

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Görülürsür
Serkan AYDIN
~~Aydın~~

**ELEKTRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE FACTS KONTROLÖRLERİN
KULLANIMIYLA KAYIP AZALTILMASI**

**T.C. YÜKSEKTEK
DOKÜMANTASYON MERKEZİ**

107312

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Müh. Tuncay TOZAR
504981026**

101312

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih: 11 Haziran 2001
Tezin Savunulduğu Tarih: 4 Temmuz 2001**

Tez Danışmanı : Prof.Dr. Adnan KAYPMAZ

Diğer Jüri Üyeleri: Doç.Dr. Belgin TÜRKAY (İ.T.Ü.)

Y.Doç. Dr. Hakan HOCAOĞLU

(Gebze Yüks.Tekn.Enstitüsü)

HAZİRAN 2001

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın hazırlanmasında değerli fikirleri, ilgi ve anlayışıyla bana kılavuzluk eden sayın hocam Prof. Dr. Adnan Kaypmaz'a , bilgi desteği ve anlayışından ötürü Araş.Gör. sayın Elif Aygen'e, sevgi ve desteklerini bir an olsun esirgemeyen aileme ve de nişanlım sevgili Yeliz'e teşekkürü borç bilirim.

Haziran 2001

Tuncay Tozar



İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	viii
ÖZET	ix
SUMMARY	x
1. GİRİŞ	1
2. ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE KOMPANZASYON	4
2.1. İdeal Seri Kompanzasyon	6
2.2. İdeal Şönt Kompanzasyon	10
2.3. Faz Açısı Kontrolü	12
3. KONTROL EDİLEBİLİR ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMİ (FACTS)	14
3.1. FACTS Cihazlarının Sınıflandırılması	15
3.2. Tristör Kontrollü FACTS Kontrolörler	16
3.2.1. Statik VAR Kompanzatör (SVC)	17
3.2.2. Tristör Kontrollü Seri Kompanzatör (TCSC)	20
3.2.3. Tristör Kontrollü Faz Açı Regülatörü (TCPAR)	23
4. FACTS TEKNOLOJİSİNİN KULLANILDIĞI OPTİMAL KAYIP MİNİMİZASYONU	27
4.1. Basit Kayıp Minimizasyon Formülasyonu	28

4.2. FACTS Cihazlarının Modellenmesi	29
4.2.1. TCSC	30
4.2.2. TCPAR	31
4.2.3. SVC	34
4.3. FACTS Cihazlarının Optimal Yerleşim Metodları	34
4.3.1. Kayıp Duyarlılık İndisleri	35
4.3.2. Optimal Yerleşim İçin Kriterler	37
4.4. FACTS Cihazlarına Bağlı Optimal Kayıp Minimizasyonu	37
5. ÖRNEK BİR 30 BARALI SİSTEM ÜZERİNDE FACTS KONTROLÖRLERİN YERLEŞİMİ VE KAYIPLAR ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ	43
6. SONUÇLAR VE ÖNERİLER	73
KAYNAKLAR	75
ÖZGEÇMİŞ	77

KISALTMALAR

FACTS	: Flexible AC Transmission Systems
TCSC	: Thyristor Controlled Series Compansator.
SVC	: Static VAR Compansator.
TSC	: Thyristor Switched Capacitor.
TSR	: Thyristor Switched Reactor.
TCR	: Thyristor Controlled Reactor.
TCPAR	: Thyristor Controlled Phase Angle Regulator.
TCPS	: Thyristor Controlled Phase Shifter.
GTO	: Gate turn-off.
STATCON	: Static Condansator.
STATCOM	: Static Compansator.
UPFC	: Unified Power Flow Controller.
SSR	: Subbsynchronous Resonans.
EMS	: Energy Management System.
EGAT	: Electricity Generating Authority Of Thailand.

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 4.1. Tam yük durumunda duyarlılık indislerinin öncelik Sıralaması	38
Tablo 4.2. Hafif yük durumunda duyarlılık indislerinin öncelik sıralaması	38
Tablo 4.3. Tam yük durumunda toplam aktif güç kaybı karşılaştırması	41
Tablo 4.4. Hafif yük durumunda toplam aktif güç kaybı karşılaştırması	41
Tablo 4.5. Bara gerilim genliğindeki standart sapma.....	42



ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa No

Şekil 2.1	: İdeal iletim hattı modeli	5
Şekil 2.2	: Güç iletim karakteristiği	6
Şekil 2.3	: Seri kapasitif kompanzasyonlu güç sistemi	7
Şekil 2.4	: Seri kapasitif kompanzasyonda gerilim-akım fazör diyagramı	8
Şekil 2.5	: Seri kapasitif kompanzasyonda iletim karakteristiği	9
Şekil 2.6	: İdeal orta nokta şönt kompanzatörlü enerji sistemi	10
Şekil 2.7	: İdeal orta nokta şönt kompanzatörlü enerji iletim karakteristiği	11
Şekil 2.8	: Faz değıştiricili sistem modeli	12
Şekil 2.9	: Faz değıştiricili sistemde gerilim-akım fazör diyagramı	13
Şekil 3.1	: TSC ve TCR içeren statik VAR kompanzatör	17
Şekil 3.2	: SVC'nin V-I karakteristiği	18
Şekil 3.3	: SVC'nin iletilebilir gücü arttırmadaki etkisi	19
Şekil 3.4	: Tristör kontrollü seri kompanzatör	20
Şekil 3.5	: Değişken seri kapasitif kompanzasyonun P-δ karakteristiği	22
Şekil 3.6	: TCPAR'lı ideal iletim sistemi	23
Şekil 3.7	: TCPAR'ın gerilim-akım karakteristiği	24
Şekil 3.8	: Kompanzasyon durumlarına göre enerji iletim karakteristiği	24
Şekil 3.9	: TCPAR'ın genel şeması	25
Şekil 4.1	: TCSC modeli	30
Şekil 4.2	: TCPAR modeli	31
Şekil 5.1	: 30 Baralı örnek sistemin tek hat şeması	44
Şekil 5.2	: Kayıp azaltımı için basit program akış diyagramı.	50
Şekil 5.3	: TCSC kullanımıyla toplam reaktif güç kaybı değişimi	68
Şekil 5.4	: TCSC kullanımıyla toplam aktif güç kaybı değişimi	69
Şekil 5.5	: %50 aşırı yükleme halinde FACTS etkisi	70
Şekil 5.6	: TCPAR kullanıldığında aktif güç kaybındaki değişim	71

SEMBOL LİSTESİ

V_S	: Verici uç (hat başı) geriliminin genliği.
V_M	: Hattın orta nokta gerilimi.
V_R	: Alıcı uç (hat sonu) geriliminin genliği.
X_L	: Hat reaktansı.
δ	: Faz açısı.
P	: Aktif güç.
Q	: Reaktif güç.
V_G	: Generatör gerilimi genliği.
V_{pq}	: Faz değıştiricisi gerilim genliği.
B_{Cmax}	: Maksimum kapasitif admittans.
$s, (k)$	: Seri kompanzasyon derecesi.
V_i	: i. bara gerilimi
V_j	: j. bara gerilimi.
P_i	: i barasının aktif gücü.
Q_i	: i barasının reaktif gücü.
Y_{ij}	: Bara admittans matrisinin ij. Elemanı.
$a, (t)$	: Faz kaydırıcı transformatör kompleks ayar oranı.
P_{LD}	: Talep edilen aktif güç.
P_{Gi}	: Üretilen aktif güç.
Q_{Ldi}	: i. baradaki yükün reaktif güç gereksinimi.
Y_k	: k transformatörünün seri admitansı.
X_{sl}	: Eğim reaktansı.
V_t	: Düğüm gerilimi genliği.
V_{ref}	: Referans gerilim genliği.
a_k	: TCSC kullanılan k hattının duyarlılık indisi.
b_k	: TCPAR kullanılan k hattının duyarlılık indisi
c_i	: SVC kullanılan i barasının duyarlılık indisi.
θ_k	: k hattının faz farkı.
Q_D	: Sistemdeki toplam reaktif güç gereksinimi.
Q_L	: Toplam reaktif güç kaybı.
X_{Cj}	: j hattındaki TCSC'nin seri reaktansı.
α_i	: i hattında TCPAR'dan kaynaklanan açı farkı.
G	: Kondüktans.
B	: Suseptans.

ELETRİK ENERJİ SİSTEMLERİNDE FACTS KONTROLÖRLERİN KULLANIMIYLA KAYIP AZALTIMI

ÖZET

Elektrik enerji iletim sistemlerinde iletilebilen güç kapasitesi, gerilim ve reaktif güç kontrolü önemli problemlerdir.İdeal bir alternatif akım şebekesine sahip olabilmek için bu problemlerin çözülmesi gerekir.

İletim şebekesindeki enerji ihtiyacı son yıllarda artmıştır ve giderekte artmaktadır.Sistemin, aktif ve reaktif güçte sürekli olarak ortaya çıkacak güç değişimlerini karşılaması gerekmektedir.Bu gereksinimleri sağlamak için çeşitli kontrolörler devreye girer. Amaç kararlılığı sağlamak ve kayıpları azaltmaktır.

Son yıllarda güç elektroniği teknolojisi, tristör kontrollü statik VAR kompanzatörleri ve tristör kontrollü seri kompanzatörlerin kullanımını arttırarak alternatif akım iletiminde önemli bir etki yapmıştır. Bu kompanzatörler güç akışını kontrol ederler ve iletim kapasitesini arttırlar.

Bu tez çalışmasında, elektrik enerji iletim sistemlerinde oluşan aktif ve reaktif güç kayıplarının azaltılması konusu incelenmiştir. Bu amaç doğrultusunda, son yılların revaçta uygulaması olan FACTS kontrolörlerin, kayıp azaltımında kullanıldığı örnek bir 30 baralı sistem üzerinde çalışma yapılmıştır. Alınan sonuçlar; özellikle seri kompanzatörlerin reaktif güç azaltımında etkili olduğu, aktif kaybı da kaydadeğer bir oranda düşürdüğü; faz kaydırıcıların gerilim genliği ve kararlılığı ile faz açısı ayarı hususunda daha etkili olduğu; statik VAR kompanzatörlerin ise kayıp azaltımı yanında, gerilim kararlılığı üzerinde etkili olduğu yönündedir.

TOTAL LOSS MINIMIZATION OF ELECTRICAL ENERGY TRANSMISSION SYSTEM CONSIDERING FACTS CONTROLLERS

SUMMARY

Transmitted Power, voltage and reactive power control are very crucial concepts in electrical energy transmission systems. These parameters have to be very well controlled to have reliable or an ideal A.C transmission system.

The energy demand in transmission systems has been increased in recent years and the trend is towards more and more demand in the coming years. The transmission systems, in this regard, need to meet the continuous variations in active & reactive power, which is likely to be the case. In order to meet such demands, various controllers are put into operation. The aim is to meet stability figures & to minimize the losses.

The developments in power electronic technology, such as thyristor controlled static VAR compensators and thyristor controlled series compensators had a very series and positive impact on AC transmission systems. These compensators basically control the power flow and thus increase the transmitted power.

Active and reactive power loss minimization in electric energy transmission system is studied in this thesis. Therefore, this study covers the total loss reducing application on 30 bus sample with FACTS controllers, which is a commonly used application on energy transmission system in recent years.

The results of this study in briefly; series compensators are effective on the reducing of active and reactive power loss, and phase shifters are especially effective on the voltage stability and phase angle regulating . And than , static VAR compensators are effective on the loss reducing , voltage stability and oscillation damping.

1. GİRİŞ

Enerji iletim sistemlerinde iletilebilen güç kapasitesi, gerilim ve reaktif güç kontrolü önemli problemlerdir. İdeal bir alternatif akım şebekesine sahip olabilmek için, bu problemlerin çözülmesi gerekir. İdeal bir alternatif akım şebekesinin kalitesi;

- Faz gerilimi ve akımlarının dengeli olması,
- Güç faktörünün 1'e yakın olması,
- Gerilimin ve frekansın sabitliği,
- Sürekli elektrik enerjisi verebilmesi,
- Harmonik miktarının belirli sınırlar arasında kalması,

ile tanımlanabilir. [1]

Reaktif güç kompanzasyon cihazları kullanılarak bu kalite elde edilebilir. Generatörleri bütün yük merkezlerinin yakınına yerleştirmek mümkün olmadığından, reaktif kompanzasyon metodları, şebeke geriliminin kontrolü ve güç iletim kapasitesinin artırılması için tasarlanmıştır. Bu metodlar şebeke gerilimi ve aktif güç akışının, reaktif güçteki değişikliklere karşı duyarlı olması nedeniyle etkili bulunmaktadır. Yüksek gerilim hatlarının tesisiyle, seri kapasiteler ve şönt reaktörler önemli kompanzasyon cihazları olmuşlardır. [1]

İletim şebekesindeki enerji ihtiyacı son yıllarda artmıştır ve giderekde artmaktadır. Sistemin, aktif ve reaktif güçte sürekli olarak ortaya çıkacak güç değişimlerini karşılaması gerekmektedir. Bu değişimleri karşılarken, elektrik enerjisini minimum maliyet ve minimum ekolojik etki yaparak sağlaması gerekir. Bu enerjinin kalitesi, frekansın sabitliği, gerilimin sabitliği ve güvenilirliği sağlayacak biçimde olmalıdır. Bu gereksinimleri karşılamak için çeşitli kontrol faaliyetleri devreye girer. Amaç kararlılığı sağlamaktır. Üretim kontrolünün ilk amacı, toplam sistem üretimini,

sistem yükü ve kayıplarına karşı dengelemektir. Böylece komşu sistemlerle istenen güç alışverişi sağlanır. [2]

Bir iletim hattındaki güç akışı; hat empedansı, alıcı ve verici uçlarındaki gerilimlerin arasındaki faz açısı ve bu gerilimlerin genliğinin fonksiyonudur. [3]

Enerji iletim sistemleri; hat empedansını optimize etmek, gerilimdeki değişimi azaltmak, sürekli halde veya yavaş değişen yük koşulları altında güç akışını kontrol etmek için gerilim regülasyonlu ve faz değiştiricili, sabit veya mekanik anahtarlı seri ve şönt reaktif kompanzasyonlarla düzenlenmiştir. [3]

Son yıllarda yarı iletken teknolojisinde ve elektronik kontrol tekniklerinde önemli gelişmeler olmuştur. Güç elektroniği teknolojisi tristör kontrollü statik VAR kompanzatörleri ve TCSC (Tristör Kontrollü Seri Kompansatör) kullanımını artırarak alternatif akım iletiminde önemli bir etki yapmıştır. Bu kompanzatörler reaktif güç üretirler ve bununla birlikte dinamik sistem koşulları altında, iletim hattı gerilimini kararlı hale getirirler. Güç akışını kontrol ederler ve iletim kapasitesinin artırılmasını sağlarlar.

Bu tezde, FACTS (Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri) teknolojisi genel hatlarıyla ele alındıktan sonra, 30 baralı örnek bir sistem üzerinde belirli FACTS cihazlarının modellenmesi ve sisteme yerleştirilmesiyle, optimum güç kaybı minimizasyonu amaçlanmıştır.

İkinci bölümde; enerji iletim sistemlerinde kompanzasyon konusu ele alınmıştır. Seri kompanzasyon, şönt kompanzasyon ve faz açısı kontrolü konuları ayrı ayrı açıklanarak, sistemin kararlılığı ve toplam güç kaybı üzerindeki etkileri belirtilmiştir.

Üçüncü bölümde; FACTS kontrolörler, genel tanımı, sınıflandırılması ve bu uygulamada kullanılanların çalışma prensipleri, sistem üzerine etkileri ayrı ayrı ele alınarak açıklanmaya çalışılmıştır. [4,5]

Dördüncü bölümde; FACTS kontrolörlerle, enerji iletim sisteminde optimum kayıp minimizasyonu konusu, FACTS cihazlarının statik modelleri ve optimal yerleşim metodlarıyla birlikte açıklanmaya çalışılmıştır. [6]

Beşinci bölümde; örnek 30 baralı sistem tanıtılmış ve basit yük akışı sonuçlarıyla birlikte FACTS kontrolörlerin kullanıldığı yük akışı sonuçlarına göre optimal kayıp azaltımı yapılmaya çalışılmıştır.



2. ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNDE KOMPANZASYON

Bilindiği gibi, reaktif enerji, elektrik ya da magnetik alan yaratan elektrikli cihazlar tarafından tüketilmektedir ve reaktif enerji olmadan bu cihazlar işlevlerini yerine getiremezler. Bu enerji ihtiyacı, sistemin dışındaki kaynaklarla da karşılanabilir. Reaktif enerjinin sistemden karşılanması, sistemden alınabilecek olan aktif enerjinin sınırlanmasına neden olacaktır. Enerji iletim hatlarında akan reaktif akım, hatlarda görünen akımın artmasına ve hatlardaki aktif kayıpların büyümesine neden olacaktır.

Enerji iletim hattından akan güç, kayıpsız bir hat için; hat empedansı, alıcı ve verici uçlarındaki gerilimlerin arasındaki faz açısı ve bu gerilimlerin genliğinin fonksiyonudur.

$$P = \frac{V_R \cdot V_S}{X_L} \sin \delta \quad (2.1)$$

V_S = Verici uç geriliminin genliği.

V_R = Alıcı “ “ “

V_M = Hattın orta nokta gerilimi.

X_L = Hat reaktansı.

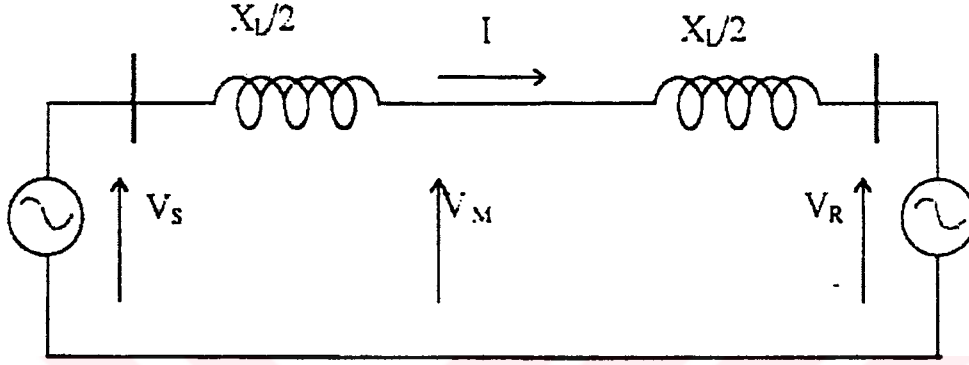
δ = Gerilimler arasındaki faz açısı

Şebekedeki güç akışı, sistemdeki güç akışını belirleyen parametreler kolay değiştirilemediği için rahatlıkla kontrol edilemez. Sistemin güç akışını kontrol etmede operatörlere gereken esnekliği sağlayan, güç elektroniği teknolojisine dayalı sistemler kullanılmaktadır ve buna dayalı sistemler gelişmektedir. [3]

Alternatif akım iletim ve dağıtım hatları ağırlıklı olarak reaktif şebekelerdir ve birim uzunluk başına seri endüktans ve şönt kapasiteleri ile karakterize edilirler. Böylece

yükte ve güç faktöründeki değişimler iletim hattı boyunca gerilim profilinde değişikliklere yol açar. Alıcı uç geriliminin genliğinde büyük değişikliklere neden olur. Yükün büyük bir bölümü gerilim değişikliklerine uyum sağlayamaz.

Basit bir AC iletim hattı modellemesi şekil 2.1 de verilmiştir [3].



Şekil 2.1: Basit bir ideal iletim hattı modeli .

Hat üzerindeki akım :

$$I = \frac{(V_S - V_R)}{jX_L} = \frac{2V}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.2)$$

$$(V_S = V.e^{j\delta}, V_R = V.e^{-j\delta})$$

Kayıpsız bir hattaki aktif güç :

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin \delta \quad (2.3)$$

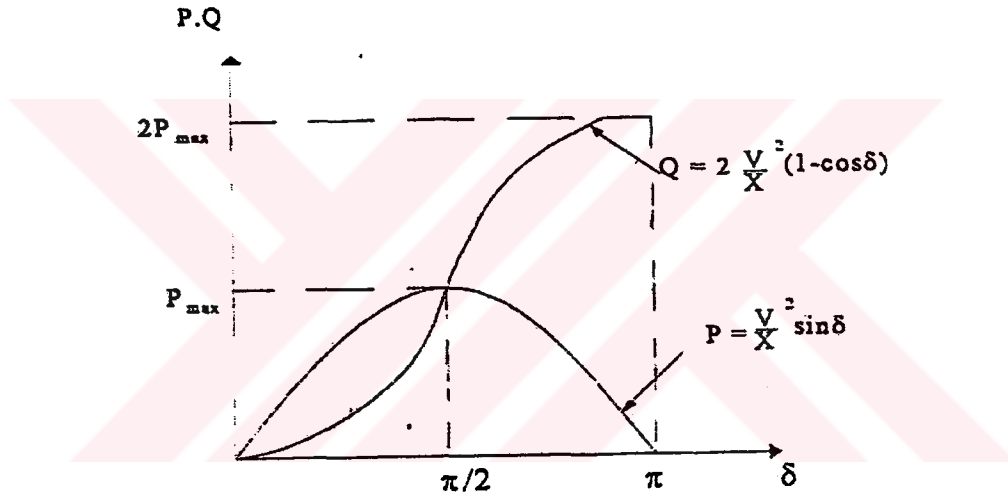
Her uca giren reaktif güç ise :

$$Q_S = Q_R = \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos \delta) \quad (2.4)$$

Hat tarafından depolanan toplam reaktif güç :

$$Q = 2Q_s = \frac{2V^2}{X_L}(1 - \cos \delta) \quad (2.5)$$

Aktif güç P , reaktif güç Q ve δ faz açısı arasındaki ilişki şekil 2.2 de gösterilmektedir [3]. Bu ifadelerden yola çıkarak maksimum gücü arttırmak için uygulanan ideal şönt kompanzasyon ve faz değıştirciler ele alınacaktır.

