

# TRİSTÖR ANAHTARLAMALI KAPASİTÖR (TSC) VE TRİSTÖR ANAHTARLAMALI REAKTÖR-TABANLI STATİK VAR KOMPANZATÖR'ÜN (TSR-TABANLI SVC) PI İLE KONTROLÜ

**Ayetül GELEN ve Tankut YALÇINÖZ**

Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü, Mühendislik-Mimarlık Fakültesi, Niğde Üniversitesi, 51245,  
Kampüs, Niğde

[agelen@nigde.edu.tr](mailto:agelen@nigde.edu.tr), [tyalcinoz@nigde.edu.tr](mailto:tyalcinoz@nigde.edu.tr)

(Geliş/Received: 01.07.2008 ; Kabul/Accepted: 16.12.2008)

## ÖZET

Güç elektroniği cihazlarının akım ve gerilim tutma kapasitelerinin gelişmesi ile birlikte, etkili bir paralel ve seri kompanzasyon için farklı tip kontrolörlerin kullanımı da artmıştır. Bu nedenle en çok önerilen kontrolörlerden biri Esnek AC İletim Sistemleri (FACTS, Flexible AC Transmission Systems) olarak bilinen güç elektroniği tabanlı kontrolörler ailesidir. Bu çalışmada, paralel FACTS cihazlarından ikisi olan Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC) ve Tristör Anahtarlama Reaktör (TSR)-tabanlı Statik VAR Kompanzator (SVC)'nin yük barası gerilimine olan etkisi incelenmiştir. Altı Darbe Üretici ve PI (Proportional Integral) Kontrolör TSC ve TSR-tabanlı SVC'nin tetikleme açılarının kontrolü için kullanılmıştır. Bu kompanzatorler; Matlab/Simulink Güç Sistemleri Araç Kutucuğu (Power Systems Toolbox) kullanılarak simule edilmiştir. Üzerinde çalışılan üç fazlı güç sistemi; iki baralı olup statik yük ve uzun iletim hattı modeline sahiptir. Yapılan benzetim sonuçları; PI kontrolörün bu tip kompanzatorlere kolaylıkla uygulanabileceğini göstermiştir.

**Anahtar kelimeler:** Kompanzasyon, gerilim regülasyonu, FACTS, TSC, TSR, SVC, PI kontrolör, Matlab/Simulink.

## PI CONTROL OF THYRISTOR SWITCHED CAPACITOR (TSC) AND THYRISTOR SWITCHED REACTOR-BASED STATIC VAR COMPENSATOR (TSR-BASED SVC)

### ABSTRACT

Together with the improvement in current and voltage handling capacities of power electronic devices, different type controllers have been increasingly used for efficient shunt and series compensation. The most promising controllers based on power electronics are known as Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices. In this study, the effects of two of shunt FACTS devices, which are Thyristor Switched Capacitor (TSC) and Thyristor Switched Reactor (TSR)-based Static VAR Compensator (SVC) on load bus voltage are investigated. Six Pulse Generator and PI Controller are used to control firing angles of TSC and TSR-based SVC. These compensators are simulated by using Matlab/Simulink, Power Systems Toolbox. Analyzed the studied three phase power system consists of two buses, a static load and a long transmission line model. The simulation results show that PI controller can be easily applicable to these type compensators.

**Keywords:** Compensation, voltage regulation, FACTS, TSC, TSR, SVC, PI controller, MATLAB/Simulink.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Teknolojideki gelişmeler ve refah seviyesinin yükselmesi nedeniyle işyerlerinde, konutlarda ve sanayide,

reaktif enerjiyi fazla miktarda çeken cihaz ve makineler artmış bulunmaktadır. Bu tip cihazlar; çalışabilmeleri için aktif akımın yanında bir de reaktif akım çekmektedirler. Çünkü reaktif akım; elektro-

dinamik prensibi ile çalışan motor, jeneratör vb. makinelerde manyetik alan doğurmaya yaramaktadır. Bu akım elektrik enerjisi sistemlerinde;

- Yüklenme kapasitesini düşürmekte;
- Enerji kayıplarını arttırmakta;
- Gerilim düşümünü arttırmakta;
- Verimi düşürmekte ve;
- Enerji ve donanım maliyetini arttırmaktadır.

Sözü geçen olumsuzlukların giderilmesi için gerekli tedbirlerin alınması halinde, mevcut elektrik sistemimizle bir müddet daha yeni yatırımlar yapılmasına gerek kalmadan elektrik taleplerinin karşılanması ve elektrik şebekelerimizin verimli bir şekilde işletilmesi mümkün olacaktır [1]. Bu tedbirlerden birisi de Reaktif Güç Kompanzasyonudur. Enerji sistemindeki indüktif ve kapasitif yüklerin dengelenmesi ile reaktif gücün tekrar kaynağa iade edilmesi için gereken ve yapılan sistemler ya da şebekenin ve yükün ihtiyacı olan reaktif gücün belli teknikler kullanılarak karşılanması işlemi Reaktif Güç Kompanzasyonu olarak adlandırılır. Aktif güç, tamamen enerji sisteminin jeneratörlerinde üretilirken buna karşılık; birkaç tane reaktif güç kaynağı vardır [2, 3]. Başlıca reaktif akım çeken cihazlar; motorlar trafolar, havai hatlar, şönt reaktörler vb. şeklinde sıralanabilir. Reaktif akım üreten cihazlar ise kondansatörler, aşırı ikazlı senkron makineler vb. dir.

