

TRİSTÖR ANAHTARLAMALI KAPASİTÖR'LÜ KOMPAZASYON SİSTEMİNİN MODELLENMESİ ve GERÇEKLEŞTİRİLMESİ

A. KARA¹

T. YALÇINÖZ²

^{1,2}Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü
Mühendislik-Mimarlık Fakültesi
Niğde Üniversitesi, 51100, Kampüs, Niğde

¹e-posta: ayetulkara@nigde.edu.tr

²e-posta: tyalcinoz@nigde.edu.tr

Anahtar sözcükler: FACTS, Tristör Anahtarlamalı Kapasitör, Kompanzasyon, Gerilim Regülasyonu, Matlab

ABSTRACT

The modern power system is a complex system consisting of a large number of loads. With the increased loading of existing AC transmission systems, problems of voltage flicker and voltage stability have become important subjects in power systems. Better utilization of existing power system capacities by installing new devices such as Flexible AC Transmission Systems (FACTS) has become very important. In this paper, effects of Thyristor Switched Capacitor (TSC), which is one of shunt FACTS devices, on load voltages are investigated as both modeling and implementation. The modeling and simulation of TSC are verified using the Matlab7.04® SimPowerSystems Blockset. The implementation is made with a prototype set installed in laboratory environment. The studied three-phase power system is a two-bus system with a static load. The results show that significant improvement on reactive power compensation and bus voltage regulation could be achieved by using the TSC. The simulation results are very close to the experimental results.

1. GİRİŞ

Elektriksel kalitenin önemli üç faktörü, frekans değişimleri, gerilim değişimleri, gerilim ve akımın dalga şekilleridir. Bunların içerisinde gerilim değişimleri; sistemde bağlı olan yükler için önemlidir [1-3]. Gerilim regülasyonu (gerilim ayarı) hem enerji taşıma hem de dağıtım sistemlerindeki en önemli sorunlardan biridir. Sistemdeki yük artışına paralel olarak meydana gelen gerilim düşümü (veya yükselmesi) sebebi ile müşterinin enterkonnekte sisteme bağlandığı baradaki gerilimin genlik değeri, (cihazların çalışması gereken) nominal değerinden farklı olacaktır. Bu da sistemdeki kayıpları ve gerilim düşümlerini arttırmaktadır. Bir sistemdeki gerilim,

reaktif güç akışı tarafından güçlü bir şekilde etkilenir. Yani gerilim, reaktif güç kontrolü vasıtasıyla istenen değerlerde kontrol edilebilir. Reaktif güç kompanzasyonu gerilim regülasyonunda kullanılan en yaygın metottur [4-7].

Son yıllarda tristör denetimli güç kompanzasyon düzenleri gerek endüstriyel sistemlerin güç katsayılarını dinamik olarak düzenlemede gerekse de terminal geriliminin kararlılığını sağlamada yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır [7].

Modern kompanzasyon yöntemlerini oluşturan Esnek AC İletim Sistemlerinin diğer bir ifadeyle FACTS (Flexible AC Transmissions Systems) cihazlarının çok kısa zamanda tepki gösterme yeteneğine (yarım çevrim), her fazın ayrı ayrı denetlenebilirliği özelliğine ve dolayısıyla dengesiz yükleri kompanze etme yeteneğine sahip olmaları dolayısıyla operatörlerce tercih edilmektedirler [7]. En genel tanımıyla FACTS'ler; şebekenin yüksek gerilim kısmı ile güç elektroniği elemanlarını ve metotlarını birleştiren elektronik kontrolör yapılarıdır. FACTS teknolojisinin enerji sistemindeki uygulamalarında gerekli standartlaşmanın oluşması için ve FACTS cihazlarının tasarımında, işletmesinde ve projelendirilmesinde dikkat edilecek hususların belirlenmesi için 1980'lerde Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute) ve CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques) olmak üzere birçok kuruluş çalışmalar yapmaktadır [7-11].

