DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR SANTRALİNDE GERİLİM VE GÜÇ KONTROLÜNÜN FACTS CİHAZLARI İLE İNCELENMESİ

Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2010
DÜZCE

DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YÜKSEK LİSANS TEZİ

RÜZGAR SANTRALİNDE GERİLİM VE GÜÇ KONTROLÜNÜN FACTS CİHAZLARI İLE İNCELENMESİ

Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

ELEKTRİK EĞİTİMİ ANABİLİM DALI

HAZİRAN 2010
DÜZCE

Mehmet Kenan DÖŞOĞLU tarafından hazırlanan RÜZGAR SANTRALİNDE GERİLİM VE GÜÇ KONTROLÜNÜN FACTS CİHAZLARI İLE İNCELENMESİ adlı bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.

Yrd.Doç.Dr.Ali ÖZTÜRK……
Tez Danışmanı, Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

Bu çalışma, jürimiz tarafından oy birliği / oy çokluğu ile Anabilim Dalında Yüksek Lisans olarak kabul edilmiştir.

Doç.Dr.Nedim TUTKUN……..
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr.Ali ÖZTÜRK…….
Elektrik Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Düzce Üniversitesi

Yrd.Doç.Dr.Bilal SARAÇOĞLU…….
Elektrik Eğitimi Anabilim Dalı, Düzce Üniversitesi

Tarih : 30/06/2010

Bu tez ile Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu Yüksek Lisans derecesini onamıştır.

Prof. Dr. Refik KARAGÜL…….
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

TEZ BİLDİRİMİ

Tez içindeki bütün bilgilerin etik davranış ve akademik kurallar çerçevesinde elde edilerek sunulduğunu, ayrıca tez yazım kurallarına uygun olarak hazırlanan bu çalışmada bana ait olmayan her türlü ifade ve bilginin kaynağına eksiksiz atıf yapıldığını bildiririm.

Mehmet Kenan DÖŞOĞLU

ÖNSÖZ

Bu tez çalışması süresince bilgileri ve tecrübesi ile bana her zaman yardımcı olan olan sayın hocam Yrd. Doç.Dr. Ali ÖZTÜRK'e teşekkürlerimi sunarım. Ayrıca tez çalışmam boyunca bana her konuda destek veren sevgili aileme teşekkür etmeyi bir borç bilirim.
.

Haziran 2010 **Mehmet Kenan DÖŞOĞLU**

İÇİNDEKİLER **Sayfa**

ÖNSÖZ ..... **iv**

İÇİNDEKİLER ..... **v**

ŞEKİL LİSTESİ ..... **viii**

ÇİZELGE LİSTESİ ..... **x**

SEMBOLLER DİZİNİ ..... **xi**

ÖZ ..... **xiii**

ABSTRACT ..... **xiv**

1. GİRİŞ **1**

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI **2**

1.2. TEZİN AŞAMALARI **2**

2. GENEL KISIMLAR **4**

2.1.LİTERATÜR TARAMASI **4**

3. MATERYAL VE YÖNTEM **7**

3.1. RÜZGAR TÜRBİNLERİ **7**

3.2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ANA BÖLÜMLERİ **7**

3.2.1. Türbin Gövdesi **7**

3.2.2. Pervane **8**

3.2.3. Kule **9**

3.2.4. Dişli Kutusu **9**

3.2.5. Generatör **10**

3.3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SINIFLANDIRILMASI **11**

3.3.1. Eksenlerine Göre Sınıflandırma **11**

3.3.1.1. Dikey Eksenli Türbinler **11**

3.3.1.2. Yatay Eksenli Türbinler **11**

3.3.2. Güçlerine Göre Sınıflandırma **12**

3.3.3. Dişli Sistemine Göre Sınıflandırma **12**

3.3.4. Kanat Sayılarına Göre Sınıflandırma 12
3.3.5. Kullanılan Generatör Çeşitlerine Göre Sınıflandırma 13
3.4. RÜZGAR GÜCÜ 17
3.5. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KONTROL SİSTEMLERİ 20
3.6. ÇEVİRİCİLER 21
3.6.1. Akım Beslemeli Çeviriciler (ABÇ) 21
3.6.2. Gerilim Beslemeli Çeviriciler (GBÇ) 22
3.6.2.1. Tek Fazlı Gerilim Beslemeli Çeviriciler 22
3.6.2.2. Üç Fazlı Gerilim Beslemeli Çeviriciler 23
3.6.2.3. Darbe Genişlik Modülasyonu Gerilim Beslemeli Çevirici 25
3.7. FACTS CİHAZLARI 27
3.7.1. FACTS Cihazlarının Yararları 27
3.7.2. FACTS Cihazlarının Zararları 29
3.8. STATİK SENKRON KOMPANZATÖR (STATCOM) 29
3.8.1. Gerilim Kaynaklı Konvertör (VSC) STATCOM 30
3.8.2. STATCOM Yapısı 30
3.8.3. STATCOM Çalışması 31
3.8.4. STATCOM V-I Karakteristiği 33
3.8.5. STATCOM Kontrolü 35
3.9. STATİK VAR KOMPANZATÖR (SVC) 36
3.9.1. SVC V-I Karakteristiği 38
3.9.2. SVC Kontrolü 40
3.10. STATİK SENKRON SERİ KOMPANZATÖR (SSSC) 41
3.10.1. SSSC Durum Analizi 44
3.10.2. SSSC Çalışma Modları 44
4.5.3. SSSC Kontrolü 45
3.11. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPANZATÖR (TCSC) 46
3.11.1. TCSC Sürekli Durum Analizi 47
3.11.2. TCSC Çalışma Modları 49
3.11.3. TCSC Kontrolü 49
3.12. BİRLEŞTİRİLMİŞ GÜÇ AKIŞI KONTROLÜ (UPFC) 50
3.12.1. UPFC Çalışma Karakteristiği 50

3.13. FACTS CİHAZLARINDA KONTROL YAPILARI 52
3.13.1. Oransal Türev (PD) Kontrol Yapısı 52
3.13.2. Oransal İntegral (PI) Kontrol Yapısı 53
3.13.3. Oransal İntegral Türev (PID) Kontrol Yapısı 54
4.BULGULAR 56
4.1. RÜZGAR SANTRALİNDE FACTS CİHAZLARININ KULLANIMI İLE ELDE EDİLEN SONUÇLAR 56
4.1.1. STATCOM Kullanarak Rüzgar Santralinin Gerilim ve Güç Analizi 56
4.1.2. SVC Kullanarak Rüzgar Santralinin Gerilim ve Güç Analizi 61
4.1.3. SSSC Kullanarak Rüzgar Santralinin Gerilim ve Güç Analizi 65
4.1.4. TCSC Kullanarak Rüzgar Santralinin Gerilim ve Güç Analizi 69
4.2. RÜZGAR SANTRALİNDE DEĞİŞKEN YÜKLERİN ETKİSİ 74
4.2.1. STATCOM'un Rüzgar Santralindeki Değişken Yüklerde Gerilim ve Güç Analizi 74
4.2.2. SVC'nin Rüzgar Santralindeki Değişken Yüklerde Gerilim ve Güç Analizi 78
4.2.3. SSSC'in Rüzgar Santralindeki Değişken Yüklerde Gerilim ve Güç Analizi 82
4.2.4. TCSC'ün Rüzgar Santralindeki Değişken Yüklerde Gerilim ve Güç Analizi 86
5. SONUÇ VE TARTIŞMA 92
KAYNAKLAR 94
ÖZGEÇMİŞ 98

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 3.1 : Türbin gövdesinin genel görünümü (Güneş, 2006). **8**
Şekil 3.2 : Rüzgar türbininde dişli kutusu (Güneş, 2006). **9**
Şekil 3.3 : Generatör genel yapısı (Güneş, 2006). **10**
Şekil 3.4 : Dikey eksenli türbinler (Toklu, 2007). **11**
Şekil 3.5 : Yatay eksenli türbinler (Toklu, 2007). **11**
Şekil 3.6 : Çift kanatlı türbin (Toklu, 2007). **12**
Şekil 3.7 : Üç kanatlı türbin (Toklu, 2007). **13**
Şekil 3.8 : Alan sargılı senkron generatör (Uyar ve diğ., 2005) **14**
Şekil 3.9 : Daimi mıknatıslı senkron generatör (Uyar ve diğ., 2005) **15**
Şekil 3.10 : Çift beslemeli asenkron generatör (Uyar ve diğ., 2005) **16**
Şekil 3.11 : Sincap kafesli asenkron generatör (Uyar ve diğ., 2005) **16**
Şekil 3.12 : Rüzgar türbini pervanesinden geçen havanın enerji hareketi **18**
Şekil 3.13 : Üç Fazlı ABÇ (Çöteli, 2006). **21**
Şekil 3.14 : Tek fazlı GBÇ (Çöteli, 2006) **22**
Şekil 3.15 : Tek fazlı GBÇ'nin akım ve gerilim dalga şekilleri (Çöteli, 2006) **23**
Şekil 3.16 : Üç fazlı GBÇ (Çöteli, 2006) **24**
Şekil 3.17 : Üç fazlı GBÇ'nin akım ve gerilim dalga şekilleri (Çöteli, 2006) **25**
Şekil 3.18 : DGM çeviricisinin çalışması (Çöteli, 2006) **26**
Şekil 3.19 : STATCOM devre modeli (Ertay, 2006) **31**
Şekil 3.20 : VSC'nin aktif akım ve reaktif akım çalışma bölgeleri (Çöteli, 2006) **32**
Şekil 3.21 : STATCOM V-I karakteristiği (Ertay, 2006) **34**
Şekil 3.22 : STATCOM'daki kayıplar (Çöteli, 2006). **35**
Şekil 3.23 : STATCOM gerilim kontrolü (Eminoğlu, 2003) **35**
Şekil 3.24 : STATCOM faz açısı kontrolü (Eminoğlu, 2003) **36**
Şekil 3.25 : SVC genel yapısı (Ertay, 2006) **37**
Şekil 3.26 : SVC V-I karakteristiği (Ertay, 2006) **39**
Şekil 3.27 : SVC kontrol modeli (Eminoğlu, 2003). **41**
Şekil 3.28 : SSSS genel yapısı (Ertay, 2006) **42**
Şekil 3.29 : SSSC eşdeğer devresi ve fazör diyagramı (Ertay, 2006) **43**
Şekil 3.30 : SSSC dört bölge çalışması (Dirik, 2006) **44**
Şekil 3.31 : SSSC kontrol modeli (Kamarposhi ve diğ., 2008) **45**
Şekil 3.32 : TCSC genel yapısı (Ertay, 2006) **46**
Şekil 3.33 : TCSC kontrol modeli (Kamarposhi, 2008). **50**
Şekil 3.34 : UPFC genel sistem şeması (Ertay, 2006) **51**
Şekil 3.35 : PD kontrol yapısı (Yüksel, 2001) **52**
Şekil 3.36 : PI kontrol yapısı (Yüksel, 2001) **53**
Şekil 3.37 : PID kontrol yapısı (Yüksel, 2001) **55**
Şekil 4.1 : Rüzgar santralinin STATCOM ile modellenmesi **57**
Şekil 4.2 : STATCOM ile yük barası gerilim değişimi **58**
Şekil 4.3 : STATCOM ile yük barası aktif güç değişimi **59**
Şekil 4.4 : STATCOM ile yük barası reaktif güç değişimi **60**
Şekil 4.5 : Rüzgar santralinin SVC ile modellenmesi **61**
Şekil 4.6 : SVC ile yük barası gerilim değişimi **62**
Şekil 4.7 : SVC ile yük barası aktif güç değişimi **63**

Şekil 4.8 : SVC ile yük barası reaktif güç değişimi **64**
Şekil 4.9 : Rüzgar santralinin SSSC ile modellenmesi **65**
Şekil 4.10 : SSSC ile yük barası gerilim değişimi **66**
Şekil 4.11 : SSSC ile yük barası aktif güç değişimi **67**
Şekil 4.12 : SSSC ile yük barası reaktif güç değişimi **68**
Şekil 4.13 : Rüzgar santralinin TCSC ile modellenmesi **69**
Şekil 4.14 : TCSC ile yük barası gerilim değişimi **70**
Şekil 4.15 : TCSC ile yük barası aktif güç değişimi **71**
Şekil 4.16 : TCSC ile yük barası reaktif güç değişimi **72**
Şekil 4.17 : Rüzgar santralinin STATCOM ile değişken yük modellemesi **75**
Şekil 4.18 : Farklı yüklerde STATCOM ile yük barası gerilim değişimi **76**
Şekil 4.19 : Farklı yüklerde STATCOM ile yük barası aktif güç değişimi **77**
Şekil 4.20 : Farklı yüklerde STATCOM ile yük barası reaktif güç değişimi **78**
Şekil 4.21 : Rüzgar santralinin SVC ile değişken yük modellemesi **79**
Şekil 4.22 : Farklı yüklerde SVC ile yük barası gerilim değişimi **80**
Şekil 4.23 : Farklı yüklerde SVC ile yük barası aktif güç değişimi **81**
Şekil 4.24 : Farklı yüklerde SVC ile yük barası reaktif güç değişimi **82**
Şekil 4.25 : Rüzgar santralinin SSSC ile değişken yük modellemesi **83**
Şekil 4.26 : Farklı yüklerde SSSC ile yük barası gerilim değişimi **84**
Şekil 4.27 : Farklı yüklerde SSSC ile yük barası aktif güç değişimi **85**
Şekil 4.28 : Farklı yüklerde SSSC ile yük barası reaktif güç değişimi **86**
Şekil 4.29 : Rüzgar santralinin TCSC ile değişken yük modellemesi **87**
Şekil 4.30 : Farklı yüklerde TCSC ile yük barası gerilim değişimi **88**
Şekil 4.31 : Farklı yüklerde TCSC ile yük barası aktif güç değişimi **89**
Şekil 4.32 : Farklı yüklerde TCSC ile yük barası reaktif güç değişimi **90**

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 4.1 : 4MW ve 2MVAr yük değerlerinde elde edilen sonuçlar.....**72**
Çizelge 4.2 : 5MW ve 3MVAr yük değerlerinde elde edilen sonuçlar.....**73**
Çizelge 4.3 : 6MW ve 4MVAr yük değerlerinde elde edilen sonuçlar.....**73**
Çizelge 4.4 : Değişken yüklerin değerleri ve devreye girme zamanları **74**
Çizelge 4.5 : Rüzgar santralinde FACTS cihazlarının değişken yüklerde aldığı değerler…..……..**91**

SEMBOLLER DİZİNİ

V_r : Rüzgar hızı [m/s]
m : Kütle [gr]
P_h : Hava yoğunluğu
A : Rüzgar alanı [m^2]
P_r : Rüzgar iş yapabilme yeteneği
P_t : Türbinden elde edilecek güç [W]
C_P : Türbin verimi
V_d : Çevirici çıkışından elde edilecek gerilim [V]
f_t : Taşıyıcı dalga frekansı [Hz]
f_m : Modülasyon dalga frekansı [Hz]
m_f : Modülasyon oranı
V_t : Taşıyıcı dalga genliği [V]
V_m : Modülasyon dalga genliği [V]
V_{ac} : AC sistem gerilimi [V]
V_{inv} : İnvertör çıkışındaki gerilim [V]
X : Transformatör kaçak reaktansı [Ω]
P : STATCOM'a aktarılan güç [W]
I_p : Aktif akım bileşeni [A]
I_q : Reaktif akım bileşeni [A]
p : Darbe sayısı
f_h : Harmonikli frekans [Hz]
X_e : SVC ve TCSC eşdeğer reaktans [Ω]
X_c : SVC ve TCSC kapasitif reaktansı [Ω]
V_i : Kapasitör gerilimi [V]
B_i : Eşdeğer süseptans [Ω]
Q_{SVC} : SVC reaktif gücü [VAr]
V_{ref} : Referans gerilimi [p.u.]
X_l : TCR reaktansı [Ω]
X_c : TSC kapasitesi [Ω]
T_1 : Denetleyici zaman sabiti [s]
T_2 : Denetleyici zaman sabiti [s]
X : Hat reaktansı [Ω]
k : Seri kompanzasyon katsayısı
V_q : Sisteme enjekte edilen gerilim [V]
K_B : Yükselme faktörü
V_{pq} : Seri gerilim [V]
m(t) : Türev ve integral etki çıkışı
E(s) : Giriş fonksiyonu
M(s) : Çıkış fonksiyonu
K_p : Oransal katsayı
K_i : İntegral katsayı
K_d : Türev katsayı
AC : Alternatif Akım
DC : Doğru Akım

AT : Akım Transformatörü
GT : Gerilim Transformatörü
FACTS : Esnek AC İletim Sistemi
IGBT : Kapıdan İzoleli Bipolar Tristör
GTO : Kapıdan Tıkamalı Tristör
ABÇ : Akım Besleyici Çevirici
GBÇ : Gerilim Beslemeli Çevirici
DGM : Darbe Genişlik Modülasyonu
STATCOM : Statik Senkron Kompanzatör
VSC : Gerilim Kaynaklı Konverter
SVC : Statik Var Kompanzatör
TCR : Tristör Kontrollü Reaktör
TSC : Tristör Anahtarlamalı Kapasitör
SSSC : Statik Senkron Seri Kompansatör
TCSC : Tristör Kontrollü Seri Kompansatör
UPFC : Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolü
PD : Oransal Türev
PI : Oransal İntegral
PID : Oransal İntegral Türev

RÜZGAR SANTRALİNDE GERİLİM VE GÜÇ KONTROLÜNÜN FACTS CİHAZLARI İLE İNCELENMESİ

(Yüksek Lisans Tezi)

Mehmet Kenan Döşoğlu

DÜZCE ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ
Haziran 2010

ÖZ

Bu çalışmada şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralinde yük barası gerilim aktif güç ve reaktif güç değişimleri Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) cihazları ile incelenmiştir. Çalışılan sistemde FACTS cihazları olarak Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) Statik Var Kompanzatör (SVC), Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC) ve Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC) kullanılmıştır. Rüzgar santralinde generatör olarak Çift Beslemeli Asenkron Generatör (ÇBAG) kullanılmıştır. Çalışmalar Matlab/Simulink ortamında gerçekleştirilmiştir. Aktif-reaktif yük modellerinde yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç değişimleri şekiller ve tablolar halinde sunulmuştur. Yapılan çalışma sonucunda, rüzgar santralinde FACTS cihazlarının kullanılması ile sistemde oluşabilecek kararsızlık durumlarının kısa süre içerisinde iyileştirildiği görülmüştür.

Bilim Kodu :
Anahtar Kelimeler : Rüzgar santrali, STATCOM, SVC, SSSC, TCSC, çift beslemeli asenkron generatör, gerilim, aktif güç, reaktif güç
Sayfa Adedi : 98
Tez Yöneticisi : Yrd. Doç. Dr. Ali ÖZTÜRK

INVESTIGATION OF VOLTAGE AND POWER CONTROL IN THE WIND PLANT USING THE FACTS DEVICES

(M.Sc. Thesis)

Mehmet Kenan Döşoğlu

DUZCE UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

June 2010

ABSTRACT

In this study, load bus voltage, active power and reactive power variations were examined by Flexible AC Transmission Systems (FACTS) devices in a wind farm which runs connected to grid. In this system, FACTS devices such as; Static Synchronous Compensators (STATCOM), Static Var Compensators (SVC), Static Synchronous Series Compensators (SSSC) and Thyristor Controlled Series Compensators (TCSC), were used. A double feed induction generator (CBAG) was used in the wind plant. These simulation studies were carried out by Matlab/ Simulink. Voltage, active power and reactive power variation in the load bus on active and reactive load models were presented with figures and tables. As a result of the study; it can be concluded that by using FACTS devices in the wind farms, possible instability of conditions in the system can be improved.

Science Code:
Key Words: Wind Farm, STATCOM, SVC, SSSC, TCSC, double feed induction generator, voltage, active power, reactive power
Page Number : 98
Adviser : Assistant Prof. Dr. Ali ÖZTÜRK

1. GİRİŞ

Son yıllarda, enerji üretimi için kullanılan fosil yakıtlarının tükenecek miktarda azalmasına bağlı olarak yeni enerji kaynaklarına yönelmeler başlamıştır. Bunlar genel olarak yenilenebilir enerji kaynakları olarak tanımlanmaktadır. Bunlardan en önemlilerinden biri de rüzgar enerjisidir. Rüzgar enerjisi enerji piyasası ve tüketiciler açısından ekonomik olmaktadır. Rüzgar enerjisinin tüketiciler açısından daha verimli olarak kullanabilmesi için rüzgar santrallerine ihtiyaç duyulmaktadır. Rüzgar santralleri, dışarıdan alınan rüzgar hızını, bir sistem içinde kontrollere bağlı olarak generatöründen elektrik enerjisine dönüştüren bir mekanizma olarak tanımlanmaktadır. Daha önceden küçük güçlü olarak imal edilen rüzgar santralleri müstakil yapının beslenmesi için yeterli olabilmekteydi. Ancak son zamanlarda güç sistemlerinin daha karmaşık bir hal alması, talep edilen yükün sürekli değişmesi gibi nedenlerden dolayı güç sistemlerinin desteklenmesi için büyük güçlü rüzgar santrallerinin üretimi önem kazanmıştır. Enterkonnekte çalışan sistemlerde sisteme rüzgar santralinin ilave olması ile güç ve gerilim sınır limitlerinde iyileşmeler olmaktadır. Bunun yanı sıra rüzgar santralleri istenildiği zaman sisteme hızlı bir şekilde alınır veya sistemden çıkartılır. Güç sistemlerinde rüzgar santralinin kullanımının artması da bazı problemleri yanında getirmiştir. Rüzgar santrallerinde uyartım kontrolü küçük güçlü rüzgar santrali için uygun olmasına karşın, büyük güçlü rüzgar santralinde uyartım kontrolü zorlaşmaktadır. Rüzgar santralinde uyartım kontrolünün zorlaşması neticesinde sistem kararsız hale gelebilmektedir. Bunun için güç sistemlerinde aktif güç, reaktif güç, empedans ve gerilim kontrolü için kullanılan güç elektroniği tabanlı sistemler kullanılmaktadır. Bu sistemler Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) olarak tanımlanmaktadır. FACTS cihazlarının büyük güçlü rüzgar santrallerinde kullanımı sayesinde sistem kontrolü sağlanmaktadır.

1.1. ÇALIŞMANIN AMACI

Bu çalışmada, bir rüzgar santralinin şebekeye bağlı olarak çalışması durumunda, yük barasındaki gerilim aktif güç ve reaktif güç değişimleri FACTS cihazlarından SVC, STATCOM, SSSC ve TCSC ile incelenmesi amaçlanmıştır. Bu amaçla tasarlanan örnek bir güç sistemi modelinin benzetim çalışması yapılmıştır. FACTS cihazlarının devrede olması esnasında yük barasındaki gerilim, aktif ve reaktif güç değişimleri, farklı zamanlarda değişken yüklerin devreye girmesi ile yük barası gerilim, aktif güç ve reaktif güç değişimleri incelenerek oluşabilecek kararsızlık durumlarının ortadan kaldırılması hedeflenmiştir.

1.2. TEZİN AŞAMALARI

Yapılan çalışmanın önemi giriş bölümünde anlatılmıştır. Rüzgar santralleri ve FACTS cihazları ile birlikte kullanıldıkları alanlar ile ilgili bilgiler literatür taramasında verilmiştir. Rüzgar türbininin ana bölümleri, rüzgar türbinlerinin güçlerine göre, dişli sistemine göre, kanat sayılarına göre, kullanılan generatör çeşitliliğine göre sınıflandırılması ve rüzgar türbininin kontrol sistemi ile ilgili bilgiler materyal ve yöntem bölümünde verilmiştir.

Güç elektroniği tabanlı akım kaynaklı çeviriciler, gerilim kaynaklı çeviriciler, gerilim beslemeli çeviriciler, tek fazlı gerilim beslemeli çeviriciler, üç fazlı gerilim beslemeli çeviriciler, darbe genişlik modülasyon çeviricilerin yapıları hakkındaki açıklamalar, FACTS teknolojisinin avantajları ve dezavantajları, STATCOM ve SVC'nin yapıları, gerilim-akım ilişkileri ve kontrol yapıları, TCSC ve SSSC yapıları durum analizleri, güç denklemleri ve çalışma bölgeleri; ayrıca UPFC'nin yapısı hakkındaki bilgiler, kontrol yapısı olarak FACTS cihazlarında Oransal Türev (PD), Oransal İntegral (PI) ve Oransal İntegral Türev (PID) yapıları ve özellikleri materyal ve yöntem bölümünde belirtilmiştir.

Bu benzetim çalışmasında şebekeye bağlı bir rüzgar santraline bağlı olarak FACTS cihazlarının sistemdeki etkileri bulgular bölümünde verilmiştir. Rüzgar santrali şebekeye FACTS cihazları ile bağlı iken farklı aktif ve reaktif yüklerdeki gerilim, aktif güç ve raktif güç değişiminin yanı sıra sistemde farklı zamanlarda değişken yüklerin

devrede olması sırasında yük barasının gerilim, aktif güç ve reaktif güç değişim analizi yapılmıştır. Elde edilen gerilim, aktif güç ve reaktif güç şekilleri ve almış oldukları değerler tablolar halinde sunulmuştur.

Sonuç ve tartışma bölümünde FACTS cihazlarının rüzgar santralinde kullanımı ile elde edilen sonuçların yorumlaması, elde edilen sonuçların karşılaştırılması verilmiştir.

2. GENEL KISIMLAR

2.1. LİTERATÜR TARAMASI

Konu ile ilgili daha önceden yapılmış çalışmalar genel olarak şu şekildedir;

Fawzi AL J., şebekeye bağlı olarak çalışan sonsuz baralı bir rüzgar santralinin geçici kararlılık çalışması Statik Seri Senkron Kompanzatör kullanarak incelemiştir. Bu çalışma ile rüzgar santralinde terminal gerilim kontrolü açısından sistemde oluşabilecek salınımların ortadan kaldırıldığı bulunmuştur (Fawzi, 2007).

Nitin N. J. ve Mohan N., yaptıkları çalışmada; şebekeye bağlı bir rüzgar santralinde iletim hattına seri olarak bağlanan TCSC ile rüzgar santralinde kullanılan asenkron generatörün arıza anındaki gerilim, akım ve moment karakteristiğini incelemişlerdir. Geçici kararlılık çalışmasında TCSC kullanılarak, sistemde oluşabilecek kararsızlık durumlarının çok kısa sürede ortadan kaldırıldığı görülmüştür (Nitin ve Mohan, 2006).

Wei Q., Ganesh Venayagomoorthy K. ve Ronald H., çift beslemeli asenkron generatörden oluşan rüzgar santralinin gerçek zamanlı olarak kontrolünü yapmışlardır. Şebekeye bağlanması esnasında ortaya çıkabilecek kararsızlık durumlarının STATCOM ile iyileştirildiği görülmüştür (Wei ve diğ., 2009).

Paulo F.T. ve Hailian X., sincap kafesli asenkron generatöre sahip olan rüzgar santralinde geçici kararlılık anındaki STATCOM'un etkilerini incelenmişlerdir. Rüzgar santralinde kararsızlık durumunun STATCOM'un kullanılmasına bağlı olarak iyileştiği, bu çalışma ile görülmüştür (Paulo ve Hailian, 2005).

Qi L., Langston J. ve Steurer M., yaptıkları çalışmada; sabit hızlı rüzgar santralinin gerilim ve reaktif güç karakteristiğini STATCOM ile incelemişlerdir. Gerilim kararlılığı yönünden incelenen sistemde terminal gerilim, rotor açı ve hız yönünden iyileştirici sonuçlar elde etmişlerdir (Qi ve diğ., 2008).

Wei Qiao, Ronald G. Harley ve Ganesh K. Venayagomoorthy, çok generatörlü güç sistemine bağlı olan rüzgar santralinin aktif güç, reaktif güç ve gerilim değişimleri, rotor açısı, osilasyon sönümlemesi ve güç akışı kontrolünü STATCOM ve SSSC ile incelenmişlerdir. Zorlanmalarda oluşabilecek kararsızlık durumlarında STATCOM ve SSSC'nin etkili olduğu bu çalışma ile görülmüştür (Wei ve diğ., 2009).

Jon Are Suul ve Tore Undeland, yaptıkları çalışmada; küçük güçlü sincap kafesli asenkron generatörden oluşan rüzgar santralinde kayma-moment karakteristiğini STATCOM ve SVC ile incelenmişlerdir. STATCOM ve SVC'nin devrede olması durumunda belli oranlarda reaktans değerleri ile sistemin kayma-moment karakteristiklerini iyileştirdikleri görülmüştür (Jon ve Tore, 2008).

Papantoniou A. ve Coonick A., rüzgar santrallerinde Birleştirilmiş Güç Akışı Kontrolü (UPFC) kullanarak sistemin gerilim, akım ve toplam harmonik dağılımını incelemişlerdir (Papantoniou ve Coonick, 1997).

Hang M. T., Lafzi A. ve Roshan M. A., rüzgar santralinin şebekeye bağlanması esnasında meydana gelebilecek kararsızlık problemlerini için UPFC kullanmışlardır. UPFC ile rüzgar santralindeki aktif güç, reaktif güç, akım, gerilim, rüzgar hızı ve pitch açı kontrolünde oluşacak salınımların ortadan kaldırıldığı görülmüştür (Hang ve diğ., 2008).

Rüzgar santrallerinin kontrolünün sağlanmasında diğer önemli unsurlardan birisi de yük taleplerinin zamana bağlı olarak değişimidir. Sistemde yükün değişimi özellikle de alıcı uçlarında, gerilim ve akımın azalmasına veya artmasına neden olmaktadır. Bunların oluşturabileceği problemlerin giderilmesinde FACTS cihazları etkili olmaktadır.

FACTS cihazlarının değişken yük kontrolünün sağlanması ile ilgili yapılmış olan çalışmalar da bulunmaktadır. Bunlar genel olarak:

Yanmaz K. ve Atlaş İ. H., sonsuz baralı bir güç sisteminde yük barasındaki yük değişimlerini STATCOM ile incelenmişlerdir. Baradaki gerilim ve reaktif güç değişimlerinin Oransal İntegral (PI) ve Bulanık Mantık (BM) kontrol yöntemleri ile karşılaştırmışlardır (Yanmaz ve Atlaş, 2008).

Eminoğlu U., Ayasun S. ve Yalçınöz T. farklı zamanlarda değişken exponansiyel yüklerin kullanıldığı bir güç sisteminde, gerilim değişimlerini ve güç katsayısındaki değişimleri Statik Var Kompanzatör (SVC) ile incelemişlerdir (Eminoğlu ve diğ., 2004).

Eminoğlu U., Yalçınöz T. ve Herdem S., güç sisteminde farklı yük değerlerinin devrede olması durumunda yük akımında, yük geriliminde, aktif güç ve reaktif güç değişimlerinde SVC ve TCSC kullanarak kararlılık yönünden iyileştirici sonuçlar elde etmişlerdir (Eminoğlu ve diğ., 2003).

Moursi M. S. E. ve Sharaf A. M., yaptıkları çalışmada; farklı zamanlarda hatta seri ve paralel yüklerin hat ve yük barasındaki aktif güç, reaktif güç, empedans, akım ve modülasyon indekslerini incelemişlerdir. Hat ve baranın kontrol edilmesinde STATCOM ve SSSC'nin etkili olduğu bu çalışma ile görülmüştür (Moursi ve Sharaf, 2006).

3. MATERYAL VE YÖNTEM

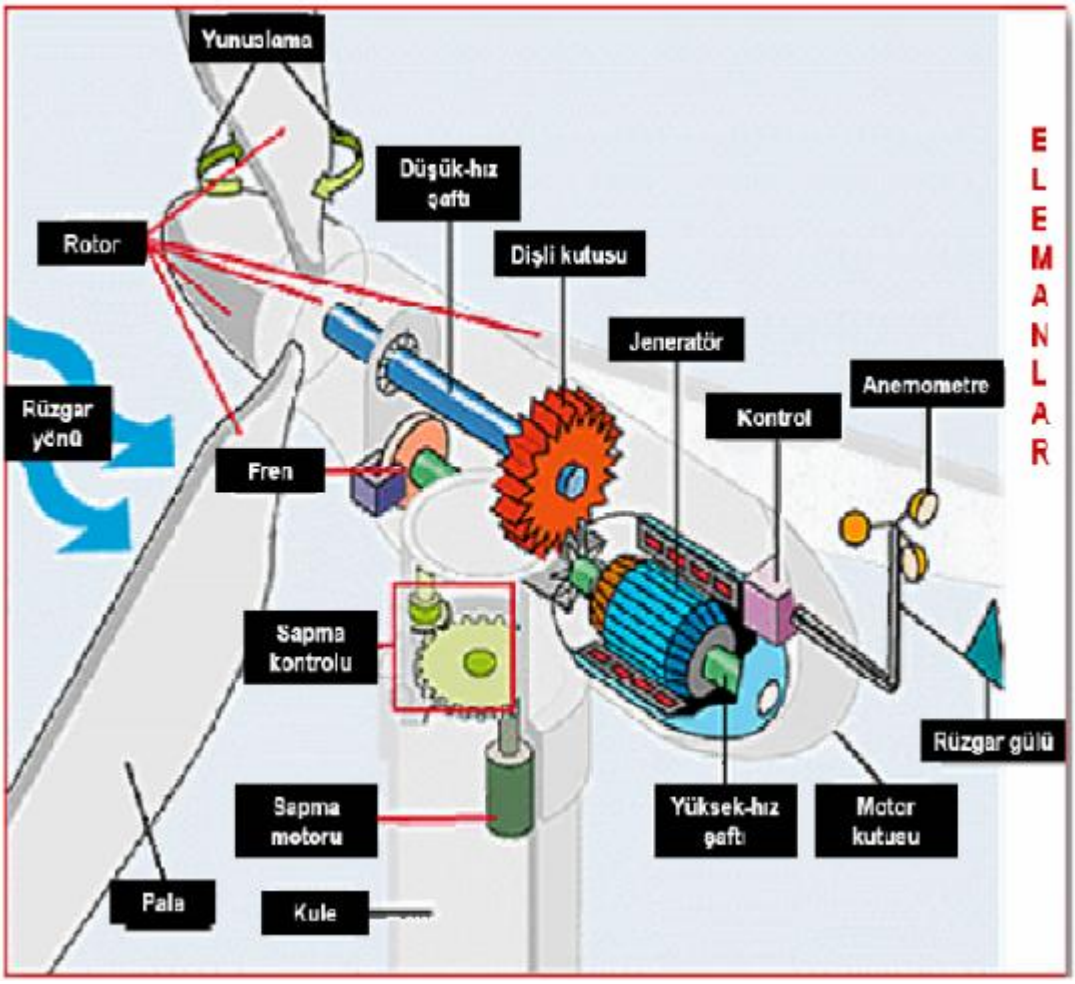
3.1. RÜZGAR TÜRBİNLERİ

Dönme hareketi yapan ve akışkanında bulunan enerjiyi, milindeki mekanik enerjiye dönüştüren makinelere türbin adı verilmektedir. Türbinler genel olarak buhar, gaz, su ve rüzgar türbinleri olarak dört grupta incelenmektedir. Rüzgar türbini; türbin gövdesi, pervaneler ve kuleden oluşmaktadır. Rüzgar türbinde elektrik enerjisinin elde edilmesinde genel olarak rüzgara karşı bir yüzey belirtilmektedir. Bu belirtilen yüzey sayesinde rüzgar basıncında dönme hareketi oluşur. Bu dönme hareketi ile dişli sistemine bağlı olan generatör tarafından elektrik üretilir. Diğer bir ifade ile rüzgar, yüzeye belli bir açıyla gelir ve yüzeye etki eden hava hızının doğrultusunda dik olarak oluşan kaldırma kuvveti ile mekanik hareketi dönme hareketine dönüştürerek elektrik üretir. Rüzgar türbinin rotoru generatöre bağlıdır. Generatör çıkışı istenen gerilim değerini kontrol etmektedir. Rotor milinin bağlı olduğu kısımda düşük ve yüksek hız arasında dişli kutusu bulunmaktadır. Bu dişli kutusu düşük hızda aerodinamik güç üreten türbin tarafından döndürülmektedir (Toklu, 2007).

