

TRAFO BAĞLANTILARINA DAYALI ÇOK DARBELİ STATCOM TASARIM ÇALIŞMALARI

Burhan Gültekin

TÜBİTAK-Uzay Teknolojileri Araştırma Enstitüsü 06531, ODTÜ/ ANKARA

burhan.gultekin@uzay.tubitak.gov.tr

Öz- İletim sistemlerindeki gerilim regülasyonu ve bölgeler arası salınımlar sistem kalitesine önemli ölçüde etki eden iki temel sorundur. Ülkemizde iletim sistemindeki gerilim regülasyonu sorunu konvansiyonel metodlar ile çözülebilmekle beraber ileride güç yarı iletkenlerine dayalı daha dinamik ve esnek yapı elemanlarının (FACTS) tasarlanıp kullanılması kaçınılmaz olacaktır. Bu makalede Türkiye Elektrik İletim Sistemindeki gerilim regülasyonu sorununa çözüm olabilecek trafo bağlantılarına dayalı 154 kV, ± 50 MVAR anma gücünde üç adet STATCOM yapısı EMTDC/PSCAD programı ile tasarlanmış ve performans karşılaştırılması yapılmıştır.

Anahtar Kelimeler: STATCOM, İletim Sistemi Gerilim Regülasyonu, Çok Darbeli Çevirgeç

I. GİRİŞ

“Static Synchronous Condenser” veya “Static Synchronous Compensator” olarak adlandırılan STATCOM sistemleri, dönen bir senkron motor olan Senkron Kondenser’in tam bir statik karşılığıdır. STATCOM’un Senkron Kondenser’e olan üstünlüklerini çok hızlı tepki gösterme becerisi ve her fazın ayrı ayrı kontrol edilebilme yeteneğidir [1]. Bir STATCOM sistemi sadece çevirgeci düşünüldüğünde sürekli $\pm Q$ MVAR aralığında şebeke frekansında (50 Hz) hem endüktif hem kapasitif reaktif güç üretebilmektedir. Diğer bir deyişle, Q MVA’lık bir kurulu çevirgeç gücünün reaktif güç üretme kapasitesi $2Q$ MVAR’dır. Bu açıdan rakip sistem olan Statik VAR Kompanzatorüne (SVC) bir üstünlük sağlamaktadır. STATCOM sisteminin SVC sistemine bir diğer üstünlüğü ise geniş bir terminal gerilimi değişimi aralığında maksimum reaktif güç üretiminin neredeyse sabit kalmasıdır. Bu açıdan STATCOM sistemi, dağıtım ve iletim sistemlerinin güç kalitesi problemlerinin çözümünde doğrudan kullanılabilir geleceğin teknolojisi olarak gözükmektedir. STATCOM sistemlerinin temel dezavantajı şu anda eşdeğer SVC sistemlerine göre daha pahalı olmalarıdır. Ancak güç yarı iletkenlerindeki hızlı gelişmeler birkaç 5 yıl içerisinde bu sistemlerin eşdeğer SVC sistemleri ile aynı veya düşük maliyetle üretilebileceği bir hale geleceğini göstermektedir.

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

STATCOM sistemi 1990’lı yıllarda geliştirilmiş ve öncelikle elektrik iletim sistemlerinde kullanılmıştır [2]. STATCOM sistemlerinin elektrik iletim ve dağıtım sistemlerinde kullanım amaçları, önemli ölçüde farklılık göstermektedir. STATCOM elektrik iletim sistemlerinde;

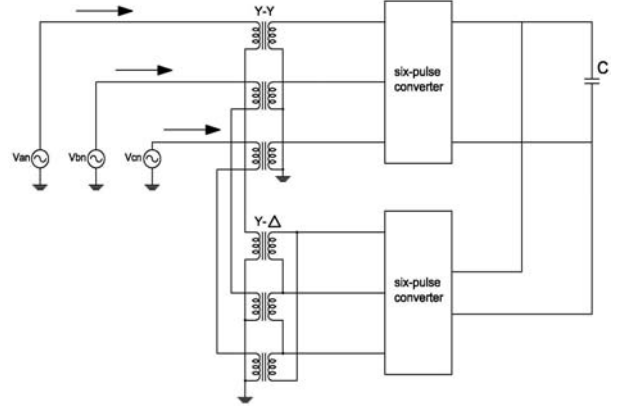
- Sürekli rejim çalışma koşullarında bara geriliminin regülasyonu,
- Geçici rejim veya dinamik rejim çalışma koşullarında geçici rejim kararlılık marjlarının (transient stability margin) iyileştirilmesi ve dinamik salınımların söndürülmesinde kullanılmaktadır.

