç faz-faz ve faz-nötr çıkış gerilimleri Şekil.4'te verilmiştir. Reaktif güç tepkisinin oturma süresi yaklaşık 3-4 periyot olarak gözükmektedir. Modülasyon endeks değerinin değişimi ile beraber gözlemlenen çevirgeç tek faz gerilim ve akım grafikleri (Akım, rahat görülebilmesi için 5.0 ile çarpılmıştır.) Şekil.5'te verilmiştir. Maksimum kapasitif ve endüktif STATCOM anma güçleri için elde edilen modülasyon endeks değerleri ve bu değerlere karşılık gelen faz-faz çıkış gerilimi toplam rms değerleri, ana bileşen rms değerleri ve THD değerleri Tablo.3'te verilmiştir.

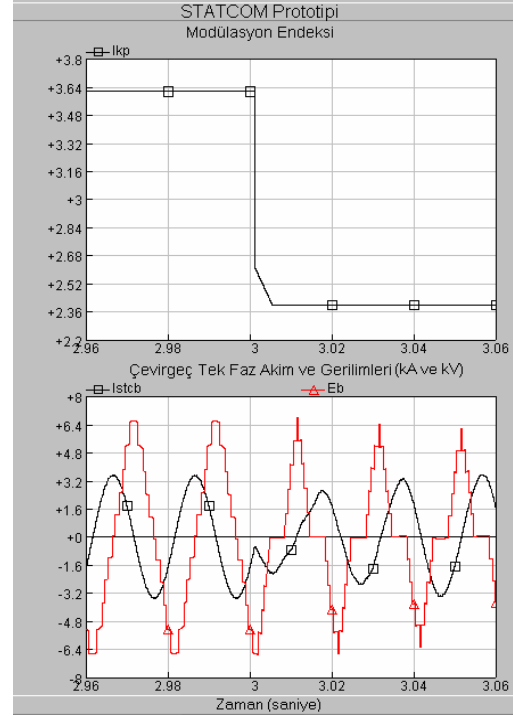
DC kondansatör gerilimlerinin kontrolünde, ölçülen kondansatör gerilimleri filtrelenerek, üzerlerindeki salınım gerilimi atılmış ve saf DC bileşen elde edilmiştir. Bunun sebebi çekilen akımla doğru orantılı olmak üzere yüksek miktarda (tepeden tepeye 10%) AC bileşen olmasıdır. Aynı kondansatör değerleri için bu AC bileşen en fazla birinci tam köprü kondansatörü için gözlemlenmektedir. Bunun sebebi iletme süresinin, bütün modülasyon endeksleri için en fazla birinci tam köprüye ait olmasıdır. Bu sebeple kondansatör değerleri, gerilim salınımını azaltmak için, iletim süresi fazla olanlarda yüksek, az olanlarda ise daha düşük seçilmiştir. Şekil.6'da tam köprü 1'in DC kondansatör gerilimlerinin saf DC bileşenlerinin değişimi, modülasyon endeksi değişimi ile beraber, her faz için verilmiştir. Şekil.7'de ise tam köprü 1 ve 2'nin her fazındaki DC kondansatör gerilimleri AC bileşenler dahil edilmiş olarak verilmiştir. DC kondansatör gerilimlerinin her birinin ayrı ayrı kontrol edilmesi gerekliliği ayrıca incelenmiştir. 5 MVAR kapasitif STATCOM modunda, DC kondansatör gerilimlerinin eşitleme kontrol döngüsü ilk 1.0 saniye için devre dışı iken, sonradan devreye alınmış ve DC kondansatörlerin saf DC gerilim bileşenlerindeki tepki gözlemlenmiştir. (Bkz. Şekil.8)