Bazı çalışmalarda TSC 3 fazlı olarak incelenmiştir. Ancak bu çalışmaların çoğunda TSC; Statik VAR kompanzator (SVC) kapsamında araştırılmıştır. Hatta bu çalışmaların birinde TSC kompanzator olmasından çok yeni bir ölçüm tekniği olarak ele

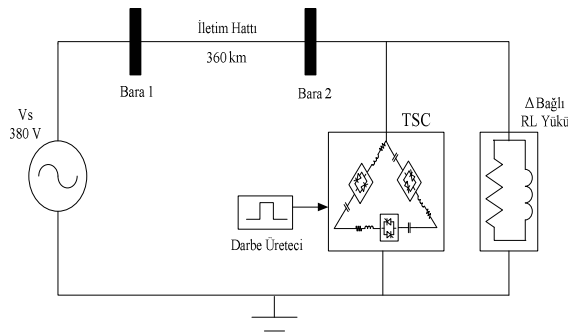
alınmıştır. Sadece Ledwich ve arkadaşları TSC'yi tekil ve kompanzator olarak simülasyon ve deneysel olarak incelemişlerdir. Ancak bu yazarlar TSC'nin kontrolünü mikrodenetleyici ile gerçekleştirmişlerdir [12-14].

Bu bildiride ilk önce FACTS cihazlarından olan Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (TSC)'nin davranışı iki baralı bir uzun iletim hattının sonunda bulunan RL yükünün gerilim kontrolü ve reaktif güç kompanzasyonu için Matlab 7.04®/Simulink ortamında incelenmiştir. Simülasyon sonuçlarının ışığında aynı sistem bir deney düzeneği vasıtasıyla oluşturulmuştur. TSC bünyesindeki tristörlerin kontrolü için 6-Darbe Üreteci kullanılmıştır.

2. TSC'NİN ÇALIŞMA PRENSİBİ

Tristör valfinin tam veya sıfır iletim kontrolü ile etkin reaktansı adımlı olarak değiştirilen paralel bağlı tristör anahtarlamalı bir kapasitördür. TSC, alternatif akım kıyıcı ile buna seri bağlı bir kapasitörden meydana gelmektedir. Birden fazla TSC yapısı (güçleri birbirlerine yaklaşık olarak eşit seçilerek) aynı yük barasına paralel olarak bağlanırlar. Reaktif güç talebi arttıkça tristörler tetiklenerek ihtiyaç duyulan sayıda TSC devreye alınır [9, 15].

TSC ile gerilim kontrolünü ve reaktif güç kompanzasyonunu incelemek için oluşturulan sistemin blok diyagramı Şekil-1'de verilmiştir. Sistem; üç fazlı olarak 380 Vrms'lik, şebeke gerilimi ve 50 Hz'lik şebeke frekansında çalışmaktadır. Sistem iki baralı omik-endüktif yüklü uzun bir enerji nakil hattından oluşmaktadır.



Şekil-1. TSC'nin Blok Diyagramı

3. TSC'NİN SİMÜLASYONU

İlk olarak kompanzasyon yapılmamış bir sistemdeki yükün davranışı yapılan simülasyonlarla incelenmiştir. Bu sistem için kullanılacak devre Şekil-1'de verilen devreden TSC bloğunun çıkarılmasıyla elde edilmiştir. Matlab 7.04®/Simulink modeli de aynı şekilde oluşturulmuştur. Sistem ve hat parametreleri Tablo-1'de verilmiştir.