Türkiye Elektrik İletim Sistemi’nde şu ana kadar STATCOM bir yana herhangi bir “Transmission SVC” bile kullanılmamıştır. Problemler genellikle yukarıda verilen (a) tipi problemler olarak mütalaa edilmiş ve 380 kV uzun iletim hatlarında seri kondansatör bankaları ve reaktörler, 154 kV gerilim seviyesine bağlı olarak çalışan transformatörlerin OG taraflarında ise şönt kondansatör bankaları kullanıla gelmiştir. Genellikle, gece yükselen geçici gerilim seviyeleri, seri kondansatörlerin devreden çıkarılması ve şönt reaktörlerin devreye alınması ile, gündüz düşen gerilim seviyeleri ise seri kondansatör ve şönt kondansatör bankalarının devreye alınması ile çözülmeye çalışılmıştır. 10 Kasım 2004 tarihli “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” yukarıda sıralanan (a) ve (b) türü problemlerin varlığını vurgulamakta ve yeni teknolojik çözümler olan İletim SVC’si ve İletim STATCOM’una atıfta bulunmadan 380 kV ve 154 kV iletim sistemleri için kullanılması gereken seri kondansatör, şönt reaktör ve şönt kondansatör bankalarının büyüklüklerini standardize etmiş ve izin verilen bağlantı noktalarını tanımlamıştır. Türkiye Elektrik İletim Sistemi gibi büyük bir sistemde mevcut olan problemlerin çözümünde bazı noktalarda klasik yöntemlerin yapılabilir olduğu noktalar olduğu gibi, İletim SVC’si ve İletim STATCOM’u gibi yeni ve üstün teknolojilerin kullanılması gereken noktaların olacağı kaçınılmazdır. Bu sebeple ülkemizde bu tür problemlerin çözümünü dinamik olarak yapacak STATCOM yapılarının tasarlanması ve ileride uygulanması önemlidir. Bu makalede, bahsedilen amaç için kullanılabilir, trafo bağlantılarına dayalı 154 kV, ± 50 MVAR anma gücünde üç adet STATCOM yapısı EMTDC/PSCAD programı ile tasarlanmış ve performansları karşılaştırılmıştır.