3.2. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN ANA BÖLÜMLERİ

3.2.1. Türbin Gövdesi

Rüzgar türbin gövdesi, pervane ve kule haricince sistem çalışmasının olduğu yerdir. Dışarıdan gelen rüzgarın generatörün üreteceği güce kadar olan sistem ekipmanlarına türbin gövdesi denmektedir. Türbin gövdesinin genel görünümü şekil 3.1'te verilmiştir.



Şekil 3.1: Türbin gövdesinin genel görünümü (Güneş, 2006).

Türbin gövdesi rotor, fren, dişli kutusu, generatör, anemometre, rüzgargülü, motor kutusu, yüksek hız şaftı, sapma motoru, fren ve pala elemanlarından oluşmaktadır.

3.2.2. Pervane

Gelen rüzgar hareketini şaft vasıtasıyla dişli kutusuna, oradan da generatöre gönderen en dış birimdir. Rotor kanadından etkilenen rüzgar, kanadın gövdesine ve rotorun merkezine doğru hareketlendikçe daha dik bir açıdan gelir. Eğer rotor kanadı çok dik bir rüzgar geliş açısı etkisinde kalırsa, rüzgarın kanadı kaldırma kuvveti azalır ve sıfırlanır. Bu nedenle, rotor kanadı eğilmek zorundadır ve kanadın arka ucu esen rüzgarla aynı yöne doğru itilir. Rüzgar türbinlerinin pervaneleri alüminyum, titan, çelik, elyaf ile güçlendirilmiş plastik ve ağaçtan imal edilmektedir. Çelikten üretilen kanatların eğilmeye dayanımı çok iyidir. Fakat yorulma dayanımları ve korozyon sorun

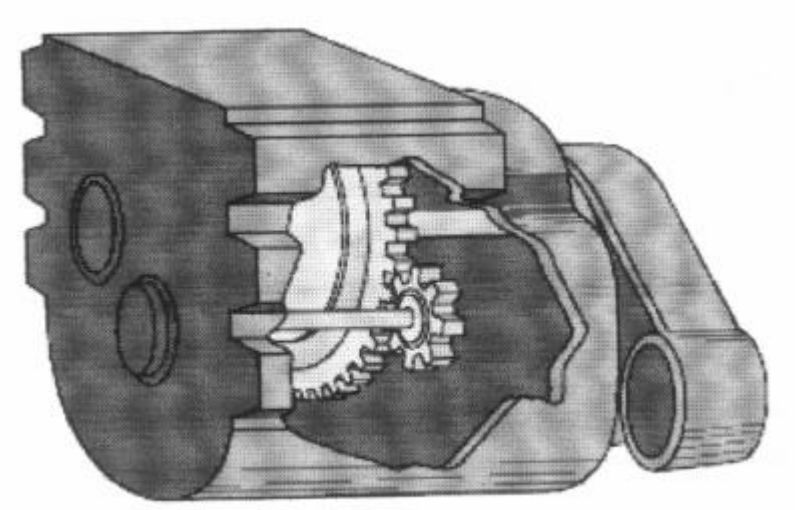
yaratmaktadır. Alüminyum kanatlar, çeliğe göre daha hafiftir ve yorulma dayanımları daha iyidir. Ayrıca korozyona karşı daha dayanıklıdır. Alüminyum malzemenin zayıf noktaları, kabuk şeklindeki malzemenin burkulması, imalat tekniğinin zor ve pahalı olmasıdır.

3.2.3. Kule

Kule malzemesi, genellikle çelik veya betondan yapılır. Modern rüzgar türbinleri enine kesitli türbinlere sahiptir. Kule yüksekliğinin ne kadar olacağı, yüksekteki rüzgar hızlarından yararlanmanın getirisi ile yüksekliğe bağlı olarak artış gösteren kule maliyeti arasındaki uygunluğun hesaplanması ile belirlenir. Kule yüksekliğinin belirlenmesinde maliyete önemli ölçüde etki eden unsurlar, eğilme doğal frekansı ve kule malzemesidir. Rüzgar türbinlerinin tüm imalat giderlerinin %11-20'si kule imalatına harcanır.

3.2.4. Dişli Kutusu

Dişli kutusu dönme sistemleri için mekanik olarak bir artış ve azalış sağlayabilirler. Rüzgar türbinlerinde dişli kutusu, düşük hızlı milin açısal hızını generatörün yüksek mil hızına dönüştürmede kullanılır. Dişli kutusu genel olarak karşılıklı iki dişli arasındaki boşlukta şiddetli tepki gösterirler. Sürücü dişli ile karşı dişli temas etmeden önce bir açı boyunca döner. Sonuç dişlisinin açısal dönüşü, giriş dişlisinin açısal dönüşü başlayana kadar gerçekleşmez. Rüzgar türbinindeki dişli kutusunun genel görünümü şekil 3.2'de verilmiştir.

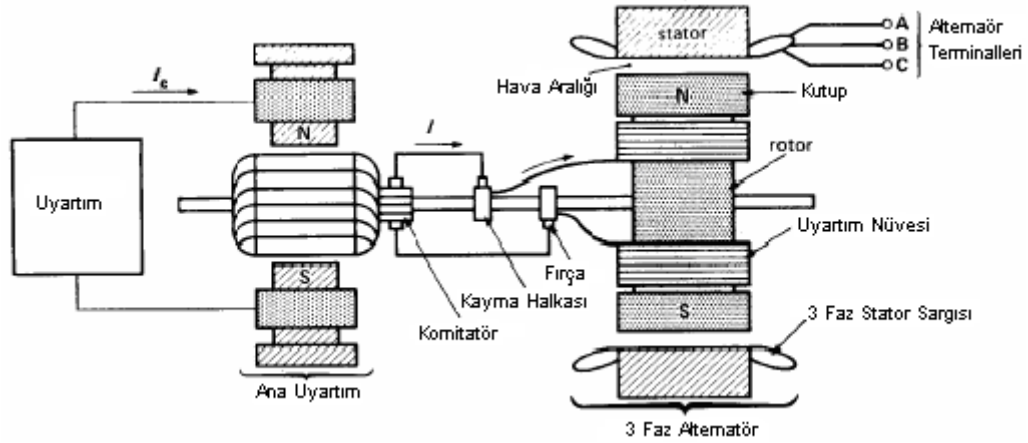


Şekil 3.2: Rüzgar türbininde dişli kutusu (Güneş, 2006).

Dişli kutusunda giriş parametre değerleri, düşük hızlı millerde hız ve momenttir. Çıkış parametre değerleri ise yüksek hız milinde açısal hız ve momenttir.

3.2.5. Generatör

Alternatif akım veya doğru akım generatörleri olarak iki sınıfa ayrılır. Elde edilen elektrik akımı yetersiz kalitede alternatif akım veya doğru akım bile olsa, çeşitli güç elektroniği düzenekleriyle şebekeye uygun hale getirilebilir. Generatörün genel yapısı şekil 3.3'te gösterilmiştir.



Şekil 3.3: Generatör genel yapısı (Güneş, 2006).

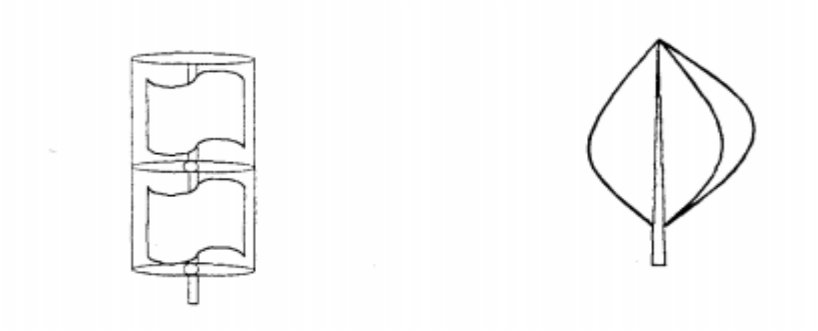
Doğru akım generatörleri büyük güçlü rüzgar enerjisi tesislerinde tercih edilmemektedir. Bunun nedeni sık bakım ihtiyacının olması ve alternatif akım generatörlerden daha pahalı olmasıdır. Doğru akım generatörleri günümüzde sadece küçük güçlü enerji tesislerinde akülere enerji depolamak için kullanılır. Dişlilerde oluşan kayıplar ve gürültülerin engellenmesi için çok kutuplu generatörlerde genellikle dişli kutusuz türbinler tercih edilmektedir (Güneş, 2006).

3.3. RÜZGAR TÜRBİNLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

3.3.1. Eksenlerine Göre Sınıflandırma

3.3.1.1. Dikey Eksenli Türbinler

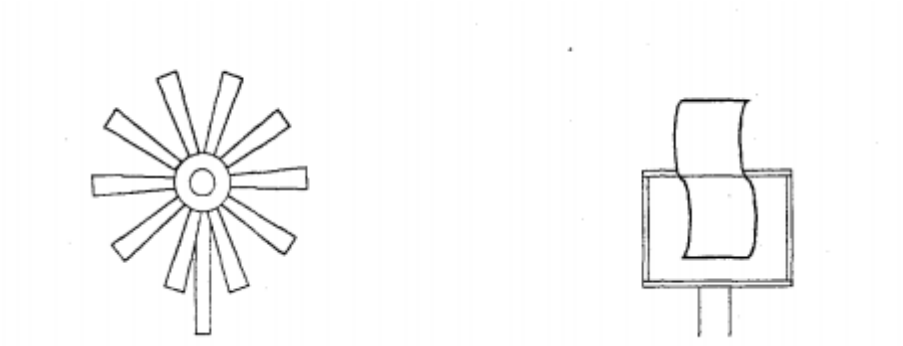
Savonius ve Darrieus türbinler en bilinen örnekleridir. Dönme ekseni rüzgar akım çizgilerine dik olan türbinlerdir. Dikey eksenli olan Savonius ve Darrieus türbinleri şekil 3.4'te verilmiştir.



Şekil 3.4: Dikey eksenli türbinler (Toklu, 2007).

3.3.1.2. Yatay Eksenli Türbinler

Fars Çarkı ve Çapraz Savonius en bilinen örnekleridir. Dönme ekseni rüzgar akım çizgilerine paralel olan türbinlerdir. Fars Çarkı ve Çapraz Savonius yatay eksenli türbinlerin genel görünümleri şekil 3.5'te verilmiştir.



Şekil 3.5: Yatay eksenli türbinler (Toklu, 2007).

3.3.2. Güçlerine Göre Sınıflandırma

1) Küçük güçlü türbinler: Güçleri 30 kw'tan daha az olan türbinlerdir.
2) Orta güçlü türbinler: Güçleri 30-100 kw arasında olan türbinlerdir.
3) Büyük güçlü türbinler: Güçleri 100-1000 kw arasında olan türbinlerdir.
4) Çok büyük güçlü türbinler: Bu türbinlerin güçleri 1 MW veya daha fazladır.

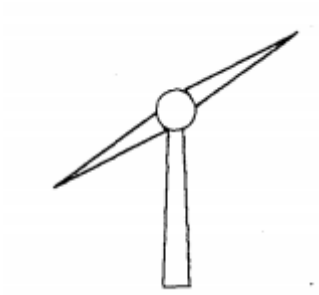
3.3.3. Dişli Sistemine Göre Sınıflandırma

1) Dişli kullanan türbinler: Generatörleri az kutuplu, yüksek devirlidir. Bu nedenle pervanenin devir sayısı ile generatörün devir sayısının uygun olması için 1/50 ile 1/70 oranlarında dişliler kullanılır.

2) Dişli kullanmayan türbinler: Generatörler çok kutuplu ve düşük devirli oldukları için dişli sisteme ihtiyaç duyulmamaktadırlar.

3.3.4. Kanat Sayılarına Göre Sınıflandırma

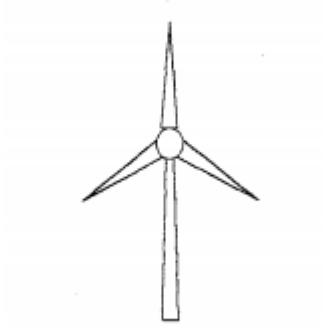
1) Tek kanatlı türbinler: Çift kanatlı pervaneye karşı ağırlık montajı vardır. Ancak çift kollu pervaneye göre ağır olduğundan genel olarak kullanılmamaktadır.
2) Çift kanatlı türbinler: Tek kanatlı pervaneye göre dinamik yönden daha iyidir. Çift kanatlı türbinin görünümü şekil 3.6'da verilmiştir.



Şekil 3.6: Çift kanatlı türbin (Toklu, 2007).

Şekil 3.6'da görünen çift kanatlı türbin, 1 kule ve 2 tane pervaneden oluşmaktadır.

1) Üç kanatlı türbinler: Günümüzde en yaygın kullanılan türbin çeşitidir. En önemli avantajlarından biri yavaşlama yönünden ayar yapılmasının kolay olmasıdır (Toklu, 2007). Üç kanatlı türbinin görünümü şekil 3.7'de verilmiştir.



Şekil 3.7: Üç kanatlı türbin (Toklu, 2007).

Şekil 3.7'de görünen üç kollu türbin, 1 kule ve 3 tane pervaneden meydana gelmektedir.

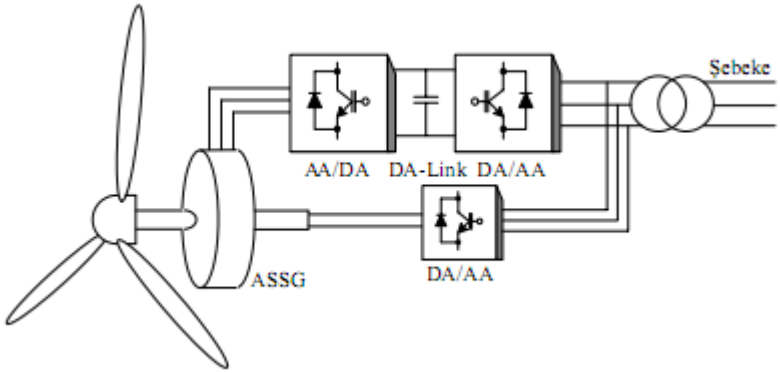
3.3.5. Kullanılan Generatör Çeşitlerine Göre Sınıflandırma

a- Doğru akım generatörlü rüzgar türbini: Doğru akım makineleri, güvenirliğinin az olması ve bakım gereksinime fazla ihtiyaç duymasına rağmen hız kontrolünde başarılı olduğu için endüstride yaygın olarak kullanılmaktadır. Genel olarak küçük güçlü rüzgar santrallerinde kullanılmaktadır. Son yıllarda mekaniksel komütatörlü doğru akım makineleri, komütatörü ortadan kaldırmak için daimi mıknatıslı olarak tasarlanmaktadır. Üretilen alternatif akım, yarı iletken doğrultucular sayesinde doğru akıma dönüştürülmektedir.

b- Senkron generatörlü rüzgar türbini: Harici bir yükü besleyen üç fazlı stator sargıları ve manyetik alanı meydana getiren rotordan oluşmaktadır. Rotorun oluşturduğu manyetik alan ya daimi mıknatıslardan ya da sargılardan geçen doğru akımdan üretilmektedir. Sabit hızlı çalışmalarda daha çok tercih edilmektedir. Genel olarak alan sargılı senkron generatör ve daimi mıknatıslı senkron generatör olarak üretilmektedir (Uyar ve diğ., 2005).

1) Alan sargılı senkron generatör: Alan sargılı senkron generatörlerde stator sargısı, dalga genişlik modülasyonu tekniğine bağlı olarak anahtarlama yapan arka arkaya

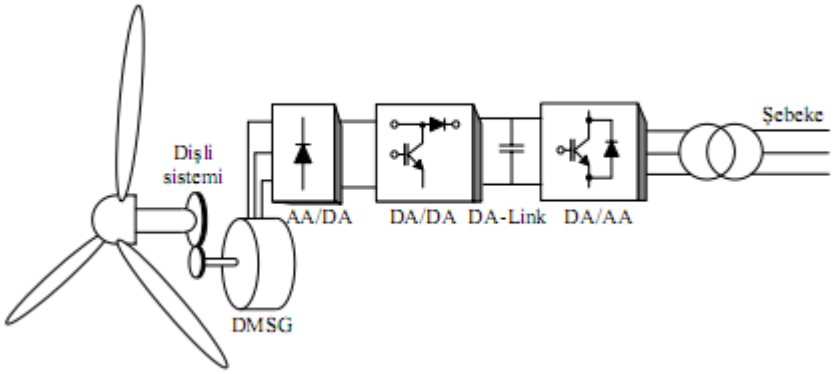
birleştirilmiş iki çevirici devresinden oluşmaktadır. Alan sargılı senkron generatörün sistem modeli şekil 3.8'de verilmiştir. Stator tarafında bulunan çevirici, elektromanyetik momenti; rotor tarafında bulunan çevirici ise aktif ve reaktif gücü kontrol etmektedir.



Şekil 3.8: Alan sargılı senkron generatör (Uyar ve diğ., 2005)

Alan sargılı senkron generatörlerin bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar moment üzerinden stator akımının tümünü kullandıklarından verimleri yüksektir, güç faktörünü doğrudan kontrol edebilirler, kutup eğimleri küçük olduğundan dişli kutusu kullanılmasına gereksinim duymazlar. Avantajlarının yanı sıra dezavantajları da bulunmaktadır. Rotor devresi sargılıdır ve aktif güç ile reaktif gücü kontrol edebilmek için büyük güçlü çevirici devrelerine ihtiyaç duyarlar.

2) Daimi mıknatıslı senkron generatör: Bu senkron generatörde DC-DC çevirici devresi elektromanyetik momenti kontrol etmektedir. Şebeke tarafındaki çevirici ise giriş güç faktörünü ve DC link hat veya bara gerilimini kontrol etmektedir. Daimi mıknatıslı senkron generatörün devre modeli şekil 3.9'da verilmiştir.

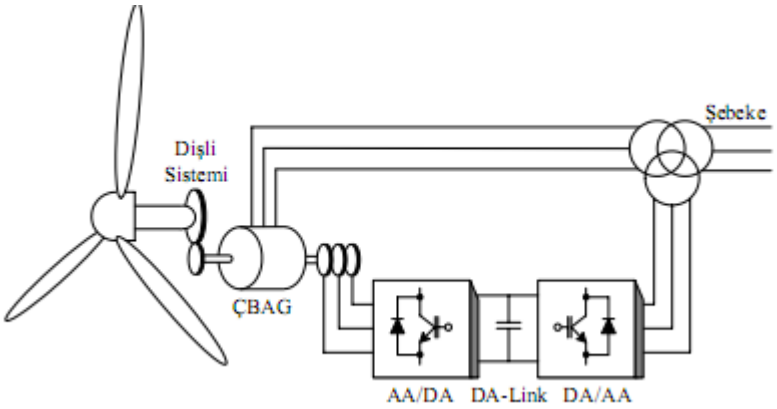


Şekil 3.9: Daimi mıknatıslı senkron generatör (Uyar ve diğ., 2005)

Daimi mıknatıslı senkron generatörün bazı avantajları bulunmaktadır. Bunlar kendinden uyartımlı olduğundan başka enerji kaynağına ihtiyaç duymazlar, farklı hızlarda güç üretebilirler, bakım maliyetleri düşüktür ve hafif uygulamalarda tercih edilirler. Avantajlarının yanında dezavantajları da bulunmaktadır. Bunlardan bazıları şunlardır: Daimi mıknatısları pahalıdır, akım genliğini artırmak için doğrultucu devrelerine ihtiyaç duymaktadır, mıknatıs malzemenin manyetik özellikleri zamanla değişebilmektedir ve güç faktörünü kontrol edememektedir.

c- Asenkron generatörler: Alternatif akım üretmek için rüzgar türbinlerinde son zamanlarda asenkron generatörler kullanılmaktadır. Bu generatörler güvenilir ve maliyetinin düşük olması nedeniyle birçok alanda kullanılabilir. Genel olarak çift beslemeli asenkron generatör ve sincap kafesli asenkron generatör olarak üretilmektedir.

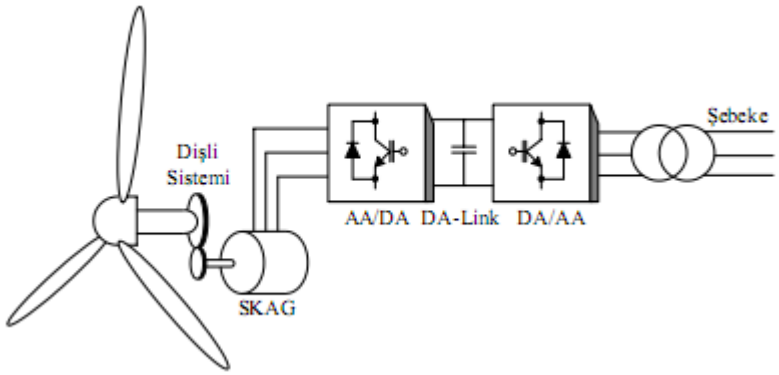
1) Çift beslemeli asenkron generatör: Çift beslemeli asenkron generatörde, stator sargısı şebekeye doğrudan bağlıdır. Rotor sargısı ise iki tane arka arkaya bağlı çeviriciden oluşmaktadır. Çift beslemeli asenkron generatörün devre modeli şekil 3.10'da gösterilmiştir. Genel olarak rotor tarafındaki çevirici devresi elektromanyetik momenti kontrol ederken şebeke tarafındaki çevirici de DC linkini kontrol etmektedir.



Şekil 3.10: Çift beslemeli asenkron generatör (Uyar ve diğ., 2005)

Çift beslemeli asenkron generatörün bazı avantajları bulunmaktadır. Rotor kayma gücü için kullanılan çevirici ve filtre devresi toplam sistem gücünün % 25 oranında olduğundan maliyeti azaltmaktadır, harici bozucu etkilere karşı dayanıklı olmaktadır. Dezavantajı ise periyodik olarak bakıma ihtiyaç duyulan bilezik düzeneğinin bulunmasıdır.

2) Sincap kafesli asenkron generatör: Sincap kafesli asenkron generatör direk olarak şebekeye bağlıdır. Sincap kafesli asenkron generatör'ün devre modeli şekil 3.11'de verilmiştir. Manyetik gürültüyü azaltmak ve iyi kalkınma momenti elde etmek için rotor olukları mile meyilli açılan pres döküm alüminyum rotor sargısı kullanılır.



Şekil 3.11: Sincap kafesli asenkron generatör (Uyar ve diğ., 2005)

Sincap kafesli asenkron generatörün bazı avantajları ve dezavantajları vardır. Avantajları fırçasız, güvenilir ve ekonomik olmasıdır. Dezavantajları ise generatör parametreleri sıcaklık ve frekans değişimleri esnasında kontrol edilmesi zordur.

Moment hız eğrisi doğrusal olduğundan rüzgar gücünde bulunan dalgalanmalar direk olarak şebekeye aktarılmaktadır. Bu rüzgar santralinin şebekeye bağlanmasının yanında bazı problemleri ortaya çıkarmaktadır (Apaydın ve diğ., 2009a).

3.4. RÜZGAR GÜCÜ

V_r hızı ile hareket halinde olan m kütlesinin sahip olduğu kinetik enerji,

$$E_k = \frac{1}{2} m V_r^2 \tag{3.1}$$

şeklinde ifade edilmektedir.

Hareketli hava kütlesi, kanat süpürme alanı A olan bir rüzgar türbininin pervanesine dik olarak çarptığında kinetik enerji belirli bir oranı frenlenir ve türbin kanatları hareket ettirilir (Toklu, 2007).

Türbin kanatlarına çarpan ρ_h yoğunluğundaki havanın kütlesi,

$$m = \rho_h V_r A \tag{3.2}$$

şeklinde ifade edilir. Rüzgarın iş yapabilme yeteneği ise,

$$P_r = (\frac{1}{2} m V_r^2) / t \tag{3.3}$$

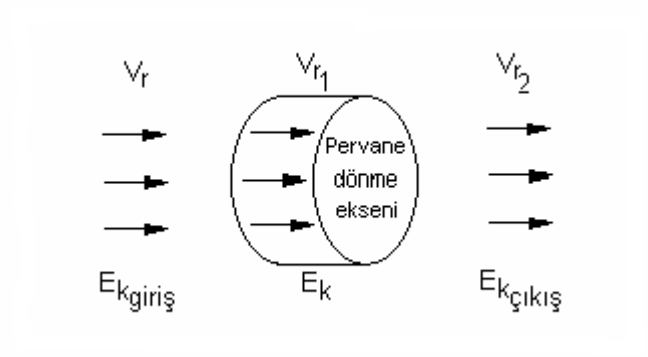
şeklinde ifade edilir. Rüzgarda elde edilecek teorik güç,

$$P_r = \frac{1}{2} \rho_h A V_r^3 \tag{3.4}$$

şeklinde tanımlanmaktadır.

Rüzgar dönüşüm sistemlerinde teorik gücün tamamen kullanılması mümkün değildir. Rüzgar enerjisi dönüşüm sisteminde elde edilecek olan toplam verim; türbin verimine, dişli verimine, mekanik kavrama verimine ve generatör verimine bağlıdır (Güneş, 2006). Bununla birlikte rüzgar türbininden elde edilen verimin %59,26'yı aşamayacağı Betz tarafından ortaya konmuştur (Çetin ve diğ., 2003), (Özdamar ve Gürsel, 1998).

Betz teoremi ile ilgili olarak, rüzgar pervanesinden geçen havanın enerji hareketi şekil 3.12'de gösterilmektedir.



Şekil 3.12: Rüzgar türbini pervanesinden geçen havanın enerji hareketi (Çetin, 2006).

Rüzgar Pervanesinden geçen akımın enerji dengesi,

$$E_k = E_{kgiriş} - E_{kçıkış} \tag{3.5}$$

şeklinde ifade edilir. Hareket halindeki rüzgarın taşıdığı kinetik enerji, kinetik enerji ifadesine göre (3.1) numaralı eşitlikte yerine konursa,

$$E_k = \frac{1}{2} m(V_r^2 - V_{r_2}^2) \tag{3.6}$$

İfadesi elde edilir. Türbinden elde edilecek güç,

$$P_t = \frac{E_k}{t} = \frac{1}{2}(\frac{dm}{dt})(V_r^2 - V_{r_2}^2) \tag{3.7}$$

şeklinde yazılır. Burada dm/dt, m ile ifade edilirse,

$$P_t = \frac{1}{2} m(V_r^2 - V_{r_2}^2) \tag{3.8}$$

şeklinde ifade edilir. Rüzgar türbini kanatlarında yapılan iş aynı zamanda rüzgar tarafından kanatlara uygulanan birim zamandaki basınca bağlıdır.

$$P_t = SV_{r1} \tag{3.9}$$

Rüzgarın türbin kanatlarına yapacağı basınç ise,

$$mV_{r1} = (V_r - V_{r2}) = (\frac{1}{2}) m(V_r^2 - V_{r2}{}^2) \tag{3.10}$$

şeklinde elde edilir. Burada,

$$V_1 = (\frac{1}{2})(V + V_2) \tag{3.11}$$

ifadesi elde edilir. (3.7) numaralı eşitlik kullanılarak, türbinden geçen havanın kütlesel debisi (m), 3.12' de yerine yazılırsa,

$$P_t = (\frac{1}{2}) \rho_h A V_{r1} (V_r^2 - V_{r2}{}^2) \tag{3.12}$$

ifadesi elde edilir. (3.12) deki eşitlik (3.13) de yerine yazılırsa,

$$P_t = (\frac{1}{4}) \rho_h A (V_r + V_r^2)(V_r^2 - V_{r_2}{}^2) \tag{3.13}$$

İfadesi elde edilir. P_t ve P_r değerleri birbirleriyle oranlanırsa,

$$C_p = \frac{P_t}{P_r} = \frac{1}{2}[1-(\frac{V_r^2}{V_r})^2][1+(\frac{V_{r2}^{\ 2}}{V_r})] \tag{3.14}$$

Türbin verimi C_p elde edilir. $\frac{V_{r2}}{V_r} = n$ olarak tanımlanırsa,

$$C_p = (1/n)(1-n^2)(1+n) \tag{3.15}$$

şeklinde verim katsayı fonksiyonu elde edilir (Çetin, 2001).

3.5. RÜZGAR TÜRBİNLERİNDE KONTROL SİSTEMLERİ

Şebekede oluşabilecek istenmeyen durumlar rüzgar türbininde birçok problemi ortaya çıkarmaktadır. Bu problemler rüzgar türbinlerinde kullanılan koruma sistemleri tarafından ortadan kaldırılabilir. Örneğin, sistemde bir kısa devre durumu oluştuğunda rüzgar türbini generatöründeki terminal geriliminin düşmesi akımının yükselmesine neden olmaktadır. Bu durumda şebekeyi rüzgar türbininden ayrılması gerekmektedir. Eğer ayrılmaz ise generatörün nominal frekans ve gerilimde enerji üretimi devam ettiğinde termal zaman sabiti yarı iletken elemanlardan oluşan çeviricide rotordaki kısa devre arızası nedeniyle akım değeri sürekli olarak yükselecektir. Sürekli yükselen akım değeri sistemin kararsız olarak çalışmasına neden olacaktır. Bu aşırı akımın oluşması ve terminal geriliminde düşümleri koruma sistemi tarafından kontrol edilmektedir. En kısa zaman içersinde frekans ve gerilim kararsızlığı ortadan kaldırılarak kesiciler tarafından şebeke ile rüzgar türbini tekrar bağlanmış olur (Thomas, 2005).

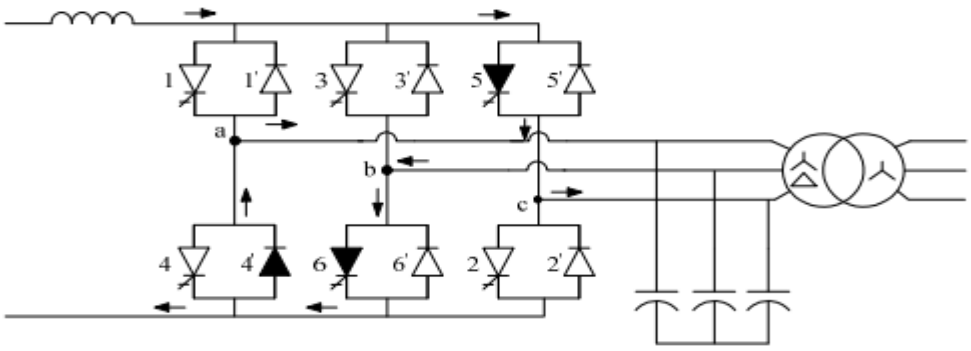
Ayrıca rüzgar türbininde oluşabilecek diğer bir problem rüzgar hızının devamlı olarak aynı olmamasıdır. Bu problemde pitch açı kontrolü denilen mekanizma tarafından ortadan kaldırılır. Pitch açı kontrolü, sisteminin yüksek rüzgar hızındaki çalışmasında aktiftir. Öyleki generatörün rotor hızı arttığında pervanenin kanat açı koordinatları değiştirilir, rotorda aerodinamik limitler ayarlanır ve generatörün gücü nominal değerinde tutularak istenilen denge sağlanmış olur.

3.6. ÇEVİRİCİLER

Çeviriciler DC güç kaynağı sayesinde AC çıkış dalgası üretebilen, çevirici çıkışına bağlı olarak da genlik, frekans ve faz açısını kendi içinde sistemden bağımsız şekilde kontrol edebilen bir cihazdır. Bu kontrol işlemi esnasında çevirici çıkışında elde edilen gerilim, frekans ve faz açısını sisteme eşitlemek amacıyla tasarlanmaktadır. Çevirici çıkışı ile sistem arasındaki dengeyi sağlamak için IGBT ve GTO gibi yarı iletken anahtarlama elemanları kullanılmaktadır. Çeviriciler genel olarak orta gerilim endüstriyel uygulamalara uygun olarak imal edilmektedirler. Çeviriciler FACTS uygulamaları, harmonik eliminasyonu ve dinamik yük değişiminin etkili olabileceği yerlerde kullanılırlar.

3.6.1. Akım Beslemeli Çeviriciler (ABÇ)

Değişken bir gerilim kaynağına büyük değerli seri endüktans bağlanarak geri beslemeli kontrol ünitesi içerisinde, değişken bir doğru akım kaynağı elde edilir. ABÇ besleme akım kaynağı olarak da kullanılabilir. ABÇ'de akım devamlı olarak tek yönlü aktığı için gücün ters dönüşümü ancak doğru gerilimin polaritesinin yönünün değiştirilmesi ile mümkündür. Bunun için güç elektroniği elemanlarından IGBT ve GTO gibi simetrik anahtarlamalar kullanılır. Üç Fazlı bir ABÇ şekil 3.13'te gösterilmektedir.



Şekil 3.13: Üç Fazlı ABÇ (Çöteli, 2006).