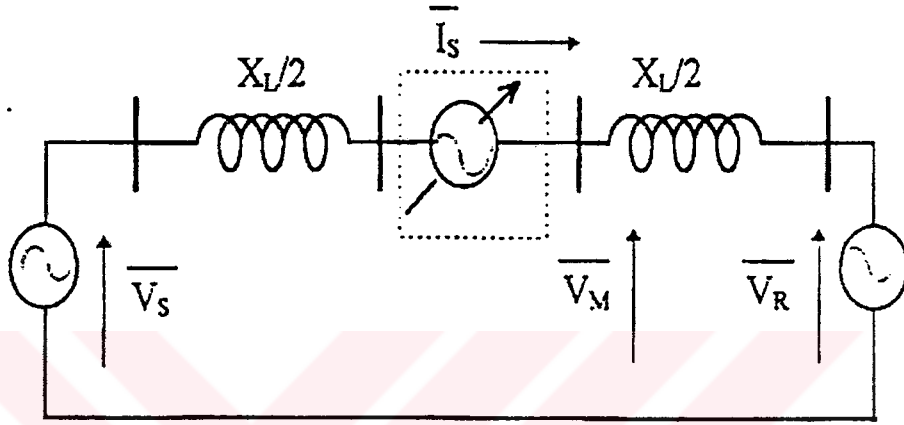


Şekil 2.2: Güç iletim karakteristiği .

2.1 İDEAL SERİ KOMPANZASYON

Sabit seri reaktörler ve mekanik anahtarlı reaktörler gibi seri reaktif kompanzasyon araçları sınırlı hatlardaki akışı azaltmak için kullanılırlar. Sabit seri kapasitörler ve mekanik anahtarlı kapasitörler ise kullanım altında olan iletim hatlarında güç akışını arttırmak için kullanılmaktadır. [7]

Seri reaktör yerleştirilmesiyle hattın reaktansı artar ve hattın akan güç azalır. Bunun sonucu olarak da reaktif güç ihtiyacı artar. Seri kapasitör yerleştirilmesiyle hattın reaktansı azalır. Böylece hattın akan güç artar. Sabit şönt reaktif cihazlar ve sabit seri reaktif cihazlar sistemdeki bir arızadan sonra güç akışını iyi bir şekilde kontrol edemezler. Mekanik anahtarlı seri reaktif elemanlar ise bir arıza sonrası sistem performansını hızlı bir şekilde geçici ve kalıcı olarak arttırmak için kullanılır.



Şekil 2.3 Seri kapasitif kompanzasyonlu güç sistemi .

Seri kompanzasyonlu iki ideal makina modeli yukarıdaki şekilde gösterilmiştir. Seri kompanzasyonda toplam hat empedansı,

$$X = X_L - X_C \quad (2.6)$$

$$X = (1 - s)X_L \quad (2.7)$$

Seri kompanzasyon, seri kapasite ekleyerek hattın reaktansını azaltır. Burada X hattın seri kompanzasyondan sonraki net reaktansını gösterir. X_L hattın eşdeğer π devresi reaktansını, s ise kompanzasyon derecesini göstermektedir. [7]

$$s = \frac{X_C}{X_L}, \quad 0 \leq s < 1 \quad \text{şeklinde ifade edilir.} \quad (2.8)$$

Kompanze edilmiş hattaki akım ve aktif güç ise :

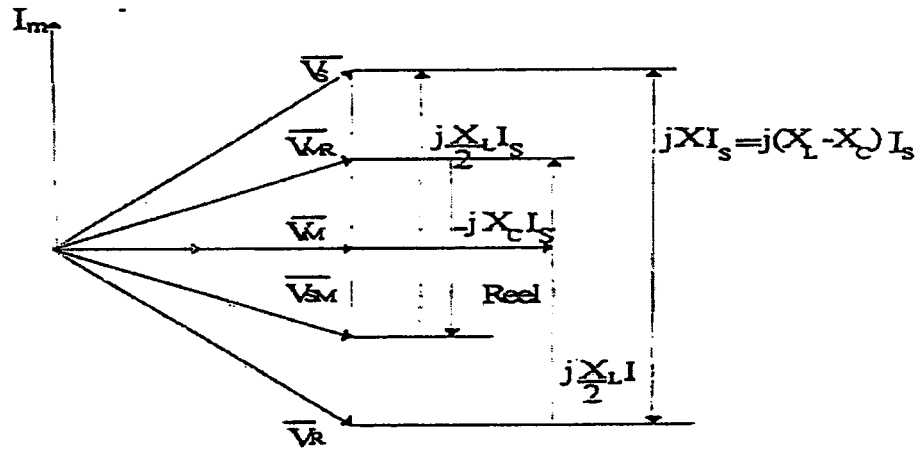
$$I_s = \frac{2V}{(1-s)X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.9)$$

$$P_s = \frac{V^2}{(1-s)X_L} \sin \delta \quad (2.10)$$

Seri kapasitörden elde edilen reaktif güç :

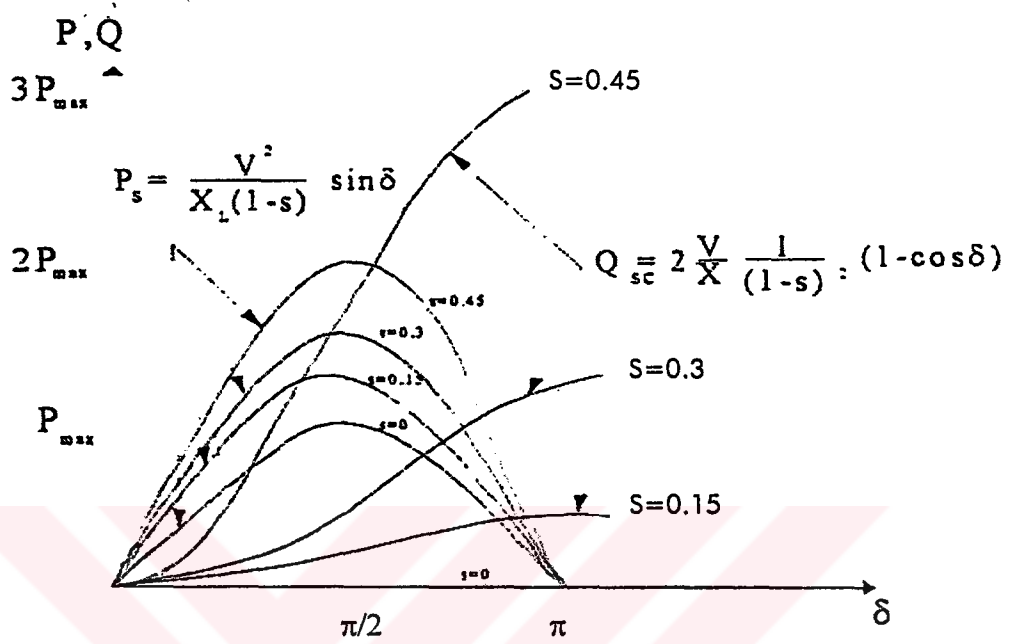
$$Q_{sc} = I^2 X_c = \frac{2V^2 s}{(1-s)^2 X_L} (1 - \cos \delta) \quad (2.11)$$

Bunlara karşı gelen gerilim ve akım fazörleri arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Burada, hat başı gerilimi (V_S), hat sonu gerilimi (V_R), hat ortası gerilimi (V_M), hat başı ile hat ortası arası gerilimi (V_{SM}) ve de hat ortası ile hat sonu arası geriliminin (V_{MR}), seri kompanzasyon akımı I_s ile fazör diyagramı verilmiştir [7].



Şekil 2.4 Gerilim ve akım arasındaki fazör diyagramı.

Aktif güç P_s , seri kapasitör reaktif gücü Q_{sc} ve δ faz açısı arasındaki ilişki, s kompanzasyon derecesine bağlı olarak değişir. Bunlar arasındaki ilişki aşağıdaki şekilde gösterilmiştir [3].



Şekil 2.5 iletim karakteristiği.

Beklenildiği gibi, iletilen gücün, seri kompanzasyon derecesi s ile hızlı olarak arttığı gözlenmiştir. Benzer olarak seri kapasitörden sağlanan reaktif güçte s ile artar ve δ açısıyla hattın reaktif gücünün değiştiği gibi değişir.

Seri kapasitörlerin iletim hattının toplam reaktansını azaltması, güç sisteminin geçici kararlılığını artırır, reaktif güç kayıplarını düşürür ve iletim hattının gerilim regülasyonunu artırır. Seri kompanzasyon etkili bir şekilde gerilim profilini kontrol etmek için de kullanılır. [3]

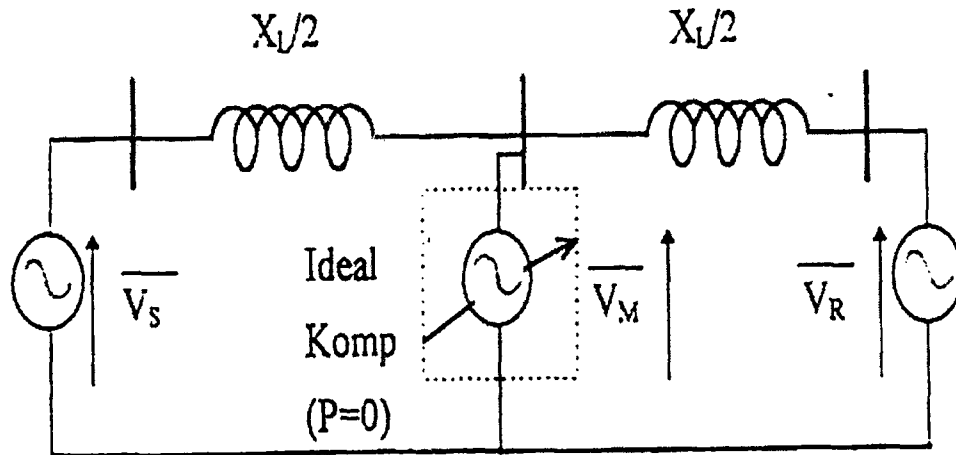
Seri kapasitör grubunun en uygun, en iyi kullanımı verecek bir şekilde iletim hattına yerleştirilmesi için iletim hattının orta noktası uygundur. Seri kapasitörün yerleşim yeri birkaç sebepten dolayı önemlidir.

- Hat boyunca kapasitör verimi kapasitörün yerine göre değişmektedir.
- Kapasitörün yeri, iletim hattının gerilim profilini etkilemektedir.
- İletim hattının ve grubunun korunumu kapasitörün yerinden etkilenmektedir.
- Kapasitör grubunun korunumu ve bakımı için yeri önemlidir.

2.2 İDEAL ŞÖNT KOMPAZASYON

Sabit şönt reaktörler ve mekanik anahtarlı reaktörler gibi şönt reaktif kompanzasyon araçları, düşük yük koşulları altında aşırı gerilimi azaltmak için kullanılırlar. Sabit şönt kapasitörler ve mekanik anahtarlı kapasitörler ise fazla yük koşulları altında gerilim seviyelerini dengelemek amacıyla kullanılırlar.

Oluşan bir hatadan sonra ilk salınım periyodundaki artırılmış kapasitif şönt kompanzasyon, generatörlerin açılmal salınımlarını azaltır ve gerilim profilini dengeler . Basit iki makinalı iletim hattının orta noktasına ideal şönt kompanzatorün bağlandığı durum aşağıda gösterilmektedir [7].



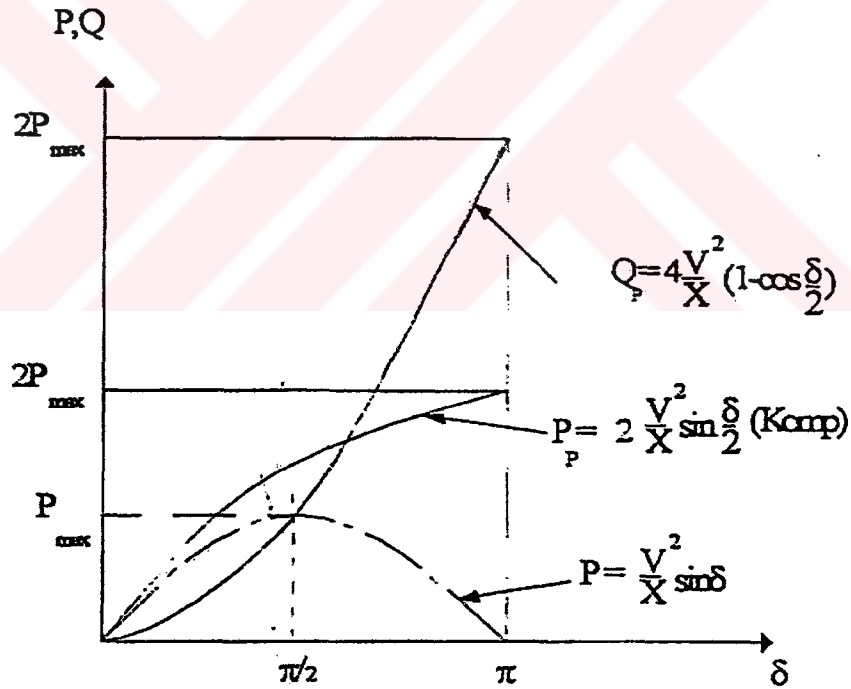
Şekil 2.6 İdeal orta nokta kompanzatorlü güç sistemi.

Reaktif akım kaynağı; δ açısından bağımsız olarak orta nokta gerilimini sabit tutmak için yeterli reaktif güç üreterek, iletim hattının reaktansını, herbiri $X_L/2$ olan iki bağımsız bölüme ayıran ideal şönt kompanzatör olarak davranır.

$$P_s = \frac{2V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.12)$$

$$Q_s = \frac{4V^2}{X} \left(1 - \cos \frac{\delta}{2}\right) \quad (2.13)$$

Aktif güç P_s , reaktif güç Q_s , δ faz açısı arasındaki ilişki ideal şönt kompanzasyon durumu için şekil 2.7 'de gösterilmektedir [3]. Reaktif güç üretimi için uygulanan şönt kompanzasyonun, iletilebilen gücü belirgin bir şekilde arttırdığı görülmektedir (burada belirtilen V , hattın alıcı ve verici uç gerilim genliğidir).

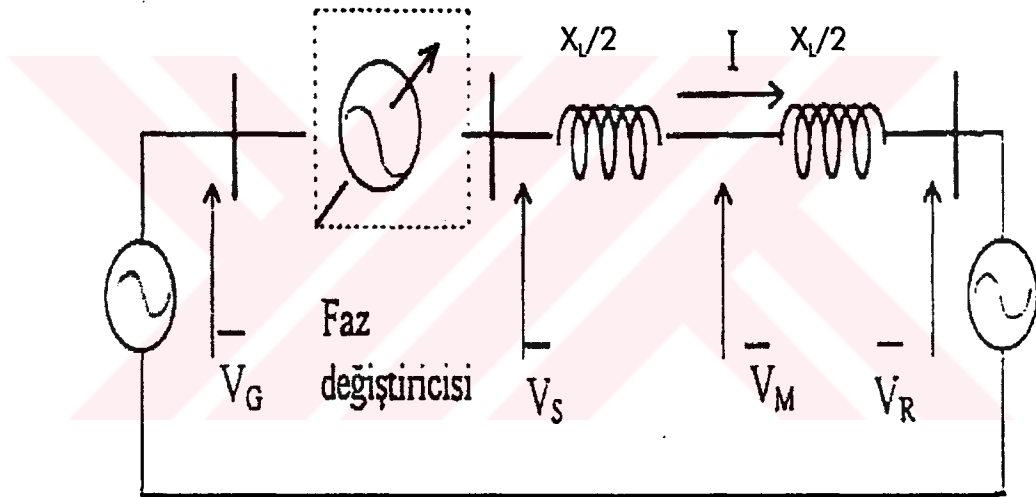


Şekil 2.7 Güç iletim karakteristiği.

2.3 FAZ AÇISI KONTROLÜ

Faz açısı kontrolü, enerji iletim sistemi geriliminin faz açısını değiştirmek amacıyla uygulanır. Faz açısı regülatörleri hat üzerindeki aktif güç akışını düzenlerler. Yüksek hızlı bir faz açısı regülatörü, sistemin geçici kararlılığını artırır ve sönümü kolaylaştırır. [3,7]

Kompanze edilmemiş endüktif hatlı ideal iki makina modeli düşünelim. Faz değiştiricisi şekil 2.8’de görüldüğü gibi güç kaynağı ile hattın verici ucu arasına yerleştirilmiştir [3].



Şekil 2.8 Faz değiştiricili güç sistem modeli.

Faz değiştiricisi, kontrollü büyüklük ve faz açılı sinüsoidal, temel frekansta AC gerilim kaynağı olarak düşünülmüştür. Faz değiştiricisinin, maksimum güç iletimi için alıcı ve verici uçlar arasındaki faz açısını $\pi/2$ de tutmak ve δ açısının $\pi/2$ ’ yi en kısa sürede aşması için uygun genlikte ve açıda V_{pq} gerilimi yerleştirmesi gerekir. V_s verici uç gerilimi, aşağıdaki şekilde gösterilen fazör diyagramında

Resim 2.9 Gerilim ve akımlar arasındaki fazör diyagramı.

Faz kaydırıcı kontrolörler için iletim hattının gücü :

$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta - \alpha) \text{ şeklinde ifade edilebilir.} \quad (2.14)$$

13

3. KONTROL EDİLEBİLİR ALTERNATİF AKIM İLETİM SİSTEMİ (FACTS)

Elektik enerji maliyetlerindeki artış, yeni hatların inşa edilmesindeki kısıtlamalar, enerji iletim sistemlerinin esnek, güvenilir ve ekonomik bir şekilde çalışması için taleplerin artmasına neden olmuştur.

Esnek alternatif akım iletim sistemi, alternatif akım iletiminin, iletilebilir güç kapasitesini ve kontrol edilebilirliğini arttırmak için güç elektroniği cihazlarının kullanımını öngören bir kavramdır. Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi, özellikle tristör teknolojisi kullanımının artmasıyla, tristörün anahtarlama kapasitesini kullanan enerji sistemleri endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulmuştur. FACTS cihazları, mevcut sistemin kendi ısı kapasitesinin altında çalıştığı durumlarda, varolan iletim imkanlarıyla daha çok enerji taşınmasına izin vererek sistemin iletim kapasitesini artırır ve yeni iletim hatlarının inşa edilmesini imkanlar dahilinde erteler. Yani FACTS cihazları, iletim sisteminin kapasitesini arttıran, iletim yönünü kontrol eden, kararlılığı arttıran güç elektroniği destekli iletim ekipmanlarının planlanması olarak ifade edilebilir. [7,9,10]

Güvenilir, yüksek hızlı FACTS cihazları aşağıdaki yararları sağlayacaklardır:

- Güç akışının kontrolü arttıkça, akım belirlenen iletim hatlarını izleyecektir.
- İletim hatlarının termal limitler düzeyinde, güvenli şekilde, daha fazla yüklenmesine izin verir. Aşırı yüklenmeden kaçınılır.
- Var olan iletim sistemlerinin kullanımını artırarak yeni iletim hatlarının kurulmasını erteler. [9]

FACTS cihazlarının maliyetleri oldukça fazladır. Ekonomik faktörleri hesaba katmadan güç sistemine fazla sayıda FACTS cihazı yerleştirmek, akılcı ve mümkün değildir.

FACTS cihazları, mekanik anahtarlama sistemlerine göre daha hızlı anahtarlama yapabildiklerinden dolayı üstündürler. [9]

Temel olarak FACTS' in iki fonksiyonu bulunmaktadır. Birisi sistem parametrelerini (güç akışı, hat akımı, uç gerilimini) kontrol etmek, diğeri ise güç sistemlerinin kararlılığını (geçici kararlılık, sürekli kararlılık, gerilim kararlılığı) arttırmaktır. [7]

1980'lerden itibaren yapılan FACTS çalışmaları göstermiştir ki, kontrolörlerle yapılan kararlılık uygulamalarıyla, iletim hatlarının enerji iletim kapasitesi önemli bir oranda artmaktadır.

