

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**STATİK VAR KOMPANZASYON SİSTEMİ TASARIMI
VE UYGULAMASI**

Elektrik Müh. Abdulkadir BOSTANCI

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez danışmanı : Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU

İSTANBUL, 2008

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. GİRİŞ.....	12
2. RÜZGAR ENERJİSİ ve RÜZGAR SANTRALLERİNİN ŞEBEKE ENTEGRASYONU	15
2.1 Rüzgar Enerjisi	15
2.2 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi.....	16
2.3 Rüzgar Türbinlerinin Şebeke Entegrasyonu.....	17
2.3.1 Gerilim Dalgalanmaları	18
2.3.1.1 Yavaş Gerilim Değişimleri	19
2.3.1.2 Hızlı Gerilim Değişimleri (Fliker).....	19
2.3.2 Gerilim Çökmesi.....	20
2.3.3 Reaktif Güç	20
2.3.4 Frekans.....	21
2.3.5 Harmonikler	21
3. ESNEK AC İLETİM SİSTEMLERİ (FACTS)	22
3.1 FACTS Cihazları	22
3.1.1 Statik VAR Kompanzator (SVC) Sistemi	23
3.1.2 Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) İçeren Statik VAR Kompanzatorlar	23
3.1.3 Sabit Kondansatörlü Tristör Kontrollü Reaktör (FC-TCR).....	27
3.1.4 Tristör Anahtarlamalı Kondansatör (TSC) İçeren Statik Var Kompanzatorlar.....	28
3.1.5 Tristör Anahtarlamalı Reaktör (TSR) İçeren Statik Var Kompanzatorlar.....	30
3.1.6 Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) Sistemi	30
3.1.7 Statik Senkron Seri Kompanzator (SSSC)	32
3.1.8 Tristör Kontrollü Seri Kondansatör (TCSC)	33
3.1.9 Tristör Kontrollü Faz Açılı Regülatörü (TCPAR).....	33
3.1.10 Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolörü (UPFC).....	34
4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SVC İLE BİRLİKTE KULLANILMASI.....	35
4.1 Çeşitli Rüzgar Türbini Uygulamalarında SVC’nin Kullanımı	36
4.1.1 69 kV’luk Baraya Direkt Bağlanan SVC Örneği	36

4.1.2	Sabit Hızlı Endüksiyon Generatörlü Rüzgar Türbinlerinde SVC ve STATCOM Uygulaması	37
4.2	SVC'nin Şebeke Entegrasyonunda Sağladığı Diğer Yararlar	40
4.3	SVC'nin Rüzgar Santrallerinde Kullanım Yöntemleri.....	41
4.4	Entegrasyonda SVC ile STATCOM'un Birlikte Kullanılması	41
5.	FC-TCR (SABİT KONDANSATÖRLÜ TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR) SİSTEMİ UYGULAMASI ve SONUÇLARI	44
5.1	Deney Düzeneği ve Çalışma Prensipleri.....	44
5.2	Uygulamada Kullanılan Elemanlar.....	44
5.2.1	dSPACE Kontrol Ünitesi.....	45
5.2.2	Akım-Gerilim Ölçüm ve Tetikleme Devresi	46
5.2.3	Besleme Devresi	47
5.3	Uygulama Adımları	48
5.3.1	Yüklerin Devrede ve Kompanzasyon Sisteminin Devre Dışı Olduğu Durum.....	48
5.3.2	Yüklerin ve Sabit Kondansatörün Devrede Olduğu Durum.....	50
5.3.3	Kompanzasyon Sisteminin Devrede Olduğu Durum	52
5.4	Uygulama Sonuçları	55
6.	FC-TCR (SABİT KONDANSATÖRLÜ TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR) SİSTEMİ SİMÜLASYONU VE SONUÇLARI	56
7.	SONUÇLAR.....	61
	KAYNAKLAR.....	62
	ÖZGEÇMİŞ.....	67

SİMGE LİSTESİ

α	Tristör tetikleme açısı
σ	Tristör iletim açısı
B_C	Kapasitif süseptans
B_L	Endüktif süseptans
C	Kondansatör
C_S	DC kondansatör
$HT+ HT-$	Gerilim sensörü giriş uçları
I_s	Endüktans üzerinden geçen akım
L_s	Şebeke Endüktansı
L_r	Reaktör (TCR) endüktansı
I_c	Kondansatör üzerinden geçen akım
I_r	Reaktör üzerinden geçen akım
Q	Reaktif güç
Q_C	Kapasitif reaktif güç
Q_L	Endüktif reaktif güç
V_C	Kondansatör üzerindeki gerilim
V	Gerilim kaynağının genliği
V_{dc}	DC kondansatör gerilimi

KISALTIMA LİSTESİ

AC	Alternative Current (Alternatif Akım)
ADC	Analog-Digital Converter (Analog-Dijital Dönüştürücü)
DC	Direct Current (Doğru Akım)
FACTS	Flexible Alternative Current Transmission Systems (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri)
FC-TCR	Fixed Capacitor – Thyristor Controlled Reactor (Sabit Kondansatörlü Tristör Kontrollü Reaktör)
FSIG	Fixed Speed Induction Generator (Sabit Hızlı Endüksiyon Generatörü)
GTO	Gate turn-off Thyristor (Kapı Tetiklemeli Tristör)
IEC	International Electrotechnical Commission (Uluslararası Elektroteknik Komisyonu)
IEEE	Institute of Electrical and Electronics Engineers (Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü)
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor (Kapı İzoleli Çift Kutuplu Transistör)
MW	Megawatt
PCC	Point of Common Coupling (Ortak Bağlantı Noktası)
PFC	Power Factor Corrector (Güç Faktör Düzenleyici)
RS	Rüzgar Santralleri
FC	Fixed Capacitor (Sabit Kondansatör)
SCR	Short Circuit Current Ratio (Kısa Devre Oranı)
FR	Fixed Reactor (Sabit Reaktör)
SSSC	Static Synchronous Series Compensator (Statik Senkron Seri Kompanzatör)
STATCOM	Static Compensator (Statik Kompanzatör)
SVC	Static VAR Compensator (Statik VAR Kompanzatör)
TCPAR	Thyristor Controlled Phase Angle Regulator (Tristör Kontrollü Faz Açığı Regülatörü)
TCR	Thyristor Controlled Reactor (Tristör Kontrollü Reaktör)
TCSC	Thyristor Controlled Series Capacitor (Tristör Kontrollü Seri Kondansatör)
TSC	Thyristor Switched Capacitor (Tristör Anahtarlama Kondansatör)
TSR	Thyristor Switched Reactor (Tristör Anahtarlama Reaktör)
UPFC	Unified Power Flow Controller (Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolörü)
VAr	Volt Amper Reaktif
VSC	Voltage Source Converter (Gerilim Kaynaklı Dönüştürücü)

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 2.1 Büyük ölçekli bir rüzgar çiftliği	15
Şekil 3.1 SVC devre şeması	23
Şekil 3.2 Bir fazlı TCR yapısı.	24
Şekil 3.3 TCR'ye ait akım ve gerilim dalga şekilleri	25
Şekil 3.4 Üçgen bağlı TCR ve filtreler.	26
Şekil 3.5 TCR'ye ilişkin V-I karakteristik eğrisi.	27
Şekil 3.6 Sabit kondansatörlü-tristör kontrollü reaktör (FC-TCR)	28
Şekil 3.7 Sürekli halde FC-TCR içeren kompanzasyonun gerilim-reaktif güç bağıntısı.	28
Şekil 3.8 Temel TSC devresi ve gerilim dalga şekilleri.	29
Şekil 3.9 Tek fazlı basit TSR şeması.	30
Şekil 3.10 Tek fazlı STATCOM şeması.	31
Şekil 3.11 Tek fazlı SSSC yapısı.	32
Şekil 3.12 TCSC devre şeması.	33
Şekil 3.13 TCPAR devresi	34
Şekil 4.1 Tek hat diyagramı, direkt bağlı SVC.	37
Şekil 4.2 Sabit hızlı endüksiyon generatörlü rüzgar türbini.	38
Şekil 4.3 Rüzgar çiftliğinin STATCOM ile birlikte şebeke entegrasyonu.	39
Şekil 5.1 FC-TCR deney düzeneği.	44
Şekil 5.2 Kontrol modeli	46
Şekil 5.3 Akım-gerilim ölçümü ve triyak tetikleme devre şeması.	47
Şekil 5.4 Besleme devre şeması.	48
Şekil 5.5 Devreye alınan yükler.	49
Şekil 5.6 Kompanzasyon sistemi olmadığı durumda endüktif yükün akım ve gerilim karakteristiği.	49
Şekil 5.7 Kompanzasyon sistemi devrede olmadığı durumda analog güç ölçer göstergesi.	50
Şekil 5.8 Yüklerin ve sabit kondansatörün devrede olması durumunda akım ve gerilim dalga şekilleri.	51
Şekil 5.9 Yüklerin ve sabit kondansatör devrede olduğunda analog güç ölçer göstergesi.	51
Şekil 5.10 Kompanzasyon sisteminin devrede olduğu durumdaki akım-gerilim karakteristiği.	52
Şekil 5.11 Kompanzasyon sistemi devrede olduğunda analog güç ölçer göstergesi.	53
Şekil 5.12 Kompanzasyon sisteminin devrede olduğu durumdaki reaktörün akım-gerilim dalga şekilleri.	54

Şekil 5.13 Kompanzasyon sisteminin devrede olduğu ve endüktif yük durumunda reaktörün akım-gerilim dalga şekilleri.	54
Şekil 6.1 Simülasyon devre şeması	56
Şekil 6.2 FC-TCR sistemi devrede değil iken gerilim dalga şekli	57
Şekil 6.3 FC-TCR sistemi devrede iken gerilim dalga şekli	58
Şekil 6.4 Reaktör üzerinden geçen akımın dalga şekli	59
Şekil 6.5 Sistemde reaktör tetiklemesi yok iken gerilim dalga şekli.....	60

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 3.1 TCR'nin tetikleme ve iletim açılarına bağlı olarak değişimi	26
Çizelge 5.1 dSPACE teknik özellikleri	45
Çizelge 6.1 PID katsayıları.....	57

ÖNSÖZ

Bu çalışmada FACTS cihazlarından olan SVC kullanılarak güç sistemlerinin kompanzasyonu, gerilim regülasyonunun sağlanması ve SVC'nin rüzgar santrallerinin şebeke entegrasyonunda kullanılabilirliği durumları araştırılmıştır. Reaktif güç kontrolü amaçlı bir uygulama devresi yapılmış ve sonuçları incelenmiştir. Ayrıca yapılan simülasyon çalışmasıyla da gerilim regülasyonu üzerine olan etkileri incelenmiştir.

Çalışmalarım boyunca değerli yardım ve katkılarıyla beni yönlendiren hocam Yrd. Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na, TÜBİTAK "Güç Kalitesi Milli Projesi" kapsamında vermiş olduğu desteklerden dolayı Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye ve tecrübelerinden faydalandığım Arş. Gör. Bülent VURAL'a teşekkürü bir borç bilirim.

Tezimi hazırlamamda emeği geçen arkadaşlarım Akın TAŞCIKARAOĞLU, Yavuz EREN, Sait Giray BİRİNÇ, Ela YILMAZ, Ozan ERDİNÇ, Yavuz ATEŞ, Eyüp Cem ERDOĞAN ve uygulama aşamasında da bana destek veren Ali Rıfat BOYNUEĞRİ'ye ve Dr. İsmail AKSOY'a teşekkür ederim.

Ayrıca "Projem İstanbul" kapsamında bu çalışmaya destek olan İstanbul Büyükşehir Belediyesi'ne ve yüksek lisans öğrenimim boyunca bana finansal destek sağlayan TÜBİTAK'a teşekkür ederim.

Son olarak bana her zaman destek olan aileme teşekkür ederim.

ÖZET

Günümüzde teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerjiye olan talep daha da artmıştır. Yıllardır enerji üretiminde kullanılan fosil yakıtlar artık tükenmenin eşiğine gelmiştir. Dolayısıyla sınırsız bir güce sahip yenilenebilir enerji kaynakları önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynaklarından en çok tercih edileni şüphesiz ki rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisinden insanlar yıllarca farklı amaçlar için yararlanmışlardır. Son yıllarda rüzgardan elektrik enerjisi üretmek çok yaygınlaşmakta ve rüzgar santrallerinin (RS) sayıları giderek artmaktadır. Ancak büyük rüzgar santrallerinin elektrik enerji şebekesine bağlanması konusunda bazı sorunlar meydana gelmektedir. Bunlardan en önemlisi güç sistem kararlılığını ve insan sağlığını etkileyen gerilim dalgalanmalarıdır.

Bu tez çalışmasında rüzgar santrallerinin sebep olduğu veya güç sisteminde meydana gelen gerilim dalgalanmalarından dolayı hem rüzgar santrallerinin hem de sistemden beslenen yüklerin etkilenmelerini azaltmak amaçlı bir araştırma yapılmıştır. Bu sorunların giderilmesine yönelik yapılan çalışmalarda FACTS cihazlarından olan SVC incelenmiş ve kompanzasyon amaçlı bir uygulaması yapılmıştır. Ayrıca gerilim regülasyonu üzerine etkilerini incelemek amacıyla bir de simülasyon çalışmasına yer verilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Rüzgar santralleri, FACTS, SVC.

ABSTRACT

Nowadays, energy demand have increased with the improvement of the technology. The fossil fuels that have been used for years have been almost exhausted. Hence, the sustainable renewable energy sources have drawn attentions. The most preferably source among the renewable sources is certainly wind energy. People have drawn benefit from the various aspects of wind energy for years. Producing electrical energy from the wind energy have become widespread and the number of wind farms have been increased in last years. However, there are serious problems at the connection points between grid and wind farms. One of the most important of those problems is voltage fluctuation that affects voltage stability.

In this thesis, the effects of the voltage fluctuation caused by wind farms have been investigated. In the investigations which is aimed to remove those problems, SVC that is one of the FACTS devices have been investigated and an application have been realized to compensates those effects. Moreover, a simulation has been realised to investigate the voltage regulation effect.

Key Words: Wind turbines, power quality, FACTS, SVC.

1. GİRİŞ

20. yüzyılda teknolojinin gelişmesiyle birlikte enerji ihtiyacı artmıştır. Özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonra fosil yakıtların üretiminde de hızlı bir artış gözlenmiştir. Günümüzde halen fosil yakıtlara olan yoğun talep devam etmektedir. Bundan dolayı oluşması binlerce yıl alan doğal gaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtlarının rezervlerinin çok kısa zamanda tükenecekleri tahmin edilmektedir. Ham petrolün yaklaşık 41 yıl, doğal gazın 61 yıl ve kömürün ise 204 yıl sonra biteceği öne sürülmektedir. Ayrıca bu fosil yakıtların enerji üretiminde kullanılmaları çevreye de ciddi zarar vermektedir (Quaschnig, 2005; Farret ve Simoes, 2006). Bu yakıtların karbon dioksit (CO₂) atıkları, atmosferde sera etkisine sebep olmaktadır. Doğada yaşayan canlılar açısından ozon tabakası hayati bir önem taşımaktadır ve canlı varlığının devamı için bu dengenin bozulmaması gerekmektedir. Bunun bilincinde olan ülkeler tarafından imzalanan Kyoto Protokolü ile fosil yakıtların kullanımına ilişkin sınırlamalar getirilmiştir. Bu duyarlılıkla beraber enerji ihtiyacının karşılanabilmesi için yeni alternatifler ortaya çıkmıştır. Ülkemiz de bu enerji politikasını göze alarak gelecekteki enerji üretim hedeflerini belirlemeye çalışmaktadır. Bu yeni alternatifler, doğada bulunan rüzgar, hidrojen ve güneş gibi yenilenebilir kaynaklardır. Güneş sistemi var olduğu sürece bu kaynaklar tükenmeyecektir. Ülkemizde yenilenebilir enerji potansiyeli olarak rüzgar enerjisi ilk sırada gelmektedir. Günümüzde hızla artan rüzgar türbin sayılarıyla beraber ülkemizde işletmedeki toplam rüzgar enerjisi santrallerinin kurulu gücü 249,15 MW olmuştur (T.R.E. Birliği, 2008). Avrupa'da olduğu gibi rüzgar santrallerinin Türkiye'de de hızlı bir biçimde yaygınlaşması ileriye yönelik bazı tedbirlerin alınmasını ve düzenlenmelerin yapılmasını gerektirmektedir. RS'lerin şebekeye paralel olarak çalıştırılmasıyla rüzgardan kaynaklanan etkilerin şebekeyi bozması veya yüklerden kaynaklanan nedenlerden dolayı rüzgar santrallerinin etkilenmesi bazı problemlere sebep olmaktadır. Bunların başında gerilim dalgalanmaları ve gerilim çökmesi olayları gelir. Dünyada olduğu gibi ülkemizde de bu sorunlar üzerine çalışılmaktadır. Yapılan bu tez çalışmasında da bu sorunlara değinilmiş ve bunlara çözüm olması açısından esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) cihazları üzerine çalışmalar yapılmıştır.

Bu tez çalışmasında FACTS cihazlarından olan Statik Var Kompanzatör (SVC) sisteminin bu problemlere karşı etkileri incelenmiştir. Bu incelemeleri gerçekleştirmek için MATLAB® Simulink®, SimPowerSystems® araç kutuları kullanılarak simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Ayrıca bu simülasyon çalışmalarının uygulamaya geçmesi için bir ön çalışma olarak Sabit Kondansatörlü Tristör Kontrollü Reaktör (FC-TCR) yapısı kullanılan Statik VAR Kompanzatör (SVC) uygulaması yapılmıştır. Uygulama çalışmasında değişik yük

koşullarında sistem kompanzasyonu yapılmış ve TCR'nin etkisi incelenmiştir.

SVC'ler günümüzde birçok uygulamada kullanılmaktadır. Örneğin güç sistemlerinde kompanzasyon ve gerilim regülasyonu SVC'nin kullanılmasında asıl amaçtır. SVC'lerin uygulaması diğer FACTS sistemlerine göre daha basit ve masrafsız olduğu için yoğun ilgi gören bir uygulamadır. Daha önceki uygulamalar göz önüne alındığında bu FACTS cihazlarının farklı alanlara doğru kaydığı bir gerçektir. Çünkü gün geçtikçe enerji üretiminde çeşitlilik artmaktadır.

Yukarıda da belirtildiği gibi yenilenebilir enerji kaynakları son yıllarda çok büyük bir önem kazanmıştır. Yenilenebilir enerji kaynakları içerisinde rüzgar santralleri, ekonomik ve çevre dostu olması ve rüzgar potansiyelimizin yüksek olması açısından ön plana çıkmaktadır. Şu an ülkemizde lisans alımı için başvurusu yapılan toplam rüzgar gücünün 5000 MW'ı geçtiği de düşünülürse bu konunun önemi daha iyi anlaşılmaktadır. Dolayısıyla gelecekte bu santrallerden elde edilecek enerjinin, üretilen toplam enerji miktarında önemli bir paya sahip olacağı bir gerçektir. Ancak bu alternatif kaynakların yaygın kullanımı, rüzgar santrallerinin bağlandığı şebekede ve dolayısıyla aynı şebekeden yararlanan tüketicilerde elektrik enerji kalitesi problemleri (gerilimdeki dalgalanmalar, aydınlatma elemanlarındaki kırışımlar, ...) meydana getirmektedir. Rüzgar santrallerinin özellikle zayıf dağıtım hatlarına bağlanması ile oluşacak elektrik enerji kalitesi ya da gerilim kalitesi problemlerine çareler aranmaktadır. Bu sorunların giderilmesi için yeni yöntemler denenmektedir. Bu yöntemlerin başında da FACTS cihazları gelmektedir. Tabii ki bu cihazlardan en bilineni ve uygulama alanı en yaygın olan ise SVC'lerdir. Yapılan çalışmalarda SVC'lerin güç sistemi üzerinde birçok olumlu etkisinin olduğu görülmektedir. SVC, reaktör ve kondansatör anahtarlama sistemleriyle bağlı olduğu sistemin reaktif güç kontrolünü sağlayan en iyi ve en ucuz yöntemlerden biridir (Arnold, 2001).

Bu tez çalışmasında da SVC'lerin çalışma prensipleri gerek uygulama gerekse simülasyon ortamında incelenerek rüzgar santrallerinde nasıl kullanılır, nasıl tepki vermesi beklenir; bu konulara yönelik çalışmalara alt yapı oluşturulmuştur.

Tezin 2. bölümünde rüzgar enerjisinin kullanımı hakkında bilgiler verilmiş ve rüzgar santrallerinin şebeke entegrasyonundan bahsedilmiştir. 3. bölümde genel olarak FACTS cihazlarının yapılarından ve uygulama alanlarından bahsedilmiştir ve 4. bölümde SVC'lerin rüzgar santrallerinde kullanılmasına ilişkin bilgilere yer verilmiştir. Çalışmanın 5. bölümde ise FC-TCR yapısı kullanılarak yapılan kompanzatör uygulamasına yer verilmiştir. Son olarak

MATLAB&Simulink elemanları kullanılarak yapılan simülasyon çalışmaları 6. bölümde anlatılmış ve bu çalışmadan elde edilen sonuçlar 7. bölümde verilmiştir.