Uygun anahtarlama sinyalleri ABÇ'ye verilerek istenilen çıkış dalgası elde edilmektedir. ABÇ genellikle büyük güçlü asenkron ve senkron motorların hız denetlemesinde, yüksek frekanslı indüksiyon ısıtmasında, doğru akım motor sürücülerinde, aktif harmonik filtrelerinde, süper iletken mıknatıs enerji depolamada, rotoru sargılı senkron

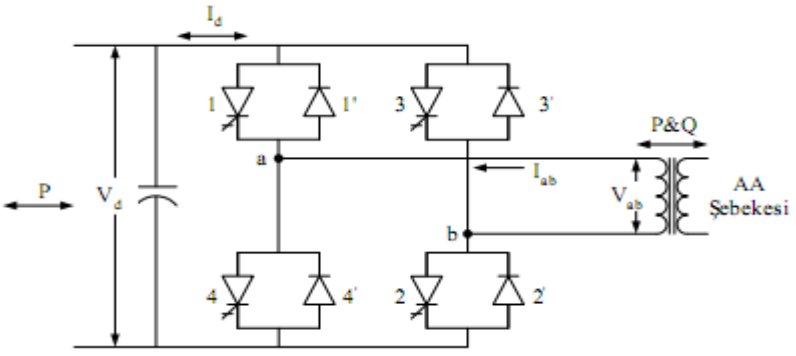
motorun değişken frekansta başlatılması gibi uygulamalarda tercih edilmektedir (Bose, 2001).

3.6.2. Gerilim Beslemeli Çeviriciler (GBÇ)

GBÇ doğru gerilim kısmında bulunan kaynağın genliğinin değiştirilmesi veya çevirici kazancı sabit tutulmasıyla değişken çıkışlı gerilim elde edilir. ABÇ'lere benzer biçimde doğru gerilim sabit bir polariteye sahiptir ve gücün ters dönüşü doğru akım ters kuvveti ile sağlanmaktadır. GBÇ'ler doğru akımda iki yönde akım geçişi olduğu için bu anahtarlama elemanları paralel olarak bağlanırlar. Dahası çeviricilerdeki doğru gerilim ters dönmediği için ve denetimli anahtarlar ters gerilim tutma kapasitesinden dolayı anahtarlama elemanlarına ihtiyaç duymazlar. Çeviriciler alternatif akım tarafında bir transformatör vasıtasıyla bağlanırken, doğru akım tarafına ise bir doğru gerilim kondansatörü bağlanır. Bu kondansatörün doğru akımdaki değişmelerde dayanabilecek kadar büyük olduğu varsayılır. Kalıcı durumlarda bir gerilim kaynağı olarak düşünülebilir (Uzunoviç, 2001). GBÇ'lerin birçok uygulama alanı bulunmaktadır. Bunlar en çok alternatif akım motor sürücüleri, kesintisiz alternatif akım güç kaynakları, indüksiyon ısıtmaları, Statik Var Generatörleri (SVG) ve Statik VAR Kompanzatörleri (SVC), aktif harmonik filtreleridir (Çöteli, 2006).

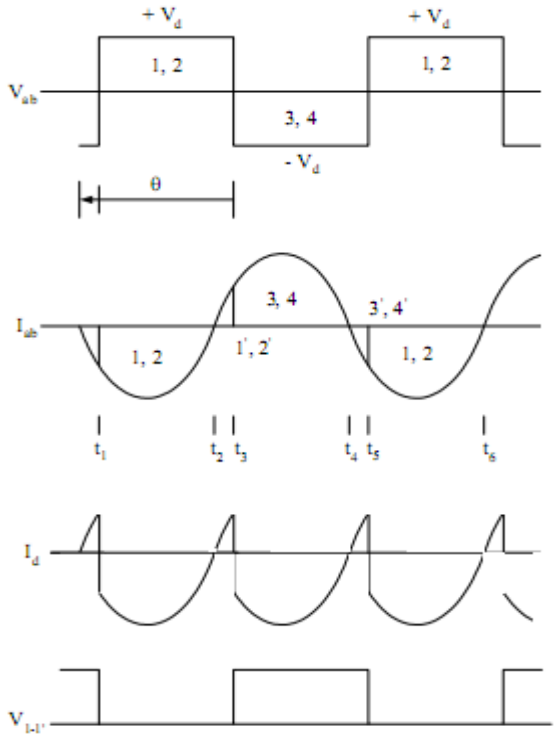
3.6.2.1. Tek Fazlı Gerilim Beslemeli Çeviriciler

En basit çevirici yapılarından biridir. Eğer akım, alternatif akım tarafından akıyorsa doğrultucu modunda, alternatif tarafından akıyorsa evirici modunda çalıştığı bilinmektedir. Şekil 3.14'te tek fazlı gerilim beslemeli çeviricinin devre şeması gösterilmiştir.



Şekil 3.14: Tek fazlı GBÇ (Çöteli, 2006)

Şekilde I_d akımının, kondansatörün dolması için doğru akım tarafına akması gerekir. I_d akımı harmonik içermekte ve bu harmonikler tek fazlı tam dalga bir çeviricide iki veya ikinin katlarını oluşturmaktadır.

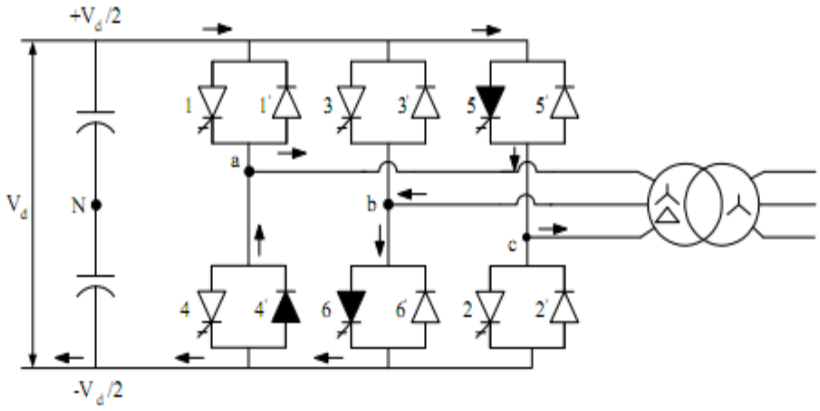


Şekil 3.15: Tek fazlı GBÇ'nin akım ve gerilim dalga şekilleri (Çöteli, 2006)

Şekil 3.15'te görüleceği gibi 1 numaralı yer iletken anahtarları aynı anda iletime geçtiklerinde ilk yarım periyotta V_{ab} gerilimi $+V_d$, 1,2 yalıtıma geçip 3,4 numaralı yarı iletken anahtarları iletime geçirildiğinde ikinci yarım periyotta V_{ab} gerilimi $-V_d$ olur. Ayrıca çeviriciler tarafından oluşan harmoniklerin yok edilmesi için pasif LC filtreleri kullanılmaktadır (Kimbark, 1971). Düşük frekans bileşenleri yok etmek için genel olarak tasarlanan filtre değerleri büyük seçilirler.

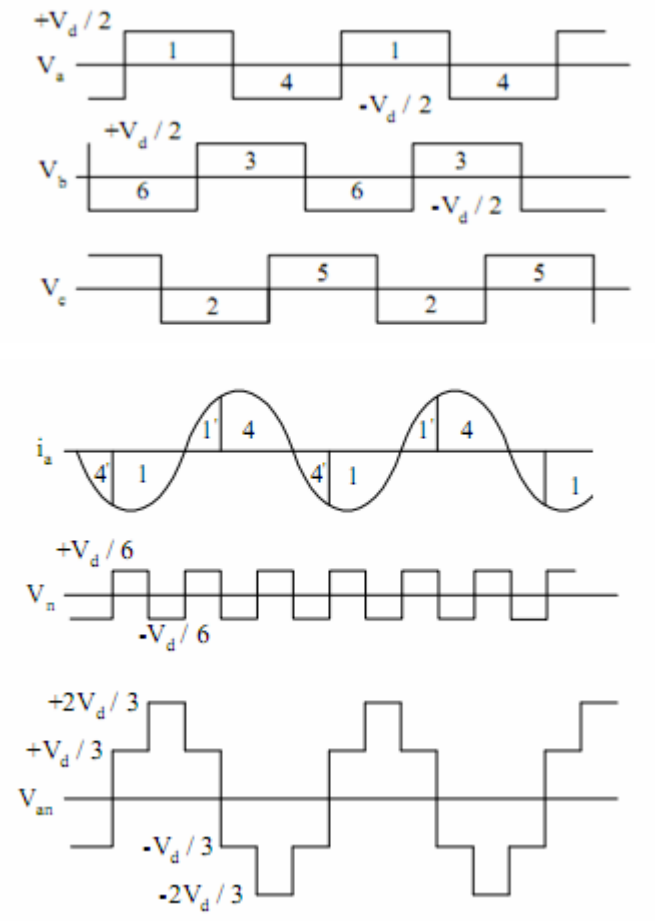
3.6.2.2. Üç Fazlı Gerilim Beslemeli Çeviriciler

Genel olarak motor sürücü devrelerinde kullanılırlar. Şekil 3.16'da üç fazlı GBÇ devre şekli verilmiştir.



Şekil 3.16: Üç fazlı GBÇ (Çöteli, 2006)

Üç fazlı çeviricilerin faz aralarında 120° lik faz farkı vardır. Bu fazlar kendi içerisinde birbirlerine uygun olarak çalışmaktadır. Üç Fazlı GBD'ler üç faz çıkışında kare dalgalar üretmektedir. Şekil 3.17'de elde edilen akım ve gerilim çıkış dalgaları gösterilmektedir. Üç faz, arasında 120°'lik faz yarı iletken anahtarların tetikleme sırasına göre oluşur. Yarı iletken anahtarlarda sırasıyla 3-6 nolu anahtarlama elemanları sonra 1-4 nolu anahtarlama elemanları son olarak da 2-5 anahtarlama elemanları devreye alınarak istenen sinüzoidal çıkış dalgası elde edilmiş olur.

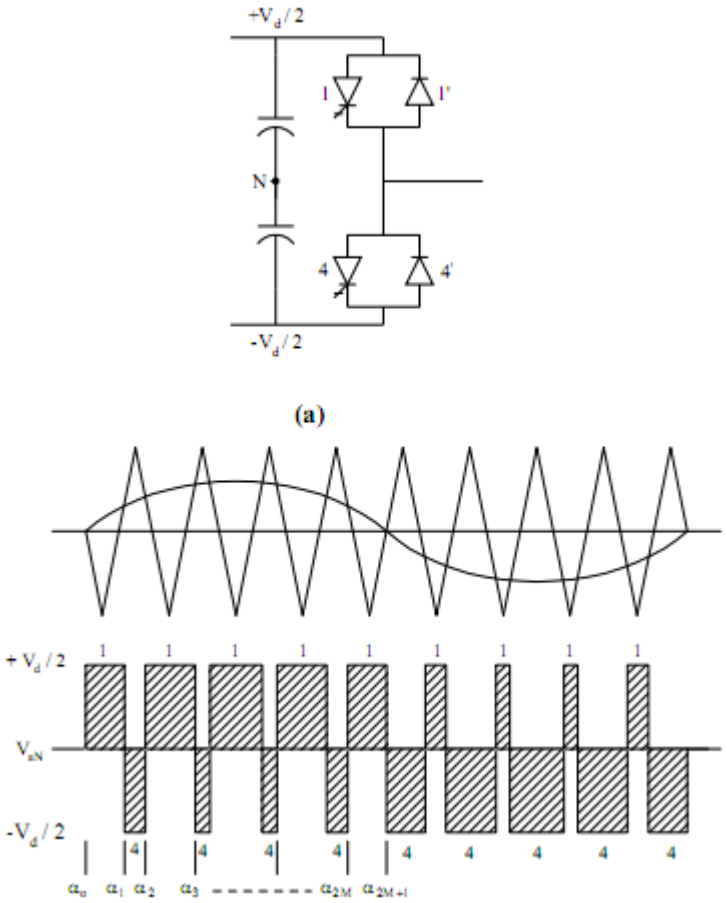


Şekil 3.17: Üç fazlı GBÇ'nin akım ve gerilim dalga şekilleri (Çöteli, 2006)

Genel olarak hat gerilimi dalga şekilleri karakteristik olarak hem 6 adımlı dalga şekline hem de üç fazlı kontrollü köprü doğrultucunun hat akımının dalga şekline benzer. Dalga şekillerinin harmonik değerleri $6n \pm 1$katında olmaktadır.

3.6.2.3. Darbe Genişlik Modülasyonu Gerilim Beslemeli Çevirici

Darbe Genişlik Modülasyonu (DGM) harmonik analizi ve harmonik bastırma işlemlerinde tercih edilmektedir. şekil 3.18'de sistem frekansı ile aynı frekans değerine sahip bir sinüzoidal dalgası ve frekansın dokuz katı bir testere dalgasının iki kontrol sinyal karşılaştırılması gösterilmiştir.



Şekil 3.18: DGM çeviricisinin çalışması (Çöteli, 2006)

Anahtarların iletime ve kesime gitmeleri için sinüzoidal dalga ve testere dalga arasında sinyaller üretilir. Testere dişlinin negatif olduğu yerde sinüzoidal dalgası ile kesiştiğinde 4 nolu anahtarlama elemanının kesimde ve 1 nolu anahtarlama elemanının iletimde olması için darbeler üretilir. Pozitif olduğu yerde 4 nolu anahtarlama elemanının iletime geçmesi için 1 nolu anahtarlama elemanının kesime gitmesi gerekmektedir.

DGB'nda taşıyıcı dalga frekansının ana frekans tarafından değeri belirlenir. Taşıyıcı dalganın frekans modülasyonu,

$$m_f = \frac{f_t}{f_m} \tag{3.16}$$

olarak ifade edilir. Burada f_t taşıyıcı dalga frekansı, f_m modülasyon dalga frekansı, m_f ise modülasyon oranı olarak tanımlanır. Modülasyon indeksi ise,

$$m = \frac{V_t}{V_m} \tag{3.17}$$

şeklinde ifade edilir. Modülasyon indeksinde V_t taşıyıcı dalga genliği, V_m modülasyon dalga genlik değeri olarak ifade edilir. Modülasyon dalga genliği 0 ile V_t arasında darbe genişliği ise 0° ile 180° arasında değiştirilebilir (Çöteli, 2006).

3.7. FACTS CİHAZLARI

Güç sistemleri, iletim sistemlerinin sürekli olarak değişmesi ve tekrar yapılanması gibi sorunlarla karşılaşmaktadır. İletim hatlarının farklı yük modellemeleri, üretimde olabilecek değişikliklere karşı esnek olmak zorundadır. Enerji iletim sistemlerinde enerjinin kesintiye uğramadan sağlanması, oluşabilecek arızalara hızlı cevap vermesi gibi durumlar göz önüne alınarak çözüm yolları aranmıştır. Bunun için çeşitli araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmaların sonucunda 1990 yıllarında enerji sistemlerini daha iyi kontrol eden ve yüksek gerilimli sistemlerde gerilim, empedans ve faz açısı kontrolü Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) geliştirilmiştir. FACTS, güç kapasitesini yükselten ve kontrol edilebilirliği arttıran güç elektroniği tabanlı alternatif akım sistemi şeklinde tanımlamıştır. Güç elektroniği tabanlı olan FACTS cihazları paralel ve seri empedans aktif ve reaktif güç gibi değişen yük durumlarında belirli bir baradaki gerilimin kontrolünü sağlamaktadır. Ayrıca FACTS cihazları sistem sönümlemesinde düzeltme yeteneğine de sahiptir. Gerçekte FACTS cihazlarının en iyi kullanım yeri uzun iletim hatlarıdır (Kumkratug ve Haque, 2003).

3.7.1. FACTS Cihazlarının Yararları

a) Mevcut iletim sistemlerinden daha iyi yararlanmayı sağlaması: İletim hatlarının yük akışı ve enerji taşıma kapasitesinin artışı çok önemlidir. Sürekli olarak artan elektrik güç talebini karşılamak için eklenen yeni iletim hatları ekonomik ve çevresel olanaklar tarafından sınırlanmaktadır. FACTS cihazları mevcut iletim hatları ile bu gereksinimleri

karşılamaya yardımcı olurlar. FACTS cihazları sistemin aşırı yüklenmelere karşı korurken, iletim hatlarının çalışma sınırlarını genişleterek sistemin daha güvenli bir şekilde yüklenmesine izin verirler.

b) İletim sistemlerinin güvenirliği ve uygunluğunun arttırılması: FACTS cihazları hataları önleyememelerine rağmen hataların etkinliklerini azaltabilir ve devre dışı kalmış olan iletim hattı elemanlarının sayısını azaltarak sistemin güvenirliğini sağlarlar. Örnek olarak bir hattın devre dışı kalmasına yol açan hattaki aşırı gerilim ve aşırı akımlar yükü devre dışı bırakabilir. FACTS cihazları aşırı gerilim ve aşırı akım olduğunda hatların devre dışı kalmasını engellerler.

c) Dinamik kararlılık ve geçiş kararlılığının arttırması: Uzun iletim hatları, birbirine bağlı şebekelerde yük değişimlerinin etkilerine ve hat arızalarına bağlı olarak iletim sistemlerinde kararsızlığına neden olmaktadır. Bunlar hattaki güç akışının azalmasına ve hattın devre dışı kalmasına sebep olurlar. FACTS cihazları, yüksek enerji kapasitesi ile hattın devre dışı kalmasına engel olarak sistem dengesinin bozulmamasını sağlarlar.

d) Hassas cihazların üretimi için kaynağın kalitesinin arttırılması: Modern endüstriler, değişmeyen gerilim, yüksek kapasiteye ve kesintisiz elektrik kaynağının frekansının değişmemesini isterler. Bunun neticesinde endüstride FACTS cihazlarının kullanılmasına bağlı olarak enerjinin kalite verimliliği artırılmış olur.

e) Çevresel yararlar: FACTS cihazları zararlı materyaller içermemektedir. Çevre ile dosttur.

f) Güç kontrolü: FACTS cihazları sistemdeki sınırlara bakılmaksızın güç kontrolünü sağlamaktadır.

g) Diğer yararları: Sistem bakım ve onarımı kolaydır. Yüksek verimde enerji üretimi yaparlar. Cihazların arızalanması, kısa devre olması gibi problemlerin azalmasını sağlarlar. Sistemde devre dışı kalacak olan iletim hattı elemanların sayısını azaltırlar.

3.7.2. FACTS Cihazlarının Zararları

FACTS cihazlarının yararlarının yanında zararları da bulunmaktadır. Bunların bazıları;

a) Kullanılan elemanlar pahalıdır.

b) Sistemin yapılanması sağlayacak, bakım ve onarımlarını yapabilecek yetişkin insan bulmak zordur.

c) Güç elektroniği tabanlı olduğundan dolayı sistemde kayıplar oluşmaktadır.

d) Yarı iletken elemanların tetiklenmesi için tetikleme ünitesine ihtiyaç duyarlar.

e) FACTS cihazları yüksek gerilim sistemlerinde kullanıldığından yalıtım problemi ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden hat ve yük birbirlerini tam olarak izole edemezler (Korkmaz, 2006), (Mathur ve Varma, 2002).

3.8. STATİK SENKRON KOMPANZATÖR (STATCOM)

Statik Senkron Kompanzatör (STATCOM) güç elektroniği tabanlı olarak sistemi dinamik değişimlere karşı koruyan güç elektroniği tabanlı FACTS cihazlarından biridir.

STATCOM güç sistemlerinde kararlılık, gerilim regülâsyonu, aktif ve reaktif güç kontrolü, osilasyon sönümlemeleri gibi oluşabilecek problemleri ortadan kaldırmak için kullanılır.

STATCOM, sisteme paralel olarak bağlanarak sisteme reaktif güç verirler veya sistemden reaktif güç çekerler. Güç sistemlerinde kullanılan STATCOM'un özel parametre ayarları yapılarak çıkış kontrolü yapılabilmektedir. Genel anlamda enerji kaynağı veya enerji depolama için kullanılan DC kapasitör elemanları şarj veya deşarj olması ile sistemin reaktif güç kontrolünü sağlarlar (Korkmaz, 2006).

Bir STATCOM'un sistem performansını iyileştirmesi için aşağıdaki durumlar göz önüne alınır:

1) İletim ve dağıtım sistemlerinde dinamik gerilimin kontrolü.

2) Güç sistemlerinden osilasyon sönümlemesi.

3) Geçici durum kararlılığı.

4) Gerilim dalgalanma kontrolü.

5) Hem reaktif güç kontrolü, hem de bağlantı noktalarında aktif güç kontrolü.

Bunların dışında STATCOM'un diğer avantajları şunlardır.

1) Elektrik çeviricileri tarafından devre elemanlarının pasif banklarını yerine koymak için daha az alan kaplarlar.
2) Fabrika inşa ekipmanları, çalışma zamanları ve bölgedeki azalmalar gibi modüler teklifler sunarlar.
3) Kapsüllü elektronik çeviriciler kullanılarak çevresel etkileri minimize ederler.

STATCOM ideal bir senkron makineye benzetilebilir. Üç fazlı sinüzoidal gerilimi, temel frekansta, genlik ve faz açısının kontrolü ile ayarlayabilmektedir. Bu ideal makinenin eylemsizliği yoktur. Pratikte anlıktır ve sistemin empedansına pek etki etmezler. Kapasitif ya da endüktif olarak reaktif güç üretirler. (Mathur ve Varma, 2002).

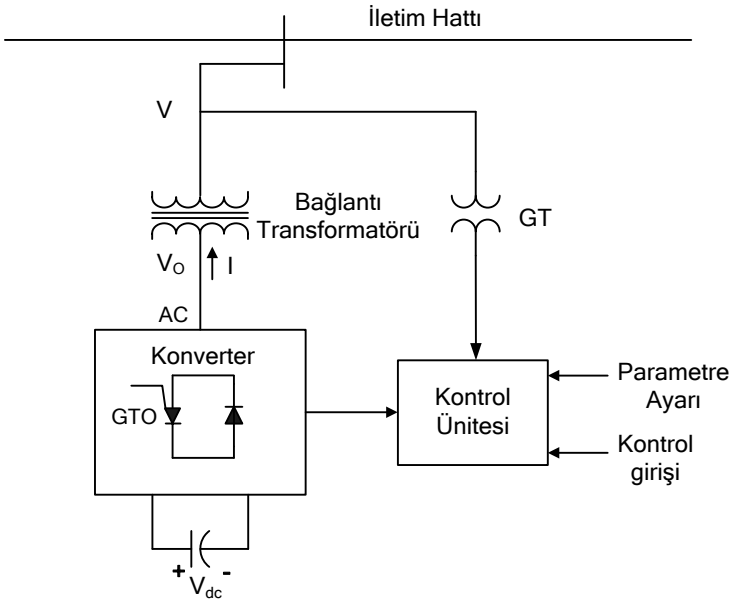
3.8.1. Gerilim Kaynaklı Konvertör (VSC) STATCOM

Statik Kompanzatör, aktif ve reaktif güç çekebilen ve üretebilen bir cihazdır. STATCOM altı darbeli VSC' ye dayanır. Bu yüzden yüksek harmonikli bileşenler içerir. Yüksek güçlü uygulamalarda altı darbeli VSC uygun performansa sahip değildir.

AC sistem ile STATCOM arasındaki reaktif güç değişimi AC sistem ile çeviricinin temel bileşeninin büyüklüklerinin karşılaştırılması ile kontrol edilir. Bu kontrol, yarı iletken elemanın anahtarlama açısındaki değişim ile sağlanır. Çevirici tarafından gerilimin ana bileşeni üretildiğinde AC sistemin gerilimi birkaç dereceye kadar geri kalmaya ya da ileri olmaya zorlanır, aktif güç çeviriciye akarak veya çeviriciden çıkarak DC kapasitör gerilim değerini değiştirebilir.

3.8.2. STATCOM Yapısı

STATCOM, sistemin faz açısı, gerilim ve reaktif gücünü kontrol edebilen bir FACTS cihazıdır. STATCOM devre modeli şekil 3.19'da verilmiştir.



Şekil 3.19: STATCOM devre modeli (Ertay, 2006)

STATCOM'un temel yapısı STATCOM genel olarak gerilim kaynaklı konverter (VSC), kuplaj transformatör, kontrol ünitesi ve DC kapasitörden oluşmaktadır.

3.8.3. STATCOM Çalışması

STATCOM'daki kapasitör çevirici için gerekli olan DC gerilimi karşılar. Çevirici çıkışındaki gerilim ile AC sistem arasındaki gerilim kontrolünü faz farkına bağlı olarak şarj veya deşarj durumlarını karşılaştırılmaktadır.

AC sistemden STATCOM'a akan güç,

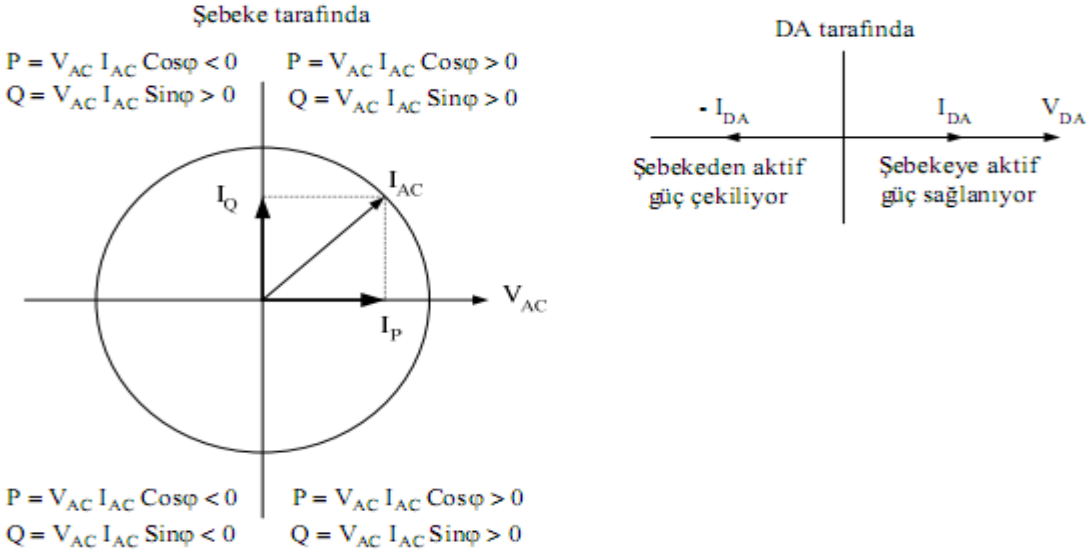
$$P = 3 * \frac{V_{ac} V_{inv}}{X} \sin\alpha \qquad (3.18)$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada V_{ac} AC sistem gerilimi, V_{inv} çevirici çıkış gerilimi, X transformatör kaçak reaktansı , α gerilimler arası faz farkıdır.

$\alpha > 0$ olduğunda çevirici çıkış gerilimi AC sistemin geriliminden geri fazdadır. $\alpha < 0$ olduğunda çevirici çıkış gerilimi AC sistem geriliminden ileri fazdadır.

VSC'nin aktif akım ve reaktif akım çalışma bölgeleri şekil 3.20'de gösterilmiştir. AC sistem ile çevirici çıkış gerilimi arasındaki dengeyi STATCOM, sisteme reaktif güç vererek ya da sistemden reaktif güç çekerek sağlar. Eğer STATCOM'un çevirici çıkışındaki gerilim AC sistem geriliminden büyük ise STATCOM'dan sisteme reaktif güç verilmektedir. Bu durumda akım gerilimden 90° ileridedir ve güç kapasitiftir. Eğer AC sistemin gerilimi çevirici çıkışındaki gerilimden büyük ise AC sistem üzerinden STATCOM güç çekmektedir. Bu durumda akım gerilimden 90° geridedir ve güç endüktiftir. STATCOM ile AC sistem arasındaki gerilimler eşit ise reaktif güç alış-verişi sıfır olmaktadır. Sistemden çekilen aktif güç P>0 olduğunda kapasitör şarj olur. P<0 olduğunda ise kapasitör deşarj olur. Sürekli olarak çevirici çıkış gerilimi geri fazda tutularak çekilen aktif güç trafo ve çevirici kayıplarını karşılamış olur.

Park dönüşümü yapıldıktan sonra I_p ve I_q akımları elde edilmektedir. I_p akımı aktif akımı ifade ederken I_q akımı reaktif akımı ifade etmektedir. Aktif ve reaktif akım akışı pozitif olduğunda güç akışı sistemden STATCOM'a doğru olur. Aktif ve reaktif akım akışı negatif olduğunda ise güç akışı STATCOM'dan sisteme doğru olmaktadır.



Şekil 3.20: VSC' nin aktif akım ve reaktif akım çalışma bölgeleri (Çöteli, 2006)

STATCOM çıkış gerilimi,

$$V_{ac}(t)=\sqrt{2}*V_{ac}\sin(wt+\theta) \tag{3.19}$$

İnvertör çıkış gerilimi,

$$V_{inv}(t)=\sqrt{2}*V_{ac}\sin(wt+\theta-\alpha) \tag{3.20}$$

olarak ifade edilir. Kayıplar ihmal edilirse,

$$P=3\frac{V_{ac}V_{inv}}{X}\sin\alpha=V_{dc}I_{dc}=CV_{dc}\frac{dV_{dc}}{dt} \tag{3.21}$$

şeklinde ifade edilir. Faz açısı $\alpha=0$ olduğunda, $\frac{dV_{dc}}{dt}=0$ olur. Kapasitör gerilimi de sabit kalmaktadır. Çevirici kayıpları, kapasitöre paralel bir direnç bağlandığında,

$$\frac{dV_{dc}}{dt}=\frac{3k}{CX}V_{ac}\sin\alpha-\frac{V_{dc}}{RC} \tag{3.22}$$

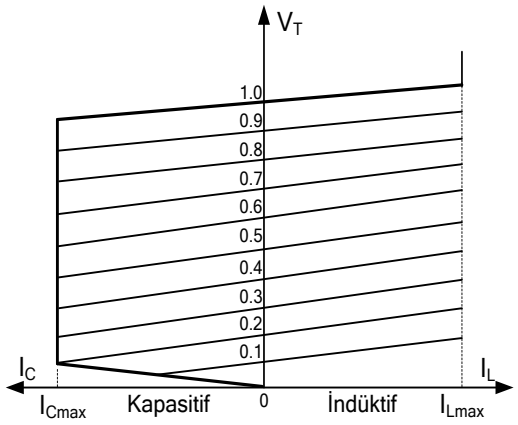
şeklinde ifade edilir. DC gerilim ile çeviriciler uygun çeviriciler uygun çevirici anahtarlamaları ile çıkış gerilimi dalga şekillerini üretebilir (Eminoğlu, 2003).

P-darbesi gerilim kaynaklı çeviricide harmonikli gerilim üretimi $f_h=(p\pm1)f_{fund}$ ve $V_h=V_{fund}/(p\pm1)$ dir. Yeterince yüksek darbe sayılarında gerilimlerdeki harmonikler önemli olmayabilir. Ancak çok düşük darbelerde çevirici filtreleri kullanılır (Korkmaz, 2006).

3.8.4. STATCOM V-I Karakteristiği

STATCOM'un V-I karakteristiği bağlantı transformatörünün kaçak reaktansına ve gerilim kaynaklı çeviricinin çıkış gerilimine bağlıdır. STATCOM'un V-I karakteristiği şekil 3.21'de gösterilmektedir. Kaçak reaktans değeri genelde %10 ile %20 arasında bir

değer almaktadır. STATCOM kendi aşırı gerilim tutucusunun sağladığı koruma seviyesine kadar olan geçici ve dinamik gerilimlere dayanmak zorundadır. Anlık uygulanan gerilimin genliği, referans DC gerilimin genliğini aştığı geçici durumlarda STATCOM'da kullanılan diyotlar sayesinde akım akacaktır. Bu akımlar kondansatörün daha yüksek bir seviyede şarj olmasına neden olacaktır.

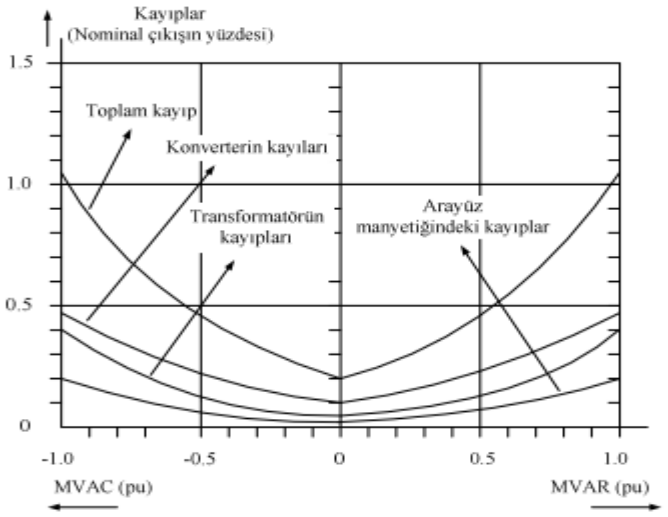


Şekil 3.21: STATCOM V-I karakteristiği (Ertay, 2006)

STATCOM'un kapasitif ve endüktif kompanzasyonunda güç sisteminin geriliminden bağımsızdır. Nominal kapasitif-endüktif oranın üzerinde çıkış akımını kontrol edebilir. Diğer bir ifade ile STATCOM güç sisteminin herhangi bir değerinde iken tam kapasitif-reaktif güç sağlayabilmektedir.

STATCOM'un çalışması sinüzoidal bir gerilim üretme temelli olduğundan geçici bozulmaları karşı zaman cevapları hızlıdır. Bir STATCOM'un kalıcı durum çalışma şartı, sistem gerilimine, sistem empedansına, STATCOM'un kaynak gerilimine ve kaçak reaktansına bağlıdır (Çöteli, 2006).