3.1 FACTS CİHAZLARININ SINIFLANDIRILMASI

FACTS kontrolörlerdeki gelişmeler, bu kontrolörler için iki belirgin inceleme yöntemini de beraberinde getirmiştir. Yani kontrolörler iki ayrı grupta toplanmıştır. İlk grup, tristör kontrollü reaktif empedans yada faz kaydırıcı transformatör kullanarak kontrol yapan; ikinci grup ise, statik konvektör komutalı kontrolörlerdir [7].

1- Tristör Kontrollü FACTS Cihazları:

- SVC
 - Tristör anahtarlama kapasitör (TSC)
 - Tristör anahtarlama reaktör (TSR)
 - Tristör kontrollü reaktör (TCR)
- TCSC (Tristör kontrollü seri kompanzatör)
- TCPS (Tristör kontrollü faz kaydırıcı)

2- GTO Anahtarlı, Gerilim Kaynaklı, Gerilim Çevirici Sürücüler

- STATCON (Geliştirilmiş şönt kompanzasyon sistemi)
- STATCOM (Statik kompanzatör)
- UPFC (Birleştirilmiş güç akış kontrolörü)

3.2 TRİSTÖR KONTROLLÜ FACTS KONTROLÖRLER

Statik VAR kompanzatörler (SVC), TCSC ve faz kaydırıcılar bu gruba girerler. Bu kontrolörlerden herbiri, üç parametreden biri üzerinde etkili olarak enerji iletiminde rol oynarlar. Buna göre SVC gerilimle, TCSC iletim empedansı, faz kaydırıcı ise iletim açısıyla ilişkilidir. Tristör kontrollü faz kaydırıcı dışındaki kontrolörler kompanzasyon için gerekli olan reaktif gücü, mevcut kapasitör ve reaktör grupları sayesinde üretir veya tüketirler. Tristör anahtarları ise alternatif sistemde mevcut bulunan birleşik reaktif empendansı kontrol amaçlı kullanılırlar. Faz kaydırıcılar, kapasitör veya reaktöre ihtiyaç duymadan, ac sistemle reaktif güç alış-verişi yaparak üretir veya tüketirler. Sonuç olarak tristör kontrollü kompanzatörler iletim şebekesine değişken reaktif admitans sağlayarak sistem empedansının karakteristiğini değiştirirler. Bazen, kapasitif şönt kompanzasyonun endüktif sistem empedansı ile bağlanması sonucunda, temel frekansın (50-60 Hz) üzerinde bir şebeke rezonansı oluşabilmektedir. Seri kapasitif kompanzasyon ise temel değerin altında bir elektriksel rezonansla sonuçlanarak ve iletim hattını besleyen türbin generatörün mekanik rezonansı ile birleşerek tüm sistemde altsenkron rezonansa (SSR) sebep olabilmektedir [4].

Şebeke rezonansının önemli problemlere sebep olabileceğinden hareketle, SVC'lerde ayarlı LC filtreler kullanımıyla sıfır empedanslar üretilerek, kritik harmonik frekanslarda paralel rezonanslar yaratılmaya çalışılır. Seri kompanzasyonla sağlanan alt harmonik rezonansdaki azalma ise, tristör kapılarının kontrolüyle oluşturulan aktif sönüm gerektirebilmektedir.

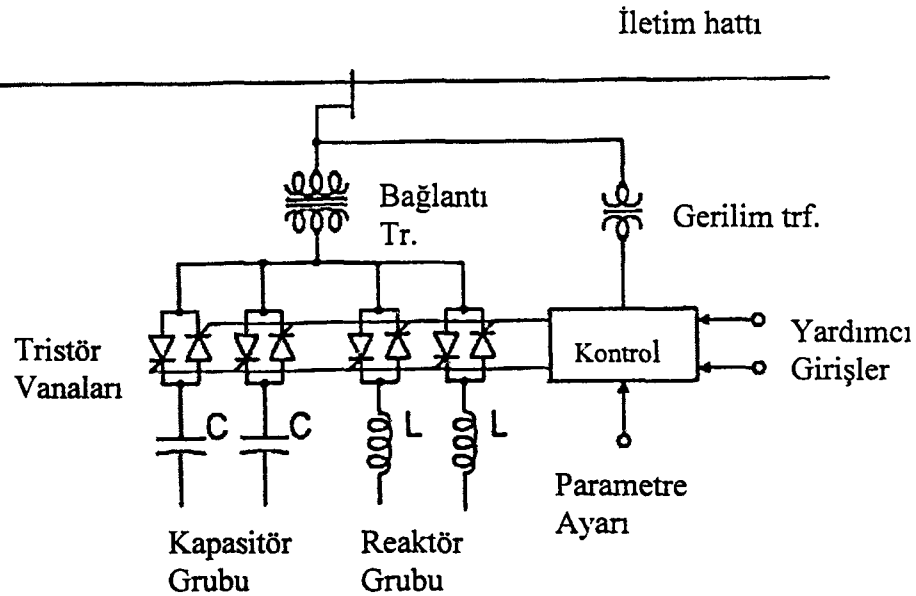
SVC ve TCSC iletim şebekesine dolaylı yoldan etki etmektedirler. Örneğin, TCSC hatta seri olarak bağlanmakta, kompanzasyon gerilimi oluşturarak hattın seri empedansı boyunca oluşan gerilimi arttırmakta ve en sonunda iletilen gücü ve akımı etkilemektedir. Dolayısıyla seri kompanzasyon hat akımının doğal bir fonksiyonu olmaktadır. Aynı şekilde SVC, istenilen kompanzasyon akımını sağlamak üzere paralel empedans olarak uygulanmaktadır. Dolayısıyla sağlanan şönt kompanzasyon hat geriliminin fonksiyonu olmaktadır [4].

Büyük çapta hataların TCSC ve SVC'yi normal kontrol aralıkları dışında çalışmaya zorladığı durumlarda, mevcut bu hat değişkenlerine bağımlılık kontrolörler için zararlı olabilmektedir.

Tristör kontrollü FACTS kontrolörlerin temel çalışma prensipleri ve karakteristikleri ilerleyen bölümlerde açıklanmaya çalışılmıştır.

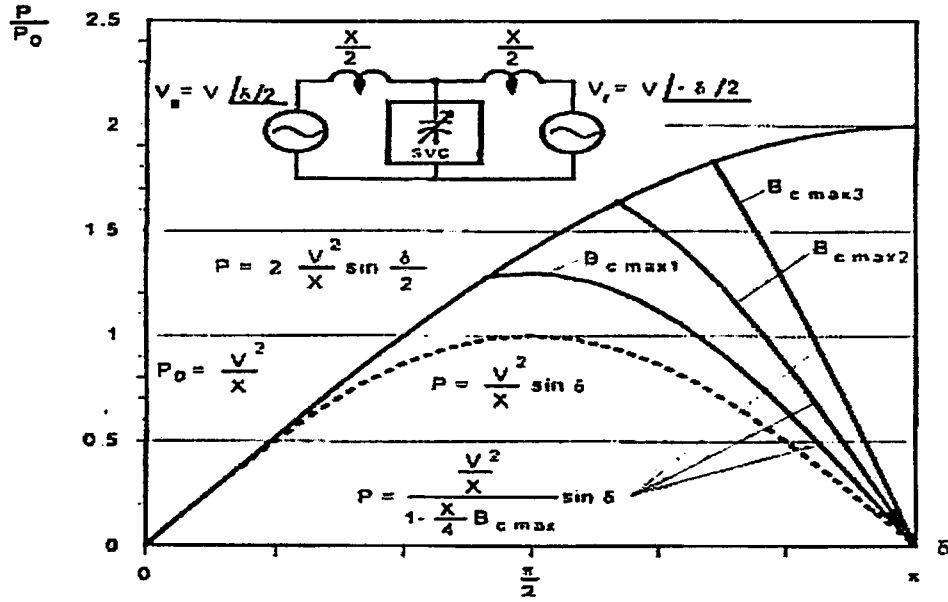
3.2.1 STATİK VAR KOMPANZATÖR (SVC)

Tristör kontrollü SVC, bugünkü FACTS kontrolörlerin başlangıcı sayılabilir. 1970'lerin başlarında ark fırını kompanzasyonu için geliştirilmiş, daha sonraları enerji iletim uygulamaları için kullanılmıştır. Şekil 3.1 de gösterildiği gibi tipik bir şönt bağlı SVC, tristör anahtarlama kapasitörler (TSCs) ve tristör kontrollü reaktörler (TCRs) den oluşmaktadır. Kapasitör ve reaktörlerin uygun bir şekilde koordinasyonlu çalışması sonucunda, reaktif güç çıkışı, elemanların kapasitif ve endüktif oranları dahilinde sürekli değiştirilebilir [4]. Kompanzatör, iletim sisteminin seçili terminalindeki gerilimi ayarlamak için kullanılır.



Şekil 3.1 TSC ve TCR içeren Statik VAR Kompanzatör.

Gerilim sağlamaya ek olarak SVC, geçici ve dinamik kararlılığı sağlamada da kullanılır. SVC'nin iletilebilir gücü arttırmadaki etkisi şekil 3.3'de gösterilmektedir. Burada maksimum kapasitif admitanslı ($B_{c \max}$), basit iki makinalı model üzerinde tanımlı P gücü, iletim açısı δ ile karşılaştırmalı olarak çizilmiştir. Burada şu tanımlama yapılabilir: SVC, verilen P- δ ilişkisinde ideal bir orta-nokta kompanzatör gibi davranmaktadır, ta ki maksimum kapasitif admitans $B_{c \max}$ 'a erişilene kadar [4].



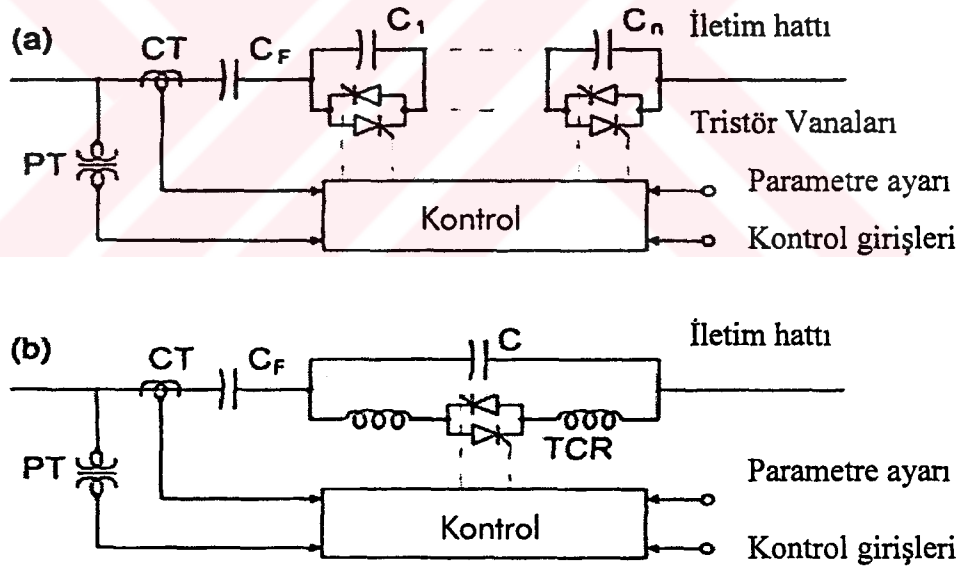
Şekil 3.3 SVC'nin iletilebilir gücü arttırmadaki etkisi.

Bu noktadan itibaren enerji iletim eğrisi, tanımlanan bu $B_{c \max}$ admitanslı, orta-nokta şönt kapasitörle özdeş olmaktadır. Geçici kararlılıktaki düzelme (ilk salınım), hata oluşumundan sonra tanımlanan, kompanze edilmiş ve edilmemiş P - δ eğrisindeki $\int P d\delta$ alanıyla orantılıdır. Bu alan, SVC'nin anma değerleri çok geniş olmadığı sürece, geniş açılı salınımlarla ($\delta > \pi/2$) sert bir düşüş göstermektedir.

Dinamik kararlılıktaki gelişme ise açısal ivmelenmelere ve salınımlara karşı gelecek, uygun kapasitif ve endüktif değerler arasındaki SVC çıkışının izlenmesiyle sağlanabilmektedir. Amaç, iletilen elektriksel gücü, hat gerilimini kapasitif VAR'larla artırmak; hat gerilimini endüktif VAR'larla düşürmektir. SVC'nin enerji salınımını söndürmedeki etkisi doğal olarak gerilim değişiminin bir fonksiyonu olmaktadır.

3.2.2 TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KAPASİTÖR (TCSC)

Aşağıdaki şekilde tristör anahtarlama kapasitörlerin ve tristör kontrollü reaktöre paralel bağlı sabit kapasitörün kullanıldığı tristör kontrollü seri kapasitörlerin iki temel şeması verilmiştir. Tristör anahtarlama kapasitör şeklinde, seri kompanzasyonun derecesi, seri bağlı kapasitör gruplarının sayısını artırarak veya azaltarak kontrol edilir. Bütün bunlarda tristör anahtarlama sağlanmaktadır. Geçici anahtarlama minimize etmek ve doğal iletimi kullanabilmek için, tristör vanalarının çalıştırılması, gerilim ve akım koordinasyonu yapılır. Oluşabilecek bir hata sonucu aşırı gerilim ve akımlardan korunmak amacıyla kapasitör grubuna paralel bir ZnO tipi gerilim durdurucu (parafudr) cihazlara gereksinim duyulur [4].



Şekil 3.4 TCSC: a) TSC nin kullanıldığı durum, b) TCR nin kullanıldığı durum.

TCR'ye paralel bağlı kapasitör durumunda; kapasitif çalışma bölgesinde seri kompanzasyonun derecesi tristör iletim periyodunun artırılmasıyla artırılır, azaltılmasıyla seri kompanzasyonun derecesi azaltılmış olur (TCR'nin admitansı,

paralel bağılı kapasitörün admitansından düşük tutulur). Minimum seri kompanzasyona TCR devre dışı olduğu durumda ulaşılır. TCR, herhangi bir arıza durumunda kapasitör üzerindeki gerilimi sınırlamak için de kullanılabilir.

Daha geniş kontrol aralığı sağlamak amacıyla, her iki tip de, TCR ve sabit kapasitör seri bağlanmak suretiyle birleştirilebilir.

Seri kompanzasyon, uzun hatlardaki endüktif reaktansı kompanze etmek için seri kapasitörlerin kullanıldığı, enerji iletimini geliştirmede iyi tanınan, etkili, ekonomik bir yöntemdir. Enerji iletim sistemlerinde seri kapasitörlerin kullanım amaçları kısaca :

- Geçici kararlılık limitlerinin yükseltilmesi sonucu olarak güç iletim kapasitesini arttırmak,
- Sistemin gerilim profilini geliştirmek,
- Paralel hatlar arasındaki aktif güç paylaşımını en uygun düzeye çıkararak iletim sistemindeki kayıpları düşürmek, şeklinde özetlenebilir.

Artan yük talepleri ve yeni tesisler kurulmasına getirilen kısıtlamalar nedeniyle iletim hatlarının güvenilir bir şekilde ısı limitlerine yakın çalıştırılmasına olanak verecek teknik gelişmeler ve ekonomik çözümler sağlar [11].

İletilen güç arttıkça seri kapasitörde reaktif güç üretimi arttığından, sistemdeki seri kompanzasyon gerilim kontrolünü ve reaktif güç dengesini düzeltir.

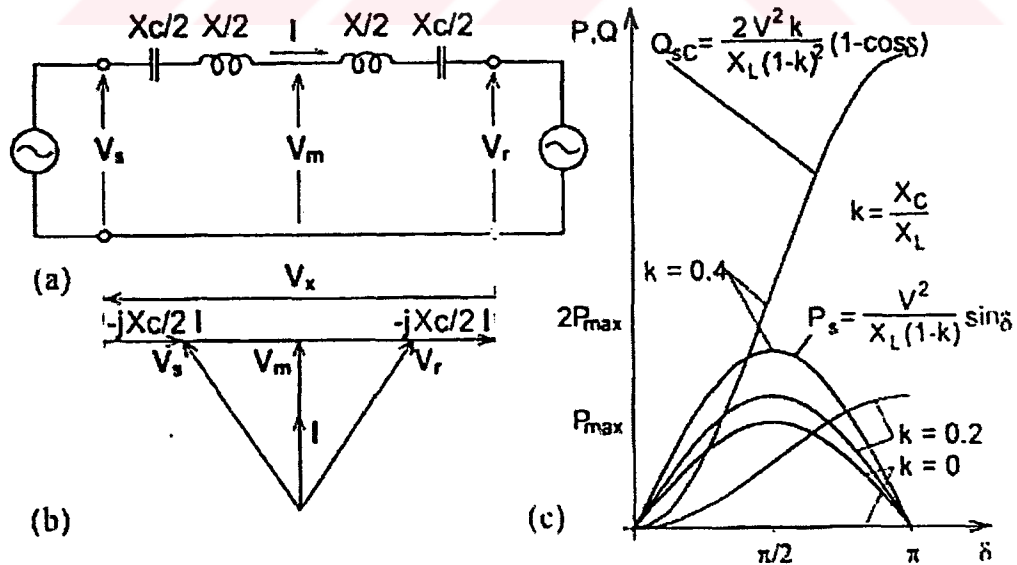
İletim hattıyla seri bağlanan kapasitörler, toplam empedansı düşürür ve hat boyunca daha fazla gücün iletilmesine izin verir. Genel olarak seri kompanzasyonda, kapasitör grupları, sistemin değişen çalışma koşullarına cevap olarak hat kompanzasyon derecesini ve hattın yüklenebilirliğini ayarlamak için, güç devre kesicileri gibi mekanik cihazlar kullanmak suretiyle hatta bağlanıp ayrılabilirler. Bununla beraber seri kompanzasyon düzeniyle kapasite dinamik olarak değiştirilemez, sadece ekonomik olarak ayrı bölümler halinde anahtarlanabilir. Güç elektroniği elemanları kullanarak bu anahtarlama fonksiyonunu, dinamik bazda yerine getirmek ve iletim hattı empedansını hızlı ve hassas ayarlı bir şekilde kontrol

etmek mümkündür [12]. Tristör kontrollü seri kapasitörler aynı zamanda güç salınımlarının söndürülmesinde ve güç akış kontrolünde de etkilidir.

Kapasitörler çoğu zaman hat boyunca yerleştirilirler ve hattın bir parçası olarak anahtarlanırlar. Yer seçimi, her ayrı olay için, ekonomi ve sistem güvenilirliği açısından, özel bir çalışma gerektirir. Hattın endüktif reaktansına göre kompanzasyon derecesi genellikle %20 ile %70 arasında değişir [11].

Aşağıda Şekil 3.5-c’de, değişken seri kapasitif kompanzasyonun $P - \delta$ karakteristiği gösterilmektedir. TCSC, güç akışının sürekli durum kontrolü dışında, geçici kararlılığın sağlanması, enerji salınımlarının söndürülmesi ve paralel hatlarda dengeli güç akışı için etkili olabilmektedir [4].

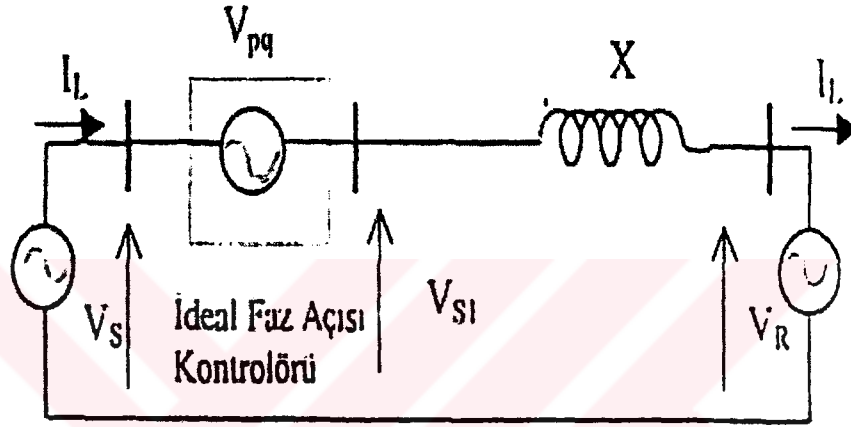
İlk üç TCSC uygulaması ABD’de 1990’lardan sonra yapılmıştır. Aralık 1991’den beri West Virginia’da 788 Mvar ZnO korumalı bir seri kapasitör 345 kV’luk hattı kompanze etmektedir. Kompanzasyonun toplam derecesi %60 olup %10-%20 ve %30’luk ayrı ayrı çalışan 3 kısımdan oluşmaktadır [12].



Şekil 3.5 Değişken seri kapasitif kompanzasyonun $P - \delta$ karakteristiği.

3.2.3 İDEAL FAZ AÇISI KONTROLÖRLERİ (TCPAR)

Şekil 3.6 da, ideal bir faz açısı kontrolörü içeren alternatif akım sistemi görülmektedir. Faz açısı kontrolörü veya faz kaydırıcı, hattın verici uç terminali ile generatör üretim terminali arasına yerleştirilmiştir.