Tablo-1. Sistem ve Hat Parametreleri

Kaynak gerilimi:	380 Vrms (F-F)
Şebeke frekansı:	50 Hz
Hat R:	6.5 Ω
Hat L:	145 mH
Hat C:	1 μF
Hat modeli:	π eşdeğer devre
Hat uzunluğu:	360 km

Yük parametrelerine ait veriler hesaplama yolu ile şu şekilde bulunmaktadır: Yük modeli için R= 750 Ω ve L= 3.19 H değerlerine göre üçgen bağlı her bir koldaki seri eşdeğer reaktans;

$$Z_{eş} = R + jX_L = R + j.2\pi f.L = 750 + j1001.6 \text{ dır.}$$

Bulunan bu eşdeğer reaktansın modülü ise;

$$|Z_{eş}| = \sqrt{R^2 + X_L^2} = \sqrt{1050^2 + 1001.6^2} = 1251 \angle 53.17^\circ$$

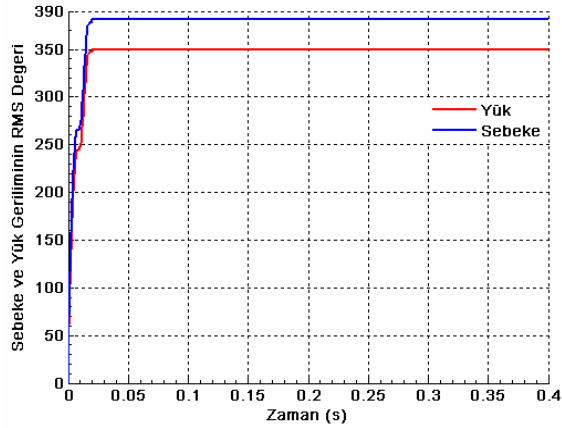
şeklinde bulunmaktadır. Bu verilere göre elde edilen üç fazlı TSC bağlanmamış sisteme ait simülasyon sonuçları Tablo-2'de verilmiştir.

Tablo-2. Kompanzasyondan Önce Elde Edilen Simülasyon Sonuçları

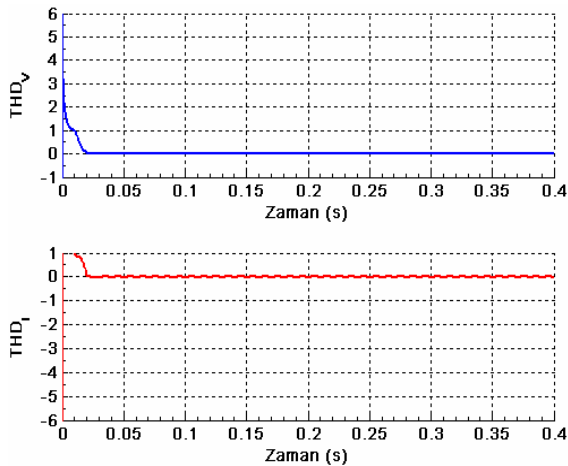
$V_{yük} (V_{FF})$	V_{F1F2}	350.08
	V_{F2F3}	350.04
	V_{F3F1}	350.25
$I_{yük} (A)$	I_{hat_F1}	0.48
	I_{hat_F2}	0.48
	I_{hat_F3}	0.48
$P_{yük} (W)$		175.78
$Q_{yük} (VAr)$		235.03
$\cos \phi$		0.598

Tablo-2'den de görüldüğü üzere TSC bağlanmamış bir sistemde yükün ihtiyaçları karşılanamamakta ve yük gerilimi ile nominal gerilim arasında oldukça büyük bir fark bulunmaktadır. Yük; nominal akım ve gerilim değerlerinde çalışmadığından kapasitesi olan gücü de sarf edememektedir. Yük 175.78 W'lık aktif güç ve 235.03 VAr'lık bir reaktif güç çekmektedir. Bu durumda güç katsayısı 0.598 olmaktadır. Dolayısıyla sistemde verimlilik düşecek ve güç kalitesi zayıflayacaktır. Bu durum Cos φ değerlerinden de açıkça görülmektedir.

Yapılan simülasyondan elde edilen yük gerilimi (rms), THD_v ve THD_i dalga şekilleri sırasıyla Şekil-2 ve Şekil-3'te verilmiştir. Simülasyonlar 20 periyotluk bir süreçte yapılmıştır.