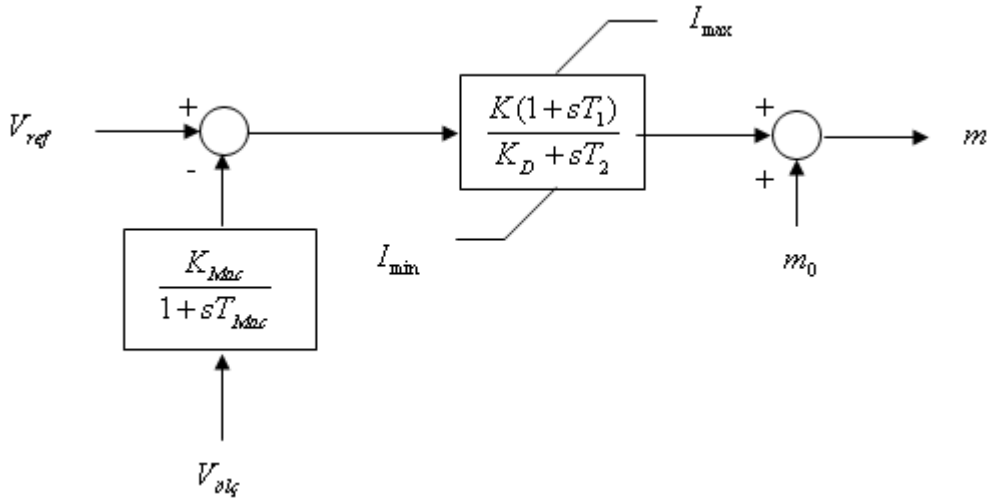
STATCOM'da çevirici devresinde kullanılan GTO ve IGBT gibi anahtarlama elemanları yüksek gerilim altında tetiklendiklerinden anahtarlama kayıpları oluşmaktadır. STATCOM'da oluşan kayıplar şekil 3.22'de gösterilmiştir. Anahtarlama kayıplarını minimum seviyeye indirmek için yarı iletkenler düşük gerilim altında tetiklenmektedir. Bunun için devrede yüksek frekanslı harmonik filtreleri kullanılmaktadır (Bilgin,2007). Anahtarlama kayıplarının dışında STATCOM'da transformatör ara yüz ve bağlantı noktalarında oluşan kayıplar da bulunmaktadır.



Şekil 3.22: STATCOM'daki kayıplar (Çöteli, 2006).

3.8.5. STATCOM Kontrolü

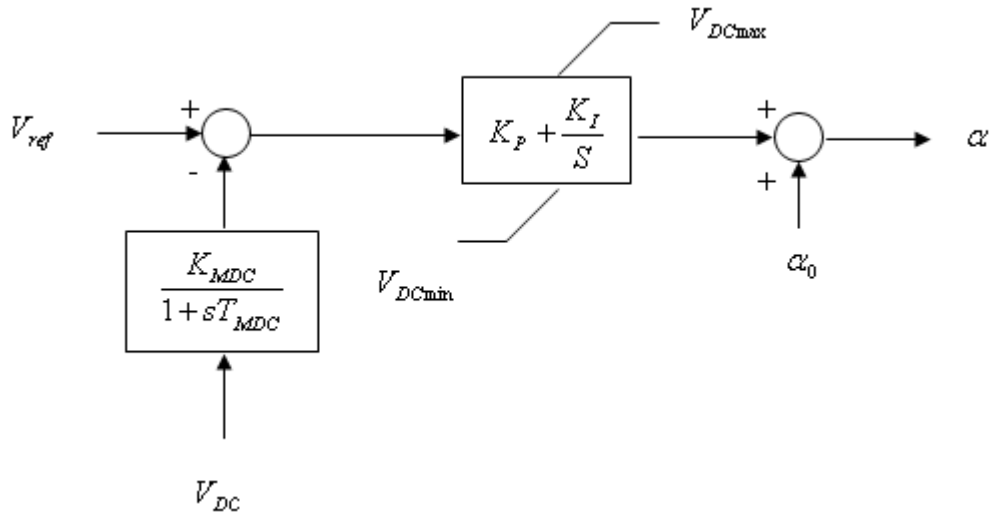
STATCOM gerilim kontrolü şekil 3.23'te verilmiştir.



Şekil 3.23: STATCOM gerilim kontrolü (Eminoğlu, 2003)

STATCOM gerilim kontrolünde modülasyon indeksi önemlidir. Ölçülen AC gerilim değeri ile referans gerilim değeri karşılaştırılarak aralarındaki hata miktarı kontroller yapısına girmektedir. Kontrol yapısı ise park dönüşümü sonucu elde edilen reaktif akım bileşenini maksimum ve minimum değeri aralığında belirleyerek ilk modülasyon indeks

değeri ile toplayarak yeni durumda oluşacak modülasyon indeksini bulur. Bu şekilde STATCOM gerilim kontrolü yapılmış olur. STATCOM faz açısı kontrolü şekil 3.24'te verilmiştir.

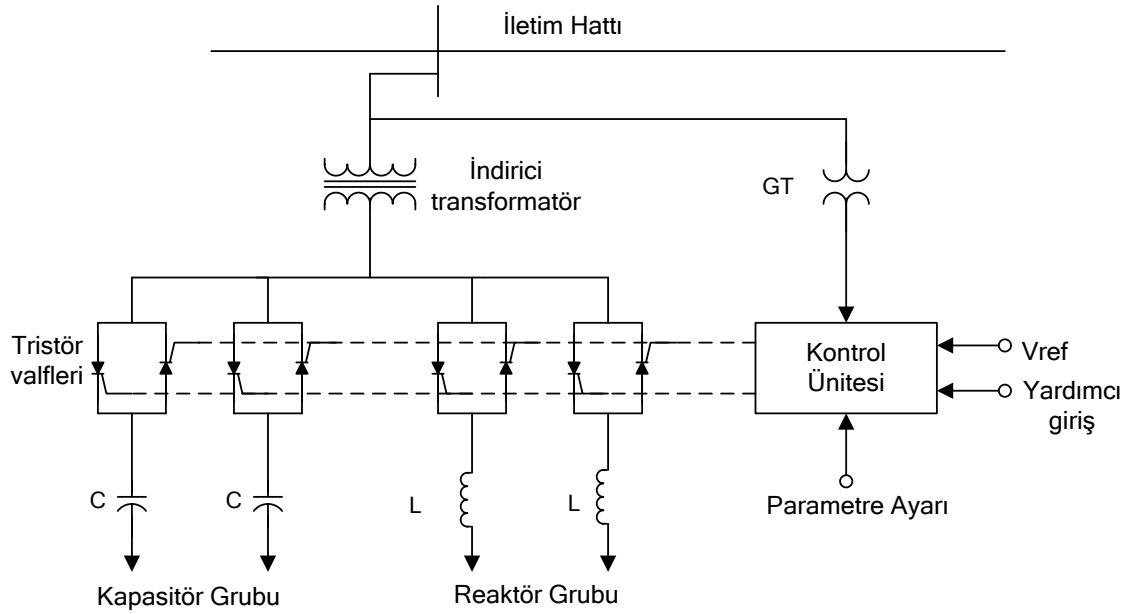


Şekil 3.24: STATCOM faz açısı kontrolü (Eminoğlu, 2003)

STATCOM faz açısı kontrolünde kondansatör şarj ve deşarjı önemlidir. Ölçülen DC gerilim değeri ile referans gerilim değeri karşılaştırılarak aralarındaki hata miktarı kontrol yapısına girmektedir. Kontrol yapısı ise park dönüşümü sonucu elde edilen aktif akım bileşenini belirlemek için kondansatör gerilim değeri maksimum ve minimum değerler arasında bulunur. Bulunan bu gerilim açısı değeri ile ilk gerilim açısı değeri toplanarak son durumda sistem gerilim açısı ile çevirici çıkışındaki gerilim açıları kontrol edilmiş olur. Bu Şekilde STATCOM faz açısı kontrolü sağlanmış olur (Eminoğlu, 2003).

3.9. STATİK VAR KOMPANZATÖR (SVC)

SVC sisteme paralel olarak bağlanan reaktif güç kontrolünü sağlayan FACTS cihazlarından biridir. SVC'nin genel yapısı şekil 3.25'te gösterilmiştir.



Şekil 3.25: SVC genel yapısı (Ertay, 2006)

Genel olarak SVC tristör kontrollü reaktör (TCR) ve tristör anahtarlamalı kapasitör (TSC)'den oluşmaktadır. SVC'nin empedansı tristörlerin tetikleme açısına göre belirlenmektedir. Endüktif durumda sistemden reaktif güç çekilmekte, kapasitif durumda ise sisteme reaktif güç verilmektedir. SVC'nin eşdeğer reaktansı aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$X_e = X_c \frac{\pi / r_x}{\sin 2\alpha - 2\alpha + \pi(2 - 1/r_x)} \tag{3.23}$$

Formülde belirtilen $r_x = \frac{X_c}{X_l}$'ye eşit olmaktadır. Bu durum SVC'nin kapasitif ya da endüktif çalışma aralığını belirlemektedir. Temel frekansta geçici kararlılık için eşdeğer devre modeli oluşturularak per-ünit cinsinden yazılması mümkündür.

$$B_e - \frac{2\alpha - \sin 2\alpha - \pi(2 - X_l / X_c)}{\pi X_l} = 0 \tag{3.24}$$

$$I - V_i B_e = 0 \tag{3.25}$$

$$Q - V_i^2 B_e = 0 \tag{3.26}$$

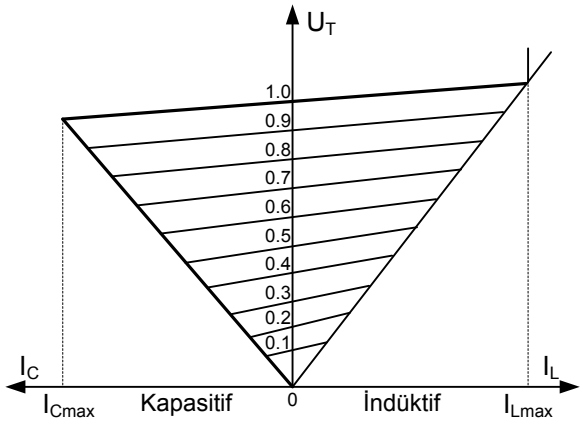
Verilen denklemelerde V_i kapasitör gerilimi, tetikleme açısı sınırlarını ayrıca SVC'nin akım ve gerilim sınırlarını göstermektedir (Faur,1996). Nümerik işlemlerin kullanılması kolay olduğu için admitans modeli tercih edilmektedir. SVC akımı, kapasitif ve endüktif çalışması durumuna göre sırası ile negatif ve pozitif olmaktadır. SVC' nin yapısıyla birlikte kullanılan filtre SVC çıkış gerilimindeki harmonik bileşenlerin AC sisteme geçmesini engellemektedir. Bu durum SVC kontrolü için başlangıç tetikleme açısı a_0 , B_e =0 eşitliğinde belirlenir. SVC için rezonans durumu olup çekilen akım ve reaktif güç sıfırdır.

$$2a_0 - \sin 2a_0 - \pi(2 - X_l / X_c) = 0 \tag{3.27}$$

Burada rezonans tetikleme açısı X_l / X_c değerine bağlı olarak belirlenir. Bu oran yapılacak olan kontrolde endüktif ve kapasitif çalışma aralığının eşit olma veya olmama durumlarına göre belirlenir (Canizares, 2000).

3.9.1. SVC V-I Karakteristiği

SVC'ye ait kontrol denklemi sürekli durum V-I karakteristiğinden yararlanılarak elde edilir. SVC V-I karakteristiği şekil 3.26'da gösterilmiştir. Bu karakteristik SVC'nin endüktif veya kapasitif çalışma aralığına göre belirlenir. Kontrol geriliminin sınırları tasarımcı tarafından belirlenir. Bu sınırlardan yararlanılarak SVC güç denklemelerinde TSC'nin kapasite değeri ve bundan yararlanılarak TCR'nin endüktans değeri hesaplanır.



Şekil 3.26: SVC V-I karakteristiği (Ertay, 2006)

SVC kontrol gerilim denklemi aşağıdaki gibi ifade edilir.

$$V = V_{ref} \pm X_{sl} I \tag{3.28}$$

SVC'nin kapasitif çalışmasında "+" endüktif çalışmasında "-" işaret almaktadır. Bu durumda tetikleme açısı sabit tutularak referans gerilimi değeri değiştirilir. Tetikleme açısının normal sınırlar aralığında değişmesi durumunda referans gerilim, başlangıç referans gerilime eşitlenir. Tetikleme açısı minimum değere ulaştığında referans gerilim değeri artırılarak kontrole devam edilir. Her iki durum referans geriliminin başlangıç değerine eşitleninceye kadar devam edilir. Gerilim V_{max}-V_{min} aralığında kontrol edilerek, reaktif gücü Q_{max}C ile Q_{min}L ve akımın $\pm I_{max}$ aralığında değişmesine neden olur. Maksimum endüktif ve kapasitif güç SVC tasarımına bağlı olarak değişir (Mithulananthan,1999). Kapasitif çalışmada sistem gerilimi artmakta ve endüktif çalışmada ise sistem gerilimi azalmaktadır. Genel olarak X_{sl}(0.02-0.05) aralığında değişmektedir. Gerilim limitleri için SVC sabit reaktans olarak modellenir. SVC ile gerilim kontrolü yaklaşık olarak %10 oranında yapılmaktadır. SVC'nin reaktif gücü,

$$Q_{SVC} = \frac{V_{\max}^2}{X_l} - \frac{V_{\max}^2}{X_c} \tag{3.29}$$

şeklinde yazılabilir. Burada X_l, TCR'ün reaktansıdır. X_c ise TSC'nin kapasitif reaktansıdır. Reaktif güç çıkışı sıfır olduğunda, kapasitif ve endüktif akımlar birbirine eşit olur. Bu durumda paralel rezonans oluşarak SVC paralel kollar arasında endüktif ve kapasitif reaktif güç aktarımı sağlanmaktadır.

$Q_{max}C = Q_{min}L$ olacak şekilde eşit aralıkta kontrol için SVC kontrol limitleri gerilim kontrol limitlerine göre belirlenir.

$$Q_{\max}C = \frac{V_{\min}^2}{X_c} \tag{3.30}$$

$$Q_{\min}C = \frac{V_{\max}^2}{X_l} - \frac{V_{\max}^2}{X_c} \tag{3.31}$$

verilen eşitliklerden yararlanılarak $\pm$%5 lik gerilim kontrol aralığı,

$$X_l = 0.55X_c \tag{3.32}$$

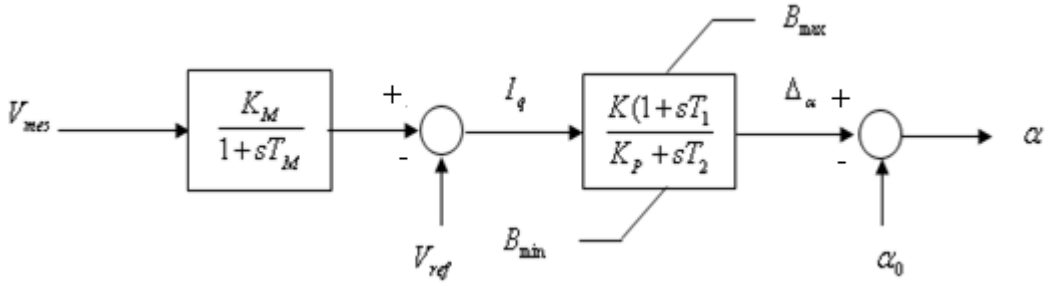
olarak elde edilir. Buna alternatif olarak, eğer çekilen endüktif ve kapasitif akımların eşit olma durumuna göre aynı gerilim sınırlarında kontrol yapılacaksa,

$$X_l = 0.53X_c \tag{3.33}$$

değeri elde edilmiş olur (Canizares ve diğ., 1999), (Rossi ve diğ., 2000).

3.9.2. SVC Kontrolü

SVC gerilim kontrolünde, kontrol edilen bara gerilimi ile referans gerilimi karşılaştırılarak bir kontrol ünitesi üzerinden tetikleme devresine geçerek SVC' nin kontrolü sağlanmış olup dahası çıkış kısmına uygun bir filtre kullanılarak istenilen çıkış sinyali elde edilmiş olur. SVC'nin kontrol modeli şekil 3.27'de verilmiştir.

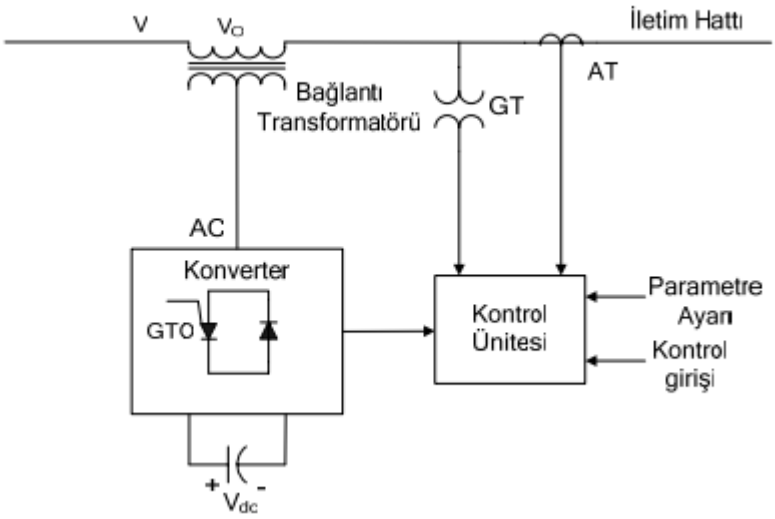


Şekil 3.27: SVC kontrol modeli (Eminoğlu, 2003).

Bu kontrol modelinde V kontrol edilen bara gerilimi, V_{ref} referans gerilim ve T_1 ve T_2 ise denetleyicinin zaman sabitleridir (Mathur ve Varma, 2002), (Ertay, 2006). Bara gerilimi referans gerilimi ile karşılaştırılarak hata işareti kontrol ünitesine aktarılır. Hata işaretinin büyüklüğüne bağlı olarak SVC ile sisteme aktarılan veya sistemden çekilen reaktif güç değeri değiştirilerek sistem geriliminin kontrolü sağlanmış olur (Eminoğlu, 2003).

3.10. STATİK SENKRON SERİ KOMPANZATÖR (SSSC)

Statik Senkron Seri Kompanzatör (SSSC) gerilim kaynaklı konverter, DC kapasitör, kontrol ünitesi ve kuplaj transformatörden meydana gelmiştir. İletim hattına seri olarak bağlanırlar. SSSC genel olarak sistemde aktif ve reaktif güç kontrolü için kullanılmaktadır. SSSC ile hat akımı direk olarak kontrol edilebilir. Gerilim ve hat akımları, üretilen reaktif güce bağlı olarak değişmektedir. SSSC endüktif ve kapasitif olarak çalışabilmektedir. SSSC'nin genel yapısı şekil 3.28'de gösterilmiştir.



Şekil 3.28: SSSS genel yapısı (Ertay, 2006)

SSSC, bir senkron gerilim kaynağına bağlı olup iletim hattının uygun faz açısında gerilim ilave ederek iletim hattının empedans kontrolünü sağlamaktadır. Bu empedans kontrolü sistemde endüktif ve kapasitif durumlara göre yapılmaktadır. Sistemde reaktif güç kontrolü gerilim genlik değerine bağlı olarak gerçekleştirilir. Aktif güç kontrolü ise açı genlik değerine göre yapılmaktadır. Gerilim, hat akımına 90° derece dik olarak ilave edilmektedir. Gerilimin akımdan 90° ileride ya da 90° geride olmasına bağlı olarak SSSC sisteme seri kapasitör veya seri reaktör ekleyerek sistemin gerilim ve açı değerlerini istenilen değere getirmeyi amaçlamaktadır. Eğer AC sistem gerilimi hat akımından 90° derece ileride ise sistem endüktif, 90° geride ise kapasitif olarak etki göstermektedir. Kapasitif durumda iken çıkış gerilimi,

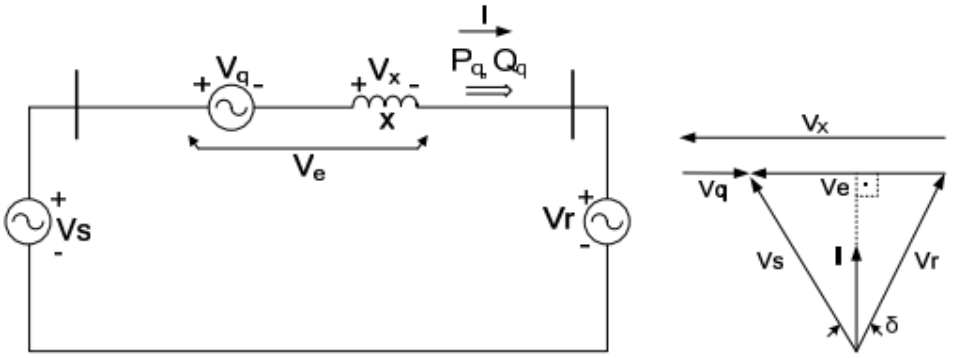
$$V_c = -jKXI \tag{3.34}$$

şeklinde ifade edilir (Taheri ve diğ., 2009).

Burada I akımı, X hat reaktansı, k ise seri kompanzasyon derecesi katsayısıdır. $kX = X_c$ olarak ifade edilir. Kapasitif durumda geride bulunan akım değerinin ileri olmasını sağlamak için gerilim değerini kontrol sistemine bağlı olarak değiştirir. Sisteme enjekte edilen gerilim değeri,

$$V_q = \pm V_q(\varsigma)\frac{I}{i} \tag{3.35}$$

şeklinde ifade edilmektedir. V_q eklenen gerilim genlik değeri, ς kontrol için seçilen bir parametre, I kompanzasyon yapılmadığı durumdaki hat akımı, i kompanzasyon durumunda hattan akan akım olarak ifade edilmektedir. SSSC'nin eşdeğer devresi ve fazör diyagramı şekil 3.29'da gösterilmiştir.



Şekil 3.29: SSSC eşdeğer devresi ve fazör diyagramı (Ertay, 2006)

SSSC'nin endüktif çalışması durumunda SSSC endüktif hat empedansı gerilimi azaltmaktadır. Buna bağlı olarak da ($V = V_{\min}$) sistemin hat empedansını arttırmaktadır. Sisteme enjekte edilen aktif güce göre değişimi,

$$P = \frac{V^2}{X}\sin\delta + \frac{V}{X}V_q\cos\frac{\delta}{2} \tag{3.36}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Sonuç olarak SSSC'nin kapasitif olarak çalıştırılması durumunda hattan aktarılan güç artmakta, endüktif çalışma durumunda ise azalmaktadır. Gerilim genliğinin değişiminden SSSC'nin aynı güç kapasitesine sahip olan kontrol edilebilen seri kapasitöre göre daha geniş bir kontrol aralığına sahip olduğunu söyleyebiliriz (Song ve Johns, 1999).

3.10.1. SSSC Durum Analizi

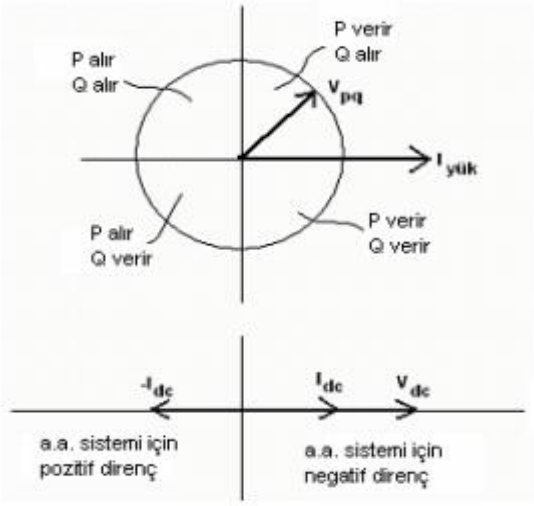
SSSC ile güç akışı, gerilim ve faz açısı kontrolü yapılması mümkündür. Sistemde hat empedansı gerilim düşümüne neden olmaktadır. Bu, düşük hat sonu gerilimlerine, hattan aktarılan gücün azalmasına ve ayrıca bağlı olduğu sistemlerde hatların dengesiz yüklenmesine neden olmaktadır. Bu gibi problemlerin çözümlenmesinde SSSC kullanılmaktadır.

Kararlılık yönünden SSSC elektromekanik salınımları bastırmada etkili olmaktadır. Diğer avantajlarından birisi de senkron generatörlerde frekanstan kaynaklanan rotor açı salınımı da söndürmede oldukça başarılıdır (Poshten ve diğ., 2006).

SSSC'de bulunan çevirici hat gerilim ve açısını SSSC'ye uyarlamaya çalışmaktadır. Ayrıca bu çevirici harmonikleri minimize etmek amaçlı olarak kullanılmaktadır. İnvertörde oluşabilecek anahtarlama kayıpları en az değere indirmek için sistemde DC gerilim kaynağı kullanılmaktadır.

3.10.2. SSSC Çalışma Modları

SSSC çalışma modları aktif ve reaktif güç arasındaki ilişkiye göre belirlenmektedir. SSSC'nin çalışma modlarındaki fazör gösterimi şekil 3.30'da gösterilmektedir.

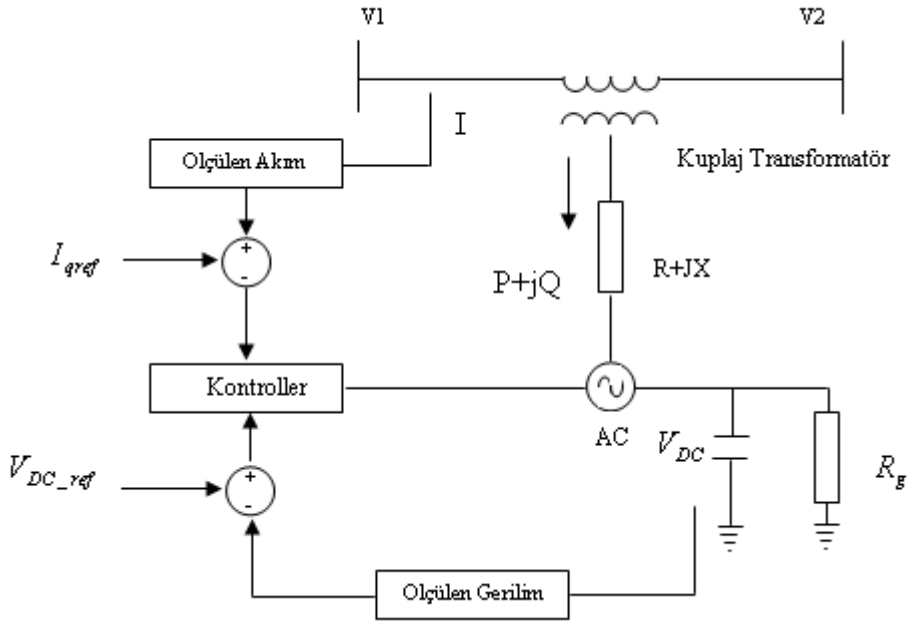


Şekil 3.30: SSSC dört bölge çalışması (Dirik, 2006)

Çalışma bölgelerindeki aktif ve reaktif güçlerin alınıp verileceğini çevirici çıkışındaki gerilim ve yük akımı belirlemektedir. Çalışma modlarında I. bölge olarak aktif gücün verilip reaktif gücün alındığı yer, II. bölge aktif gücün ve reaktif gücün alındığı kısım, III. bölge aktif gücün alındığı reaktif gücün verildiği kısım, IV. bölge de aktif ve reaktif gücün verildiği kısım olarak tanımlanmaktadır. Ayrıca DC kapasitörün şarj veya deşarj olmasına bağlı olarak akımın pozitif veya negatif olduğu yine şekil 3.30'da gösterilmektedir. SSSC'nin pozitif direnç ve negatif direnç olarak çalışmasında DC kapasitörün çevirici devresine olan beslemesine bağlı olarak değişmektedir.

4.5.3. SSSC Kontrolü

SSSC nin kontrol modeli şekil 3.31' de verilmiştir.



Şekil 3.31: SSSC kontrol modeli (Kamarposhi ve diğ., 2008)

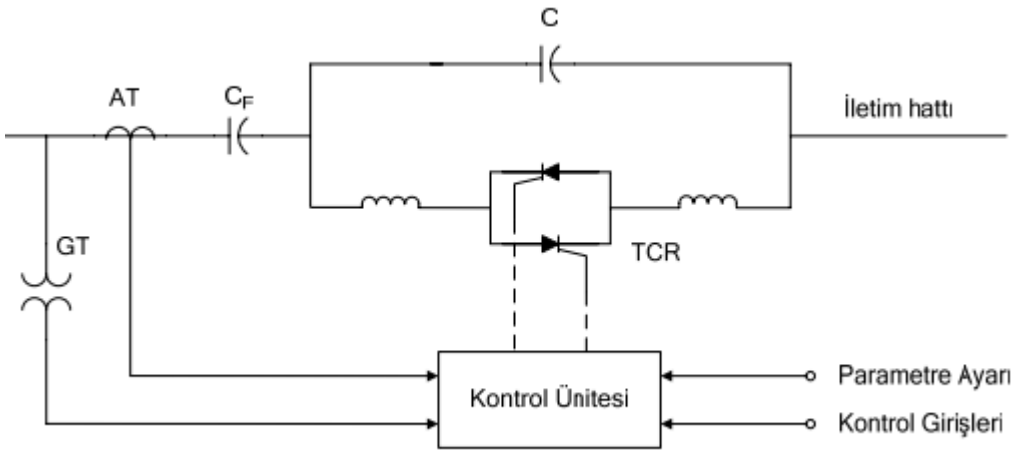
Şekil 3.31'deki iki kontrol metodunun birleşimine göre SSSC hattı kontrol edebilmektedir. Öncelikli olarak kapasitör geriliminin değeri ile referans gerilim değer arasındaki hata miktarı kontrollere girmektedir. Aynı şekilde hattan ölçülen akım değeri de referans akımı ile karşılaştırılarak iki değer arasındaki fark kontroller devresine girmektedir. Kontrol ünitesi sistemin çalışmasına bağlı olarak hattı endüktif ya da

kapasitif olarak beslemektedir. Kapasitör geriliminin ve akımının değerlerine bağlı olarak SSSC sistemin kontrolünü sağlamaktadır.

3.11. TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPANZATÖR (TCSC)

Tristör kontrollü seri kompanzatör (TCSC) seri kompanzasyon olarak iletim hattının endüktif reaktansını azaltarak oluşacak olan gerilim düşümünü kompanze etmek ve sistemden çekilen reaktif gücü azaltmak için kullanılır. TCSC reaktif güç verirken sistemden çekilen reaktif güç oranını azalmaktadır. Kapasitif güç hattan akan akımın karesi ile doğru orantılı olduğundan sistem yükü arttıkça kapasitif güç de artmaktadır. Yükün artmasına paralel olarak çekilen akım değeri de artacağından bunun sonucuna bağlı olarak gerilim düşümü de artmaktadır. TCSC seri kompanzasyonda kullanılarak hattın sistem kapasitesini arttırır (Eminoğlu, 2003).

TCSC genel olarak seri endüktans, tristör grupları ve buna paralel bağlı olan kapasitörlerden oluşmaktadır. Büyük güçlü sistemlerde yüksek gerilim yükselmelerinde hattı korumak için metal oksit varistörlerde kullanılmaktadır (Huang ve Li, 2002). TCSC esas sistemdeki fonksiyonu seri kapasitöre bağlı olarak hattın empedansını kontrol etmektedir. Ayrıca diğer önemli bir özelliği de geçici kararlılık analizin iyi olmasıdır. Şekil 3.32'de TCSC'ün genel yapısı gösterilmektedir.



Şekil 3.32: TCSC genel yapısı (Ertay, 2006)

Sisteme seri olarak bağlanan TCSC yapısı genel anlamıyla SVC yapısına benzemektedir. Ancak SVC sisteme paralel olarak bağlanırken TCSC devreye seri olarak bağlanırlar. Diğer önemli özelliklerinden biri de kuplaj transformatör olmaksızın sisteme bağlanmaktadır. TCSC'ün temel olarak seri kompanzasyon yaparken kapasitör boyutu önemlidir. Kapasitör boyutuna bağlı olarak kondansatördeki şarj ve deşarj sistemin endüktif yük mü yoksa kapasitif yük mü alacağını göstermektedir.

3.11.1. TCSC Sürekli Durum Analizi

İletim hattına verilen güç direk olarak hat empedansı ile doğru orantılı olduğundan hat empedansının kompanze edilmesi sonucu sınır değeri artmaktadır. Örnek olarak diğer parametrelerin sabit olması durumunda %50'lik seri kompanzasyon ile sürekli durum güç kapasitesi yaklaşık olarak iki katına çıkmaktadır. %75'lik seri kompanzasyon ile transfer kapasitesinin dört katına çıkarılması mümkündür. Seri kompanzasyon ile güç kapasitesi büyük değerlerde olsa bile pratikte bu en çok %70'lere çıkmaktadır.

TCSC eşdeğer empedans yönünden TCR ve TSC'den oluşan SVC eşdeğer empedansının benzer şekilde elde edilmektedir. TCSC'ün temel devre karakteristiği kapasitör bloklarına ve tristör devre tetiklemesinde bulunan reaktanslara bağlı olarak değişmektedir. Bu kapasitif reaktans,

$$X_c = \frac{X_c X_l}{X_c[2(\pi-\alpha)+\sin 2\alpha]/\pi - X_l} \tag{3.37}$$

şeklinde hesaplanır. $X_c = X_v$ durumunda oluşan rezonansa karşılık gelen rezonans tetikleme açısı $r_x = X_c / X_l$ oranına bağlı olarak değişmektedir (Canizares ve diğ., 1999).

Ayrıca TCSC'ün temel devre karakteristiği sistemde kullanılan kapasitör grupları ve tristörlerin devre bileşeni reaktansına bağlı olarak değişmektedir. Kollara ait reaktanslar,

$$X_c = -\frac{1}{w_n C} \tag{3.38}$$

$$X_v = X_l \frac{\pi}{2(\pi - \alpha) + \sin 2\pi} \tag{3.39}$$

ifadeleri ile elde edilir. Burada $w_n = 2\pi f_n$ sistemin radyan cinsinden nominal frekansını vermektedir. Sistem rezonans frekansı tristörlerin koldaki endüktans ve seri kapasitörün bulunması ile elde edilir.

TCSC için pratik olarak kapasitör reaktansı kontrolü ve görünür toplam reaktans arası bir yükselme faktörü olarak tanımlanır. Bu yükselme faktörü K_B ile ifade edilmektedir.

$$K_B = \frac{X_{app}}{X_c} \tag{3.40}$$

Yükselme faktörü endüktif ve kapasitif çalışmaya bağlı olarak pozitif veya negatif değer alabilirler. TCSC temel devresi maksimum yükselme faktörü ve kapasitör gerilimine göre tanımlanmaktadır (Song ve Johns, 1999). Bu katsayının birden büyük olması istenmeyen bir durumdur. TCSC seri sabit kapasitör frekansı ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Seri kapasitör reaktansı frekans ile azaldığından dolayı frekans arttıkça kompanzatör reaktansı da artmaktadır.