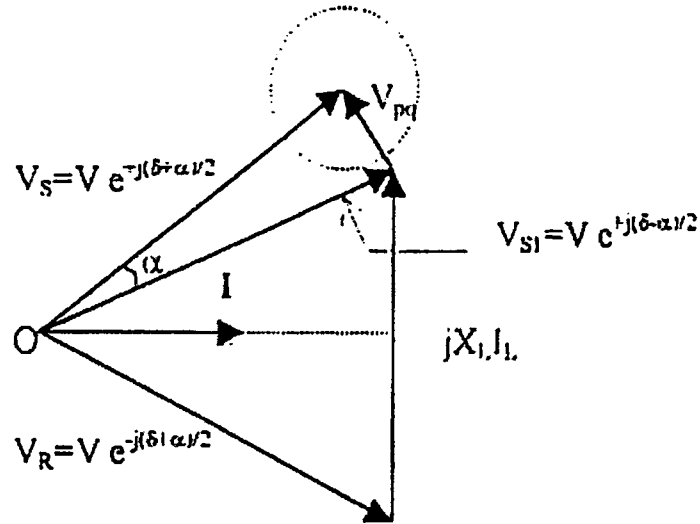
Şekil 3.6 TCPAR'lı ideal iletim sistemi.

Faz açısı kontrolörlerinin temel işlevi, alıcı ve verici uç gerilimlerinin faz farkı δ 'yı, maksimum güç iletimi için etkin faz açısı $\pi/2$ yapacak şekilde, ayarlanan genlikte ve faz açısında V_{pq} gerilimini oluşturmaktır [13].

Faz kaydırıcı kontrolörler için iletim hattındaki güç ifadesi:

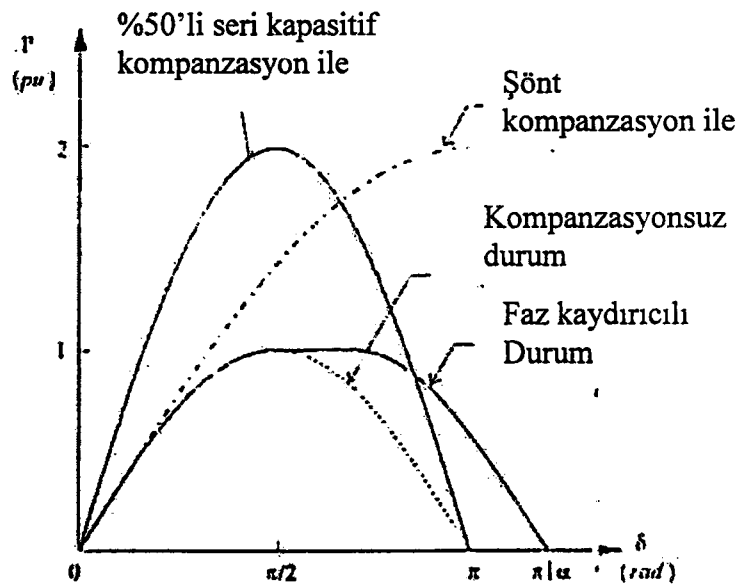
$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin(\delta - \alpha) \quad \text{şeklinde ifade edilebilir.} \quad (3.1)$$

Kontrol faz açısı α olmak üzere, faz farkı $(90 - \alpha)$, 90° 'ye yaklaştığında iletilen güç artar.



Şekil 3.7 TCPAR'ın V-I karakteristiği.

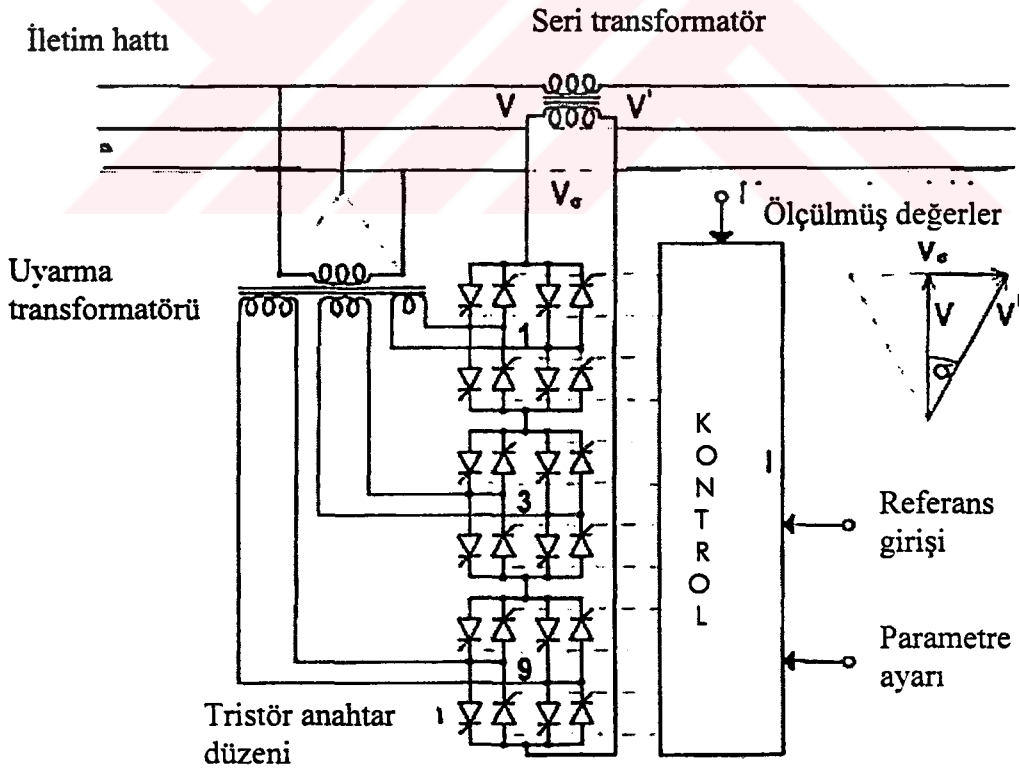
Faz kaydırıcı, kompanzasyon yapılmamış hattan iletilebilecek gücü arttırmamasına rağmen, üretim açısı δ 'yı $(\pi/2 \leq \delta \leq \pi/2 + \delta)$ olacak şekilde ayarlayarak iletilen gücü maksimum değerinde tutmaya olanak vermektedir [14].



Şekil 3.8 Kompanzasyon durumlarına göre güç iletim karakteristiği.

Şekil 3.8 den de açıkça görüldüğü gibi, kompanzasyon seviyesine bağlı olarak seri kompanzasyon güç iletim kapasitesini arttırmak için en iyi seçimdir. Faz kaydırıcı, kontrol edilemeyen ve aşırı faz farklılığı olan iki sistemi birbirine bağlamakta önemlidir. Şönt kompanzator, kararlılık seviyesini yükseltmek için en iyi seçimdir. Gerçekte verilen bir çalışma noktası için geçici bir hata ortaya çıktığında mevcut üç kompanzasyon dikkate alınacak şekilde kararlılık seviyesini yükseltirler. Ancak bu durum şönt kompanzasyon için özellikle geçerlidir.

Tristör kontrollü faz kaydırıcı transformator düzeni aşağıdaki şekilde gösterilmektedir. Faz kaydırıcı; uygun kademeli şönt bağlı uyarma transformatorünün, seri ekleme transformatorünün ve ekleme transformatorünün sekonder tarafına bağlı tristör anahtar düzeninden oluşmaktadır. Tristör kontrollü faz kaydırıcı transformator; iletim faz açısını ayarlamak, çoklu iletim hatlarında güç akışı dengesini tanımlamak ve faz açısını kontrol etmek suretiyle geçici ve dinamik kararlılığı arttırmak için uygulanabilir [4].



Şekil 3.9 TCPAR'ın genel şeması.

Gerilim enjeksiyonu sonucu oluşan reaktif güç değişimi, önemli gerilim düşmelerine sebep olabilir. Hat boyunca önemli gerilim düşmelerinden kaçınmak için kademe değiştirici tipli faz kaydırıcı, gerekli reaktif gücü sağlamak amacıyla kontrol edilebilir reaktif şönt kompanzatörle tamamlanmalıdır ya da generatörle ilişiksiz olarak yerleştirilmelidir. Bu çalışma karakteristiği yüzünden, bu tip faz kaydırıcılar henüz büyük güçlü uygulamalar için geliştirilmemiştir.



4- FACTS TEKNOLOJİSİ KULLANILARAK KAYIP AZALTIMI

Enerji sisteminin optimal işlemini konusunda ekonomik kriterlerin önemi büyüktür. Bununla birlikte, enerji kalitesi hakkındaki gelişen endişeler, sistem mühendislerini diğer kriterleri de dikkate almaya yöneltmiştir (gerilim şekli, iletim hattı kaybının minimize edilmesi vb.).

Elektrik enerjisi iletimindeki kayıplar, artan üretim kapasitesi gereksinimi dolayısıyla da gelir kaybına yol açmaktadır. En uygun kayıp minimizasyonu ise, modern enerji yönetim sistemi (EMS) kapsamında bulunan uygulama fonksiyonlarından biridir. Toplam iletim sistemi kayıplarını minimize etmekte ve gerilim profilini iyileştirmekte kullanılır. Son yıllarda güç elektroniği ve mikroelektronik alanlarındaki hızlı gelişmeler, enerji iletim sistemi üzerinde daha fazla esnek operasyon yapabilme olanağı sağlamıştır. Bu amaçla, kontrolör sayısını arttırmak üzere FACTS uygulamalı programı geliştirilmiştir [18]. Bu yeni cihazlar, günümüz iletim ve dağıtım şebekesini daha güvenilir, daha kontrol edilebilir ve daha verimli kılabilir.

Son birkaç yıldır, FACTS cihazlarının iletim sistemi kararlılığı, güvenilirliği ve yük akış durumu üzerine uygulamalarında artış olmuştur. Bununla birlikte, sistemin statik performansı (maliyet ve kayıp minimizasyonu) üzerinde sınırlı sayıda çalışmalar bulunmaktadır [19,20]. Bu çalışmada FACTS cihazları, sıradan bir kontrol parametreleri olarak ele alınmıştır. Günümüz çalışmalarında TCSC, TCPAR ve SVC'nin statik modelleri kullanılmaktadır. İletim kayıplarının minimizasyonu, diğer kontrol elemanlarının olduğu gibi FACTS cihazlarının da uygun işletme değerlerinin bulunmasıyla sağlanır.

Optimum kayıp güc minimizasyonu problemi, birbirini izleyen programlar sayesinde çözülmüştür. Bununla birlikte FACTS cihazlarının pahalılığından dolayı optimal yerleşimleri de önemli bir karar halini almıştır. Duyarlılık indisleri bazlı metodlar, bu cihazların optimal yerleşimi için önerilen çözüm yoludur.

Yapılan bir çalışmada ise, EGAT (Tayland Elektrik Üretim Kurumu) enerji şebekesi sistemi örnek alınarak, FACTS cihazlarının kayıp minimizasyonu üzerindeki etkisi araştırılmıştır [6].

4.1- BASİT KAYIP MİNİMİZASYON FORMÜLASYONU

Şebeke performans sınırlamalarını ve kontrol değişkenlerinin işletme limitlerini sağlamak kaydıyla, toplam aktif güc kaybını minimize etmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir. Bu yöntemlerdeki kontrol değişkenleri: generatör çıkış gerilimi ve transformatör kademe ayarıdır. Bunlar, generatör ve diğer VAR kaynaklarının optimal reaktif güc ayarı tanımlamasında kullanılırlar. Örnek bir optimum kayıp minimizasyon formülasyonu aşağıda açıklanmaya çalışılmıştır [6].

N baralı bir sistemin, N_q adet barasının reaktif güc kaynağı, N_g tanesinin generatör ve $N_g + 1, \dots, N$ baranın ise yük barası olduğunu kabul edelim. Bu sistemde, N_1 tane hat ve N_a kadarda ayarlı (t_i) transformatör olsun. $V_i \angle \delta_i$, i . baranın kompleks gerilimi olmak üzere i . baradaki aktif ve reaktif güçler,

$$P_i = \sum_{j=1}^N [V_i^2 G_{ii} - t^2 V_i^2 G_{ij} + t V_i V_j (G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j))] \quad (4.1)$$

$$Q_i = \sum_{j=1}^N [-V_i^2 B_{ii} - (t^2 - 1)V_i^2 B_{ij} + t V_i V_j (G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j))] \quad (4.2)$$

olarak verilebilir. Burada, $Y_{ij} = G_{ij} + jB_{ij}$, bara admitans ($[Y_{bus}]$) matrisinin ij . elemanı ve ' t ' ise transformatör yükte kademe değiştiricisi ayarıdır.

Objektif fonksiyon ise,

$$\text{Min.} f = P_L(V, \delta, t) = \sum_{i=1}^N P_i \quad (4.3)$$

biçiminde olup, aktif ve reaktif güç dengesi eşitlikleri (eşitlik sınırlamaları) ise,

$$h_i = P_i - P_{Gi} + P_{LD} = 0 \quad i = 1, \dots, N \quad (4.4)$$

$$g_i = Q_i + Q_{Ldi} = 0 \quad i = N_{q+1}, \dots, N \text{ biçimindedir.} \quad (4.5)$$

Q_i = i. baraya enjekte edilen reaktif güç,

Q_{Ldi} = i. baradaki yükün reaktif güç gereksinimi,

P_i = i. baradaki enjekte edilen aktif güç,

P_{Gi} = üretilen aktif güç,

P_{LD} = talep edilen aktif güç.

Bu çalışmada, P_{Gi} temel durum değerinde sabit olarak kabul edilmiş olup işletim sınırlamaları (eşitsizlik sınırlamaları) ise:

$$Q_{Gi \min} \leq Q_i + Q_{Ldi} \leq Q_{Gi \max} \quad i = 1, \dots, N_q \quad (4.6)$$

$$t_{j \min} \leq t_j \leq t_{j \max} \quad j = 1, \dots, N_q \quad (4.7)$$

$$V_{i \min} \leq V_i \leq V_{i \max} \quad i = 1, \dots, N \quad (4.8)$$

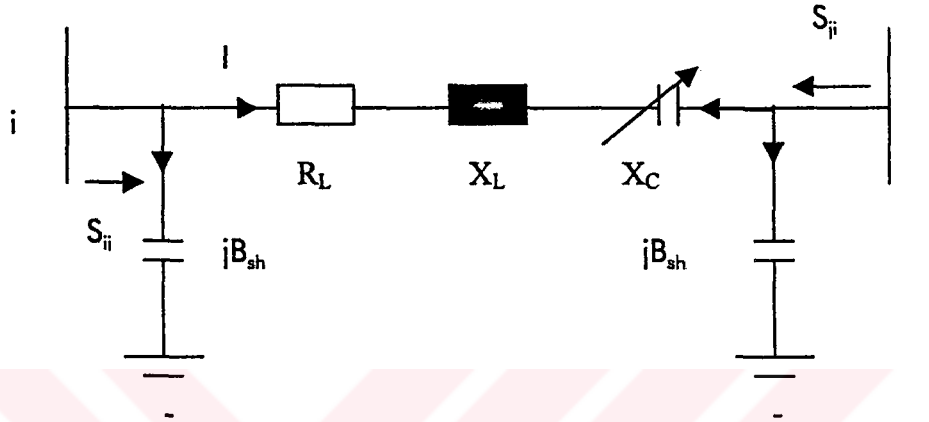
biçiminde verilmiştir. Yani, tüketilen reaktif güç, üretilen değer minimum ve maksimumu arasında olmalıdır. Aynı şekilde, gerilim genliğinin ve faz kaydırıcı transformatör ayar oranının belirli değerler arasında olması gerekir.

4.2- FACTS CİHAZLARININ MODELLENMESİ

Burada FACTS cihazlarının statik modelleri kullanılmıştır. Sistem içerisinde, güç akışı ve gerilim profili kontrolünü sağlayacak çeşitli FACTS cihazları mevcuttur. Bu

çalışmada ise, TCSC, TCPAR ve SVC cihazları iletim kayıplarını minimize etmek için kullanılacaktır .

4.2.1. TCSC :



Şekil 4.1: TCSC modeli.

Sürekli hal söz konusu olduğunda TCSC, jX_c empedansında bir statik kapasitör/reaktör olarak kabul edilebilir. i.baradan j. baraya aktif ve reaktif güç akışı sonuçlarını elde etmek için, genel kompleks güç eşitliğini kullanabiliriz. Burada, V_i : i. bara gerilim genliği , V_j : j. bara gerilim genliği, I_{ij} : i-j hattından geçen akım, δ_i , δ_j : faz açıları olmak üzere sırayla şu denklemler verilebilir:

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* = V_i e^{j\delta_i} \left[(V_i e^{j\delta_i} - V_j e^{j\delta_j}) (G_{ij} + jB_{ij}) + V_i e^{j\delta_i} B_{sh} e^{-j} \right]^* \quad (4.9)$$

$$S_{ij} = V_i e^{j\delta_i} \left[(V_i e^{-j\delta_i} - V_j e^{-j\delta_j}) (G_{ij} - jB_{ij}) + V_i B_{sh} e^{-j(\delta_i+1)} \right]$$

$$S_{ij} = (V_i^2 - V_i V_j e^{j(\delta_i-\delta_j)}) (G_{ij} - jB_{ij}) + V_i^2 B_{sh} e^{-j}$$

$$S_{ij} = V_i^2 G_{ij} - jV_i^2 B_{ij} - V_i V_j G_{ij} e^{j(\delta_i-\delta_j)} + jV_i V_j B_{ij} e^{j(\delta_i-\delta_j)} + V_i^2 B_{sh} e^{-j}$$

$$S_{ij} = V_i^2 G_{ij} - jV_i^2 B_{ij} - V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - jV_i V_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + jV_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - V_i V_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) - jV_i^2 B_{sh}$$

(4.10)

Buradan i-j arası aktif ve reaktif güç eşitlikleri şu şekilde verilebilir,

$$P_{ij} = V_i^2 G_{ij} - V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) - V_i V_j B_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (4.11)$$

$$Q_{ij} = -V_i^2 (B_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j G_{ij} \sin(\delta_i - \delta_j) + V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (4.12)$$

Aynı şekilde, j-i arası kompleks güç eşitliğinden aktif ve reaktif güç denklemlerine ulaşılabilir;

$$S_{ji} = V_j I_{ji}^* = V_j e^{j\delta_j} \left[(V_j e^{j\delta_j} - V_i e^{j\delta_i}) (G_{ij} + jB_{ij}) + V_j e^{j\delta_j} B_{sh} e^{j\delta_j} \right] \quad (4.13)$$

$$P_{ji} = V_j^2 G_{ij} - V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i) - V_i V_j B_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i) \quad (4.14)$$

$$Q_{ji} = -V_j^2 (B_{ij} + B_{sh}) - V_i V_j G_{ij} \sin(\delta_j - \delta_i) + V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_j - \delta_i) \quad (4.15)$$

Böylece i-j arasındaki k hattının toplam aktif ve reaktif güç eşitlikleri sırasıyla,

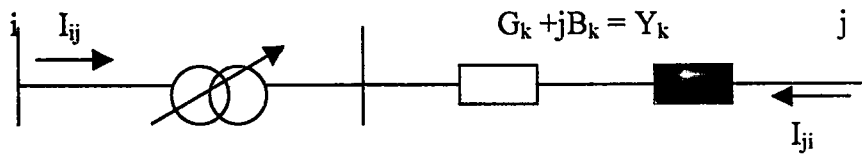
$$P_{Lk} = P_{ij} + P_{ji}$$

$$P_{Lk} = V_i^2 G_{ij} + V_j^2 G_{ij} - 2V_i V_j G_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (4.16)$$

$$Q_{Lk} = -(B_{ij} + B_{sh}) (V_i^2 + V_j^2) + 2V_i V_j B_{ij} \cos(\delta_i - \delta_j) \quad (4.17)$$

şeklinde verilebilir. Bu iki eşitlik (4.16 ve 4.17), TCSC' nin modellenmesinde kullanılmaktadır [6].

4.2.2- TCPAR :



Şekil 4.2 : TCPAR modeli .