Şekil-2. TSC'siz 3 ~ Sistemdeki Şebeke ve Yük Gerilimi



Şekil-3. TSC'siz 3 ~ Sistemdeki THD_V ve THD_I

Test sisteminin güç katsayısı yaklaşık olarak 0.6 değerine sahiptir. Böyle bir sistemin kompanzasyon ihtiyacı olduğu açıktır. Gerilimin nominal değerlere çekilmesi (gerilim regülasyonu), $\text{Cos } \varphi$ 'nin 1'e yaklaştırılması ve THD'lerin (özellikle de akım harmonikleri) minimize edilmesi için sistemde mutlaka reaktif güç kompanzasyonu yapılmalıdır. Yapılacak reaktif güç kompanzasyonu sayesinde enerji iletim hattının verimliliği artırılarak kullanım kapasitesi arttırılacaktır. Ayrıca kayıplar azaltılarak sistemin faydalanma oranı da arttırılacaktır. Bu aşamada TSC'li kompanzasyon incelenmiştir.

Bu yük tipi için gerekli kompanzatorün parametreleri Tablo-3'te verilmiştir. Tablo-4'te ise elde edilen simülasyon sonuçları verilmektedir.

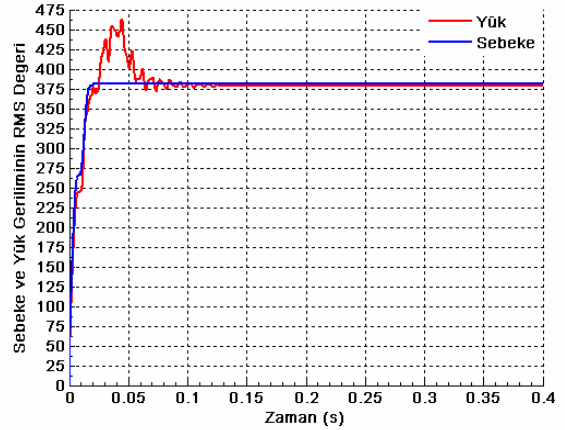
Tablo-3 TSC'li Yapı için Yük ve Kompanzator Parametreleri

Yük		Kompanzator	
R (Ω)	L (H)	C (μF)	Q _C (VAr)
750	3.19	2	272.04

Tablo-4. TSC'li Yapı için Simülasyon Sonuçları

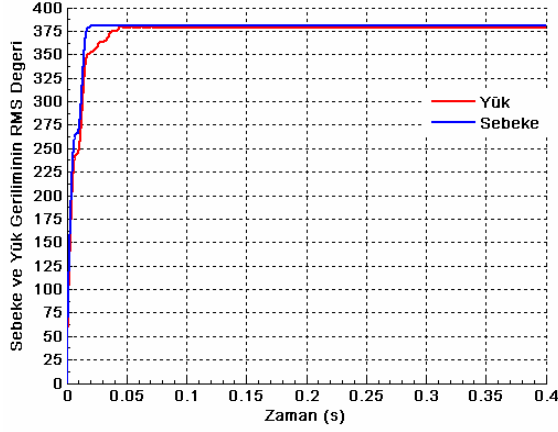
$V_{\text{yük}} (V_{\text{FF}})$	V_{F1F2}	378.75
	V_{F2F3}	378.75
	V_{F3F1}	378.75
$I_{\text{yük}} (A)$	$I_{\text{hat F1}}$	0.32
	$I_{\text{hat F2}}$	0.32
	$I_{\text{hat F3}}$	0.32
$P_{\text{yük}} (W)$	206.65	
$Q_{\text{yük}} (VAr)$	4.92	
$\text{Cos } \varphi$	0.999	

Tablo-4'ten de anlaşılacağı üzere yük gerilimi şebeke gerilimine kompanzasyon yapılmamış durumdakine göre daha da yaklaşmıştır. Bu, gerilim regülasyonunun ve kompanzasyonun başarılı bir şekilde gerçekleştiğini göstermektedir. Yük nominal gücüne kompanzasyon yapılmamış durumdakine göre daha da yaklaşmıştır. Bu etki özellikle (güç faktörü) $\text{Cos } \varphi$ üzerinde de görülmektedir. TSC'li sistemde elde edilen yük gerilimine ait dalga şekli aşağıda verilmektedir.