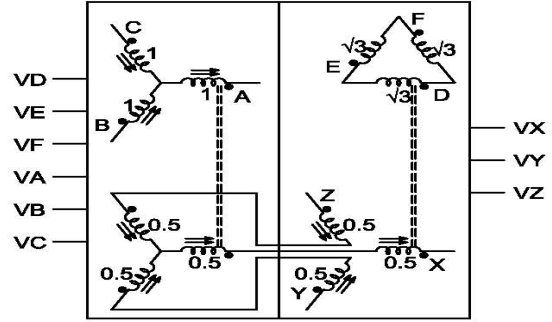
II. 12-DARBELİ ÇEVİRGEÇ YAPISI

İletim STATCOM ile ilgili literatür incelemesi yapıldığında gerçekleştirilen STATCOM örneklerinin trafo bağlantılarına dayalı çok darbeli türden olduğu görülecektir. Trafo bağlantılarına dayalı çok darbeli konfigürasyonlar esasen 12-darbeli çevirgeçlerin uygun açılarda ateşlenmesi ve uygun manyetik yapıya bağlanması ile tasarlanmaktadır. Bu amaçla öncelikle 12-darbeli çevirgeç yapısının iyi anlaşılması gerekmektedir. 12-darbeli STATCOM iki adet 6-darbeli çevirgecin aynı DC barasına bağlanmasıyla oluşur [3]. AC tarafta her çevirgeç, paralel ve seri bağlı trafolar ya da bir manyetik devre ile şebekeye bağlanır. Primerleri seri bağlı olan bu trafoların Yıldız-Yıldız olanına 1.çevirgeç; Yıldız-Üçgen olanına ise 2.çevirgeç bağlanmıştır (Şekil.1). Bu yapının çalışma mekanizması şöyledir: Yıldız-Yıldız manyetik devresine bağlı 6-darbeli çevirgecin ürettiği gerilimdeki ana bileşen Yıldız-Üçgen devresine bağlı 6-darbeli çevirgecin ürettiği gerilimdeki ana bileşene göre 30 derece geride olacak şekilde üretilirse seri bağlı primerlerde bu ana bileşenler aynı faza gelirler. Bunun sebebi, Yıldız-Üçgen manyetik devresinde primerin sekondere göre 30 derece ilerde olmasıdır. Dolayısıyla çevirgeçte üretilen 30 derece gerideki gerilim primerde öne doğru kaydırılarak Yıldız-Yıldız manyetik devresinde üretilen gerilimle aynı faza getirilir. Primerler de seri olduğu için manyetik devre çıkışında gerilimlerin toplamı elde edilir.

Her çevirgeç çıkışında aynı genliğe sahip gerilimi elde etmek için Yıldız-Üçgen devresinin sekonder sarım sayısı Yıldız-Yıldız devresinin sekonder sarım sayısının $\sqrt{3}$ katı olmalıdır (Şekil.2). Bu yapıda harmonik eliminasyon ise şöyle olmaktadır: Bilindiği gibi 5. harmonik negatif-bileşenli, 7.harmonik ise pozitif-bileşenlidir. Yıldız-Yıldız yapıdaki manyetik devreye bağlı çevirgeç çıkışında oluşan 5. ve 7. harmonik bileşenleri aynı fazdadır. Yıldız-Üçgen yapıdaki manyetik devreye bağlı çevirgeç çıkışında oluşan bu harmonikler bu çevirgecin ötekine göre 30 derece geride ateşlenmesinden dolayı aynı fazda ancak ana bileşene göre ters fazdadır. Eğer bu çevirgeç çıkışı pozitif bileşene göre 30 derece ileriye kaydırılırsa iki çevirgecin ana bileşenleri aynı fazda, 5. ve 7. harmonik bileşenleri ise ters fazda oluşur. Seri bağlı primerlerde ana bileşen gerilimleri manyetik devrenin tur oranlarına göre toplanırken 5. ve 7. harmonik bileşenli gerilimler ise birbirini yok eder. Böylece 12-darbeli çevirgeç çıkışında ana bileşen ile birlikte $n = 12k \pm 1$, $k=1,2,3,\dots$ sayılı harmonikli gerilimlerin toplamından oluşan bir grafik elde edilir. Bu teknolojiye anahtarlama 50 Hz ana bileşende olmakta ve her anahtarlama elemanı her periyotta bir kez iletme geçmektedir. Bu yüzden sistemde anahtarlama sonucu oluşan kayıplar çok az değerlerde olmaktadır. Sistemdeki toplam kaybın büyük bir kısmı kullanılan trafolardan kaynaklanmaktadır.



Şekil.1. 12-Darbeli Çevirgeç Yapısı



Şekil.2. 12-Darbeli Çevirgeç Yapısında Kullanılan Manyetik Devre

Tablo.1. Simülasyon parametreleri

EMTDC PSCAD	
Program İsmi	PSCAD V3.0.8 EE
Hesap Aralığı	15us
Çizim Aralığı	20us

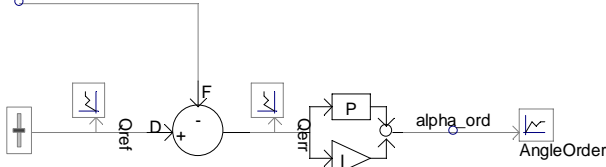
III. SİMÜLASYONLAR

Trafo bağlantılarına dayalı ± 50 MVAr gücündeki STATCOM örnekleri için EMTDC/PSCAD simülasyonları 12-,24- ve 48-darbe olarak tasarlanıp gerçekleştirilmiştir. Çözömlenelerde kullanılan PSCAD parametreleri Tablo.1'de verilmiştir.