TCPAR'ın kompleks ayar oranı, $1:a \angle \alpha = [1:(a_T + j a_i)]$ ve de Y_k ise k. transformatörünün seri admitansdır.

$$\begin{bmatrix} I_i \\ I_j \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} |a|^2 y & -a^* y \\ -ay & y \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} V_i \\ V_j \end{bmatrix}$$

Faz kaydırıcı transformatörün matematiksel modeli yukarıdaki gibi verilebilir. TCPAR cihazı, ayar kademesi değiştirilebilir bir transformatör olarak ele alınabilir. Transformatörün çevirme oranı 'a' komplekstir.[2].

i-j baraları arasına yerleştirilen TCPAR' ın statik modelinde kullanılacak olan aktif ve reaktif güç eşitliklerini elde etmek için genel kompleks güç ifadesinden yola çıkılabilir.

$$S_{ij} = V_i I_{ij}^* \quad (4.18)$$

Yukarıda verilen faz kaydırıcı transformatör matematiksel modelinden,

$$I_i = a^2 y V_i - a^* y V_j \quad (4.19)$$

şeklde yazılabilir. Admittans eşitliği, $y=G+jB$ olmak üzere,

$$I_i = (G + jB) [a^2 V_i e^{j\delta_i} - a e^{-j\alpha} V_j e^{j\delta_j}] \quad (4.20)$$

$$I_i^* = (G - jB) [a^2 V_i e^{-j\delta_i} - a e^{j\alpha} V_j e^{-j\delta_j}] \quad (4.21)$$

$$S_{ij} = (G - jB) V_i e^{j\delta_i} (a^2 V_i e^{-j\delta_i} - a e^{j\alpha} V_j e^{-j\delta_j})$$

$$S_{ij} = (G - jB) (a^2 V_i^2 - a e^{j\alpha} V_i V_j e^{j(\delta_i - \delta_j)})$$

$$S_{ij} = G a^2 V_i^2 - a G V_i V_j e^{j\delta_j + \alpha} - j B a^2 V_i^2 + j B a V_i V_j e^{j(\delta_j + \alpha)}$$

$$S_{ij} = G a^2 V_i^2 - a G V_i V_j \cos(\delta_j + \alpha) - j a G V_i V_j \sin(\delta_j + \alpha) - j B a^2 V_i^2 + j B a V_i V_j \cos(\delta_j + \alpha) - B a V_i V_j \sin(\delta_j + \alpha)$$

biçiminde verilebilir. (4.22)

Buradan i-j arası aktif ve reaktif güç eşitlikleri sırasıyla:

$$P_{ij} = Ga^2 V_i^2 - aGV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) - BaV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) \quad (4.23)$$

$$Q_{ij} = -Ba^2 V_i^2 - aGV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) + BaV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) \quad (4.24)$$

şeklinde verilebilir. Aynı şekilde, j-i doğrultusundaki güç eşitlikleri için,

$$S_{ji} = V_j I_{ij}^* = V_j I_j^* \quad (4.25)$$

$$I_j = -ayV_i + yV_j \quad (4.26)$$

$$S_{ji} = -GaV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) + jGaV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) + GV_j^2 + jBaV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) + BaV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) - jBV_j^2 \quad (4.27)$$

bağıntısı verilebilir. Burada j-i baraları arasındaki aktif ve reaktif güç akışı için,

$$P_{ji} = -GaV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) + GV_j^2 + BaV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) \quad (4.28)$$

$$Q_{ji} = -BV_j^2 + GaV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) + BaV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) \quad (4.29)$$

denklemleri yazılabilir. Genel ifadesiyle, TCPAR kullanılan bir k hattının toplam aktif ve reaktif güç ifadeleri,

$$P_{Lk} = P_{ij} + P_{ji} = Ga^2 V_i^2 - aGV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) - BaV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) - GaV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) + GV_j^2 + BaV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) \quad (4.30)$$

$$Q_{Lk} = Q_{ij} + Q_{ji} = -Ba^2 V_i^2 - aGV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) + BaV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) - BV_j^2 + GaV_i V_j \sin(\delta_{ij} + \alpha) + BaV_i V_j \cos(\delta_{ij} + \alpha) \quad (4.31)$$

şeklinde bulunur [6].

4.2.3 SVC (Statik VAR Kompansatör):

Enerji sisteminde, gerilim kontrolünü sağlayan önemli bir elemandır. SVC'nin reaktif güç çıkışı şöyle hesaplanabilir:

$$Q_{SVC} = V_t(V_t - V_{ref})X_{sl} \quad (4.32)$$

X_{sl} = eşim reaktansı (p.u), V_t ve V_{ref} ise düğüm ve referans gerilimleridir (bkz, şekil 3.2). Q_{SVC} , endüktif ve kapasitif kısımlara ayrılıp tanımlama yapılabilir.

$$Q_{ind} = B_{ind} \cdot V_{ref}^2 \quad (4.33)$$

$$Q_{cap} = B_{cap} \cdot I_{ref}^2 \quad (4.34)$$

Optimum kayıp minimizasyonunda SVC, reaktif güç limitlerini de içine alan reaktif güç kaynağı olarak kabul edilebilir [6].

4.3 FACTS CİHAZLARININ OPTİMAL YERLEŞİM METODLARI

FACTS cihazlarıyla ilgili yapılmış olan ilk çalışmalarda, sistemin kararlılığını arttırmak için kullanılan FACTS cihazlarının yerleşimi konusu incelenmiştir [6].

Yeni çalışmalarda, FACTS cihazları sistemin toplam aktif güç kayıplarını (P_L) azaltmada da kullanılır olmuştur. Bu çalışmalarda FACTS'ler statik açıdan değerlendirilip, toplam kaybı azaltmak için kullanıldığından, optimal yerleşim için duyarlılık analizleri kullanılmıştır [6].

4.3.1 KAYIP DUYARLILIK İNDİSLERİ

Önerilen metod, FACTS cihazlarının yerleşimi için, cihazın kontrol parametreleriyle birlikte iletim kayıplarının duyarlılığını kullanır. Uygulamada kullanılan üç FACTS cihazının kontrol parametreleri: TCSC için, hattın seri reaktansı (X_k); TCPAR için, faz açısı; SVC için ise reaktif güç beslemesi (Q_i) dir.

Kayıp duyarlılık faktörleri, elde edilen temel yük akış sonuçlarından hesaplanabilirler. Bu faktörler cihaz parametrelerine göre, k hattındaki TCSC için:

$$a_k = \frac{\partial P_L}{\partial X_k} , \quad (k = 1, \dots, N_l)$$

k hattındaki TCPAR için:

$$b_k = \frac{\partial P_L}{\partial \phi_k} , \quad (k = 1, \dots, N_l)$$

i. baradaki SVC için:

$$c_i = \frac{\partial P_L}{\partial Q_i} , \quad (i = 1, \dots, N_l)$$

olarak verilmektedir [6].

i. bara ile j. bara arasında $R_k + jX_k$ seri empedanslı bir 'k' hattında X_k , hatta bulunan seri kompanzatörün net reaktansı olabilir. Baralardaki gerilimler, $V_i \angle \delta_i$, $V_j \angle \delta_j$ ve faz farkı , $\phi_k = \delta_i - \delta_j$ şeklindedir.

TCSC parametresine göre kayıp duyarlılığı :

$$\frac{\partial P_{lk}}{\partial X_k} = \left[a^2 V_i^2 + V_j^2 - 2a V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \right] \left[\frac{2 R_k X_k}{(R_k^2 + X_k^2)^2} \right] \quad (4.35)$$

$$\frac{\partial Q_{lk}}{\partial X_k} = \left[a^2 V_i^2 + V_j^2 - 2a V_i V_j \cos(\delta_i - \delta_j) \right] \left[\frac{(R_k^2 - X_k^2)}{(R_k^2 + X_k^2)^2} \right] \quad (4.36)$$

Faz farkı ϕ_k 'nın kayıp duyarlılık indisi ise (TCPAR) :

$$\frac{\partial P_{Lk}}{\partial \phi_k} = 2aV_iV_jG_k \sin(\phi_k) , \quad (k = 1, \dots, N_L) \quad (4.37)$$

$$\frac{\partial Q_{Lk}}{\partial \phi_k} = -2aV_iV_j \sin(\phi_k) , \quad (4.38)$$

SVC'nin kayıp duyarlılık indisinin hesabı için, sistem kayıpları P_L ,

$$P_L = \sum_{j=1}^N \sum_{i=1}^N [\alpha_{jk} (P_j P_k + Q_j Q_k) + \beta_{jk} (Q_j P_k - P_j Q_k)] \quad (4.39)$$

biçiminde verilebilir. Burada, α ve β ile tanımlanan kayıp katsayıları olup,

$$\alpha_{jk} = \frac{r_{jk}}{V_j V_k} \cos(\delta_j - \delta_k) \quad (4.40)$$

$$\beta_{jk} = \frac{r_{jk}}{V_j V_k} \sin(\delta_j - \delta_k) \quad (4.41)$$

biçiminde tanımlanmıştır. Ayrıca, $P_i + jQ_i$, 'i' barasına enjekte edilen kompleks güç, r_{jk} , $[Z_{bus}]$ bara empedans matrisinin jk . elemanının reel kısmıdır.

Bu kayıp formülüne göre i. baradaki duyarlılık indisi :

$$\frac{\partial P_L}{\partial Q_i} = 2 \sum_{j=1}^N (\alpha_{ij} Q_j + \beta_{ij} P_j) , \quad (i=1, \dots, N) \quad (4.42)$$

biçiminde hesaplanmaktadır [6].

4.3.2 OPTİMAL YERLEŞİM İÇİN KRİTERLER

Enerji iletim sistemlerinde FACTS kontrolörlerin kayıp azaltımı ve gerilim kararlılığının sağlanması konusunda etkili olabilmesi için, optimal yerleşimleri büyük önem taşımaktadır. Bu amaç doğrultusunda, her bir cihazın ayrı ayrı kontrol parametreleri dikkate alınarak iletim hattı ve bara duyarlılıkları belirlenmiştir. Bu yöntemle kayıp azaltımında kullanılan FACTS cihazlarıyla birlikte her bir hat ve bara için kayıp duyarlılık indisleri hesaplanmaktadır. Bu yöntemle göre enerji sisteminde FACTS cihazı , en duyarlı bara veya hatta yerleştirilmelidir. Kayıp duyarlılık indisleri hesaplanmış FACTS cihazlarının optimal yerleşimi için kullanılan kriterler:

- 1-) TCSC nin , pozitif kayıp duyarlılık indisi (a_k) büyük olan hatta ,
- 2-) TCPAR'nin, b_k 'nin en büyük mutlak değeri aldığı hatta ,
- 3-) SVC'nin, negatif duyarlılık indisi c_i olan 'i' barasına yerleştirilmesi,
- 4-) TCSC ve TCPAR hat duyarlılığı yüksek olsa bile iki üretim barası arasına yerleştirilmemesi,
- 5-) SVC'nin ise, sadece yük baralarına yerleştirilmesi, olarak verilmektedir[6].

Bütün bu kriterler ışığında, önceden verilen duyarlılık indisleri eşitliklerinin dikkate alındığı en duyarlı hatlar ve baralar belirlenebilir, optimal yerleştirme yapılabilir (Bkz, bölüm 5).

4.4 FACTS CİHAZLARINA BAĞLI OPTİMAL KAYIP MİNİMİZASYONU

Enerji şebekesinde, duyarlılık indisleri yöntemine göre FACTS cihazlarının optimal yerleşimine karar verdikten sonra, her bir cihazın kontrol parametresine göre, sistemde uygun görülen müdahalelerle kayıp minimizasyonu sağlanabilir. İlerde 30 baralı örnek bir sistem üzerinde, yük akışı sonucu elde edilen kayıp enerjiyi minimize etmek için kullanılan üç FACTS cihazı uygulaması verilecektir. Bu

uygulamada optimal yük akışı, olanaksızlıklar nedeniyle yapılamamış; ancak, duyarlılık indisleri hesabı yoluyla yapılan analiz sonucunda FACTS'lerin optimal yerleşimi verilmiş ve buna göre kontrol parametrelerine müdahale edilerek, kayıp azaltımı gerçekleştirilmiştir.

Bu uygulamaya ek olarak, optimal yük akışının ve kayıp azaltımının yapıldığı örnek bir çalışma da aşağıda verilmiştir.

Bu çalışmada, 230 kV ve 500 kV'luk EGAT şebekesi optimizasyon sonuçlarını tahmin etmek için kullanılmıştır. Bu durum 1997'de kaydedilmiş olup, sistemdeki 17 üretici merkez yükleri beslemekte, 7 üretici merkez ise hafif yükler için devrededir. Sistemde 58 bara, 77 hat ve 4 adet ayarlı transformatör mevcut olup, FACTS cihazlarının yerleşiminin duyarlılık yöntemiyle belirlenmesi için üç adet öncelikli hat/bara tablo 4-1 ve tablo 4-2'de gösterilmiştir [6].

Tablo 4.1: Duyarlılık indislerinin öncelik sırası (tam yük durumu)
(optimal yük akışı programı sonucu elde edilmiş.)

<u>Öncelik</u>	<u>a_k (hat)</u> (TCSC)	<u>b_k (hat)</u> (TCPAR)	<u>c_i (bara)</u> (SVC)
1.	37-49	37-49	31
2.	20-26	20-26	28
3.	26-13	26-13	47

Tablo 4.2: Duyarlılık indislerinin öncelik sırası (hafif-yük durumu)

<u>Öncelik</u>	<u>a_k (hat)</u>	<u>b_k (hat)</u>	<u>c_i (bara)</u>
1.	37-9	26-7	47
2.	2-22	20-26	15
3.	20-26	37-9	44

Buradan da gözleneceği gibi FACTS cihazlarının yerleşiminde hatların ve baraların önceliği, iki farklı yükleme durumu için aynı bara veya hat numaraları olmamaktadır. Burada, optimizasyon sonuçlarının kayıplar üzerine etkisi iki durum için incelenmiştir. Birincisi, tam yük koşullarına ilk öncelik verildiğinde; ikincisi, hem tam yük hemde hafif yük (az yük) durumunun FACTS cihazlarının yerleşimi için dikkate alındığı haldir. İnceleme sonuçları göstermiştir ki, TCSC ve TCPAR tam yükleme koşullarında öncelikli olarak yerleştirilip (hat 37-49), SVC ise duruma göre üçüncü öncelikte yerleştirildiğinde (47.bara) , optimizasyon sonucu kayıp azalması her iki işletme koşulları için de kaydadeğer düzeyde olmaktadır[6]. Bununla birlikte,FACTS cihazlarının iletim sistemlerinde (N-1) durumu ve iletim sisteminde aşırı yüklenme durumlarında kayıp azaltımı konusunda normal yükleme durumuna göre daha etkili olduğu görülmektedir [Bkz, bölüm 5].

FACTS cihazlarının optimal yerleşimine karar verdikten sonra, basit optimizasyon (FACTS kullanılmayan, basit bir amaç fonksiyonu minimizasyonu) ve FACTS içeren optimizasyon her iki işletim koşulları için de, kontrol değişkenlerinin optimal ayarını tanımlamak için çalıştırılır.

Üç adet FACTS cihazı içeren optimal yük akışı formülasyonu aşağıdaki objektif fonksiyonu minimize etmek için tanımlanabilir.

$$P_L = \sum_{i=1}^{N_1} (P_{LM} + P_{ML}) + \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} P_{TCSC_i} + \sum_{i=N_1+N_2+1}^{N_l} P_{TCPAR_i} \quad (4.43)$$

P_{TCSC_i} = TCSC kullanılan ‘i’ hattındaki aktif güç kaybı.

P_{TCPAR_i} = TCPAR kullanılan ‘i’ hattındaki aktif güç kaybı.

N_1 = FACTS cihazsız hat sayısı.

N_2 = TCSC li hat sayısı.

$N_1 - N_1 - N_2$ = TCPAR’ lı hat sayısıdır.

Reaktif güç dengesi eşitliği:

$$\sum_{i=1}^{N_q} Q_{Gi} - Q_L - Q_D + \sum_{i=N_q+1}^{N_q+N_{SVC}} Q_{SVC_i} = 0 \quad (4.44)$$

şeklinde verilebilir. Burada,

Q_D = Sistemdeki toplam reaktif güç gereksinimi,

Q_L = Toplam reaktif güç kaybını ifade etmektedir.

Buradaki Q_L reaktif güç kaybı,

$$Q_L = \sum_{i=1}^{N_1} (Q_{LM} + Q_{ML}) + \sum_{i=N_1+1}^{N_1+N_2} Q_{TCSC_i} + \sum_{i=N_1+N_2+1}^{N_1} Q_{TCPAR_i} \quad (4.45)$$

olarak verilmektedir.

Optimal kayıp azaltımında kullanılan eşitsizlik sınırlamaları ise:

$$Q_{Gi}^{\min} \leq Q_{Gi} \leq Q_{Gi}^{\max} \quad i = 1, \dots, N_q \quad (4.46)$$

$$V_i^{\min} \leq V_i \leq V_i^{\max} \quad i = 1, \dots, N \quad (4.47)$$

$$X_{Cj}^{\min} \leq X_{Cj} \leq X_{Cj}^{\max} \quad j = N_1+1, \dots, N_1+N_2 \quad (4.48)$$

$$\alpha_j^{\min} \leq \alpha_j \leq \alpha_j^{\max} \quad i = N_1+N_2+1, \dots, N_1 \quad (4.49)$$

$$Q_{SVCi}^{\min} \leq Q_{SVCi} \leq Q_{SVCi}^{\max} \quad i = N_q+1, \dots, N_q+N_{SVC} \quad (4.50)$$

şeklinde verilebilir. Yani, üretilen reaktif güç , bara gerilim genliği, kapasitif reaktans, transformatör faz farkı ve SVC' nin ürettiği reaktif güç değeri belirli bir minimum ve maksimum değerler arasında kalmalıdır. Burada,

Q_{TCSC_i} = TCSC'li i hattındaki reaktif güç kaybı,

Q_{TCPAR_i} = TCPAR'lı i hattındaki reaktif güç kaybı,

N_{SVC} = toplam SVC'li kaynak sayısı,

Q_{SVC_i} = i barasında SVC'nin reaktif güç çıkışı.

X_{Cj} = j hattındaki TCSC'nin seri reaktansı.

α_i = i hattındaki TPAR'dan kaynaklanan açı farkını göstermektedir.

100 MVA temel güce göre, p.u olarak kayıp değerleri Tablo 4.3 ve Tablo 4.4’de her iki yük durumu için gösterilmektedir [6].

Tablo 4.3: Toplam aktif güç kaybı karşılaştırması (tam yük)

<u>Açıklama</u>	<u>P_L(p.u)</u>	<u>% kayıp düşümü</u>
Temel durum	3.2124	-
Basit optimizasyon	2.8024	12.61
FACTS içeren optimizasyon		
-TCSC(37-49 hattı)	2.8073	12.61
-TCPAR(37-49 hattı)	2.6532	17.41
-SVC(47 barası)	2.8004	12.82

Tablo4. 4: Toplam aktif güç kaybı karşılaştırması (az yük)

<u>Açıklama</u>	<u>P_L(p.u)</u>	<u>% kayıp düşümü</u>
Temel durum	1.9048	-
Basit optimizasyon	1.5244	19.97
FACTS içeren optimizasyon		
-TCSC(37-49 hattı)	1.5240	19.99
-TCPAR(37-49 hattı)	1.5195	20.23
-SVC(47 barası)	1.5120	20.62

Buradan da görüleceği üzere, basit optimizasyon yalnız başına tam yük koşulları için toplam kaybı %12,6 oranında azaltabilmekte; hafif yük durumu için de, toplam kaybı %19,97 oranında azaltabilmektedir. TCSC ve SVC, basit optimizasyon ile her iki yükleme koşulu için de karşılaştırıldığında; toplam aktif güç kaybında daha az düşme sağlarken, TCPAR cihazı %5 daha fazla düşme sağlamaktadır. Bu küçük yüzde bile MW değerlerinde kayıp düşmelerine karşılık gelmekte ve önemli gelir tasarrufu sağlamaktadır [6].

Bununla birlikte elde edilen sonuçlara göre, optimal kayıp minimizasyonu yalnızca sistem kayıplarını düşürmemekte, aynı zamanda bara gerilim şeklini de düzeltmekte, kararlı kılmaktadır.

Tablo 4.5: Gerilim genliğindeki standart sapma (p.u).