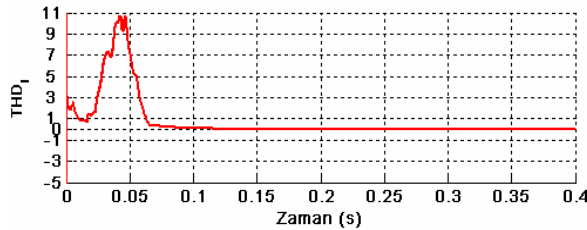
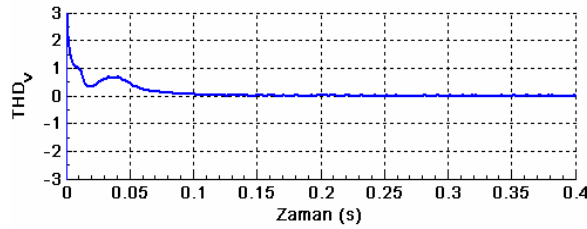
Şekil-4. TSC'li 3 ~ Sistemdeki Şebeke ve Yük Gerilimi

Gerilim regülasyonunun yapıldığı Şekil-4'te açık bir şekilde görülmektedir. Ancak ilk periyodun sonunda yük üzerinde aşırı gerilim meydana gelmiştir. Bunun nedeni ise kapasitörlerin devreye alınmaları sırasında küçük ya da büyük geçici dalgalanmalara yol açmalarıdır. Bu dalgalanmalar kapasite ile dış sistem arasındaki rezonans frekansına bağlı olarak değişir. Kapasitörler devreye alınırken aşırı gerilimlerin meydana gelmemesi için kapasitörler sistem geriliminin tepe değerine eşit değerde doğru gerilimle doldurulurlar [16, 17]. Bu değer sistem üç fazlı olduğu için 380 V_{rms}'tir. Bu koşullarda kapasitör geriliminin sürekli hal koşullarına çekebilmek için gerekli DC gerilim seviyesi 537.401 V_p'tur. Bu değer başlangıç değeri olarak sisteme verildiği zaman elde edilen grafiksel sonuç ise Şekil-5'te gösterilmiştir.

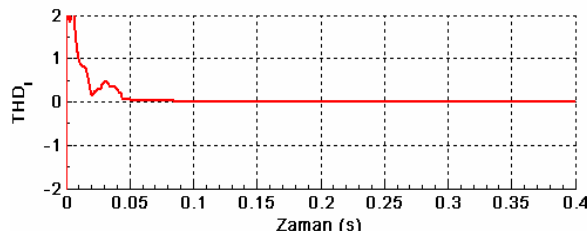
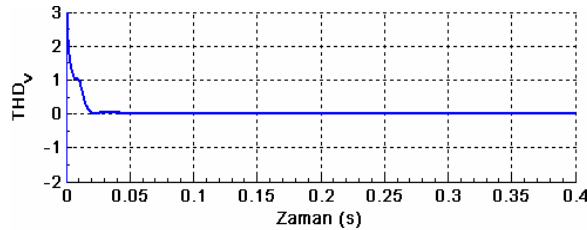


Şekil-5. TSC'li Sistemde Şebeke ve Yük Gerilimi (Kapasitör önşarjlı)

Son olarak gerilim ve akıma ait toplam harmonik distorsiyonlarına ait dalga şekilleri verilecektir. İlk aşamada elde edilen TSC'li kompanzasyondaki THD_V ve THD_I Şekil-6'da, kondansatörün önşarjlı devreye alınmasından sonra elde edilen THD_V ve THD_I ise Şekil-7'de verilmiştir.