Şönt kapasitörlerin ve reaktörlerin anahtarlanması ile reaktif güç kontrol edilebilir. Eğer tristörler; anahtar olarak, kapasitörler ve/veya şönt reaktörler içindeki akımı kontrol etmek için kullanılırsa reaktif gücün hızlı ve adımsız kontrolü yapılabilir. Son yıllarda gelişen teknolojiye paralel olarak güç elektroniği elemanları daha büyük güçlerde imal edilebilmektedir. Ayrıca kontrol elemanlarının performansında da büyük gelişmeler sağlanmıştır [3]. Alternatif akım iletiminin, iletilebilir aktif güç kapasitesini ve kontrol edilebilirliğini arttırmak için güç elektroniği elemanlarının kullanılması FACTS (Flexible Alternative Current Transmission Systems–Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) cihazlarını doğurmuştur. FACTS kontrolörlerinin farklı tipleri IEEE, CIGRE ve EPRI dökümanlarında tanımlanmaktadır [4-6]. FACTS cihazlarını şu şekilde sınıflandırabiliriz [5, 6];

1. Tristöre Dayalı FACTS Cihazları
  - Statik VAR Kompanzator (SVC)
  - Tristö Anahtarlamalı Kapasitör (TSC)
  - Tristö Anahtarlamalı Reaktör (TSR)
  - Tristö Kontrollü Kapasitör (TCC)
  - Tristö Kontrollü Reaktör (TCR)
  - Tristö Kontrollü Seri Kapasitör (TCSC)
  - Tristö Kontrollü Faz Değiştirici (TCPV)
2. Kapıdan Kapanabilir Anahtara (GTO) Dayalı FACTS Cihazları
  - Statik Kompanzator (STATCOM)

- Birleştirilmiş Güç Akış Cihazı (UPFC)

Bir alternatif akım iletim sisteminin kalitesi; güç faktörünün 1'e yakın olması, harmonik miktarının en aza indirilmesi, gerilim ve frekansın kararlılığı, faz gerilimi ve akımlarının dengeli olması ile anlaşılır [7, 8]. Elektrik güç sistemindeki sorunları yok etmek için, sistemin yük durumu, maliyeti ve sistem cevap süresi gibi çeşitli etkenler göz önünde bulundurularak, FACTS cihazlarından birisi seçilir. Bu çalışmada, FACTS cihazlarından olan Tristö Anahtarlamalı Kapasitör (TSC) ve Tristö Anahtarlamalı Reaktör (TSR)-tabanlı Statik VAR Kompanzator (SVC)'nin incelenmesi amaçlanmıştır.

Hosseini ve arkadaşları [9] anahtarlamalı kapasitörlerin kontrolünü P (Oransal) denetleyici kullanarak gerçekleştirmişlerdir. "P" algoritmasını bir mikrodenetleyiciye yazarak kompanzasyon sisteminin cevap hızını daha da iyileştirmişlerdir. Ayrıca P kontrolün anahtarlama elemanının yıpranmaksızın kullanılmasını sağladığını da belirtmişlerdir. TSC tabanlı bir SVC çalışmasında ise kompanzatorların kontrolü I (İntegral) denetleyici kullanılarak incelenmiştir. TSC'li SVC yapısının AC iletim sistemlerinde geçici kararlılığı düzeltmek ve gerilimi desteklemek için kullanıldığı belirtilmiştir. Bu yapının kararlılık analizi rekürans teorisi olarak isimlendirilen bir analiz yöntemi ile incelenmiştir. Bunun sonucu olarak çalışma altındaki sistemde denetleyicinin üreteceği açıların bu metotla doğru bir şekilde hesaplanabileceğini belirtmişlerdir [10]. Johnson [11] TSC'nin PI (Oransal-İntegral) kontrolünü gerçekleştirmiş ve benzetimini yapmıştır. Bu çalışmanın amacı ise PI kontrollü TSC yapısının ATP, EMTP96 ve EMTDC gibi bilgisayar programlarında ayrı ayrı incelenilebileceğini ve benzer sonuçlar elde edildiğini göstermektir. Yapılan çalışmaların sonucu da bu düşüncüyü desteklemiştir. Ahmed ve arkadaşları [12] prototip bir rüzgar enerjisi santrali bünyesindeki SVC yapısını, benzetim ve deneysel olarak incelemiştir. Buradaki SVC; TSC tabanlıdır ve kontrol işlemi PI ile yapılmıştır. Bu tür bir kontrolün esnek olduğunu göstermişlerdir.

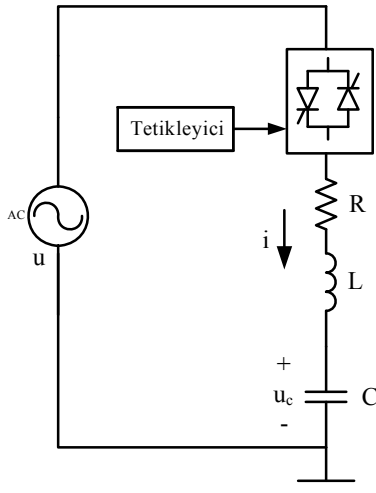
Bu çalışmada ise her iki anahtarlamalı yapısının (TSC ve TSR-tabanlı SVC) PI ile kontrolü incelenmiştir. Elde edilen sonuçlara göre oldukça esnek bir kontrol işlemi gerçekleştirilmiştir. Tristölerin tetiklenmesi anındaki geçici olaylar minimize edilerek sistem toplam harmonik bozulması iyileştirilmiştir. Reaktif güç kompanzasyonu işlemi başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir. Bu, gerilim regülasyonunun yapılmasından ve güç faktöründeki düzelmeden kolaylıkla anlaşılabilir. Bu çalışmada ayrıca klasik metot (On-Off kontrol) ile PI kontrolör Matlab/Simulink ortamında karşılaştırılmıştır. Bunun sonucu olarak PI kontrolörün sisteme başarılı bir şekilde uyarlanabileceği ortaya çıkmıştır. PI kontrolör ile elde edilen sonuçların, klasik metotla elde edilen sonuçlara olan yakınlığı karmaşık bir kontrolörü kullanmaksızın da başarılı ve esnek bir reaktif güç kontrolü yapılabileceğini göstermiştir. Ayrıca Matlab/Simulink programının da

anahtarlamalı kompanzatorlerin modellenmesinde oldukça elverişli olduğu görülmüştür.