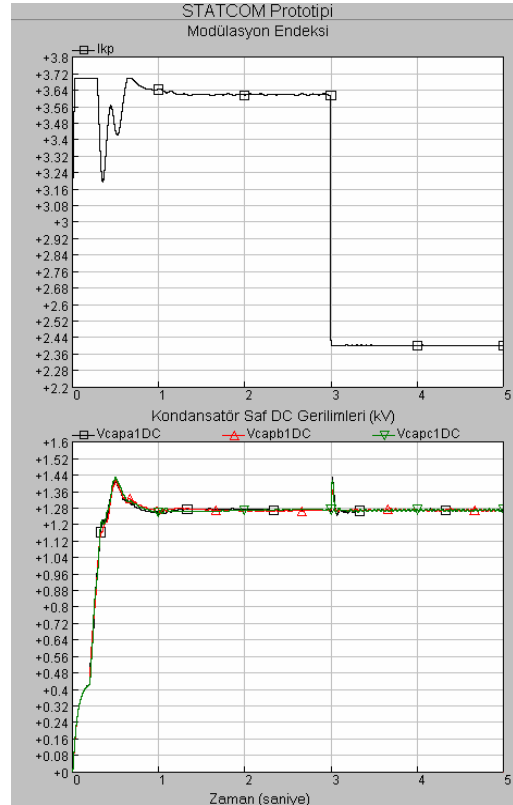
Şekil.4. CMIWSS Reaktif Güç Tepkisi ve Çevirgeç Çıkış Gerilimleri

Tablo.3. Çıkış Gerilimi Analizi

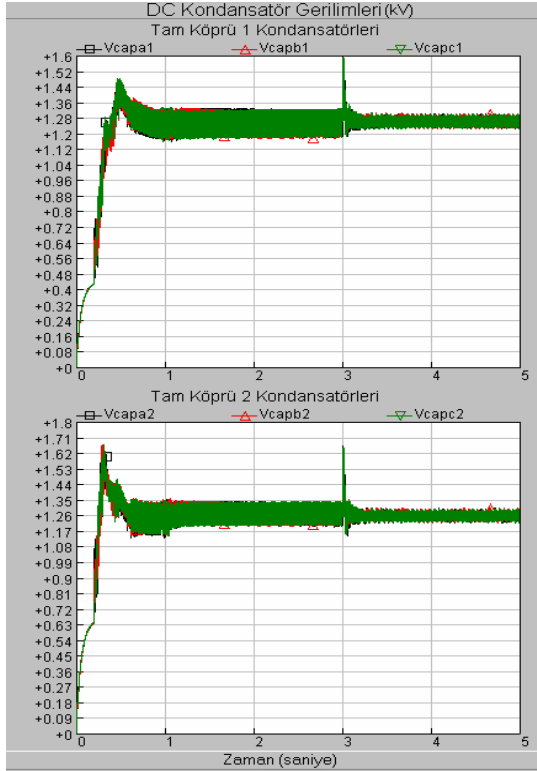
m	Ana Bileşen Rms (kV)	Toplam Rms (kV)	THD (%)
2.40	3.7421	3.7569	8.90
3.60	5.6131	5.6235	6.07



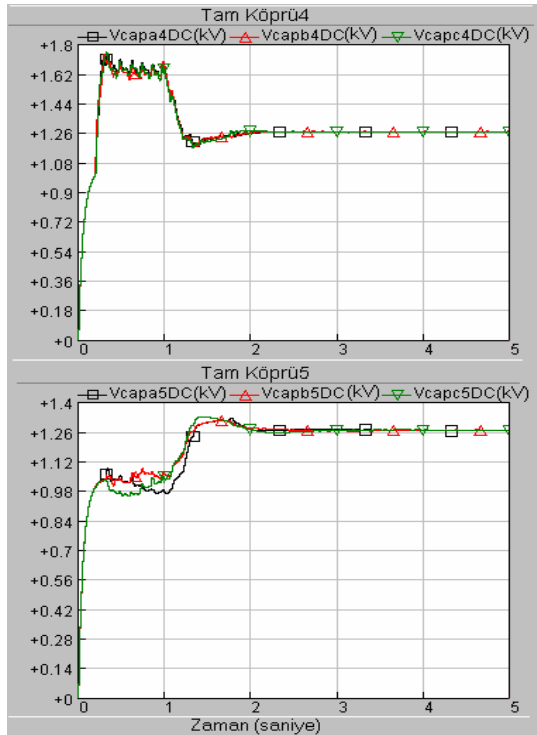
Şekil.5. CMIWSS Modülasyon Endeksi Değişimi ve Çevirgeç Tek Faz Akım-Gerilim Grafiği