Şekil-6. TSC'li Sistemdeki THD_V ve THD_I (Kapasitör boş)

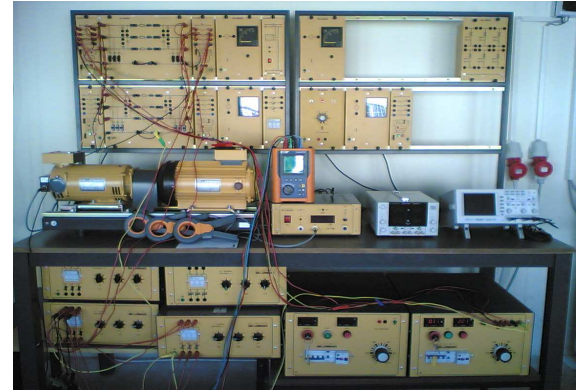


Şekil-7. TSC'li Sistemdeki THD_V ve THD_I (Kapasitör Önşarjlı)

Şekil-6 ve Şekil-7 birlikte incelenecek olursa kapasitörlerin önşarjlı olarak devreye alınması ile harmoniklerin olabildiğince azaldığı görülecektir. Zaten bu sistem harmonik üretmediği için operatörler tarafından tercih edilmektedir.

4. TSC'NİN UYGULAMASI

İlk olarak simülasyon ortamındaki gibi kompanzasyon yapılmamış sistem incelenecektir. Üzerinde çalışılan devreye ait uygulama resmi Şekil 8'de gösterilmiştir. Burada sistem üç fazlı olup statik seri-üçgen bağlı omik-endüktif yüklü uzun bir iletim hattında çalışma yapılmıştır. Sistem ve hat parametreleri simülasyon ortamında kullanılanlar ile aynıdır.



Şekil-8. Üç Fazlı TSC'siz Uygulama Sistemi

Kompanzasyon yapılmamış durumda elde edilen uygulama sonuçları Tablo 5'de verilmektedir.

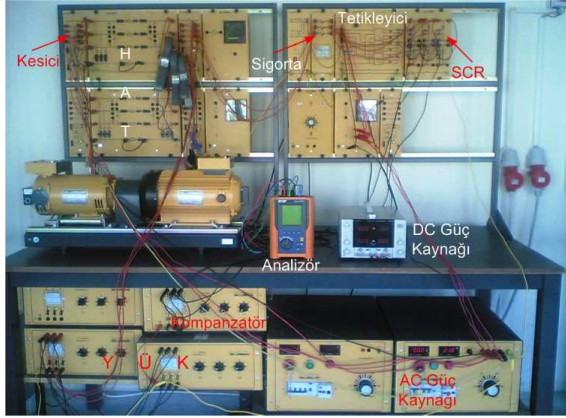
Tablo 5. TSC'siz 3 ~ Sisteme Ait Uygulama Sonuçları

1st phase						2nd phase		3rd phase	
U _{rsm}	U _{L12}	U _{rsm}	U _{L23}	U _{rsm}	U _{L13}				
201.860	350.420	202.283	348.525	205.379	350.346				
thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)	thd(U)	S(kVA)				
19.903	0.093	10.391	0.095	10.889	0.094				
I _{rsm}	P(kW)	I _{rsm}	P(kW)	I _{rsm}	P(kW)				
0.481	0.058	0.468	0.062	0.458	0.062				
thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) i	thd(I)	Q(kVAR) i				
2.350	0.073	1.468	0.071	1.197	0.070				
Pf i	dPf	Pf i	dPf	Pf i	dPf				
0.624	0.638	0.658	0.661	0.665	0.670				
Total Info									
Stat(kVA)	Q _{tot} (kVAR)	P _{tot} (kW)	P _{tot} i	I _{null}					
0.28	0.21	0.18	0.65	0.03					