TCSC'ün dezavantajları seri kapasitör eklenmesinden dolayı hat empedansı ile arasında rezonans durumunun oluşmasıdır. Rezonans durumunun oluşmasında ise mekanik arızalar ortaya çıkmakta ve generatör senkronizmasını kaybetmektedir. Bu gibi arızaların ortadan kalkması için alt senkronizma rezonans söndürücüleri kullanılmaktadır. TCSC'de Harmonik analizi sürekli durum çalışmalarında yapılabilmektedir. TCSC'de genellikle 30 ve daha üstü harmonikler için filtreler kullanılır. TCSC'ün toplam harmonik dağılması aşağıda verilen denklemdeki gibi ifade edilebilir.

$$THD = \frac{1}{V_1} \sqrt{\sum_{n=2}^{30} V_n^2} \tag{3.41}$$

Gerilim ve akım harmoniklerinin toplam harmonik dağılımı tristör tetiklemelerine bağlı olarak ayrıca hesaplanabilir (Eminoğlu, 2003). Sistemin reaktans/süseptans kontrolü ile hat gerilimi, hat akımı, faz açısı, hattan çekilen aktif ve reaktif güç kontrol edilmektedir. Parametrelerin birisinde olan değer değişimi diğer parametreler üzerinde de etki oluşturmaktadır.

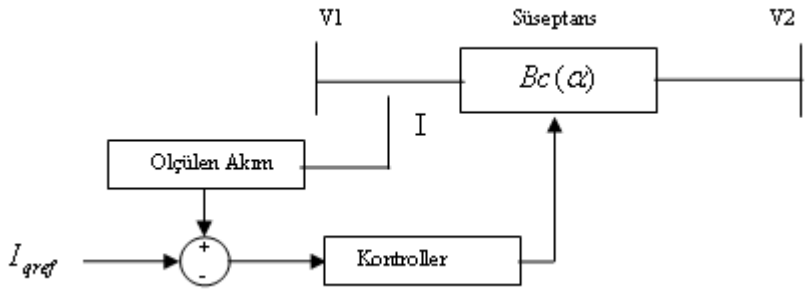
3.11.2. TCSC Çalışma Modları

TCSC tristör tetiklemelerine bağlı olarak çeşitli modlarda tetiklenmektedir. Normal çalışma koşullarında TCSC'ün dört tane çalışma modu bulunmaktadır. Bu modlar tıkama (blok) modeli, bypass modeli, artan kapasite modeli ve artan endüktans modelidir.

Blok modu tristör gruplarının devamlı devrede kalmaması için kullanılmaktadır. Blok modunda hat akımı seri kapasitörün akımına eşit olmaktadır. Bypass modülü ise blok modülünün tam aksine tristör gruplarının devamlı olarak devrede kalması için kullanılmaktadır. Tristör gruplarında kesime gitme olayı bu modda gerçekleşmez. Kapasite arttıran modda tristör hat sıfır çizgisinde gerilime bağlı olarak tetiklenirler. Kapasitif özelliğin artmasında kapasitörlerin şarj veya deşarj durumlarına göre oluşan akımlar endüktans kollarında dolaşarak kapasitif özelliği oluşturmaktadır. Endüktansı artan modda ise sistem içinde dolaşan akımlar hat akımından daha büyük olmaktadır. Bu durumun oluşması ile sinüs dalgasının bozulması problemi ortaya çıkmaktadır. Bu problemi engellemek için tristör grupları tetiklenerek devreye endüktans alınarak akım değerlerinin eşitlenmesi sağlanmaktadır (Khederzadeh, 2007).

3.11.3. TCSC Kontrolü

TCSC'ün kontrol modeli Şekil 3.33'te verilmiştir.



Şekil 3.33: TCSC kontrol modeli (Kamarposhi, 2008).

TCSC kontrol modelinde sonsuz baralı sistemde hattan geçen akım değeri ile referans değeri arasındaki fark denetleyici ünitesine girer. Kontrol ünitesi ise belirlenen hata miktarı ile hattın süseptans değerini hesaplar. Endüktif veya kapasitif çalışma durumuna bağlı olarak tristör tetikleme açıları bulunur. Bu belirlenen tristör tetikleme açıları sistemin endüktif veya kapasitif çalışmasını kontrol etmiş olur.

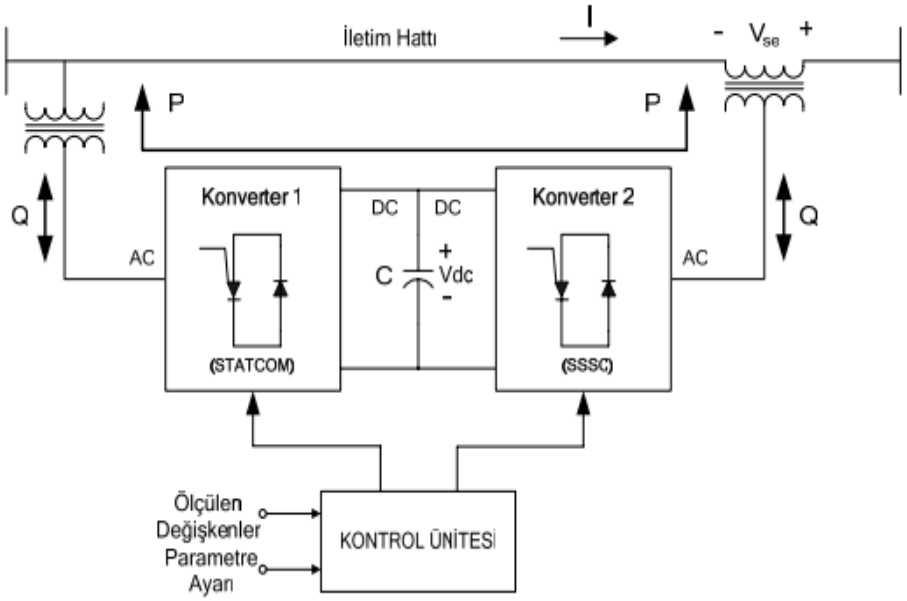
3.12. BİRLEŞTİRİLMİŞ GÜÇ AKIŞI KONTROLÜ (UPFC)

Birleştirilmiş güç akışı kontrolü (UPFC), hattı seri ve paralel olarak kontrol eden FACTS cihazıdır. Hattaki seri bağlantısında SSSC, paralel bağlantısında ise STATCOM olarak kullanılmaktadır. SSSC'nin çıkış ucu ile şönt STATCOM'un çıkış ucu arasında çift yönlü olarak aktif güç akışını kontrol etmektedir. UPFC bu birleşim sayesinde hat gerilimini, hat empedansını, hat açısını ve hattın aktif ve reaktif gücünü kontrol etmektedir. UPFC gerilim ile reaktif gücü, açı ile aktif gücü denetlemektedir. Diğer FACTS cihazlarına nazaran hem gerilim hem de açı kontrolünü daha kapsamlı olarak yapmaktadır. UPFC'nin diğer bir özelliği, hat başı ve hat sonu gerilimleri arasında etkin faz açısını kontrol etmek için seri olarak enjekte edilen gerilimi faz kaydırıcı olarak kullanmaktadır (Karadeniz, 2006).

3.12.1. UPFC Çalışma Karakteristiği

Genel olarak UPFC GTO gibi yarı iletken güç elemanlarının kullanıldığı iki çeviriciden oluşmaktadır. Her iki çevirici birbirinden bağımsızdır, sistemden reaktif güç çekme veya sisteme reaktif güç vermeyi sağlarlar. Konvertörler için gerekli olan gerilim DC kapasitör sayesinde karşılanmaktadır. UPFC'de ikinci konverterin kullanım amacı p faz

açısının kontrol edilebilmesi için V_{pq} büyüklüğünde gerilim ilave edilmesidir. UPFC'nin genel sistem şeması şekil 3.34'te gösterilmiştir.



Şekil 3.34: UPFC genel sistem şeması (Ertay, 2006)

UPFC'nin AC ucundaki reaktif güç değişimi, bağlı olduğu çevirici tarafından sağlanmaktadır. AC girişteki aktif güç DC hattın güç talebini karşılamak için birinci çevirici tarafından DC güce dönüştürülmektedir. Birinci çevirici, ikinci çeviricinün güç talebini karşılamak üzere AC sistemde güç çekme veya AC sisteme güç verme amacı ile kullanılır. DC hattın gücü, gerilimin tekrar AC gerilime dönüştürülmesi ile AC güce dönüştürülür. Birinci konvertör ayrıca AC sistemden reaktif güç çekerek veya sisteme reaktif güç vererek reaktif güç kompanzasyonu yapmış olur.

UPFC çalışma karakteristiğinden anlaşıldığı gibi, reaktif güç kontrolü yapılırken ayrıca sisteme seri olarak gerilim eklenmesinden dolayı, faz açısı kontrollü de yapılmaktadır (Song ve Johns, 1999), (Uzunoviç ve diğ., 1998).

3.13. FACTS CİHAZLARINDA KONTROL YAPILARI

FACTS cihazlarında kontrol yapısı olarak Oransal Türev (PD), Oransal İntegral (PI) ve Oransal Türev İntegral (PID) kontrol yapıları kullanılmaktadır. FACTS cihazlarında kullanılan bu kontrol yapıları ile sistemde oluşan geçici kararlılık olayları gibi istenmeyen durumların ortaya çıkmasına karşı sistemin daha güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamaktadır.

3.13.1. Oransal Türev (PD) Kontrol Yapısı

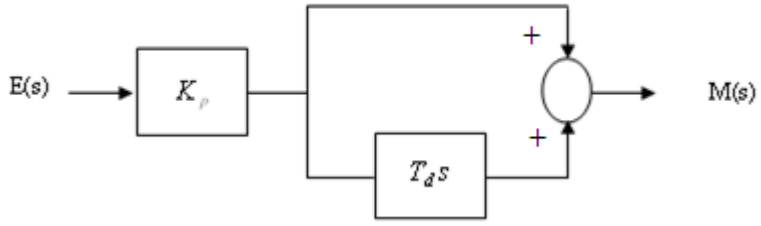
Türev etki çıkışı, hatanın zamanına bağlı olarak türev ile orantılı olmaktadır. Türevsel etki çıkışı,

$$m(t) = K_d \frac{de}{dt} \tag{3.42}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada m(t) türev etki çıkışını, de/dt ise hatanın zamana bağlı türev değişkenini belirtmektedir. Transfer fonksiyonu ise,

$$M(s) = E(s)K_p(1+T_d s) \tag{3.43}$$

şeklinde ifade edilir. Türev etkinin en önemli üstünlüğü, hatanın büyümesini önceden belirleyebilmesi ve büyük bir hata çıkabilme durumuna karşı düzeltme etkisi sağlayabilmektedir. Şekil 3.35'te PD denetim sisteminin kontrol yapısı gösterilmiştir.



Şekil 3.35: PD kontrol yapısı (Yüksel, 2001)

E(s) giriş fonksiyonu ile M(s) çıkış fonksiyonu arasındaki hata değeri K_d değerlerine girerek istenen çıkış değerine eşit veya ona çok yakın bir değer elde edilmesini sağlamaktadır.

3.13.2. Oransal İntegral (PI) Kontrol Yapısı

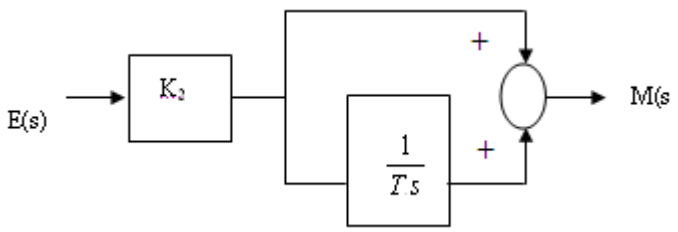
İntegral etki çıkışı, hatanın zamana bağlı olarak integrali ile orantılı olmaktadır. İntegral etki çıkışı,

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt \tag{3.44}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada m(t) integral etki çıkışını, $\int_0^t e(t)dt$ ise hatanın zamana bağlı integral değişkenini belirtmektedir. Transfer fonksiyonu ise,

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i}s) \tag{3.45}$$

şeklinde ifade edilir. İntegral etkinin en önemli özelliği geçmişte meydana gelen hataların birleşimi ile orantılı olarak çalışırken herhangi bir anda hatanın integrali büyük olduğunda düzeltme etkisi sağlanmaktadır. Şekilde 3.36'da PI denetim sisteminin kontrol yapısı görülmektedir.



Şekil 3.36: PI kontrol yapısı (Yüksel, 2001)

Bu kontrol yapısının çalışması E(s) giriş fonksiyonu ile M(s) çıkış fonksiyonu arasındaki hata değeri K_p ve K_i değerlerine girerek istenen çıkış değerine eşit veya ona çok yakın bir değer elde edilmesini sağlamaktadır.

3.13.3. Oransal İntegral Türev (PID) Kontrol Yapısı

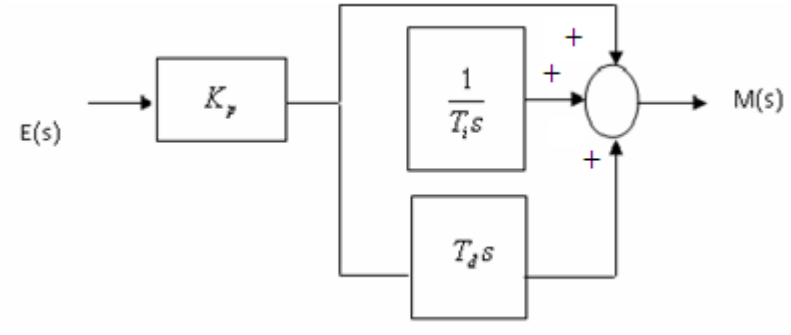
İntegral ve türev etki çıkışı, hatanın zamana bağlı olarak integral ve türevi ile orantılıdır. İntegral türev çıkış etkisi,

$$m(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t)dt + K_d \frac{de}{dt} \tag{3.46}$$

şeklinde ifade edilmektedir. Burada m(t) integral ve türev etki çıkışını, $\int_0^t e(t)dt$ ise hatanın zamana bağlı integral değişkenini, $\frac{de}{dt}$ ise hatanın zamana bağlı türev değişimini belirtmektedir. Transfer fonksiyonu ise,

$$\frac{M(s)}{E(s)} = K_p(1 + \frac{1}{T_i}s + T_d s) \tag{3.47}$$

şeklinde ifade edilir. PID denetimi, üç temel denetim etkisinden meydana gelmiştir. Üç denetim etkisinin üstünlüklerini tek birim içerisinde birleştiren bir denetim etkisidir. İntegral etki sistemde ortaya çıkabilecek kalıcı-durum hatasını sıfırlarken türev etkisi yalnızca PI denetim kullanılmasına göre sistemin aynı bağıl kararlılığı için cevap hızını arttırır. Şekil 3.37'de PID denetim sisteminin kontrol yapısı görülmektedir.



Şekil 3.37: PID kontrol yapısı (Yüksel, 2001)

PID kontrol yapısında giriş E(s) fonksiyonu ile çıkış M(s) fonksiyonu arasındaki hata değeri K_p, K_i ve K_d değerlerine girerek istenen çıkış değerine eşit veya ona çok yakın bir değer elde edilmesini sağlamaktadır (Yüksel, 2001).

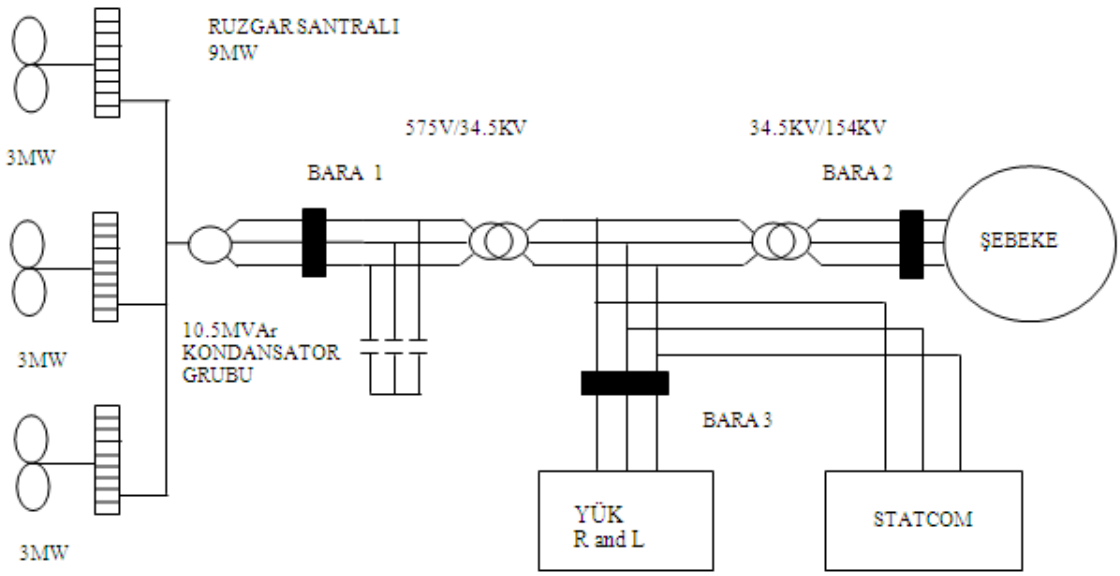
4.BULGULAR

4.1. RÜZGAR SANTRALİNDE FACTS CİHAZLARININ KULLANIMI İLE ELDE EDİLEN SONUÇLAR

Bu bölümde, FACTS cihazlarının rüzgar santralindeki bir yük barasında gerilim aktif güç ve reaktif güç değişimleri FACTS cihazları kullanılarak Matlab/Simulink ortamında incelenmiştir. STATCOM ve SVC sistemde bulunan yük barasına paralel bağlı iken SSSC ve TCSC yük barasına seri olarak bağlanmıştır. FACTS cihazlarının kontrol modellemesinde Oransal İntegral (PI) metodu kullanılmıştır. STATCOM gerilim kontrolünde Kp=1, Ki=500, SVC gerilim kontrolünde Kp=10, Ki=300, SSSC akım kontrolünde Kp=0.03, Ki= 1.5, TCSC akım kontrolünde ise Kp=0.001, Ki=0.02 değerleri kullanılmıştır. Farklı aktif ve reaktif güç değerlerinde yük barasının gerilim, aktif güç ve reaktif güç değişim eğrileri çizilmiştir. Gerilim, aktif güç ve reaktif gücün kararlı oldukları değerler ve zaman cevapları çizelgeler halinde verilmiştir. FACTS cihazlarının rüzgar santralinde değişken yük altındaki etkileri incelenmiştir. Farklı zamanlar içerisinde devreye alınan farklı yüklerin yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç eğrileri çizilerek kararlı oldukları değerler ve zaman cevapları çizelgeler halinde verilmiştir.

4.1.1 STATCOM Kullanarak Rüzgar Santralinin Gerilim ve Güç Analizi

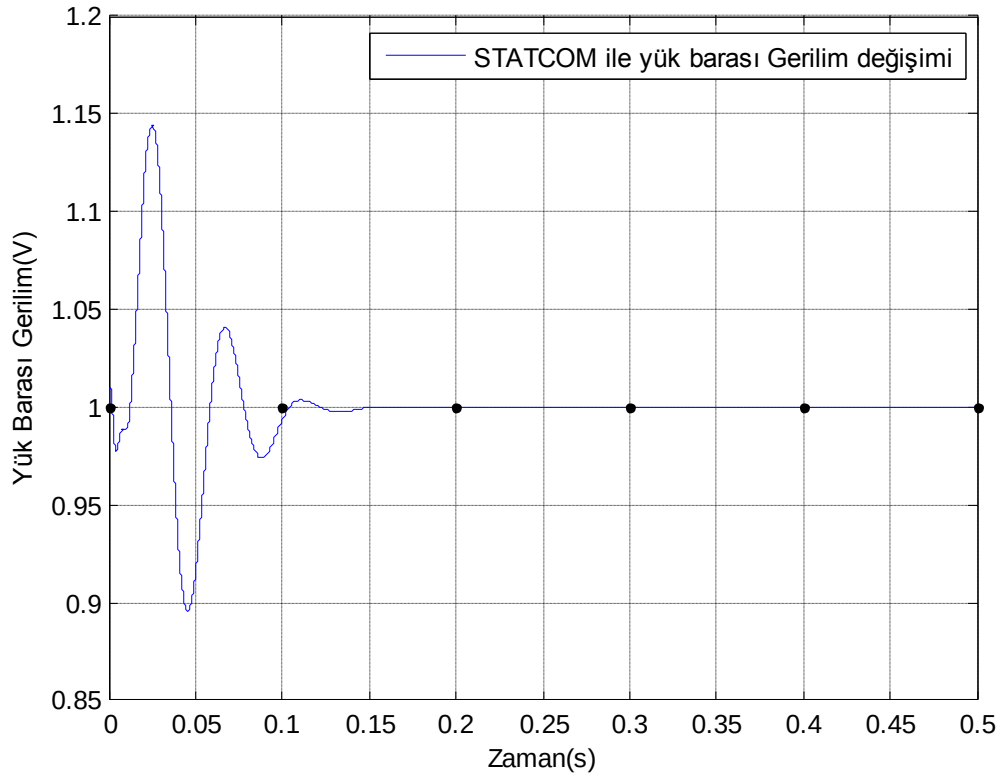
Sonsuz baraya veya enterkonnekte şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralinin yük barasındaki gerilim ve reaktif güç kontrolü ile aktif güç değişiminin incelenmesi için 10 MVA'lık bir STATCOM kullanılmıştır. Bu çalışmanın devre modeli şekil 4.1'de gösterilmiştir.



Şekil 4.1: Rüzgar santralinin STATCOM ile modellenmesi

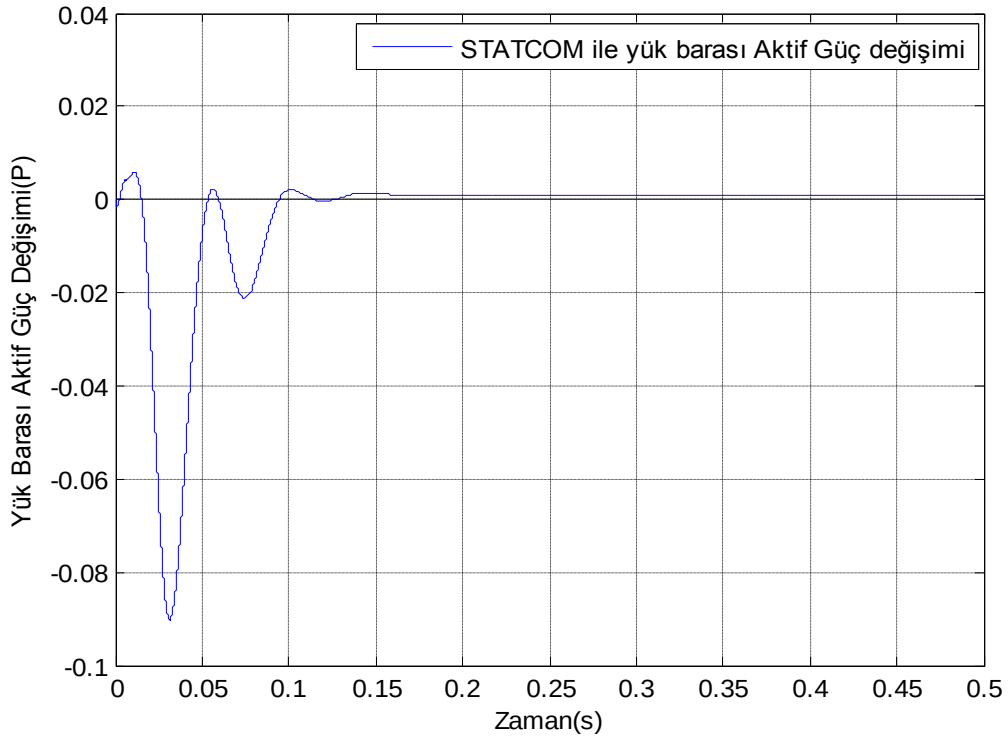
Rüzgar santralinde çift beslemeli asenkron generatör kullanılmıştır. Bu sistemde 3 tane 3 MW'lık rüzgar santrali kullanılmıştır. 9MW'lık rüzgar santrali 1 numaralı baraya bağlanmıştır. Rüzgar santrali reaktif gücün belli kısmını şebekeden ve kapasitör gruplarından karşılamaktadır. Bundan dolayı sistemde 10,5 MVAr'lık bir kondansatör grubu kullanılmıştır. Rüzgar santralinden elde edilen 575 V gerilim yükseltici transformatör sayesinde 34,5 KV' a yükseltilmiştir. Sistemin 2 numaralı barasına 154 KV'luk şebeke bağlanmıştır. Şebekedeki 154 KV'luk gerilim alçaltıcı transformatör ile 34,5 KV'da düşürülmüştür. 3 numaralı bara ise sistemde yük barası olarak kullanılmıştır. 10 MVA'lık STATCOM'un 3 nolu baraya paralel bağlanması ile 3 farklı aktif ve reaktif güç değerinde yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç eğrileri çizilmiştir. Kararlı oldukları değerler ve zaman cevapları çizelge halinde sunulmuştur.

Yük barasındaki yükün değeri 4MW ve 2MVAr olduğu andaki STATCOM'un kullanılmasına bağlı olarak elde edilen grafikler şekil 4.2, şekil 4.3. ve şekil 4.4'te verilmiştir.



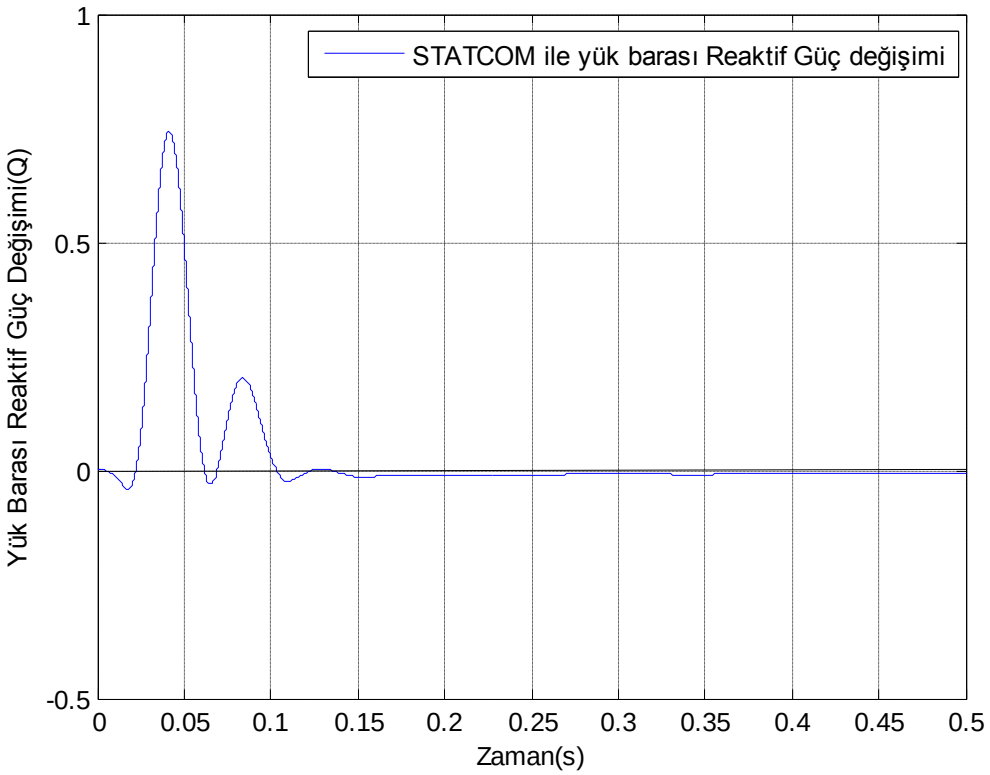
Şekil 4.2: STATCOM ile yük barası gerilim değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki gerilimin kontrolü STATCOM ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.15 saniyede gerilim referans olarak kabul edilen 1 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.2'de görülmektedir. STATCOM ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.



Şekil 4.3: STATCOM ile yük barası aktif güç değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki aktif güç değişimi STATCOM ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.15 saniyede aktif güç referans olarak kabul edilen 0 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.3'te görülmektedir. STATCOM ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.

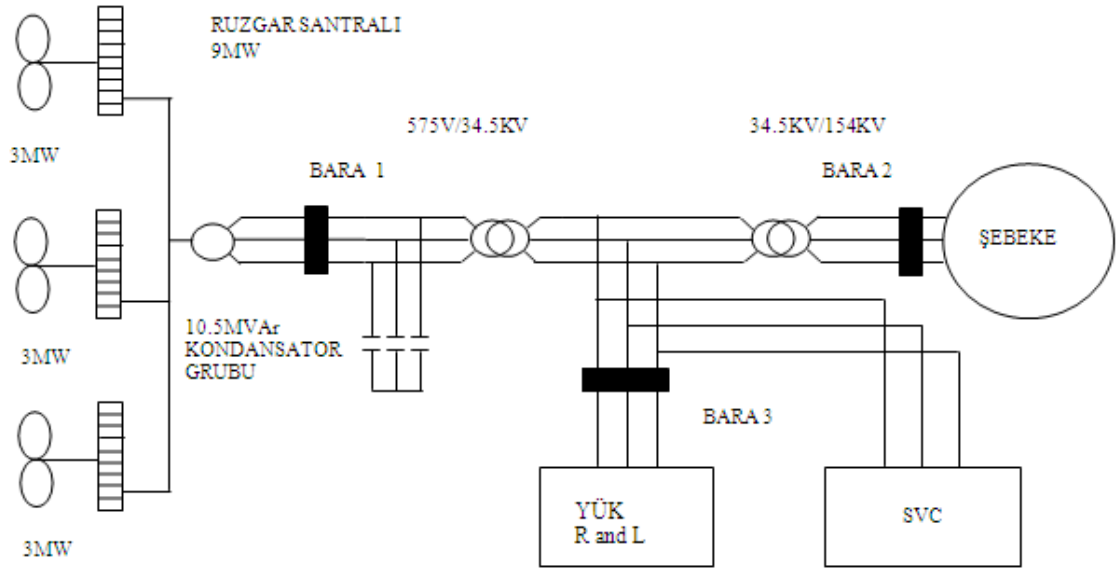


Şekil 4.4: STATCOM ile yük barası reaktif güç değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki reaktif güç değişimi STATCOM ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.15 saniyede reaktif güç referans olarak kabul edilen 0 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.4'te görülmektedir. STATCOM ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.

4.1.2. SVC Kullanarak Rüzgar Santralinin Gerilim ve Güç Analizi

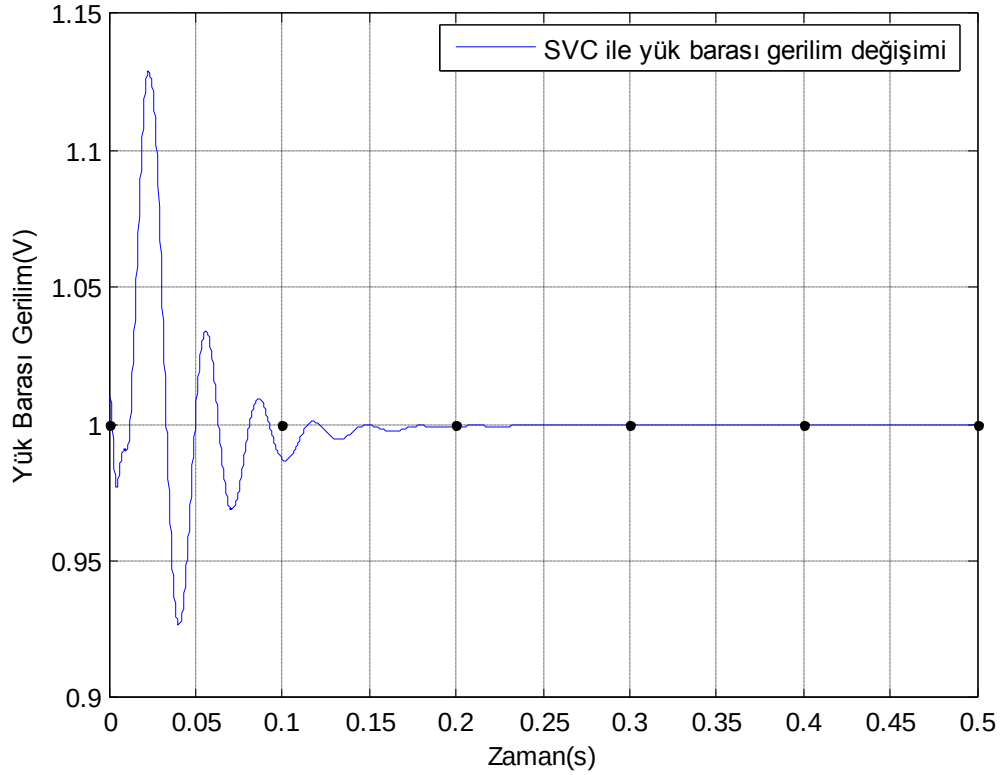
Sonsuz baraya veya enterkonnekte şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralinin yük barasındaki gerilim ve reaktif güç kontrolü ile aktif güç değişiminin incelenmesi için 10 MVA'lık bir SVC kullanılmıştır. Bu çalışmanın devre modeli şekil 4.5'de gösterilmiştir.