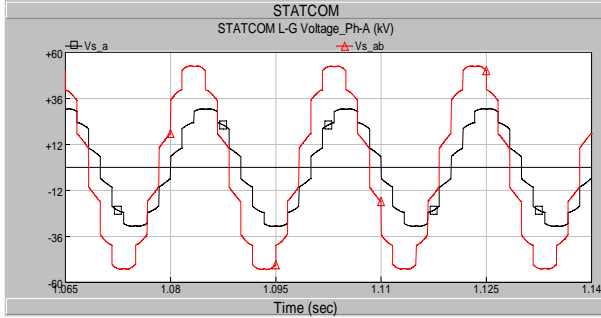
Öncelikle 12-darbeli STATCOM güç katı ve kontrol blokları ile tasarlanmış ve sistem performansı gözlenmiştir. Tasarlanan bu 12-darbeli yapı, 24- ve 48-darbeli STATCOM yapıları için temel olmuştur. Bütün simülasyonlarda DC gerilim %5'in altında salınım yapacak şekilde kontrol edilmiş ancak belli bir değerde tutulmamıştır. Bunun ana nedeni tasarlanan STATCOM yapılarının açılı kontrollü olmalarıdır. STATCOM tarafından üretilecek gerilimi ya da reaktif gücü kontrol eden, bu açı değeridir. Bu değer şebeke tarafından ölçülen reaktif güç ile referans gücün karşılaştırılıp bir PI döngüsünden geçirilmesinden elde edilir (Şekil.3). Kaydırma açısı çok küçük değerlerde (< 1 derece) altında olmaktadır. Reaktif güç kontrolü yerine şebeke geriliminin rms değeri kontrolü de yapılabilir. Ancak tasarlanan gücün görülmesi ve güç değişimlerine sistem tepkimesini görmek amacıyla simülasyonlarda reaktif güç kontrolü yapılmıştır.

a. 12-Darbeli STATCOM

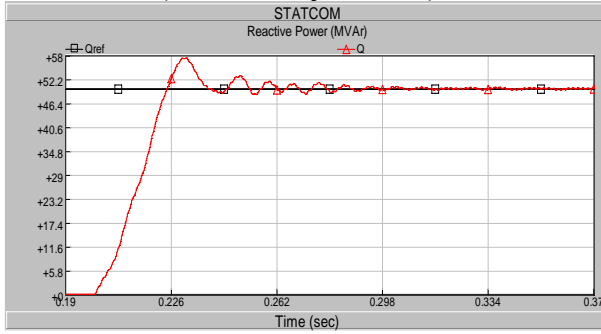
Simülasyonlarda kullanılan çevirgeç bilgileri Tablo.2’de verilmiştir. Manyetik devrelerin çıkışında elde edilen faz-nötr ve faz-faz gerilim dalga şekilleri aşağıda verilmiştir (Şekil.4). Elde edilen bu faz-faz geriliminin harmonik analizi Tablo.3’te gösterilmiştir.



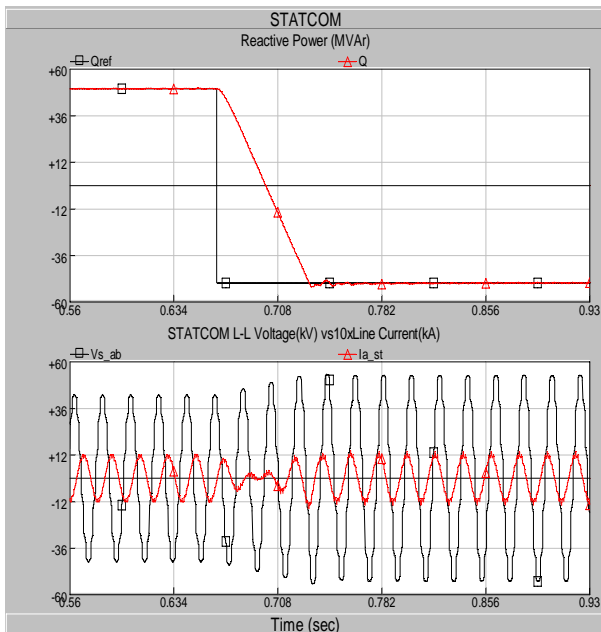
Şekil.3. Kaydırma Açısı Bulma Döngüsü



Şekil.4. 12-Darbeli STATCOM Çıkış Gerilimleri (-50 MVar Kapasitif Mod)