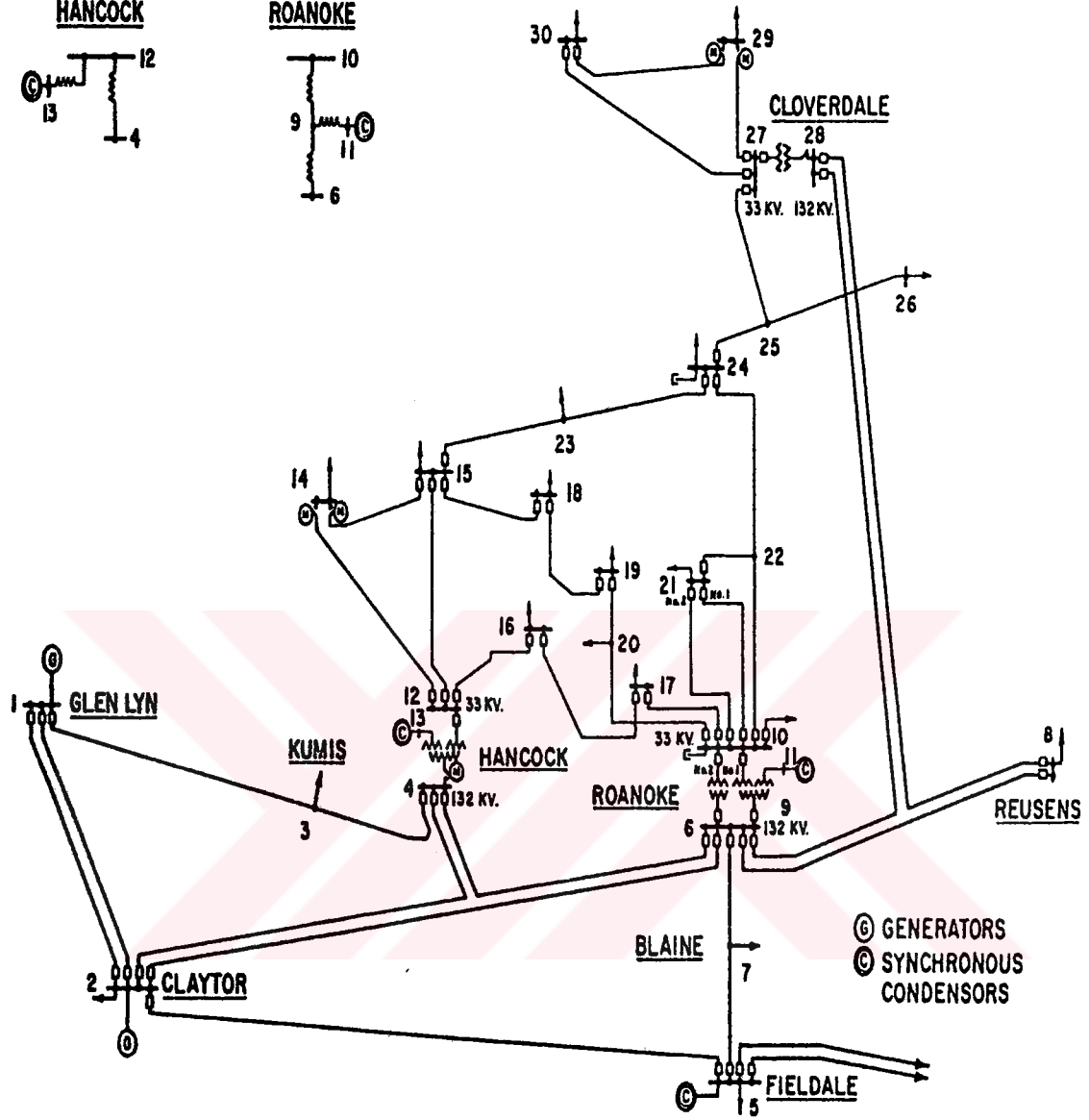
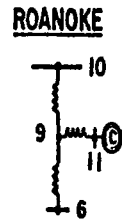
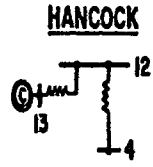
Yükleme <u>Durumu</u>	temel <u>durum</u>	basit <u>optim.</u>	TCSC'li <u>Optim.</u>	TCPAR'li <u>Optim.</u>	SVC'li <u>Optim.</u>
Tam yük	0.023	0.014	0.014	0.014	0.014
Hafif yük	0.041	0.018	0.017	0.018	0.016

Tablo 4.5'de gerilim profilindeki düzeltmeler gerilim genliğindeki standart sapmalarla karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Bu tablo açıkça göstermektedir ki, EGAT şebekesindeki optimizasyon sonuçları gerilim profili açısından, hafif yük durumları için oldukça uygundur [6].

**5. ÖRNEK BİR 30 BARALI SİSTEM ÜZERİNDE
FACTS KONTROLÖRLERİN YERLEŞİMİ
VE KAYIPLAR ÜZERİNE ETKİSİNİN İNCELENMESİ**



THREE WINDING TRANSFORMER EQUIVALENTS



Şekil 5.1: 30 baralı örnek sistemin tek hat şeması.

Yukarıda tek hat şeması verilen 30 baralı örnek sisteme ilişkin yük akışı bilgileri ve duyarlılık analizi sonuçları, MATLAB tabanında çalışan MATPOWER 2.0 (a matlab Power System Simulation Package) programında yapılan çalışmalar sonucunda elde edilmiştir [21].

İlerde verilen yük akışı tablosunun (runpf) daha iyi anlaşılmasında, aşağıda verilen sistem verileri tanımlamaları yardımcı olabilecektir.

30 Baralı Sistem Verileri :

Case30.m:

fonksiyon [baseMVA, bus, gen, branch, area, gencost] = case

% Bara verileri:

- % 1 bara numarası (1 to 29997)
- % 2 bara tipi
 - % PQ bara = 1
 - % PV bara = 2
 - % referans bara = 3
 - % izole bara = 4
- % 3 Pd, talep edilen aktif güç (MW)
- % 4 Qd, talep edilen reaktif güç (MVAR)
- % 5 Gs, şönt kondüktans (MW (talep edilen ?) at V = 1.0(p.u.)
- % 6 Bs, şönt suseptans (MVAR enjekte edilen ?)at V =1.0(p.u.)
- % 7 alan numarası , 1-100
- % 8 Vm, gerilim genliği (p.u.)
- % 9 Va, gerilim açısı (derece)
- % (-) (bara ismi)
- % 10 baseKV, baz gerilim (kV)
- % 11 bölge (1-999)
- % (+) 12 maxVm, maximum gerilim genliği (p.u.)
- % (+) 13 minVm, minimum gerilim genliği (p.u.)
- %

% Generatör Verileri:

- % 1 bara numarası
- % (-) (makina tanımlayıcısı, 0-9, A-Z)
- % 2 Pg, aktif güç çıkışı (MW)
- % 3 Qg, reaktif güç çıkışı (MVAR)
- % 4 Qmax, maksimum reaktif güç çıkışı (MVAR)
- % 5 Qmin, minimum reaktif güç çıkışı (MVAR)
- % 6 Vg, gerilim genliği (p.u.)
- % 7 mBase, makinanın toplam MVA bazı.
- % (-) (makina empedansı, p.u.)
- % (-) (step up transformatör empedansı, p.u.)
- % (-) (step up transformatör nominal dışı çevirme oranı)
- % 8 durum, 1 – makina devrede, 0 – makina servis dışı
- % 9 Pmax, maksimum aktif güç çıkışı (MW)
- % 10 Pmin, minimum aktif güç çıkışı (MW)
- %

% İletim hattı verileri:

- % 1 f, başlangıç bara numarası
- % 2 t, bitiş bara numarası

- % 3 r, rezistans (p.u.)
- % 4 x, reaktans (p.u.)
- % 5 b, toplam hat dolum suseptansı (p.u.)
- % 6 rateA, MVA rating A (hattın uzun süreli yüklenebilme kapasitesi)
- % 7 rateB, MVA rating B (hattın kısa süreli yüklenebilme kapasitesi)
- % 8 rateC, MVA rating C (acil yükleme kapasitesi)
- % 9 çevirme oranı, (= 0 hatlar için)
- % 10 transformatör faz kaydırma açısı (derece)
- % (-) (Gf, başlangıç barasından olan şönt kondüktans, p.u.)
- % (-) (Bf, başlangıç barasından olan şönt suseptans, p.u.)
- % (-) (Gt, bitiş barasından olan şönt kondüktans,p.u)
- % (-) (Bt, bitiş barasından olan şönt suseptans,p.u)
- % 11 başlangıç hat durumu, 1 – hat devrede, 0 – hat devre dışı
- %




```

%% generator data
gen = [
1 23.5400 0.0000 150.000 -20.0000 1.0000 100.0000 1 80.0000 0.0000;
2 60.9700 0.0000 60.0000 -20.0000 1.0000 100.0000 1 80.0000 0.0000;
22 21.5900 0.0000 62.5000 -15.0000 1.0000 100.0000 1 50.0000 0.0000;
27 26.9100 0.0000 48.7000 -15.0000 1.0000 100.0000 1 55.0000 0.0000;
23 19.2000 0.0000 40.0000 -10.0000 1.0000 100.0000 1 30.0000 0.0000;
13 37.0000 0.0000 44.7000 -15.0000 1.0000 100.0000 1 40.0000 0.0000;
];

%% branch data
branch = [
1 2 0.0200 0.0600 0.0300 130.0000 130.0000 130.0000 0.0000 0.0000 1;
1 3 0.0500 0.1900 0.0200 130.0000 130.0000 130.0000 0.0000 0.0000 1;
2 4 0.0600 0.1700 0.0200 65.0000 65.0000 65.0000 0.0000 0.0000 1;
3 4 0.0100 0.0400 0.0000 130.0000 130.0000 130.0000 0.0000 0.0000 1;
2 5 0.0500 0.2000 0.0200 130.0000 130.0000 130.0000 0.0000 0.0000 1;
2 6 0.0600 0.1800 0.0200 65.0000 65.0000 65.0000 0.0000 0.0000 1;
4 6 0.0100 0.0400 0.0000 90.0000 90.0000 90.0000 0.0000 0.0000 1;
5 7 0.0500 0.1200 0.0100 70.0000 70.0000 70.0000 0.0000 0.0000 1;
6 7 0.0300 0.0800 0.0100 130.0000 130.0000 130.0000 0.0000 0.0000 1;
6 8 0.0100 0.0400 0.0000 32.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
6 9 0.0000 0.2100 0.0000 65.0000 65.0000 65.0000 1.0000 0.0000 1;
6 10 0.0000 0.5600 0.0000 32.0000 32.0000 32.0000 1.0000 0.0000 1;
9 11 0.0000 0.2100 0.0000 65.0000 65.0000 65.0000 1.0000 0.0000 1;
9 10 0.0000 0.1100 0.0000 65.0000 65.0000 65.0000 1.0000 0.0000 1;
4 12 0.0000 0.2600 0.0000 65.0000 65.0000 65.0000 1.0000 0.0000 1;
12 13 0.0000 0.1400 0.0000 65.0000 65.0000 65.0000 1.0000 0.0000 1;
12 14 0.1200 0.2600 0.0000 32.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
12 15 0.0700 0.1300 0.0000 32.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
12 16 0.0900 0.2000 0.0000 32.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
14 15 0.2200 0.2000 0.0000 16.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
16 17 0.0800 0.1900 0.0000 16.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
15 18 0.1100 0.2200 0.0000 16.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
18 19 0.0600 0.1300 0.0000 16.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
19 20 0.0300 0.0700 0.0000 32.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
10 20 0.0900 0.2100 0.0000 32.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
];

```

```

10 17 0.0300 0.0800 0.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
10 21 0.0300 0.0700 0.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
10 22 0.0700 0.1500 0.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
21 22 0.0100 0.0200 0.0000 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
15 23 0.1000 0.2000 0.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
22 24 0.1200 0.1800 0.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
23 24 0.1300 0.2700 0.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
24 25 0.1900 0.3300 0.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
25 26 0.2500 0.3800 0.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
25 27 0.1100 0.2100 0.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
28 27 0.0000 0.4000 0.0000 65.0000 65.0000 1.0000 0.0000 1;
27 29 0.2200 0.4200 0.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
27 30 0.3200 0.6000 0.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
29 30 0.2400 0.4500 0.0000 16.0000 16.0000 0.0000 0.0000 1;
8 28 0.0600 0.2000 0.0200 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
6 28 0.0200 0.0600 0.0100 32.0000 32.0000 0.0000 0.0000 1;
];

%%----- OPF Data -----%%
%% area data
area = [
1 8;
2 23;
3 26;
];

%% generator cost data
gencost = [
2 0.00 0.00 3 0.02 2 0;
2 0.00 0.00 3 0.0175 1.75 0;
2 0.00 0.00 3 0.0625 1 0;
2 0.00 0.00 3 0.0083 3.25 0;
2 0.00 0.00 3 0.025 3 0;
2 0.00 0.00 3 0.025 3 0;
];

return;

```

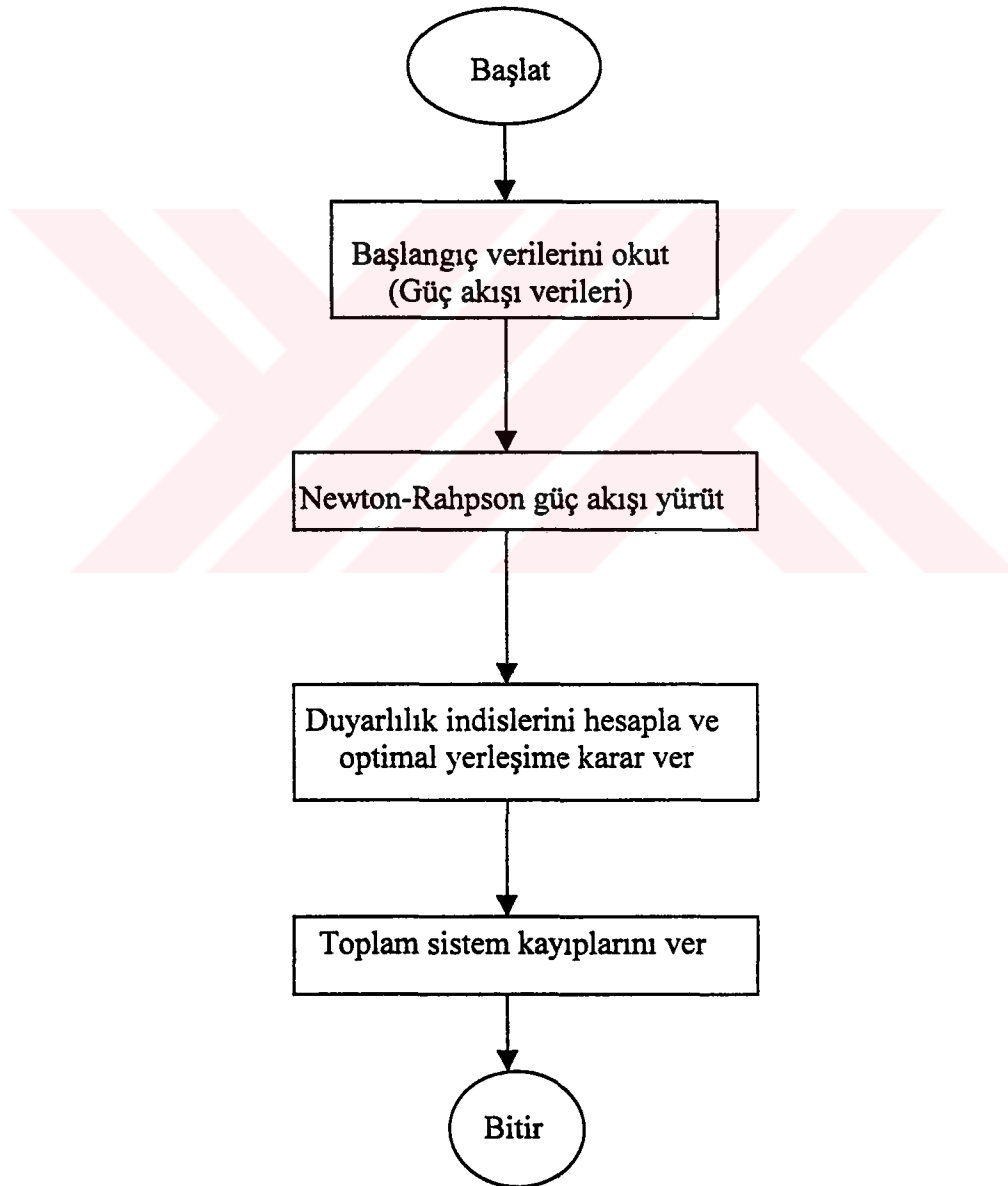
```

%% generator maliyet verileri:
genrcost = [
    2  0.00  0.00  3  0.02      2      0;
    2  0.00  0.00  3  0.0175   1.75   0;
    2  0.00  0.00  3  0.0625   1      0;
    2  0.00  0.00  3  0.0083   3.25   0;
    2  0.00  0.00  3  0.025    3      0;
    2  0.00  0.00  3  0.025    3      0;
];

return;

```

Optimal kayıp azaltımı için, yük akışı analizi yanında duyarlılık indisleri yönteminin de kullanıldığı basit bir akış diyagramı aşağıdaki gibi verilebilir.



Şekil 5.2: Kayıp azaltımı için basit program akış diyagramı.

Bunun yanında MATLAB programında yapılan duyarlılık indisi hesabının formülasyon kısmı ise aşağıdaki gibi verilebilir.

```
%-----
-duyarlılık endeksleri
%-----TSCS için
% Çıkarılan duyarlılık denklemleri kullanıldı.
dpx=zeros(nl,3);
dpdelta=zeros(nl,3);
for i=1:nl;
dpx(i,1)=(bus(branch(i,1),8)^2+bus(branch(i,2),8)^2-
2*bus(branch(i,1),8)*bus(branch(i,2),8)*cos((pi/180)*
(bus(branch(i,1),9)-bus(branch(i,2),9))))*
((2*rk(i)*xk(i))/(rk(i)^2+xk(i)^2)^2);
    dpdelt(i,2)=branch(i,1); dpdelt(i,3)=branch(i,2);
end

%-----TCPAR için
for i=1:nl;
    dpdelt(i,1)=2*gk(i)*bus(branch(i,1),8)*bus(branch(i,2),8)*
cos((pi/180)*(bus(branch(i,1),9)-bus(branch(i,2),9)));
    dpdelt(i,2)=branch(i,1); dpdelt(i,3)=branch(i,2);
end

%-----SVC için
Zbus=inv(Ybus);
Sbusyeni=makeSbus(baseMVA,bus,gen);
for i=1:nb;
    for j=1:nb;
        dpq(i)=2*((real(Zbus(i,j)))/(bus(i,8)*bus(j,8)))*
cos((pi/180)*(bus(i,9)-bus(j,9)))*imag(Sbusyeni(j))+ ...
+((real(Zbus(i,j)))/(bus(i,8)*bus(j,8))*sin((pi/180)*(bus(i,9)-
bus(j,9)))*real(Sbusyeni(j)));
    end
end
[plq,ipl]=sort(dpq);
plq,
ipl=ipl
%-----
```

Newton-Raphson yöntemiyle yük akışı yapan ve MATLAB ortamında çalışan MATPOWER 2.0 programı sayesinde bütün bu hesaplamaların bir algoritması yapılabilir [21].

YÜK AKIŞI VE DUYARLILIK ANALİZİ SONUÇLARI

runpf , senspf. (MATPOWER 2.0)

runpf (normal yük akışı sonuçları) :

| Sistem Özeti: |

=====

Adet		Miktar	P (MW)	Q (MVar)
Bara	30	Toplam üretim kap.	335.0	-95.0 to +405.9
Generatör	6	On-line kapasite	335.0	-95.0 to +405.9
İşler generatörler	6	üretim (mevcut)	191.6	100.4
Yükler	20	Yük	189.2	107.2
Hatlar	41	Kayıplar ($I^2 * Z$)	2.44	8.99
Transformatör	7	Hat şarjı (inj)	-	15.6
Alan	3	Şönt (inj)	0.0	0.2
Bağlantı hattı	7	Toplam bağlantı hattı	66.4	54.2

	Minimum	Maksimum
Gerilim genliği	0.961 p.u. @ bus 8	1.000 p.u. @ bara 1
Gerilim açısı	-3.96 deg @ bus 19	1.48 deg @ bara13
P kayıpları ($I^2 * R$)	-	0.29 MW @ hat 2-6
Q kayıpları ($I^2 * X$)	-	2.10 MVar @ hat 12-13

=====

senspf (duyarlılık indisi sonuçları) :

dpx =

0.0079	1.0000	2.0000
0.0125	1.0000	3.0000
0.0186	2.0000	4.0000
0.0086	3.0000	4.0000
0.0104	2.0000	5.0000
0.0289	2.0000	6.0000
0.0311	4.0000	6.0000
0.0171	5.0000	7.0000
0.0069	6.0000	7.0000
0.0603	6.0000	8.0000
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000

0	12.0000	13.0000
0.0023	12.0000	14.0000
0.0078	12.0000	15.0000
0.0066	12.0000	16.0000
0.0001	14.0000	15.0000
0.0027	16.0000	17.0000
0.0070	15.0000	18.0000
0.0028	18.0000	19.0000
0.0021	19.0000	20.0000
0.0042	10.0000	20.0000
0.0051	10.0000	17.0000
0.0105	10.0000	21.0000
0.0068	10.0000	22.0000
0.0745	21.0000	22.0000
0.0087	15.0000	23.0000
0.0060	22.0000	24.0000
0.0040	23.0000	24.0000
0.0016	24.0000	25.0000
0.0017	25.0000	26.0000
0.0047	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
0.0034	27.0000	29.0000
0.0044	27.0000	30.0000
0.0012	29.0000	30.0000
0.0033	8.0000	28.0000
0.0004	6.0000	28.0000

dpdelta =

9.9997	1.0000	2.0000
2.5461	1.0000	3.0000
3.6178	2.0000	4.0000
11.3360	3.0000	4.0000
2.3108	2.0000	5.0000
3.2423	2.0000	6.0000
11.2209	4.0000	6.0000
5.6228	5.0000	7.0000
7.7375	6.0000	7.0000
10.9980	6.0000	8.0000
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000
0	12.0000	13.0000
2.8168	12.0000	14.0000

6.2030	12.0000	15.0000
3.6038	12.0000	16.0000
4.7652	14.0000	15.0000
3.5942	16.0000	17.0000
3.4513	15.0000	18.0000
5.4719	18.0000	19.0000
9.6778	19.0000	20.0000
3.2897	10.0000	20.0000
7.9038	10.0000	17.0000
10.1161	10.0000	21.0000
5.0298	10.0000	22.0000
39.7353	21.0000	22.0000
3.9206	15.0000	23.0000
5.0691	22.0000	24.0000
2.8617	23.0000	24.0000
2.5650	24.0000	25.0000
2.3264	25.0000	26.0000
3.8758	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
1.9169	27.0000	29.0000
1.3386	27.0000	30.0000
1.7495	29.0000	30.0000
2.5770	8.0000	28.0000
9.4858	6.0000	28.0000

»
dpq =

Columns 1 through 7

0.0003 0.0003 0.0000 -0.0001 0.0002 -0.0002 -0.0000

Columns 8 through 14

-0.0003 0.0001 0.0002 0.0001 0.0003 0.0004 0.0003

Columns 15 through 21

0.0002 0.0003 0.0002 0.0002 0.0002 0.0002 0.0002

Columns 22 through 28

0.0002 -0.0001 -0.0004 -0.0018 -0.0017 -0.0026 -0.0008

Columns 29 through 30

-0.0063 **-0.0099**

Buna göre, aktif güce göre yapılan duyarlılık indisi sonucunda TCSC ve TCPAR için en uygun hat 21-22 olarak, SVC için ise en uygun bara 30. bara olarak bulunmuştur. Ayrıca, reaktif güce göre yapılan duyarlılık indisleri analizi sonucunda da TCSC ve TCPAR için en uygun hat: 21-22 elde edilmiştir.