Şekil 4.5: Rüzgar santralinin SVC ile modellemesi

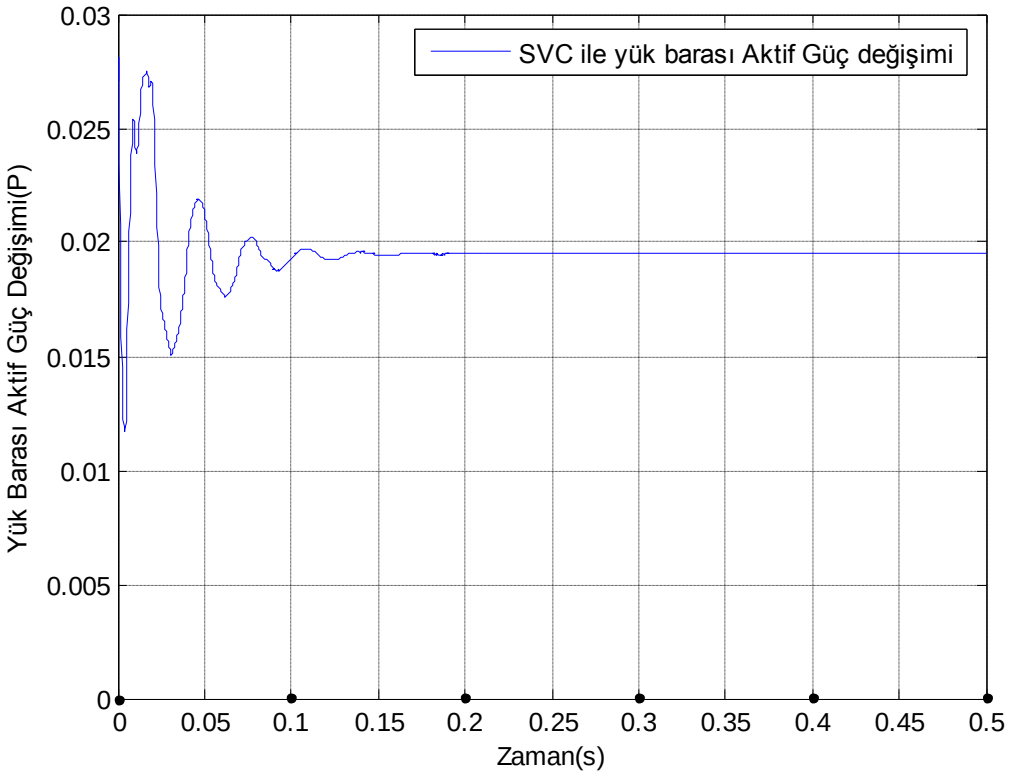
Rüzgar santralinde çift beslemeli asenkron generatör kullanılmıştır. Bu sistemde 3 tane 3 MW'lık rüzgar santrali kullanılmıştır. 9MW'lık rüzgar santrali 1 numaralı baraya bağlanmıştır. Rüzgar santrali reaktif gücün belli kısmını şebekeden ve kapasitör gruplarından karşılamaktadır. Bundan dolayı sistemde 10,5 MVAr'lık bir kondansatör grubu kullanılmıştır. Rüzgar santralinden elde edilen 575 V gerilim yükseltici transformatör sayesinde 34,5 KV'a yükseltilmiştir. Sistemin 2 numaralı barasına 154 KV'luk şebeke bağlanmıştır. Şebekedeki 154 KV'luk gerilim alçaltıcı transformatör ile 34,5 KV'da düşürülmüştür. 3 numaralı bara ise sistemde yük barası olarak kullanılmıştır. 10 MVA'lık SVC'nin 3 nolu baraya paralel bağlanması ile 3 farklı aktif ve reaktif güç değerinde yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç eğrileri çizilmiştir. Kararlı oldukları değerler ve zaman cevapları çizelge halinde sunulmuştur.

Yük barasındaki yükün değeri 4MW ve 2MVAr olduğu andaki SVC'nin kullanılmasına bağlı olarak elde edilen grafikler şekil 4.6, şekil 4.7. ve şekil 4.8'de verilmiştir.



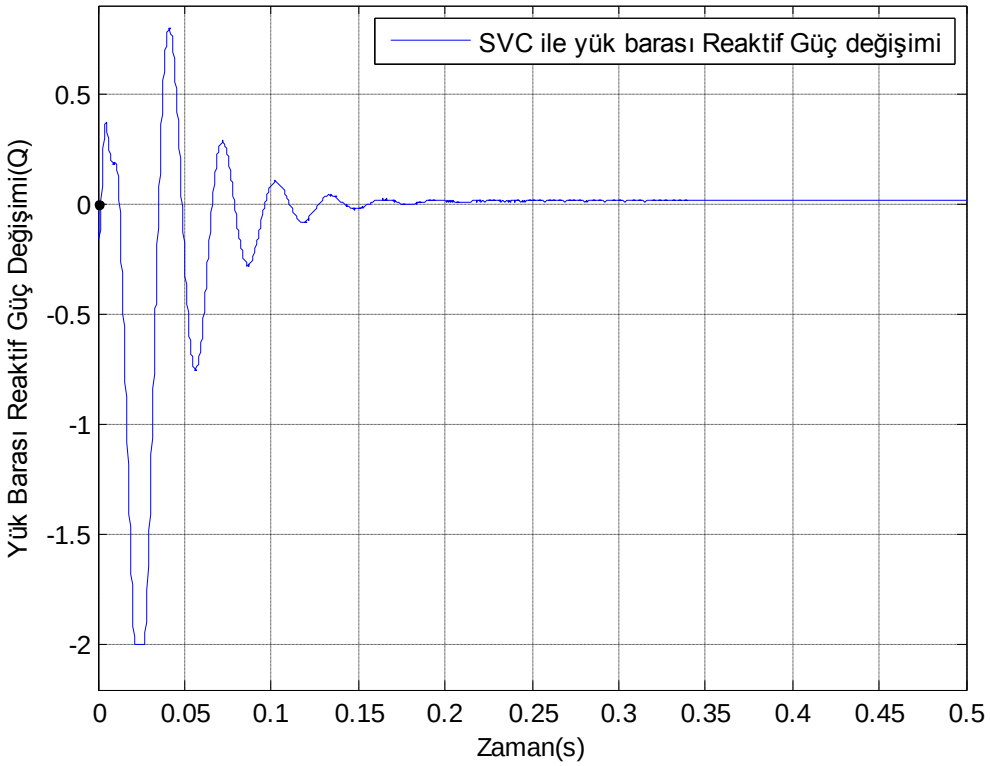
Şekil 4.6: SVC ile yük barası gerilim değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki gerilimin değişimi SVC ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.23 saniyede gerilim referansı olarak kabul edilen 1 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.6'da görülmektedir. STATCOM ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.



Şekil 4.7: SVC ile yük barası aktif güç değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki aktif güç değişimi SVC ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.23 saniyede aktif güç referansı olarak kabul edilen 0 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.7'de görülmektedir. SVC ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.

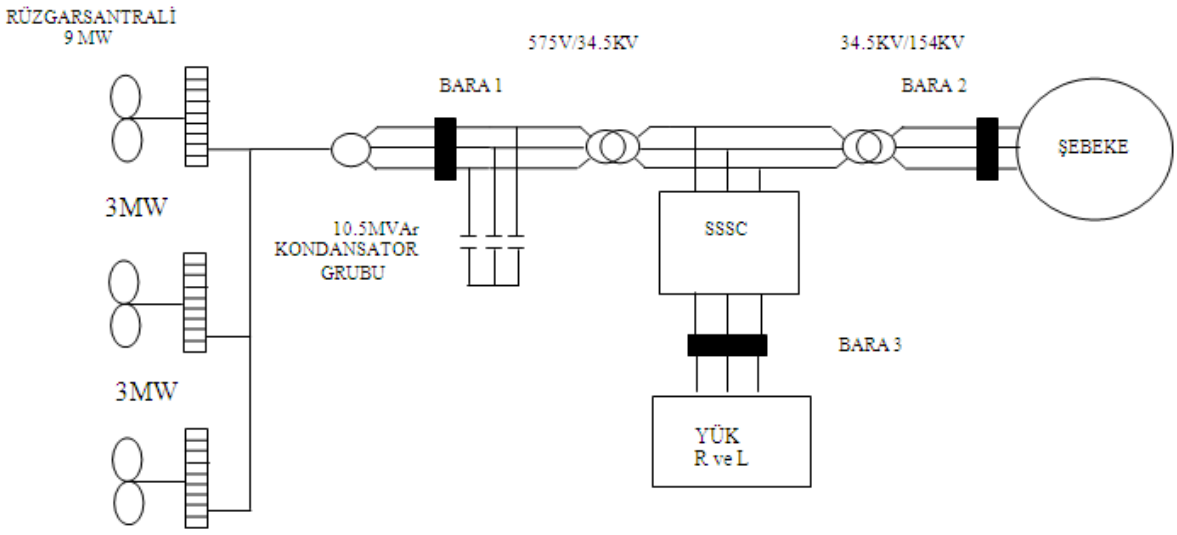


Şekil 4.8: SVC ile yük barası reaktif güç değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki reaktif güç değişimi SVC ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.23 saniyede reaktif güç referansı olarak kabul edilen 0 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.8'de görülmektedir. SVC ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.

4.1.3. SSSC Kullanarak Rüzgar Santralinin Gerilim ve Güç Analizi

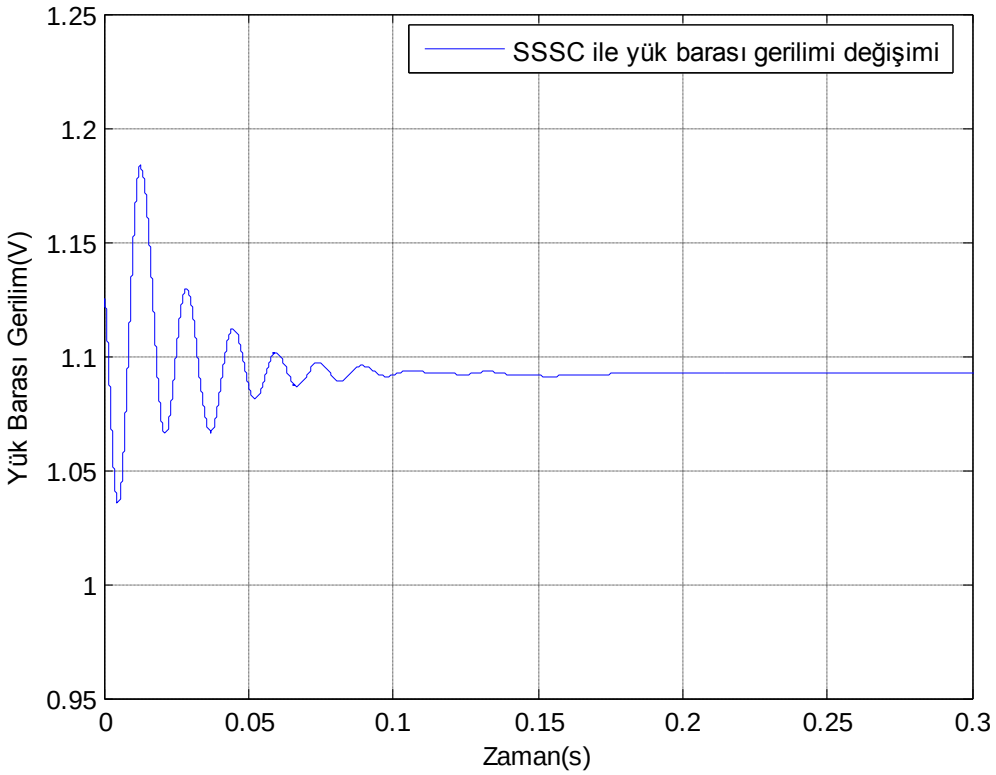
Sonsuz baraya veya enterkonnekte şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralinin yük barasındaki gerilim ve reaktif güç kontrolü ile aktif güç değişiminin incelenmesi için 10 MVA'lık bir SSSC kullanılmıştır. Bu çalışmanın devre modeli şekil 4.9'da gösterilmiştir.



Şekil 4.9: Rüzgar santralinin SSSC ile modellenmesi

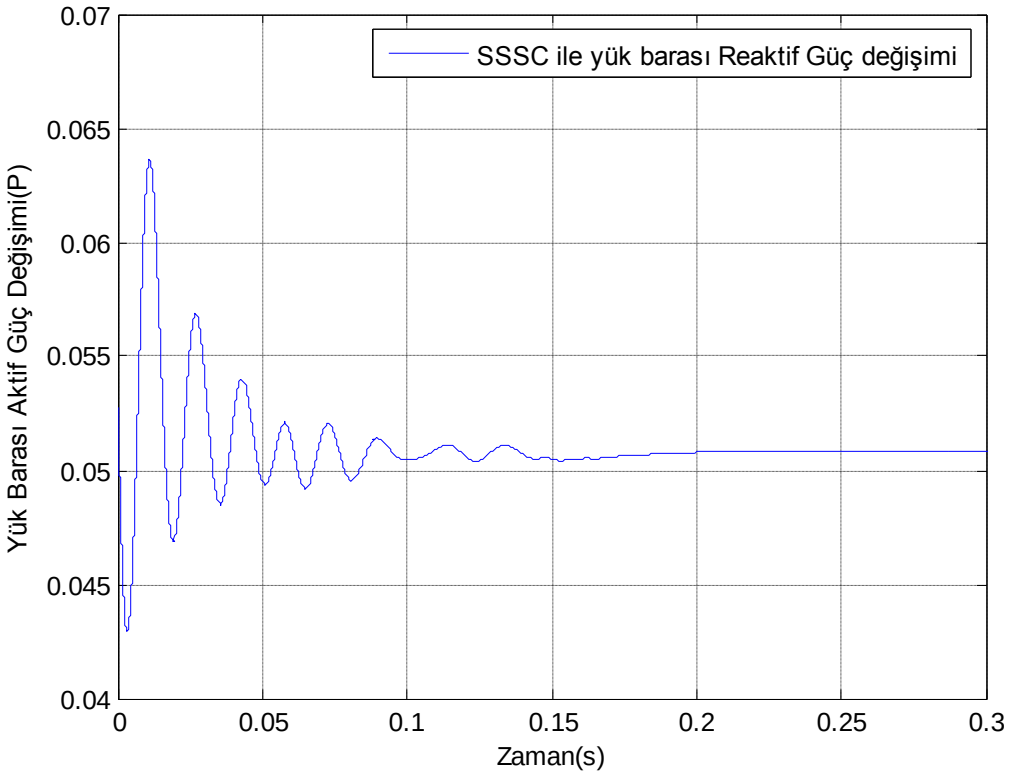
Rüzgar santralinde çift beslemeli asenkron generatör kullanılmıştır. Bu sistemde 3 tane 3 MW'lık rüzgar santrali kullanılmıştır. 9MW'lık rüzgar santrali 1 numaralı baraya bağlanmıştır. Rüzgar santrali reaktif gücün belli kısmını şebekeden ve kapasitör gruplarından karşılamaktadır. Bundan dolayı sistemde 10,5 MVAr'lık bir kondansatör grubu kullanılmıştır. Rüzgar santralinden elde edilen 575 V gerilim yükseltici transformatör sayesinde 34,5 KV'a yükseltilmiştir. Sistemin 2 numaralı barasına 154 KV'luk şebeke bağlanmıştır. Şebekedeki 154 KV'luk gerilim alçaltıcı transformatör ile 34,5 KV da düşürülmüştür. 3 numaralı bara ise sistemde yük barası olarak kullanılmıştır. 10 MVA'lık SSSC'nin 3 nolu baraya seri bağlanması ile 3 farklı aktif ve reaktif güç değerinde yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç eğrileri çizilmiştir. Kararlı oldukları değerler ve zaman cevapları çizelge halinde sunulmuştur.

Yük barasındaki yükün değeri 4MW ve 2MVAr olduğu andaki SSSC'nin kullanılmasına bağlı olarak elde edilen grafikler şekil 4.10, şekil 4.11. ve şekil 4.12'de verilmiştir.



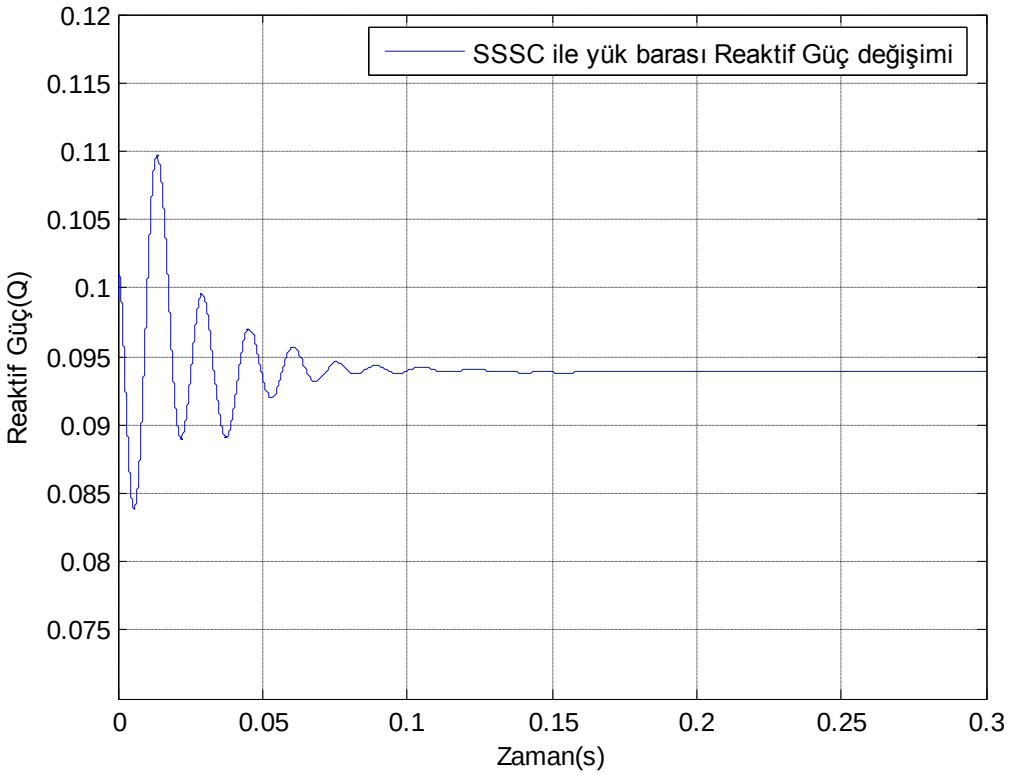
Şekil 4.10: SSSC ile yük barası gerilim değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki gerilim değişimi SSSC ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.18 saniyede gerilim referansı olarak kabul edilen 1 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.10'da görülmektedir. SSSC ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.



Şekil 4.11: SSSC ile yük barası aktif güç değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki aktif güç değişimi SSSC ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.18 saniyede aktif güç referansı olarak kabul edilen 0 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.11'de görülmektedir. SSSC ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.

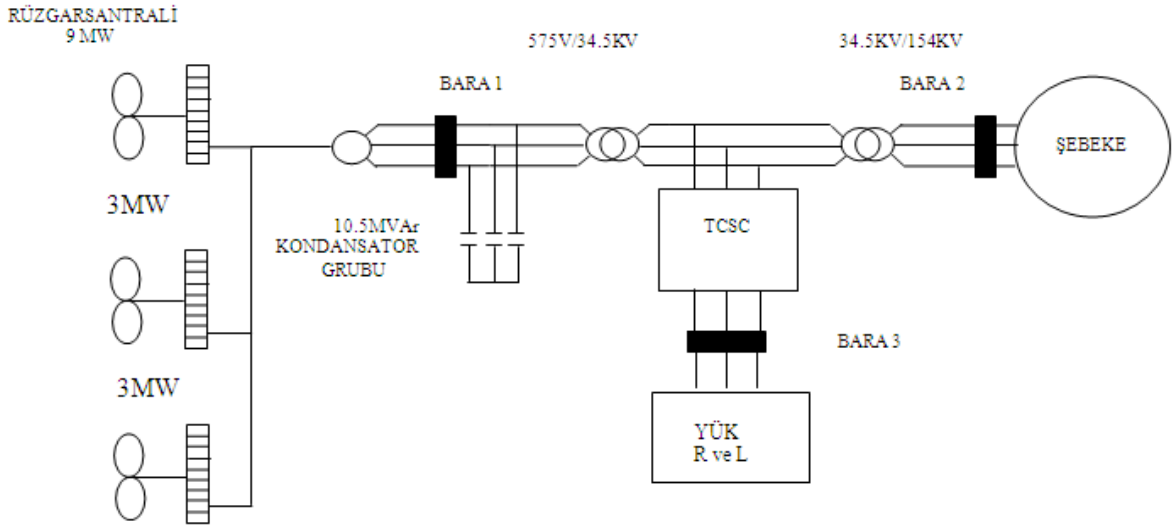


Şekil 4.12: SSSC ile yük barası reaktif güç değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki reaktif güç kontrolü SSSC ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.18 saniyede reaktif güç referansı olarak kabul edilen 0 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.12'de görülmektedir. SSSC ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.

4.1.4. TCSC Kullanarak Rüzgar Santralinin Gerilim ve Güç Analizi

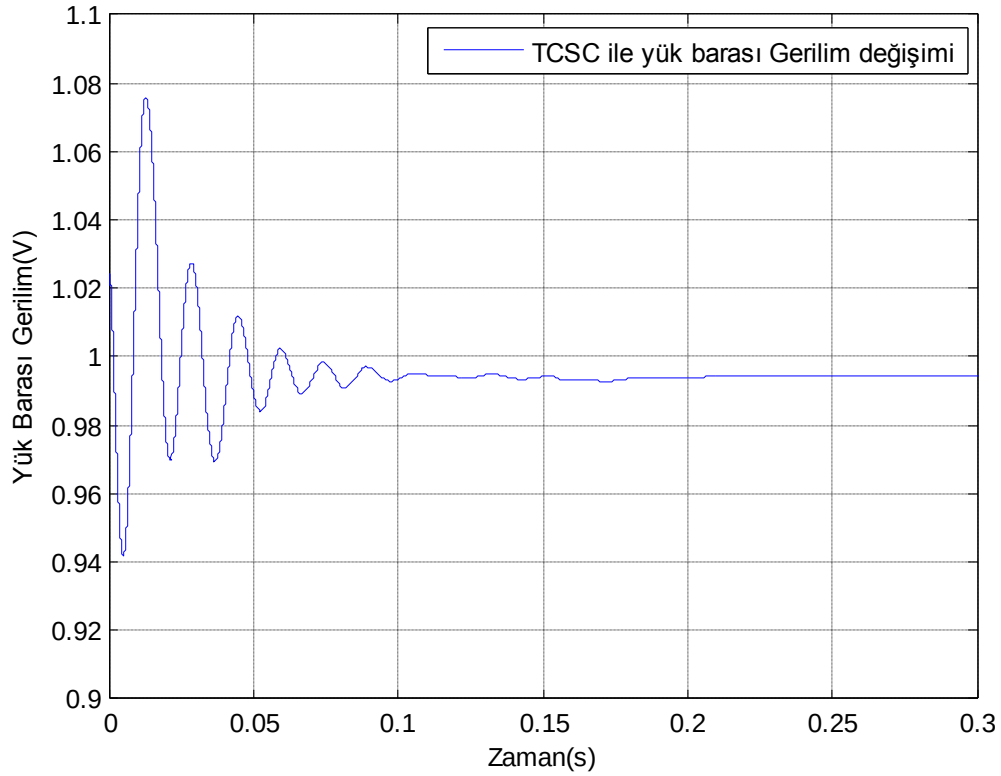
Sonsuz baraya veya enterkonnekte şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralinin yük barasındaki gerilim ve reaktif güç kontrolü ile aktif güç değişiminin incelenmesi için TCSC kullanılmıştır. Bu çalışmanın devre modeli şekil 4.13'te gösterilmiştir.



Şekil 4.13: Rüzgar santralinin TCSC ile modellenmesi

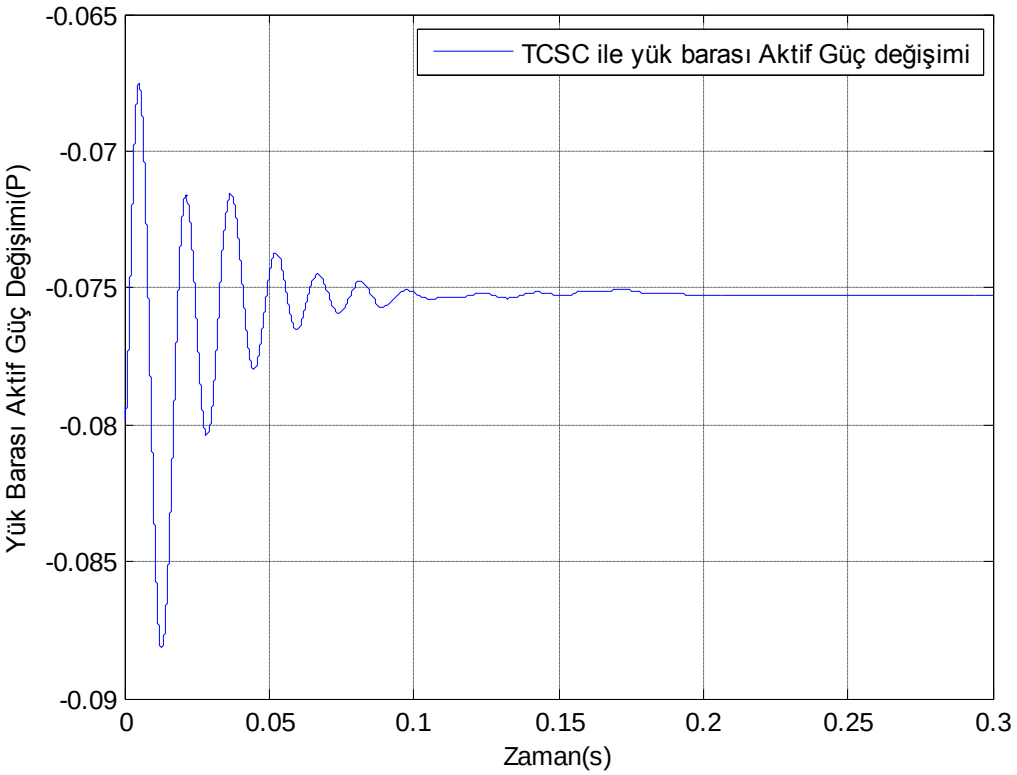
Rüzgar santralinde çift beslemeli asenkron generatör kullanılmıştır. Bu sistemde 3 tane 3 MW'lık rüzgar santrali kullanılmıştır. 9MW'lık rüzgar santrali 1 numaralı baraya bağlanmıştır. Rüzgar santralinin reaktif gücün belli kısmını şebekeden ve kapasitör gruplarından karşılamaktadır. Bundan dolayı sistemde 10,5 MVAr'lık bir kondansatör grubu kullanılmıştır. Rüzgar santralinden elde edilen 575 V gerilim yükseltici transformatör sayesinde 34,5 KV'a yükseltilmiştir. Sistemin 2 numaralı barasına 154 KV'luk şebeke bağlanmıştır. Şebekedeki 154 KV'luk gerilim alçaltıcı transformatör ile 34,5 KV da düşürülmüştür. 3 numaralı bara ise sistemde yük barası olarak kullanılmıştır. TCSC'ün 3 nolu baraya seri bağlanması ile 3 farklı aktif ve reaktif güç değerinde yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç eğrileri çizilmiştir. Kararlı oldukları değerler ve zaman cevapları çizelge halinde sunulmuştur.

Yük barasındaki yükün değeri 4MW ve 2MVAr olduğu andaki TCSC'ün kullanılmasına bağlı olarak elde edilen grafikler şekil 4.14, şekil 4.15. ve şekil 4.16'da verilmiştir.



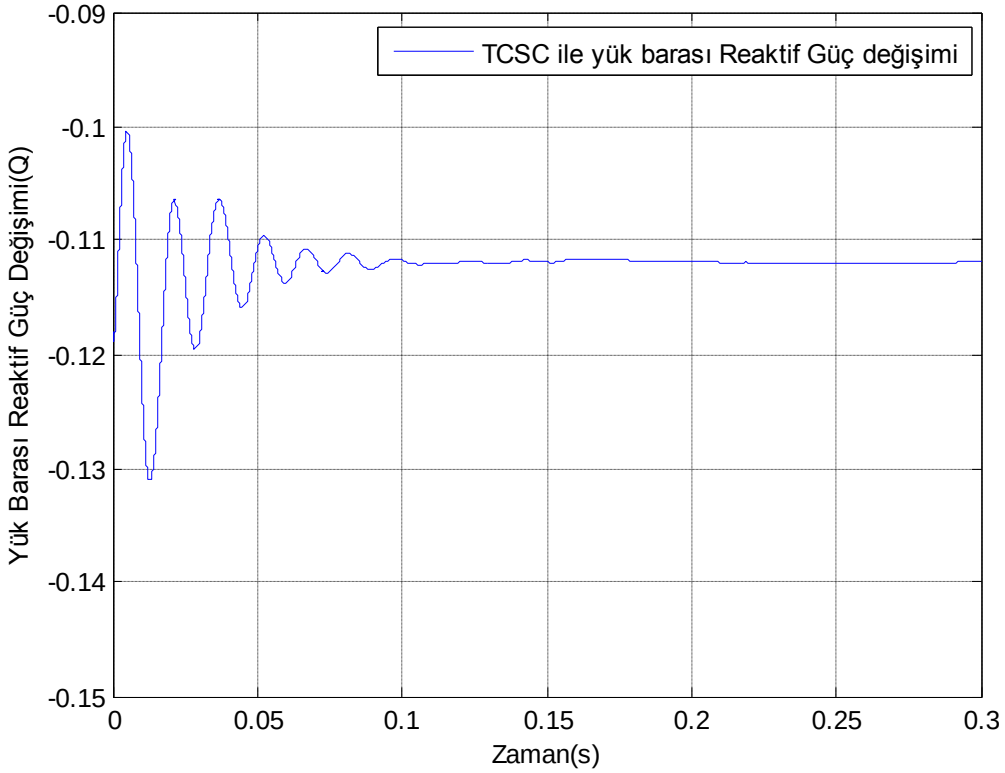
Şekil 4.14: TCSC ile yük barası gerilim değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki gerilim değişimi TCSC ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.21 saniyede gerilim referansı olarak kabul edilen 1 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.14'de görülmektedir. TCSC ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.



Şekil 4.15: TCSC ile yük barası aktif güç değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki aktif güç değişimi TCSC ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.21 saniyede aktif güç referansı olarak kabul edilen 0 p.u değerine çok yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.15'te görülmektedir. TCSC ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.



Şekil 4.16: TCSC ile yük barası reaktif güç değişimi

Verilen sistemde yük barasındaki reaktif güç değişimi TCSC ile incelenmektedir. Yaklaşık olarak 0.21 saniyede reaktif güç referansı olarak kabul edilen 0 p.u değerine yakın bir değerde tekrar kararlı hale geldiği şekil 4.16'da görülmektedir. TCSC ile sistemin çalışmasında osilasyon sönümlemesi de zaman içinde kararlı hale gelmektedir.

Sisteme 4MW ve 2MVAr yük değerlerinde devreye alındığında elde edilen sonuçlar çizelge 4.1'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.1: 4MW ve 2MVAr yük değerlerinde elde edilen sonuçlar

Kompanzatör tipi	Yük barası zaman cevabı(s)	Gerilim p.u. (V)	Aktif güç p.u.(W)	Reaktif güç p.u (Q)
STATCOM	0.15	1.005	-0.13	0.13
SVC	0.23	1.002	0.019	0.011
SSSC	0.18	1.085	0.05	0.093
TCSC	0.21	0.99	-0.1	-0.104

Sisteme 5MW ve 3MVAr yük değerlerinde devreye alındığında elde edilen sonuçlar çizelge 4.2'de gösterilmiştir.

Çizelge 4.2: 5MW ve 3MVAr yük değerlerinde elde edilen sonuçlar

Kompanzatör tipi	Yük barası zaman cevabı(s)	Gerilim p.u. (V)	Aktif güç p.u.(W)	Reaktif güç p.u (Q)
STATCOM	0.15	0.992	-0.13	0.13
SVC	0.23	0.996	0.032	0.014
SSSC	0.18	1.067	0.053	0.122
TCSC	0.21	0.97	-0.12	-0.153

Sisteme 6MW ve 4MVAr yük değerlerinde devreye alındığında elde edilen sonuçlar çizelge 4.3'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.3: 6MW ve 4MVAr yük değerlerinde elde edilen sonuçlar

Kompanzatör tipi	Yük barası zaman cevabı(s)	Gerilim p.u. (V)	Aktif güç p.u.(W)	Reaktif güç p.u (Q)
STATCOM	0.15	0.986	-0.13	0.13
SVC	0.23	0.994	0.039	0.015
SSSC	0.18	1.045	0.055	0.148
TCSC	0.21	0.95	-0.138	-0.196

Sistemde STATCOM, SVC, SSSC ve TCSC kullanıldığında yük barası geriliminin 1 p.u değerinde çok yakın bir değer aldığı görülmektedir. Aynı şekilde yük barasındaki aktif güç ve reaktif güç değişimlerinin de 0 p.u değerine yakın değer aldığı benzetim çalışmasında görülmektedir. Çizelgelerde elde edilen sonuçlar neticesinde gerilim ve güç kontrollerinde FACTS cihazlarının yük barasındaki gerilim, aktif ve reaktif güç değişimlerini kontrol etmede etkili olduğu görülmektedir. STATCOM'un zaman cevabı açısından diğer FACTS cihazlarından daha kısa sürede sistemi kararlı hale getirirken TCSC'ün sistemi daha geç zamanda kararlı hale getirdiği görülmüştür.

4.2. RÜZGAR SANTRALİNDE DEĞİŞKEN YÜKLERİN ETKİSİ

Şebekeye bağlı olan rüzgar santralinde farklı zamanlarda farklı yüklerin devreye girmesi ile FACTS cihazları ile yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç değişiminin incelenmesi amaçlanmıştır. Değişken yük olarak sisteme giren aktif ve reaktif yük değerleri çizelge 4.4'te verilmiştir

.