2. RÜZGAR ENERJİSİ ve RÜZGAR SANTRALLERİNİN ŞEBEKE ENTEGRASYONU

Rüzgar enerjisi yıllarca çok farklı amaçlar için kullanılmıştır. Ancak son yıllarda rüzgar enerjisinden elektrik elde edilmesi daha çok ön plana çıkmaktadır. Rüzgar enerjisi değişken yapısı nedeniyle incelenmesi gereken bir konu olmuştur.

2.1 Rüzgar Enerjisi

Rüzgar enerjisi güneş enerjisinin dolaylı bir şeklidir. Güneş ışınlarının etkisi ile dünya üzerinde sıcaklık farklılıkları oluşur. Bu farklılık rüzgarın oluşmasına neden olur. Rüzgar, güneş ışınlarından daha büyük güç yoğunluğuna ulaşabilir. Bir fırtına anında bu yoğunluk 25 kW/m²'ye ulaşabilir.

Rüzgar gücünün tarihi, yüzyıllar öncesine dayanır. Rüzgar gücü yaklaşık 3000 yıl önce ilk olarak sulama amaçlı kullanılmıştır (Quaschnig, 2005). Elektrik enerjisi üretmek için dünyadaki ilk rüzgar türbini Poul La Cour adındaki bir Danimarkalı tarafından 1891 yılında yapılmıştır. La Cour rüzgar tribünlerinden elde ettiği enerjiyi suyun elektrolizinden hidrojen elde etmek için kullanmıştır.



Şekil 2.1 Büyük ölçekli bir rüzgar çiftliği
(http://www.mypersonallender.com/images/wind_farm.jpg)

Amerika Birleşik Devletler’inde ilk rüzgar elektrik sistemleri 1890’ların sonlarında kurulmuştur. 1930 ve 1940 yıllarda binlerce küçük kapasiteli rüzgar elektrik sistemleri kırsal alanlarda kullanılmış, fakat şebekeye bağlanmak için yeterli güce sahip olamamışlardır. 1941 yılında en büyük rüzgar güç sistemi, 1250 kW’lık enerji üretimiyle Vermont’da kurulmuştur (Masters, 2004). Rüzgara olan ilgi 1970’lerde meydana gelen petrol krizi ile yeniden ortaya çıkmıştır. Eski rüzgar güç sistemleri yerine daha modern rüzgar enerji sistemleri elektrik üretmeye başlamıştır. Özellikle rüzgar enerjisine olan ilginin artmasıyla birlikte sonraki on yıl içinde binlerce yeni rüzgar türbini kurulmuştur. 1990’larda dünya genelinde rüzgar enerjisi kurulumu hızlı bir şekilde gelişmeye başlamıştır. Rüzgar türbin teknolojileri Danimarka, Almanya ve İspanya’da da hızlı bir biçimde gelişmeye devam etmektedir. 1995’ten sonra dünya genelindeki rüzgar enerjisi kapasitesi, yıllık yaklaşık olarak %25 oranında artmıştır. Yalnızca ABD’de son 5 yılda rüzgar enerjisi üretimi yıllık yaklaşık olarak %24 artmıştır (Bird vd., 2005). Avrupa’da da rüzgardaki gelişme ile Kyoto Protokolü çerçevesinde belirlenen hedefe 2010’dan önce ulaşılması beklenmektedir (Jader-Waldau ve Ossenbrink, 2004).

Dünyada rüzgar enerjisindeki en büyük paya Almanya sahiptir. Bunu İspanya, Amerika Birleşik Devletleri, Danimarka ve Hindistan izlemektedir. Ülkemizde de son zamanlarda rüzgar enerjisine olan ilgi artmış ve 2003 yılından sonra artış hızı ivme kazanmıştır.

2.2 Türkiye’de Rüzgar Enerjisi

Dünyada rüzgar enerjisinden, elektrik enerjisi elde etmek amacıyla 1891 yılından beri yararlanılmasına rağmen, ülkemizde henüz son 10 yıldır ön plana çıkmıştır. Özellikle son yıllarda rüzgar enerjisi konusunda verilen teşviklerle rüzgar enerjisine olan ilgi daha da artmıştır. Türkiye’de şu an işletmede olan rüzgar santrallerinin toplam kapasitesi 249,15 MW’tır. 2008 yılı itibariyle inşa halindeki rüzgar santrallerinin toplam kapasitesi 198 MW ve 2010 yılı sonrasına kadar bitirilmesi hedeflenen sözleşmesi imzalanmış rüzgar enerjisi projelerinin toplam kapasitesi ise 1068,80 MW’tır (T.R.E Birliği, 2008). Bu da göstermektedir ki ülkemizdeki rüzgar enerjisinin artışı özellikle son yıllarda çok hızlı bir şekilde gelişmektedir. Türkiye’de kurulmakta olan rüzgar santrallerinin, şebeke sistemine bağlanmaları belirli kısıtlamalar dahilinde olmaktadır. Çünkü özellikle zayıf şebekelerde bu rüzgar santrallerinin güç kalitesi açısından belli sıkıntıları da beraberinde getireceğinden korkulmaktadır.

Türkiye’de şu an için belirli bir bölgede kurulacak rüzgar santrallerinin toplam gücünün, bölgedeki şebekenin kısa devre gücünün % 5’ini geçmemesi gerekmektedir (Elektrik İletim

Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği, 2004). Böylece rüzgar türbinlerinin şebeke üzerindeki olumsuz etkilerinin sınırlandırılabilmesi amaçlanmaktadır.

2.3 Rüzgar Türbinlerinin Şebeke Entegrasyonu

Rüzgar türbinleri şebekeye bağlı ya da şebekeden bağımsız bir biçimde çalıştırılabilirler. Şebekeye bağlı olan rüzgar santralleri, gerekli önlemler alınmazsa güç sistemi üzerinde birtakım sorunlara neden olabilirler. Bunlar güç sisteminin işletme maliyetinin artması, güç kalitesi problemleri ve güç dengesizlikleri gibi problemler olabilir.

Rüzgar yeterli miktarda estiği sürece rüzgar türbinleri elektrik üretir ve çıkış gücü rüzgar hızına bağlı olarak değişir. Rüzgar hızının bu değişiminden dolayı, rüzgardan elde edilen gücün, şebekenin güç kalitesi üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Rüzgar türbinlerinin yerleşimi ve kesintili olması, bağlı olduğu barada sürekli gerilim değişimleri, gerilim çökmesi, frekans değişimleri ve düşük güç faktörü gibi güç kalitesi problemlerine neden olabilmektedir.

Rüzgar türbinleri genellikle endüktif makinelerdir. Bunlar sistemden reaktif güç çekerler ve düşük güç faktörü üretirler. Eğer rüzgar türbini sistemden çok fazla reaktif güç çekiyorsa, sistem dengesiz hale gelebilir. Düşük güç kalitesi, son kullanıcının cihazlarını verimli kullanmasını etkileyebilir. Ayrıca insan sağlığını etkileyen aydınlatma elemanlarında fliker etkisine neden olurlar veya sistemin dengesini bozabilir ve kullanıcının enerjisinin kesilmesine yol açabilirler.

Rüzgar gücünden kaynaklanan güç kalitesi problemlerinin en iyi çözümü rüzgar türbinlerinin şebekeye bağlandığı noktada yapılan çalışmalardır (Kennedy, 2004). Geçmişteki uygulamalarda gerilimi sabit tutmak ve güç faktörünü sağlamak için anahtarlamalı kondansatörler kullanılmaktaydı. Fakat anahtarlamalı kondansatörler sabit değerli reaktif güç ürettikleri için rüzgar türbinin dişli kutusuna baskı yapmakta ve bakım maliyetlerini arttırmaktaydılar.

Yeni rüzgar generatörlerinde kullanılan güç elektroniği elemanları ve kanat açısı kontrollü türbinler, rüzgar türbinlerinin farklı rüzgar hızlarında enerji üretmesine izin verir (Kanellos ve Hatziargyriou, 2002). Ayrıca güç elektroniği elemanları güç faktörünü bire yakın tutarken türbin çıkış gerilimini de düzenler. Türbindeki güç elektroniği elemanları çıkış gerilimi ve güç faktörünün kontrolü için gerilimi ve rotor akımlarının faz açılarını kontrol eder. Ayrıca sadece rüzgar türbinlerinden kaynaklanan değil, sisteme bağlı yüklerden kaynaklanan

dalgalanmalarda söz konusudur.

Mevcut alternatif akım (AC) iletim sistemlerinin aşırı yüklenmesiyle gerilim dalgalanması ve gerilim kararlılığı problemleri önemli bir konu haline gelmiştir. Ancak özellikle büyük güçlü rüzgar santrallerinin zayıf şebekelere bağlanmasında bu problemler daha ciddi boyutlarda olabilmektedir. Bu problemlere çözüm olması açısından esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS) kullanılmaktadır (Kara ve Yalcinoz, 2005). Gerilimin regülasyonunda SVC ya da STATCOM sistemlerinin kullanımlarıyla ilgili çalışmalar devam etmektedir. Büyük güçlü rüzgar türbinlerinin zayıf şebekelere bağlanması durumunda özellikle STATCOM' un etkisi Chong ve Alex (2006) tarafından incelenmiştir.

Yukarıda belirtilen rüzgar santrallerinin neden olduğu veya maruz kaldığı güç kalitesi problemleri genelde gerilim düzensizliği üzerinedir. Bu düzensizliği gidermek için önerilen FACTS cihazları en pratik çözüm yolunu sunar. RS'lerin şebekeye bağlandığı noktada kullanılan bu cihazlar, sistemin gerilim regülasyonunu sistemle reaktif güç alış-verişi yaparak sağlarlar. Bu yöntemlerden ucuz ve pratik olanından başlamak istenildiğinde SVC ile başlanması uygun bir çözüm olarak karşımıza çıkmaktadır. Daha önceleri bir çeşit kompanzasyon yöntemi olarak geliştirilen SVC'ler artık gerilim kalitesini artırmak amaçlı da kullanılmaktadır. Bu cihazların güç sistemlerinde gerilim kararlılığını sağladığı bilinmektedir. Bununla ilgili bir örnek 4. bölümde verilecektir.

Güç sistemlerinde kullanılan SVC'lerin gerilim regülasyonu üzerine olumlu etkiler göstermesi çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlamıştır. Bu yönüyle gerilim regülasyonunun çok büyük bir problem olduğu rüzgar enerji santrallerinde de SVC'ler kullanılmaya başlanmıştır. Bunlar sisteme en iyi cevabı bağlandığı noktada verebilmeleri açısından, rüzgar santrallerinin şebekeye bağlandığı noktada devreye alınırlar ve güç sistemi için birçok avantaj sunarlar.

Günümüzde kullanılan FACTS cihazlarının özellikleri ve çalışma prensiplerine bundan sonraki bölümlerde ayrıntılı bir şekilde yer verilmiş ve özellikle SVC'lerin rüzgar santrallerinde kullanılması hakkında daha fazla ayrıntıya yer verilmiştir. Yukarıda belirtilen güç kalitesi problemlerinden gerilim regülasyonu üzerine etkisi incelenmiştir. Rüzgar santrallerinin sebep olduğu bu problemleri alt başlıklar halinde açıklamak istersek;

2.3.1 Gerilim Dalgalanmaları

Rüzgar türbinlerinde gerilim kalitesini etkileyen en önemli sorun üretim değerlerinin sürekli

olarak değişmesidir. Türbinler sisteme aktif güç verdikleri için sistemdeki gerilim seviyesini arttırmaları ve aynı zamanda sistemden reaktif güç çekmeleri nedeniyle de gerilim seviyesini düşürürler. Bu nedenle bazı durumlarda türbinlerin çıkış gerilim değerlerine bağlı olarak tamamen şebekeden ayrılmaları gerekebilir. Bu durumda türbinde maksimum elektrik üretimi nedeniyle oluşan yüksek gerilim değerlerinde gerilim seviyesi düşürülebilir.

Gerilim dalgalanmaları da kendi aralarında hızlı ve yavaş gerilim değişimleri olmak üzere ikiye ayrılıp incelenebilir.

2.3.1.1 Yavaş Gerilim Değişimleri

İletkenlerin empedansından dolayı gerilim seviyesi, rüzgar gücü üretimine ve beslenen yüke bağlı olarak hat boyunca değişir. EN 50160 standardına göre 10 dakikalık ortalamalarla tüketici noktalarında ölçülen yavaş gerilim değişimleri, bir haftanın % 95'i boyunca nominal gerilimin \pm % 10'u içerisinde kalmalıdır (Tande ve Uhlen, 2001).

Rüzgar gücünün şebeke içindeki oranının artması, maksimum gerilim değerini arttırmaktadır. Bu sorun rüzgar türbinlerinde güç faktörü ayarı ile çözülebilir. Ancak güç faktörünün düşürülmesi, şebekede kayıpların artmasına neden olmaktadır. Bu nedenle güç faktörü regülasyonu dikkatli kullanılmalıdır (Tande, 2002).

2.3.1.2 Hızlı Gerilim Değişimleri (Fliker)

Hızlı gerilim değişimleri genellikle yükteki veya üretilen güç değerindeki hızlı değişimlerden kaynaklanırlar. 0,05 Hz ile 35 Hz frekans aralığındaki gerilim dalgalanmalarının neden olduğu ışık kaynaklarındaki aydınlık şiddetleri değişimi, gerilim flikeri olarak adlandırılır. Gerilim flikerinin güç elektroniği elemanlarının hatalı çalışmasına veya arızalanmasına neden olma gibi etkileri vardır. Ancak en önemli etkisi insan sağlığı üzerinedir (Caldara vd., 1998; Gallo vd., 2008).

Fliker şiddeti 10 dakikalık bir periyot içinde ölçülen bir kısa dönem değeri (P_{st}) veya 2 saatlik bir ölçüm sonucunda elde edilen kısa dönem değerlerinden hesaplanan bir uzun dönem değeri (P_{lt}) ile verilebilir. EN 50160'a göre uzun dönem fliker şiddeti bir haftanın % 95'i boyunca 1'e eşit veya 1'den küçük olmalıdır.

Rüzgar türbinleri, anahtarlama işlemleri ve sürekli çalışması esnasındaki aktif ve/veya reaktif güçteki dalgalanmalar nedeniyle flikere neden olurlar. Kullanılan generatörler açısından fliker etkisi incelenecek olursa, endüksiyon generatörüne sahip olan türbinler, şebekeden çektikleri

değişken reaktif güç nedeniyle fliker üretirler. Bu generatörler daha çok sabit hızlı türbinlerde kullanıldığından, bu türbinlerin fliker açısından şebekeye olumsuz etkileri, değişken hızlı türbinlerden daha fazladır (Tande, 1998).

Senkron generatörlü değişken hızlı makineler ise fliker üretmezler. Ancak günümüzde çoğu değişken hızlı türbin, çift beslemeli endüksiyon generatörlerine sahiptir ve belli bir oranda fliker emisyonu görülebilir. Bu türbinlerde de reaktif güç kontrol edilerek, hızlı gerilim değişimlerinin şebeke üzerindeki etkileri sınırlandırılabilir.

2.3.2 Gerilim Çökmesi

Gerilim çökmesi, nominal gerilimin ani bir şekilde değerinin % 10'u ile % 90'ı arasında bir değere düşmesi ve kısa bir süre sonra geriliminin düzelmeye başlamasıdır. Nominal gerilimin % 10'u ile % 15'i arasındaki düşmelerin nedeni genellikle yüklerin anahtarlanmasıdır. Daha büyük düşmeler ise arızalar sırasında oluşmaktadır (Tande, 2003).

Gerilim çökmeleri, rüzgar santrallerinin şebeke entegrasyonundaki en önemli sorundur. Geçici hataların etkileri, çok büyük coğrafi alanlara yayılabilir ve bu hata şartları altında rüzgar çiftliklerinin bağlantısının kesilmesi ile de şebeke ve kaynakların güvenliği açısından ciddi bir tehlike oluşabilir. Bu yüzden günümüzde çoğu şebeke kodlarında, rüzgar türbinlerinin arıza üstü çalışma (fault ride through) yeteneğine sahip olması zorunlu hale getirilmiştir (Akhmatov ve Eriksen, 2007).

2.3.3 Reaktif Güç

Rüzgar türbinlerinde sağlanan reaktif güç talep edilenden daha az ise sistem geriliminde bir düşme, daha fazla ise bir artma meydana gelir. Generatörler şebeke tarafından talep edilen reaktif gücü sağlarken, ürettikleri aktif güç düşük ise güç faktörü düşebilir. Ancak generatörler nominal şartlarda çalışırken güç faktörü 1'den uzaklaşırsa aşırı akımlar oluşur. Bu nedenle rüzgar türbinlerinin güvenli bir şekilde sağlayabileceği aktif ve reaktif güç değerleri, genellikle bir sınırlayıcı eğri ile belirlenir (De Alegria vd., 2006).

Endüksiyon generatörleri şebekeden reaktif güç çekerler ve düşük güç faktörü üretirler. Ayrıca çekilen reaktif gücün çok fazla artmasıyla sistem kararsız hale gelebilir. Rüzgar türbinlerinde endüksiyon generatörleri kullanılması durumunda generatörün reaktif güç ihtiyacı şebekeden çekilir veya bu ihtiyaç rüzgar türbinine yerleştirilecek kondansatör gruplarından karşılanır. Rüzgar türbinlerinin şebekeden çekecekleri reaktif gücün azaltılması,

gerilim seviyesini yükseltecektir. Bu sayede rüzgar türbinlerinin şebeke gerilimi üzerindeki etkileri azalacaktır.

2.3.4 Frekans

Bir generatörün çıkış gücünün aktif bileşeni, miline uygulanan mekanik giriş gücü ile belirlenir. Sağlanan güç ve talep edilen güç arasındaki fark, sistem frekansında değişimlere yol açar. Üretimdeki fazlalık frekansta artışa, eksiklik ise düşüğe neden olur.

EN 50160 standardına göre temel frekansın 10 saniyelik ortalama değeri bir yılın % 99,5'i boyunca 49,5 – 50,5 Hz arasında ve zamanın % 100'ü boyunca 47 – 52 Hz arasında olmalıdır. Bu limitler paralel işletmedeki enterkonnekte sistemler için geçerlidir. Rüzgar türbinlerinde frekans 50 Hz'i aştığında, türbinin aktif güç üretimi ancak nominal değerinin altında bir değerde olacak şekilde sürdürülebilir. Ayrıca şebeke kodlarına göre de frekans nominal değerini aştığında santraller, belli bir oranda çıkış güçlerini düşürmelidir.

2.3.5 Harmonikler

EN 50160 standardına göre her bir tekil harmonik distorsiyon değerinin 10 dakikalık ortalama efektif değeri, bir haftanın % 95'i boyunca belirli sınırlar içerisinde olmalıdır. Harmonik gerilim değerlerinin kabul edilebilir sınırlar içinde kalmasını sağlamak için her bir harmonik akım kaynağının sınırlı bir katkı yapmasına izin verilmektedir. Kabul edilebilir harmonik gerilim sınırları standartlarda 40. harmoniğe kadar tanımlanmıştır. 40. harmonikten sonrası genelde küçük değerli olduğundan ve bu değerlerin ölçümü zor olduğundan herhangi bir sınır tanımlanmamıştır.

Bir güç elektroniği konverteri olmaksızın şebekeye direkt bağlanan endüksiyon generatörlü bir rüzgar türbini, gerilimin dalga şeklini ekilemez. Bu nedenle sabit hızlı rüzgar türbinli sistemler için harmonikler dikkate alınmazlar. Değişken hızlı türbinlerde ise tristör kullanan konverterler, standartlarda sınırları verilen harmonik gerilimlerini etkileyebilecek harmonik akımları üretirler. Ancak günümüzde türbinlerde kullanılan konverterler genellikle transistör bazlı olduklarından 3 kHz'in üzerindeki anahtarlama frekanslarında çalışırlar. Bu nedenle yeni rüzgar türbinlerinin harmonik açısından gerilim dalga şekli üzerindeki etkileri genelde oldukça azdır.