Şekil.5. 12-Darbeli STATCOM Tepkimeleri (+50 MVar Endüktif)



Şekil.6. Mod Değişimlerinde STATCOM Tepkimeleri

Tablo.2. Modellemede Kullanılan Çevirgeç Bilgileri

12-Darbeli Çevirgeç	
Çevirgeç Adedi	2
Çevirgeç Anma Gücü	25 MVA
Çevirgeç DC Gerilimi	9.4 kV
Çevirgeç AC Gerilimi	6.0 kV
Çevirgeç AC Akımı	2405 A
Anahtarlama Elemanı	GTO
Kondansatör Değeri	5mF

Tablo.3. 12-Darbeli STATCOM Çıkış Gerilimindeki Harmonik RMS Değerleri

Harm. No.	1	5	7	11	13	23	25	29
Değer (kV)	38.17	0.012	0.006	2.55	2.0	1.17	1.06	0.27
%	100	0.03	0.015	6.68	5.23	3.06	2.77	0.7
THD	9.47							

Tablo.4. 12-Darbeli STATCOM Tepkime Değerleri

Endüktif Mod	
Maksimum Tepe	+58 MVar
Yükselme Süresi (t_{rise})	30 ms
Oturma Süresi (t_{ss})	130 ms
Kapasitif Mod	
Maksimum Tepe	-54 MVar
Yükselme Süresi (t_{rise})	40 ms
Oturma Süresi (t_{ss})	130 ms

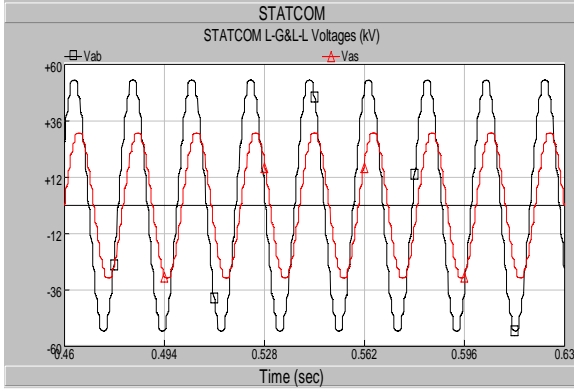
Çıkış gerilimindeki en büyük genliğe sahip harmoniklerin 11. ve 13. harmonik olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar 5. ve 7. harmonik bileşenlerinin başarı ile süzüldüğü görülmektedir. Endüktif mod için THD değeri %8.56 olmaktadır.

Kontrol devresinde kullanılan PI parametrelerinin sistem üzerindeki etkisini görmek için sistem reaktif güç referans değerleri 0/+50 MVar ve 0/-50 MVar seviyelerine getirilerek sistem tepkimeleri ölçülmüştür. Bu sonuçlar Tablo.4’te gösterilmiştir. STATCOM’un tam anma güçlerindeki değişimlerinde sistem tepkimeleri de gözlenmiş ve Şekil.6’da bu değişim gösterilmiştir. Endüktif modda geride olan akım kapasitif moda geçince 3-4 periyot içinde gerilimin önüne geçmektedir.