## 2. TSC VE TSR-TABANLI SVC (TSC AND TSR-BASED SVC)

### 2.1. Tristör Anahtarlamalı Kapasitör (Thyristor Switched Capacitor, TSC)

Tristör valfinin tam veya sıfır iletim kontrolü ile etkin reaktansı adımli olarak değiştirilen paralel bağlı tristör anahtarlamalı bir kapasitördür. Şekil 1'de TSC eşdeğer devresi görülmektedir. TSC, alternatif akım kıyıcı ile buna seri bağlı bir kapasitörden meydana gelmektedir. Buna ilaveten devredeki L indüktansının da iç direnci bulunmaktadır. Bu eleman tetiklemenin olmadığı durumlarda meydana gelebilecek anlık yüksek akımları sınırlamak için kullanılmıştır [8, 13-16]. 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 [13-15].



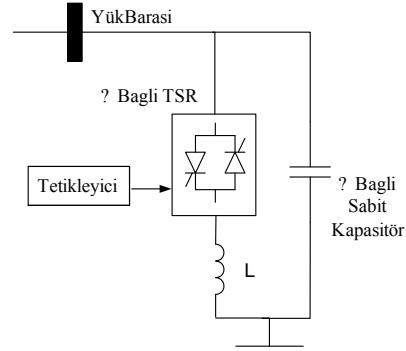
Şekil 1. TSC eşdeğer devresi (Equivalent circuit of TSC)

Üç fazlı uygulamalarda TSC cihazı üçgen (delta) olarak bağlanmaktadır [4, 9, 16]. TSC'nin kontrolü on-off kontrol tekniği ile yapılır. Enerji sisteminde; başlangıçta meydana gelebilecek bozulmaları önlemek için TSC yapısındaki kondansatörler devreye alınmadan önce kaynak geriliminin tepe değerine şarj edilerek devreye alınmaktadır [8, 16]. Bu çalışmada da kondansatörler dolu olarak devreye alınmıştır.

### 2.2. Tristör Anahtarlamalı Reaktör-tabanlı Statik Var Kompanzator (Thyristor Switched Reactor-based Static Var Compensator, TSR-based SVC)

TSR; reaktif güç tüketen paralel bir kompanzatördür. Çalışma prensibi basit, sadece yarım sayıklık gecikmeye sahip ve harmonik üretimi yapmamaktadır. Bağlama aşırı gerilimlerine ve geçici olaylara yol açmamak için reaktör elemanları; sisteme uygulanan alternatif gerilimin pozitif ve negatif tepe

değerlerinde yani akımın sıfır geçiş noktalarında devreye alınır ve çıkarılırlar. TSR yapısında sadece alternans başlarında ( $\pm 90^\circ$ ) tetikleme yapıldığından harmonik problemi ortadan kalkmaktadır [5, 6, 17]. Şekil 2'de TSR-tabanlı SVC'nin eşdeğer devresi görülmektedir. TSR, alternatif akım kıyıcı ile buna seri bağlı bir reaktörden meydana gelmektedir. SVC oluşumu ise mevcut TSR yapısına paralel bağlı bir sabit kapasitör eklenmesi ile elde edilmektedir. Üç fazlı uygulamalarda TSR cihazı üçgen (delta) olarak bağlanmaktadır [18].



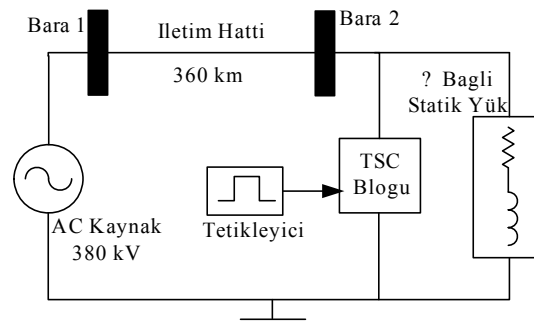
Şekil 2. TSR-tabanlı SVC'nin eşdeğer devresi (Equivalent circuit of TSR-based SVC)

## 3. BENZETİM SONUÇLARI (SIMULATION RESULTS)

### 3.1. Üç Fazlı PI Kontrollü TSC'li Sistemin Benzetim Sonuçları (Simulation Results of Three Phase System with PI Controlled TSC)

Şekil 3'te eşdeğer devresi verilen benzetimi yapılan iki baralı sistem; üç fazlı, seri-üçgen bağlanmış statik yüklü ve uzun iletim hattından oluşmaktadır. Denetleyici olarak PI kullanılmıştır. Çünkü diferansiyel etki hatanın türevini almaktadır ve sabit kalan hata üzerinde etkinliği yoktur. Yani hata girişi sabit ise diferansiyel etkinin sağlayacağı kontrol sıfır olacaktır [19]. Üzerinde çalışılan test sisteminde ise sabit güç ve akıma sahip yük bulunmaktadır. Dolayısıyla her "t" anındaki gerilim değeri sabittir. Bu sebepten dolayı PI kontrolör kullanılmıştır.

İki baralı sistemin değerleri ve hat parametreleri Tablo 1'de verilmiştir. Benzetim zamanı 20 periyot



Şekil 3. Üç fazlı PI kontrollü TSC'li sistemin eşdeğer devresi (Equivalent circuit of three phase system with PI controlled TSC)

**Tablo 1.** İki baralı sistem ve hat parametreleri (Two-bus system and line parameters)

Kaynak gerilimi	Şebeke frekansı	Hat R	Hat L	Hat C	Hat modeli	Hat uzunluğu	Statik Yük	
							P	Q
380 kV	50 Hz	6.5 Ω	145 mH	1 μF	π	360 km	207 MW	277 MVar

olarak alınmıştır. İlk olarak kompanzasyon yapılmamış 3 fazlı sisteme ait benzetim sonuçları verilmiştir. Daha sonra 6-darbe üretici ile (klasik metot) yapılan benzetim sonuçları verilecektir. Son olarak ta PI ile kontrol edilen TSC'li sisteme ait sonuçlar verilecektir. Buradaki amaç; anahtarlamalı kompanzatorlerin standart tetikleyicilerin dışındaki denetleyicilerle çalışma kabiliyetinin ne şekilde değiştiğini görmektir.