3. ESNEK AC İLETİM SİSTEMLERİ (FACTS)

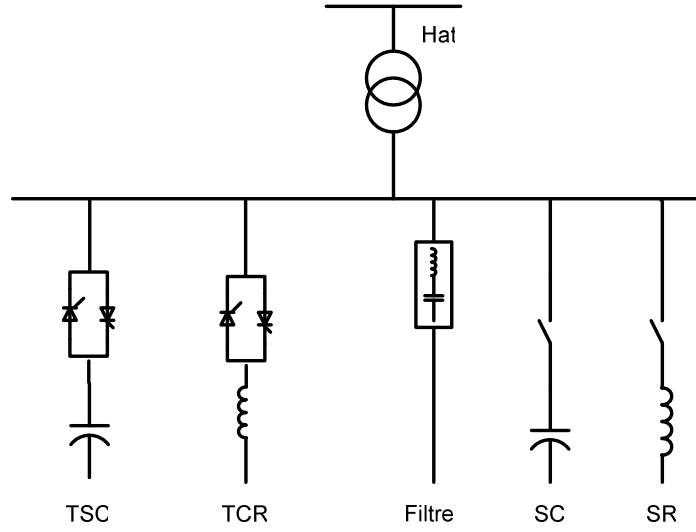
Teknolojinin ilerlemesiyle birlikte enerji alanında ciddi bir şekilde gelişme meydana gelmiştir ve her geçen gün karmaşıklaşan bir elektrik sistemi oluşmaktadır. Elektrik sistemlerinin üretim, iletim ve dağıtım kapasitelerinin artırılması, reaktif güç akışının sebep olduğu kayıpların minimuma indirilmesi ve son kullanıcıya sunulan elektrik enerjisinin daha kaliteli hale getirilmesi için uygun ve hızlı bir reaktif güç kompanzasyonun gün geçtikçe daha yaygın bir şekilde kullanımını gerektirmektedir. Bunun yanında yüklenmelerin artması, gerilim kararlılığı ve gerilim çökmesi problemlerini de beraberinde getirmektedir. Bu kompanzasyon sistemleri üzerinde yapılan çalışmalarla özellikle son yıllarda yarı iletken teknolojili güç kompanzasyon sistemleri oldukça geliştirilmiştir. Daha önceleri bu sistemler kompanzasyon amacıyla kullanılıyorlardı, ancak bu sistemlerin geliştirilmesiyle farklı sorunlara da çözüm yöntemleri olmuşlardır. Bunlardan en önemlisi gerilim kararsızlığı problemlerine karşı iyi cevap vermeleridir ve bu alanda çok yaygın bir şekilde kullanılmaktadırlar. Bu cihazlarla bağlandıkları sistem arasında yapılan reaktif güç alışverişi ile gerilim regülasyonu sağlanmaya çalışılır. Uygulamalarda alışlagelmiş eski yöntemler hızlı bir biçimde değişen yüklere hızla cevap verememektedir. Bunun yerine modern kompanzasyon sistemi olarak adlandırılan FACTS cihazları, çok kısa zamanda cevap verme ve dengesiz sistemlerde de her fazı ayrı ayrı denetleme yeteneğine sahip olduklarından dolayı tercih edilirler (TMMOB, 1999; Enrique vd., 2004).

3.1 FACTS Cihazları

FACTS cihazları ilk olarak yüksek güçlü tristörler kullanılarak statik VAr kompanzator (SVC) ve tristör kontrollü seri kondansatör (TCSC) olarak birçok uygulamada kullanılmıştır (Hingorani ve Gyugyi, 1999). SVC, tristör temeline dayanan bir sistemdir ve çok çeşitli uygulamaları vardır. Bu tez çalışmasında SVC'nin kullanımına yönelik simülasyon ve deneysel çalışmalar yapıldığından bu kısımlara bundan sonraki bölümlerde çok daha ayrıntılı olarak yer verilmiştir. Güç elektroniği elemanlarının gelişmesi FACTS cihazlarının gelişmesini de sağlamıştır. Daha sonraları invertör temeline dayanan STATCOM ve statik senkron seri kompanzator (SSSC) sistemleri geliştirilmiştir. Bu cihazlar güç sistemlerindeki geçici hal kararlılığının artırılması ve gerilim regülasyonunun sağlanması için kullanılmaktadır (Gyugyi, 1993; Mori, 1993).

3.1.1 Statik VAR Kompanzatör (SVC) Sistemi

Statik VAR kompanzatörler temel olarak tristör kontrollü elemanları kullanır. Bir statik VAR sisteminin tamamını veya bir kısmını meydana getiren reaktif güç kontrol elemanlarının temel tipleri: tristör kontrollü reaktör (TCR), tristör anahtarlama reaktör (TSR) ve tristör anahtarlama kondansatör (TSC) olarak ele alınabilir. (Hingorani ve Gyugyi, 1999; Uzunoglu ve Kocatepe, 2001; Woodford, 2003; Kodsı, v.d., 2006). SVC, maksimum kapasitif ve endüktif güç sınırlarına ve bu sınırlar arasında her değeri sağlama yeteneğine sahiptir. Genel itibariyle SVC devre şeması Şekil 3.1’de gösterilmiştir.

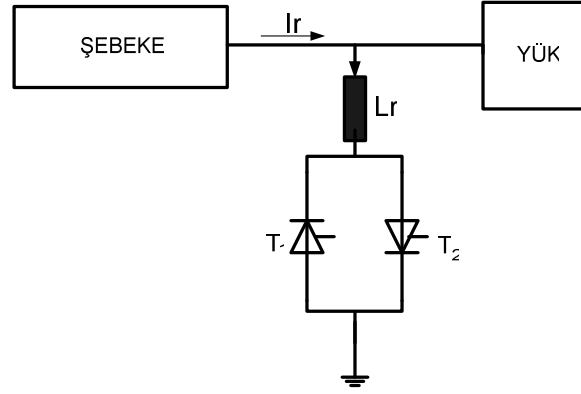


Şekil 3.1 SVC devre şeması

Şekil 3.1’de SVC’nin temel tiplerine yer verilmiştir (TSC, TCR). Ayrıca bunlarla birlikte kullanılan sabit kondansatör (SC), sabit reaktör (SR) ve harmonikleri elemine etmek için kullanılan filtre yapıları da gösterilmiştir.

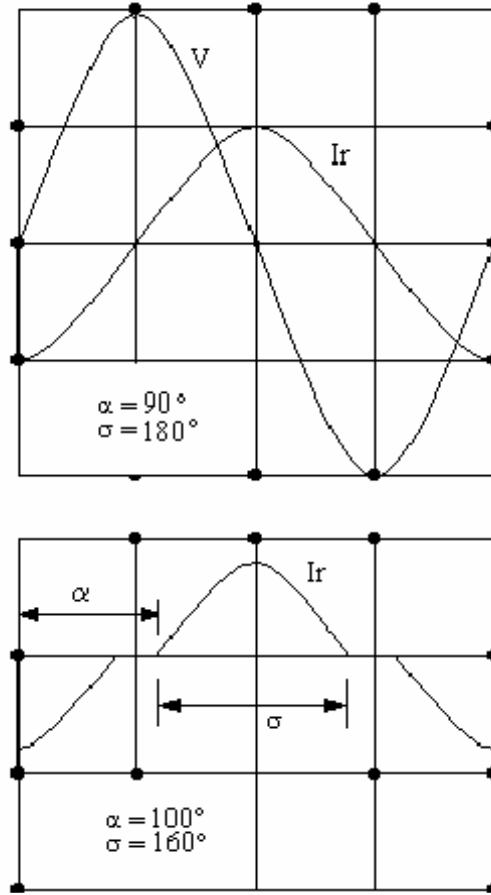
3.1.2 Tristör Kontrollü Reaktör (TCR) İçeren Statik VAR Kompanzatörler

Güç sistemlerinde kullanımı hızlı bir biçimde artan tristör kontrollü reaktör içeren statik VAR kompanzatörler, sürekli ve hızlı bir reaktif güç ve gerilim kontrolü sağlama kabiliyetleri sebebiyle sistemin performansını ve kalitesini pek çok yönden geliştirebilmektedirler. Bunlar; güç frekansında geçici aşırı gerilimlerin kontrolü, gerilim çökmesinin önlenmesi, geçici kararlılığın artırılması, iletim ve dağıtım sistemlerinde dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesi ve kesintili sürelerde çalışan yüklerin sebep olduğu gerilim salınımlarının önlenmesi olarak sıralanabilir (Uzunoglu ve Kocatepe, 2001).



Şekil 3.2 Bir fazlı TCR yapısı.

İletim sistemlerinde kullanılan tristör kontrollü reaktör, kapalı çevrim gerilim regülatörü ve tristör tetiklemeli kontrol sistemi içerir (Hingorani ve Gyugyi, 1999). Genel bir TCR yapısı Şekil 3.2’de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi TCR, paralel bağlı iki tristör ve bunlara seri bağlı bir reaktörden oluşur. Bu iki ters paralel tristör simetrik bir biçimde kapılanmıştır. Buradaki tristörler zamana bağlı olarak akımın temel bileşenini kontrol eder (Bohmann ve Lasseter, 1986). Tristörlerin her biri, uçlarındaki gerilimin sıfır geçiş anından itibaren ölçülen tetikleme açısına (α) ya da iletim açısına (σ) bağlı olarak dönüşümlü olarak yarım periyotluk sürelerle iletimde olurlar. Şekil 3.3’te görüldüğü gibi tetikleme açısının 90° ile 180° değerleri arasında kısmi iletim söz konusudur. Tetikleme açılarının 0° ile 90° değerleri arasında olması durumunda, doğru akım bileşenli asimetrik akımlar meydana geleceğinden, bu aralıklarda işletimine pratikte müsaade edilmez (Miller, 1982). Tam iletim 90 derece tetikleme açısında elde edilir. Bu durumda akım, reaktif karakterde ve sinüsoidaldir. Kısmi iletimler ise 90 ile 180 derece arasındaki açılarda elde edilir. Tetikleme açısının artırılmasının etkisi akımın temel bileşeninin düşürülmesidir. Bu değer, reaktörün reaktif gücünü ve akımının düşmesini sağlar dolayısıyla reaktörün endüktans değerinde de bir artış meydana gelir. Akımın temel bileşeniyle ilgili olduğu kadarıyla tristör kontrollü reaktör kontrol edilebilir bir süseptanstır (Hingorani ve Gyugyi, 1999; Uzunoglu ve Kocatepe, 2001).



Şekil 3.3 TCR'ye ait akım ve gerilim dalga şekilleri

Şekil 3.3'te görülen tristörlerin α tetikleme açıları ya da σ iletim açıları uygun seçilmek şartıyla, reaktör akımının efektif değeri, istenilen sınırlar içinde ayarlanabilir. Akım dalga şeklinin Fourier analizi sonucu temel bileşen reaktör akımı,

$$I_r^{(1)}(\sigma) = \frac{V}{X_r} \left[1 - \frac{2\pi - \sigma}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin(2\pi - \sigma) \right] \quad (3.1)$$

olarak elde edilir (Gyugyi, 1988). Burada, X_r temel frekanstaki reaktörün reaktansdır. Tetikleme açısı α 'nın artması (σ iletim açısının azalması) sonucu, temel bileşen akımının ($I_r^{(1)}$) değeri düşecektir. Tetikleme açısıyla iletim açısı arasında,

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (3.2)$$

eşitliği vardır. Akımın temel frekans bileşeni dikkate alındığında, tristör kontrollü reaktör, kontrol edilebilir bir süseptans elemanı olarak algılanabilir. Temel frekansta, iletim açısı σ 'nın fonksiyonu olarak efektif süseptans,

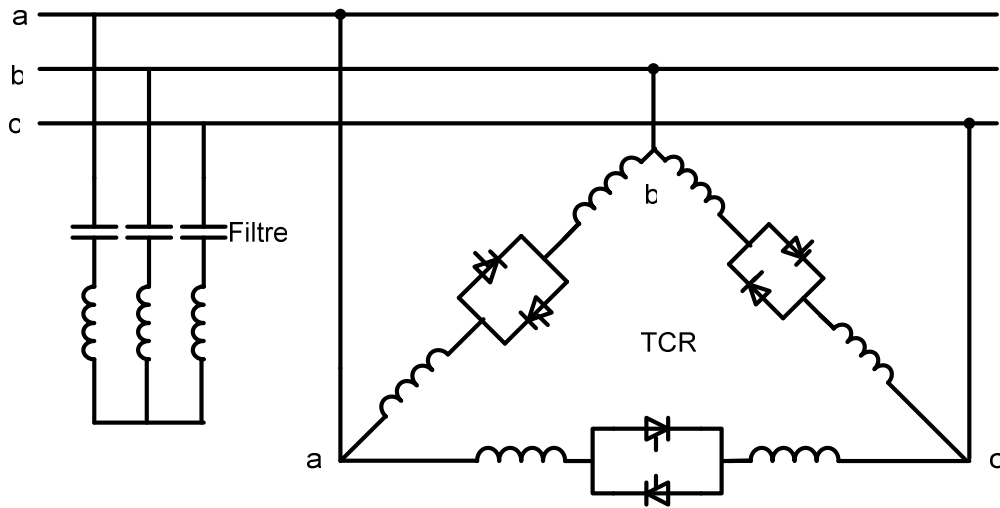
$$B(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{X_r \pi} \quad (3.3)$$

ile belirlenir (Bohmann ve Lasseter, 1990). Şekil 3.2’de verilmiş olan TCR için efektif süseptansın değerleri Çizelge 3.1’deki gibi değişmektedir.

Çizelge 3.1 TCR’nin tetikleme ve iletim açılarına bağlı olarak değişimi

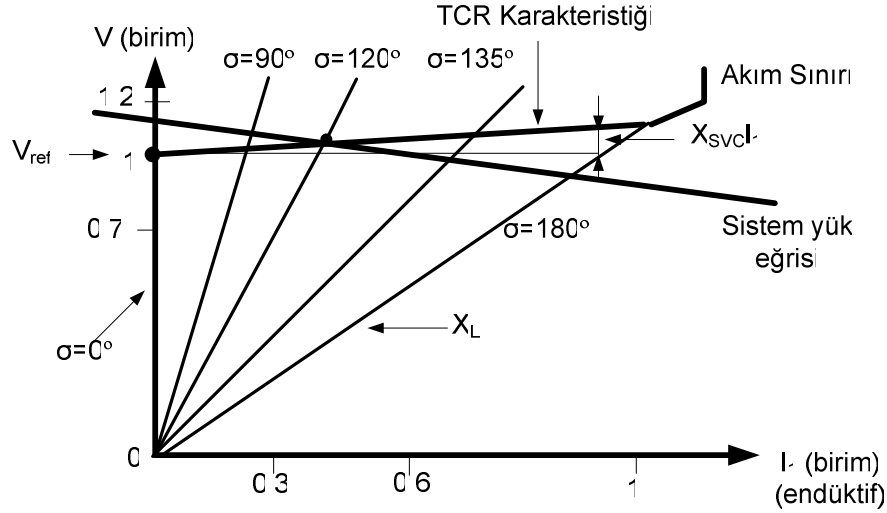
α	σ	B	Açıklama
90°	180°	$(X_r)^{-1}$	Maksimum süseptans
110°	140°	$0.5732(X_r)^{-1}$	-
130°	100°	$0.2421(X_r)^{-1}$	-
150°	60°	$0.0577(X_r)^{-1}$	-
180°	0°	0	Minimum süseptans

Şekil 3.4’te 3 fazlı üçgen bağlı TCR bağlantısı ve harmonikleri filtre etmek için kullanılan filtre elemanları gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Üçgen bağlı TCR ve filtreler.

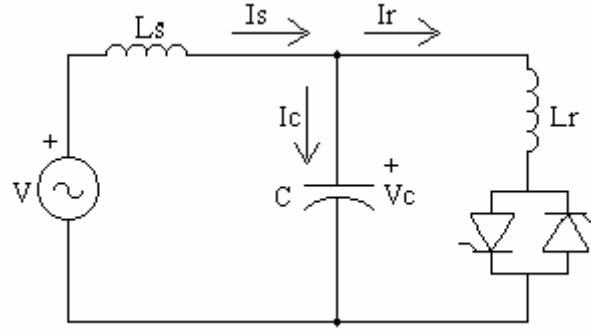
Şekil 3.5'te verilen TCR akım-gerilim karakteristiğine göre (TCR karakteristiği ile sistem yük eğrisinin kesiştiği nokta) $\sigma = 120^\circ$ için V bara gerilimi 1 pu değerinin az üstündedir. Diğer bir ifade ile mevcut yük durumu için $\sigma = 120^\circ$ 'de çalışılması durumunda TCR amacına yönelik çalışmış ve bara geriliminin de referans değerinde tutulması sağlanmış olacaktır.



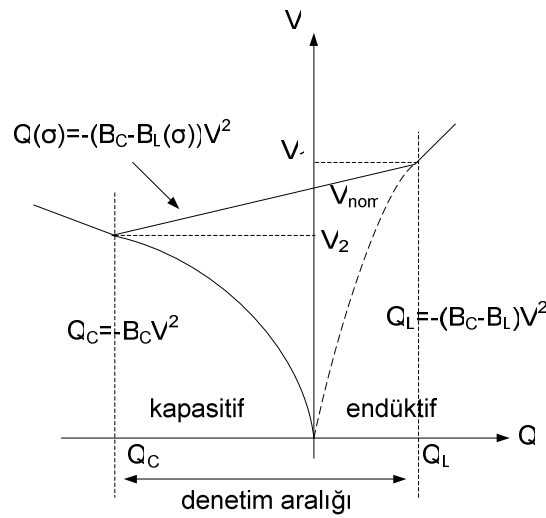
Şekil 3.5 TCR'ye ilişkin V-I karakteristik eğrisi.

3.1.3 Sabit Kondansatörlü Tristör Kontrollü Reaktör (FC-TCR)

Şekil 3.6'da gösterilen sabit kondansatörlü-tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) içeren statik VAR kompanzatorları, sabit kondansatör gruplarına paralel bağlı (σ açısı ile kontrol edilen) değişken bir reaktörden oluşur. Sabit kondansatörlü tristör kontrollü reaktörde (FC-TCR), bir yandan sabit kondansatörler reaktif güç üretirken, diğer yandan tristör kontrollü reaktör güç tüketecektir. Belirli bir gerilim seviyesinde kondansatör grubunun reaktif güç üretimi sabit olduğundan, selften sağlanan sistemin reaktif güç üretimi tristörlerin tetikleme açılarının değiştirilmesiyle belirlenmektedir. Tristörün tetikleme açılarının değiştirilmesi reaktör akımının temel bileşenini, dolayısıyla reaktif gücün büyüklüğünü kontrol edecektir (Xu v.d., 1991). Bazen tetikleme açılarının uygun seçilmemesi, tristör kontrollü reaktörün harmonik üretiminin etkin olduğu belli değerlerde, rezonans şartları bakımından olumsuzluklara yol açabilmektedir.



Şekil 3.6 Sabit kondansatörlü-tristör kontrollü reaktör (FC-TCR)

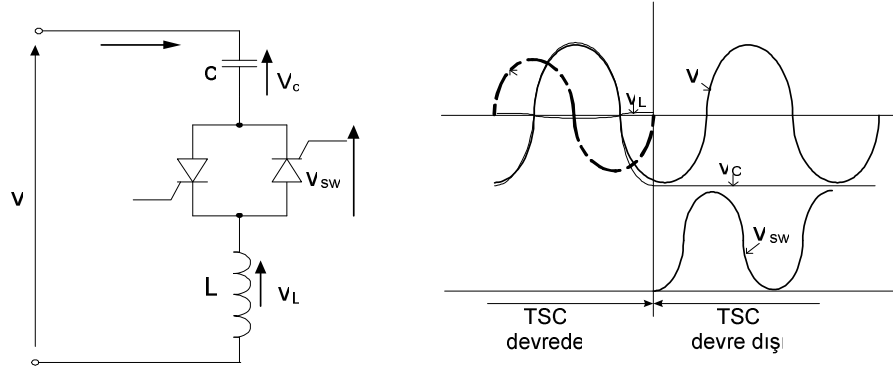


Şekil 3.7 Sürekli halde FC-TCR içeren kompanzatörün gerilim-reaktif güç bağıntısı.

Burada B_C , kondansatör süseptansı ve $B_L(\sigma)$ ise iletim açısına bağlı reaktörün süseptansıdır. Şekil 3.7’de görüldüğü gibi ayar aralığında ($V_1 - V_2$ aralığı) gerilim karakteristiğine karşı reaktif gücün eğimi, iletim açısının kontrolüyle belirlenir.

3.1.4 Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör (TSC) İçeren Statik Var Kompanzatörler

Tristörlerin tam veya sıfır iletim kontrolü ile reaktansı kademeli olarak değiştirilen paralel bağlı tristör anahtarlamaalı bir kondansatördür. TSC bir alternatif akım kısıyıcı ile buna seri bağlı bir kondansatörden meydana gelmektedir. Bu ünitelerin aynı yük barasına paralel olarak bağlanmasıyla reaktif güç ihtiyacı kademeli olarak karşılanabilir (Kara ve Yalcinoz, 2005; IEEE/PES, 1999). Tek fazlı tristör anahtarlamaalı kondansatör (TSC) Şekil 3.8’de gösterilmiştir.



Şekil 3.8 Temel TSC devresi ve gerilim dalga şekilleri.

Bu reaktöre öncelikle anormal işletme koşulları altında tristör valfindeki ani akımları sınırlamak için ihtiyaç vardır. Ayrıca bu reaktör belirli frekanslarda sistem empedansı ile rezonans korumak amacıyla da kullanılmaktadır. Kararlı hal şartlarında tristör valfi kapandığında ve TSC kolu bir sinüzoidal AC gerilim kaynağına bağlandığında gerilim

$v = V \cdot \sin(\omega t)$ olmak üzere koldaki akım,

$$i(\omega t) = V \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \cos \omega t \quad (3.4)$$

ile verilir. Burada n,

$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (3.5)$$

ile hesaplanmaktadır. Kondansatörün iki ucu arasındaki gerilimin genliği,

$$V_C = \frac{n^2}{n^2 - 1} V \quad (3.6)$$

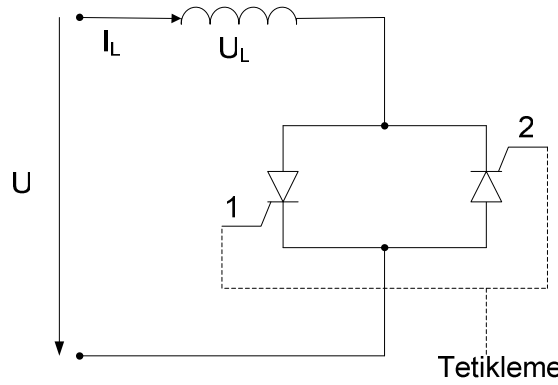
eşitliği ile bulunmaktadır. TSC kolu, akımın herhangi bir sıfır anında tristör valfine sinyal verilerek devre dışı bırakılır. Akımın sıfır geçişlerinde kondansatör gerilimi en yüksek değerindedir ($v_{c,i=0} = Vn^2/(n^2-1)$). Bu durumda kondansatör şarj durumundadır. Bağlantısı kesilen kondansatör bu gerilim değerinde şarja sahiptir ve bu nedenle iletken olmayan tristör valfinin uçlarındaki gerilim, uygulanan AC gerilimin sıfır ve tepe değerleri arasındadır (Şekil 3.8).