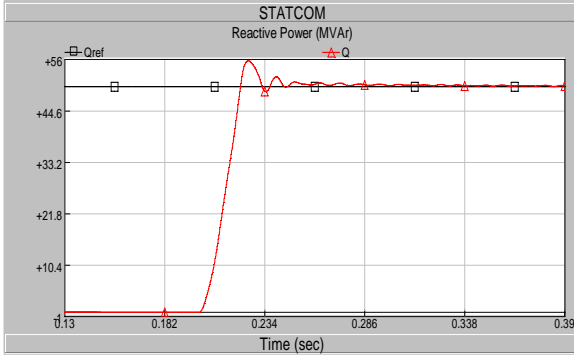
b. 24-Darbeli STATCOM

24-darbeli STATCOM iki adet 12-darbeli çevirgecin aynı DC barasına bağlanmasıyla oluşur [4]. Toplam 4 adet 6-darbeli çevirgeç kullanılmış olup bunların iki tanesi Yıldız-Yıldız manyetik devrelerine (4 Adet) geri kalan iki adedi ise Yıldız-Üçgen manyetik devrelerine (4 Adet) bağlanmıştır. Ateşlemeler aynı 12-darbeli çevirgece bağlı 6-darbeli çevirgeçler arasında 30 derece; ardışık 12-darbeli çevirgeçler arasında da 15 derecelik faz farkı olacak şekilde yapılmalıdır. Manyetik devrelerin çıkışında elde edilen faz-nötr ve faz-faz gerilim dalga şekilleri

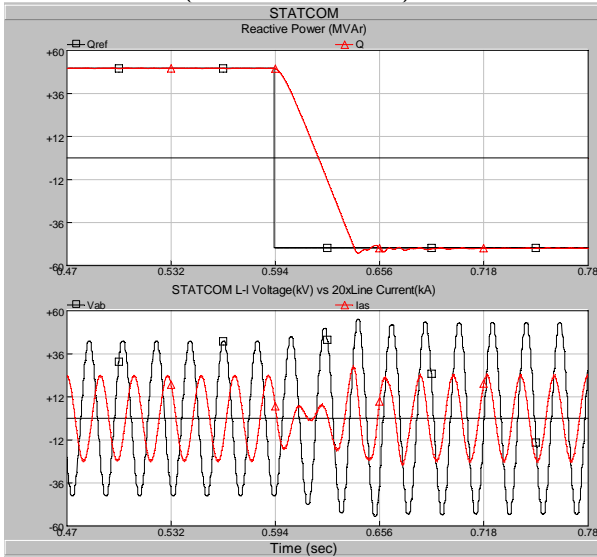
aşağıda verilmiştir (Şekil.7). 12-darbeli yapı ile karşılaştırıldığında sinüse daha yakın bir gerilim grafiği elde edilmiştir. Elde edilen bu faz-faz geriliminin harmonik analizi Tablo.5'te gösterilmiştir. Çıkış gerilimindeki en büyük genliğe sahip harmoniklerin 23. ve 25. harmonik olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar 5., 7., 11.,13., 17. ve 19. harmonik bileşenlerinin başarı ile süzülmesini göstermektedir. Endüktif mod için THD değeri %4.65 olmaktadır. Optimum PI parametreleri bulunarak sistem için en iyi performans değerleri elde edilmiştir.



Şekil.7. 24-Darbeli STATCOM Çıkış Gerilimleri (-50 MVAR Kapasitif Mod)



Şekil.8. 24-Darbeli STATCOM Tepkimeleri (+50 MVAR Endüktif)



Şekil.9. Mod Değişimlerinde STATCOM Tepkimeleri

Tablo.5. 24-Darbeli STATCOM Çıkış Gerilimindeki Harmonik RMS Değerleri (-50MVar Kapasitif Mod)

Harm. No.	1	11	13	23	25	47	49
Değer (kV)	38.25	0.34	0.32	1.2	1.05	0.58	0.55
%	100	0.88	0.83	3.13	2.74	1.51	1.43
THD	5.13						

Tablo.6. STATCOM Tepkime Değerleri Endüktif Mod

Endüktif Mod	
Maksimum Tepe	+56 MVAR
Yükselme Süresi (t_{rise})	25 ms
Oturma Süresi (t_{ss})	130 ms
Kapasitif Mod	
Maksimum Tepe	-53 MVAR
Yükselme Süresi (t_{rise})	23 ms
Oturma Süresi (t_{ss})	130 ms

12-darbeli yapının verdiği değerlere yakın tepki değerleri elde edilmiştir (Tablo.6.) Tam anma güçlerindeki değişimlerinde sistem tepkimeleri de gözlenmiş ve Şekil.8'de bu değişim gösterilmiştir. Endüktif modda geride olan akım kapasitif moda geçince 3-4 periyot içinde gerilimin önüne geçmektedir.