3 fazlı kompanzasyon yapılmamış sisteme ait benzetim sonuçları Tablo 2'de verilmiştir. Statik yük simetrik olup kompanzasyon yapılmadan önce yük barasından ölçülen gerilim değerleri her bir faz için 350 kV'tur. Her fazdan akan akım değerleri ise 0.48 kA değerindedir. Nominal aktif gücü 207 MW ve reaktif gücü 277 MVar olan yükün, kompanzasyon öncesi durumdaki aktif gücü 175 MW ve reaktif gücü 235 MVar olarak ölçülmüştür. Bu değerlerden de anlaşıldığı üzere enerji sistemi nominal değerlerden uzaklaşmıştır ve kompanzasyon yapılması gerekmektedir.

TSC'li sistem için denetleyici olarak seçilen PI denetleyiciye ait parametreler deneme-yanılma metodu kullanılarak seçilmiştir.  $K_p$  ve  $K_i$  sırasıyla 10 ve 100 olarak elde edilmiştir. Ancak karşılaştırma yapma açısından ilk olarak 6-darbe üretici kullanılan TSC'li sisteme ait benzetim sonuçları Tablo 3'te verilecektir. Daha sonra ise bu veriler ışığında elde edilen PI kontrollü TSC'li sisteme ait benzetim sonuçları Tablo 4'te verilecektir.

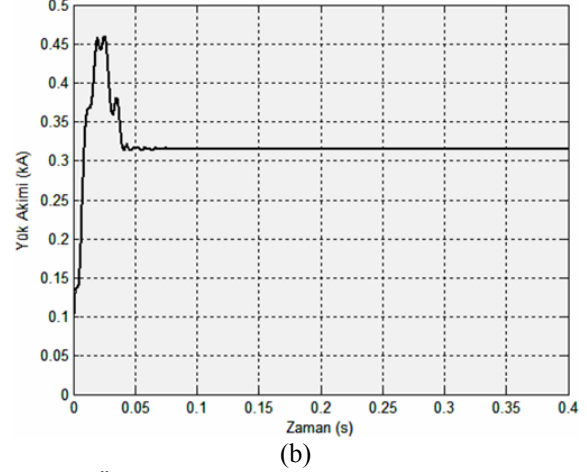
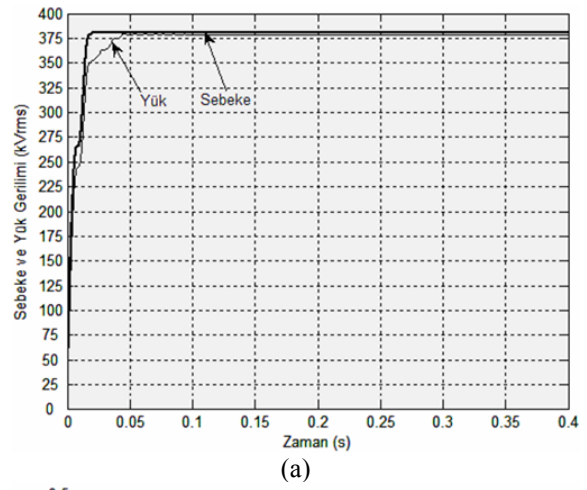
Her iki tablo birlikte incelenecek olursa her nicelik için PI kontrollü sistemde elde edilen ölçüm değerleri klasik metotla yapılan kompanzasyonda elde edilen sonuçlar ile hemen hemen aynı değerlere sahiptir. Buradan şu sonuçlar çıkarılabilir:

PI denetleyici bir önceki duruma göre sistemi kararsız duruma getirmemiştir. Çünkü simetrik koşullarda çalışan yük; PI'li sistemde de aynı şekilde davranmıştır. Bunun dışında on-off olarak çalışan bir sisteme klasik metodun haricinde karmaşık bir denetleyici uygulandığı zaman sistemin buna sorunsuz bir şekilde adapte olduğu görülmüştür.

3 fazlı PI kontrollü TSC'li sisteme ait benzetim sonuçlarının verildiği Tablo 4'teki sonuçlardan gerilim ve akıma ait dalga şekilleri Şekil 4'te verilmiştir. Şekil 4-(b)'de tristörlerin anahtarlandığı andaki akım yükselmesinin kısa sürede söndürüldüğü

**Tablo 2.** Üç fazlı kompanzasyon yapılmamış sisteme ait benzetim sonuçları (Simulation results for three-phase uncompensation system)

$V_{y\ddot{u}k}$ (kV)			$I_{y\ddot{u}k}$ (kA)			$P_{y\ddot{u}k}$ (MW)	$Q_{y\ddot{u}k}$ (MVar)	$\cos \phi$
Vab	Vbc	Vca	Ihat a	Ihat b	Ihat c			
350	350	350	0.48	0.48	0.48	175.78	235.03	0.598

**Şekil 4.** Üç fazlı PI kontrollü TSC'li sistem (a) Gerilim (b) Akım (Three-phase PI controlled TSC System (a) Voltage (b) Current)

görülmektedir. Sistemdeki güç ve PI kontrollü bir kompanzatorün sistemde kararsızlığa yol açıp açmadığını daha rahat görebilmek için (Gerilim/Akım Toplam Harmonik Distorsiyonu)  $THD_V$  ve  $THD_I$ 'na ait dalga şekilleri ise sırasıyla Şekil 5-(a) ve Şekil 5-(b)'de verilmiştir. Burada verilen şekillerde TSC yapısında bulunan kapasitör önşarjlı olarak devreye alınmıştır.