Şekil.6. CMIWSS Modülasyon Endeksi Değişimi ve Tam Köprü 1 için Her Fazdaki Kondansatör Gerilimlerinin Saf DC Bileşenleri



Şekil.7. Tam Köprü 1 ve 2 için Her Fazdaki Kondansatör Gerilimleri (AC bileşenler dahil)



Şekil.8. Gerilim Eşitleme Kontrolü Yokken ve Varken DC Kondansatör Gerilimleri Saf DC Bileşenleri

#### IV. SONUÇ

Yapılan araştırmaların ve simülasyonların sonucu olarak aşağıdaki yargılara varılmıştır:

1) CMIWSS için, yeterli sayıda tam köprü kullanıldığında, istenilen harmonikleri rahatlıkla elemek ve THD değerini düşürmek mümkündür, bu da düşük

ateşleme frekansında yapılacağı için kayıplar az olacaktır.

2) Yüksek seviyeli yapılar içerisinde CMIWSS, DC kondansatör gerilim kontrolü açısından zorluklar taşımaktadır fakat, bütün kondansatör gerilimleri ölçülüp, gerekli teknikler uygulanarak, kontrolü sağlamak mümkün olmaktadır.

3) Literatürde verilen birbiri ile çelişkili DC kondansatör gerilimi kontrol mantıkları modifiye edilip tek tek denenmiş, çalışır durumdaki en hızlı ve güvenilir olanı, simülasyonlar neticesinde bulunmuş ve kullanılmıştır.

4) CMIWSS için, çıkış gerilim THD değerleri, modüler yapı, kontrol kolaylığı ve DC kondansatör gerilim kontrolü konularının tümü, laboratuvar prototip çalışmalarının sonuçlarına bağlı olarak, ekonomik ve yapılabirlik açısından incelenecek ve Türkiye Elektrik İletim Sistemine bağlanacak olan  $\pm 50$  MVar STATCOM için bu topolojinin kullanılıp kullanılmayacağına karar verilebilecektir.

#### V. KAYNAKÇA

[1] C. Schauder et al, "Development of a  $\pm 100$  MVar Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems", in IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.3, July 1995

[2] Fang Zheng Peng, Jih-Sheng Lai "Multilevel Converters – A New Breed of Converters", in IEEE Transactions on Industry Apps., Vol. 32, No. 3, May/June 1996

[3] Yiqiao Liang, C. O. Nwankpa, "A New Type of STATCOM Based on Cascading Voltage-Source Inverters with Phase-Shifted Unipolar SPWM", in IEEE Transactions on Industry Apps., Vol. 35, No. 5, September/October 1999

[4] Fang Zheng Peng et al, "A Multilevel Voltage-Source Inverter with Seperate DC Sources for Static Var Generation" in IEEE Transactions on Industry Apps., Vol. 32, No. 5, September/October 1996

[5] Leon M. Tolbert et al, "Modulation Index Regulation of a Multilevel Inverter for Static Var Compensation", in IEEE Power Engineering Society General Meeting, Vol. 1, July 2003

[6] Leon M. Tolbert et al, "Elimination of Harmonics in a Multilevel Converter With Nonequal DC Sources" in IEEE Transactions on Industry Apps., Vol. 41, No. 1, January/February 2005

[7] Burak Ozpineci et al, "Harmonic Optimization of Multilevel Converters Using Genetic Algorithms" in IEEE Power Electronics Letters, Vol. 3, No. 3, September 2005

[8] Leon M. Tolbert et al, "Charge Balance Control Schemes for Cascade Multilevel Converter in Hybrid Electric Vehicles" in IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol. 49, No. 5, October 2002

[9] Yiqiao Liang, C. O. Nwankpa, "A New Type of STATCOM Based on Cascading Voltage-Source Inverters with Phase-Shifted Unipolar SPWM", in IEEE Transactions on Industry Apps., Vol. 35, No. 5, September/October 1999