Bağlantısı kesilen kondansatörün uçlarındaki gerilim değişmeden kalırsa, uygulanan AC gerilimin uygun tepe değerinde hiçbir geçici durum olmadan TSC grubu tekrar

anahtarlanabilir. Normalde kondansatör bağlantısı koparıldıktan sonra deşarj edilir. Böylelikle, kondansatörün tekrar bağlanması sıfır ile $V_n^2/(n^2-1)$ arasındaki bazı artık kondansatör gerilimlerinde gerçekleştirilmelidir. Tristör valfinin uçlarındaki gerilim sıfır olduğunda uygulanan AC gerilim ve kondansatör artık gerilimi birbirine eşittir (Hingorani ve Gyugyi, 1999).

3.1.5 Tristör Anahtarlamaalı Reaktör (TSR) İçeren Statik Var Kompanzatorler

TSR kullanılarak oluşturulan SVC yapısındaki filtreler, SVC yapısındaki güç elektroniği elemanlarının neden olduğu ve büyük değerli endüstriyel yüklerden kaynaklanan harmonikleri ortadan kaldırmak amacıyla kullanılır. Genellikle harmonik üretimi açısından TCR yerine bu TSR yapısı tercih edilir (Endres, v.d., 1989). TSR yapısındaki tristörler kaynak geriliminin pozitif/negatif tepe noktalarında veya hat akımının sıfır geçiş noktalarında tetiklenmektedir. Böylece enerji sistemindeki harmonik üretimi engellenmiş olur. Tek fazlı basit bir TSR şeması Şekil 3.9'da verilmiştir. Sistemde TSR yapısı kullanılan SVC, yük değişimlerinde gerilim kontrolünü hızlı bir şekilde sağlar. Sonuçta TSR, daha az harmonik üretir ve sistemin gerilim regülasyonunu sağlamada yardımcı olur (Gelen ve Yalcinoz, 2007).



Şekil 3.9 Tek fazlı basit TSR şeması.

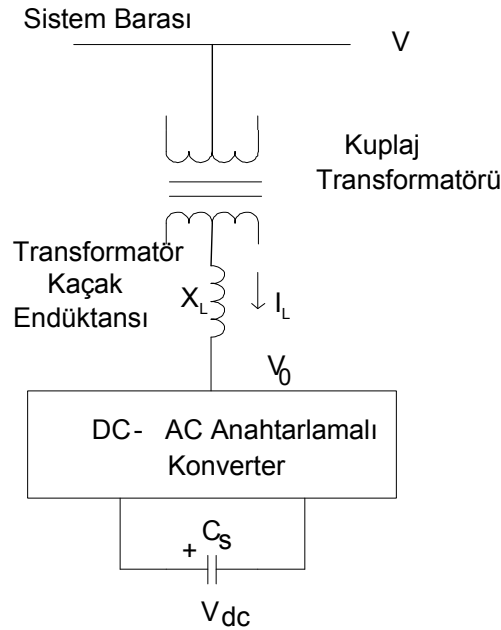
3.1.6 Statik Senkron Kompanzator (STATCOM) Sistemi

Statik senkron kompanzator (STATCOM), temeli gerilim kaynaklı dönüştürücüye (VSC) dayanan paralel bir kompanzator çeşididir. VSC, DC kondansatörün DC gerilimini AC'ye dönüştürüp sisteme verir ayrıca sistemin AC gerilimini DC'ye dönüştürüp DC kondansatörün şarj olmasını sağlar. Yani iki yönlü bir dönüştürücüdür. AC sistem gerilimini bağımsız olarak kontrol edebilen, kapasitif veya endüktif akım çıkışlı paralel bağlı statik VAR kompanzatorü

gibi çalışan statik senkron generatördür (Acha Vd., 2004; Hingorani ve Gyugyi, 1999; Kara ve Yalcinoz, 2005; Woodford, 2003).

Gerilim kaynağı olarak bir DC kondansatöre sahiptir ve bu kondansatörde depolanan enerjiyi bir VSC yardımıyla AC sisteme vererek reaktif güç kontrolü sağlar. Bu durumun tersi de kondansatörün tekrar dolabilmesi için geçerlidir. VSC'ler için birçok farklı yapılandırma söz konusudur. Bu durumda da STATCOM için farklı yapılandırmalar yapılabilir. Genellikle harmonik etkinliğini azaltmak için çok darbeli olarak kullanılırlar (Woodford, 2003). Dolayısıyla STATCOM, güç elektroniği elemanları kullanarak ve bu elemanların çalışma frekanslarına bağlı olarak sisteme çok hızlı bir şekilde cevap vererek reaktif güç alışverişini sağlar. Şekil 3.10'da bir baraya bağlı tek fazlı STATCOM şeması gösterilmiştir.

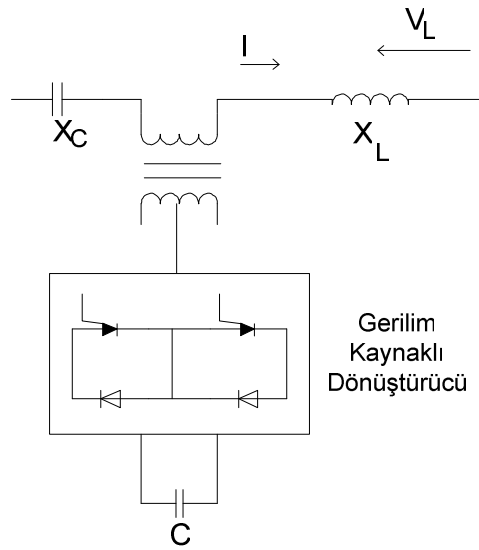
Kapı anahtarlama tristor (GTO) tabanlı ve zigzag transformatör kullanılarak yapılan STATCOM'lar sağladığı birçok avantaj açısından klasik statik VAR kompanzatlara göre son yıllarda ön plana çıkmaktadır (Mori v.d., 1993). Ancak STATCOM'da kullanılan zigzag transformatörlerin pahalı, hantal ve güvensiz olmaları gibi dezavantajlarının da olduğu göz önünde bulundurulmalıdır (Peng ve Lai, 1996).



Şekil 3.10 Tek fazlı STATCOM şeması

3.1.7 Statik Senkron Seri Kompanzator (SSSC)

Statik senkron seri kompanzator (SSSC) sistemi, STATCOM'da olduğu gibi temeli gerilim kaynaklı çeviriciye (VSC) dayanan seri bir kompanzator çeşididir. Şebekeye seri bir şekilde trafo üzerinden bağlı SSSC'nin tek fazlı devre şeması Şekil 3.11'de verilmiştir. SSSC, hat akımının genliğinden bağımsız, benzer bir kapasitif ve endüktif aralıkta kontrol edilebilir kompanzasyon gerilimi sağlar (Gyugyi v.d.,1997). Seri kapasitif kompanzasyon, hattın empedansının uçlarındaki gerilimin artırılması prensibi ile gerçekleştirilir. Bu durum da hattın akımının ve gücünün artmasını sağlar (Blazic ve Papic, 2006; Hingorani ve Gyugyi, 1999). Yapılan çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre SSSC'nin sabit reaktans durumunda kullanılması; daha yüksek sönümlenme gücü, senkronizasyon gücü ve daha iyi bir geçici hal kararlılık durumu sağlar. Böylelikle bu durumda çalışıldığı zaman SSSC sayesinde kompanzasyon sisteminin boyutları, dolayısıyla maliyetleri de önemli oranda azalmaktadır (Jowder, 2005). Seri reaktif kompanzasyonun yanı sıra ayrıca harici bir DC güç kaynağının da kullanılmasıyla SSSC, hat empedansının aktif bileşeni üzerindeki gerilim düşümünü de ayrıca kompanze eder. Hat daha yüksek bir seri kompanzasyon oranına sahip olsa bile aktif empedansın kompanzasyonu, daha yüksek bir X/R oranını sürdürebilir ve böylece hat üzerinde aktif – reaktif güç oranı uygun bir biçimde sağlanır. Geçici hal ve dinamik sistem kararlılıkları ile ilgili uygulamalarda, aktif ve reaktif kompanzasyonun koordineli ve rastlantısal modülasyonu, SSSC oldukça etkin bir şekilde ilk salınımı asgari hale getirir ve güç salınımının sönümünü önemli bir oranda artırır (Gyugyi v.d.,1997).

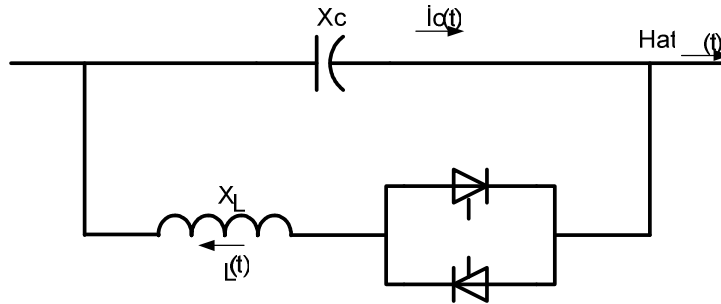


Şekil 3.11 Tek fazlı SSSC yapısı

Yapılan çeşitli çalışmalarda elde edilen sonuçlara göre çok seviyeli kaskad bağlı inverterli SSSC yapısı kullanıldığında oluşan yapının güç sistemi tarafından ihtiyaç duyulan işletim gerilimini, gerekli sayıda köprü eklenmesi veya çıkarılmasıyla optimize edebilecek esnekliğe sahip olacaktır. Ayrıca bu yapının diğer bir avantajı da bu sistemin iletim hattına kuplaj generatörü olmadan direkt bağlantısına olanak sağlamasıdır (Han, 2002).

3.1.8 Tristör Kontrollü Seri Kondansatör (TCSC)

TCSC kullanılarak yapılan statik VAr kompanzatörler, kompanze edilen sisteme birçok fayda sağlar. TCSC sistemi ile hattın doğal empedans değeri artırılarak daha etkili bir biçimde güç ve kararlılık kontrolü yapılabilir. Bu sistemler hattın kapasitif empedansını değiştirerek hattın güç taşıma yeteneğini ve sistem kararlılığını arttıran bir FACTS sistemidir. TCSC'ler hızlı cevap verme özelliğinden dolayı sistem salınımlarını hızlı bir şekilde kontrol edebilir. Ayrıca bunların kontrol sistemlerinde mekanik anahtarlamalar kullanılmadığından bakım maliyetleri oldukça düşüktür (Arunachalam, 2005; Canizares ve Faur, 1999; Kara ve Yalcinoz, 2005). Şekil 3.12'de genel bir TCSC yapısı gösterilmiştir.

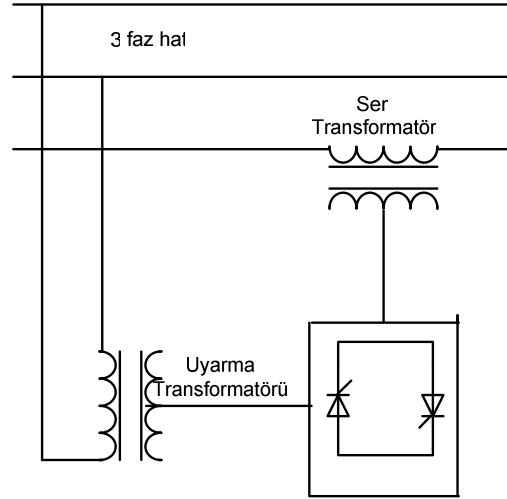


Şekil 3.12 TCSC devre şeması.

Şekil 3.12'den de görüldüğü gibi tristör kontrolü, hatta seri bağlı kondansatörün uçları arasında yapılır. Sistem salınımlarının söndürülmesi için TCSC'lerde çok farklı kontrol yöntemleri ve sinyalleri uygulanmıştır (Dolan, 1995; Wang ve Swift, 1997).

3.1.9 Tristör Kontrollü Faz Açısı Regülatörü (TCPAR)

Tristör kontrollü faz açısı regülatörü, hızlı değişen faz açısı sağlar. İletim hattının faz gerilimine dikey olarak gerilim bileşenleri eklenmesi veya çıkarılması ile faz kaydırması yapılabilir. Genel bir devre şeması Şekil 3.13'te verilmiştir (Kara ve Yalcinoz, 2005). Uyarma transformatöründen faz gerilimine dik bir gerilim bileşeni elde edilir. Bu gerilim seri transformatör üzerinden yeni bir gerilim üretmek için hatta verilir (Huang ve Li, 2003).



Şekil 3.13 TCPAR devresi

3.1.10 Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü (UPFC)

SSSC ve STATCOM'un birleşimi ile oluşur. SSSC'nin seri çıkış uçları ile STATCOM'un paralel uçlarının çift yönlü reel güç akışını sağlayacak şekilde bir DC hat yardımıyla bağlanması ile elde edilir. Yani birer transformatör yardımıyla sisteme, aynı noktadan STATCOM'un paralel ve SSSC'nin seri bağlanmasıyla oluşan bir sistemdir. Harici bir elektrik enerjisine ihtiyaç duymadan seri aktif ve reaktif güç kompanzasyonu yapar (Kara ve Yalcinoz, 2005).

4. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SVC İLE BİRLİKTE KULLANILMASI

Günümüzde yenilenebilir enerji kaynaklarına olan ilginin artmasıyla uygulama alanları çok genişlemiştir. Özellikle bu yenilenebilir enerji kaynaklarından rüzgar enerjisine gösterilen ilgi çok daha fazladır. Rüzgar santrallerinin (RS) sayılarının gittikçe çoğalması ve dolayısıyla üretilen enerji kapasitesinin artması birçok olumlu özelliklerin yanında bazı problemleri de beraberinde getirmiştir. Şebekelere rüzgar santrallerinin bağlanmalarının artmaya başlamaları sonucunda gerilim dalgalanmaları problemleri meydana gelmektedir. Eğer bu RS'lerin şebeke kısa devre gücüne göre oranı düşük ise (örneğin %5 gibi) bu gerilim dalgalanmalarının şebekeye genel olarak etkisi ihmal edilebilir boyutlarda olabilir. Ancak RS'lerin gelişim seyri dikkate alındığında şebeke kısa devre gücüne göre %5 gibi küçük rakamlarla sınırlamaların ileriye yönelik mümkün olamayacağı aşikardır. Özellikle gelişmiş bazı Avrupa ülkelerinde bu oran daha şimdiden %20-%40 arasında hedeflenmektedir.

Rüzgar santralleri sahip olduğu generatörlerin özelliklerinden dolayı sistemden reaktif güç çekerler. Bu reaktif güç ihtiyacının büyük miktarda olması sistem geriliminin dalgalanmasına yol açar. Bazen bu gerilim değişimleri, sisteme bağlı yükler tarafından da meydana gelebilmektedir. Bunun ötesinde RS'lerin doğası gereği de belli oranda gerilim dalgalanmaları meydana gelir. Düzenli gerilim flikeri (kırpışması), kule gölge etkileri ve türbülanslı rüzgar etkisinden kaynaklanan etkiler de sorunların bir parçasıdır. Bu gerilim dalgalanmaları enerji sürekliliğinin sağlanması açısından çeşitli sorunlar çıkarabilmektedir. Belirli bir dereceye kadar, şebekedeki reaktif güç açısından kaynaklanan gerilim kontrol problemleri, sabit veya mekanik olarak anahtarlanan şönt kondansatörlerin kullanılmasıyla düzeltilebilir. Ancak bu çözüm, rüzgar generatörlerinin değişken çıkışından kaynaklanan gerilim dalgalanmalarının düzeltilmesine yardımcı olmayacaktır. Bunun ötesinde şebeke hatalarından kaynaklanan gerilim çökmeleri ve reaktif güç desteği için paralel kondansatörler içeren dağıtım şebekelerinin rüzgar gücünün ani değişimi ile ilgili ani aşırı gerilimler de bu sorunlara neden olabilmektedir (Grünbaum, 2000).

Güç sistemi üzerindeki gerilim dalgalanmalarının ve çökmelerinin aşırı yük veya arıza (hata) anlarında reaktif güç ihtiyacından dolayı olduğu biliniyordu (Kundur, 1994). Bu dalgalı yüklerin büyüklüğü ve sayısı arttıkça fliker, harmonikler ve dengesizlik problemleri gibi güç kalite problemleri de artmıştır. Ancak rüzgar santrallerinin de işin içine girmesiyle, türbin generatörlerinin şebeke üzerine bozucu etkileri de ön plana çıkmıştır (Bousseau v.d., 2006; Pålsson v.d., 2002).

Bu problemlerin giderilmesi için birçok yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan birisi olan SVC, FACTS ailesinin bir üyesi olarak reaktif gücün tristör kontrolü aracılığıyla, şebekeyle ortak bağlantı noktasında dinamik gerilim kontrolünün yapılmasına olanak sağlar. SVC'ler fliker ve dengesizliği azaltmak için bazı fabrikalarda zaten kullanılmaktadır. Dünyada 900'ün üstünde SVC uygulaması bulunmaktadır (Erinmez, 2003). Günümüzde tristör kontrollü reaktör tabanlı (TCR) teknolojinin giderek gelişmesiyle bu FACTS cihazının reaktif güç kompanzasyonu ve gerilim regülasyonu amaçlı rüzgar çiftliklerinde de kullanılması daha çok düşünülebilir (Bousseau v.d., 2006).

SVC'nin hızlı cevap vermesi, kararlı hal ve dinamik gerilim kontrolünü gerçekleştirme işlemlerinin yapılabilmesi için son derece uygundur. Ayrıca SVC'nin bağlantı noktasında düşürücü bir transformatöre ihtiyaç duymaması da çok büyük avantajlar sağlayabilmektedir (Grünbaum v.d., 2008).

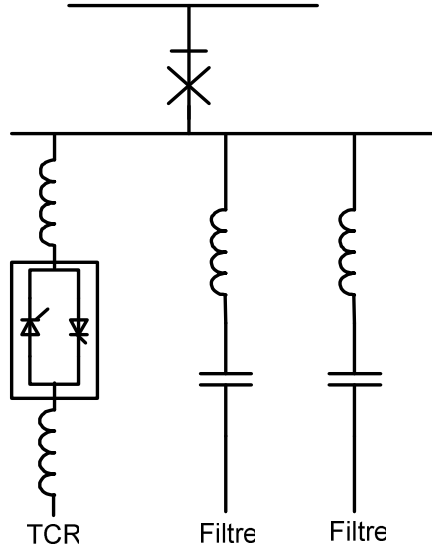
4.1 Çeşitli Rüzgar Türbini Uygulamalarında SVC'nin Kullanımı

4.1.1 69 kV'luk Baraya Direkt Bağlanan SVC Örneği (Grünbaum v.d., 2008)

Şebekeye doğrudan bağlanan SVC'lerde, şebeke ile SVC arasına düşürücü trafo bağlanmasına ihtiyaç yoktur. SVC'de amaç reaktif güç denetimi ile gerilim regülasyonu sağlamaktır. Bu özelliği SVC'nin daha kolay kurulumunu, kurulum maliyetinin azalmasını, kapladığı alanın daha az olmasını, kayıpların azalmasını ve diğer birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Şekil 4.1'de bu uygulamaya ait baraya direkt bağlanmış, filtreli yapıya sahip SVC'nin tek hat diyagramı verilmiştir. Buradaki filtreler harmonikleri elimine etmek içindir.

Direkt bağlı SVC konseptleri tipik olarak seri bağlı tristör valf modülleri içerirler, aksi takdirde klasik ekipman kullanılır. Bu konsept aşağıdaki ana bölümlerden oluşur:

- Bir yüksek gerilim devre kesicisi
- Bir tristör kontrollü reaktör (TCR)
- Bir harmonik filtre seti (FC)
- Kontrol ve koruma ekipmanı
- Yardımcı güç ekipmanı



Şekil 4.1 Tek hat diyagramı, direkt bağlı SVC.