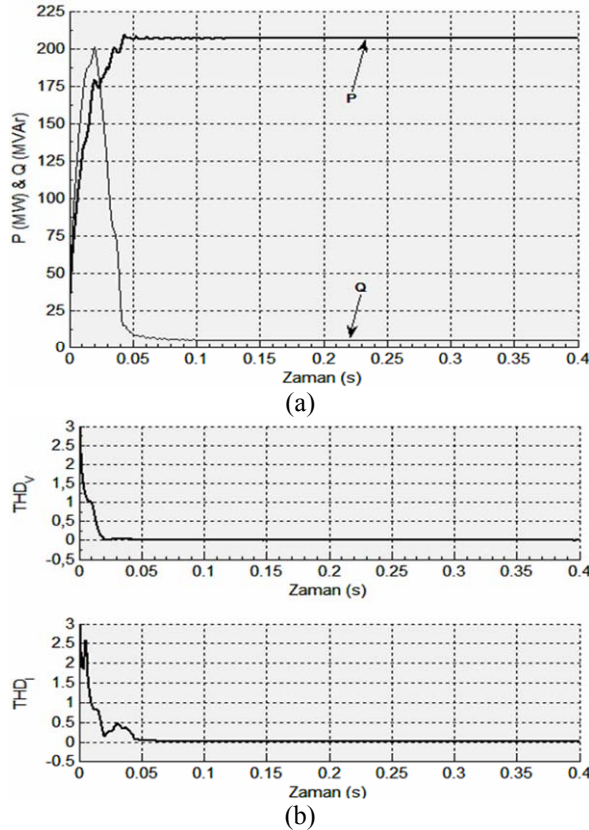
Şekilden 5-(b)'den de anlaşılacağı üzere denetleyici olarak PI'nin kullanımı sisteme klasik metoda göre ekstra bozulmalar eklememiştir. Bu da on-off kontrollü kompanzatorler için PI denetleyicinin kullanılabilirliğini göstermektedir. Üzerinde çalışılan sistemin kapalı çevrim çalışma süreci şu şekilde anlatılabilir:

**Tablo 3.** Üç fazlı TSC'li sisteme ait benzetim sonuçları (6–Darbe üreteçli) (Simulation results for three-phase system with TSC, (six-pulse generator))

V <sub>yük</sub> (kV)			I <sub>yük</sub> (kA)			P <sub>yük</sub> (MW)	Q <sub>yük</sub> (MVar)	Cos φ
V <sub>ab</sub>	V <sub>bc</sub>	V <sub>ca</sub>	I <sub>hat a</sub>	I <sub>hat b</sub>	I <sub>hat c</sub>			
378.75	378.75	378.75	0.32	0.32	0.32	206.65	4.92	0.999

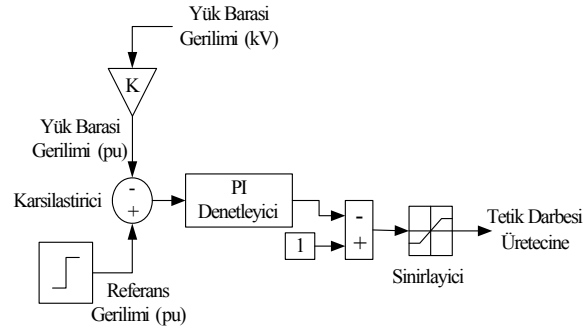
**Tablo 4.** Üç fazlı PI kontrollü TSC'li sisteme ait benzetim sonuçları (Simulation results for three-phase system with PI controlled TSC)

V <sub>yük</sub> (kV)			I <sub>yük</sub> (kA)			P <sub>yük</sub> (MW)	Q <sub>yük</sub> (MVar)	Cos φ
V <sub>ab</sub>	V <sub>bc</sub>	V <sub>ca</sub>	I <sub>hat a</sub>	I <sub>hat b</sub>	I <sub>hat c</sub>			
378.75	378.75	378.75	0.32	0.32	0.32	206.67	4.93	0.999

**Şekil 5.** Üç fazlı PI kontrollü TSC'li sistem (a) Aktif ve reaktif güç (b) THD<sub>V</sub> ve THD<sub>I</sub> (Three-phase PI controlled TSC System (a) Active and reactive power (b) THD<sub>V</sub> and THD<sub>I</sub>)

Şebeke ve yük geriliminin Şekil 6'da gösterilen bir karşılaştırıcı devreye uygulanması ile çıkış işareti olarak bir hata işareti elde edilir. Elde edilen bu hata işareti bir komparatör devre yardımıyla operatör tarafından belirlenen limitler ile karşılaştırılarak ve tristörlerin tetiklenme durumunun belirlenmesi için bir çıkış işareti üretilir. Nihayetinde tristörlerin tetiklenmesi ile kapasitörler devreye girerek kompanzasyon işlemi gerçekleşmiş olur.

Üzerinde çalışılan test sistemi tek tek (münferit) kompanzasyon tipidir. Bu kompanzasyon tipinde yük sabit güçlü ve bir adettir. Bu yükü kompanze edecek kompanzator de yük ile aynı şalter üzerinden açılıp kapanmaktadır. Yük sabit güçlü olduğundan dolayı karşılaştırıcı devre çıkışındaki gerilim hata değeri her "t" anında sabittir. Komparatöre gelen hata işareti de sabit

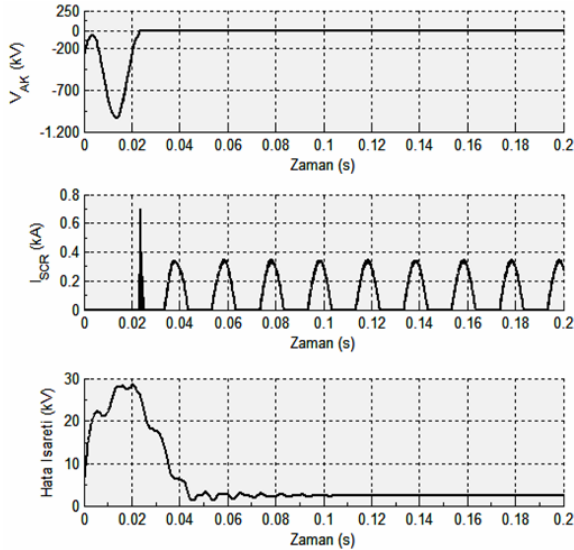
**Şekil 6.** Denetleyici yapısı (Structure of Controller)

olacağından dolayı komparatör de hep sabit çıkış işareti üretecektir. Eğer hata işareti belirlenen limitler dışında ise tristörlerin tetiklenmesi sürekli olarak devam edecektir. 3 fazlı TSC'li kompanzasyon sisteminin kapalı çevrim benzetim sonuçlarından elde edilen tristör anot-katod gerilimi ( $V_{AK}$ ), tristör akımı ( $I_{SCR}$ ) ve hata işareti Şekil 7'de verilmiştir.