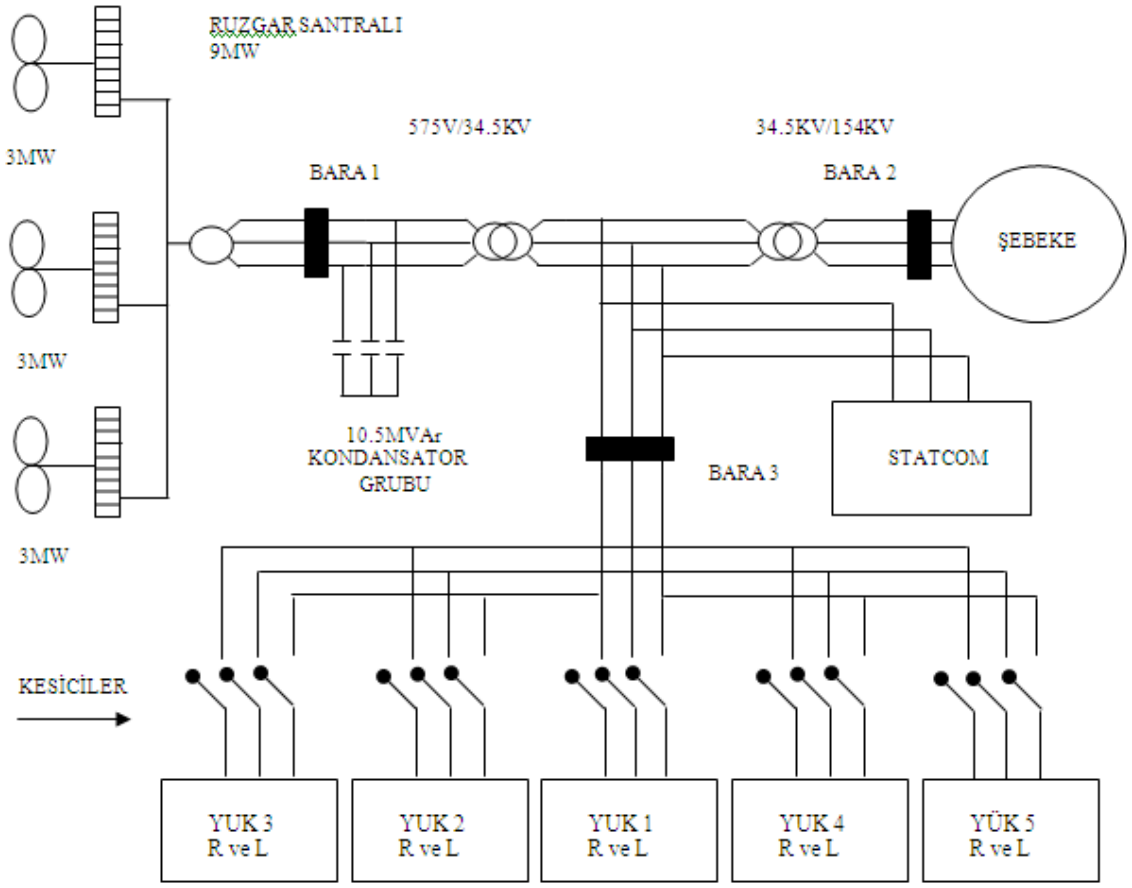
Çizelge 4.4: Değişken yüklerin değerleri ve devreye girme zamanları

Zaman (s)	0 s-0.2 s	0.2 s-0.4 s	0.4 s -0.6 s	0.6 s-0.8s	0.8 s-1 s
P (MW)	4 MW	5 MW	6 MW	5 MW	4 MW
Q (MVAr)	2 MVAr	3 MVAr	4 MVAr	3 MVAr	2 MVAr

Değişken yüklerin 1 saniye çalışan sistemin farklı zamanlarında değişken yüklerin yük barasındaki etkilerinin incelenmesi hedeflenmiştir.

4.2.1. STATCOM'un Rüzgar Santralindeki Değişken Yüklerde Gerilim ve Güç Analizi

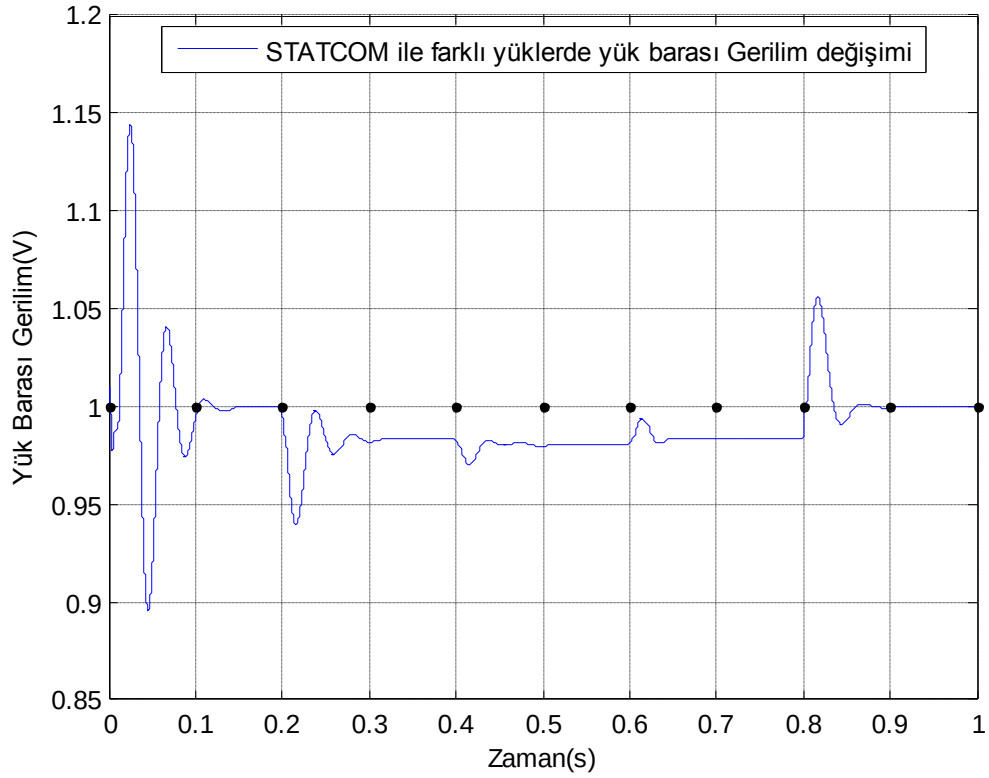
Sonsuz baraya veya enterkonnekte şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralinin yük barasındaki gerilim, aktif ve reaktif güç değişiminin incelenmesi için 10 MVA'lık bir STATCOM kullanılmıştır. Bu çalışmanın devre modeli şekil 4.17'de gösterilmiştir.



Şekil 4.17: Rüzgar santralinin STATCOM ile değişken yük modellemesi

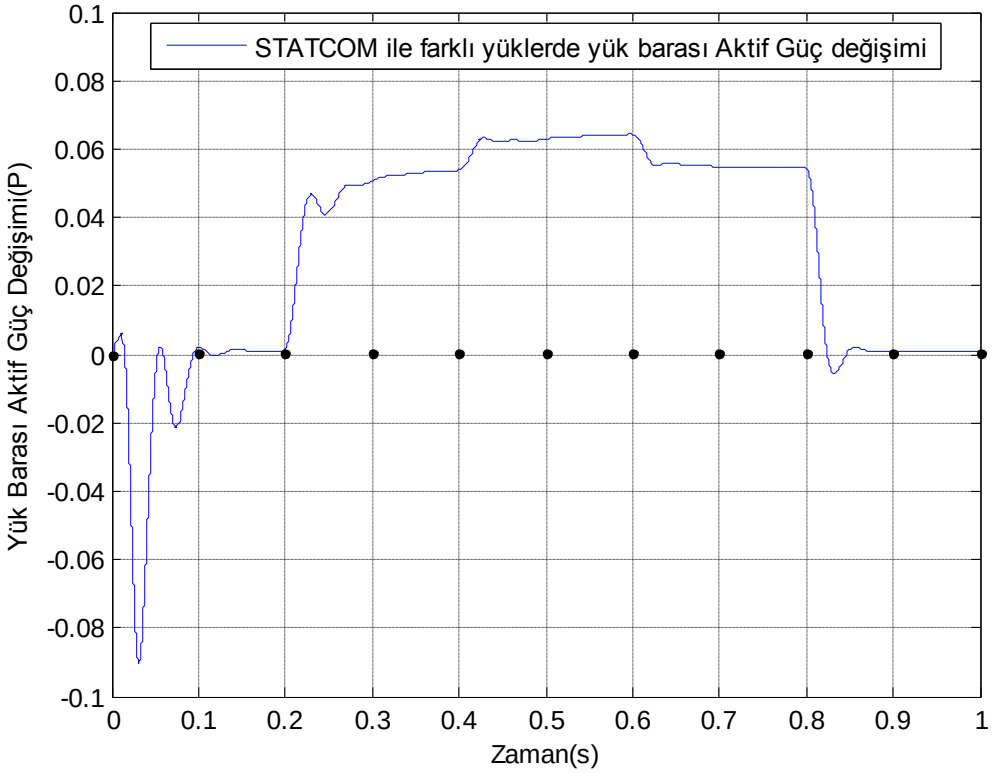
Rüzgar santralinde çift beslemeli asenkron generatör kullanılmıştır. Bu sistemde 3 tane 3 MW'lık rüzgar santrali kullanılmıştır. 9MW'lık rüzgar santrali 1 numaralı baraya bağlanmıştır. Rüzgar santrali reaktif gücün belli kısmını şebekeden ve kapasitör gruplarından karşılamaktadır. Bundan dolayı sistemde 10,5 MVAr'lık bir kondansatör grubu kullanılmıştır. Rüzgar santralinden elde edilen 575 V gerilim yükseltici transformatör sayesinde 34,5 KV'a yükseltilmiştir. Sistemin 2 numaralı barasına 154 KV'luk şebeke bağlanmıştır. Şebekedeki 154 KV' luk gerilim alçaltıcı transformatör ile 34,5 KV'da düşürülmüştür. 3 numaralı bara ise sistemde yük barası olarak kullanılmıştır. 10 MVA'lık STATCOM'un 3 nolu baraya paralel bağlanması ile farklı zamanlarda değişken yüklerin sisteme girmesi incelenmiştir. Bunun için 5 adet aktif ve reaktif yük modeli kullanılmıştır. Yük 1 değeri 4MW ve 2MVAr gücünde olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0 ile 0.2 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 2 değeri 5MW ve 3MVAr gücünde olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0.2 ile 0.4 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 3 değeri 6MW ve 4MVAr gücünde olup,

1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0.4 ile 0.6 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 4 değeri yük 2 de olduğu gibi 5MW ve 3MVAr olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0-6 ile 0.8 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 5 değeri ise yük 1'de olduğu gibi 4MW ve 2MVAr olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0-8 ile 1 saniye arasında kapalı konumdadır. 10 MVA'lık STATCOM'un sistem içinde bulunması ile 5 farklı aktif ve reaktif yük değerlerinde yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç eğrileri çizilmiştir.



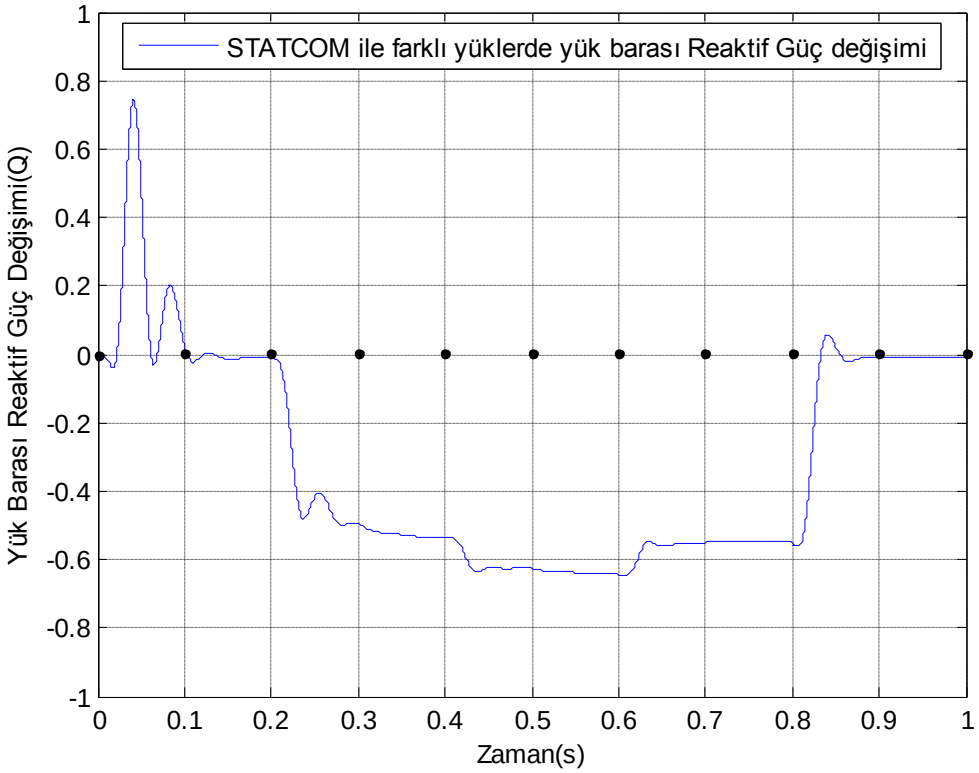
Şekil 4.18: Farklı yüklerde STATCOM ile yük barası gerilim değişimi

Şekil 4.18'de sistemin çalışması ile yük barasındaki gerilim değişimi STATCOM ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların daha az olduğu görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara geriliminin 1 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.18'de görülmektedir.



Şekil 4.19: Farklı yüklerde STATCOM ile yük barası aktif güç değişimi

Şekil 4.19'da sistemin çalışması ile yük barasındaki aktif güç değişimi STATCOM ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların daha az olduğu görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara aktif güç değişiminin 0 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.19'da görülmektedir.

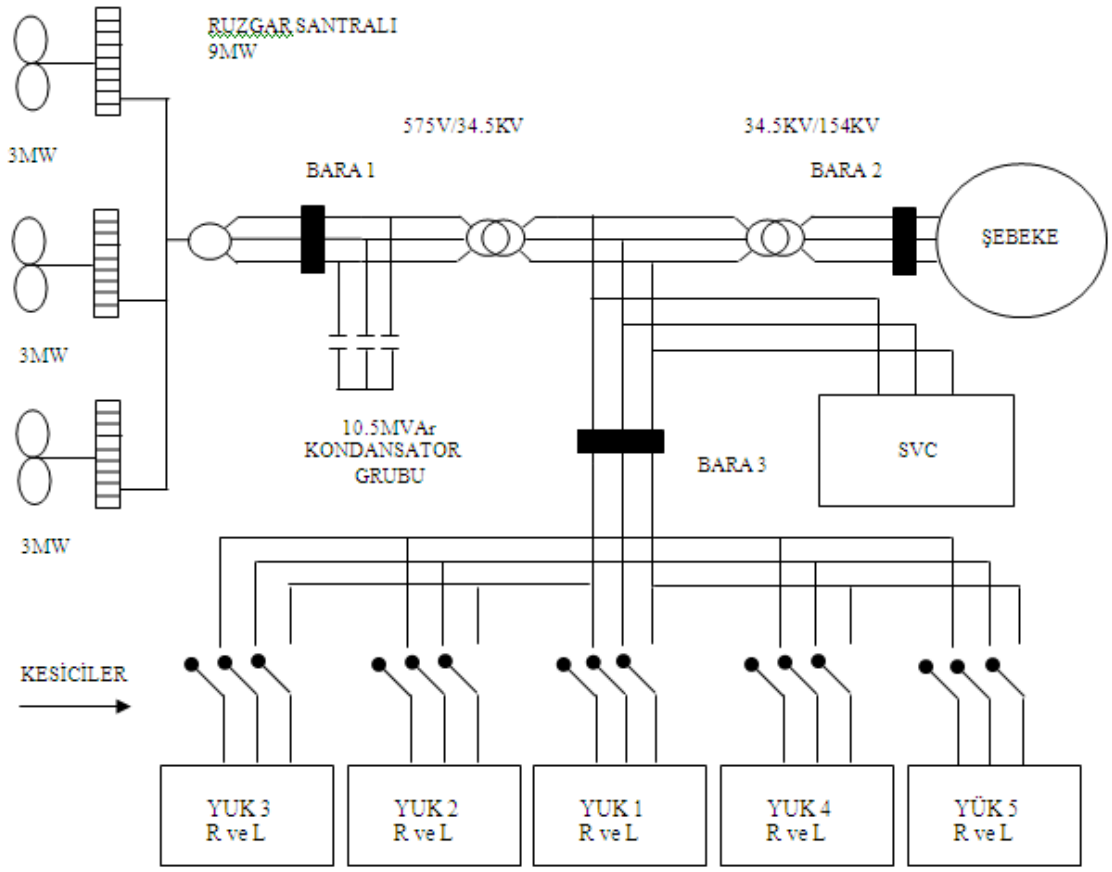


Şekil 4.20: Farklı yüklerde STATCOM ile yük barası reaktif güç değişimi

Şekil 4.20'de sistemin çalışması ile yük barasındaki reaktif güç değişimi STATCOM ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların daha az olduğu görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara reaktif güç değişiminin 0 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.20'de görülmektedir.

4.2.2. SVC'nin Rüzgar Santralindeki Değişken Yüklerde Gerilim ve Güç Analizi

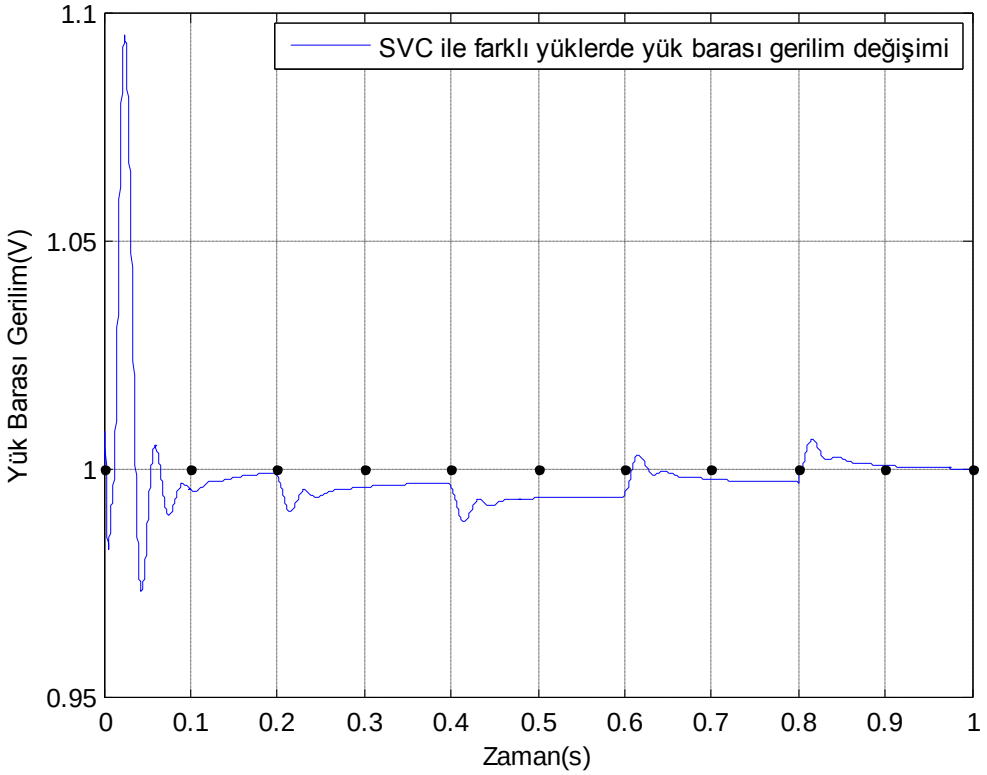
Sonsuz baraya veya enterkonnekte şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralinin yük barasındaki gerilim, aktif ve reaktif güç değişiminin incelenmesi için 10 MVA'lık bir SVC kullanılmıştır. Bu çalışmanın devre modeli şekil 4.21'de gösterilmiştir.



Şekil 4.21: Rüzgar Santralinin SVC ile değişken yük modellemesi

Rüzgar santralinde çift beslemeli asenkron generatör kullanılmıştır. Bu sistemde 3 tane 3 MW'lık rüzgar santrali kullanılmıştır. 9MW'lık rüzgar santrali 1 numaralı baraya bağlanmıştır. Rüzgar santrali reaktif gücün belli kısmını şebekeden ve kapasitör gruplarından karşılamaktadır. Bundan dolayı sistemde 10,5 MVAr'lık bir kondansatör grubu kullanılmıştır. Rüzgar santralinden elde edilen 575 V gerilim yükseltici transformatör sayesinde 34,5 KV'a yükseltilmiştir. Sistemin 2 numaralı barasına 154 KV' luk şebeke bağlanmıştır. Şebekedeki 154 KV'luk gerilim alçaltıcı transformatör ile 34,5 KV'da düşürülmüştür. 3 numaralı bara ise sistemde yük barası olarak kullanılmıştır. 10 MVA'lık SVC'nin 3 nolu baraya paralel bağlanması ile farklı zamanlarda değişken yüklerin sisteme girmesi incelenmiştir. Bunun için 5 adet aktif ve reaktif yük modeli kullanılmıştır. Yük 1 değeri 4MW ve 2MVAr gücünde olup, 1 saniye'lik benzetim çalışmasında kesici 0 ile 0.2 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 2 değeri 5MW ve 3MVAr gücünde olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici

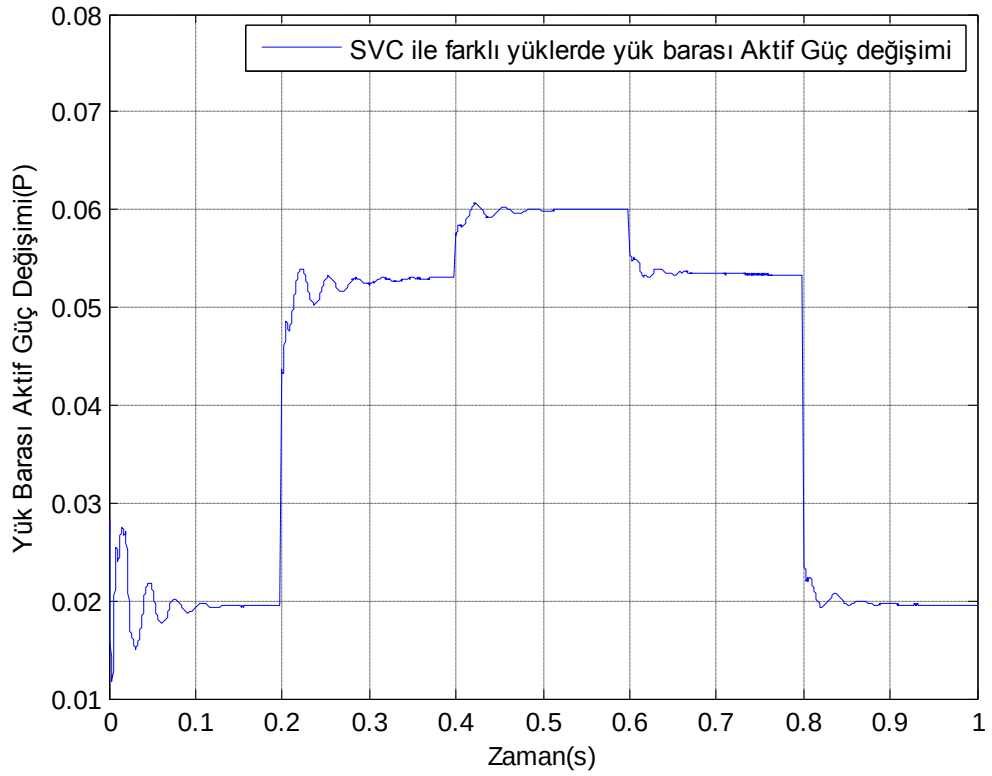
0.2 ile 0.4 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 3 değeri 6MW ve 4MVAr gücünde olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0.4 ile 0.6 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 4 değeri yük 2 de olduğu gibi 5MW ve 3MVAr olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0-6 ile 0.8 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 5 değeri ise yük 1'de olduğu gibi 4MW ve 2MVAr olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0-8 ile 1 saniye arasında kapalı konumdadır. 10 MVA'lık SVC'nin sistem içinde bulunması ile 5 farklı aktif ve reaktif yük değerlerinde yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç eğrileri çizilmiştir.



Şekil 4.22: Farklı yüklerde SVC ile yük barası gerilim değişimi

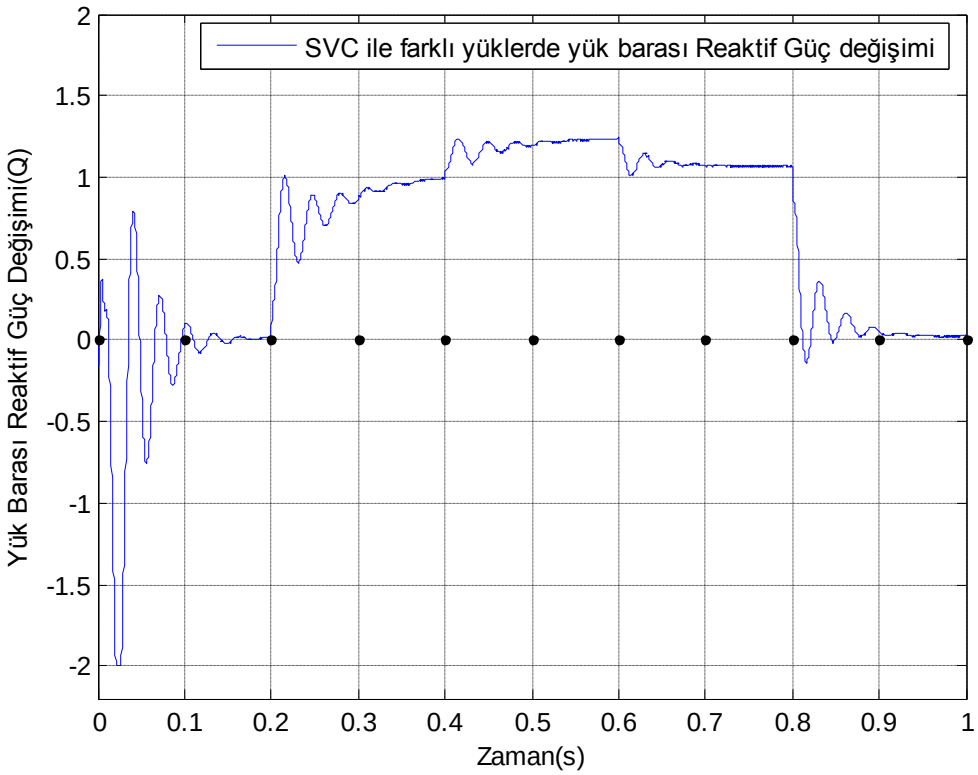
Şekil 4.22'de sistemin çalışması ile yük barasındaki gerilim değişimi SVC ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0,2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0,4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların daha az olduğu görülmektedir.

0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara geriliminin 1 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.22'de görülmektedir.



Şekil 4.23: Farklı yüklerde SVC ile yük barası aktif güç değişimi

Şekil 6.23'de sistemin çalışması ile yük barasındaki aktif güç değişimi SVC ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.1 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların daha az olduğu görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara aktif güç değişiminin 0 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.23'te görülmektedir.

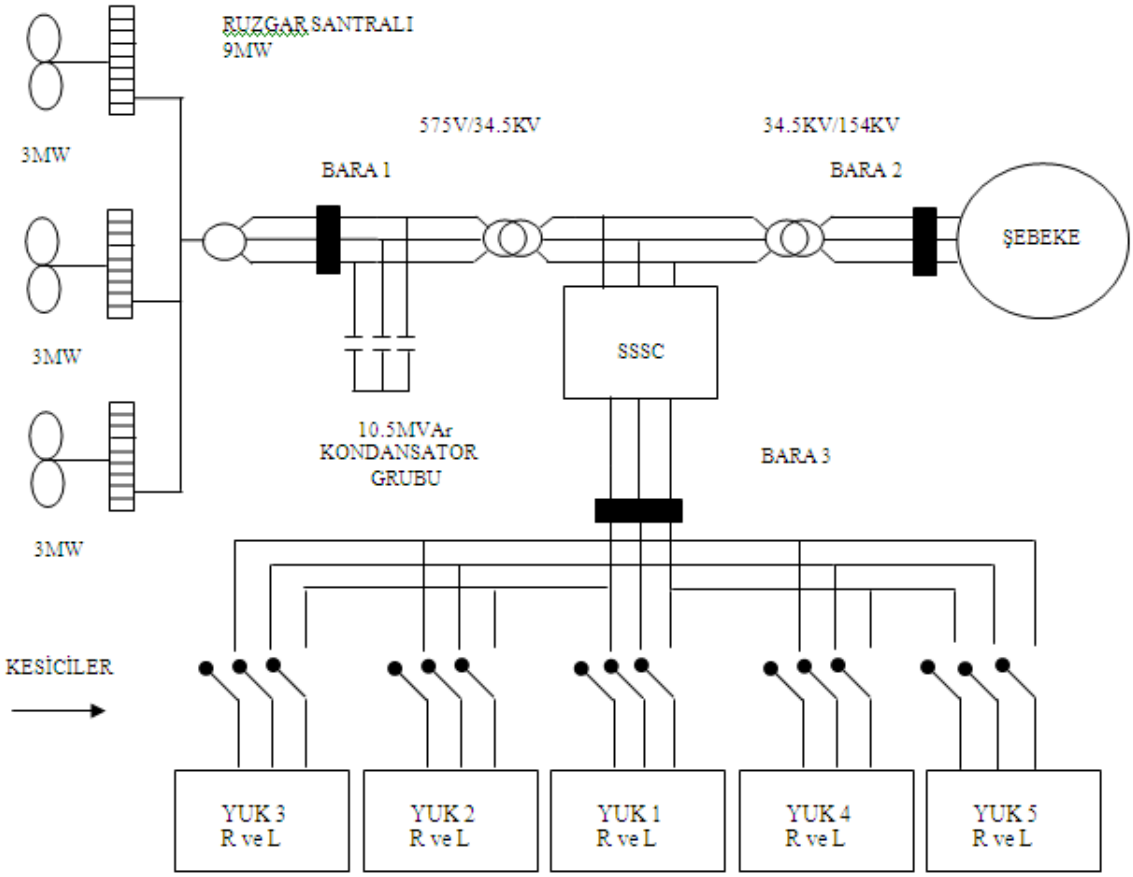


Şekil 4.24: Farklı yüklerde SVC ile yük barası reaktif güç değişimi

Şekil 4.24'de sistemin çalışması ile yük barasındaki reaktif güç değişimi SVC ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların daha az olduğu görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara reaktif güç değişiminin 0 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.24'de görülmektedir.

4.2.3. SSSC'in Rüzgar Santralindeki Değişken Yüklerde Gerilim ve Güç Analizi

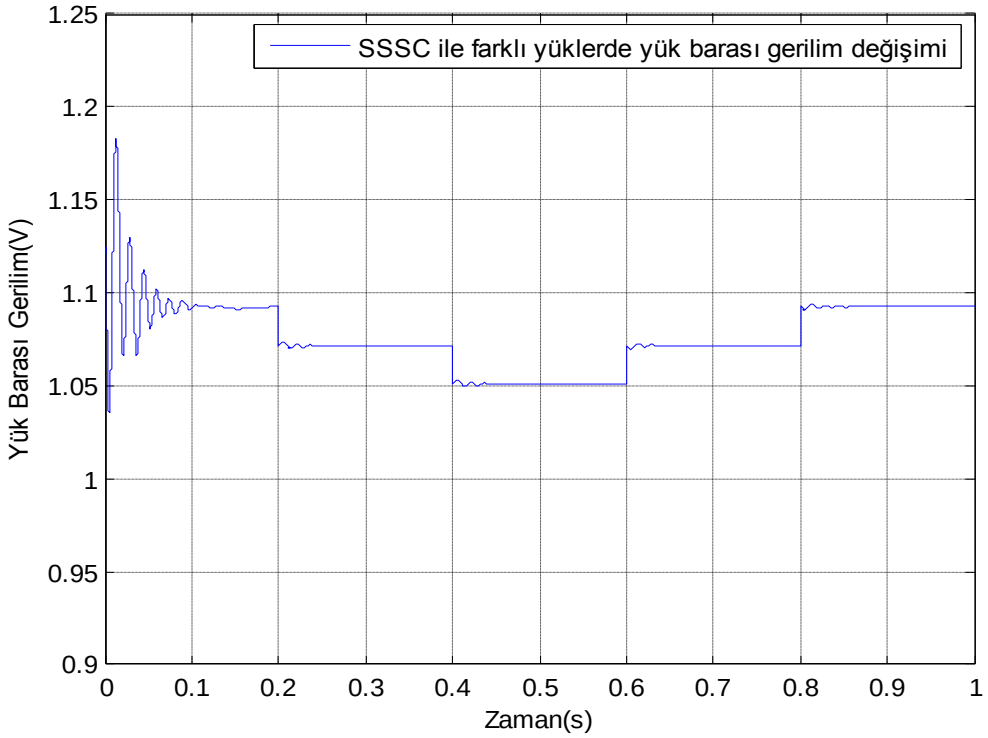
Sonsuz baraya veya enterkonnekte şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralinin yük barasındaki gerilim, aktif ve reaktif güç kontrolü değişiminin incelenmesi için 10 MVA'lık bir SSSC kullanılmıştır. Bu çalışmanın devre modeli şekil 4.25' de gösterilmiştir.



Şekil 4.25: Rüzgar Santralinin SSSC ile değişken yük modellemesi

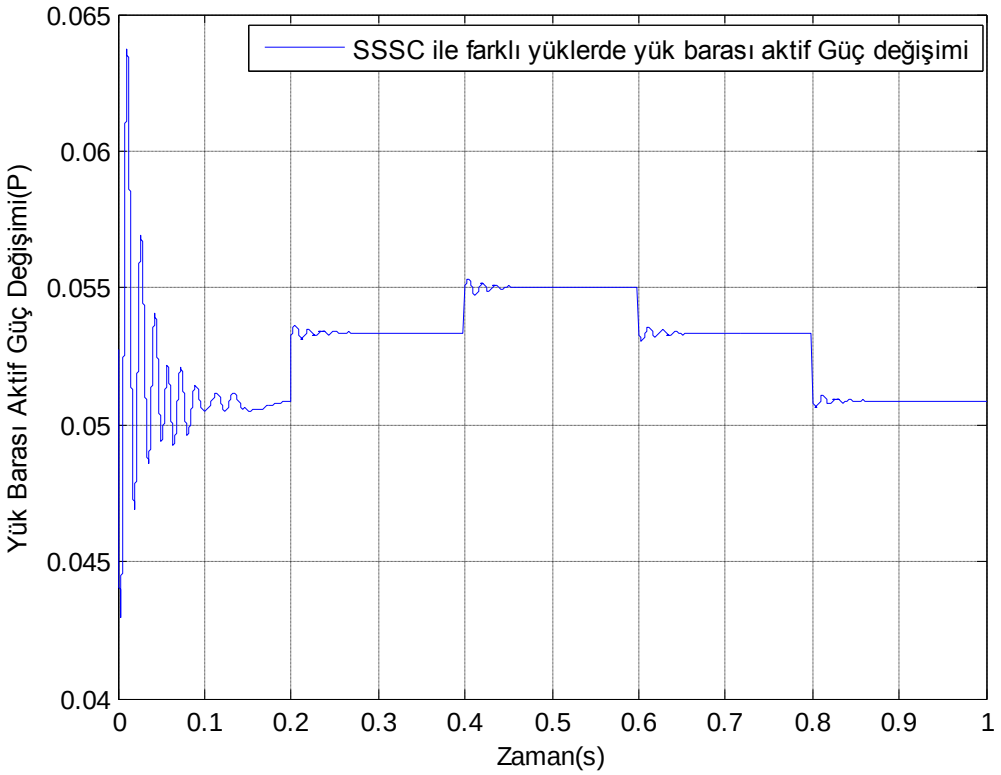
Rüzgar santralinde çift beslemeli asenkron generatör kullanılmıştır. Bu sistemde 3 tane 3 MW'lık rüzgar santrali kullanılmıştır. 9MW'lık rüzgar santrali 1 numaralı baraya bağlanmıştır. Rüzgar santrali reaktif gücün belli kısmını şebekeden ve kapasitör gruplarından karşılamaktadır. Bundan dolayı sistemde 10,5 MVAr'lık bir kondansatör grubu kullanılmıştır. Rüzgar santralinden elde edilen 575 V gerilim yükseltici transformatör sayesinde 34,5 KV'a yükseltilmiştir. Sistemin 2 numaralı barasına 154 KV' luk şebeke bağlanmıştır. Şebekedeki 154 KV'luk gerilim alçaltıcı transformatör ile 34,5 KV'da düşürülmüştür. 3 numaralı bara ise sistemde yük barası olarak kullanılmıştır. 10 MVA'lık SSSC'nin 3 nolu baraya seri bağlanması ile farklı zamanlarda değişken yüklerin sisteme girmesi incelenmiştir. Bunun için 5 adet aktif ve reaktif yük modeli kullanılmıştır. Yük 1 değeri 4MW ve 2MVAr gücünde olup, 1 saniye'lik benzetim çalışmasında kesici 0 ile 0.2 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 2 değeri 5MW ve 3MVAr gücünde olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0.2 ile 0.4 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 3 değeri 6MW ve 4MVAr gücünde

olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0.4 ile 0.6 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 4 değeri yük 2 de olduğu gibi 5MW ve 3MVAr olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0-6 ile 0.8 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 5 değeri ise yük 1'de olduğu gibi 4MW ve 2MVAr olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0-8 ile 1 saniye arasında kapalı konumdadır. 10 MVA'lık SSSC'nin sistem içinde bulunması ile 5 farklı aktif ve reaktif yük değerlerinde yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç eğrileri çizilmiştir.