4.1.2 Sabit Hızlı Endüksiyon Generatörlü Rüzgar Türbinlerinde SVC ve STATCOM Uygulaması (Foster v.d., 2006)

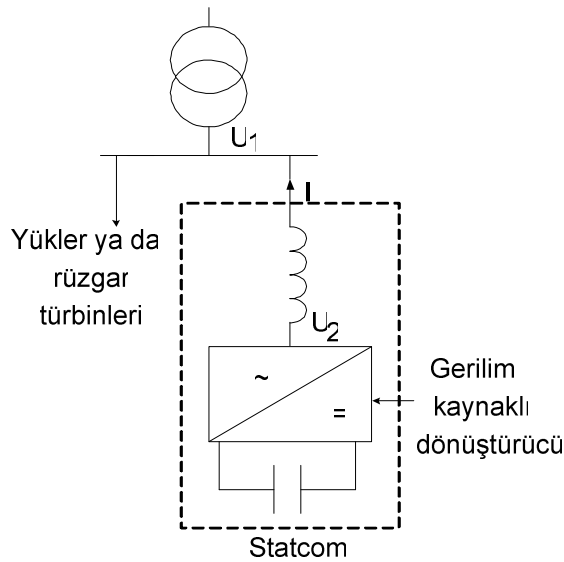
Karada kurulan çoğu rüzgar çiftliklerinde sabit hızlı endüksiyon generatörleri (FSIG) kullanılmaktadır. Bu tip generatörler stator mıknatıslanması için şebekeden önemli miktarlarda reaktif güç çekerler. Daha büyük rüzgar çiftliklerinde enerji üretiminde kısa devre oranı (SCR) düşüktür. Daha önceki araştırmalara göre, SCR çok düşükse iletim hattındaki arızaların, şebeke geriliminin kararsızlığına ve generatörün aşırı hızlanmasına sebep olabileceğini göstermektedir (Akhmatov v.d., 2000). Bu tür sistemlerde arıza giderildikten sonra generatör tarafından yüksek oranda reaktif güce ihtiyaç duyulmaktadır. Bu reaktif güç sağlanamazsa makine kontrolsüz hızlanacak ve güç sisteminden ayrılması gerekecektir. Küçük kapasiteli rüzgar çiftliklerinin kayıpları kabul edilebilirken, büyük güçlü rüzgar çiftlikleri şebeke bağlantı standartlarına bağlı kalmalıdır ve sistemde meydana gelen dalgalanma anlarında da belli bir süre devrede kalabilmelidirler.

Çalışmalar gösteriyor ki, rüzgar çiftliklerinde bara geriliminin kontrolüyle geçici ve sürekli hal kararlılığı artırılabilir. Böylelikle daha büyük rüzgar çiftliklerinin şebekeye bağlantısı sağlanabilir (Holdsworth v.d., 2003). Bu referanstaki çalışmada sabit hızlı endüksiyon generatörü kullanılan rüzgar çiftliklerinin sistem kararlılığını incelenmiştir. Ayrıca rüzgar çiftliğinin şebeke entegrasyonunda SVC ve STATCOM kullanılması ele alınmıştır. Bu çiftliğin şebekeye bağlandığı noktada STATCOM ve SVC bağlantısı yapılmıştır. STATCOM

durumda elektriksel tork değeri, mekaniksel tork değerinin altına inmiş ve rotor hızı artmaya devam etmiştir. Sonucunda sistem kararsız hale gelmiştir.

Aynı arıza varken SVC ve STATCOM bağlı olması durumunda yapılan ölçümler göstermiştir ki, AC gerilim değerini arıza sonrasında 0,9 pu değeri civarında tutabilmektedir. Önceki duruma göre bu % 10'luk bir artış elektriksel torkun artmasına ve giriş mekaniksel torkunun üstünde kalmasına yardımcı olmuştur. Sonuç olarak rotor hızı arıza öncesi değerine düşmüş ve sistem kompanzasyon sistemiyle kararlı hale gelmiştir.

SVC ve STATCOM, güç faktörü düzeltme (PFC) kondansatörleriyle karşılaştırılırsa SVC ve STATCOM sistemi kararlılığını kaybetmeden daha uzun süre devrede tutabilmektedir. Ayrıca STATCOM sonuçları SVC'den daha iyi çıkmıştır. STATCOM gerilim kontrollü dönüştürücüler (VSC) üzerinden sisteme bağlı olduğundan genlik, faz ve frekans tamamıyla kontrol edilebilmektedir.



Şekil 4.3 Rüzgar çiftliğinin STATCOM ile birlikte şebeke entegrasyonu.

STATCOM'larda dönüştürücü gerilimi şebeke gerilimine ayarlanırken dönüştürücünün anahtarlanmasına bağlı olarak çok hızlı bir şekilde reaktif güç sağlanabilir veya çekilebilir. Cevap zamanı, genel olarak anahtarlama frekansı ve endüktansın boyutuna bağlıdır.

STATCOM, endüksiyon makinesi tabanlı rüzgar çiftlikleri tarafından çekilen reaktif güç değişimi sebebiyle ihtiyaç duyulan reaktif gücü karşılama ve oluşan fliker etkisini hafifletmeye yardım etmektedir (Bousseau v.d., 2006). STATCOM'un birçok avantajı bulunmasına rağmen SVC'ye göre daha pahalı ve karmaşık bir sistem olmasından dolayı

yaygın bir kullanımı yoktur.

4.2 SVC'nin Şebeke Entegrasyonunda Sağladığı Diğer Yararlar

Bir rüzgar çiftliği, özellikle kullanılan generatörlerin özelliğinden dolayı yüksek reaktif güç kompanzasyonu gerektirir. Rüzgar çiftliklerinin işletiminden kaynaklanan bu reaktif güç azlığı, şebeke toplam kayıplarında bir artışa neden olabilir ve gerilim kararlılığı üzerinde de negatif etkiler gösterir. SVC gibi esnek AC iletim sistemleri (FACTS), gerekli olan reaktif gücü hızlı bir şekilde güç sistemine sağlayarak daha iyi bir gerilim profilinin sürdürülmesine yardım ederler. Rüzgar çiftliklerinin tam reaktif güç desteğinde SVC'ler etkindir (Ha ve Saha, 2004; Polisetty v.d., 2006). FACTS cihazlarının kullanılması yeni rüzgar türbinleriyle genişletilen rüzgar çiftliklerinde kararlılığın sürdürülmesine yardımcı olur (Salehi v.d., 2006). Daha önceleri yapılan basit kompanzasyon yöntemlerine göre örneğin sabit kondansatör gruplarından farklı olarak SVC'ler kararlı halde daha iyi bir gerilim kontrolü profiline sahiptir. Ayrıca bozulmalar boyunca rüzgar türbini generatörlerinin arıza sırasında çalışma yeteneğini arttırılırlar. Elektrik güç sistemlerinde kullanılan tristör kontrollü bu SVC'ler kritik yüklerin gerilim desteği, geçici hal kararlılığının arttırılması ve güç osilasyonu sönümlemesi için kullanılırlar (Chompoo-inwai v.d., 2005; Gyugyi, 1998; Tan v.d., 1993).

SVC'nin performansı hem kararlı halde hem de dinamik/geçici kararlılıkta sabit kondansatörden daha iyidir. Sabit kondansatörlere göre daha yüksek maliyetlerine rağmen SVC'ler rüzgar çiftliğine ve bağlanılan şebekeye önemli ölçüde yarar sağlarlar. Rüzgar çiftliği inverteri ve SVC tarafından sağlanan reaktif güç kompanzasyonu, tüm güç sistemi için daha iyi bir gerilim profili elde etmek amacıyla koordine edilir (Chompoo-inwai v.d., 2005; Polisetty v.d., 2006).

Yapılan bir çalışmada gerilim kararlılığı ve güç sistem sönümü değerlendirilmelerinin gerçekleştirilmesiyle, SVC aracılığıyla gerilim kontrolü ve reaktif güç kompanzasyonunun sistem sönümlemesi üzerine pozitif bir etkisi olduğu görülmüştür. Hatta daha yüksek güçlerde SVC'ler toplam sistem sönümlemesi açısından daha iyi sonuçlar vermektedir (Marzio v.d., 2005).

Büyük ölçekli rüzgar çiftliklerinin şebeke bağlantısında SVC'nin varlığı güç açısının yerleşme zamanını arttırır, diğer bir deyişle sistem sönümlerinin azaltılmasını sağlar. Böylece sistemin dinamik gerilim kararlılığı SVC'nin varlığından dolayı geliştirilmiş olur. Ayrıca SVC'nin devreye alınmasıyla sistemin gerilim kararlılığı ile birlikte geçici hal kararlılığı da

gelişir (Shimy v.d., 2008).

Rüzgar çiftliklerinde SVC kullanımının hem türbinler hem de şebeke üzerinde olumlu etkileri vardır. Şebekedeki bir arıza sırasında rüzgar türbinleri şebekeye bağlı kaldıkları zaman SVC, türbin üzerindeki baskıları azaltır. Ayrıca şebeke açısından bakılırsa SVC reaktif güç açığını gidermeye çalışır ve hata giderildiğinde osilasyonları azaltır (Gertmar, 2003).

SVC'ler çoğu kararlı hal gerilim problemlerini etkin olarak çözecek şekilde reaktif çıkışlarını ayarlayarak sistem gerilimini regüle ederken rüzgar çiftliklerini güç sisteminden korumak için gerilimdeki ani değişimlere cevap verecek şekilde programlanabilirler veya bunun tersi de geçerlidir (Kerhli ve Ross, 2003).

4.3 SVC'nin Rüzgar Santrallerinde Kullanım Yöntemleri

Rüzgar çiftliklerinde kullanılan SVC'lerin sağladıkları gücün bir sınırı vardır. Şebeke içindeki rüzgar gücü oranının yüksek olması durumunda SVC'ler reaktif güç sınır değerlerine ulaşılan kadar sistem kararlılığını iyileştirmeye yardım ederler. Daha fazla reaktif güç gerekmesi durumunda sistem hem geçici kararlılık hem de gerilim kararlılığı açısından kararsız hale gelir. Bu nedenle SVC'lerin güçleri oranında, belirli bir rüzgar gücüne kadar şebekeye katkı yapabilecekleri söylenebilir (Ha ve Saha, 2004; Shimy v.d., 2008). SVC'ler kapasiteleriyle sınırlandırılırlar ve geçici olaylar için kullanılacaklarsa uygun şekilde boyutlandırılmalıdırlar (Kerhli ve Ross, 2003).

Rüzgar çiftliklerinde maliyetleri düşürmek için bazen SVC'ler sabit kondansatör grupları ile bir kombinasyon oluşturularak beraber kullanılırlar (Muljadi v.d, 2004).

Teknolojisine bağlı olarak rüzgar türbinleri, şebeke bağlantı şartlarını karşılayacak uygun reaktif güç kompanzasyonuna ve gerilim kontrol yeteneklerine sahip olabilirler. Ancak bazı durumlarda tristör anahtarlamalı kondansatör (TSC), SVC, STATCOM, senkron kondenser gibi diğer kompanzasyon cihazlarını da beraberinde kullanmak gerekebilir (Bousseau v.d., 2006).

4.4 Entegrasyonda SVC ile STATCOM'un Birlikte Kullanılması

SVC ve STATCOM gibi FACTS cihazları ortak bağlantı noktasındaki reaktif güç girişini kontrol etmek için kullanılan güç elektroniği anahtarlarıdır ve böylece bara gerilimini de regüle ederler. SVC ve STATCOM'un kullanıldığı güç sistemlerinde gerilim profili

geliştirilebilir (Cheng ve Hsu, 1990; Palssoni v.d, 2002; Polisetty v.d., 2006). SVC ve STATCOM rüzgar hızından bağımsız olarak yük değişimine göre ortak bağlantı noktasındaki gerilimi belli sınırlar içerisinde tutabilir. Salehi vd. yük değişimi durumunda ve birkaç rüzgar çıkışı için P-V eğrileri oluşturularak rüzgar çiftliği bağlantısında SVC ve STATCOM kullanımını incelemişlerdir. Burada SVC veya STATCOM kullanılması, fiderdeki ve özellikle rüzgar çiftliğinin dağıtım fiderine bağlı olmadığı yani rüzgar çiftliğinin üretim yapmadığı durumlarda veya rüzgar hızının düşük olduğu durumlarda son yükler için gerilimin belli sınır değerler içerisinde kalmasını sağlamıştır (Salehi v.d., 2006).

Rüzgar çiftliği tarafından ihtiyaç duyulan reaktif güç, fliker ve şebeke kaynaklı reaktif güç akışlarındaki dalgalanmaları ciddi bir şekilde azaltacak kadar inverter kontrolörü tarafından hesaplanıp bu oran kadar STATCOM inverteri sürülebilir. Tristör tabanlı çözümlerin aksine (TSC ve SVC), VSC güç elektroniği sistemleri IGBT teknolojisine dayanmaktadır ve tristörden daha hızlı çözüm sunmaktadır. Yarı iletken teknolojisindeki sürekli gelişim ile birlikte yüksek güçlü STATCOM'lar (birkaç 10 MVA) tasarlanabilmekte ve milisaniyeler mertebesinde çok iyi dinamik cevaplar verebilmektedirler (Bousseau v.d., 2006). SVC'lerle karşılaştırıldığında STATCOM cihazları daha hızlı cevap sürelerine sahiptirler, daha az yer kaplarlar ve düşük gerilimlerde daha iyi performans gösterirler (Kerhli ve Ross, 2003).

Rüzgar türbinlerinin arıza üstü çalışma yetenekleri bir STATCOM'un kullanılmasıyla tristör kontrollü SVC'lere göre daha fazla geliştirilebilir. Hesaplamalar, simülasyonlar ve ölçümler, STATCOM kapasitesi artırılarak daha fazla geçici kararlılık ve böylece daha fazla arıza üstü çalışma yeteneği sağlayacağını göstermiştir. SVC ile kıyasla STATCOM'un geçici olaylara karşı daha büyük katkısı vardır.

Şebeke reaktansının tüm değerleri için gerekli STATCOM değeri neredeyse her zaman gereken SVC kapasitesinden daha düşüktür. Şebekenin güçlenmesiyle kararlılığı sağlamak için gereken SVC ve STATCOM kapasiteleri daha da azalır. Düşük şebeke empedanslarında sistem, küçük STATCOM akım değerleri ve bundan biraz daha yüksek SVC akım değerleri için kararlı olacaktır. Kritik hız arttıkça STATCOM ve SVC kapasite değerleri artar. Daha yüksek şebeke empedanslarında ise kararlılığı sağlamak için daha fazla reaktif akıma gerek vardır ve gereken SVC kapasitesi tüm durumlarda gereken STATCOM kapasitesinden daha büyük olacaktır (Molinas v.d., 2008).

STATCOM'lar bu özelliklere sahip olmakla birlikte daha geniş bir kontrol aralığında çalışırlar ve düşük gerilim seviyelerinde daha yüksek akım sağlayabilirler (Gyugyi, 1993;

Larsen v.d., 1991). Bunlara ilave olarak SVC'ler kondansatör bazlı olduklarından reaktif güç sağlama yetenekleri, gerilimin karesi ile azalır. Bu nedenle SVC'nin derin gerilim çökmeleri durumunda yarar sağlama yeteneği azalır. Bu durumda da STATCOM daha etkin çözüm yöntemi sunabilir. STATCOM'lar SVC'lere göre daha iyi performans gösterdiğinden, fliker kompanzasyonu düşük gerilimlerde yüksek kompanzasyon seviyelerine çıkabilmek için tercih edilirler (Hingorani ve Gyugyi, 1999; Molinas v.d., 2008; Noroozian v.d., 2003).

Ayrıca bazı STATCOM cihazları, kararlı hal gerilim regülasyonunu sağlamak amacıyla gereken cihazın boyutunu düşürmek için yakınındaki anahtarlamalı paralel kondansatörleri ve reaktörleri kontrol etme yeteneğine sahiptir (Kerhli ve Ross, 2003).

Kurulan rüzgar santralının şebeke bağlantısında, SVC veya STATCOM kullanılması arasındaki seçim, ekonomik incelemelere ve ayrıca rüzgar çiftliği bağlantısının güç kalitesi konularına bağlıdır (Salehi v.d., 2006). Birkaç STATCOM uygulaması, rüzgar çiftliklerinde halen kullanımdadır. Ancak maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle yaygın değildir (Bousseau v.d., 2006). SVC'nin güç sistemlerinde uygulanması diğer yöntemlere göre daha kolay ve ucuz bir yöntemdir. Hatta ilk kurulum maliyetleri açısından karşılaştırıldığında SVC, STATCOM' a göre çok daha ucuzdur (Eromon, 2005; Kirby ve Hirst, 1997).

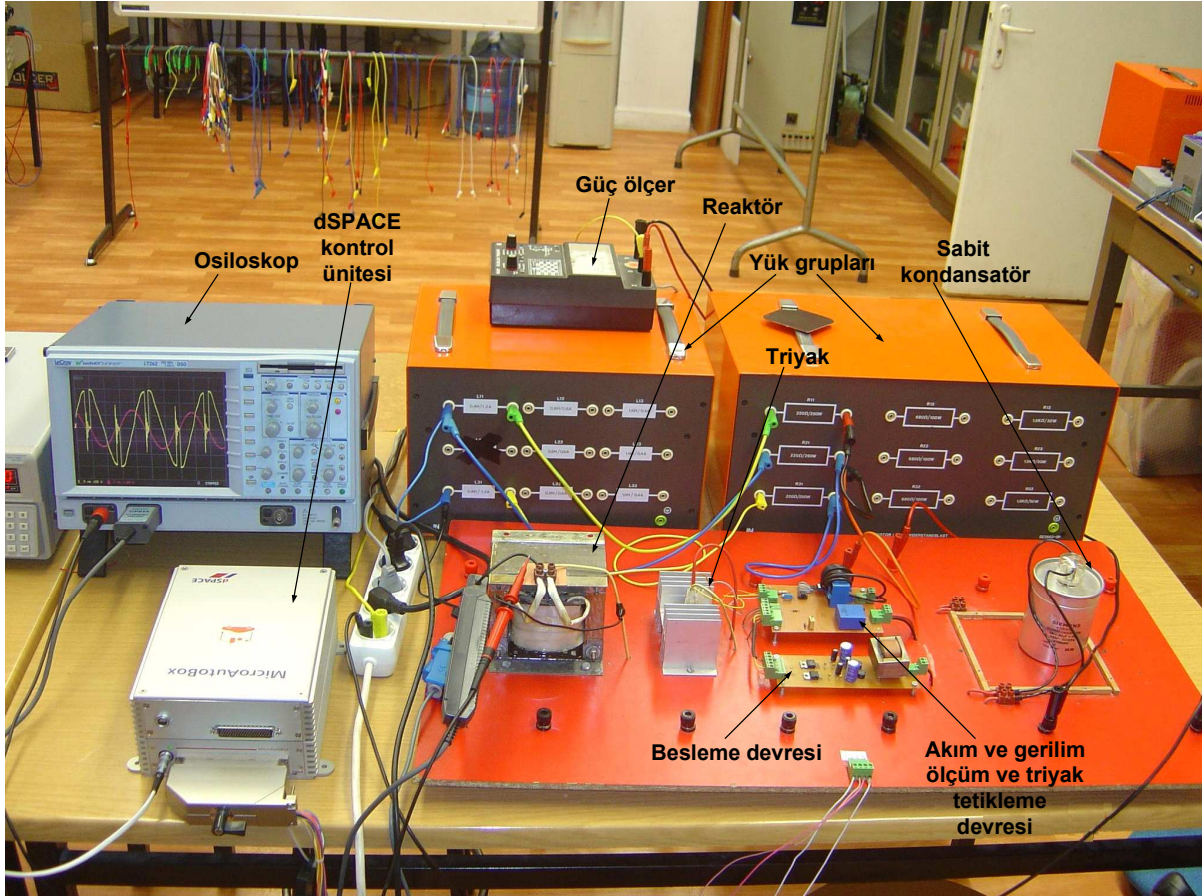
5. FC-TCR (SABİT KONDANSATÖRLÜ TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR) SİSTEMİ UYGULAMASI ve SONUÇLARI

5.1 DeneY Düzeneyi ve Çalışma Prensibi

Bu çalışmada, tek fazlı sabit kondansatörlü tristör kontrollü reaktör (FC-TCR) uygulaması gerçekleştirilmiştir. Devrede 30 μF 'lık bir kondansatör ve 0,20 H'lik bir reaktör kullanılmıştır. MATLAB&Simulink ortamında geliştirilen kontrol modeli dSPACE gömülü kontrol ünitesine yüklenerek gerçek zamanlı olarak çalıştırılmıştır. Ayrıca deney düzeneği oluşturulup FC-TCR için şebeke bağlantısı yapılarak farklı omik-endüktif yükler olması durumlarında testler gerçekleştirilmiştir.

5.2 Uygulamada Kullanılan Elemanlar

DeneY düzeneği, Şekil 5.1'de gösterilmiştir. DeneY düzeneğinde kullanılan elemanlar hakkında genel bilgiler aşağıda verilmiştir.



Şekil 5.1 FC-TCR deneY düzeneyi.