Şekil 7'de 0.02 s anına kadar olan dalgali yükselme sistem çalışmasından bağımsız bir süreçtir. Çünkü Simulink ortamında kullanılan RMS Dönüştürücü Bloğu giriş sinyalinin ilk periyodunu hesaplama için kullanılmaktadır. Sistemin kapalı çevrim çalışması bu andan itibaren gözlemlenebilmektedir. Kompanzasyon yapılmamış test sisteminde yük üzerindeki gerilim 350 kV olarak ölçülmüştü (Tablo 2). Böylece elde edilecek hata işareti  $380-350=30$  kV olmalıdır. Bu durum şekilde 0.02 s anında görülmektedir. Hata işaretinin eldesi, karşılaştırıcının bunu algılayıp tristörleri tetikleme oldukça kısa bir sürede gerçekleşmektedir. Tristörlerin tetiklenmesi için 0.0035 saniye bir gecikme olmaktadır. Çünkü anahtarlamalı kompanzatorların tetikleme açılarını gerilim tepe değer noktaları belirlemektedir. Tristörlere tetik sinyali gönderecek olan blok komparatör çıkışının aktif olduğu anda tristörlerin tetiklenmesi için ilk sıfır geçişten sonraki tepe değerini beklemek zorundadır. Bu an da  $0.02+0.0035=0.0235$  saniyeye karşılık gelmektedir. Bu andan itibaren tristörler tetiklenmekte, kapasitörler devreye alınmakta ve kompanzasyon işlemi başlamaktadır. Bu süreç Şekil 7'de  $V_{AK}$  ve  $I_{SCR}$ 'de de açık bir şekilde görülmektedir.

Karşılaştırıcı "Eğer hata işareti  $>0$  ise tristörleri tetikle, değilse tristörleri tetikleme" şeklinde temel bir algoritmaya sahiptir. Limitlerin bu şekilde belirlenmesi %100 kompanzasyon yapılması içindir. Hata işaretinin





Şekil 7.  $V_{AK}$ ,  $I_{SCR}$  ve hata işareti ( $V_{AC}$ ,  $I_{SCR}$  and error signal)

belirlenen limitlere yaklaşıma süresi 0.0435 s anına denk gelmektedir. Bu da bir periyotluk bir süreçtir ki ( $0.0435-0.02=0.0235$  s) TSC'nin sisteme cevap zamanı 1 periyottur ve tek dezavantajı da budur. Bu andan itibaren yük üzerindeki gerilim 378.75 kV olarak sabitlenmektedir. Hata işaretinin "0" olmamasının bir nedeni ise kapalı çevrim gerilim kontrol çalışmasında TSC, bara gerilimini  $V_{ref} \pm \Delta V/2$  aralığında regüle etmektedir [6, 20]. Ayrıca daha önce de söylendiği üzere münferit kompanzasyonda yük tek olduğu için kompanzator de sabit güçlü olup tektir. Dolayısıyla kompanzatorün yapacağı kompanzasyon da belirli limitler dahilinde kalacaktır.

### 3.2. PI Kontrollü TSR-tabanlı SVC'nin Benzetim

#### Sonuçları (Simulation Results of PI Controlled TSR-based SVC)

Bu sistemde de üç fazlı TSC'li sistemde kullanılan iki baralı sistem, hat, yük ve kontrolör parametreleri kullanılmıştır. Kısacası; sadece kompanzator tipi değiştirilmiştir. 3 fazlı kompanzasyon yapılmamış sisteme ait benzetim sonuçları Tablo 2'de verilmişti. İlk olarak 6-Darbe üretici kullanılan TSR-tabanlı SVC'li sisteme ait benzetim sonuçları Tablo 5'te verilmektedir. Daha sonra ise bu veriler ışığında elde edilen PI kontrollü TSR-tabanlı SVC'li sisteme ait benzetim sonuçları ise Tablo 6'da verilmektedir.

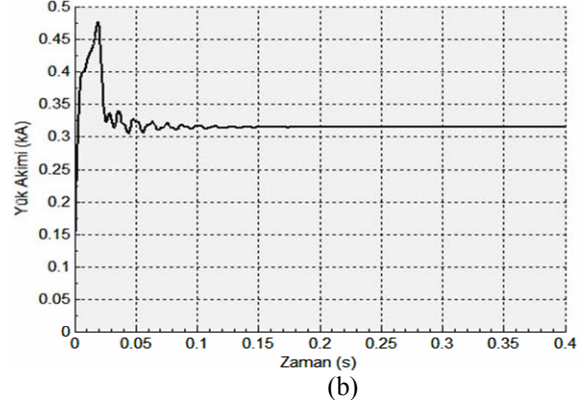
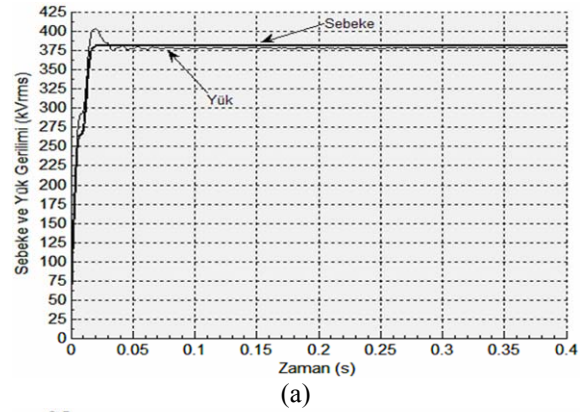
Her iki tablo birlikte incelendiği zaman TSC'li sistemde olduğu gibi PI kontrollü TSR-tabanlı SVC'li sistemde elde edilen ölçüm sonuçları da klasik metotla yapılan kompanzasyonda elde edilen sonuçlar ile hemen hemen aynı değerlere sahiptir. Buradan şu sonuçları çıkarabiliriz:

Tablo 5. Üç fazlı TSR-tabanlı SVC'li sisteme ait benzetim sonuçları (6-Darbe üreteli) (Simulation results of three-phase system with TSR-based SVC, (six-pulse generator))

$V_{yük}$ (kV)			$I_{yük}$ (kA)			$P_{yük}$ (MW)	$Q_{yük}$ (MVar)	Cos $\phi$
Vab	Vbc	Vca	Ihat a	Ihat b	Ihat c			
377.91	377.78	377.83	0.31	0.31	0.31	205.45	14.47	0.997

Sonuçların teorik olarak ta benzer çıkması gerekmektedir. Çünkü kontrolöre hata işareti üreten karşılaştırıcı çıkışı sürekli sabittir. Sabit olan bir hata herhangi bir ayarlama (tuning) gerektirmemektedir. Dolayısıyla kontrolör girişine gelen sinyali birtakım matematiksel işlemlerden geçirdikten sonra çıkış üretmektedir ve onun da çıkışı sabittir. Simetrik koşullarda çalışan yük; PI denetleyicili sistemde de aynı şekilde davranmış ve on-off olarak çalışan bir sisteme klasik metodun haricinde karmaşık bir denetleyici uygulandığı zaman sistemin buna sorunsuz bir şekilde adapte olduğu görülmüştür. 3 fazlı PI kontrollü TSR-tabanlı SVC'li sisteme ait benzetim sonuçlarının verildiği Tablo 6'daki sonuçlara ait dalga şekilleri Şekil 8 ve Şekil 9'da sırasıyla verilmiştir.

Şekil 8-(a)'da tristörlerin tetiklenmesi anında meydana gelen gerilim yükselmesi TSR yapısındaki bobinin etkisidir. Ancak kısa bir sürede



Şekil 8. Üç fazlı PI kontrollü TSR-tabanlı SVC'li sistem (a) Gerilim (b) Akım (Three-phase system with PI controlled TSR-based SVC (a) Voltage (b) Current)

söndürülmüştür. Bunun dışında akım dalga şeklindeki dalgalanmalar TSC'li yapıdaki gibi kısa sürede sürekli hale ulaşamamıştır. Bu da TSC'nin TSR-tabanlı SVC'ye göre bir üstünlüğüdür. Burada dikkat

**Tablo 6.** Üç fazlı, PI kontrollü TSR-tabanlı SVC'li sisteme ait benzetim sonuçları (Simulation results of three-phase system with PI controlled TSR-based SVC)

V <sub>yük</sub> (kV)			I <sub>yük</sub> (kA)			P <sub>yük</sub> (MW)	Q <sub>yük</sub> (MVar)	Cos φ
V <sub>ab</sub>	V <sub>bc</sub>	V <sub>ca</sub>	I <sub>hat a</sub>	I <sub>hat b</sub>	I <sub>hat c</sub>			
377.81	377.76	377.83	0.31	0.31	0.31	205.55	14.49	0.997

edilmesi gereken nokta bu söndürülme işlemlerinin herhangi bir harmonik filtreye ihtiyaç duyulmadan gerçekleşmesidir. Bu da enerji sistemleri için önemli bir avantajdır. Şekil 9-(b)'den de anlaşılacağı üzere denetleyici olarak PI denetleyicinin kullanımı sisteme klasik metoda göre ekstra bozulmalar eklememiştir. Bu da on-off kontrollü kompanzatorler için PI denetleyicinin de kullanılabilirliğini göstermektedir. Kompanzasyon başarılı bir şekilde gerçekleştirilmiş ve gerilim regülasyonu şartlar dahilinde en uygun şekilde yapılmıştır.

#### 4. SONUÇLAR (CONCLUSIONS)

Bu çalışmada; paralel tip FACTS cihazlarından olan Tristör Anahtarlama Kapasitör (TSC) ve Tristör Anahtarlama Reaktör-tabanlı Statik Var Kompanzator yapısının (TSR-tabanlı SVC) PI (Proportional-Integral) ile kontrolü incelenmiştir. Üzerinde çalışılan test sistemi; üç fazlı, iki baralı olup statik yük ve uzun iletim hattı modeline sahip münferit kompanzasyon tipidir. Elde edilen benzetim sonuçlarına göre PI kontrolörün kullanımı ile esnek bir kontrol işlemi gerçekleştirilmiş ve tristörlerin tetiklenmesi anındaki dalgalanmalar herhangi

bir filtre kullanılmadan söndürülerek sistem toplam harmonik bozulması iyileştirilmiştir. Reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu işlemi başarılı bir şekilde gerçekleşmiştir.