Tablo-5; simülasyon sonuçları ile birlikte incelenecek olursa gerilim değerleri yaklaşık olarak örtüşmektedir. Uygulama için 200 örnek ölçüm alınmıştır. Bu örneklerden en nominali bunlardır. Çünkü şebeke gerilimi sürekli olarak 1 V ile 10 V arasında dalgalanmaktadır. Yani şebeke gerilimi

simülasyon ortamındaki gibi sürekli olarak 220 V'ta sabit değildir. Cihazın kayıt işlemi ile görülen değer arasında da zaman gecikmesi olduğu için elde edilen en uygun sonuçlar bu şekildedir. Akım değerleri arasında ise yaklaşık olarak 0.02 A'lık bir fark bulunmaktadır. Bu fark uygulama koşulları da hesaba katılacak olursa ihmal edilebilecek bir değerdir. Uygulamada elde edilen aktif güç 180 W, reaktif güç ise 210 VAR'dır. Bu değerlere göre elde edilen güç faktörü ise 0.65'tir. Akımdaki fark referans alındığı zaman bu değerler ile simülasyon sonuçları arasındaki farkın da buradan kaynaklanmış olduğu görülecektir. Sonuç olarak simülasyon sonuçları ile uygulama sonuçlarının birbirini desteklediği söylenebilir.

TSC'li sistem için üzerinde çalışılan devre Şekil-9'da gösterilmektedir. Burada yük barasına paralel olarak yükü kompanze etmek için TSC bağlanmıştır.



Şekil-9. TSC'li 3 ~ Sisteme Ait Uygulama Sistemi

Uygulama ortamında kullanılan değerler simülasyon ortamında kullanılan parametreler ile aynıdır. Bu koşullar altında elde edilen uygulama sonuçları ise Tablo-6'da verilmektedir.

Tablo-6. TSC'li Sistem için Uygulama Sonuçları

$V_{yük} (V_{FF})$	V_{F1F2}	378.7
	V_{F2F3}	378.4
	V_{F3F1}	378.4
$I_{yük} (A)$	$I_{hat F1}$	0.32
	$I_{hat F2}$	0.32
	$I_{hat F3}$	0.32
$P_{yük} (W)$	206.2	
$Cos \phi$	0.98	

Tablo-6, Tablo-4'teki simülasyon sonuçları ile birlikte incelenecek olursa gerilim ve akım değerleri örtüşmektedir. Uygulama için yapılan ölçümlerden en nominali bunlardır. Uygulamada elde edilen aktif güç 206.2 W, güç faktörü ise 0.98'dir. Sonuç olarak simülasyon sonuçları ile uygulama sonuçları birbirini desteklemektedir.

Uygulama kapsamında toplam harmonik bozulmalar verilmemiştir. Bu nedeni ise laboratuvar ortamında 3 fazlı TSC'yi dolduracak DC güç kaynağının bulunmamasıdır. Simülasyon sonuçlarından da görüldüğü üzere TSC sisteme boş olarak alındığı zaman istenmeyen osilasyonlara sebep olmaktadır. Ancak kapasitörlerin dolu ya da boş olması elde edilecek olan nümerik değerleri etkilememektedir.

4. SONUÇ

Bu bildiriye ilk önce 3 fazlı dengeli yüklü bir sistemde FACTS cihazlarından TSC Matlab 7.04®/Simulink ortamında ele alınmıştır. Sonuçlar başarılı bir şekilde elde edilmiştir. Yapılan simülasyon çalışmasının en önemli sonuçları şunlardır:

- TSC bağlandığı sisteme kolaylıkla adapte olabilmektedir,
- TSC ile her faz ayrı ayrı denetlenebilmektedir,
- Simetrik bir güç çeken yük TSC ile kompanze edilmesi durumunda simetrik yapıdan uzaklaşmamaktadır.

Teorik bilgiler ile simülasyon sonuçlarının birbirini desteklediği görülmüştür.