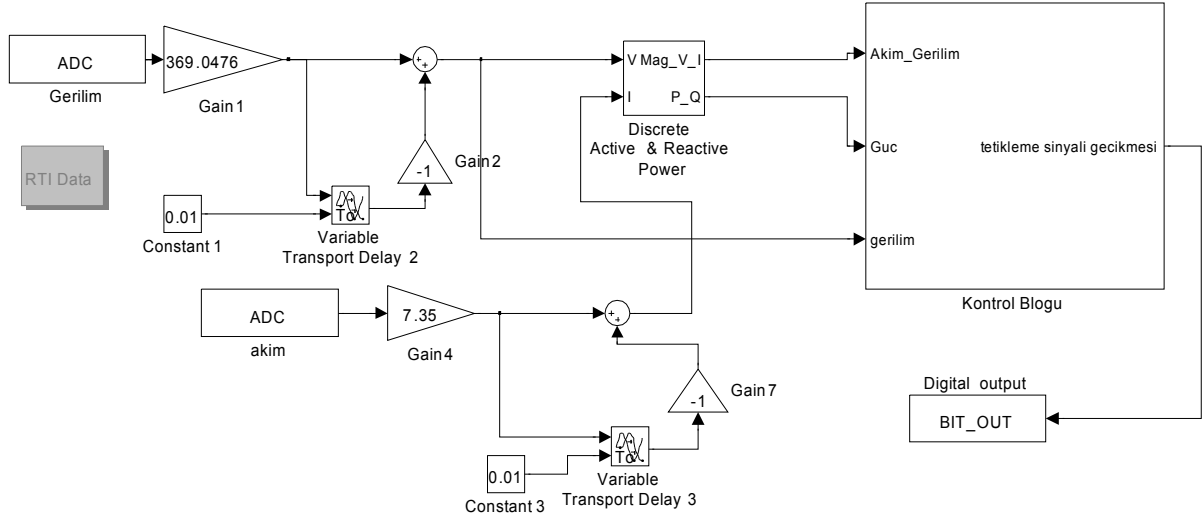
5.2.1 dSPACE Kontrol Ünitesi

dSPACE bu tür deneysel uygulamalarda çok kullanışlıdır. Çünkü yapılan kontrol algoritmalarının gerçek zamanlı (real time) çalışmasını sağlamaktadır. Bu özelliği kullanıcıya sistemi bozmadan sadece kontrol yazılımı değiştirilerek çeşitli testler yapabilme imkanı vermektedir. dSPACE kontrol ünitesine ait teknik özellik Çizelge 5.1’de verilmiştir.

Çizelge 5.1 dSPACE teknik özellikleri

İşlemci	800 MHz
Hafıza	8 MB Ana Hafıza 4 MB PC Haberleşme Hafızası 16 MB Kalıcı Hafıza
Bilgisayar Bağlantısı	2xRS232 Arayüzü
Analog Bağlantı	16 Analog Giriş 12 Bit Çözünürlüklü 4 Kanal
Dijital Bağlantı	16 Bit Dijital Giriş 10 Bit Dijital Çıkış 4 Bit PWM Çıkışı
Analog Giriş Gerilimi	0-5 V
Analog Çıkış Gerilimi	0-4,5 V

Bu uygulamada MATLAB&Simulink araç kutuları kullanılarak yapılan kontrol sistemi, bilgisayarın PCMCIA çıkışına takılan özel bağlantı kartıyla dSPACE kontrol ünitesine yüklenmiştir. Kontrol sisteminde değişiklik yapılmak istenildiğinde MATLAB&Simulink yazılımı aracılığıyla istenilen değişiklikler kolaylıkla gerçekleştirilebilmiştir. Modüle yüklenen kontrol modeli Şekil 5.2’de verilmiştir.



Şekil 5.2 Kontrol modeli

Analog girişlerden alınan akım ve gerilim sinyalleri, analog-dijital dönüştürücüler (ADC) aracılığıyla akım ve gerilim değerleri kontrol sistemine aktarılmaktadır. Akım ve gerilim sensörlerinin ve ADC'lerin çevirme oranları ölçülerek gerçek değerleri elde edebilmek için birer katsayıya çevrilmiştir. dSPACE'in analog girişleri 0-5 V arasındaki sinyalleri alabildiği için sinüsün negatif kısmını alamamaktadır. Bu nedenle pozitif kısmının tersi alınıp 180° ötelenerek gelen sinyaller ile toplanmış ve çıkışında girişe gelemeyen sinüs sinyalinin aynısı elde edilmiştir. Daha sonra elde edilen sinyaller güç hesaplama bloğuna verilmiştir. Buradan alınan ölçüm sonuçları tasarlanan kontrol bloğuna girilmiştir. Kontrol bloğunda alınan bu verilerden reaktif gücü kompanze edecek değeri elde etmek için gerekli tetikleme açısı kontrol bloğunda hesaplanmış ve ateşleme sinyali olarak dijital çıkışa verilmiştir. Bu dijital çıkış, sistemde reaktörü devreye alan triyak elemanını tetiklemek üzere kontrol sinyali göndermektedir.

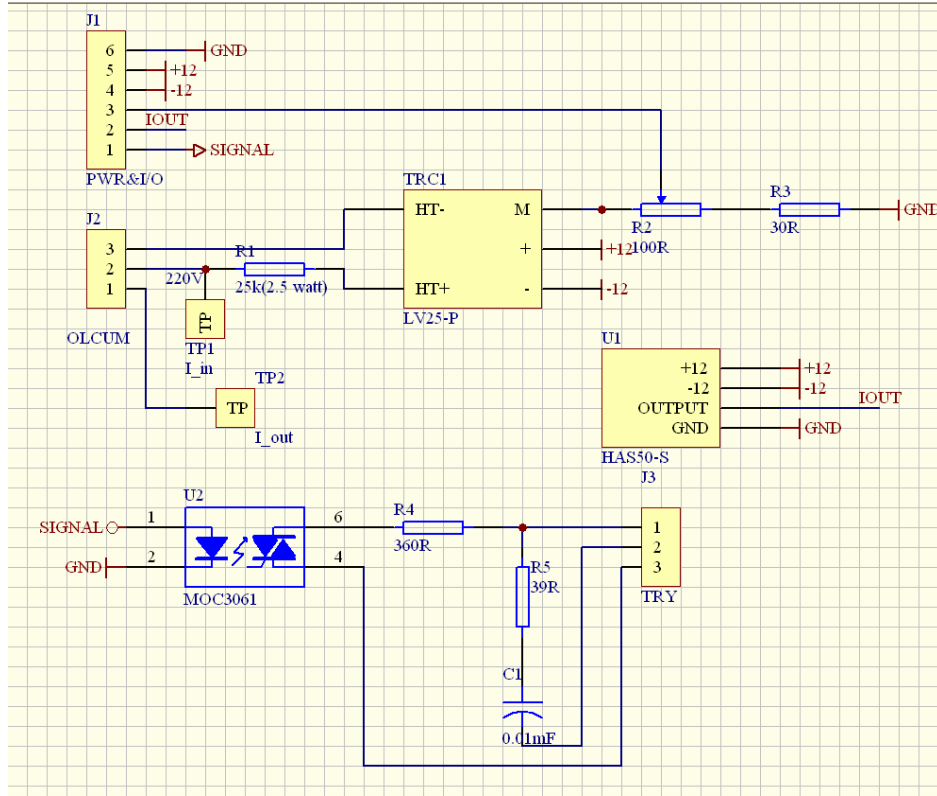
5.2.2 Akım-Gerilim Ölçüm ve Tetikleme Devresi

Sistem gerilimi izoleli bir gerilim sensörü (LV25P) kullanılarak örneklenmiştir. Şekil 5.3'te devre şeması görülmektedir. Şemaya göre gerilimin bağlantısı önemlidir. Gerilim faz ucu gerilim sensörünün HT+ ucuna ve nötr ucu ise sensörün HT- ucuna bağlanmıştır. Sensörün besleme gerilimi de ± 12 V besleme uçlarına bağlanmıştır ve ölçüm ucuna 100Ω 'luk potansiyometre ve 30Ω 'luk direnç bağlayarak potansiyometre üzerinde 310 V için 5 V'luk gerilim elde edilmiştir.

Sistem akımı ise izoleli bir akım sensörü (HAS50-S) kullanılarak örneklenmiştir. Akım

sensörünün örnekleme yapabilmesi için ± 12 V besleme gerilimine ihtiyacı vardır. Akım sensörü özelliği itibarıyla 50 A akım için 5 V çıkış sinyali vermektedir. Ancak bizim sistem akımımız çok küçük olduğu için sensörden geçirilen kablo sarım sayısı 10 katına çıkarılarak çıkış değerinin hassas ölçümler yapılabilmesi için büyütülmesi sağlanmıştır.

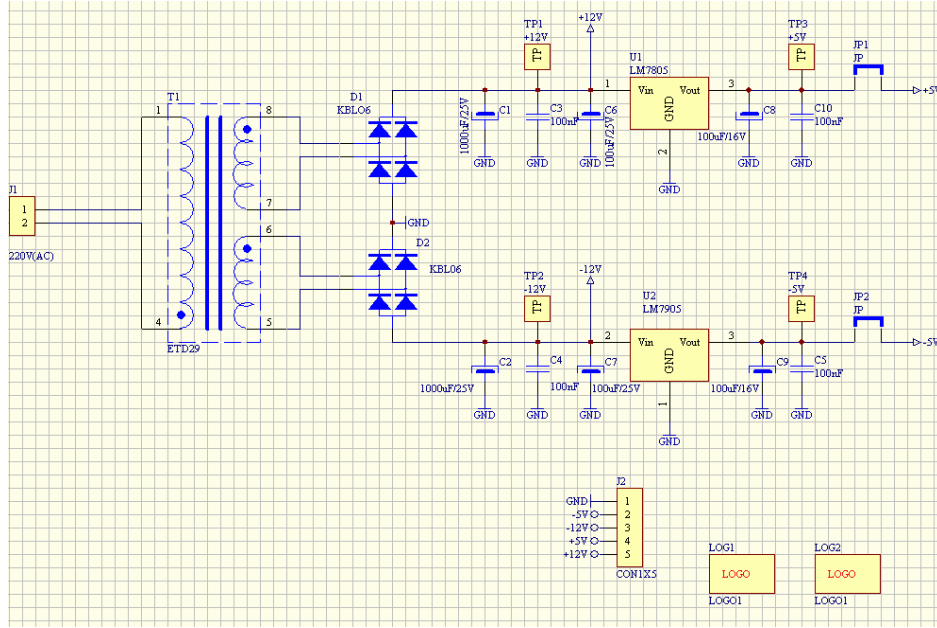
Reaktöre seri bağlı olan triyak elemanına (BTA41) tetikleme sinyallerini göndermek için izoleli bir sürme devresi kullanılmıştır. Böylece kontrol ünitesi, istenmeyen durumlara karşı korunmuştur.



Şekil 5.3 Akım-gerilim ölçümü ve triyak tetikleme devre şeması.

5.2.3 Besleme Devresi

Akım ve gerilim örnekleme için kullanılan sensörlerin (algılayıcılar) uygun bir DC gerilimle beslenmeleri gerekmektedir. Bu amaçla çıkış gerilim seviyeleri ± 12 V, ± 5 V ve 0 (Nötr) olan ve devre şeması Şekil 5.4'te verilen güç kaynağı tasarlanmıştır.



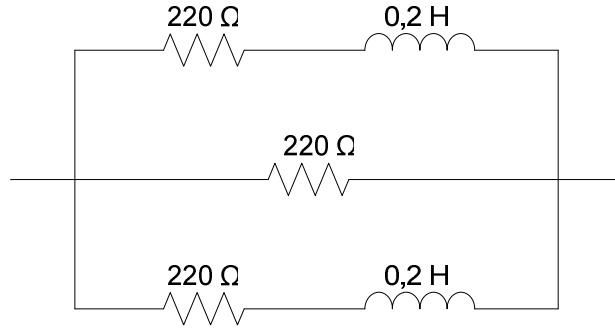
Şekil 5.4 Besleme devre şeması.

5.3 Uygulama Adımları

Deneysel çalışmada 3 farklı durum incelenmiştir. İlk olarak kompanzasyon sisteminin devrede olmaması durumu incelenmiş ve sistemden çekilen reaktif güç gösterilmiştir. İkinci olarak ise sistemde sabit kondansatörün devrede olmasına karşılık sistemin çalıştırılmadığı durum incelenmiştir. Son olarak kompanzasyon sisteminin devrede olması durumu incelenmiştir.

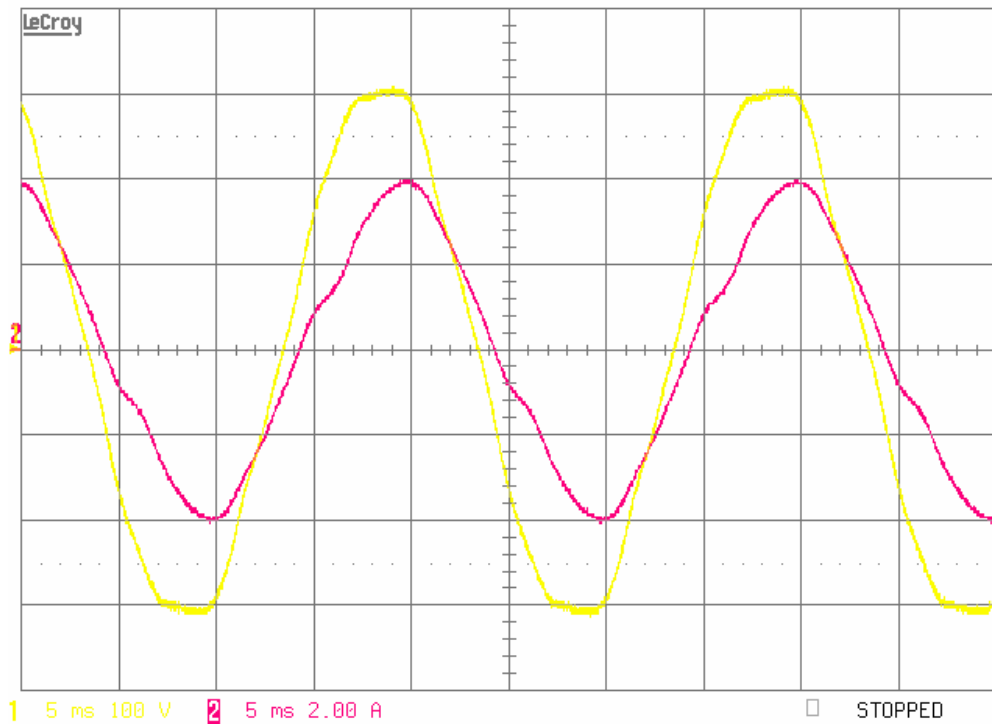
5.3.1 Yüklerin Devrede ve Kompanzasyon Sisteminin Devre Dışı Olduğu Durum

Bu durumda şebekeye Şekil 5.5'te gösterildiği gibi omik-endüktif bir yük gurubu bağlanarak akım ve gerilim ölçümü alınmıştır. Şekil 5.6'da görüldüğü gibi bu durumda omik-endüktif yük nedeniyle akım ile gerilim arasında faz farkı oluşmuş ve sistemden endüktif reaktif güç çekilmiştir.



Şekil 5.5 Devreye alınan yükler.

Akım ve gerilim dalga şekillerinin tam sinüsoidal olmaması, şebekedeki harmoniklerden kaynaklanmaktadır. Sistemin asıl amacı reaktif güç kompanzasyonu yapmak olduğundan harmonikleri söndürmek için herhangi bir filtre kullanılmamıştır.



Şekil 5.6 Kompanzasyon sistemi olmadığı durumda endüktif yükün akım ve gerilim karakteristiği.

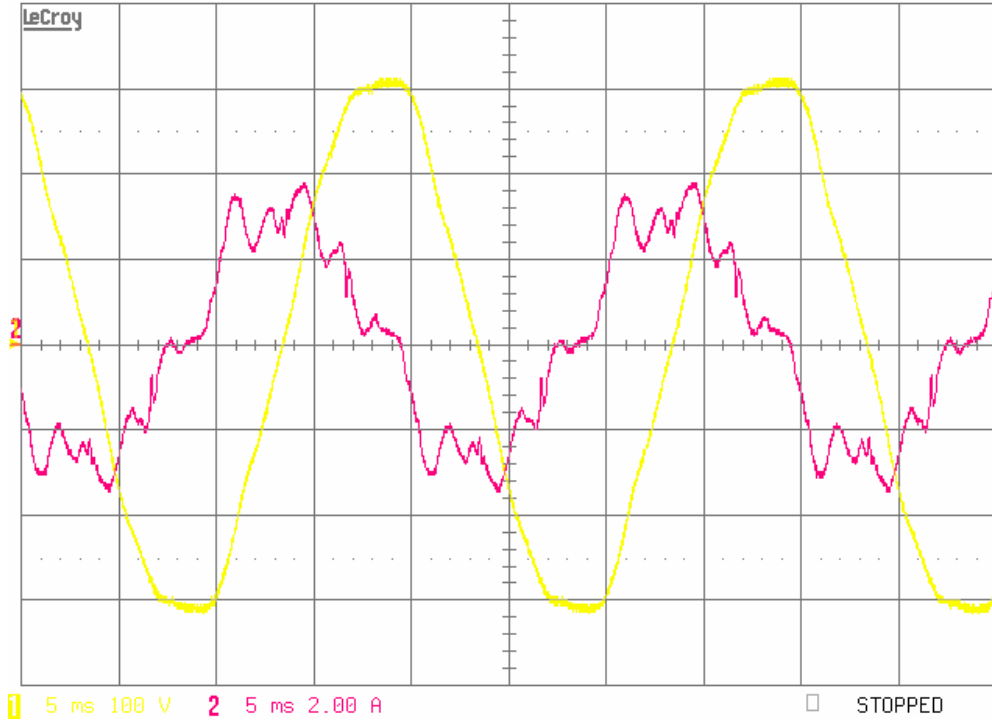


Şekil 5.7 Kompanzasyon sistemi devrede olmadığı durumda analog güç ölçer göstergesi.

Şekil 5.7’den de görüldüğü gibi kompanzasyon yapılmazken devredeki yüklerle bağlı olarak sistem endüktif olarak yüklenmektedir.

5.3.2 Yüklerin ve Sabit Kondansatörün Devrede Olduğu Durum

Bu durumda ise sisteme önceden bağlı yüklerle ek olarak paralel bir kondansatör bağlanmıştır. Bu durumdaki akım-gerilim karakteristiği Şekil 5.8’te gösterilmiştir. Şekilden de görüldüğü gibi akım ile gerilim arasında kondansatörden dolayı meydana gelen 90 derecelik kapasitif faz farkı bulunmaktadır, yani akım gerilimden 90 derece ileridedir. Bilindiği gibi kondansatörler tek başlarına harmonik oluşturmazlar, ancak gerilimi harmonikli olan bir şebekede harmonik akımlarının artmasına sebep olurlar. Dolayısıyla deney düzeneğinin bağlı olduğu şebekede de harmonikli bileşenler olduğundan kondansatörün devreye girmesiyle akımdaki harmonik değerlerinde bir artış meydana gelmiştir. Sabit kondansatör değeri, çalışılacak olan yüklerin endüktif reaktif güç değerine göre hesaplanarak bu değerden büyük olacak şekilde belirlenmelidir. Eğer gerekenden daha küçük bir değere sahip bir kondansatör seçilirse reaktör hiç devreye alınmasa bile sistem şebekeden endüktif reaktif güç çekecektir. Diğer yandan kondansatör değerinin büyük olmaması da gerekmektedir. Çünkü kondansatörün olduğundan büyük olması maliyeti arttıracaktır.



Şekil 5.8 Yüklerin ve sabit kondansatörün devrede olması durumunda akım ve gerilim dalga şekilleri.

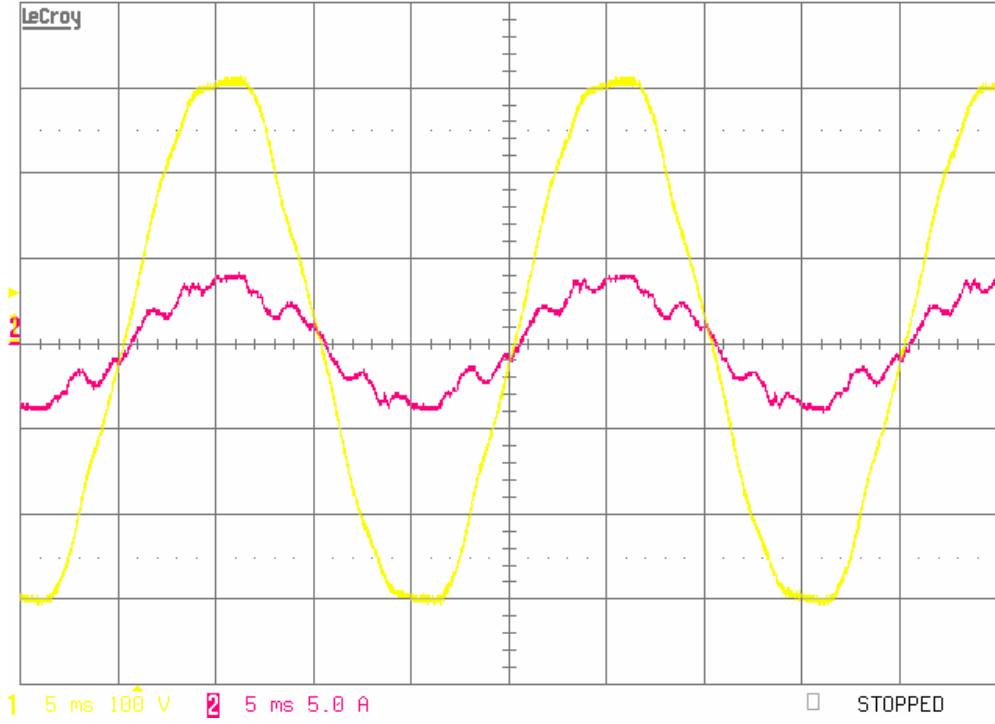


Şekil 5.9 Yüklerin ve sabit kondansatör devrede olduğunda analog güç ölçer göstergesi.