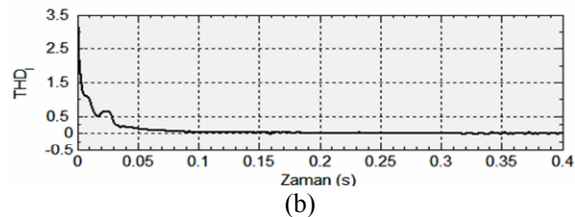
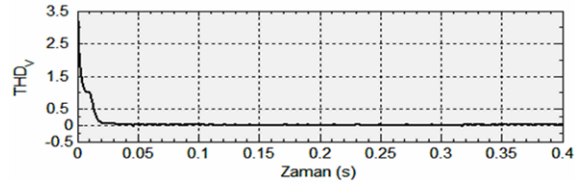
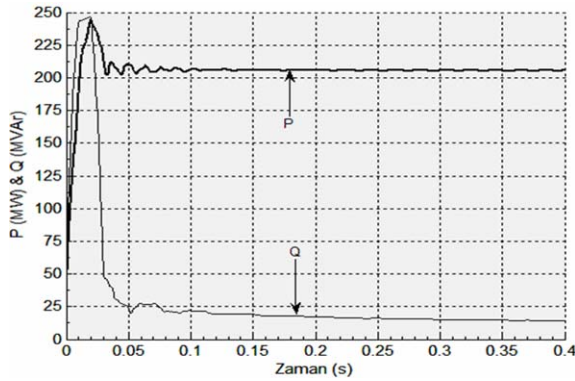
Bu çalışmada ayrıca klasik metod ile PI kontrolör karşılaştırılmıştır. Tristörlerin tetikleme devrelerinden önce kullanılan karşılaştırıcı devresinin sistem cevap hızı oldukça iyidir. Karşılaştırıcı temel algoritması oldukça basittir. Bu da tasarlanacak sistemi karmaşıklıktan uzak tutacaktır. Bunun sonucu olarak PI kontrolün sisteme başarılı bir şekilde uyarlanabileceği ortaya çıkmıştır. Anahtarlama kompanzatorler; On-Off kontrollü olduklarından dolayı herhangi bir ayar aralığı yoktur. PI gibi çıkış işaretini hassas bir ayar ile kontrol eden denetleyicilere gerek kalmadan da kompanzasyon işlemi kolaylıkla gerçekleştirilebilmektedir. Bu tür kontrolörler ayrıcalıklarını zaman içerisinde yük değişimi olan sistemlerde göstermektedir. Bütün bu bilgilerin ışığında anahtarlama kompanzatorler çok karmaşık kontrolörlere ihtiyaç duymamaktadırlar. Bu da tasarlanacak sistem için bir önemli bir avantaj teşkil etmektedir. Anahtarlama kompanzatorlerin tek dezavantajı örneğin; TSC'nin cevap süresinin 1 periyot, TSR'nin cevap süresinin yarım periyot olmasıdır. Anahtarlama kompanzatorlerin cevap sürelerinin kısaltılması üzerine birtakım çalışmalar yapılmaktadır. Ancak enerji sistemlerindeki en büyük problemlerden biri olan harmonikleri üretmediklerinden dolayı büyük bir avantaja sahiptirler.

#### TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından 104M235 no'lu TÜBİTAK KARIYER projesi çerçevesinde desteklenmiştir.

#### KAYNAKLARLAR (REFERENCES)

1. Eser H., "Kompanzasyon ve Uygulama Esasları", 1998.
2. Anderson G., "Power System Dynamics and Stability: An Introduction", September 1999.
3. Wollenberg B. F., "Transmission System Reactive Power Compensation", *IEEE Power Engineering Society*, pp. 507-508, 2002.
4. 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.
5. Hingorani N. G., Gyugyi L., "Understanding FACTS: Concepts and Technology Flexible AC Transmission Systems", IEEE Press, New York, 1999.



**Şekil 9.** Üç fazlı PI kontrollü TSR-tabanlı SVC'li sistem (a) Aktif ve reaktif güç (b) THD<sub>V</sub> ve THD<sub>I</sub> (Three-phase system with PI controlled TSR-based SVC (a) Active and reactive power (b) THD<sub>V</sub> and THD<sub>I</sub>)

6. Mathur R. M., Varma R. K., “**Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems**”, IEEE Press, USA, 2002.
7. Gelen (Kara) A., “**Tristör Anahtarlamalı Reaktör ve Kapasitör Tasarımı**”, Yüksek Lisans Tezi, N.Ü.F.B.E., Niğde, 2006 Haziran.
8. Garcia N., Medina A., “Fast Periodic Steady State Solution of Systems Containing Thyristor Switched Capacitors”, **IEEE Power Engineering Society Summer Meeting**, pp. 1127-1132, 2000.
9. Hosseini S. H., Ledwich G. F., Shannon G. F., “Voltage Regulation by Proportional Microcontrolled Switched Capacitors”, **IEEE International Symp. of Ind. Electronics (ISIE)**, Xian, China, pp. 854-855, May 1992.
10. 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 Conf.**, Vol 2. pp. 849-852, 12-14 April 1994.
11. Johnson B. K., “Simulation of TSC and TSSC”, **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, pp. 637-638, 2001.
12. Ahmed T., Ogura K., Soshin K., Hiraki E., Nakaoka M., “Small-Scale Wind Turbine Coupled Single-Phase Self-Excited Induction Generator with SVC for Isolated Renewable Energy Utilization”, **The 5th Int. Conf. on Power Electronics and Drive Systems**, Vol. 1, pp. 781-786, 17-20 November 2003.
13. Acha E., Fuente-Esquivel C. R., Ambriz-Perez H., Angeles-Camacho C., “**FACTS: Modelling and Simulation in Power Networks**”, John Wiley&Sons LTD, 2004.
14. Çetinkaya H. B., Öztürk S., Basa Arsoy A., Alboyacı B., Şengül M., Türker T., “Enerji İletim Hatlarındaki Enerji Kalitesini Düzenleyen Klasik ve Modern Kontrol Yapıları”, **Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu**, Kocaeli, Sy: 61-65, Mayıs 2005.
15. Gelen A., Yalçınöz T., “Tristör Anahtarlamalı Kapasitör’lü Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi ve Gerçekleştirilmesi”, **Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO’2006)**, Bursa, Sy: 9-14, 6-10 Aralık 2006.
16. Gelen (Kara) A., Yalcinoz T., “Simulation of TSC on Voltage Regulation for Static and Dynamic Load Models Using MATLAB”, **IEEE The 38th North American Power Symposium, (NAPS-2006)**, USA, September 17-19, 2006.
17. Endres B., Thiele G., Bonfanti İ., Testi G., “Design and Operational Testing on Thyristor Modules for The SVC Kemps Creek”, **IEEE Power Engineering Society Winter Meeting**, pp. 1321-1326, November 1989.
18. Gelen A., Yalcinoz T., “Analysis of TSR-based SVC for a Three-Phase System with Static and Dynamic Loads”, **IEEE Int. Conf. on Elect. Eng., (ICEE 2007)**, Lahore, Pakistan, pp:1-6, ISBN:1-424408938, 11-12 April 2007.
19. Özdaş M.N., Dinibütün A.T., Kuzucu A., “**Otomatik Kontrol Temelleri**”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 1998.
20. Arifoğlu U., “**Güç Sistemlerinin Bilgisayar Destekli Analizi**”, Alfa Yayınevi, İstanbul, 2002.