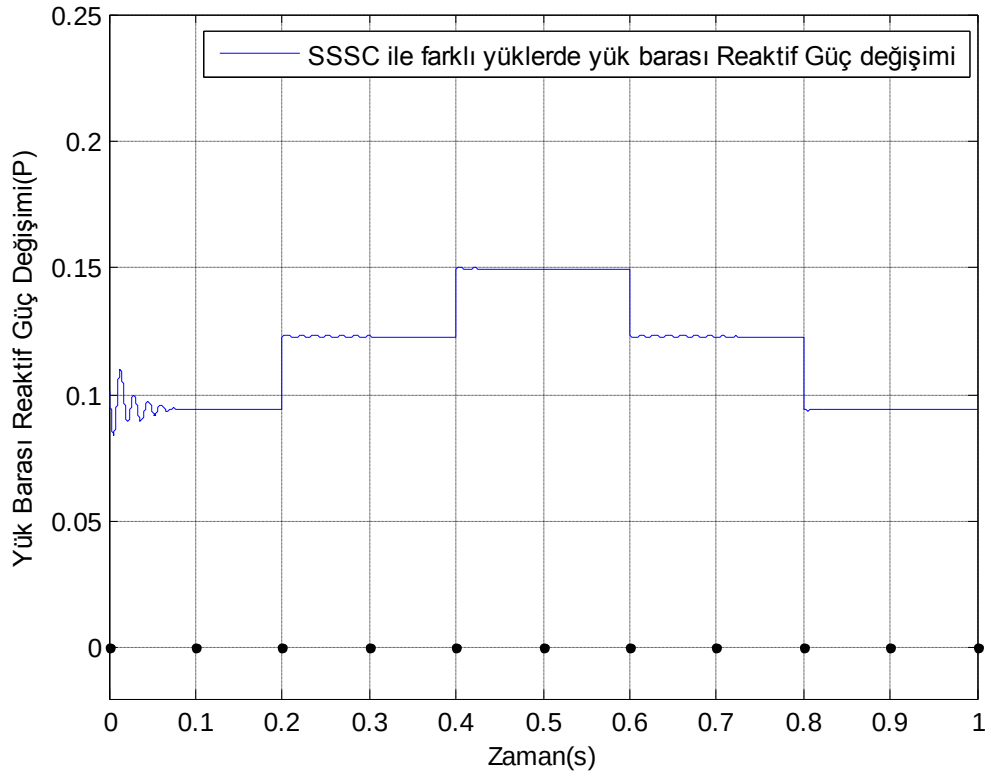
Şekil 4.26: Farklı yüklerde SSSC ile yük barası gerilim değişimi

Şekil 4.26'da sistemin çalışması ile yük barasındaki gerilim değişimi SSSC ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların tamamen azaldığı görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara geriliminin 1 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.26'da görülmektedir.



Şekil 4.27: Farklı yüklerde SSSC ile yük barası aktif güç değişimi

Şekil 4.27'de sistemin çalışması ile yük barasındaki aktif güç değişimi SSSC ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların azaldığı görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara aktif güç değişiminin 0 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.27'de görülmektedir.

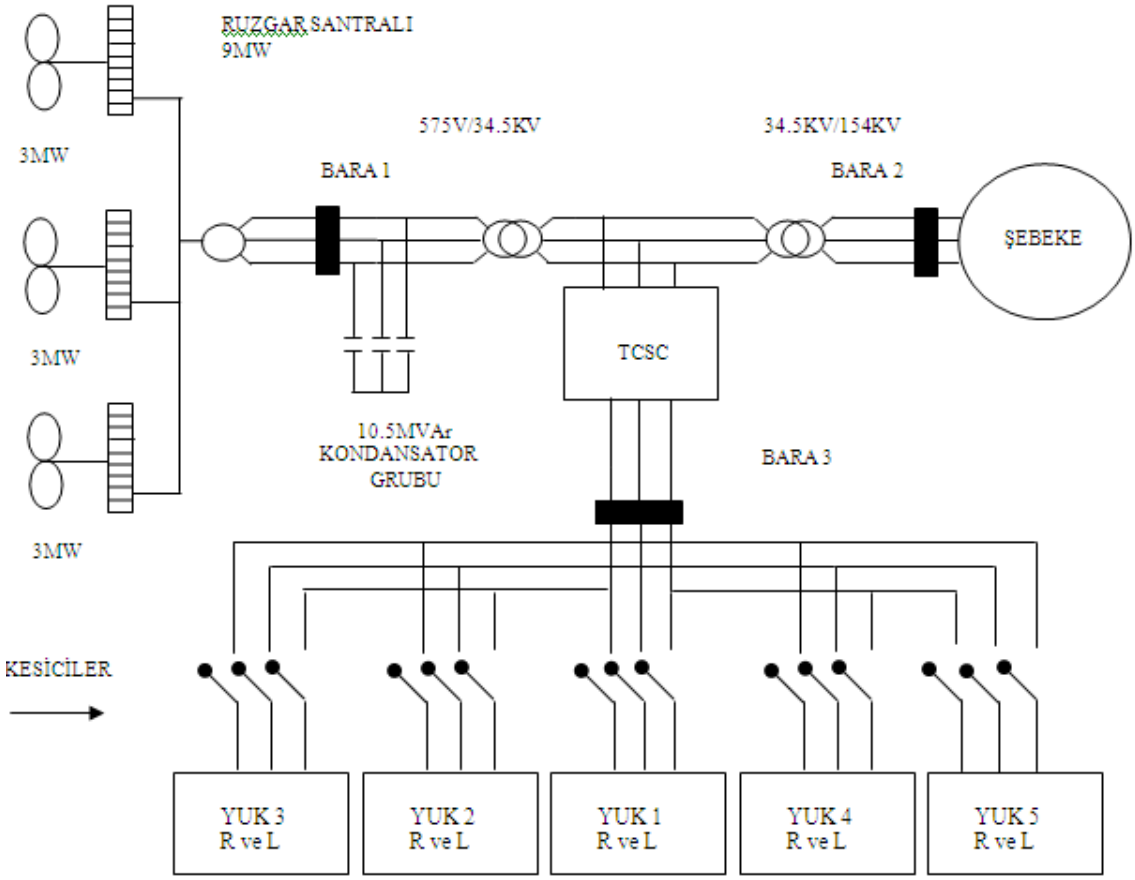


Şekil 4.28: Farklı yüklerde SSSC ile yük barası reaktif güç değişimi

Şekil 4.28'de sistemin çalışması ile yük barasındaki reaktif güç değişimi SSSC ile incelenmiştir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların azaldığı görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara reaktif güç değişiminin 0 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.28'de görülmektedir.

4.2.4. TCSC'ün Rüzgar Santralindeki Değişken Yüklerde Gerilim ve Güç Analizi

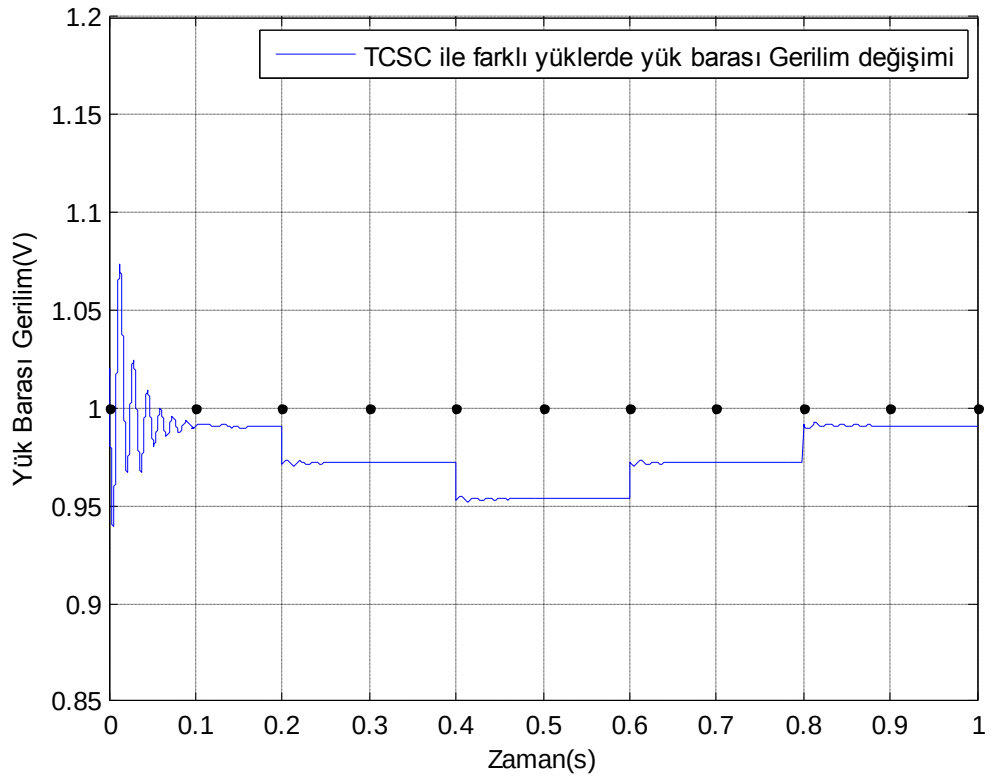
Sonsuz şebekeye bağlı olarak çalışan rüzgar santralinin değişken yüklerin devrede olması ile yük barasındaki gerilim, aktif ve reaktif değişiminin incelenmesi için TCSC kullanılmıştır. Bu çalışmanın devre modeli şekil 4.29'da gösterilmiştir.



Şekil 4.29: Rüzgar Santralinin TCSC ile değişken yük modellemesi

Rüzgar santralinde çift beslemeli asenkron generatör kullanılmıştır. Bu sistemde 3 tane 3 MW'lık rüzgar santrali kullanılmıştır. 9MW'lık rüzgar santrali 1 numaralı baraya bağlanmıştır. Rüzgar santrali reaktif gücün belli kısmını şebekeden ve kapasitör gruplarından karşılamaktadır. Bundan dolayı sistemde 10,5 MVAr'lık bir kondansatör grubu kullanılmıştır. Rüzgar santralinden elde edilen 575 V gerilim yükseltici transformatör sayesinde 34,5 KV'a yükseltilmiştir. Sistemin 2 numaralı barasına 154 KV' luk şebeke bağlanmıştır. Şebekedeki 154 KV'luk gerilim alçaltıcı transformatör ile 34,5 KV'da düşürülmüştür. 3 numaralı bara ise sistemde yük barası olarak kullanılmıştır. TCSC'ün 3 nolu baraya seri bağlanması ile farklı zamanlarda değişken yüklerin sisteme girmesi incelenmiştir. Bunun için 5 adet aktif ve reaktif yük modeli kullanılmıştır. Yük 1 değeri 4MW ve 2MVAr gücünde olup, 1 saniye'lik benzetim çalışmasında kesici 0 ile 0.2 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 2 değeri 5MW ve 3MVAr gücünde olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0.2 ile 0.4 saniye

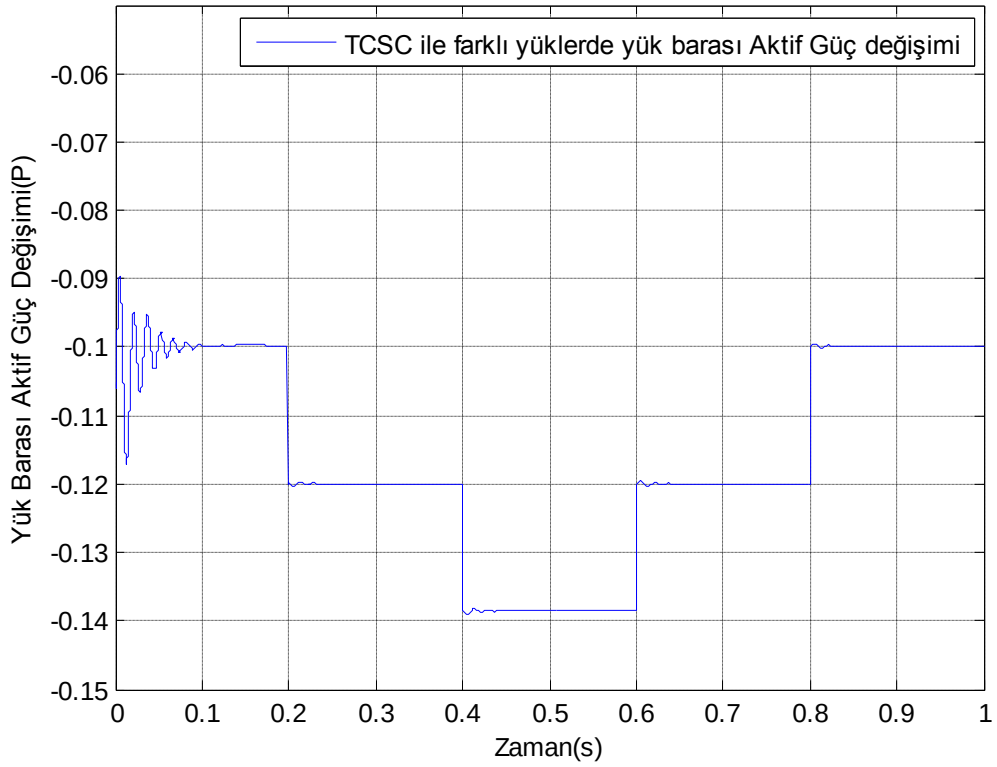
arasında kapalı konumdadır. Yük 3 değeri 6MW ve 4MVAr gücünde olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0.4 ile 0.6 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 4 değeri yük 2 de olduğu gibi 5MW ve 3MVAr olup,1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0-6 ile 0.8 saniye arasında kapalı konumdadır. Yük 5 değeri ise yük 1'de olduğu gibi 4MW ve 2MVAr olup, 1 saniyelik benzetim çalışmasında kesici 0-8 ile 1 saniye arasında kapalı konumdadır. TCSC'ün sistem içinde bulunması ile 5 farklı aktif ve reaktif yük değerlerinde yük barasındaki gerilim, aktif güç ve reaktif güç eğrileri çizilmiştir.



Şekil 4.30: Farklı yüklerde TCSC ile yük barası gerilim değişimi

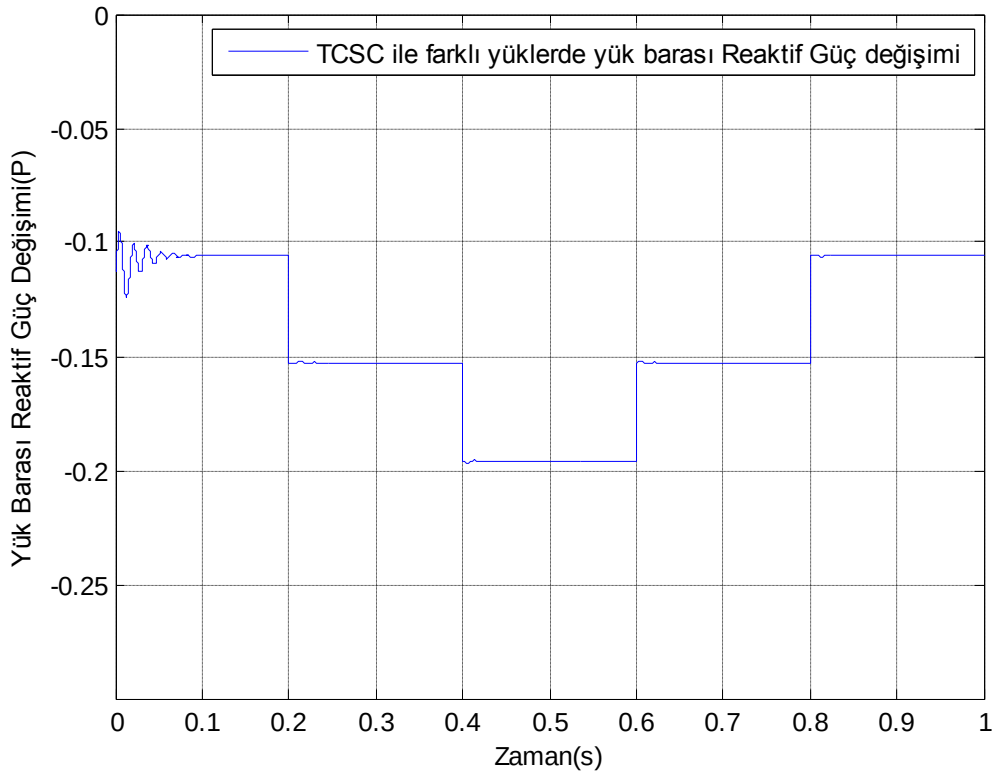
Şekil 4.30'da sistemin çalışması ile yük barasındaki gerilim değişimi TCSC ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların tamamen azaldığı

görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara geriliminin 1 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.30'da görülmektedir.



Şekil 4.31: Farklı yüklerde TCSC ile yük barası aktif güç değişimi

Şekil 4.31'de sistemin çalışması ile yük barasındaki aktif güç değişimi TCSC ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların tamamen azaldığı görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara aktif güç değişiminin 0 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.31'de görülmektedir.



Şekil 4.32: Farklı yüklerde TCSC ile yük barası reaktif güç değişimi

Şekil 4.32' de sistemin çalışması ile yük barasındaki reaktif güç değişimi TCSC ile incelenmektedir. Yük 1 devrede iken 0.2 saniyeye yakın bir değerde kararlı hale gelen gerilim yük 2'nin devreye girmesi ile 0.4 saniyeye kadar kararlı hale gelebilmektedir. 0.4 ile 0.6 saniye arasında yük 3 ve 0.6 ile 0.8 saniye arasında yük 4 devreye girdiğinde yük 1 ve yük 2'nin devrede olması ile oluşan salınımların tamamen azaldığı görülmektedir. 0.8 saniyede yük 1 devrede olduğu süre içerisinde bara reaktif güç değişiminin 0 p.u değerine yakın bir değerde kararlı hale geldiği şekil 4.32'de görülmektedir.

Değişken yüklerin farklı zamanlarda devreye girmesiyle yük barası gerilim, aktif güç ve reaktif güç değişimlerinin almış olduğu değerler çizelge 4.5'te gösterilmiştir.

Çizelge 4.5: Rüzgar santralinde FACTS cihazlarının değişken yüklerde aldığı değerler

Kompanzatör Tipi (Ölçüm)	Zaman Aralıkları (s)				
	0 s-0.2 s	0.2 s-0.4 s	0.4 s -0.6 s	0.6 s-0.8s	0.8 s-1 s
SVC (V)	0.998	0.996	0.994	0.996	0.998
SVC (P)	0.019	0.026	0.033	0.026	0.019
SVC (Q)	-0.05	0.09	0.018	0.09	-0.05
STATCOM (V)	1	0.995	0.993	0.995	1
STATCOM (P)	0	0.015	0.025	0.015	0.025
STATCOM (Q)	0	-0.015	-0.025	-0.015	0
SSSC (V)	1.09	1.07	1.05	1.07	1.09
SSSC (P)	0.051	0.053	0.055	0.053	0.051
SSSC (Q)	0.094	0.123	0.149	0.123	0.094
TCSC (V)	0.99	0.97	0.95	0.97	0.95
TCSC (P)	-0.1	-0.12	-0.138	-0.12	-0.1
TCSC (Q)	-0.1	-0.15	-0.198	-0.15	-0.1

Çizelge 4.5'teki değerler sonucunda SVC, STATCOM, SSSC ve TCSC kullanımı ile yük barasında değişen gerilim, aktif güç ve reaktif güç değerlerinin kararlı hale geldikleri görülmektedir. Farklı zamanlarda devrede olan yüklerde oluşabilecek kararsız durumları FACTS cihazlarının kullanımı ile ortadan kaldırılmaktadır.

5.SONUÇ VE TARTIŞMA

Rüzgar Santralinde FACTS cihazlarının kullanımı ile sistemin kararlı hale geldiği bu benzetim çalışmasında görülmüştür. Aktif yük ve reaktif yük modelinin devrede olması anında SVC, STATCOM, SSSC ve TCSC'ün kısa zaman içerisinde yük barasındaki gerilimin 1.p.u değerine, aktif güç ve reaktif güç değerlerinin ise 0 p.u. değerine yakın değerler aldığı bu benzetim çalışmasında görülmüştür. FACTS cihazlarının kullanımı ile sistemin kısa sürede kararlı hale geldiği görülmüştür.

Yük barasına paralel olarak bağlanan SVC ve STATCOM yük barasına seri olarak bağlanan SSSC ve TCSC'e göre daha kısa zamanda kararlı hale gelmiş ve salınımları ortadan kaldırmışlardır.

Sisteme farklı zamanlarda değişken yüklerin girmesiyle FACTS cihazlarının yük barası gerilim, aktif güç ve reaktif güç değerlerini kısa zaman içerisinde kararlı hale getirdikleri görülmüştür. Değişken yüklerde SVC ve STATCOM'un yük barasındaki gerilimi değerini SSSC ve TCSC' e göre 1 p.u değerine daha yakın değerler almıştır. Aktif güç ve reaktif güç değişimlerinde ise sistemde kullanılan FACTS cihazlarının hepsinde 0 p.u yakın değerler aldığı görülmüştür. Değişken yüklerde yük barasında oluşan salınımları SSSC ve TCSC daha kısa zamanda ortadan kaldırmışlardır.

Büyük güçlü olan rüzgar santrallerinde FACTS cihazlarının kullanımı ile talep edilen yük değerlerinin zaman içerisindeki değişimleri kontrol edilmiş olmaktadır. Yüklerinde devamlı değişmesi esnasında oluşabilecek gerilim kararsızlık durumları FACTS cihazları ile iyileştirilmiş olur.

Aktif yük ve reaktif yük değerlerinin artışının ve azalışının yük barasındaki oluşabilecek salınımları FACTS cihazlarının kullanılması ile ortadan kaldırılmıştır. Bu da sistemin daha güvenli bir şekilde çalışmasını sağlamıştır.

Rüzgar Santralinde FACTS cihazlarının uygulama alanında kullanılabilirliği bu benzetim çalışmasında görülmüştür. Rüzgar santrali ile beslenen müstakil yapıların aktif

ve reaktif yüklerin zaman içinde değişmesi veya değişmemesine bağlı olarak FACTS cihazlarının sistemi güvenli bir şekilde kontrol edeceğini söyleyebiliriz.

Rüzgar santralinin gücünün yaklaşık olarak 1.11 katına yakın FACTS cihazının seçimi, sistem maliyetini düşüreceği bu çalışma ile bulunmuştur. Devresinde daha kapsamlı kontrolör bulunduran STATCOM ve SSSC'nin yanı sıra daha basit kontrol mekanizmasına sahip olan SVC ve TCSC'ün maliyet açısından tercih edilmesi ile sistem maliyetinin azaltabileceğini söyleyebiliriz.

KAYNAKLAR

APAYDIN M., ÜSTÜN A.K., KURBAN M., FİLİK Ü.B., 2009, Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Jeneratörlerin Karşılaştırılmalı Analizi, *V. Yenilenebilir Enerji Sempozyumu (YEKSEM 2009)* Diyarbakır, 103-107.

APAYDIN M., ÜSTÜN A.K., KURBAN M., FİLİK Ü.B., 2009, Rüzgar Enerjisinde Kullanılan Asenkron Jeneratörler, *2. Rüzgar Enerjisi Sempozyumu (RÜGES 2009)*, Samsun, 1-5.

BİLGİN H.F., 2007, *Design and Implementation of a Current Source Converter Based Statcom for Reactive Power Compensation*, Phd Thesis, Middle East Technical University .

Bose K.G., 2001, *Modern Power Electronics and AC Drivers*, Prentice Hall PTL.

CANIZARES C.A., CORSİ S., POZZİ M., 1999, *Modelling and Implementation of TCR of VSI Based FACTS Controllers*, 1-32, University of Waterloo.

CANİZARES C.A., 2000, Power Flow and Transient Stability Models of FACTS Controllers for Voltage Stability and Angle Studies, *IEEE PES/WM Panel*, Singapure.

ÇETİN N. S., 2001, Küçük Güçlü bir Rüzgar Türbini Tasarımı ve Elektrik Enerjisi Eldesi, *Ege Üniversitesi Güneş Enerjisi Sempozyumu*, İzmir.

ÇETİN N.S., ÖZDAMAR A., ÇOLAK M., ÖZBALTA N., 2003, Rüzgar Türbinlerinde Optimum Dizayn Devirlilik Sayısının Enerji Üretimine Etkisinin Belirlenmesi, *Ege Enerji Sempozyumu*, Denizli, 57-63.

ÇETİN N.S., 2006, *Şebeke Bağlantısız PM Generatörlü Rüzgar Türbinlerinin YSA ile Sistem Optimizasyonu*, Doktora Tezi, Ege Üniversitesi.

ÇÖTELİ R.,2006, *STATCOM ile Güç Akışı Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi.

DİRİK H., 2006, *STATCOM ve SSSC Denetleyicilerinin Güç Sistemi Gerilim Kararlılığı Üzerine Etkisinin İncelenmesi*, Fen Bilimleri Enstitüsü, Ondokuz Mayıs Üniversitesi.

EMİNOĞLU U., 2003, *FACTS Elemanları Kullanılan Güç Akış Sistemlerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi.

EMİNOĞLU U., YALÇINÖZ T., HERDEM S., 2003, Analysis of FACTS Devices for Dynamic Loads Using Matlab, *38th International Universities Power Engineering Conference 2003 (UPEC 2003)*, volume 2, 377-380.

EMİNOĞLU U., AYASUN S., YALÇINÖZ T., 2004, Application of SVC on Dynamic Load for Different Load Types, *International Universities Power Engineering Conference 2004 (UPEC 2004)*, volume 1, 251-255.

ERTAY M.M., 2006, *Enerji İletim Sistemlerinin UPFC ile Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi.

FAUR Z.T., 1996, Effect of FACTS Devices on Static Voltage Collapse Phenomena, Ontorio, Canada.

GÜNEŞ İ.İ., 2006, *Bir Rüzgar Türbininin Modellenmesi, Benzetimu ve Kontrolü*, Yüksek Lisans Tezi, Gebze İleri teknoloji Enstitüsü.

HANG M. T., LAFZİ A. ve MILANI A. R., 2008, Dynamic and Stability Improvement of a Wind Farm Connected to Grid Using UPFC, *International Conference Industrial Technology (ICIT 2008)*, 1-5.

HUANG G.M., LI Y., 2002, Impact of Thyristor Controlled Series Capacitor on Bulk Power System Reability, *IEEE Power Engineering Society Summer Meeting (PESS 2002)*, volume 2, 975-980.

JON A.S., TORE U., 2008, Low Voltage Ride through of Wind Farms with Cage Generators:STATCOM Versus SVC, *IEEE Transaction on Power Electronics*, volume 23, 1104-1117.

JOSHİ N.N., MOHAN N., 2006, Application of TCSC in Wind Farm Application, *IEEE Power Electronics, Electric Drives, Automation and Motion 2006, (SPEEDAM 2006)*, 1196-1200.

JOWDER F.A., 2007, Application of SSSC to Wind Farm, *Power Engineering Conference (IPEC 2007)*, 544-549.

KAMARPOSHI M.A, ALINEZHAD M., LESANI H., TALEBI N., 2008, Comparison of SVC, STATCOM, TCSC and UPFC Controller for static Voltage Stability Evuluated by Continuation Power Flow Method, İEEE Electrical Power Conference (EPEC 2008), 1-8.

KARADENİZ K., 2006, *Elektrik Enerji Sistemlerinde FACTS-UPFC Cihazının Etkilerinin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi.

KHEDERZADEH M., 2007, Application of TCSC to Enhance Power Quality, *Universities Power Engineering Conference 2007 (UPEC 2007)*, 607-612.

KIMBARK E.W., 1971, *Direct Current Transmission*, Volume 1, John Wiley, New York.

KORKMAZ F.A., 2006, *Statik Senkron Kompanzatörlerin Tasarımı ve Uygulaması*, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi.

KUMKRATUG P., HAQUE M.H., 2003, Improvement of Damping of a Power System by Statcom, *Australasion Universities Power Engineering Conference (AUPEC 2003)*, New Zealand, 122-128.

MATHUR R.M., VARMA R.K., 2002, Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, *IEEE pres*, New Zealand.

MITHULANANTHAN N., CANIZARES .C.A, REEVE J., Hoft Bifurcation Control in Power System using Power Systems Stabilizers and Static Var Compensators, *North American Power Symposium (NAPS)*, California.

MOURSI M. S. E, SHARAF A.M., Nover Reactive Power Controllers for the STATCOM and SSSC, *Electric Power System Research 76 (2006)*, 228-241.

ÖZDAMAR A., GÜRSEL T., 1998, *Yenilenebilir Enerji Kaynaklarından Güneş ve Rüzgarın Deniz ve Kültür Balıkçılığında Kullanım Olanakları Sempozyumu*, İzmir, 65-80.

PAPANTONIOU A., COONICK A., Simulation of FACTS for Wind Farm Application, *IEEE Power Electronics for Renewable Energy*, 1-5, 1997.

PAULO F. D. T, HAILIAN X., 2005, Wind Farm in Weak Grids Compensated with STATCOM, *Nordic PhD Course on Wind Power*, Smola, Norveç.

POSHTEN M., SINGH B.N., RASTGOUFARD P., 2006, A Nonlinear Control Method for SSSC to Improvement Power System Stability, *IEEE Power Electronics Drivers and Energy Systems Conference (PEDES 2006)*, 1-7.

QI L., LANGSTON J, STEURER M., 2008, Applying a STATCOM for Stability Improvement an Exiting Wind Farm with Fixed Speed Induction Generator, *IEEE Power and Energy Socienty General Meeting- Conversion and Delivery of Electric Energy in the 21st Century*, 1-6.

ROSSI D.A, CANIZARES C.A., QUINTENA V., DONA V., 2000, Stability Improvement using TCSC in Radial Power Systems", *NAPS 2000.*

SONF Y.H., JOHNS A.T., 1999, *Flexible AC Transmission Systems (FACTS)*, The Institution of Electrical Engineering, London.

TAHERI H., SHAHABI S., TAHERI S., GHOLAMI A., 2009, Application of SSSC on Enhancement of Voltage Stability and Power System Oscillations, *IEEE EUROCON 2009*, 533-539.

THOMAS A., 2005, *Wind Power in Power Systems,* Royal Institute of Technology Stockholm, Sweden, 978-0-470-01749-4.

TOKLU M., 2007, *Rüzgar Enerjisi ve Elazığ Şartlarında Bir Rüzgar Santrali Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi.

UYAR M., GENCEOĞLU M.T. ve YILDIRIM S., 2005, Değişken Hızlı Rüzgar Türbinleri için Generatör Sistemleri, *YEKSEM III.Yenilenebilir Enerji Sempozyumu,* Mersin, 173-178.

UZUNOVİÇ E., EMTP, 2001, *Transient Stability and Power Flow Models and Controllers* , Phd Thesis, Canada.

UZUNOVİÇ E., CANİZARES C.A., REEVE J., 1998, Fundamental Frequency Model of Unified, *Power Symposium, (NAPS),* 294-299.

WEI Q., RONALD G. H., VENAYAGOMOORTHY G. K., 2006, Effect of FACTS Devices on a Power Systems which Includes a Large Wind Farm, *IEEE Power System Conference and Exposition 2006, PSCE 2006*, 2070-2076.

WEI Q., VENAYAGOMOORTHY, RONALD G.H., Harley, 2009, Real Time Implementation of a Wind Farm Equipped with Double Feed Induction Genarator, *IEEE Transaction Industry Application*, volume 45, 98-107.

YANMAZ K., ATLAŞ İ. H., 2008, Yükler Üzerindeki Reaktif Gücün Bulanık Mantık Denetleyicisi STATCOM ile Kontrolü, *7. Ulusal Temiz Enerji Sempozyumu*, 75-82.

YÜKSEL İ., 2001, *Otomatik Kontrol Sistem Dinamiği ve Denetim Sistemleri*, Ankara, 9789755641119.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, adı : DÖŞOĞLU, Mehmet Kenan

Uyruğu : T.C.

Doğum tarihi ve yeri : 01.01.1983 Gaziantep

Medeni hali : Bekar

Telefon : 0 (380) 542 11 33

Faks : 0 (380) 542 11 34

e-mail : kenandosoglu@duzce.edu.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet tarihi
Yüksek lisans	Düzce Üniversitesi/ Elektrik Bölümü	2008
Lisans	Düzce Üniversitesi/ Elektrik Bölümü	2006
Lise	Atatürk Tek. ve End. Mes. Lisesi	2000

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2007-2010	Düzce Üniversitesi	Araştırma Görevlisi

Yabancı Dil

İngilizce

Hobiler

Futbol, Masa Tenisi, Yüzme