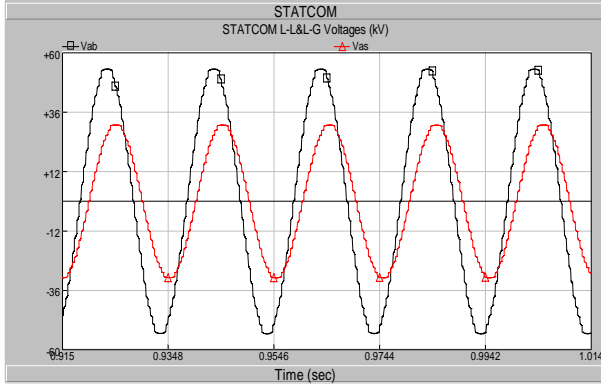
c. 48-Darbeli STATCOM

48-darbeli STATCOM iki adet 24-darbeli çevirgecin ya da 4 adet 12-darbeli çevirgecin aynı DC barasına bağlanmasıyla oluşur [5]. Toplam 8 adet 6-darbeli çevirgeç kullanılmış olup bunların dört tanesi Yıldız-Yıldız manyetik devrelerine geri kalan dört adedi ise Yıldız-Üçgen manyetik devrelerine bağlanmıştır. Ateşlemeler aynı 12-darbeli çevirgece bağlı 6-darbeli çevirgeçler arasında 30 derece; ardışık 12-darbeli çevirgeçler arasında da 7.5 derecelik faz farkı olacak şekilde yapılmalıdır.

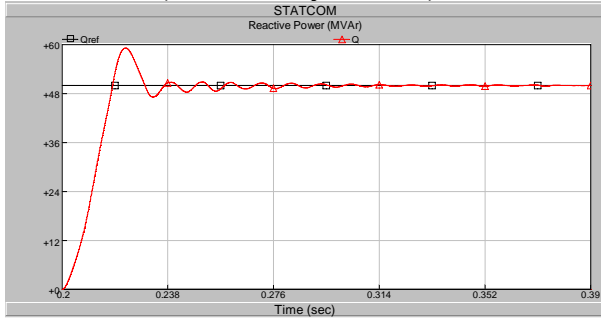
Manyetik devrelerin çıkışında elde edilen faz-nötr ve faz-faz gerilim dalga şekilleri aşağıda verilmiştir (Şekil.10). Tasarlanan yapılar içinde sinüse en yakın gerilim grafiği bu çalışmada elde edilmiştir. Elde edilen bu faz-faz geriliminin harmonik analizi Tablo.7'de gösterilmiştir. Çıkış gerilimindeki en büyük genliğe sahip harmoniklerin 47. ve 49. harmonik olduğu gözlemlenmektedir. Bu sonuçlar bu harmoniklerin altında kalan diğer harmonik bileşenlerinin başarı ile süzülmesini göstermektedir. Endüktif mod için THD değeri %2.24 olmaktadır.

Optimum PI parametreleri bulunarak sistem için en iyi performans değerleri elde edilmiştir. 24-darbeli yapının verdiği değerlere yakın tepki değerleri elde edilmiştir. STATCOM'un tam anma gücündeki değişimlerinde sistem tepkimeleri de gözlenmiş ve Şekil.12'de bu değişim gösterilmiştir. STATCOM'un tam anma güçlerindeki değişimlerinde sistem tepkimeleri de gözlenmiş ve Şekil.12'de bu değişim gösterilmiştir. Endüktif modda geride olan akım

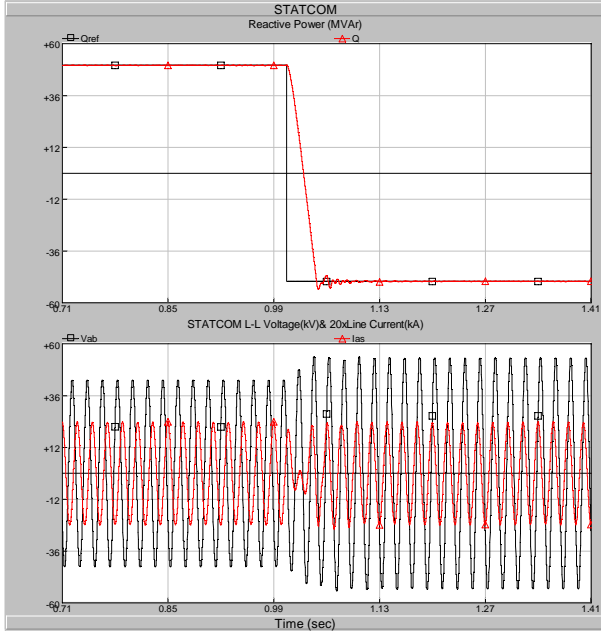
kapasitif moda geçince 3-4 periyot içinde gerilimin önüne geçmektedir.