Sistemde, değişik çalışma durumları (aşırı yük, hattın devre dışı kalması, vb.) için de yük akışı ve duyarlılık analizi sonuçlarını elde edip, bu sonuçlara göre FACTS cihazı yerleşimi yapıldığı takdirde elde edilen sonuçlar ise :

2-6 HATTININ ÇIKARILDIĞI DURUM:

runpf:

Sistem Özeti:				
=====				
=====				
Adet		Miktar	P (MW)	Q (MVar)

Bara	30	Toplam üretim kap.	335.0	-95.0 to +405.9
Generatör	6	On-line kapasite	335.0	-95.0 to +405.9
İşler generatörler	6	üretim (mevcut)	192.1	104.2
Yükler	20	Yük	189.2	107.2
Hatlar	40	Kayıplar ($I^2 * Z$)	2.86	10.67
Transformatör	7	Hat şarjı (inj)	-	13.5
Alan	3	Şönt (inj)	0.0	0.2
Bağlantı hattı	7	Toplam bağlantı hattı	62.6	68.9

		Minimum	Maksimum	
		-----	-----	
Gerilim genliği		0.951 p.u. @ bus 8	1.000 p.u. @ bara 1	
Gerilim açısı		-4.91 deg @ bus 19	0.62 deg @ bara 13	
P kayıpları ($I^2 * R$)		-	0.42 MW @ hat 2-4	
Q kayıpları ($I^2 * X$)		-	2.14 MVar @ hat 12-13	

senspf:

dpx =

0.0021	1.0000	2.0000
0.0235	1.0000	3.0000

0.0442	2.0000	4.0000
0.0178	3.0000	4.0000
0.0194	2.0000	5.0000
0	0	0
0.0768	4.0000	6.0000
0.0309	5.0000	7.0000
0.0019	6.0000	7.0000
0.0605	6.0000	8.0000
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000
0	12.0000	13.0000
0.0024	12.0000	14.0000
0.0086	12.0000	15.0000
0.0072	12.0000	16.0000
0.0002	14.0000	15.0000
0.0031	16.0000	17.0000
0.0074	15.0000	18.0000
0.0030	18.0000	19.0000
0.0020	19.0000	20.0000
0.0040	10.0000	20.0000
0.0051	10.0000	17.0000
0.0149	10.0000	21.0000
0.0088	10.0000	22.0000
0.0837	21.0000	22.0000
0.0091	15.0000	23.0000
0.0062	22.0000	24.0000
0.0042	23.0000	24.0000
0.0015	24.0000	25.0000
0.0017	25.0000	26.0000
0.0046	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
0.0034	27.0000	29.0000
0.0044	27.0000	30.0000
0.0012	29.0000	30.0000
0.0036	8.0000	28.0000
0.0010	6.0000	28.0000

Buna göre TCSC kontrolörü 21-22 hattına;

dpdelta =

9.9999	1.0000	2.0000
2.5306	1.0000	3.0000
3.5910	2.0000	4.0000

11.1931	3.0000	4.0000
2.3000	2.0000	5.0000
0	0	0
11.0347	4.0000	6.0000
5.5537	5.0000	7.0000
7.6020	6.0000	7.0000
10.7840	6.0000	8.0000
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000
0	12.0000	13.0000
2.8079	12.0000	14.0000
6.1843	12.0000	15.0000
3.5904	12.0000	16.0000
4.7522	14.0000	15.0000
3.5794	16.0000	17.0000
3.4410	15.0000	18.0000
5.4527	18.0000	19.0000
9.6413	19.0000	20.0000
3.2763	10.0000	20.0000
7.8701	10.0000	17.0000
10.0896	10.0000	21.0000
5.0190	10.0000	22.0000
39.7165	21.0000	22.0000
3.9156	15.0000	23.0000
5.0692	22.0000	24.0000
2.8618	23.0000	24.0000
2.5651	24.0000	25.0000
2.3264	25.0000	26.0000
3.8759	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
1.9169	27.0000	29.0000
1.3386	27.0000	30.0000
1.7495	29.0000	30.0000
2.5295	8.0000	28.0000
9.3118	6.0000	28.0000

»

TCPAR ise aynı şekilde 21-22 hattına yerleştirilmelidir.

dpq =

Columns 1 through 7

0.0004	0.0004	-0.0001	-0.0002	0.0003	-0.0004	-0.0001
--------	--------	---------	---------	--------	---------	---------

Columns 8 through 14

-0.0004 -0.0001 0.0001 -0.0001 0.0002 0.0003 0.0002

Columns 15 through 21

0.0001 0.0002 0.0001 0.0001 0.0001 0.0001 0.0001

Columns 22 through 28

0.0000 -0.0002 -0.0005 -0.0019 -0.0019 -0.0028 -0.0010

Columns 29 through 30

-0.0065 **-0.0100**

.Bu sonuçlara göre ise SVC için en uygun bara 30. baradır.

* Ayrıca, reaktif güce göre yapılan duyarlılık analizi sonuçlarında, TCSC için:12-13 hattı; TCPAR için:21-22 hattı ve SVC için : 30. bara en uygun yerleşim olarak belirlenmiştir.

6-8 Hattının Devre Dışı Olduğu Durum:

Sistem özeti:

=====

Adet	Miktar	P (MW)	Q (MVar)
Bara	30	Toplam üretim kap.	335.0 -95.0 to +405.9
Generatör	6	On-line kapasite	335.0 -95.0 to +405.9
İşler generatörler	6	Üretim (mevcut)	193.1 105.9
Yükler	20	Yük	189.2 107.2
Hatlar	40	Kayıplar($I^2 * Z$)	3.94 14.28
Transformatörler	7	Hat şarjı (inj)	- 15.3
Alan (bölge)	3	Şönt (inj)	0.0 0.2
Bağlantı hattı	7	Toplam bağlantı hattı	68.5 64.5

	Minimum	Maksimum
Gerilim genliği	0.864 p.u. @ bus 8	1.000 p.u. @ bus 1
Gerilim açısı	-5.94 deg @ bus 8	1.36 deg @ bus 13

P kayıpları ($I^2 \cdot R$)	-	1.41 MW @ line 8-28
Q kayıpları ($I^2 \cdot X$)	-	4.70 MVar @ line 8-28

=====

Duyarlılık indisi sonuçları (senspf):
dpx =

0.0094	1.0000	2.0000
0.0132	1.0000	3.0000
0.0193	2.0000	4.0000
0.0092	3.0000	4.0000
0.0107	2.0000	5.0000
0.0300	2.0000	6.0000
0.0324	4.0000	6.0000
0.0175	5.0000	7.0000
0.0066	6.0000	7.0000
0	0	0
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000
0	12.0000	13.0000
0.0024	12.0000	14.0000
0.0082	12.0000	15.0000
0.0067	12.0000	16.0000
0.0001	14.0000	15.0000
0.0028	16.0000	17.0000
0.0070	15.0000	18.0000
0.0028	18.0000	19.0000
0.0022	19.0000	20.0000
0.0042	10.0000	20.0000
0.0051	10.0000	17.0000
0.0107	10.0000	21.0000
0.0068	10.0000	22.0000
0.0740	21.0000	22.0000
0.0085	15.0000	23.0000
0.0054	22.0000	24.0000
0.0043	23.0000	24.0000
0.0010	24.0000	25.0000
0.0017	25.0000	26.0000
0.0039	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
0.0034	27.0000	29.0000
0.0044	27.0000	30.0000
0.0012	29.0000	30.0000
0.1294	8.0000	28.0000

0.0709 6.0000 28.0000

Buna göre TCSC kontrolörü 8-28 hattına yerleştirilmelidir.

dpdelta =

9.9997	1.0000	2.0000
2.5455	1.0000	3.0000
3.6168	2.0000	4.0000
11.3308	3.0000	4.0000
2.3105	2.0000	5.0000
3.2411	2.0000	6.0000
11.2145	4.0000	6.0000
5.6204	5.0000	7.0000
7.7329	6.0000	7.0000
0	0	0
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000
0	12.0000	13.0000
2.8170	12.0000	14.0000
6.2033	12.0000	15.0000
3.6040	12.0000	16.0000
4.7655	14.0000	15.0000
3.5943	16.0000	17.0000
3.4514	15.0000	18.0000
5.4721	18.0000	19.0000
9.6781	19.0000	20.0000
3.2898	10.0000	20.0000
7.9040	10.0000	17.0000
10.1163	10.0000	21.0000
5.0299	10.0000	22.0000
39.7355	21.0000	22.0000
3.9207	15.0000	23.0000
5.0692	22.0000	24.0000
2.8617	23.0000	24.0000
2.5651	24.0000	25.0000
2.3263	25.0000	26.0000
3.8759	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
1.9169	27.0000	29.0000
1.3386	27.0000	30.0000
1.7495	29.0000	30.0000
2.2661	8.0000	28.0000
9.2805	6.0000	28.0000

Buna göre TCPAR kontrolörü 21-22 hattına yerleştirilmelidir.

dpq =

Columns 1 through 7

0.0004 0.0003 0.0000 -0.0000 0.0003 -0.0002 0.0000

Columns 8 through 14

-0.0006 0.0001 0.0003 0.0001 0.0004 0.0005 0.0003

Columns 15 through 21

0.0002 0.0003 0.0003 0.0002 0.0002 0.0002 0.0002

Columns 22 through 28

0.0002 -0.0001 -0.0004 -0.0018 -0.0018 -0.0027 -0.0009

Columns 29 through 30

-0.0064 **-0.0100**

»

Bu sonuçlara göre de SVC kontrolörü en uygun 30. baraya yerleştirilebilir.

8-28 HATTININ ÇIKARILDIĞI DURUM

runpf:

Sistem Özeti:			
=====			
=====			
Adet		Miktar	P (MW) Q (MVar)

Bara	30	Toplam üretim kap.	335.0 -95.0 to +405.9
Generatör	6	On-line kapasite	335.0 -95.0 to +405.9
İşler generatörler	6	üretim (mevcut)	191.7 102.6
Yükler	20	Yük	189.2 107.2
Hatlar	40	Kayıplar ($I^2 * Z$)	2.53 9.27
Transformatör	7	Hat şarjı (inj)	- 13.7
Alan	3	Şönt (inj)	0.0 0.2
Bağlantı hattı	7	Toplam bağlantı hattı	65.8 54.6

	Minimum	Maksimum
Gerilim genliği	0.956 p.u. @ bus 8	1.000 p.u. @ bara 1
Gerilim açısı	-3.93 deg @ bus 19	1.50 deg @ bara13
P kayıpları ($I^2 \cdot R$)	-	0.30 MW @ hat 2-6
Q kayıpları ($I^2 \cdot X$)	-	2.10 MVar @ hat 12-13

Senspf (duyarlılık indisi sonuçları):
dpx =

0.0080	1.0000	2.0000
0.0127	1.0000	3.0000
0.0191	2.0000	4.0000
0.0088	3.0000	4.0000
0.0106	2.0000	5.0000
0.0298	2.0000	6.0000
0.0326	4.0000	6.0000
0.0175	5.0000	7.0000
0.0067	6.0000	7.0000
0.0927	6.0000	8.0000
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000
0	12.0000	13.0000
0.0023	12.0000	14.0000
0.0078	12.0000	15.0000
0.0066	12.0000	16.0000
0.0001	14.0000	15.0000
0.0027	16.0000	17.0000
0.0070	15.0000	18.0000
0.0028	18.0000	19.0000
0.0021	19.0000	20.0000
0.0042	10.0000	20.0000
0.0051	10.0000	17.0000
0.0111	10.0000	21.0000
0.0071	10.0000	22.0000
0.0758	21.0000	22.0000
0.0089	15.0000	23.0000
0.0062	22.0000	24.0000
0.0039	23.0000	24.0000
0.0017	24.0000	25.0000

0.0017	25.0000	26.0000
0.0049	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
0.0034	27.0000	29.0000
0.0044	27.0000	30.0000
0.0012	29.0000	30.0000
0	0	0
0.0045	6.0000	28.0000

dpdelta =

9.9997	1.0000	2.0000
2.5442	1.0000	3.0000
3.6145	2.0000	4.0000
11.3175	3.0000	4.0000
2.3092	2.0000	5.0000
3.2378	2.0000	6.0000
11.1955	4.0000	6.0000
5.6127	5.0000	7.0000
7.7182	6.0000	7.0000
10.9313	6.0000	8.0000
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000
0	12.0000	13.0000
2.8153	12.0000	14.0000
6.2001	12.0000	15.0000
3.6017	12.0000	16.0000
4.7631	14.0000	15.0000
3.5920	16.0000	17.0000
3.4498	15.0000	18.0000
5.4692	18.0000	19.0000
9.6726	19.0000	20.0000
3.2878	10.0000	20.0000
7.8990	10.0000	17.0000
10.1123	10.0000	21.0000
5.0283	10.0000	22.0000
39.7326	21.0000	22.0000
3.9198	15.0000	23.0000
5.0691	22.0000	24.0000
2.8618	23.0000	24.0000
2.5650	24.0000	25.0000
2.3264	25.0000	26.0000

3.8758	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
1.9169	27.0000	29.0000
1.3386	27.0000	30.0000
1.7495	29.0000	30.0000
0	0	0
9.4929	6.0000	28.0000

dpq =

Columns 1 through 7

0.0003	0.0002	-0.0001	-0.0002	0.0002	-0.0004	-0.0001
--------	--------	---------	---------	--------	---------	---------

Columns 8 through 14

-0.0003	-0.0000	0.0001	-0.0000	0.0002	0.0003	0.0002
---------	---------	--------	---------	--------	--------	--------

Columns 15 through 21

0.0001	0.0002	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001	0.0001
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 22 through 28

0.0000	-0.0002	-0.0005	-0.0020	-0.0020	-0.0030	-0.0011
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Columns 29 through 30

-0.0066	-0.0102
---------	----------------

*Ayrıca, SVC için elde edilen duyarlılık indisi sonuçlarından, en uygun bara: 30.bara olarak bulunmuştur. Reaktif güce göre yapılan duyarlılık indisi analizine göre ise, TCSC için: 6-8 hattı, TCPAR için: 21-22 hattı en uygun yerleşim yerleri olarak hesaplanmıştır.

%50 Aşırı Yükleme Durumu:

Sistem özeti

=====

Adet	Miktar	P (MW)	Q (MVar)
Bara	30	Toplam üretim kap.	335.0
Generatör	6	On-line kapasite	335.0
İşler generatör	6	Üretim (mevcut)	293.1
Yükler	20	Yük	283.8
Hatlar	41	Kayıplar ($I^2 \cdot Z$)	9.35
Transformatör	7	Hat şarjı (inj)	-
Alan	3	Şönt (inj)	0.0
Bağlantı hattı	7	Toplam bağlantı hattı	160.2

	Minimum	Maksimum
Gerilim genliği	0.929 p.u. @ bus 8	1.000 p.u. @ bus 1
Gerilim açısı	-12.69 deg @ bus 19	0.00 deg @ bus 1
P kayıpları ($I^2 \cdot R$)	-	1.39 MW @ line 1-2
Q kayıpları ($I^2 \cdot X$)	-	4.43 MVar @ line 1-3

Duyarlılık indisleri sonuçları:

dpx =

0.4173	1.0000	2.0000
0.1149	1.0000	3.0000
0.0879	2.0000	4.0000
0.0933	3.0000	4.0000
0.0392	2.0000	5.0000
0.1316	2.0000	6.0000
0.1272	4.0000	6.0000
0.0615	5.0000	7.0000
0.0078	6.0000	7.0000
0.1568	6.0000	8.0000
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000
0	12.0000	13.0000
0.0063	12.0000	14.0000
0.0284	12.0000	15.0000
0.0115	12.0000	16.0000

0.0004	14.0000	15.0000
0.0040	16.0000	17.0000
0.0120	15.0000	18.0000
0.0038	18.0000	19.0000
0.0066	19.0000	20.0000
0.0123	10.0000	20.0000
0.0128	10.0000	17.0000
0.0358	10.0000	21.0000
0.0178	10.0000	22.0000
0.1523	21.0000	22.0000
0.0155	15.0000	23.0000
0.0084	22.0000	24.0000
0.0048	23.0000	24.0000
0.0032	24.0000	25.0000
0.0040	25.0000	26.0000
0.0103	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
0.0078	27.0000	29.0000
0.0104	27.0000	30.0000
0.0028	29.0000	30.0000
0.0060	8.0000	28.0000
0.0078	6.0000	28.0000

dpdelta =

9.9861	1.0000	2.0000
2.4909	1.0000	3.0000
3.5395	2.0000	4.0000
10.9023	3.0000	4.0000
2.2726	2.0000	5.0000
3.1544	2.0000	6.0000
10.7168	4.0000	6.0000
5.3828	5.0000	7.0000
7.3400	6.0000	7.0000
10.3718	6.0000	8.0000
0	6.0000	9.0000
0	6.0000	10.0000
0	9.0000	11.0000
0	9.0000	10.0000
0	4.0000	12.0000
0	12.0000	13.0000
2.7543	12.0000	14.0000
6.0746	12.0000	15.0000
3.5264	12.0000	16.0000
4.6488	14.0000	15.0000
3.5074	16.0000	17.0000

3.3521	15.0000	18.0000
5.2763	18.0000	19.0000
9.3401	19.0000	20.0000
3.2110	10.0000	20.0000
7.7517	10.0000	17.0000
10.0080	10.0000	21.0000
4.9918	10.0000	22.0000
39.6099	21.0000	22.0000
3.8758	15.0000	23.0000
5.0362	22.0000	24.0000
2.8432	23.0000	24.0000
2.5340	24.0000	25.0000
2.2782	25.0000	26.0000
3.8542	25.0000	27.0000
0	28.0000	27.0000
1.8945	27.0000	29.0000
1.3132	27.0000	30.0000
1.6981	29.0000	30.0000
2.4292	8.0000	28.0000
9.0148	6.0000	28.0000

dpq =

Columns 1 through 7

0.0008	0.0006	0.0000	-0.0002	0.0005	-0.0005	-0.0000
--------	--------	--------	---------	--------	---------	---------

Columns 8 through 14

-0.0006	0.0001	0.0004	0.0001	0.0006	0.0007	0.0005
---------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 15 through 21

0.0003	0.0005	0.0004	0.0003	0.0003	0.0003	0.0003
--------	--------	--------	--------	--------	--------	--------

Columns 22 through 28

0.0003	-0.0001	-0.0006	-0.0029	-0.0028	-0.0043	-0.0017
--------	---------	---------	---------	---------	---------	---------

Columns 29 through 30

-0.0102	-0.0154
---------	----------------

»

Toplam yükün %50 arttırıldığı durumda, optimum FACTS cihazı yerleştirme sonuçları ise, yapılan yük akışı analizi sonucunda,

$P_T = 9.347$ MW (toplam aktif güç kaybı),

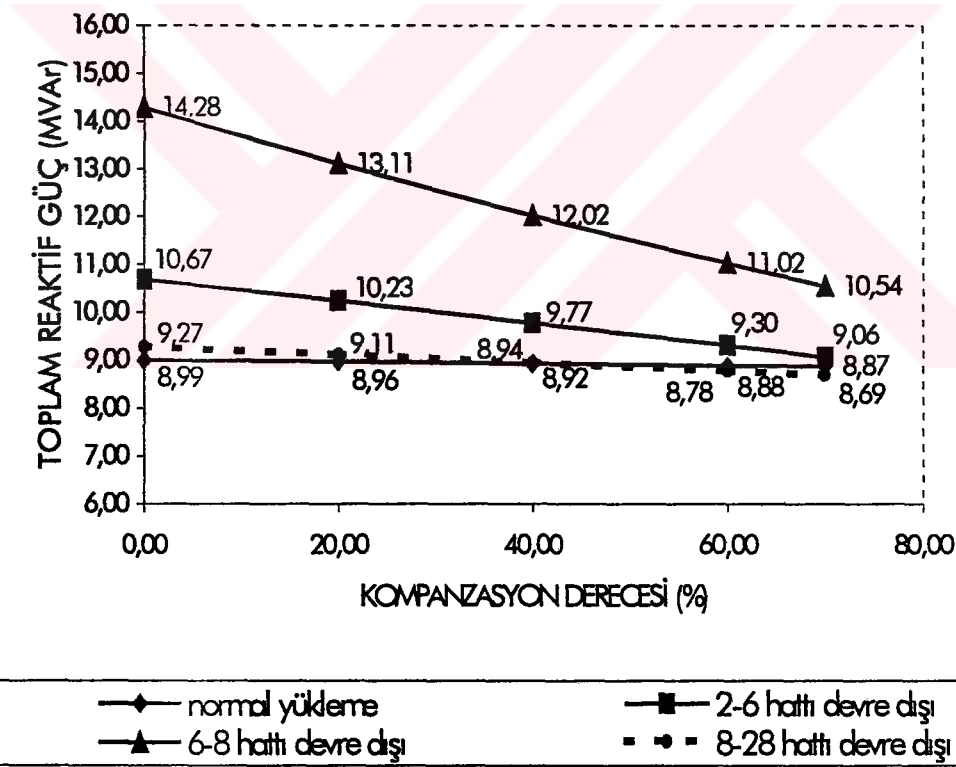
$Q_T = 33.74$ MVar (toplam reaktif güç kaybı) olarak bulunmuştur.