Ayrıca bu çalışmada üç fazlı 346 VA'lık bir TSC sistemi laboratuvar ortamında kurulmuştur. Yük omik endüktif olup yük ve kompanzatorler üçgen bağlanmıştır. TSC'nin harmonikler üzerine etkisini daha net görebilmek için kapasitörlerin önsarjlı olarak devreye alınması gerekmektedir. Ancak laboratuvar ortamında bu ihtiyacı karşılayacak DC güç kaynağı bulunmamaktadır. Bu nedenle çalışmalar kapasitörler boş iken yapılmıştır. Simülasyon sonuçları ile deneysel sonuçlar nümerik olarak birbiri ile örtüşmektedir.

Sonuçlardan da görüldüğü gibi TSC yük geriliminde bir artış ve kayıplarda bir azaltma özelliği göstermektedir. Böylece güç kalitesi sağlanmıştır.

TEŞEKKÜR

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 104M235 TÜBİTAK KARIYER projesi çerçevesinde desteklenmiştir.

KAYNAKLAR

- [1] Anderson G., Power System Dynamics and Stability, September, 1999.
- [2] Arifoğlu U., Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi, Ocak, 2002.
- [3] Peşint M. A., Senkron Makinalar, 1975.
- [4] Eminoğlu U., Yalçınöz T., Herdem S., Tristör Kontrollü Seri Kapasitör Kullanılarak Değişken Yüklü Güç Sistemlerinde Gerilim Kontrolü, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, pp.148-151, İstanbul, Eylül, 2003.
- [5] Eminoğlu U., Herdem S., Yalçınöz T., İntertör Temelli FACTS Cihazları Kullanarak Reaktif Güç

Kompanzasyonu ile Gerilim Kontrolü, Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, pp.152-155, İstanbul, Eylül, 2003.

[6] Wollenberg B. F., "Transmission System Reactive Power Compensation", IEEE Power Engineering Society, pp. 507-508, 2002.

[7] TMMOB, "TMMOB Reaktif Güç Kompanzasyonu Seminer Notları", İstanbul, EMO, 1999.

[8] Acha E., Fuerte-Esquivel C. R., Ambriz Perez H., Angales-Camacho C., "FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley&Sons LTD, 2004.

[9] Hingorani N. G., Gyugyi L., "Understanding FACTS: Concepts and Technology Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press, New York, 1999.

[10] Povh D., "Modelling of FACTS in Power System Studies", IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Vol. 2, 23-27 January/2000, pp.1435-1439.

[11] Mathur R. M., Varma R. K., "Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems", IEEE Press, USA, 2002.

[12] Thomas P. Y., Conard J. Ph., Labrique F., Buyse H., "Analysis of A Three Phase TSC-TCR

Static VAR Compensator by Recurrences Theory", IEEE 7th Mediterranean Electrotechnical Conference, Vol 2. pp. 849-852, 12-14 April/1994.

[13] G. F. Ledwich, S. H. Hosseini, G. F. Shannon, "Voltage Balancing Using Switched Capacitors", Electric Power Systems Research, Vol. 24, Issue 2, pp. 85-90, August/1992.

[14] M. Tabandeh, M.H. Alavi, M. Marami, G.R. Dehnavi. "Design and Implementation of TSC Type SVC Using A New Approach for Electrical Quantities Measurement", IEEE Power Tech Proceedings, Vol. 2, 10-13 Sept. 2001.

[15] Jianhua Z., Guangping D., Gang X., Jie Z., Hui Z., Shuying W., "Design of the Control System for Thyristor Switched Capacitor Devices", IEEE Power Engineering Society, pp. 606-610, 2003.

[16] Kara A., Yalçınöz T., "AÇ-KAPA Kontrollü FACTS Cihazları ile Yük Kompanzasyonu", III. Otomasyon Sempozyumu, Sy: 68-72, Denizli, 11-12 Kasım 2005.

[17] Kara A., Yalçınöz T., "Esnek AC İletim Sistemlerinde Kullanılan Cihazlar ve TCR, SVC, TSR Yapılı Paralel Kompanzatorlerin Yük Gerilimine Etkisinin Matlab Ortamında İncelenmesi", II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi MBGAK 2005, ISBN: 9754047588, İstanbul, 17-19 Kasım/2005.