Sistemde kontrollü bir kompanzasyon olmadığında yani sadece kondansatörün bağlı olduğu durumda sistemin kapasitif olarak yüklenmesi Şekil 5.9'daki güç ölçer göstergesinden de görülmektedir.

5.3.3 Kompanzasyon Sisteminin Devrede Olduğu Durum

Bu durumda kompanzasyon sistemi devreye alınarak akım ve gerilim ölçümleri tekrarlanmıştır. Şekil 5.10'da görüldüğü gibi akım ve gerilim arasındaki faz farkı sıfıra yaklaştırılarak reaktif güç kompanzasyonu gerçekleştirilmiştir. Bu durumda ölçülen reaktif güç, güç ölçerden alınmıştır ve Şekil 5.11'de gösterilmiştir.



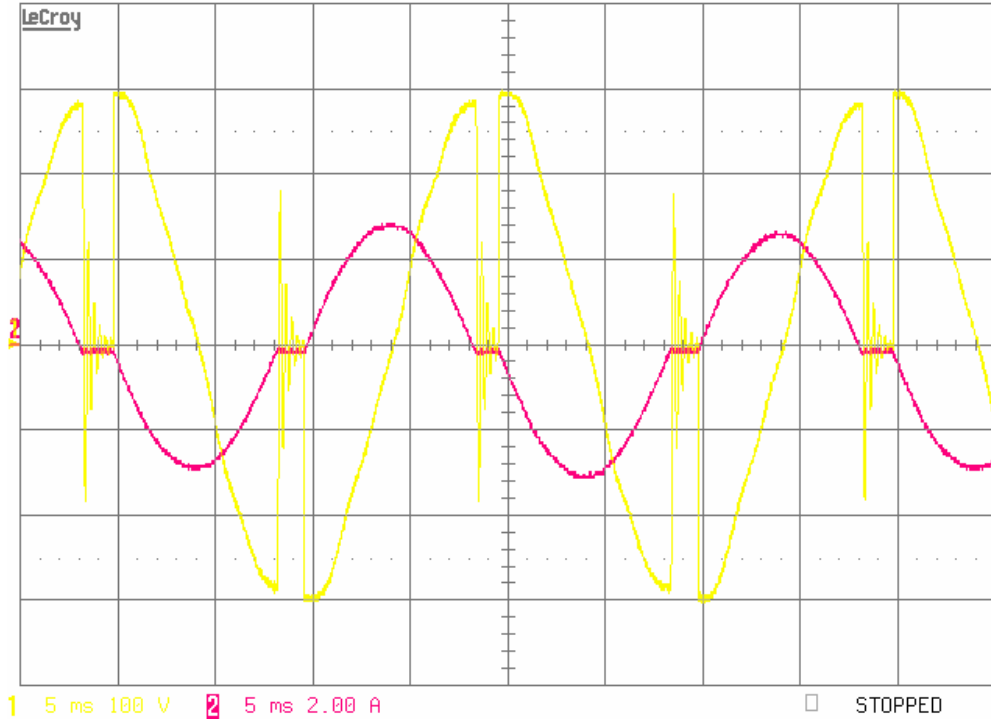
Şekil 5.10 Kompanzasyon sisteminin devrede olduğu durumundaki akım-gerilim karakteristiği.



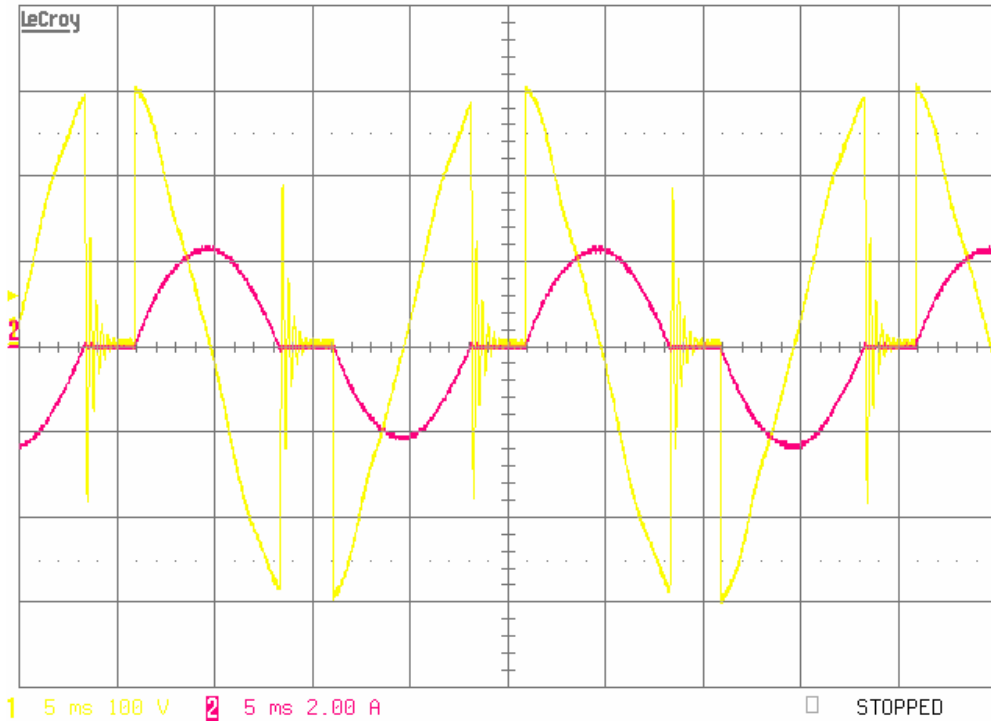
Şekil 5.11 Kompanzasyon sistemi devrede olduğunda analog güç ölçer göstergesi.

Şekil 5.10'daki dalga şekilleri incelendiğinde sistemden çekilen akımın reaktif bileşeninin azalmasına bağlı olarak sistemden çekilen toplam akımın belirgin bir şekilde azaldığı görülmüştür. Bunun sebebi reaktif gücü şebekeden karşılayan sistemin, ihtiyacı olan reaktif güce bağlı olarak şebekeden reaktif akım çekmesidir. Akımın reaktif bileşeni kondansatörden karşılanarak şebekeden çekilen akım azaltılmıştır.

Triyak tetiklenirken dikkat edilmesi gereken önemli bir nokta da akımda DC bileşen oluşmaması için α tetikleme açısının 90° ile 180° arasında kalmasıdır. Şekil 5.12 ve Şekil 5.13'te reaktör gerilimi ve reaktör akımı farklı yüklenme durumları için elde edilmiştir. Triyak elemanının iletimde olduğu durumda reaktör üzerinden geçen akım ve reaktör üzerindeki gerilim gözükmemektedir. Triyak elemanı kesimde olduğu zaman ise reaktör üzerinden akım akmadığı için reaktör üzerinde gerilim de oluşmaz. İhtiyaç olan endüktif reaktif güce göre tetikleme sinyallerindeki değişime bağlı olarak akımın dalga şeklindeki değişim gözlenebilmektedir. Triyak elemanının kesime geçtiği anda oluşan salınımları azaltmak için söndürme (snubber) devresi kullanılmıştır. Daha kaliteli bir söndürme (snubber) devresi ile bu salınımlar daha da azaltılabilir.



Şekil 5.12 Kompanzasyon sisteminin devrede olduğu durumdaki reaktörün akım-gerilim dalga şekilleri.



Şekil 5.13 Kompanzasyon sisteminin devrede olduğu ve endüktif yük durumunda reaktörün akım-gerilim dalga şekilleri.

5.4 Uygulama Sonuçları

Yapılan deneysel çalışmalar sonucunda kompanzasyon sistemi devrede iken reaktif güç sıfıra yakın bir değere kadar düşürülerek kompanzasyonun sağlandığı görülmektedir.

Bu uygulamadaki amaç, FACTS cihazlarından biri olan SVC'yi kullanarak, reaktif güç desteğinin kontrollü olarak ihtiyacı giderecek şekilde verilmesidir. Gerçekleştirilen sistemde sabit kondansatörün kapasitif etkisi, reaktif güç değerine göre reaktörle sınırlandırılmıştır. Yüke bağlı olarak değişen reaktif güç değeri kontrol edilerek reaktör tetiklenmiş ve şebekeden çekilen reaktif güç sıfıra yakın bir değere indirilmiştir.

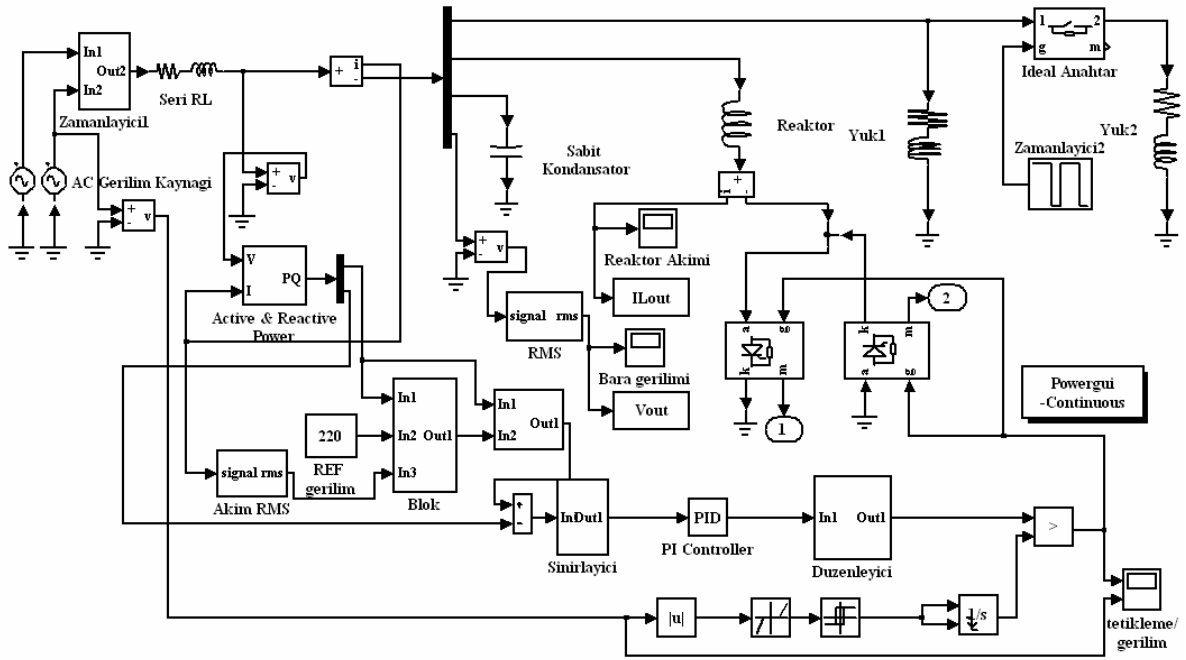
İlk aşamada yapılan FACTS cihazlarının temelini oluşturan SVC sistemi bundan sonra yapılacak çalışmalara yönelik bir alt yapı oluşturmaktadır. Daha sonraki çalışmalarda SVC'lerin gerilim üzerine etkisi uygulama olarak incelenebilir ve gerilim üzerine olan etkinin hangi FACTS cihazlarıyla daha iyi olabileceği araştırılabilir.

Bu bölüme kadar yapılan çalışmalar göz önüne alındığında ve özellikle literatür çalışmalarından edinilen bilgiler doğrultusunda RS'lerin hayatımızda gün geçtikçe daha çok rol oynayacağı söylenebilir. Dolayısıyla RS'lerden dolayı kaynaklanan veya bağlanmış olduğu sistemden kaynaklanan gerilim problemleri de öncelikli giderilmesi gereken problemlerin başında gelmektedir. Araştırılan bilgilere göre görülüyor ki bu oluşan gerilim problemleri FACTS cihazları yardımıyla çözülebilmektedir.

Uygulama alanı çok geniş olan SVC'ler hem kurulum hem de maliyet açısından ekonomik olması nedeniyle en çok tercih edilen yöntemdir. Şimdiye kadar yapılmış birçok uygulamada başarı sağlamıştır. Yapmış olduğumuz FC-TCR uygulamasında da, bu tip kompanzasyon sistemlerinin donanımsal açıdan çok kolay kontrol edilebildiği ve istenilen sisteme uygun bir hale çok kolay bir şekilde getirilebileceği gösterilmiştir.

6. FC-TCR (SABİT KONDANSATÖRLÜ TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR) SİSTEMİ SİMÜLASYONU VE SONUÇLARI

Simülasyon çalışmasında SVC'nin temel tiplerinden olan FC-TCR (sabit kondansatörlü tristör kontrollü reaktör) sistemi kullanılmıştır. Yapılan tek fazlı sistemde, hat geriliminin efektif değeri 220 V'tur. AC gerilim kaynağı sistemi beslemektedir. Ayrıca devrede rüzgar santrallerinin devreye girip çıkmaları esnasında meydana gelen gerilim dalgalanmalarını gösterebilmek için ikinci bir gerilim kaynağı kullanılmıştır. 0,2. saniyede gerilimde artış olması sağlanmış ve 0,7. saniyede ise yine gerilim kaynakları anahtarlanarak bara geriliminin düşmesi sağlanmıştır. Devrede, sabit olan bir RL yükü ve sistemin çalıştığını gösterebilmek açısından sürekli devreye girip çıkan RL yükü vardır. Bilindiği gibi yüklerin sürekli olarak devreye girip çıkmaları gerilim bozulmalarına yol açmaktadır. Yapılan simülasyon çalışmasının devre şeması Şekil 6.1'de gösterilmiştir.



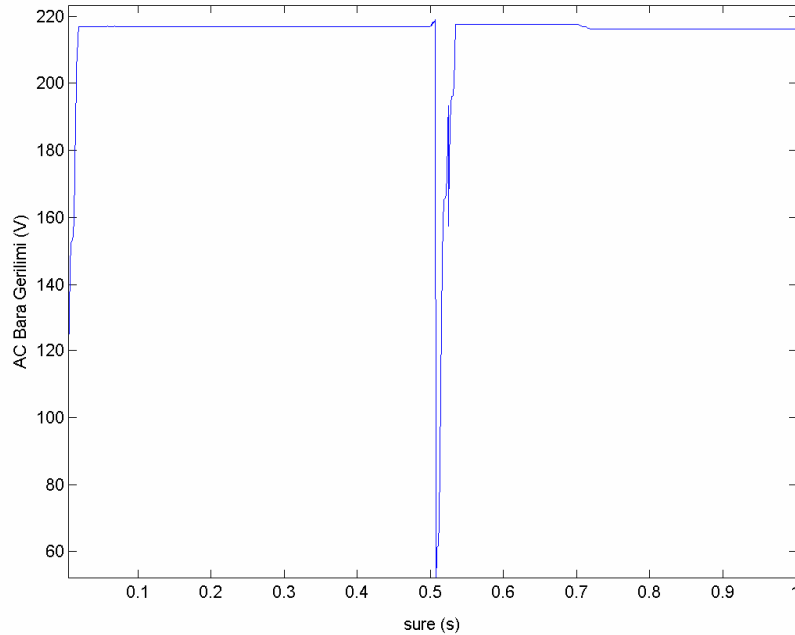
Şekil 6.1 Simülasyon devre şeması

Yapılan çalışmada bara gerilimi baz alınarak gerilim kontrolü yapılmıştır. Bara gerilimi, referans gerilimi olan 220 V ile karşılaştırılarak katsayıları Çizelge 6.1'de verilen PID kontrolörden geçirilmiştir. Katsayılar, sistemin kararlı hal hatası ve yükselme zamanları da dikkate alınarak belirli testler sonucunda belirlenmiştir.

Çizelge 6.1 PID katsayıları

PID Katsayıları	K_P	K_I	K_D
	0.005	0.11	0

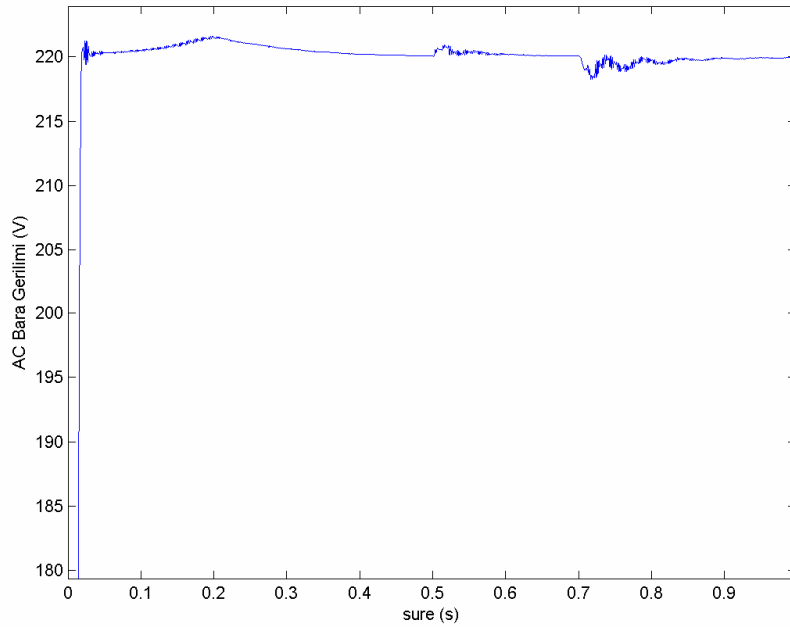
Kontrolörün çıkışından alınan kontrol sinyalleri reaktörü devreye almak için kullanılan anahtarlama elemanlarının kapı uçlarına gitmektedir. FC-TCR sistemi devreye alındığında kontrolör sistem gerilimini sürekli kontrol ederek reaktörleri devreye alıp çıkaracak sinyalleri üretmektedir. Eğer TCR sistemi devrede olmazsa sistemde yük değişimlerinden ve kaynak geriliminin değişiminden kaynaklanan gerilim değişimleri Şekil 6.2'deki gibi olacaktır. Özellikle yüklerin devreye girip çıktığı anlarda (0,5. saniyede yük devre dışı) gerilimde ciddi bozulmalar meydana gelmektedir. Hatta 220 V'un altına düşen gerilim hata sonrasında dahi eski seviyesine gelememektedir. Sistemde kontrol olmadığı için sistem düştüğü veya yükseldiği gerilim kademesinde, bir sonraki yük değişimi veya kaynak gerilim değişimine kadar sabit kalmaktadır.



Şekil 6.2 FC-TCR sistemi devrede değil iken gerilim dalga şekli

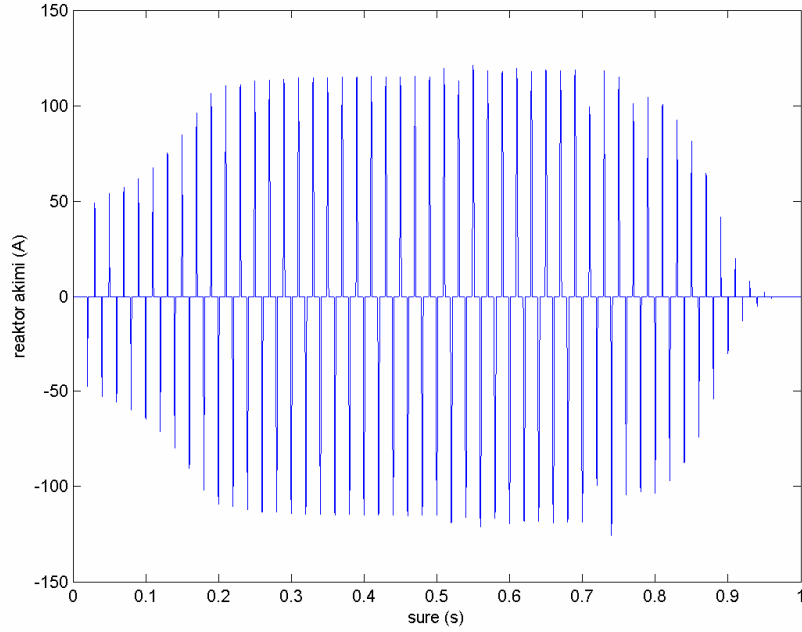
Ancak TCR sisteminin devrede olması durumunda bara gerilimi kolaylıkla kontrol edilebilmekte ve gerilim referans gerilim olan 220 V civarında tutulabilmektedir. Şekil 6.3'te

bu durumda meydana gelen gerilim dalga şekli gösterilmektedir. Yüklerin devreye girip çıktığı anlarda ve gerilim kaynaklarından kaynaklanan gerilim değişimleri, kısa süreli küçük bozulmalara neden olsa da kontrollü bir şekilde bu bozulmalar kısa sürede kontrol edilmiş ve gerilim sabit bir seviyeye çekilmiştir. Gerilim yükseldiğinde reaktör daha çok devreye alınmış ve devrede daha fazla olan kapasitif etki azaltılarak gerilim seviyesinin istenilen seviyede tutulması sağlanmaya çalışılmıştır aynı zamanda belirlenen gerilim seviyesinin altına düştüğünde ise reaktör daha az devreye alınarak gerilimin yükselmesi sağlanmıştır. Gerilim düzenlenirken meydana gelen kısa süreli dalgalanmalar yüklerin anahtarlanması için kullanılan anahtar elemanlarından kaynaklanmaktadır.