%50 aşırı yüklenme halinde yapılan duyarlılık indisleri analizi sonucu:

TCSC için en uygun 1-2 hattı, TCPAR için en uygun 21-22 hattı, SVC için ise en uygun 30. Bara elde edilmiştir.

Elde edilen bu duyarlılık indisi sonuçlarına göre yapılan optimum FACTS cihazı yerleştirmeleri ve kompanzasyon uygulamalarından elde edilen bazı sonuçlar aşağıda grafiksel olarak verilmeye çalışılmıştır.

TCSC KULLANIMIYLA TOPLAM REAKTİF GÜÇ DEĞİŞİMİ

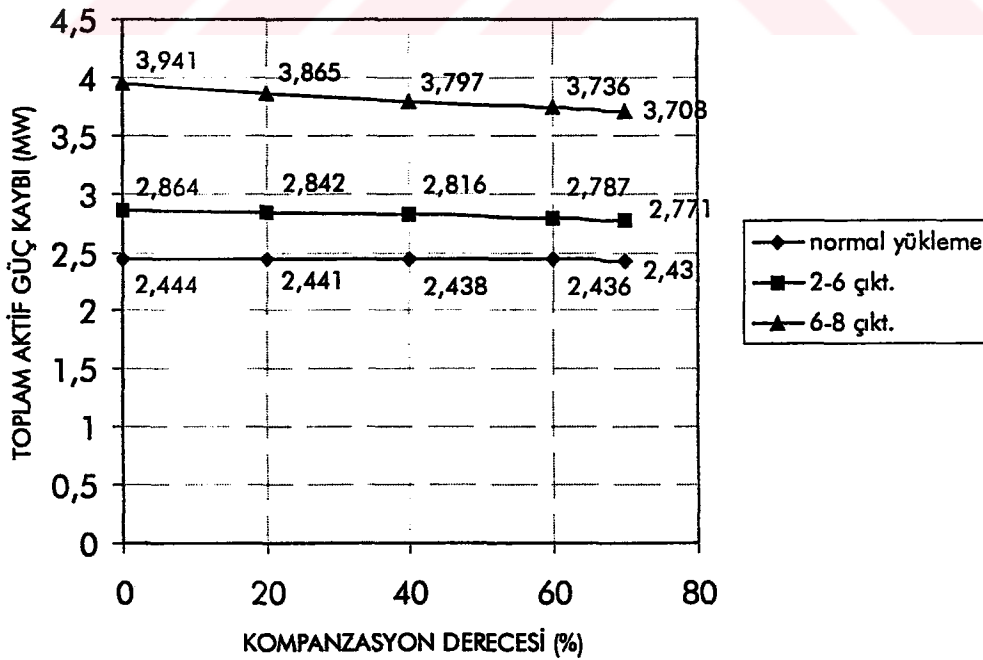


Şekil 5.3 : TCSC kullanımının toplam reaktif güç değişimine etkisi

Yukarıdaki grafikte, TCSC kullanarak yapılan kompanzasyonun , toplam reaktif güç kaybı üzerindeki azaltıcı etkisi görülmektedir. Bu etki çeşitli yükleme durumlarına göre incelenmiştir. Normal yükleme durumlarında alınan sonuçlara göre; reaktif güç

kayıp kompanzasyonsuz durumdaki değeri olan 8,99 MVar' dan , 20-40-60-70 yüzdeli kompanzasyon kademeleriyle 8,87 MVar' a kadar düşürülebilmektedir (~ 1,5% azalma). Bunun dışında, değişik N-1 durumları da incelenmiştir. Buna göre, 2-6 hattı devre dışı iken yapılan TCSC yerleşimi sonucunda alınan verilere göre reaktif güç kaybı, aynı kompanzasyon kademelerinde 10,67 MVar' dan 9,06 MVar' a düşürülebilmektedir(~ 18% azalma). Bir başka durum olan 6-8 hattının devre dışı olması halinde kullanılan TCSC, reaktif kaybı 14,28 MVar değerinden 10,54 MVar değerine düşürülebilmektedir(~ %35 azalma). 8-28 hattının devre dışı kalması durumunda ise reaktif güç kaybı kompanzasyonsuz değeri olan 9,27 MVar' dan 8,69 MVar' a düşmüştür(~ %7 azalma). Seçilen bu N-1 durumları yüksek kayıplı durumlardır. Yani en yüksek kayıp değerlerine ulaşılan N-1 durumları örnek alınmıştır ve bu durumlara göre kayıp azaltımı yapılmaya çalışılmıştır. Grafik 5.3' de de %50 aşırı yüklenme halinde TCSC ve SVC' nin toplam aktif güç kaybı üzerindeki etkisi gösterilmiştir.

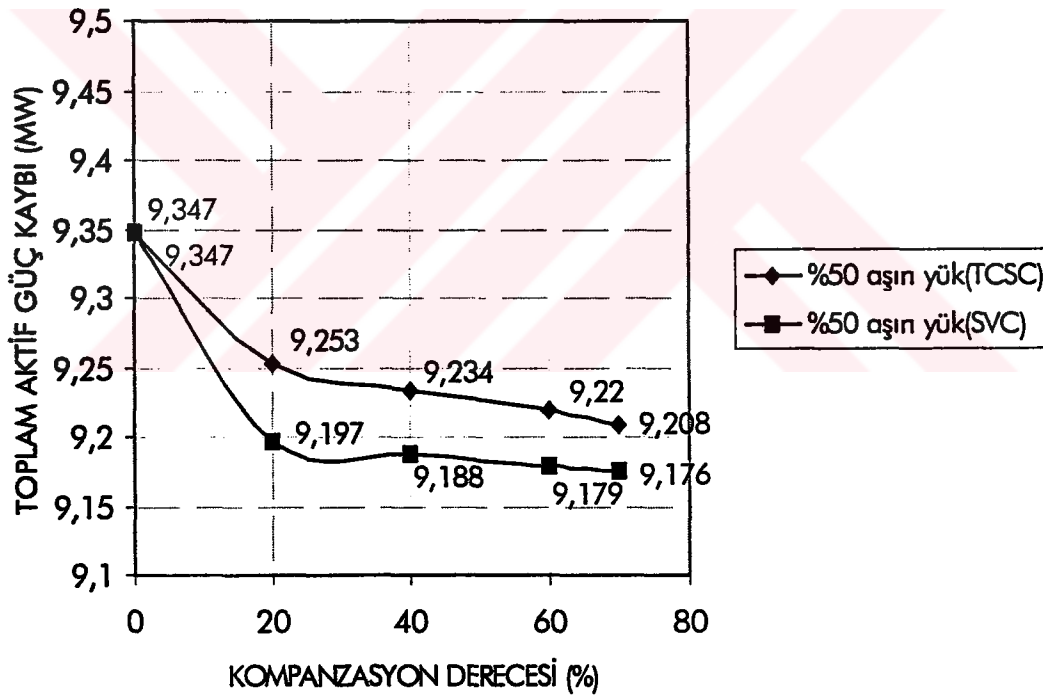
TCSC KULLANIMIYLA AKTİF GÜÇ KAYBI DEĞİŞİMİ



Şekil 5.4 : TCSC kullanımının aktif güç kaybı üzerine etkisi.

Yukarıdaki grafikte, TCSC cihazının optimal yerleşimi ve bu yerleşime göre yapılan kompanzasyon sonucu elde edilen toplam aktif güç kaybındaki değişim görülmektedir. Aynı şekilde, normal yükleme ve değişik N-1 durumlarındaki aktif güç kaybı değişimleri verilmektedir. Normal yükleme durumunda aktif güç kaybı 2,444 MW değerinden 2,43 MW değerine kadar düşmektedir. 2-6 hattının devre dışı olduğu durumda yapılan seri kompanzasyonla ,aktif güç kaybı 2,864 MW değerinden 2,771 MW değerine kadar düşmektedir(~ 3,4% azalma). 6-8 hattının devre dışı olması durumunda ise toplam aktif güç kaybı 3,941 MW değerinden 3,708 MW değerine düşürülebilmıştır (~6,3% azalma).

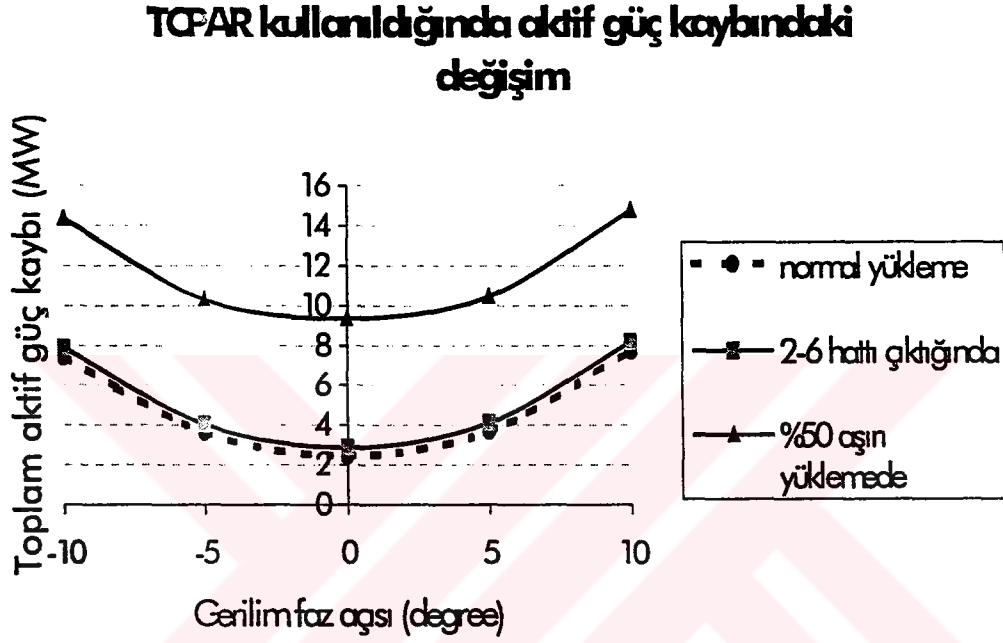
%50 AŞIRI YÜKLEME HALİNDE FACTS ETKİSİ



Şekil 5.5 : %50 aşırı yükleme halinde FACTS kontrolörlerin etkisi.

Yukarıdaki grafikte ise, %50 aşırı yükleme halinde TCSC ve SVC kullanımının toplam aktif güç kaybı üzerine etkisi gösterilmiştir. Buna göre TCSC, aktif kaybı

9,347 MW değerinden 9,208 MW değerine kadar düşürebilmektedir ($\sim 1,5\%$). SVC ise toplam aktif güç kaybını 9,347 MW değerinden 9,176 MW' a kadar düşürmektedir ($\sim 2\%$ azalma). Ayrıca TCSC , $\%50$ aşırı yüklenme durumunda toplam reaktif güç kaybını ise kompanzasyonsuz değeri olan 33,74 MVar değerinden 32,7 MVar' a kadar düşürebilmiştir ($\sim 3,2\%$ azalma).



Şekil 5.6 : TCPAR kullanıldığında aktif güç kaybındaki değişim.

Aynı şekilde, farklı yükleme koşulları dikkate alınarak yapılan TCPAR kontrolörlü kayıp azaltım çalışmalarında, toplam kayıplarda azalma yerine artmalar elde edilmiştir. Öyle ki aynı ayrı incelenen farklı yükleme koşullarında yapılan çalışmalar sonucunda, aktif ve reaktif güç kaybı değerlerinde büyük oranlarda artmalar elde edilmiştir. Denemeler, faz açısı değeri olarak -10° ile $+10^\circ$ arasında kademe kademe yapılmıştır. Grafik 5.4' de de görüldüğü gibi, toplam aktif güç kaybı normal yükleme koşullarındaki 2,444 MW değerinden, -10° faz açısında 7,426 MW, -5° de 3,607 MW, 5° de 3,692 MW ve de 10° de ise 7,712 MW değerine yükselmiştir. Alınan sonuçlardan hareketle TCPAR cihazının bu gibi şebekelerde kayıp minimizasyonu

yerine gerilim kararlılığı ve faz açısı ayarı için kullanımının daha etkin ve faydalı olacağı söylenebilir.

SVC kontrolör kullanılarak yapılan çalışmalarda aktif güç kaybı değişimi diğer kontrolörlerin etkisine nazaran daha düşük yüzdeli elde edilmiştir. Öyle ki, normal yük koşullarında toplam aktif güç kaybı 2,444 MW iken, SVC kullanımı sonucunda 2,43 MW' a kadar düşebilmiştir. 2-6 hattının devre dışı olması durumunda aktif güç kaybı 2,864 MW değerinden 2,853 MW' a; 8-28 hattı devre dışı iken 2,528 MW değerinden 2,517 MW' a düşürülebilmektedir.

SVC kontrolörün toplam aktif güç kaybı üzerindeki azaltım etkisi düşük olmakla birlikte, bara gerilim genliğinin artırılması ve gerilim kararlılığının sağlanması üzerindeki etkisi daha belirgin ve etkin olmaktadır. Örneğin, normal yük koşullarında 30. bara gerilim genliği p.u olarak 0,968' den 0,973 değerine yükseltilebilmiştir.

6. SONUÇLAR VE YORUMLAR

Elde edilen sonuçlara göre seri kompanzatör, aşırı yüklenme koşulları için aktif kayıp güç minimizasyonunda, normal yükleme durumuna göre daha etkili olabilmekte ve kayıp minimizasyonu yapabilmektedir (örnek uygulamada %2 oranında).

Şebeke üzerinde herhangi bir hattın devreden çıkması ve dolayısıyla dengesiz yük dağılımı durumunda ise, sistem üzerinde uygun yere yerleştirilecek olan TCSC, sistem kayıplarının minimizasyonunda çok daha etkili olabilmektedir. (Örnekte, 2-6 hattının devreden çıktığı durumda: yaklaşık %18; 28-27 hattı devre dışı iken : yaklaşık %20 oranında reaktif güç kaybı minimizasyonu sağlanmaktadır. Bkz:Grafik 5.1).

Ayrıca sonuçlar göstermiştir ki, reaktif güce göre alınan duyarlılık indisleri ile yer belirleme yöntemi sonucunda seri kompanzatör, kayıp minimizasyonunda daha etkili olabilmektedir. Özellikle reaktif güç minimizasyonu konusunda bu etki daha belirgindir.

Statik VAR kompanzatörün (SVC), toplam kayıp gücü minimizasyonu yanında gerilim genliği ve salınımların iyileştirilmesi konusunda da etkili olduğu alınan yük akışı sonuçlarından görülmektedir. (Normal yük koşullarında 30. Baranın gerilim genliği, 0.968 p.u değerinden 0.975 p.u değerine yükseltilebilmektedir).

Tristör kontrollü faz kaydırıcı (TCPAR) ise alınan sonuçlara göre, sistem geriliminin kararlılığını arttırmakta ve faz açısı kontrolünü sağlamakla birlikte toplam kayıp değeri üzerinde arttırıcı etki yapabilmektedir.

Bu duruma göre yapılan yük akışı ve duyarlılık analizi sonucunda, sistem daha iyi etüd edilebilmekte ve de sisteme müdahale daha etkin ve kolay olabilmektedir. FACTS teknolojisi sayesinde şebekenin esnek ve doğru kontrolü sağlanabilmektedir. Oluşabilecek arızaların ve aşırı yüklenmelerin önüne geçilebilmekte ve oluşabilecek maliyet zararı minimize edilebilmektedir.

Çok yeni bir uygulama olan FACTS teknolojisinin enerji iletim sistemlerinde uygulamalarının artmasıyla , enerji iletimi daha kaliteli ve etkin gerçekleştirilecek ve enerjinin kontrolü daha kolaylaşabilecektir.



KAYNAKLAR

- [1] Öztürk, İ., O., 1998. Statik VAR kompanzatörü ile Reaktif Güç Kontrolü ve Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü FBE, İstanbul.
- [2] Kundur, P. , 1994. Power System Stability and Control, EPRI Power System Engineering Series, Mc Graw Hill.
- [3] Gyugyi, L. , 1995. Solid –State Control of AC Transmission , Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh, Pennsylvania 15235.
- [4] Narain Hingorani, Laslo Gyugyi Understanding FACTS : Concepts and Technology of Flexible AC Transmission Systems. Chapter 1.
- [5] Yong Hua Song, Allan T. Johns. Flexible AC Transmission Systems (FACTS). IEE Power and Energy Series, 30.
- [6] Preecha Preedavichit, S.C. Srivastava. Optimal Reaktif Power Dispatch Considering FACTS devices. Electric Power System research 46 (1998), 251-257.
- [7] Hingorani, N.G., 1991. Flexible AC Transmission System , The Second Annual Transmission and Wheeling Conference, Denver.
- [8] Watanabe, H.,E., and Barbosa , G., Principles of Operation of FACTS Devices, Electrical Engineering Department, Coppe-Federal University of Rio De Janerio.
- [9] Hingorani, N.,G , 1993, Flexible AC Transmission , IEEE Reprinted from IEEE Spectrum , Volume 30, Number 4.
- [10] Gotham , D. ,J., and Heydt, G. T. ,FACTS Device Models for Power Flow Studies. Purdue University,W. Lafayette.
- [11] Halvarsson, P. 1995, Flexible AC Transmission Systems Using Thyristor Controlled Series Capacitors, ABB Power Systems , Sweden.
- [12] Torgerson, D.,R., 1995, Thyristor Controlled Series Capacitor Application, CİGRE&IEEE , Rio De Janerio , Brazil.
- [13] Watanabe, H.,E., and Barbosa , G., November 6-9 ,1995 Principle of Operation of FACTS Devices, IEEE Cıgre Brazil Work Shop on FACTS 38/14.

- [14] Gyugyi, L. , 1989. Solid –State Control of AC Transmission , Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh, Pennsylvania 15235.
- [15] H. Dağ, M. Bağrıyanık, , “ Determination of Location of Series Compansation Devices in Electric Power Systems”. YTÜ Dergisi, 2002-2 Sayısı, Syf: 52.
- [16] Walid Hubbi, Takashi Hiyama, “Optimal Placements of Phase Shifters to Minimize Power System Losses”. Electric Machines and Power Systems. 26:69-76, 1998.
- [17] Faur, T.Z ,Canizares,A.C , October 1995, Effects of FACTS devices on System Loadability.27. North American Power Symposium. Montana.
- [18] N.G . Hingorani, Flexible AC transmission, IEEE Spectrum, April (1993) 40-45.
- [19] E. Handschin. D. Westermann, J. Handke and B. Wiesmann, Coupled active and reactive optimization using FACTS equipment, Proceedings of the 12th Power Systems Computational Conference (PSCC), Dresden, Germany, 19-23 August 1996, 981-987.
- [20] D.J. Gotham, G.T. Heydt, Power flow control and power flow studies for systems with FACTS devices, IEEE Trans. PWRS 13 (1) (1998) 60-65.
- [21] Ray Zimmerman, David Gan, Matpower 2.0 December 24, 1997 Power Systems Engineering Research Center (PSERC).

ÖZGEÇMİŞ

Tuncay Tozar, 22. 05. 1974 tarihinde Sivas'da doğdu. İlk, orta ve lise öğrenimini sırasıyla: Danişmend İlkokulu, Dörteylül Ortaokulu ve Sivas Lisesi'nde tamamladıktan sonra, 1992 yılında İ.T.Ü Elektrik Mühendisliği bölümünü kazandı. Bu bölümü 1997 de bitirdi ve 1998 de de Elektrik Mühendisliği Programı'nda yüksek lisans yapmaya hak kazandı. Halen ALSTOM Elektrik Endüstrisi A.Ş.'de Elektrik Mühendisi olarak görev yapmaktadır.