Şekil.10. 48-Darbeli STATCOM Çıkış Gerilimleri (-50 MVar Kapasitif Mod)



Şekil.11. 48-Darbeli STATCOM Tepkimeleri (+50 MVar Endüktif)



Şekil.12. Mod Değişimlerinde STATCOM Tepkimeleri

Tablo.7. 48-Darbeli STATCOM Çıkış Gerilimindeki Harmonik RMS Değerleri (-50MVar Kapasitif Mod)

Harm. No.	1	23	25	47	49	95	97
Değer (kV)	38.59	75	75	0.59	0.55	0.28	0.27
%	100	0.19	0.19	1.52	1.42	0.73	0.71
THD	2.48						

Tablo.8. Trafo Bağlantılarına Dayalı STATCOM Teknolojilerinin THD yüzdeleri

TOPOLOJİ	Endüktif (%)	Kapasitif (%)
12-Darbeli STATCOM	8.56	9.47
24-Darbeli STATCOM	4.65	5.13
48-Darbeli STATCOM	2.24	2.48

IV. SONUÇ

Türkiye Elektrik İletimi için 154 kV seviyesinde ve ± 50 MVar anma gücünde üç adet STATCOM yapısı EMTDC/PSCAD programı ile tasarlanmış ve performans karşılaştırılması yapılmıştır. Elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır:

- Tablo.8'de incelenen üç ayrı konfigürasyonun aynı gerilim ve aynı güç durumları için Çıkış Gerilimi THD değerleri verilmiştir. Bu sonuçlara göre 12-Darbeli konfigürasyonu THD yönüyle yetersiz kalmaktadır. 24-Darbeli konfigürasyon %5 THD değeri için sınırda kalmasına rağmen 48-darbeli konfigürasyonda bu değer %3'ün altına inmektedir.
- Akım THD değerleri darbe sayısı artıça azalmaktadır.
- Endüktif ve Kapasitif rejimler için THD değerleri değişmekte ve Kapasitif modda yüzdeler artmaktadır.
- Sistem tepkimeleri aynı güçler için tüm konfigürasyonlarda hemen hemen aynıdır.
- Modelde kullanılan kontrol devreleri ABC referansına göre ayarlanmıştır. DQ modelleri kullanıldığı takdirde kontrol kolaylığı elde edilebilir.
- Her üç konfigürasyon da istenen tepkimeleri başarı ile vermektedir.
- Bu üç konfigürasyonun en temel problemi kullanılan manyetik devrelerdir. Manyetik devrelerin dikkatli bir şekilde tasarlanıp üretilmesi gerekmektedir.

V. KAYNAKÇA

- [1] Laszlo Gyugyi, "Dynamic Compensation of AC Transmission Lines by Solid-state Synchronous Voltage Sources," in IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. 9, No. 2, April 1994
- [2] Schauder C. et al, "Development of a ± 100 MVAR Static Condenser for Voltage Control of Transmission Systems," in IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.10, No.3, July 1995
- [3]Sen K.K., "STATCOM-STATIC synchronous COMPensator:Theory, Modeling and Application", IEEE Power Engineering Society 1999 Winter Meeting
- [4]Norouzi A.H., Sharaf A.M., "Two Control Schemes to Enhance the Dynamic Performance of the STATCOM and SSSC", IEEE Trans.on Power Delivery, Vol.20.No.1, Jan.2005
- [5]Lee C.K. et al, "Circuit-Level Comparison of STATCOM Technologies," IEEE Trans. on Power Electronics, Vol.18, No.4, July2003