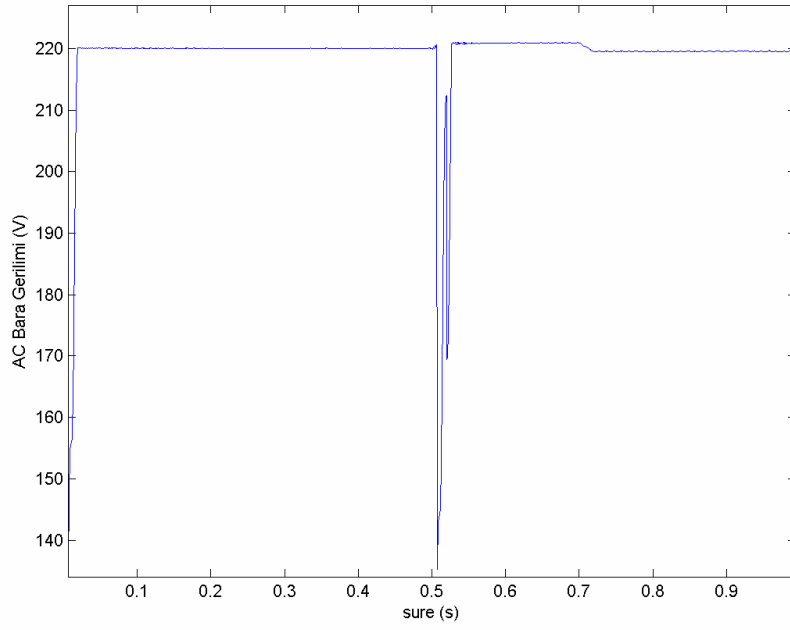
Şekil 6.3 FC-TCR sistemi devrede iken gerilim dalga şekli

FC-TCR sistemi devreye alındığında eğer reaktöre sinyal geliyor ve devreye giriyorsa reaktör üzerinden bir akım geçecektir. Bu akım belirli bir kontrol aralığında geçeceğinden sünizoidal olmayacaktır. Şekil 6.4'te verilen akım dalga şekline göre sünizoidal eğride, tetiklemeden dolayı bazı kırpmalar meydana gelmektedir. Bu dalga şekli reaktörden ihtiyaç olunan endüktif reaktif gücü sağlayacak X_L değerinin elde edildiğini göstermektedir. Özellikle gerilim dalgalanmalarının yaşandığı zamanlarda tetikleme sinyalinin ve reaktörden geçen akımın dalga şeklinin değişmesi olasıdır. Bara gerilimi karşılaştırılan gerilim seviyesinin (220V) altına düştüğü anda kontrol sinyali kesilir ve reaktör üzerinden geçen akım sıfırdır.



Şekil 6.4 Reaktör üzerinden geçen akımın dalga şekli

Sistemde sadece tetikleme uçları kopartılırsa yani reaktörü devreye alıp çıkaran anahtarlama elemanlarının tetikleme kesilirse sistem barasında meydana gelecek olan gerilim dalga şekli, Şekil 6.5'te gösterilmiştir. Bu durumda da gerilim üzerinde bir kontrol olmadığından bara geriliminde, yükün devreye girip çıktığı noktalarında ve gerilim kaynağından kaynaklanan gerilim değişimleri sırasında ciddi bozulmalar meydana gelmektedir.



Şekil 6.5 Sistemde reaktör tetiklemesi yok iken gerilim dalga şekli

Sonuç olarak FC-TCR sisteminin gerilim üzerinde olumlu etkileri bulunmaktadır. Özellikle rüzgar santrallerinde buna benzer gerilim bozulmaları çok sık olmaktadır. Gerek yüklerden kaynaklanan gerekse de rüzgar santralinden kaynaklanan hızlı gerilim değişimleri, bağlantı noktasındaki barada buna benzer bozuk bir gerilim oluşmasına sebep olmaktadır. Bu sorunları asgariye indirebilmek için en iyi, en ekonomik ve en kolay yollardan birisi FACTS cihazlarından olan SVC'nin kullanılmasıdır. Uygulama ve simülasyon çıktılarından da görülüyor ki SVC çok kolay bir şekilde kontrol edilebilmekte ve sisteme uygulanması da diğer sistemlere göre daha kolay bir biçimde gerçekleştirilebilmektedir.

7. SONUÇLAR

Bu tez çalışmasında sistemde meydana gelen güç kalitesi problemlerinin azaltılmasına yönelik çalışmalar ele alınmıştır. Özellikle son yıllarda çok önemli bir konu haline gelen RS'lerin meydana getirdiği veya RS'lerin maruz kaldığı problemler ele alınmıştır. RS'lerin yerel şebekelere bağlanmasıyla şebekeyi çok ciddi bir şekilde etkilemektedirler ve şebekede meydana gelen bozulmalardan da ciddi bir şekilde etkilenmektedirler.

Bu bozulmaların azaltılması RS'lerin geleceği açısından çok önemli bir konu olmuştur. Yapılan araştırmalarda bu problemlerin giderilmesine yönelik birçok çalışma yapılmıştır. Bunlardan en yaygın ve uygulanması daha kolay ve ucuz olan SVC sistemleri bu tez çalışmasının konusu olmuştur. Problemlerin giderilmesine yönelik uygulama ve simülasyon çalışmaları yapılmıştır. Yapılan çalışmalar genellikle gerilim üzerindeki bozulmalara yöneliktir. Çünkü tüketicileri ve RS'leri en çok etkileyen sorunlardan birisi de bu durumdur. Yapılan çalışmalarda kullanılan SVC sistemi, kullanım avantajlarından dolayı bu sorunların giderilmesinde en pratik yollardan biri olduğunu göstermiştir.

Gerçekleştirilen araştırma ve çalışmalar ileride yapılacak olan daha geniş kapsamlı çalışmalar için bir ön hazırlık oluşturmuştur. Daha sonraki çalışmalarda yaşanan problemlerin daha iyi nasıl giderilebileceği ve hangi sistemler kullanılarak bu problemlerin asgariye düşürülebileceği belirlenebilir. Bu yapılan çalışma ile bu konuda yeterli bir alt yapı hazırlanmıştır.

Özellikle ele alınan gerilim dalgalanması veya çökmesi problemleri konusunda SVC'nin yanı sıra birlikte kullanımı giderek artan STATCOM konusunda çalışmalar ileriye yönelik olarak yapılabilir. STATCOM'la yapılacak simülasyon ve uygulamalar sonucunda, SVC ile STATCOM arasında hem ekonomik hem de teknik açıdan kıyaslamalar yapılabilir ve en uygun olanının, nasıl seçilebileceği konusunda kriterler belirlenebilir.

KAYNAKLAR

- Acha, E., Fuerte-Esquivel, C.R., Ambriz-Perez, H. ve Angales-Camacho, C., (2004), FACTS: Modelling And Simulation In Power Networks, John Wiley & Sons, London.
- Akhmatov, V., Knudsen, H., Nielsen, A.H., Pedersen, J.K. ve Poulsen, N.K., (2000), “A Dynamic Stability Limit of Grid-Connected Induction Generators”, Proc. International IASTED Conference on Power and Energy Systems, Marbella.
- Akhmatov, V. ve Eriksen, P.B., (2007), “A Large Power System in Almost Island Operation- A Danish Case Study”, IEEE Trans. Power Systems, 22:937-943.
- Arnold, R., (2001), “Solution to the Power Quality Problem”, Power Engineering Journal, 15:65-73
- Arunchalam, M., Ghamandi, L., Rajiv, C.G. ve Narayanan B., “Performance verification of TCSC control and protection equipment using RTDS” 15th Power Systems Computation Conference, 22-26 August, 2005, Liege.
- Blazic, B. ve Pasic, I., (2006), “Improved D-StatCom Control for Operation With Unbalanced Currents and Voltages”, IEEE Transactions on Power Delivery, 21:225-233.
- Bird, L., Parsons, B., Gagliano, T., Brown, M., Wisner, R. ve Bolinger, M., (2005), “Policies and Market Factors Driving Wind Power Development in the United States”, Energy Pol., 33:1397-1407.
- Bohmann, L.J. ve Lasseter, R.H., (1986), “Equivalent Circuit for Frequency Response of a Static VAR Compensator”, IEEE Transactions on Power Systems, 1:68-74.
- Bohmann, L.J., Lasseter, R.H., (1990), “Stability and Harmonics in Thyristor Controlled Reactors”, IEEE Transactions on Power Delivery, 5:1175-1181.
- Bousseau, P., Fesquet, F., Belhomme, R., Nguéfeu, S. ve Tha, T.C., (2006), “Solution for the Grid Integration of Wind Farms – A Survey”, Wind Energy, 9:13-25.
- Byung-Moon, H., Hee-Joong, K., Seung-Taek, B., (2002) , “Performance Analysis of SSSC Based on Three-Level Multi-Bridge PWM Inverter”, Electric Power Systems Research, 61:195-202.
- Caldara, S., Nuccio, S. ve Spataro, C., (1998), “A Virtual Instrument for Measurement of Flicker”, IEEE Trans. Instrumentation and Measurement, 47:1155-1158.
- Canizares, C.A. ve Faur, Z.T., (1999), “Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse”, IEEE Transactions on Power Systems, 14:158-165.
- Canizares, C., (2001), “Voltage Stability Assessment, Procedures and Guides”, IEEE/PES Power system stability subcommittee special publication, Final draft (<http://www.power.uwaterloo.ca>).
- Cheng, C.H. ve Hsu, Y.Y., (1990), “Application of Power System Stabilizers and a Static VAR Controller to a Multimachine Power System”, IEEE Proceeding on Generation.
- Han, C., Huang, A.Q., Litzemberger, W., Anderson, L., Edris, A.A., Baran, M., Bhattacharya, S. ve Johnson, A., (2006), “STATCOM Impact Study on the Integration of a Large Wind Farm into a Weak Loop Power System”, Power Systems Conference and Exposition, 29 Oct. - 1 Nov. 2006.

Chompoo-inwai, C., Yingvivanapong, C., Methaprayon, K. ve Lee, W.J, (2005), "Reactive Compensation Techniques to Improve the Ride-Through Capability of Wind Turbine during Disturbance", IEEE Transactions on Industry Applications, 41:666-672.

De Alegria, I.M., Andreu, J., Martin, J.L., Ibanez, P., Villate, J.L. ve Camblong, H., (2006), "Connection Requirements for Wind Farms: A Survey on Technical Requirements and Regulation", Renewable and Sustainable Energy Reviews, 11:1858-1872.

Dolan, P.S., Mith, J.R.S. ve Mittelstadt, W.A., (1995), "A Study of TCSC Optimal Damping Control Parameters for Different Operating Conditions", IEEE Transactions on Power Systems, 10:1972-1978.

El-Shimy, M., Badr, M.A.L. ve Rassem, O.M., (2008) "Impact of large scale wind power on power system stability", Power System Conference, 12-15 Marc 2008, Aswan.

Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenilirliği ve Kalitesi Yönetmeliği, (2004).

Endres B., Thiele G., Bonfanti I., Testi G., (1989), "Design and Operational Testing on Thyristor Modules for The SVC Kemps Creek," IEEE Power Engineering Society Winter Meeting, Nov. 1989, 1321-1326.

Enrique, A., et al., (2004), "FACTS Modelling and Simulation in Power Networks", John Wiley&Sons Ltd., London.

Erinmez I.A., (2003), "Static Synchronous Compensator (STATCOM) for Arc Furnace and Flicker Compensation", Electra, 211:58-65.

Eromon, D., (2005), "Distributed Energy Resource (DER) Using FACTS, STATCOM, SVC and Synchronous condensers for Dynamic Systems Control of VAR", NAIT Convention, Dec. 2005, St. Louis.

Farret, F.A. ve Simoes, M.G., (2006), "Integration of Alternative Sources of Energy", John Wiley & Sons, New Jersey.

Foster, S., Xu, L. ve Fox B., (2006), "Grid Integration of Wind Farms Using SVC and STATCOM", 41st International Universities Power Engineering Conference, 6-8 Sept. 2006, Newcastle.

Gallo, D., Landi, C. ve Pasquino, N., (2008), "An Instrument for Objective Measurement of Light Flicker", Measurement, 41:334-340.

Gelen, A., Yalcinoz, T., (2007), "Analysis of TSR-Based SVC for a Thre-Phase System with Staticand Dynamic Loads", ICEE '07 International Conference.

Gertmar L.,(2003), Power Electronics and Wind Power.

Grünbaum, R., (2000), "SVC Light: A Powerful Means for Dynamic Voltage and Power Quality Control in Industry and Distribution", 8th Power Electronics and Variable Speed Drives International Conference, 18-19 Sep. 2000, London.

Grünbaum, R., Halonen, M. ve Strömberg G., (2008), "SVC for 69 kV Direct Grid Connection", Transmission and Distribution Conference and Exposition, 21-24 April 2008, Chicago.

Gyugyi, L., (1988), "Power Electronics in Electric Utilities: Static Var Compensators", Proceedings of IEEE, Proceedings of The IEEE, 76:483-495.

Gyugyi, L., (1993), "Solid-State Synchronous Voltage Sources for Dynamic Compensation and Real-Time Control of AC Transmission Lines", Emerging Practices in Technology, IEEE-Transmission Lines, IEEE Standards Pres, Piscataway, USA.

Gyugyi, L., (1994), "Dynamic Compensation of AC Transmission Line by Solidstate Synchronous Voltage Sources", IEEE Transactions on Power Delivery, 9:904-911.

Gyugyi, L., Schauder, C. D. ve Sen, K. K., (1997), "Static synchronous series compensator: a solid-state approach to the series compensation of transmission lines", IEEE Transactions on Power Delivery, 12:406-417.

http://www.mypersonallender.com/images/wind_farm.jpg

Ha T.L., Saha, T.K., (2004), "Investigation of Power Loss and Voltage Stability Limits for Large Wind Farm Connection to a Subtransmission Network", IEEE Power Engineering Society general meeting, 6-10 June 2004.

Hingorani, N.G. ve L. Gyugyi, (1999), "Understanding FACTS, Concepts and Technology of flexible ac transmission system", IEEE Pres, New York.

Holdsworth, L., Wu, X.G., Ekanayake, J.B. ve Jenkins, N., (2003), "Comparison of Fixed-Speed and Doubly-Fed Induction Generator Wind Turbines During Power System Disturbances", IEE Proc. C – Gener., Transm. Distrib., 150(3): 343-352.

Huang, G. M., Li, Y., (2003), "Composite Power System Reliability Evaluation for Systems with SVC and TCPAR", Power Engineering Society General Meeting, 13-17 July 2003, Toronto.

IEEE/PES, (1999), "Power System Stability Subcommittee Report on Voltage Stability Assessment, Procedures and Guides", Final draft.

Jager-Waldau, A. ve H. Ossenbrink, (2004), "Progress of Electricity from Biomass, Wind and Photovoltaics in the European Union.", Renew Sustain Energy Rev, 8:157-182.

Jowder, F.A.L., (2005), "Influence of Mode of Operation of the SSSC on the Small Disturbance and Transient Stability of a Radial Power System", IEEE Transactions on Power Systems, 20:935-942

Kanellos, F. ve N. Hatziargyriou, (2002), "The Effect of Variable-Speed Wind Turbines on the Operation of Weak Distribution Networks", IEEE Trans Energy Conv, 17:543-548.

Kara, A. ve Yalcinoz, T., (2005), "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, İstanbul, 138-147.

Kennedy, B., (2004), "Integrating Wind Power Transmission and Operational Impacts", Refocus, 1:36-37.

Kerhli, A., Ross, M., (2003), "Understanding Grid Integration Issues at Wind Farms and Solutions Using Voltage Source Converter FACTS Technology", Power Engineering Society General Meeting, 13-17 July 2003.

Kirby, B., Hirst, E., (1997), "Ancillary Service Details:Voltage Control", Oak Ridge National Laboratory, Dec. 1997, Ohio.

- Kodsi, K.M.S., Cañizares, A.C. ve Kazerani, M., (2006s) "Reactive current control through SVC for load power factor correction", *Electric Power Systems research*, 76:701-708.
- Kundur, P., (1994), "Power System Stability and Control, McGraw-Hill".
- Larsen, E., Miller, N., Nilsson, S., Lindgren, S., (1991) "Benefits of Gto-based Compensation Systems for Electric Utility Application" *IEEE Power Eng. Soc.*, 397:1-8.
- Marzio, G.D., Fosso, O.B., Uhlen, K., Palsson, M., (2005), "Large Scale Wind Power Integration, Voltage Stability Limits and Modal Analysis",. 15th Power Systems Computation Conference, 2005, Liege
- Masters, G.M., (2004), "Renewable and Efficient Electric Power Systems", John Wiley & Sons, USA, Incorporated.
- Miller, J. E., (1982), "Reactive Power Control in Electric Systems" John Wiley & Sons, New York.
- Molinas, M., Suul, J.,A., (2008), Low Voltage Ride Through of Wind Farms With Cage Generators: STATCOM Versus SVC, *IEEE Power Electronics*, 23(3):1104-1117.
- Mori, S., Matsuno, K., Hasegawa, T., Ohnishi, S., Takeda, M., Murakami, S., ve Ishiguro, F., (1993), "Development of a Large Static Var Generator Using Self-Commutated Inverters for Improving Power Systems Stability", *IEEE Power Systems*, 8(1):371-377.
- Muljadi, E., Butterfield, C.P., Yinder, R., Romanowitz, H., (2003), Energy Storage and Reactive Power Compensator in a Large Wind Farm, *AIAA Aerospace Sciences Meeting and Exhibit*, 5-8 Jan. 2004, Nevada .
- Noroozian, M., Petersson, N., Thorvaldson, B., Nilsson, B.A., Taylor, C.W., (2003), "Benefits of SVC and STATCOM for Electric Utility Application", *IEEE, PES Transm. Distrib. Conf. Expo*, 3(7):1143-1150.
- Quaschnig, V., (2005), "Understanding Renewable Energy Systems".
- Palssoni, M.P., Toftevaag, T., Uhlen, K., Tande, J.O.G.,(2002), "Large Scale Wind Power Integration and Voltage Stability Limits in Regional Network", *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting*, 22-25 Jul. 2002.
- Peng, F.Z. ve Lai, J.S., (1996), "A Multilevel Voltage –Source Inverter with Separate DC Sources for Static Var Generation", *IEEE Transactions on Industry Applications*, 32:1130-1138.
- Polisetty, V.K., Jetti, S.R., (2006), Venayagamoorthy, G.K., Harley, G.H., Intelligent Integration of a Wind Farm to an Utility Power Network with Improved Voltage Stability, *Industry Application Conference*, 8-12 Oct. 2006.
- Schauder, C. ve Mehta, H., (1993), "Vector Analysis and Control of Advanced Static VAR Compensator", *IEE Proc. C.*, 140(4):299-3061.
- Salehi, V., Afsharnia, S., Kahrobaee, S., (2006), "Improvement of Voltage Stability in Wind Farm Connection to Distribution Network Using FACTS Devices", *IEEE Industrial Electronics*, 4242-4247.
- Tan, O., Paap, G.C., Kolluru, M.S., (1993), "Thyristor-Controlled Voltage Regulators For Critical Induction Motor Loadas Dring Voltage Disturbances", *IEEE*, 8:100-106.

- Tande, J.O.G., (1998), "Impact of Wind Turbines on Voltage Quality", Proceedings of 8th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 14-16 Oct. 1998, 1158-1161.
- Tande, J.O.G. ve Uhlen, K., (2001), "Wind Turbines in Weak Grids-Constraints and Solutions", 16th International Conference and Exhibition on CIRED, 18-21 June 2001.
- Tande, J.O.G., (2002), "Applying Power Quality Characteristics of Wind Turbines for Assessing Impact on Voltage Quality", Wind Energ., 5:37-42.
- Tande, J.O.G., (2003), "Grid Integration of Wind Farms", Wind Energ., 6:281-295.
- TMMOB., TMMOB Reaktif Güç Kompanzasyonu Seminer Notları, (1999), EMO, İstanbul.
- Türkiye Rüzgar Enerjisi (T.R.E) Birliği., (2008), "Rüzgar Enerjisi Sektör Raporu".
- Uzunoğlu, M., Kocatepe, C., (2001) "Tristör Kontrollü Reaktör İçeren Statik VAR Kompanzatorler ve Harmonik Etkinliği", 3e-Electrotech, 82:116-120.
- Wang, H.F., Swift, F.J., (1997), "A unified Model for Analysis of FACTS Devices in Damping Power System Oscillations Part 1: Single-Machine Infinite-Bus Power Systems", IEEE Transactions on Power Systems, 15(3):978-983.
- Woodford D., (2003), "How FACTS Controllers Function in an AC Transmission System" Power Engineering Society General Meeting, 10 June 2004, Montreal.
- Xu, W., Marti, J.R. ve Herman, W.D., (1991) "Harmonic Analysis of Systems with Static Compensators", IEEE Transactions on Power Systems with Static Compensators, 1(6): 183-190.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	08.07.1983	
Doğum yeri	Çorum	
Lise	1997-2001	Çorum Atatürk YDA Lisesi
Lisans	2001-2006	Yıldız Teknik Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü