

**TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPAZASYON VE
TÜRKİYE ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNE
UYGULANMASI**

100576

YÜKSEK LİSANS TEZİ
Müh. Aysu ÖZYÜREK
496Y341

100576

Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 31 Mayıs 1999
Tezin Savunulduğu Tarih : 16 Haziran 1999

Tez Danışmanı : Doç.Dr. Hasan DAĞ

Diğer Jüri Üyeleri Prof.Dr. Adnan KAYPMAZ

Prof.Dr. Salman KURTULAN

Hasan Dağ

Adnan Kaypmaz 16.07.1999

Salman Kurtulan

16.07.1999

HAZİRAN 1999

ÖNSÖZ

Yüksek lisans tezi çalışmasında, Türkiye enerji iletim sistemine güç akışı uygulayıp, seri kompanzasyon yoluyla iletilebilir güç kapasitesinin artırılması üzerinde araştırmalar yapılmıştır.

Bu tez sırasında bana yol gösteren başta sayın hocam Doç. Dr. Hasan Dağ olmak üzere, Türkiye sistemi ile ilgili verileri elde etmemiz için bize yardımcı olan sayın hocam Prof. Dr. Adnan Kaypmaz'a, tezin büyük aşamasında beraber çalıştığımız arkadaşım Mühendis Banu Öztürk'e, bana manevi destek veren arkadaşım Mühendis Ayşe Ayter'e ve çalışmalarımda büyük yardımları olan aileme teşekkür ederim.

Mayıs 1999

AYSU ÖZYÜREK

İÇİNDEKİLER

TABLO LİSTESİ.....	iv
ŞEKİL LİSTESİ.....	v
SEMBOL LİSTESİ.....	vi
ÖZET.....	vii
SUMMARY.....	viii
1. GİRİŞ	1
2. GÜÇ AKIŞ ANALİZİ.....	7
2.1. Pflow Güç Akış Programı.....	16
3. TEMEL KOMPAZASYON KAVRAMLARI.....	20
3.1. Kompanze Edilmemiş Enerji İletim Sistemi.....	20
3.2. İdeal Seri Kompanzasyon	23
3.3. İdeal Şönt Kompanzasyon.....	27
3.4. Faz Açısı Kontrolü	29
4. KONTROL EDİLEBİLİR ALTERNATİF AKIM SİSTEMİ CİHAZLARI..	30
4.1. FACTS Cihazlarının Sınıflandırılması	32
4.2. Tristör Kontrollü Seri Kapasitörler	35
4.3. TCSC Uygulamaları	39
4.3.1. Gerilim Kararsızlığı.....	39
4.3.2 .Küçük Frekanslı Salınımlar	39
4.3.3. Güç Salınım Söndürülmesi.....	40
4.4.4. Güç Akışı Kontrolü	41
5. TÜRKİYE ENERJİ İLETİM SİSTEMİNE GÜÇ AKIŞI UYGULANMASI	42

6. KONTROLLÜ SERİ KAPASİTÖR YERLEŞTİRİLMİŞ TÜRKiYE	
İLETİM SİSTEMİ DEĞERLERİ.....	45
7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA.....	49
KAYNAKLAR.....	51
EKLER.....	54
ÖZGEÇMİŞ.....	67
*EKLER DİSKET İÇERMEKTEDİR	



TABLO LİSTESİ

Sayfa No

Tablo 2.1 : Bara tipleri	10
Tablo 3.1 : Seri kompanzasyon kullanım amacı [8]	23
Tablo 3.2 : Şönt kompanzasyonun amacı [8].....	27
Tablo 4.1 : FACTS cihazlarının kontrol ettikleri parametreler [11]	35
Tablo 4.2 : FACTS işletme fonksiyonları [8].....	35
Tablo 5.1: Sol özvektöre ait maksimum değerler	44
Tablo 6.1 : Seri kompanzasyon uygulaması1	46
Tablo 6.2: Seri kompanzasyon uygulaması2.....	46
Tablo 6.3 : Seri kompanzasyon uygulaması3	46
Tablo 6.4: Seri kompanzasyon uygulaması4.....	47
Tablo 6.5: Seri kompanzasyon uygulaması5	47
Tablo 6.6: Sol özvektöre ilişkin değerler (kompanzasyonlu durum).....	47
Tablo 6.7: Çift TCSC kullanılmış seri kompanzasyon.....	47
Tablo A.1 : Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü	54
Tablo A.2 : Türkiyenin enerji ihtiyacını karşılayan kuruluşlar (1997)	55
Tablo A.3: Türkiye kurulu gücünün 1990-1997 yılları arasındaki gelişimi.....	55
Tablo A.4 : 1996-1997 puant yüklerinin karşılaştırılması.....	56

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 2.1 5 Baralı örnek sistem [5].....	8
Şekil 3.1 Kısa iletim hatlı 2 İdeal makine sistemi [2]	21
Şekil 3.2 V_S , V_R , V_M ve I arasındaki fazör diagramı [2]	22
Şekil 3.3 Güç iletim karakteristiği.....	23
Şekil 3.4 Seri kapasitif kompanzasyonlu güç sistemi.....	24
Şekil 3.5 Gerilim ve akım arasındaki fazör diagramı.....	25
Şekil 3.6 İletim karakteristiği.....	26
Şekil 3.7 İdeal orta nokta kompanzatörlü basit makine güç sistemi	27
Şekil 3.8 Güç iletim karakteristiği [2]	28
Şekil 3.9 Faz değıştiricili güç sistem modeli [2]	29
Şekil 3.10 Gerilim ve akımlar arasındaki fazör diagramı.....	29
Şekil 4.1 SVC prensip şeması.....	33
Şekil 4.2 Bir TCSC düzeneği [14]	38
Şekil 4.3 İdealize edilmiş iletim sistemi [14]	39

SEMBOL LİSTESİ

- S : Kompleks generatör gücü
 P : Aktif güç
 Q : Reaktif güç
 V_i : Bara kompleks gerilimi.
 I_i : Bara kompleks akımı
 V_R : Alıcı uç gerilimi
 V_S : Verici uç gerilimi
 δ : V_S ile V_R arasındaki faz açısı
 Y_{bara} : Bara admitans matrisi
 g : Kondüktans
 b : Süseptans
 X_L : Hat empedansı
 s : Seri kompanzasyon derecesi

TRİSTÖR KONTROLLÜ SERİ KOMPAZASYON VE TÜRKİYE ENERJİ İLETİM SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

ÖZET

Enerji iletim sistemlerinin elektrik gücü iletim kapasitesinin arttırılabilmesi için seri kompanzasyon yapılması gerekmektedir. Tezde, Türkiye iletim sistemine *Pflow*¹ güç akış programı kullanarak güç akış analizi uygulanmıştır. Elde edilen sonuçlara göre kullanılabilir iletim kapasitesinin arttırılıp arttırmamayacağını incelemek için çalışmalar yapılmıştır. Seri kompanzasyon uygulanacak hatları belirlemek için *Pflow* güç akış programında kullanılan *direkt metot*²'dan yararlanılmıştır. Seri kompanzasyon için tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC²) kullanılmıştır

Yapılan güç akış analizi sonucunda Türkiye sisteminin yüklenme kapasitesinin çok düşük olduğu gözlenmiştir. Bu sonuçlar göz önüne alınarak seri kompanzasyon uygulanacak hatlar belirlenmiştir. Fakat bu hatlarda uygulanan seri kompanzasyon sistemin yüklenme faktörünü çok az miktarda arttırmıştır. Elde edilen sonuçlara göre değerlendirmeler yapılmıştır.

¹ 1996 yılında Kanada Waterloo Üniversitesinden Claudio A.Canizares, Zeno T. Faur ve Amerika Wisconsin-Madison Üniversitesinden Fernando L. Alvarado tarafından hazırlanmış bir güç akış programı.

² Thyristor Controlled Series Capacitor

THYRISTOR CONTROLLED SERIES COMPENSATION AND ITS APPLICATION TO THE TURKISH POWER TRANSMISSION SYSTEM

SUMMARY

In order to increase the capacity of electrical power transmission, it is needed to implement series compensation. In this thesis power flow analysis is applied to electric power system to Türkiye. A study is conducted to see whether the transmission capacity can be increased according to the results. To determine the lines which series compensation will be implemented, we get the advantage of the *direct method* which is used at the *Pflow* program. For series compensation TCSC is used.

At the end of the conducted power flow analysis, it is observed that the loading factor of the Turkish system is too small. By taking these results in consideration the lines which series compensation to be implemented is determined. But this implemented series compensation on the lines, increased the loading factor at a very low rate. Evaluations are made according to the results.

1. GİRİŞ

Elektrik gücü iletimi, modern güç sisteminin temel bir parçası haline gelmiştir. Teknoloji geliştikçe dağıtık iletim noktaları ve üretim merkezleri yüksek gerilim iletim hatlarıyla birleştirilmiştir. Bu, çok miktardaki gücün uzun mesafelere aktarılmasına olanak vermektedir. Güç, üretim birimlerinden tüketicilere havai hatlar ve kablolar aracılığıyla iletilir. Havai hatlar uzun mesafeler için açık alanlar ve kırsal bölgelerde kullanılırken, kablolar yerleşim bölgelerinde ve su altı geçitlerinde yeraltı iletimi amacıyla kullanılır. Kablolar havai hatlardan 10-15 kat daha pahalı olup sadece havai hatların kullanılmayacağı özel durumlarda kısa mesafelerde kullanılır [1].

Bir enerji iletim hattı dört parametre ile karakterize edilir. Bunlar; seri direnç R , fazlar ve toprak arasındaki kaçak akımlardan oluşan şönt kondüktans G , iletkenleri çevreleyen magnetik alandan kaynaklanan seri indüktans L ve hatların toprağa karşı olan şönt kapasitesi C dir. Şönt kondüktans G 'nin güç iletim hatlarına etkisi küçüktür ve genellikle ihmal edilir [1].

Enerji iletim ve dağıtım hatları birim uzunluk başına seri indüktans ve şönt kapasiteleri ile karakterize edilirler. Bu nedenle güç ve güç faktöründeki değişimler, iletim hattı boyunca gerilim profilinde değişikliklere yol açar ve alıcı ucun geriliminin genliğinde büyük değişikliklere neden olur. Son yıllarda çevre ve maliyet problemleri, üretim merkezleri ve üretim hatlarının yapımını geciktirmiştir. Bu, enerji iletim sistemi uygulamalarında değişimi gerektirmiştir. Varolan güç sistemlerinin daha iyi kullanımını etkili hale getirmiştir [2].

Enterkonnekte şebekeler güç üretim kapasitesinden daha iyi yararlanmayı sağlar ve enerji iletim hatlarının hızlı reaktif kompanzasyonu ve kararlılık limitlerini belirgin bir şekilde artırır. Böylece iletilebilir güç de artar. Enterkonnekte şebekeler, geniş güç

transferlerini kolaylaştırarak, elektrik santralleri kurulması ihtiyacını en aza indirir ve komşu kullanıcıların ve bölgelerin güç alışverişi yapmalarına imkan verir [1].

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

- faz gerilimi ve akımlarının dengeli olması,
- güç faktörünün 1'e yakın olması,
- geriliminin ve frekansının sabitliği,
- sürekli elektrik gücü verebilmesi,
- harmonik miktarının belirli sınırlar arasında kalması,

ile tanımlanabilir [3].

Reaktif güç kompanzasyon cihazları kullanılarak bu kalite elde edilebilir. Generatörleri bütün yük merkezlerinin yakınına yerleştirmek mümkün olmadığından, reaktif kompanzasyon metotları, şebeke geriliminin kontrolü ve güç iletim kapasitesinin artırılması için tasarlanmıştır. Bu metotlar, şebeke gerilimi ve aktif güç akışının, reaktif güçteki değişikliklere karşı duyarlı olması nedeniyle etkili bulunmaktadır [3].

Senkron motorlar, küçük senkron kompanzatörler ve iletim sistemlerinde büyük senkron kompanzatörler gibi dinamik elemanlar, 1940'lı yıllardan itibaren kullanılmaya başlanmıştır. Yüksek gerilim hatlarının kurulmasıyla, seri kapasiteler ve şönt reaktörler önemli kompanzasyon cihazları olmuşlardır [3].

Enerji iletim hatlarını; generatörler, iletim ve dağıtım hatları ve yükler oluştururlar. Generatörler, dönen senkron makinelerdir. İletim ve dağıtım hatları temel olarak şönt kapasiteleri ve seri endüktansları ile karakterize edilen dağılmış parametrelili reaktif şebeke ağlarıdır [1].

Alternatif akım güç iletimi iki temel şarta dayanmaktadır.

1. Generatörler senkronize kalmalı,
2. Gerilim düzeyleri belirli sınırlar içinde kalmalıdır [4].

İletim şebekesindeki enerji ihtiyacı son yıllarda artmıştır ve giderek de artmaktadır. Sistemin, aktif ve reaktif güçte sürekli olarak ortaya çıkacak güç değişimlerini karşılaması gerekmektedir ve bu değişiklikleri karşılarken, elektrik gücünü minimum maliyet ve minimum ekolojik etki yaparak sağlaması istenir. Bu gücün kalitesinin de frekansın sabitliği, gerilimin sabitliği ve yeterli düzeyde 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 frekans ve güç alışverişi sağlanır [1].

İletim kontrol düzenleri; statik var kompanzatörleri (SVC¹), STATCON², anahtarlı kapasitörler, reaktörler, kademeli transformatörler, faz kaydırıcılı transformatörler ve yüksek gerilim doğru akım iletim kontrol cihazlarını (HVDC³) içerirler [1].

Bir iletim hattındaki güç akışı; hat empedansı, alıcı ve verici uçlarındaki gerilimlerin arasındaki faz açısı ve bu gerilimlerin genliğinin fonksiyonudur. Şimdiye kadar, elektrik güç iletim sistemleri, bu üç kritik parametrenin genelde dinamik sistem şartlarını yeteri kadar hızlı idare edecek şekilde kontrol edilmediği anlayışında düzenlenmişlerdir [2].

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 [2].

Son 20 yılda, yarı iletken teknolojisi elemanlarında ve elektronik kontrol tekniklerinde önemli gelişmeler yapılmıştır. Güç elektroniği teknolojisi tristör kontrollü statik var kompanzatörlerinin ve TCSC kullanımını arttırarak 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 arttırılmasını sağlarlar [2].

¹ Static Var Compensator

² Static Condenser

³ High Voltage Direct Current

Enerji iletim sistemi kararlılığı, güç sisteminin normal çalışma koşulları altında dengeli çalışmasını, bir hataya maruz kalma durumunda kabul edilebilir bir denge durumuna yeniden kavuşmasını sağlayan özellik olarak tanımlanır. Yük talebindeki artış veya gerilimdeki sürekli ve kontrol edilemeyen düşme durumunda sistem kararsız gerilim durumuna girebilir. Kararsızlığa sebep olan ana faktör, güç sisteminin reaktif güç talebini karşılamada yetersiz kalışıdır [1].

Enerji iletim sistemlerinin etkin ve güvenilir çalışabilmesi için sistemdeki bütün cihazların uçlarındaki gerilimin belli sınırlar dahilinde kalması gerekir. Üretim birimleri generatör uçlarında belirlenmiş gerilim seviyesini korumak için uyarma alanını kontrol eden otomatik gerilim regülatörlerinden faydalanır. Diğer cihazlar ise sistemin tümünde yer alır [1].

Bu cihazlar;

- a) şönt kapasitörler,
şönt reaktörler,
senkron kondenserler,
SVC'ler,
- b) seri kapasitörler gibi hat reaktansı kompanzatörleri,
- c) kademe değiştirici transformatörler gibi regülasyon transformatörleridir [1].

Şönt kapasitörler ve reaktörler ile seri kapasitörler pasif kompanzasyon sağlar. Bunlar gerilim kontrolüne şebeke karakteristiklerini düzelterek katkıda bulunurlar. Senkron kondenserler ve statik gerilim kontrolörleri aktif kompanzasyon sağlarlar. Bunlar tarafından reaktif güç çekilmesi ya da verilmesi bağlı oldukları baraların gerilimlerini koruyacak şekilde otomatik olarak ayarlanır. Şönt kapasitörler, reaktif güç verirler ve bölgesel olarak gerilimi düzeltirler [1].

Şönt reaktörler, açık devrede ya da hafif yükte doğan gerilimi sınırlandırmak için hat kapasitesinin etkilerini kompanse etmede kullanılır. Reaktörler, anahtarlama sırasında oluşacak olan aşırı gerilimleri sınırlayacaklardır [1].

Seri kapasitörler hattın endüktif reaktansını kontrol etmek için hatlara seri olarak bağlanır. Bu baralar arasındaki dönüşüm transfer reaktansını azaltır ve iletilen maksimum gücü artırır. Aynı zamanda etkin reaktif güç kaybı XI^2 'yi azaltır. Seri

kapasitörler çoğunlukla gerilim kontrolü için tesis edilmedikleri halde, reaktif güç dengesini ve gerilim kontrolünü düzeltmek için de kullanılırlar [1].

Senkron kondenserler tahrik makinası ve mekanik yükü olmayan senkron makinalardır. Uyarma akımını kontrol ederek reaktif akım çekecek ya da üretecek şekilde yapılabilirler. Gerilim regülatörü ile reaktif güç çıkışını uç gerilimi sabit olacak şekilde ayarlayabilirler. Bunlar çoğunlukla transformatörlerin üçgen sargılarına bağlanırlar. Bunlar aktif kompanzatör kategorisindedirler. Yüksek maliyetlerinden ötürü statik var kompanzatörleri ile yer değiştirmişlerdir. Bunların statik kompanzatörlerden pekçok üstünlükleri vardır. Sistemin kısa devre kapasitesine katkıda bulunurlar. Reaktif güç üretimleri sistem geriliminden etkilenmez. Senkron kondenserler sürekli nominal değerinin 2 katı kadar büyük güçte reaktif güç verebilirler [1].

Reaktif güç aynı zamanda iletim kaybını da artırır. Hat değişikliklerinden, arızalardan, yük ve diğer olumsuzluklardan kaynaklanan gerilim farklılıkları ve reaktif güçteki hızlı değişiklikler güç sistemindeki gerçek güç talebini ani olarak değiştirebilir. Aktif güç talebindeki ani değişiklikler, bir kısım güç üreticilerinin sürekli hal senkronize hızlarının artmasına bir kısmının ise azalmasına yol açar. Bu da geçici frekans ve güç salınımlarına veya ekstrem durumlarda senkronizmanın tamamen kaybına hatta güç sisteminde çözülmeye neden olabilir [1].

Enerji iletim sistemlerinde kontrollü güç alışverişi ancak bütün generatörler birbirleriyle uyum içinde çalışırlarsa mümkün olabilir. Senkronizmanın sürdürülmesi veya tekrar kazanılması kararlılık terimi ile ifade edilmektedir Verici ve alıcı uçlar arasındaki iletim hattı boyunca iletilen güç reaktif hat empedansı ile belirlenir. Hattan akan aktif güç hat empedansı ile ters orantılıdır, alıcı ve verici uçlar arasındaki açı ile kontrol edilir. Bir devre tarafından iletebilecek gücün maksimum değeri, gerilimin sabit tutulduğu noktalar arasındaki empedans ne kadar küçükse o kadar yüksek olur. İletilebilen güçte uyulması zorunlu sınırların bulunması, şebekelerin işlemesi üzerinde çok büyük tepkiler oluşturur [2].

Bu tezde, Türkiye enerji iletim sisteminin iletim kapasitesinin arttırılabilmesi için seri kompanzasyon uygulanması amaçlanmıştır.

İkinci bölümde güç akışı ve güçlerin belirlenmesi için yapılan yöntemler anlatılmış ve tezde kullanılan ve Türkiye ulusal enerji iletim sistemine uygulanan *Pflow* güç akışı programı tanıtılmıştır.

Üçüncü bölümde kompanzasyon kavramından bahsedilmiş ve temel seri ve şönt kompanzasyon kavramları üzerinde durulmuştur. Seri ve şönt kompanzasyonun iletim sistemleri üzerindeki etkileri incelenmiştir.

Dördüncü bölümde kontrol edilebilir alternatif akım sistemi (FACTS¹) cihazları hakkında genel olarak bilgi verilmiştir. Enerji iletim sistemlerinde iletim kapasitesinin artırılması için uygulanan seri kompanzasyon aracı tristör kontrollü seri kapasitör (TCSC²) detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Beşinci bölümde, Türkiye iletim sistemine ait IEEE³ formatındaki bilgiler *Pflow* güç akış programı ile çözülerek, sonuçları verilmiştir. Bu programda uygulanan direkt metod ile sol özvektör bulunur ve sol özvektörden yararlanarak iletim sisteminde zayıf olan baralar belirlenir. Zayıf olan baralar iletim kapasitesinin artırılması için seri kompanzasyon uygulanacak hatları belirleyen baralardır.

Altıncı bölümde *Pflow* programı sonucunda belirlenen baralara ve değerlere göre iletim kapasitesini arttırmak için kullanılacak olan TCSC'nin *Pflow* güç akış programı kullanarak sisteme uygulanması ve sistemin yüklenebilirliğine etkileri üzerinde incelenmiştir.

¹ Flexible Alternative Current Transmission Systems

² Thyristor Controlled Series Capacitor

³ The Institute of Electrical and Electronics Engineers

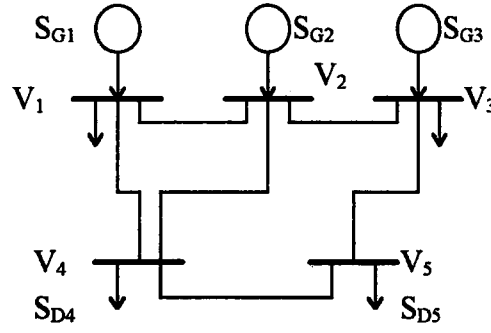
2. GÜÇ AKIŞ ANALİZİ

Güç akışı, enerji iletim sisteminde her bir baranın geriliminin genliğini ve faz açısını belirlemek amacıyla yapılır. Mevcut sistemin işleminde durum kestirimi, ekonomik analiz ve gerilim kararlılığı açısından bilgileri belirlemede kullanılır. Güç akışı, gelecekte sistemde oluşabilecek gelişmeleri planlamak için gereklidir. Sistemin işleminde eksiklik varsa o zaman eksiklikleri giderme yolunu açar.

Güç akışı analizi yaparken sistemin dengeli, sürekli rejim koşulları altında olduğu kabul edilir. Sistemin dengeli olması eşdeğer tek faz uygulamasına izin verir. Güç akışı analizi sonucunda, bütün bara gerilimlerinin belirli sınırlar içinde kalıp kalmadığı, reaktif güç akışının uygun sınırlar içinde olup olmadığı, sistem üzerinde ne kadar güç kaybı olduğu belirlenir. Güç akışının amacı planlamayı sağlamaktır. Tüketiciye, üretici ne ölçüde cevap verebiliyor, yük dağılımı nasıl ve ne şekilde gerçekleştiriliyor sorularına cevap verir [5,6].

Güç akışı yaparken bara admitans matrisini oluşturmak için düğüm gerilimleri yöntemi kullanılmaktadır. Sistemi düğüm sayılarına göre tanımlamak daha kolay olduğundan bu yöntem tercih edilmektedir. Ayrıca paralel kollar, denklem sayısını arttırmadan gözönüne alınmaktadır.

Güç akışı analizinde, iletim sistemi, iletim hatlarıyla bağlanmış baralar ve düğümler grubu olarak modellenir. İletim sisteminde çeşitli düğümlere bağlı generatörler ve yükler iletim sistemine güç verir ve iletim sisteminden güç çekerler. Bu model iletim sisteminin sürekli hal gücü ve gerilimlerini çözmek için uygundur [5].



Şekil 2.1 5 Baralı örnek sistem [5]

Örnek olarak verilen sistemde transformatörler, generatör, yük ve iletim hattı modelinin içinde gösterilmiştir. Şekilde S_{Gi} sisteme verilen generatör kompleks güçlerini, S_{Di} yükleri ve V_i 'lerde bara kompleks gerilimlerini göstermektedir.

Bara gücü S_i ; $S_i = S_{Gi} - S_{Di}$ ile ifade edilmektedir.

Bara akımı I_i ; $I_i = I_{Gi} - I_{Di}$ şeklinde belirtilmiştir.

O halde i . baranın kompleks gücü,

$$S_i = \sum_{k=1}^n S_{ik} \quad (2.1)$$

şeklinde ifade edilir. Bu durumda i . baraya bağlı bütün hatlarda S_{ik} lar toplanır.

Aynı şekilde i . baranın akımı denklem (2.2)'de belirtilmiştir.

$$I_i = \sum_{k=1}^n I_{ik} \quad (2.2)$$

Her bir iletim hattı, tek faz eşdeğer devre olarak yerleştirilir. Böylece bütün bara akımları I_i 'lerle bara gerilimleri V_i 'ler arasında bağlantı kurulur [5].

$$V = \begin{bmatrix} V_i \\ \vdots \\ V_n \end{bmatrix} \quad (2.3)$$

$$I = \begin{bmatrix} I_i \\ \vdots \\ I_n \end{bmatrix} \quad (2.4)$$

olmak üzere

$$I = Y_{bara} V \quad (2.5)$$

şeklinde ifade edilir. Burada Y_{bara} bara admitans matrisidir. Bara admitans matrisi;

- simetriktir,
- y_{ii} : II eşdeğer devresinde i . baraya bağlı admitansların toplamıdır. Köşegen üzerindeki elemanları göstermektedir.
- y_{ik} : Y_{bara} 'nın ik . elemanı, II eşdeğer devresinde i . ve k . düğümlere bağlı admitansların ters işaretlisini gösterir.

Aşağıda belirtilen

$$S_i = V_i I_i^* \quad (2.6)$$

i . baraya ait güç ifadesinde, (2.5) ifadesi yerleştirilip tekrar düzenlendiğinde

$$S_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (\cos \delta_{ik} + j \sin \delta_{ik}) (g_{ik} - jb_{ik}) \quad (2.7)$$

elde edilir [5]. Burada S_i , kompleks gücün belirli bir değerini belirtmektedir. Sırasıyla g_{ik} ve b_{ik} , y_{ik} 'nın reel ve imajiner kısmı olup kondüktans ve süseptans adlarını alırlar. Gerilim için kutupsal gösterim, admitans için kartezyen gösterim kullanılmıştır.

Bara tipleri 3 bölümde açıklanabilir.

1. **Serbest Bara:** Referans veya salınım barası olarak da bilinir. Bu bara hiçbir zorlanma olmayan generatör barasıdır. Gerilimi sabit ve 1 p.u (per-unit) kabul edilir. Gerilimin faz açısı da sıfırdır.
2. **Üretim (Generatör) Barası:** Bu barada aktif güç ve bara geriliminin genliği bellidir. Üretim baraları, gerilim kontrol barası ($P, |V_i|$) olarak da ifade edilebilirler.
3. **Yük barası:** Üretim yapılmayan baralardır. Aktif ve reaktif (P, Q) yükler bilinmektedir. En yaygın bara tipidir [5].

Baralara ait bilinen ve bilinmeyen değerler aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 2.1 : Bara tipleri

Bara Tipi	Bilinenler	Bilinmeyenler
Serbest Bara	Gerilimin genliği $ V_i =1$, faz açısı $\delta_i=0$	Aktif güç Reaktif güç
Üretim Barası	Gerilimin genliği $ V_i $, P_{gi} üretilen aktif güç	Faz açısı Reaktif güç
Yük Barası	Tüketilen aktif ve reaktif güç	Gerilimin genliği, Faz açısı

Güç akışı problemini çözmek, iterasyon teknikleri kullanmayı gerektirir. Genel olarak Gauss-Seidel ve Newton-Raphson metotları kullanılmaktadır. Tezde incelenen güç akışı programında Newton-Raphson metodu kullanıldığından bu metoda ait eşitlikleri kısaca gözden geçirelim.

Fonksiyon $f(x)$ ve x , $n \times 1$ boyutunda vektörler ve $f'(x)$, $n \times n$ matris olmak üzere

$$f(x) = 0 \quad (2.8)$$

denklemleri ifade edilmektedir. Fonksiyon $f(x)$ lineer olmayan bir denklem takımıdır. Bu fonksiyon Taylor serisine açılıp 2.terimden sonrası ihmal edilerek

$$f(x) = f(x^m) + \frac{df(x^m)}{dx}(x - x^m) \quad (2.9)$$

elde edilir. Denklem (2.9)'un sol tarafı $f(x)=0$ olduğundan

$$f(x^m) = 0 - \frac{df(x^m)}{dx}(x - x^m) \quad (2.10)$$

$$(x - x^m) = - \frac{f(x^m)}{\frac{df(x^m)}{dx}} \quad (2.11)$$

ifadeleri elde edilir. Denklem (2.11)'nin sol tarafındaki ifade $x - x^m = \Delta x$ olarak kabul edilirse

$$\Delta x = - \frac{f(x^m)}{\frac{df(x^m)}{dx}} \quad (2.12)$$

yazılabilir [6].

Fark vektörünü oluşturan Δx ;

$$\Delta x = \begin{bmatrix} \Delta x_1 \\ \vdots \\ \Delta x_n \end{bmatrix} \quad (2.13)$$

şeklindedir.

Jakobiye matris $J(x)$, $f(x)$ fonksiyonlarının x değişkenlerine göre türevlerinin oluşturduğu matrisdir ve Jacobian matrisi olarak adlandırılır.

$$J(x) = \begin{bmatrix} \frac{\partial f_1}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_1}{\partial x_n} \\ \vdots & \ddots & \vdots \\ \frac{\partial f_n}{\partial x_1} & \cdots & \frac{\partial f_n}{\partial x_n} \end{bmatrix} \quad (2.14)$$

Bu matrisin fark vektörüyle çarpımı sonucu,

$$J^v \Delta x^v = -f(x^v) \quad (2.15)$$

eşitliği elde edilir.

Newton-Raphson metodu x^0 başlangıç değerinden başlar, her seferinde Δx kadar arttırılarak $f(x)=0$ değerini sağlayan x değerleri elde edilene kadar sürer. Bir sonraki iterasyon değeri $x^{m+1}=x^m+\Delta x$ şeklinde hesaplanır.

Newton Raphson yöntemi güç akışı problemine uygulandığında $S_i(x)-S_i = 0$ denkleminin reel ve imajiner kısımları $f(x)$ 'i oluşturmaktadır. Denklem (2.7) 'de belirtilen aktif ve reaktif güçler ayrıldığında

$$P_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [g_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + b_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] \quad (2.16)$$

$$Q_i = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [g_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - b_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)] \quad (2.17)$$

elde edilmiş olur [5]. Eşitliklerin sol tarafındaki P_i ve Q_i değerleri bellidir. Sağ taraftaki fonksiyonlar $|V_i|$ ve δ_i değişkenlerine bağlıdır. Aşağıda belirtilen

$$\delta = \begin{bmatrix} \delta_2 \\ \cdot \\ \cdot \\ \delta_n \end{bmatrix} \quad (2.18)$$

$$|V| = \begin{bmatrix} |V_2| \\ \cdot \\ \cdot \\ |V_n| \end{bmatrix} \quad (2.19)$$

açı ve gerilimin genliği Newton Raphson yönteminde kullandığımız değişken

$$x = \begin{bmatrix} \delta \\ |V| \end{bmatrix} \quad (2.20)$$

vektörünü oluşturur. Aşağıdaki $S_i(x)$, $|V_i|$ ve δ_i 'ye bağlı olarak fonksiyon belirtmektedir

$$S_i(x) = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| (\cos \delta_{ik} + \sin \delta_{ik}) (g_{ik} - b_{ik}) \quad (2.21)$$

Denklem (2.16) ve denklem (2.17) 'in sağ tarafları $P_i(x)$ ve $Q_i(x)$ olmak üzere

$$P_i(x) = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [g_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k) + b_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k)] \quad (2.22)$$

$$Q_i(x) = \sum_{k=1}^n |V_i| |V_k| [g_{ik} \sin(\delta_i - \delta_k) - b_{ik} \cos(\delta_i - \delta_k)] \quad (2.23)$$

sağ taraftaki ifade sol tarafa geçirildiğinde

$$P_i(x) - P_i = 0 \quad (2.24)$$

$$Q_i(x) - Q_i = 0 \quad (2.25)$$

farkları Newton Raphson metodundaki $f(x)$ fonksiyonunu oluşturur. Bu $f(x)$ ifadesinin

$$f(x) = \begin{bmatrix} P_2(x) - P_2 \\ \vdots \\ P_n(x) - P_n \\ Q_2(x) - Q_2 \\ \vdots \\ Q_n(x) - Q_n \end{bmatrix} \quad (2.26)$$

şeklinde olması gerekir.

$$J = \begin{bmatrix} \frac{\partial P_i(x)}{\partial \delta_k} & \frac{\partial P_i(x)}{\partial |V_k|} \\ \frac{\partial Q_i(x)}{\partial \delta_k} & \frac{\partial Q_i(x)}{\partial |V_k|} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \quad (2.27)$$

Newton Raphson metodunda kullandığımız denklemler güç akışı analizi ifadelerine uygulandığında ve elde edilen denklemler genelleştirildiğinde

$$J^v \Delta x^v = f(x^v) \quad (2.28)$$

$$\Delta P(x) = \begin{bmatrix} P_2 - P_2(x) \\ \vdots \\ P_n - P_n(x) \end{bmatrix} \quad (2.29)$$

$$\Delta Q(x) = \begin{bmatrix} Q_2 - Q_2(x) \\ \vdots \\ Q_n - Q_n(x) \end{bmatrix} \quad (2.30)$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} \Delta P(x) \\ \Delta Q(x) \end{bmatrix} \quad (2.31)$$

$$\begin{bmatrix} J_{11} & J_{12} \\ J_{21} & J_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta \delta^v \\ \Delta |V| \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta P(x^v) \\ \Delta Q(x^v) \end{bmatrix} \quad (2.32)$$

matrisleri ile ifade edilir [5,6].

Üretim baraları için δ , yük baraları için ise δ ve $|V|$ değişkendir. Üretim baraları için P , yük baraları için P ve Q değerleri bilinmektedir. Başlangıç tahmin değerleri yerleştirilerek $f(x)$ hesaplanır. Jakobiyen matrisi J 'nin de başlangıç değeri hesaplanır. Denklem (2.32) 'den yararlanarak Δx vektörü bulunur. Daha sonra $x^1 = x^0 + \Delta x^0$ iterasyonu ile bulunan x^1 değeri kullanılarak tekrar aynı işlemlere devam edilir. Fark değerleri ΔP , ΔQ yani $f(x)=0$ oluncaya kadar işlemler sürdürülür. İşlemler sonunda $f(x)=0$ yapan x değerleri aranan δ ve $|V|$ değerleri olarak bulunur.

2.1. Pflow Güç Akış Programı

Pflow, güç akış programı, genel bir güç akış programı olup aynı zamanda yük artımlarına karşı sistemin davranışını simüle eder. Sistemin Jacobian matrisindeki tekillik ile karakterize edilen bölgesel çökme noktalarını (bifurkasyon¹) hesaplamak için düzenlenmiş bir yaklaşımdır. Bu program ayrıca; bölgesel çökme noktalarındaki sağ ve sol özdeğerler, Jacobian matrisi, değişik yükleme seviyelerindeki güç akış çözümlerini incelemek için de kullanılır.

Pflow programı veya bu programın bölümleri test amaçlı kullanımlar için ücretsiz olarak elde edilebilir. Programda elde edilen sonuçların doğruluğu hakkında garanti verilmemektedir.

Bu program AC/DC² güç akış bilgisini WSCC³/BPA⁴/EPRI⁵ formatında veya IEEE formatında, FACTS aygıtları bilgilerini özel bir formatla, sürekli hal yük modeli bilgilerini OH⁶ formatında ve sürekli hal generatör bilgilerini basit serbest bir formatla okur. Bifurkasyon analizi için formatsız ek bilgiler, üretim değişimi yönü, güç değişimi yönü ve maksimum generatör gücü gibi bilgiler gerekir. Yükleme faktörünün değişimine izin verir. Program tarafından belirlenmedikçe bütün sürekli hal sistem kontrolleri işletmededir.

¹ Kararlı bir çalışma noktası ile kararsız bir çalışma noktasının birbirine yaklaşarak sistemi kararsızlığa götürmesi

² Alternative Current/Direct Current

³ Western System Coordination Council

⁴ Bonneville Power Administration

⁵ Electric Power Research Institute

⁶ Ontario Hydro

Program, C bilgisayar programlama dili ile hazırlanmış olduğunda DOS işletim sistemi ve UNIX işletim sistemi altında, C++ programlama dili ile hazırlanmış durumda Windows 95 ve 3.1 altında çalıştırılabilir. Sistem büyüklüğünde hafıza sınırlamalarından başka bir sınırlama yoktur.

Programın kullanımı, komut satırına istenilen komutları yazarak gerçekleştirilir. DC bilgileri WSCC/BPA/EPRI formatında olabilir. FACTS aygıtları formatı, bu program için özel olarak düzenlenmiştir. Giriş bilgileri WSCC/BPA/EPRI formatında veya IEEE formatındadır. Çıkış dosyası ASCII formatında yazılabilir. Ayrıca -W ve -w komutlarıyla EPRI ve IEEE formatında da yazdırılabilir. Güç akışı, asenkron sistemlerin alan değişimlerini, uzaktan gerilim kontrolünü, bölgesel ve uzaktan regüle transformatörlerini (gerilimleri, açıları ve/veya aktif ve reaktif güç akışlarını kontrol eden yük altında kademe değiştiriciler ve faz değiştiricileri) hesaba katarak Newton-Raphson metoduyla çözüm yapar. FACTS cihazları olarak statik SVC ve TCSC kullanılmaktadır. Birleştirilmiş güç akış kontrolörü (UPFC¹) ve STATCON cihazlarının da programa ileride eklenmesi beklenmektedir.

Bu program 1996 yılında Claudio A.Canizares, Zeno T. Faur ve tarafından hazırlanmıştır. Aşağıda Claudio A.Canizares, Zeno T. Faur'un bulundukları üniversiteler ve internet adresleri verilmiştir.

Claudio A. Canizares

Zeno T. Faur

University of Waterloo

Waterloo, Ontario N2K-2C4

CANADA

claudio@iliniza.uwaterloo.ca

<http://www.power.uwaterloo.ca>

Fernando L. Alvarado

University of Wisconsin-Madison

Madison, Wisconsin 53706

USA

alvarado@ece.wisc.edu

¹ Unified Power Flow Controller

-Onum : -m komutuyla birlikte MATLAB yardımıyla enerji profillerini belirlemek için *artımsal metot* sırasında AC/DC TEF (Transient Energy Function) bilgilerini yazdırmak için kullanılır.

-s : Ekranı ara çözümleri göstermez.

-Sval : Yükleme faktörü λ için *artımsal metotta* sonlandırma değeri. (Maksimum λ 'dan p.u değeri için)

-x : Program sadece bir tane gerilim barası kullanmaya zorlanır.



3. TEMEL KOMPAZASYON KAVRAMLARI

Yük kompanzasyonu; enerji iletim sistemlerinin gerilimini, güç faktörünü, sürekli ve geçici hal durumunda uygun sınırlar dahilinde kalmasını, sistemin dengeli olmasını ve sistemin dengeli olmasını sağlamak için gerekli olan gücün kontrol edilmesidir [3]. Reaktif enerji, elektrik ya da magnetik alan yaratan elektrikli cihazlar tarafından tüketilmektedir ve reaktif enerji olmadan bu aygıtlar işlevlerini yerine getiremezler. Bu enerji ihtiyacı sistemin dışındaki kaynaklar ile de karşılanabilir. Reaktif enerjinin sistemden karşılanması sistemden alınabilecek olan aktif enerjinin sınırlanmasına neden olacaktır. Enerji iletim hatlarında akan reaktif akım, hatlarda görünen akımın artmasına ve hatlarda 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.

$$P = \frac{V_R V_S}{X_L} \sin \delta \quad (3.1)$$

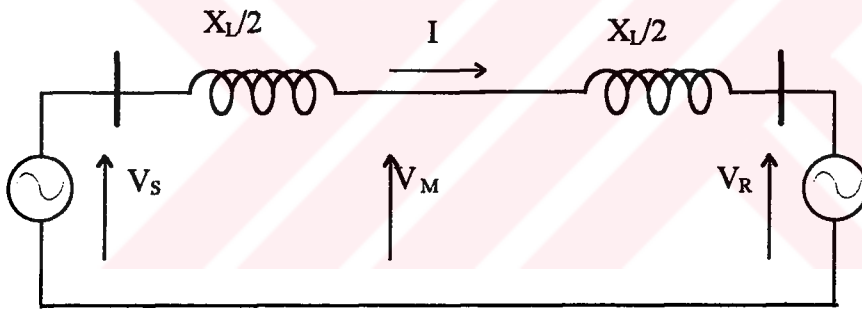
Şebekedeki güç akışı, sistemdeki güç akışını belirleyen parametreler kolay değiştirilemediği için rahatlıkla kontrol edilemez. Sistemin güç akışını kontrol etmede operatörlere gereken esnekliği sağlayan güç elektroniği teorisine dayalı sistemler kullanılmaktadır ve buna dayalı sistemler gelişmektedir [2].

3.1. Kompanze Edilmemiş Enerji İletim Sistemi

Reaktif güç ihtiyacını karşılamak için reaktif gücün bir yerde üretilmesi gerekmektedir. Tesisleri reaktif güçten kurtarmak, tesis elemanlarının kapasitelerinden tam olarak yararlanmak ve ekonomik bir işletme sağlamak amacıyla reaktif gücün santralde

değilde tüketim merkezlerinde üretilmesi en uygun ve ekonomik yoldur. Reaktif güç üretimi için kondansatörlerden yararlanılır. Kondansatörlerin kayıpları çok düşük, bakım masrafları çok küçüktür. Kondansatörler ile istenen her güçte reaktif güç kaynağı teşkil edilebildiği gibi bunları tüketicilerin yanlarına kadar götürüp hemen bunların uçlarına bağlamak ve böylece orta ve alçak gerilim şebekelerini de reaktif gücün yükünden kurtarmak mümkün olur. Onun için kondansatörler kompanzasyon için en uygun araçtır [3].

Alternatif akımla elektrik enerjisi iletim ve dağıtımının genel özelliği, aktif gücün genellikle reaktif güçle ilgili olmasıdır. 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



Şekil 3.1 Kısa iletim hatlı 2 İdeal makine sistemi [2]

Temel güç transfer ilişkileri için Şekil 3.1' de gösterilen kısa bir iletim hattı, 2 ideal makine sisteminden oluşmuş AC sistemi düşünülmüştür.

$|V_S|$: verici uç geriliminin büyüklüğü

$|V_R|$: alıcı uç geriliminin büyüklüğü

$|V_M|$: hattın orta nokta gerilimi

X_L : hat reaktansı

δ : gerilimler arasındaki faz açısı olmak üzere,

hat üzerindeki akım

$$I = \frac{(V_S - V_R)}{jX_L} = \frac{2V}{X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (3.2)$$

olarak hesaplanır [2].

Kayıpsız bir hat düşünüldüğünde, güç her iki uca da aynıdır ve orta nokta gerilimine eşittir.

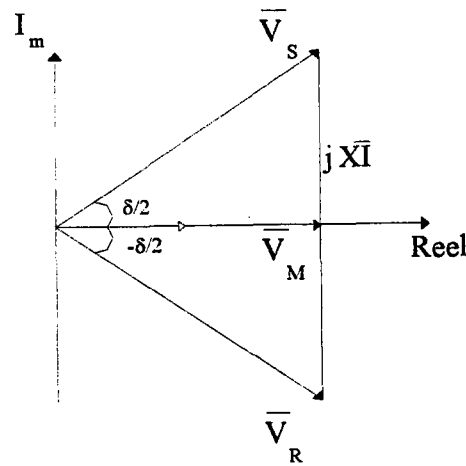
$$P = \frac{V^2}{X_L} \sin \delta \quad (3.3)$$

Her uca giren reaktif güç ise

$$Q_s = Q_R = \frac{V^2}{X_L} (1 - \cos \delta) \quad (3.4)$$

hat tarafından depolanan toplam reaktif gücü ortaya çıkarır.

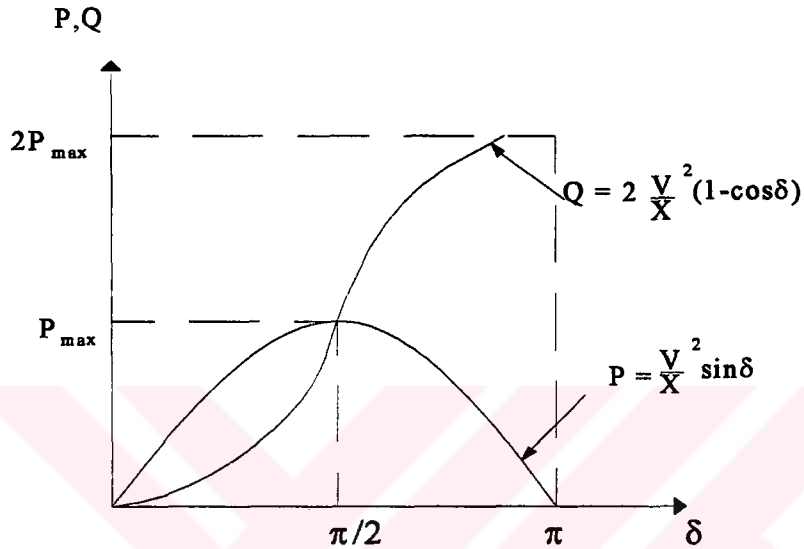
$$Q = 2Q_s = \frac{2V^2}{X_L} (1 - \cos \delta) \quad (3.5)$$



Şekil 3.2 V_S , V_R , V_M ve I arasındaki fazör diagramı [2]

V_s , V_R , V_M gerilimleri ve I akımı arasındaki ilişki Şekil 3.2’de deki fazör diagramında gösterilmiştir.

Aktif güç P , reaktif güç Q ve δ faz açısı arasındaki ilişki şekil 3.3’de gösterilmiştir. Bu ifadelerden yola çıkarak maksimum gücü arttırmak için uygulanan ideal şönt kompanzasyon, ideal seri kompanzasyon ve faz değıştirciler ele alınacaktır.



Şekil 3.3 Güç iletim karakteristiği

3.2 İdeal Seri Kompanzasyon

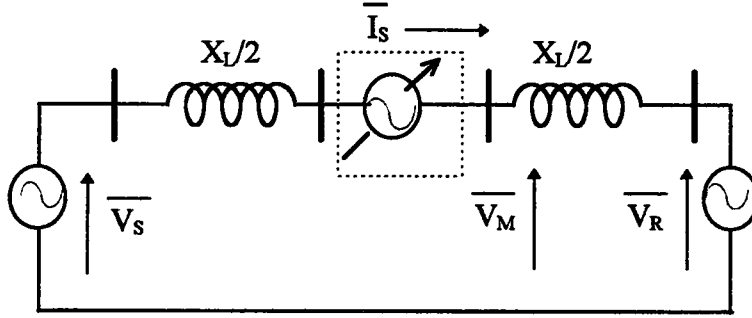
Geleneksel seri reaktif kompanzasyon araçları çoğunlukla bugünkü uygulamalarda aşağıdaki amaçlar için kullanılır.

Tablo 3.1 : Seri kompanzasyon kullanım amacı [8]

KOMPAZASYONUN AMACI	KOMPAZASYON ARACI
Temel olarak sınırlı hatlarda akışı azaltmak	1.sabit seri reaktörler 2.Mekanik anahtarlı reaktörler
Kullanım altında olan iletim hatlarında akışı arttırmak	1.sabit seri kapasitörler 2.Mekanik anahtarlı kapasitörler

Seri reaktör yerleştirilmesiyle hattın reaktans artar ve hattan akan güç azalır. Bunun sonucu olarak da reaktif güç ihtiyacı artar. Seri kapasitör yerleştirilmesiyle, hattın reaktansı azalır. Böylece hattan akan güç artar. Sabit şönt reaktif cihazlar ve sabit seri

reaktif cihazlar sistemdeki bir bozulmadan sonra güç akışını iyi bir şekilde kontrol edemezler. Mekanik anahtarlı seri reaktif elemanlar ise bir arıza sonrası sistem performansını hızlı bir şekilde geçici veya kalıcı olarak arttırmak için kullanılır [8].



Şekil 3.4 Seri kapasitif kompanzasyonlu güç sistemi

Seri kompanzasyonlu 2 ideal makine modeli Şekil 3.4’da gösterilmiştir. Bir iletim hattının güç iletim kapasitesini arttırmak için seri kompanzasyon yapılması gerektiğini gösterir. Seri kompanzasyonda toplam hat empedansı,

$$X = X_L - X_C$$

$$X = (1-s)X_L$$

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 [2,7].

s seri kompanzasyon derecesi, hatta eklenen seri kapasitif reaktans değerine bağlı olarak $0 \leq s < 1$ arasında değişir ve

$$s = \frac{X_C}{X_L}$$

şeklinde ifade edilir.

Denklem (3.2) ve (3.3)'den yararlanarak kompanze edilmiş hattaki akım ve aktif güç

$$I_s = I < 0 = \frac{2V}{(1-s)X_L} \sin \frac{\delta}{2} \quad (3.6)$$

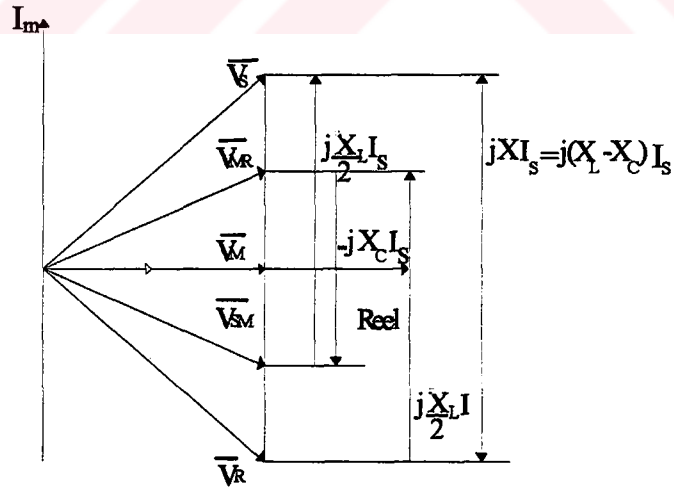
$$P_s = \frac{V^2}{(1-s)X_L} \quad (3.7)$$

şeklinde elde edilir.

Seri kapasitörden elde edilen reaktif güç

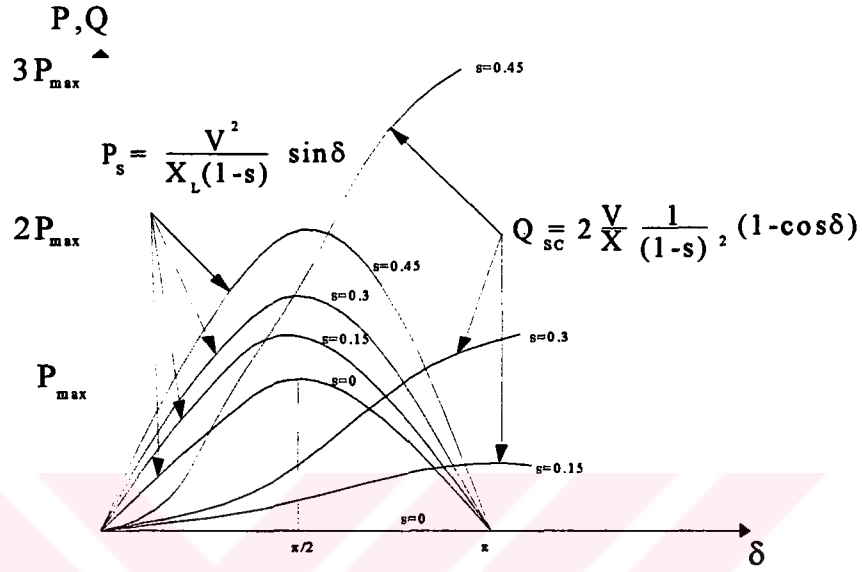
$$Q_{sc} = I^2 X_c = \left(\frac{2V^2 s}{(1-s)^2 X_L} \right) (1 - \cos \delta) \quad (3.8)$$

olarak bulunur. Bunlara karşı gelen gerilim ve akım fazörleri arasındaki ilişki Şekil 3.5'de gösterilmiştir.



Şekil 3.5 Gerilim ve akım arasındaki fazör diagramı

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 Şekil 3.6'da gösterilmiştir [2].



Şekil 3.6 İletim 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 [2].

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 [9].

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 grubun korunumu kapasitörün yeri ile etkilenmektedir.
- Kapasitör grubunun korunumu ve bakımı için yeri önemli bir faktördür [9].

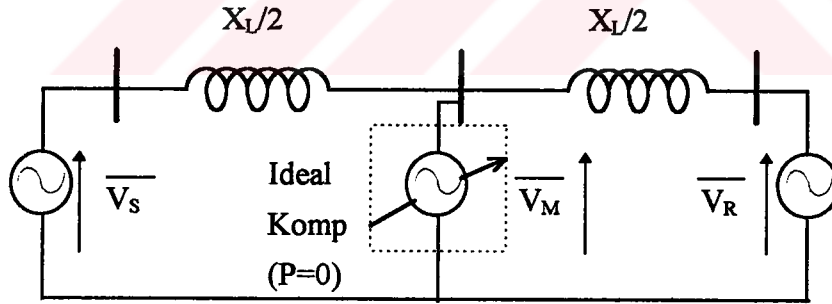
3.3 İdeal Şönt Kompanzasyon

Şönt reaktif kompanzasyon araçları çoğunlukla bugünkü uygulamalarda aşağıdaki amaçlar için kullanılır.

Tablo 3.2 : Şönt kompanzasyonun amacı [8]

KOMPAZASYON AMACI	KOMPAZASYON CİHAZI
Düşük yük koşulları altında fazla gerilimi azaltmak	1.sabit şönt reaktörler 2.mekanik anahtarlı reaktörler
Fazla yük koşulları altında gerilim seviyelerini sağlamak	1.sabit şönt kapasitörler 2.mekanik anahtarlı kapasitörler

Bir hatadan sonraki ilk salınım periyodundaki arttırılmış kapasitif şönt kompanzasyon, generatörlerin açılma salınımlarını azaltır ve istenen gerilim profilini sağlar.



Şekil 3.7 İdeal orta nokta kompanzatörlü basit makine güç sistemi

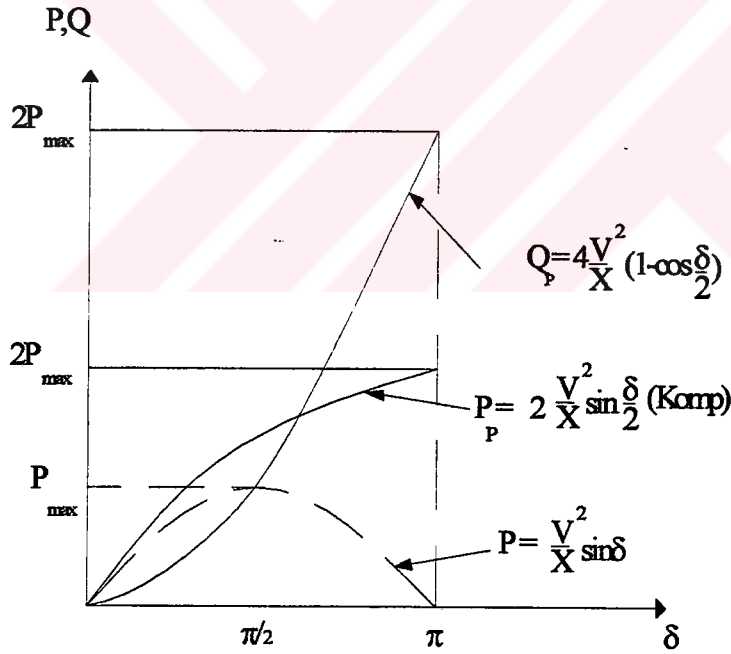
Şekil 3.7’de gösterildiği gibi iletim hattının orta noktasına ideal şönt kompanzatörün bağlandığı durumu düşünelim.

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

$$P_s = \frac{2V^2}{X} \sin \frac{\delta}{2} \quad (3.9)$$

$$Q_s = \frac{4V^2}{X} (1 - \cos \frac{\delta}{2}) \quad (3.10)$$

Aktif güç P_s , reaktif güç Q_s ve δ faz açısı arasındaki ilişki, ideal şönt kompanzasyon durumu için Şekil 3.8 'de gösterilmiştir. Reaktif güç üretimi için uygulanan şönt kompanzasyonun, iletilebilen gücü belirgin bir şekilde artırdığı görülmüştür.

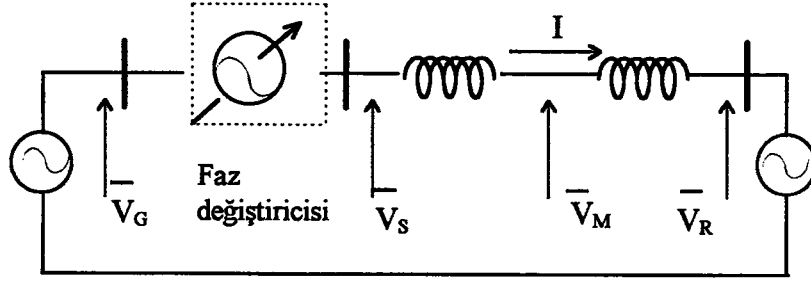


Şekil 3.8 Güç iletim karakteristiği [2]

3.4. Faz Açısı Kontrolü

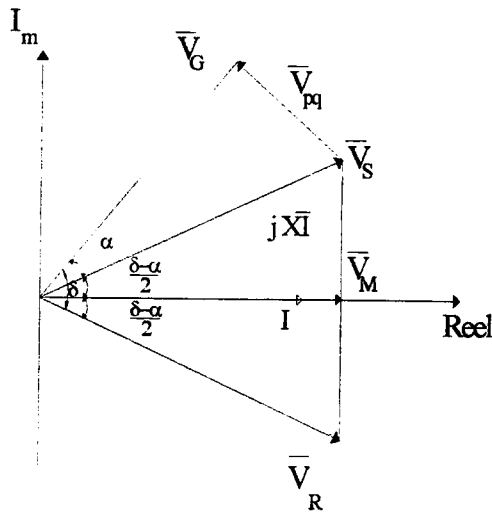
Faz açısı kontrolü, enerji iletim sisteminin geriliminin faz açısını değiştirmek amacıyla uygulanır. Faz açısı regülatörleri hat üzerindeki aktif güç akışını düzenlerler. Yüksek hızlı bir faz açısı regülatörü geçici kararlılığı ve sistemin söndürülmesini artırır [2,7].

Kompanze edilmemiş endüktif hatlı ideal 2 makine modeli düşünelim. Faz değıştircisi Şekil 3.9’da görüldüğü gibi güç üreticisi ile hattın verici ucu arasına yerleştirilmiştir.



Şekil 3.9 Faz değıştircili güç sistem modeli [2]

Faz değıştircisi, kontrollü büyüklük ve faz açılı sinüsoidal AC gerilim kaynağı olarak düşünülmüştür (temel frekansta). Faz değıştircisinin, 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, Şekil 3.10’da gösterilen fazör diagramında belirtilen V_G generatör gerilimi ile faz değıştircisi tarafından sağlanan V_{pq} geriliminin toplamı haline gelir.



Şekil 3.10 Gerilim ve akımlar arasındaki fazör diagramı

4. KONTROL EDİLEBİLİR ALTERNATİF AKIM SİSTEMİ CİHAZLARI

Kontrol edilebilir alternatif akım iletim sistemi, alternatif akım iletiminin iletilebilir güç kapasitesini ve kontrol edilebilirliğini arttırmak için güç elektroniği cihazlarının kullanımını öngören bir kavramdır. Birçok iletim hattı ısı limitlerinin yakınında çalışmaz. Kontrol edilebilen alternatif akım iletim sistemi cihazlarının amacı, iletimin termal sınırlara yakın değerlerde yapılması ve bunu teknik alanda geliştirmektir. Böylece varolan imkanlar daha iyi kullanılmış olur. Bu yüzden, iletim hattını termal limitinin yakınında yüklemek için varolan limiti artırma teknikleri gerekir. Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi, özellikle tristör teknolojisinin kullanımının artması ile tristörün anahtarlama kapasitesini kullanan güç sistem endüstrisinde yaygın kullanım alanı bulmuştur. FACTS cihazları, mevcut sistemin kendi ısı kapasitesinin altında çalıştığı durumlarda, varolan iletim imkanlarıyla daha çok gücün iletimine izin vererek sistemin iletim kapasitesini artırır ve yeni iletim hatlarının inşaa edilmesini imkanlar dahilinde erteler. Sonuç olarak FACTS cihazları iletim sisteminin gücünü artıran, yönünü kontrol eden, kararlılığı arttıran geleneksel iletim ekipmanlarının güç elektroniği ile birleştirilerek planlanması olarak ifade edilebilir [10].

Temeli kontrole dayanan FACTS teknolojisi, güç sistemi çalışmalarını kontrol etmek için önerilmiştir. Kontrol etkisini değerlendirmek için, güç akışı çalışmalarını değerlendirmek gerekir. FACTS cihazları iletim hatlarının, dinamik, seri, şönt ve faz kompanzasyonu için kullanılır [11].

Güvenilir, yüksek hızlı FACTS cihazları aşağıdaki yararları sağlayacaklardır.

- Güç akışının kontrolü arttıkça, akım belirlenen iletim hatlarını izleyecektir.
- Aşırı yüklenmeden kaçınılır. İletim hatlarının termal limitler düzeyinde güvenli şekilde daha fazla yüklenmesine izin verir.

- Kontrollü alanlar arasında daha iyi iletilebilme yeteneği sağlar. Böylece güç üretim rezerv sınırı %18'den %15'e veya daha aza düşürülebilir.
- Varolan iletim sistemlerinin kullanımını arttırarak, yeni iletim hatlarının kurulmasını belirli bir süre erteler [10].

FACTS cihazlarının maliyeti oldukça fazladır. Ekonomik faktörleri hesaba katmadan güç sistemine fazla miktarda FACTS cihazı yerleştirmek mümkün değildir. FACTS cihazı yerleştirmenin en iyi yolu onu en çok yarar sağlanabilecek yerlere yerleştirmektir. Değişik yerlerdeki FACTS cihazlarının güç sistemleri üzerinde oldukça değişik etkileri bulunmaktadır. FACTS cihazları, mekanik anahtarlamalı sistemlerine göre daha hızlı anahtarlama yapabildiklerinden dolayı üstündürler [10].

Temel olarak FACTS'in iki fonksiyonu bulunmaktadır. Birisi sistem parametrelerini (güç akışı, hat akımı, uç gerilimi) kontrol etmek, diğeri ise güç sistemlerinin kararlılığını (geçici kararlılık, sürekli kararlılık, gerilim kararlılığını) arttırmaktır [8].

FACTS'in ilk fonksiyonunun büyük ekonomik etkileri vardır. Çünkü bu, güç şebekesinin üretim yerlerinden kullanıcılara belirlenen üretim yollarından güç akışını kontrol ederek daha fazla güç iletimi yapmasına olanak sağlar. Aynı zamanda iletim hatlarının ısı limitlerine göre güvenli yüklenmesine olanak sağlar. Bu nedenle uygulama yerleri maliyetler gözönüne alınarak saptanabilir. Bundan FACTS'in etkilerinden en ekonomik şekilde yararlanabilecek yerlere konulması gerektiği anlaşılmalıdır. Güç sistemi kapsamının geliştirilmesi ve çalıştırılma şartlarının durumu nedeniyle dengeleme problemleri giderek daha da önem kazanmaktadır [8].

FACTS konusunda en eski çalışmalar EPRI başkanı Dr.Narain Hingorani tarafından yapılmıştır [10].

4.1. FACTS Cihazlarının Sınıflandırılması

1. Tristöre Dayalı FACTS Cihazları

- SVC
 - Tristör anahtarlama kapasitör (TSC¹)
 - Tristör anahtarlama reaktör (TSR²)
 - Tristör kontrollü reaktör (TCR³)
- TCSC
- Tristör kontrollü faz değıştiricisi (TCPS⁴)

2. GTO⁵ Anahtarlı, Gerilim Kaynaklı, Gerilim Çevirici Sürücüler

- STATCON
- Statik kompanzatör (STATCOM⁶)
- Birleştirlimiş Güç Akış Cihazı (UPFC⁷)

FACTS cihazları genel olarak yukardaki şekilde sınıflandırılmıştır.[8]

Statik Var Kompanzatörü

SVC, ileri fazda veya geri fazda reaktif güç kompanzasyonu sağlayan tristör anahtarlı paralel kapasitör veya indüktör devresidir. SVC aktif güç akışını kontrol etmemesine rağmen FACTS cihazı olarak gruplandırılmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonunun hızlı olarak değıştirilmesi gerektiğinde tercih edilir. Sisteme reaktif güç enjekte

¹ Thyristor Switched Capacitor

² Thyristor Switched Reaktor

³ Thyristor Controlled Reaktor

⁴ Thyristor Controlled Phase Shifter

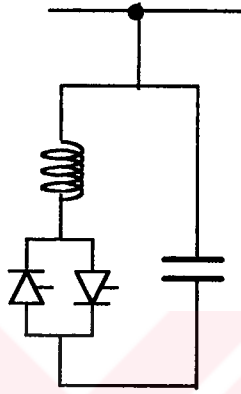
⁵ Gate Turn-Off Thyristor

⁶ Static Compensator

⁷ Unified Power Flow Controller

edilmesi bara gerilimini artırır. SVC, geçici kararlılık iyileştirilmesi, güç salınımlarının söndürülmesi ve gerilim desteği için kullanılır.

Kapazitör anahtarlama ve reaktör kontrolünün uygun birleşmesiyle, reaktif güç çıkışı, ekipmanın kapasitif ve endüktif sınırları arasında devamlı olarak değiştirilebilir. Kompanzator normal olarak; seçilen noktadaki iletim sisteminin gerilimini regüle etmek için, genelde güç salınımları farkedilirde söndürme sağlamak için uygun bir modülasyon seçeneği ile çalışır [1,11].



Şekil 4.1 SVC prensip şeması

Tristör kontrollü reaktör ve sabit kapasiteden oluşan şönt bağlı SVC Şekil 4.1' de gösterilmiştir.

STATCON

Hem ileri fazda hem de geri fazda reaktif güç sağlayan ve salınımları söndürmek için küçük enerji depolama kapasitesine sahip olan bir çeviricidir. Reaktif güç, depolama kapasitörü üzerindeki gerilim kontrol edilerek değiştirilir. STATCON, SVC'ye göre üstün performans gösterir ama daha pahalıdır. STATCON'un uygulama alanları aşağıda belirtilmiştir [11].

- GTO tristörlerinin kullanımına dayalı olarak yeni reaktif güç kompanzasyonu
- Şönt kompanzasyon
- Gerilim kontrolü
- Dinamik kararlılığın iyileştirilmesi

Faz Açısı Regülatörü:

Enerji iletim hatlarındaki güç akışını kontrol etmek için kullanılan diğer bir elemandır. Faz açısı regülatörü değişik şekillerde önerilmiştir. Ama hepsi faz değiştirici transformatöre benzer bir anlamda çalışmaktadır [11].

- Seri kompanzasyon hat açısı regülatörü
- Güç akışı kontrolü
- Dinamik kararlılığın iyileştirilmesi

Faz dönüştürücü transformatörler faz açısındaki bir değişime dakikanın 10'da biri sürede etki edecek kadar yavaş elemanlardır. Bütün anahtarlama düşük gerilimde çalışan ayarlama sargısı tarafından yapılır.

Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü :

UPFC, şönt, seri kompanzasyon ve faz açısı kontrolü için senkron gerilim kaynakları kullanır. UPFC reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim ve güç akışı kontrolü sağlar. UPFC, enerji iletim sistemlerinin gerçek-zaman kontrolü ve dinamik kompanzasyonu için önerilmiş olup çok yönlü kompanzasyon fonksiyonları bulunmaktadır. Bunu kullanarak enerji iletim sisteminin üç parametresini kontrol etmek mümkündür. (gerilim, hat empedansı ve faz açısı) Bu parametrelerin kontrolü, gerçek zaman içerisinde bir tip kontrolden diğerine aynı anda veya birbirini takip ederek geçmek suretiyle gerçekleştirilir. Bu fonksiyonel esneklik, enerji iletim endüstrisine, karşılaştıkları problemlerin bir çoğunun çözümünde büyük bir kolaylık sağlar [12].

Şönt ve seri inverterlerle birlikte UPFC nin yapısı, bütün güç iletim parametrelerinin (gerilim iletimi, empedans iletimi, faz açısı iletimi) kontrolünde büyük esneklik sağlar.

Tablo 4.1: FACTS cihazlarının kontrol ettikleri parametreler [11]

FACTS CİHAZLARI	Kontrol edilebilen parametreler
SVC	Gerilim, reaktif güç
TCSC	Güç, gerilim, empedans
STATCON	Gerilim, reaktif güç
FAZ AÇISI REGÜLATÖRÜ	Güç, faz açısı
UPFC	Güç, gerilim, reaktif güç

Tablo 4.2: FACTS işletme fonksiyonları [8]

Sürekli Hal Akış Kontrolü	Sürekli Hal Gerilim Kontrolü	Kararlılık Yükseltilmesi
Güç akışı dengesi	Hafif yük koşulları	Geçici
Aşırı Yüklenme Sorununun çözümü	Ağır yük koşulları	Söndürücü
Açının azaltılması	Normal yük koşulları	Gerilim
	Güçkalitesi	Küçük frekanslı salınımlar (SSR ¹)
	Önleyici kontrol	

FACTS cihazlarının kontrol ettikleri parametreler ve işletme fonksiyonları tablo 4.1 ve tablo 4.2’de gösterilmiştir.

4.2. Tristör Kontrollü Seri Kapasitörler

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

Seri kompanzasyon, uzun hatlardaki endüktif reaktansı kompanze etmek için, seri kapasitörler kullanarak güç iletimini geliştirmede iyi tanınan, etkili, ekonomik bir

¹ Sub-Synchronous Resonance

yöntemdir. İletim sistemlerinde, seri kapasitörlerin kullanılmasındaki başlıca nedenler şunlardır :

- 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.

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 [13].

İletilen güç arttıkça seri kapasitörde reaktif güç üretimi arttığından, sistemdeki seri kompanzasyon gerilim kontrolünü ve reaktif güç dengesini düzeltir. Bu açıdan seri kapasitör kendi kendini ayarlayan bir cihazdır.

Tristör kontrollü seri kapasitörler, genellikle hat seri kapasitörlerine seri olarak bağlanırlar. Her bir modül seri kapasitör parçasına paralel olarak bağlı bulunan TCR'ye sahiptir [14].

İletim hattı ile 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 düzeyini ve hattın yüklenilebilirliğini ayarlamak için, güç devre kesicileri gibi mekanik cihazlar kullanmak suretiyle hatta bağlanıp ayrılabilir. 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, aynı zamanda çeşitli teknik yararlar sağlamak mümkündür.

TCSC, turbo-generatör setlerindeki SSR salınım risklerinin giderilmesinde de yararlıdırlar. Tristör kontrolü seri kapasitörler aynı zamanda güç salınımlarının söndürülmesinde ve güç akış kontrolünde de etkilidir [14].

Seri kapasitörün, çevredeki güç sistemleriyle uyumlu bir halde çalışabilmesi için, yüksek güvenilirlikle birlikte, uygun koruyucu faktörlere ihtiyaç vardır. Bu faktörlerin ilki, seri kapasitörün en az sistemdeki diğer elemanlar kadar ihtiyaç duyulacak şekilde dizayn edilmesidir. (hatlar, kesiciler, transformatör vs. gibi).

İkinci faktör, seri kapasitörün güç sisteminde oluşacak arızaların, kendisinin bozulmasını önlemek üzere çabuk ve güvenli bir şekilde by-pass yapacak koruyucu bir sistemle donatılması gerektiğini söylemektedir. Bununla beraber aynı koruyucu sistem, kapasitörün çevre iletim sistemlerindeki arıza giderilince minimum bir gecikmeyle devreye girmesini sağlamalıdır [13].

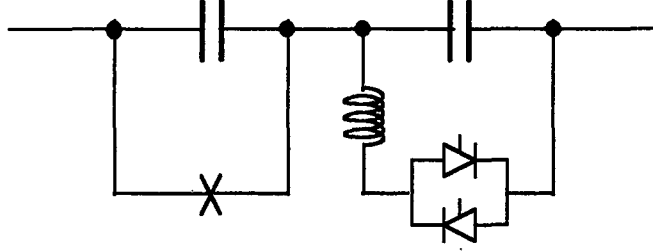
Kapasitörler çoğu zaman hat boyunca yerleştirilirler ve hattın bir parçası olarak anahtarlanırlar. Yer seçimi, her ayrı olay için genel ekonomi ve sistem güvenilirliği açısından özel bir çalışma gerektirir. Hattın endüktif reaktansına göre kompanzasyon derecesi genellikle %20 ile %70 arasında değişir [13]

Seri kompanzasyonla ilgili teknoloji son yıllarda etkileyici bir gelişme göstermiştir. Yıllar boyunca güvenilirlik, güç yoğunluğu ve kayıplar açısından yalnızca kapasitörlerin kendileri değil aynı zamanda koruyucu cihazlar, kontrol sistemleri gibi onlarla ortak cihazlarda büyük gelişme göstermiştir. Koruma alanında çinko oksit (ZnO) teknolojisi güvenilirlik ve yeniden devreye girme hızı açısından yenilikler getirmiştir [13].

Koruma ve kontrol sistemi, en son düzeninde mikroişlemci ve fiberoptik sinyal iletişimi kullanır. Bu da gerek bugün gerekse gelecekte seri kapasitör kullananlara geniş kullanım özellikleri sunmaktadır.

Dünyada (1995 yılı itibarıyla) 50.000 MVAR 'dan fazla seri kapasitör kullanılmakta veya kuruluş aşamasında bulunmaktadır. Tristör kontrollü seri kapasitörler, FACTS sistemi için oldukça uygundur.

TCSC' ye gelişmiş ve hızlı bir seri kompanzasyon gereken durumlarda ihtiyaç vardır. Kapasite grubu hat akımına faz ekleyen, akım darbelerini dolaştıran paralel tristör kontrollü reaktör ile donatılmıştır. Seviyenin ötesinde kapasitif gerilimi arttırır. Her bir tristör bir periyot ile tetiklenmiş olup oranlanmış temel frekansın yarım periyotundan daha kısa iletme aralığına sahiptir.



Şekil 4.2 Bir TCSC düzeneği [14]

Tristör hattında dolaşan yük miktarı, kapasitördeki ek gerilimi karşılar. Sistem profili açısından, artmış gerilim tristör tetikleme sisteminin, tetiklemeden hemen sonra akım darbesindeki yük miktarını kontrol eder. Kural olarak, girilen gerilim, tek faz kontrolörü için bir defasında teorik band genişliği 60 veya 50Hz'li bir yarım periyot'la kontrol edilebilir. Eğer ek gerilim hattaki akımla oranlı bir şekilde kontrol ediliyorsa, iletim sistemi, kontrollü seri kapasitörü, kapasitörün fiziki reaktansının ötesinde gerçek olarak artmış bir reaktansı varmış gibi algılayacaktır.. Kapasitör düşük reaktans hattı oluşturursa harmonik akımların büyük bir kısmı normal olarak TCSC kapasitörde tutulur. Kapasitör ve tristör valfi gibi aksam elemanlarının kabul edilebilir maksimum baskısı elde edilebilecek toplam gerilim üzerinde bir takım sınırlamalara yol açar. Düşük hat akımında yüksek gerilim desteği maksimum gerçek reaktanstaki büyük artışa karşılık elde edilebilir. Tristör valfi kapasitör aşırı gerilim koruma şemasının içine yerleştirilmiştir. Ateşleme aralığı ihtiyacını karşılar. Kural olarak bu, iletim hattına kontrollü reaktans verilmesini gerçekleştirir. İletim sistemindeki bu yapı nedeniyle cihaz, güç akışı ve söndürüm kontrolü uygulamalarında yararlı bir iş görür.

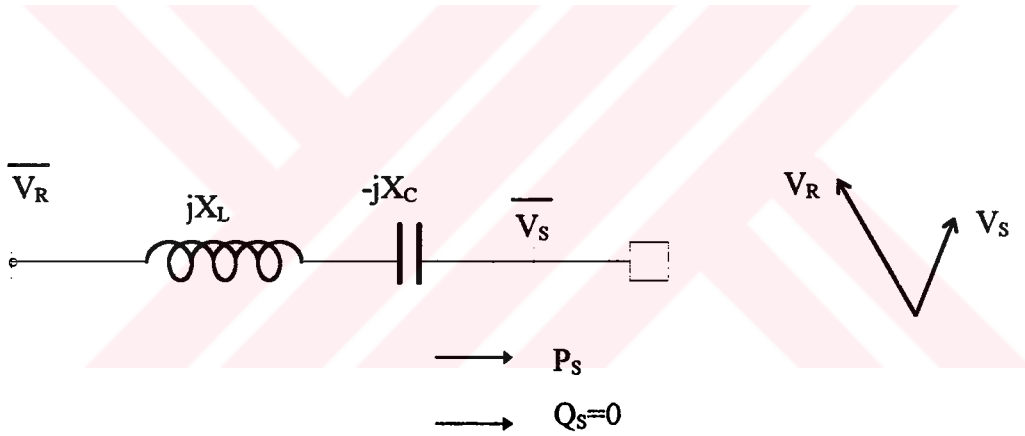
4.3 TCSC Uygulamaları

TCSC'ler iletim sistemlerindeki aşağıdaki problemlere çözüm getirirler [14].

- Gerilim kararsızlığı
- Küçük frekanslı salınımlar (SSR)
- Güç salınım söndürülmesi
- Güç akış kontrolü

4.3.1 Gerilim Kararsızlığı

Seri kapasitörler, iletim sistemindeki gerilim açısından zayıf olan noktaları destekleyerek gerilim kararlılığını iyileştirirler. Bu özellik şekil 4.3'de, iletim hattının, reaktif üretimi ve tüketiminden yoksun olan noktaları saf aktif güçle beslediği idealize edilmiş durum ile gösterilmiştir.



Şekil 4.3 İdealize edilmiş iletim sistemi [14]

4.3.2 Küçük Frekanslı Salınımlar

Seri kapasitörler iletim hatlarının güç iletim kapasitesini artırır ve böylece sınırlı güç üretim merkezlerinin iletim düzeylerinden daha fazla yararlanmaya olanak sağlar. İletim şebekelerindeki müsaade edilebilir kompanzasyon düzeyi, geleneksel olarak seri kapasitörlerin potansiyel olarak birbirlerini etkilemeleri ve yakındaki türbin generatörlerin milleri tarafından sınırlandırılmıştır. Bu olay SSR olarak bilinmektedir. TCSC, kendisiyle türbin generatörün mili arasındaki elektrik gücü alışverişini kontrol

edebilir, böylece SSR oluşumu korkusu olmadan seri kompanzasyonun düzeyini müsaade edilen düzeyin ötesinde artırma olanağı sağlar [14].

TCSC'nin avantajı; tristör kontrollü reaktörleri seri kapasitör kısımlarıyla paralel olarak birleştirmesi ve iletim hattını SSR frekanslarında rezonans şartlarına uydurmamasıdır [14].

4.3.3 Güç Salınım Söndürülmesi

Bir çok güç sistemi, iletim kapasitesine göre yüksek düzeydeki gücün uzun mesafelerde iletimi sırasında, kritik bağlantı hatları boyunca 0.2-2 Hz arasında bir frekansta söndürülmemiş güç salınımı ile karşılaşır. TCSC'ler, bu salınımlar için aktif bir söndürüm sağlar ve böylece uzun mesafelerde daha fazla gücün iletimine olanak verirler.

Ayrıca, TCSC'ler önemli arızalardan sonra güç sistemlerine destek sağlayarak, sistemin senkronize durumda çalışmasını sürdürmesine olanak verirler [14].

TCSC'ler, güç salınım söndürümü için kullanıldıklarında, iletim sistemi planlayıcılarının seçimine sunulan diğer yaklaşımlara göre daha fazla avantaja sahiptirler. TCSC kompanze edilmiş iletim hattının reaktansını, enterkonnekte bölgeler arasındaki salınımlara göre değiştirerek çalışır. TCSC'nin geniş çapta bara gerilim değişikliklerine yol açmaması nedeniyle söndürüme etkisi, yükteki değişikliklerden etkilenmez. TCSC'ler kompanze edilmiş hat boyunca yüksek düzeylerdeki güç iletiminde çok daha etkilidir. TCSC'nin güç salınımının söndürülmesindeki etkinliği daha güçlü iletim hatlarıyla paralellik kurulduğunda azalır [14].

TCSC'nin küçük bir bölümü (örneğin %10) güç salınımının söndürülmesine genellikle yetmektedir. Hat akımı ve bara gerilimini kapsayan yerel geri besleme ölçüsü, güç salınımlarının söndürülmesini arttırmak için TCSC'yi kontrol etme ve güç salınımlarını ortaya çıkarma konusunda etkilidir. [14].

4.4.4 Güç Akışı Kontrolü

Enterkonnekte bir güç sisteminde gücün bir bölgeden diğerine iletilmesi, iki bölgeyi birbirine bağlayan iletim yollarının sağlamlığına dayanan hatları kullanır.

Güç akışının kontrolü için konan değerler;

- sistem kayıplarının en aza indirilmesi,
- iletimin aşırı yükünün giderilmesi,
- gücün belirlenmiş iletim hattına yöneltilmesi

şeklindedir [14].

Seri kapasitör teknolojisi uzun bir süredir bilinmekte olup güç sistemlerindeki etkinliğini ve güvenilirliğini kanıtlamıştır. TCSC kullanımının artması, birçok iletim problemine çözüm getirmiştir. TCSC enerji iletim sistemleri için kontrol edilebilir, kuvvetli çözümler sağlayacak cihazlardan biridir [14].

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 kısma bölünmüştür. Bu kombinasyon %10' luk bir artışla %0 ile %60 arasında bir kompanzasyona imkan vermektedir [14].

Ayrıca belirtilen düzende, tristör anahtarının gerçek şartlarda çalıştırılmasını sağlayan tristör kontrollü seri kapasitör kısmı bulunmaktadır. Bu uygulama, güç salınımlarının söndürülmesi, SSR'nin söndürülmesi ve güç akışını en iyi şekilde optimize etmek için kontrollü seri kapasitörlerin geliştirilmesinde önemli bir adım oluşturmaktadır [14].

5. TÜRKİYE ENERJİ İLETİM SİSTEMİNE GÜÇ AKIŞI UYGULANMASI

Tezin amacı, 380, 154, 66 kV iletim hatlarını ve üretim birimlerini içeren Türkiye Elektrik Enerji Sistemine güç akışı uygulamak ve iletilebilir güç kapasitesini arttırmak için seri kompanzasyon yapılacak en uygun hattı belirlemektir. Bunun için *Pflow* güç akış programından yararlanılacaktır. Türkiye sistemi üzerinde çalışırken gerçek değerler kullanılmıştır. Türkiye sisteminde toplam 551 bara üzerinde çözüme gidilmiştir. Bu baraların 54 tanesi üretim barası olup transformatör değerleride ayrıca baralar arasındaki ilişkilerde belirtilmiştir. Sisteme ilişkin verilerde 54 adet transformatör bulunmaktadır. Transformatörlerin ayar kademeleri doğru olarak bulunamamıştır. Çalışmanın doğru sonuç vermesi için sistem sadece 380, 154, 66 kV'luk gerilim kademeleri için düzenlenmiştir.

Bu çalışma için Türkiye ulusal enerji iletim sistemine ait 1997 yılı gerçek hat, transformatör, yük ve üretim değerleri Ankara TEAŞ genel müdürlüğü APK daire başkanlığından temin edilmiştir. Sonuçların doğruluğunu karşılaştırmak için 1997 yılı güç akış sonuçları da edinilmiştir.

Türkiye iletim sistemine ait 1997 yılı itibariyle toplam enerji üretimi ve bu enerjinin üretildiği kurumlara göre dağılımı, sistemde bulunan seri kapasitörler, şönt reaktörler ve bazı bölgelerde bulunan şönt kapasiteler Ek A'da verilmiştir.

TEAŞ genel müdürlüğünce elde edilen veriler IEEE common formatından¹ [16] farklı bir formatta ve bilgisayar çıktısı olarak elde edilmiştir. Bu veriler yeniden IEEE formatına uygun olarak düzenlenerek Türkiye enerji iletim sisteminin maksimum yük durumu için bir *turk.cf* uzantılı bir dosya hazırlanmıştır. Bu program çözümü *turk.pfl* uzantılı dosya ile saklanmıştır. Güç akışı, baralara ilişkin yük değerlerini, santrallerin üretim değerlerini, maksimum üretimlerini içeren ve yük paylaşımını yapmak amacıyla düzenlenen *turk.k* dosyası kullanılarak çözülmüştür.

¹ *Pflow* programı : claudio@iliniza.uwaterloo.ca

üretim değerlerini, maksimum üretimlerini içeren ve yük paylaşımını yapmak amacıyla düzenlenen *turk.k* dosyası kullanılarak çözülmüştür.

Programda ilk önce

-I turk.cf -lturk.lg1 turk.pf1

komutu ile temel durum çözümü yapılmıştır. *turk.lg1* dosyası çözümde oluşacak hataları görmek için kullanılmıştır. Güç akışı sonuçlarına ilişkin örnek gösterim Ek B'da verilmiştir. Elde edilen sonuçlara göre bazı bölgelerde gerilim seviyesinin düşük olduğu gözlenmiştir. Gerilim seviyesinin 0.8 p.u civarında olduğu baralar doğu bölgelerindedir. Ege bölgesinde de 0.9'un altında gerilim seviyesine sahip baralar olduğu gözlenmiştir.

Seri kompanzasyon uygulanacak hatları bulmak için *direkt metodundan* yararlanılır. *Direkt metodu*, *Pflow* güç akış programında -C komutu ile kullanılır. -C komutu bifurkasyon noktasındaki sol özvektörü dosyaya yazdırılır. Bu dosya *turk.lft* uzantılı olacak şekilde program tarafından elde edilir.

Sol özvektör aktif güç açısından en hassas baraları belirler [15]. *Maxim* komutu kullanarak, sol özvektöre ait en büyük aktif güç değişimini veren değerler yazdırılır. Burada elde edilen değerlerden en büyük olanından yararlanarak seri kompanzasyon uygulanacak hatlar belirlenir. -C komutu ayrıca verilen üretim ve yük durumları için maksimum yükleme faktörü λ_{md} 'yı bulur.

Komut satırına

-I turk.cf -Kturk.k -Cturk.lft -L0.01 -lturk.lg2 turk.pf2

yazılarak *direkt metod* ile çözüm yapılır. Bu programda kullandığımız -C komutu ile sisteme ait yükleme faktörü % 3.74463 olarak bulunmuştur.

turk.lft dosyasının maxim komutu ile elde edilen sol özvektöre ait maksimum değerler

Tablo 5.1: Sol özvektöre ait maksimum değerler

dP3134	Van	1
dP3112	Engil	0,95052
dP3113	Erciş	0,89881
dP3102	Adilcevaz	0,83107
dP2917	Kars	0,80146

şeklinde bulunmuştur.

Bu yükleme faktörüne ilişkin gerilim profilini görmek ve sistemin davranışını incelemek için artımsal metod kullanılmıştır.

-I turk.cf -Kturk.k -cturkvp.m -m -k0.01 -lturk.lg4 turk.pf4

komutu kullanılarak *turkvp.m* dosyası oluşturulur. Bu dosya gerilimi zayıf olan baraları içerir. Programın ana sayfasında -c komutu ile çözüm yapıldığında yükleme faktörüne bağlı olarak gerilim değerlerinin değişimi yazdırılır.. Yukarıda belirtilen çözüme ait gerilim profillerinin yazdırılmış olduğu *turkvp.m* dosyası MATLAB programı ile çalıştırılarak gerilim profilleri çizdirilir. Elde edilen gerilim profilleri Ek C’de gösterimiştir.

6. KONTROLLÜ SERİ KAPASİTÖR YERLEŞTİRİLMİŞ TÜRKİYE İLETİM SİSTEMİ DEĞERLERİ

Bu bölümde 380,154, 66 kV'luk Türkiye enerji iletim sistemi için yapılan güç akışı analizi sonuçları incelenerek belirlenen hatlarda seri kompanzasyon uygulaması yapılacaktır. Elde edilen güç akışı sonuçlarında %3.74463 bir yükleme faktörü bulunmuştur. Sistem ancak tüm yükünün %3.7 kadar bir yük daha iletebilmektedir. Bu değer oldukça küçüktür. *Pflow* programı sonucunda belirlenen değerlere göre iletim kapasitesini arttırmak amacıyla, yine *Pflow* programı kullanılarak Tristör kontrollü seri kapasitör yerleştirilmiştir. TCSC'nin yerleşimi için özel bir format kullanılmıştır.

Bifurkasyon noktasındaki sağ özvektöre ilişkin sıfır özdeğer kararsızlığa en eğilimli noktayı belirtir. Bununla beraber buna karşı gelen sol özvektör en hassas durum değişkenlerini gösterir. Buradan anlaşıldığı gibi sağ ve sol sıfır özvektörler gerilim kararsızlığına en eğilimli baraları ve sisteme en çok etki edecek hatları belirler. Bu bilgi, sisteme yerleştirilecek FACTS cihazının en uygun yerini bulmak için kullanılır [15].

Bölüm 5'de *direkt metot* kullanarak elde ettiğimiz verilerden yararlanarak Van barası ile bağlı hatlardan sırayla en büyük reaktansa bağlı baradan başlayarak kompanzasyon analizi yapılmıştır.

$C \quad Bus1 > < kV1 \quad Bus2 > < kV2 < \text{---} Xc < \text{---} Xl < am < aM < \text{---} cont | < MVA < \text{---} al < \text{---} MI^1$

FC 0 Van 154 Ercis 154 .06700 .00670144175 90.0000X100.153.74.0

Yukarıda belirtilen veriler *turk.cf* programında Programın 'END' satırından önce yazılarak *turk1.cf* uzantısı ile saklanmıştır. Van barasının bağlı olduğu Ercis ve Engil hatlarına seri kompanzasyon denemesi yapılmıştır.

¹ Bakınız: *Pflow* : 173 bus ac-dc-FACTS system

Tablo 6.1 : Seri kompanzasyon uygulaması1

BARA NO	BARA ADI	BARA NO	BARA ADI	KOMP. DERECEŚİ	YÜKLEME FAKTÖRÜ	HAT REAKTANSI
3134	Van	3113	Ercis	%12	0.0442285	0,168691
3134	Van	3112	Engil	%12	0,0405847	0,065491

TCSC'nin per unit değeriindeki kapasitesi X_C , X_L hat reaktansı olmak üzere

$$X_C = 0,12.X_L$$

olarak hesaplanır [15]. TCSC kullanarak bu yükleme faktörü ancak %4,4 'e kadar çıkartılabilmektedir. Bu %4.4'lük yükleme faktörü, tatmin edildiğı gibi belirlenen Van ile Ercis hattı arasında elde edilmiştir. Bu yükleme faktörü

-I turk1.cf -Kturk.k -Cturk1.lft -L0.01 -lturk1.lg1 turk1.pf1

komutu ile bulunmuştur. Aynı şekilde

-I turk1.cf -Kturk.k -cturk1vp.m -m -k0.01 -lturk1.lg4 turk1.pf4

komutu ile seri kompanzasyondan sonra elde edilen yükleme faktörü ile gerilim değeri arasındaki gerilim profilini çizdirilir. Bu gerilim profiline ait gösterim Ek D'de gösterilmiştir.

Sol özvektörden elde ettiğimiz maksimum değerlerden yararlanarak sırayla kompanzasyon uygulayalım.

Tablo 6.2 : Seri kompanzasyon uygulaması2

BARA NO	BARA ADI	BARA NO	BARA ADI	KOMP. DERECEŚİ	YÜKLEME FAKTÖRÜ	HAT REAKTANSI
3112	Engil	3131	Tatvan	%12	0,0371785	0,176147
3112	Engil	3134	Van	%12	0,0405847	0,065491

Tablo 6.3 : Seri kompanzasyon uygulaması3

BARA NO	BARA ADI	B.NO	B.ADI	KOMP. DERECEŚİ	YÜKLEME FAKTÖRÜ	HAT REAKTANSI
3113	Ercis	3134	Van	%12	0.0442285	0,168691
3113	Ercis	2901	Ağrı	%12	0,0436057	0,189244
3113	Ercis	3102	Adilceva	%12	0,0411554	0,105788

Tablo 6.4: Seri kompanzasyon uygulaması4

BARA NO	BARA ADI	BARA NO	BARA ADI	KOMP. DERECESE	YÜKLEME FAKTÖRÜ	HAT REAKTANSI
3102	Adilceva	3131	Tatvan	%12	0,0409469	0,107849
3102	Adilceva	3113	Ercis	%12	0,0411554	0,105788

Sistemde deneme yapmak amacıyla Ege bölgesinde ve doğu bölgesinde gelişigüzel baralar seçilerek seri kompanzasyon uygulanmış ve sonuçlar aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.5: Seri kompanzasyon uygulaması5

BARA NO	BARA ADI	BARA NO	BARA ADI	KOMP. DERECESE	YÜKLEME FAKTÖRÜ	HAT REAKTANSI
1806	Manisa	1801	Akhisar	%12	0,0374372	0,095152
1806	Manisa	1810	Turgutlu	%12	0,0374472	0,071726
5025	Bornova	1807	Morsan	%12	0,0374479	0,041443
3131	Tatvan	3110	Dodan	%12	0,0403245	0,014594
2005	Ant.SB	2006	A.Kemer	%12	0,0374457	0,077181
2739	Karabu	2736	Catalca	%12	0,0374478	0,548267

Elde edilen *turk1.lft* dosyasını tekrar maxim komutu ile çalıştırıldığında

Tablo 6.6: Sol özvektöre ilişkin değerler (kompanzasyonlu durum)

dP3113	Erciş	1
dP3134	Van	0,96839
dP3112	Engil	0,93763
dP2917	Kars	0,90722
dP3102	Adilceva	0,89915

yukarıda belirtilen baralar bulunur. Sisteme 2.bir TCSC yerleştirildiğinde elde edilen sonuçlar aşağıdaki tabloda gösterilmiştir.

Tablo 6.7: Çift TCSC kullanılmış seri kompanzasyon

BARA NO	BARA ADI	BARA NO	BARA ADI	KOMP. DERECESE	HAT REAKTANSI	YÜKLEME FAKTÖRÜ
3134	Van	3113	Ercis	%12	0,168691	0,0442285
3113	Ercis	2901	Agri	%12	0,065491	0,0433605
SİSTEM GENELİ						0,0374478

Sol özvektörden bulunan Van barası ile Ercis barası arasındaki hatta uygulanan, seri kompanzasyon elde edilen yükleme faktörüne göre tablodan da görüldüğü gibi en iyi sonucu vermektedir. Fakat doğu bölgesindeki gerilim seviyeleri genelde düşüktür. Bu yüzden burada yapılan seri kompanzasyon sonucu her ne kadar yükleme faktörü artmış olsada seri kompanzasyonla bu hatlarda daha fazla güç iletmek düşük olan gerilimi daha da düşürmektedir. Bu yüzden iyi bir sonuç elde edilememektedir. Sistemin genelinde birden fazla TCSC konulduğunda yükleme faktörü % 4,4'den daha düşük olmaktadır. Sistem belli bir miktardan sonraki reaktif gücü kabul etmemektedir. Bu sonuç üretimlerin tüketimleri dengeleyememesinden kaynaklanabilir. EkA'da verilen üretim değerlerine Türkiye sisteminde üretimler tüketimleri karşılamaktadır. Üretimlerle tüketimler dengeli olduğuna göre, sistemi belli bir değerin üstünde yükleyememek gerilim seviyelerinin düşük olmasından veya eldeki verilerin hatalı olmasından kaynaklanabilir.



7. SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Son yıllarda çevre, maliyet problemleri hem üretim merkezleri hem de üretim hatlarının yapımını geciktirmiştir. Bununla beraber iletim şebekesindeki talepler son yıllarda artmıştır ve giderek de artmaktadır. Bu amaçla bu tezde seri kompanzasyon uygulayarak Türkiye enerji iletim kapasitesinin artırılması istenerek çalışmalar yapılmıştır.

Tezin içeriğinde Türkiye 380, 154, 66 kV'luk enerji iletim sistemi için *Pflow* güç akış programı kullanılarak güç akışı analizi yapılmıştır. Elde edilen sonuçlara göre iletilebilir güç kapasitesinin artırılması istenmiştir. Elimizde bulunan Türkiye enerji iletim sisteminin verilerinin doğruluğunu kabul ettiğimizde *Pflow* programında elde edilen güç akışı sonuçlarına göre Türkiye enerji iletim sistemi ancak %3.74463'lik bir yükleme faktörüne sahiptir. Sistemde özellikle doğu bölgelerinde ve Ege bölgesinin bazı yörelerinde gerilim seviyesi oldukça düşüktür. Bu değer 0.9'un altındadır. Sistem hiçbir yükleme faktörü altında çalışmıyorken bile gerilim düşük olduğu için çok fazla yüklenememekte ve %3,7'lük bir yükleme faktöründen sonra sistem çökmektedir.

Direkt metot ile bulunan sol özvektör bize seri kompanzasyon uygulanacak hatları belirlemede yardımcı olur [15]. *Pflow* programında -C komutu kullanarak elde edilen *turk.lft* dosyası *maxim* komutu ile çalıştırılarak elde edilen sonuçlara göre Van barası ile ona bağlı baralar arasındaki hatlarda sırayla kompanzasyon yapılmıştır. Van barası ile Ercis barası arasındaki hatta uygulanan kompanzasyon sonrası en iyi değer elde edilmiştir. Van-Ercis arasına TCSC kullanarak seri kompanzasyon yapıldığında % 4,42285'lik bir değer elde edilir.

Deneme amacıyla gelişigüzel baralar seçilerek bu baralarda da TCSC ile seri kompanzasyon yapılmıştır. En iyi sonucun beklenildiği gibi sol özvektörden belirlediğimiz baralar arasında olduğu gözlenmiştir. Sistem genelde % 3,7'lik bir yükleme faktörüne sahipken TCSC kullanarak bu yükleme faktörü % 4,4'e

çıkılmaktadır. Bu iyi bir sonuç değildir. Doğu bölgelerinde gerilim seviyeleri normalde de düşük olduğu için bu baralarda seri kompanzasyon yaparak daha fazla güç iletmek gerilim seviyesini daha da düşürür.

FACTS cihazları ekonomik açıdan pahalı olduğu için, cihazı iyi sonuç verecek en uygun yere yerleştirmek gerekmektedir. Bu sonuçlara dayanarak bu sistem için, TCSC kullanımının ekonomik açıdan uygun olmadığı görülmüştür. Sistemde bir iyileştirme yapıldıktan sonra uygun olan yerlerde en iyi sonucu verecek şekilde seri kompanzasyon uygulanabilir.

Türkiye enerji iletim sistemindeki enerji ihtiyacı artışı gözönüne alındığında, ileriye dönük olarak, sistemde özellikle doğu bölgelerinde üretim birimlerinin yapılanması ihtiyacını doğurur.



KAYNAKLAR

- [1] **Kundur, P.,** 1994. Power System Stability and Control, EPRI Power System Engineering Series, McGraw Hill.
- [2] **Gyugyi, L.,** 1995. Solid-state Control of AC Power Transmission, Westinghouse Electric Corporation, Pittsburgh, Pennsylvania 15235.
- [3] **Öztürk, İ., O.,** 1998. Statik Var Kompanzatorü ile Reaktif Güç Kontrolü ve Kompanzasyonu, Yüksek Lisans Tezi, İ.T.U, Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] **Fuldner, A., H.,** 1997. Upgrading Transmission Capacity for Wholesale Electric Power Trade, Power Technologies, Inc.
- [5] **Bergen, A., R.,** 1986. Power System Analysis, Electrical and Computer Engineering Series, Prentice Hall.
- [6] **Gross, A., C.,** 1986. Power System Analysis, by John Wiley & Sons, Inc.
- [7] **Watanabe, H., E., and Barbosa, G.,** Principles of Operation of FACTS Devices, Electrical Engineering Department, Coppe-Federal University of Rio de Janeiro.
- [8] **Hingorani, N.G.,** 1991. FACTS Flexible AC Transmission System,' The Second Annual Transmission & Wheeling Conference , 21-22 November, Denver, CO.

- [9] **Anderson, P., M., and Farmer, R., G.,** 1996. Series Compensation of Power Systems, PBLSH. Inc.187 Calle Magdalena, Encinitas, California.
- [10] **Hingorani, NG.,** 1993. Flexible AC Transmission, IEEE reprinted from IEEE spectrum Volume 30, Number 4.
- [11] **Gotham, D., J., and Heydt, G., T.,** FACTS Device Models for Power Flow Studies ' Purdue University, W. Lafayette, IN 47907.
- [12] **Gyugyi, L.,** 1992. Unified Power Flow Control Concept for Flexible AC Transmission Systems, IEEE proceedings-C Vol.139, No 4.
- [13] **Halvarsson, P.,** 1995. Flexible AC Transmission Systems using Thyristor Controlled Series Capacitors, ABB Power Systems AB, Sweeden.
- [14] **Torgerson, D., R.,** 1995. Thyristor Controlled Series Capacitor Application, Western Area Power Administration, CIGRE & IEEE, Brazil Workshop FACTS, Rio de Janeiro, Brazil.
- [15] **Faur. T., F., and Canizares C., A.,** 1995. Effects of FACTS devices on system loadability 'Proc North American Power Symposium, Bozeman, Montana, 520-524.
- [16] **IEEE Working Group,** July 9-14, 1972. Common Data Format for the Exchange of Solved Load Flow Data, IEEE Power System Engineering Commitee, San Francisco.
- [17] **TEAŞ,** 1997. İşletme Faaliyet Raporu.
- [18] **Canizares, C., A., and Faur, Z., T.,** 1998. Analysis of SVC and TCSC Controllers in Voltage Collapse, 'IEEE/PES PE -200-PWRS-0-2-1998, in IEEE Trans. Power systems.

- [19] Canizares. C., A., and Berizzi. A., and Marannio, P., 1998. Using FACTS
Controllers to Maximize Available Transfer Capability, Bulk Power
Systems Dynamics and Control IV -Restructuring, August 24-28,
Santorini, Greece.**



EK A

1977 yılında toplam 106.777,4 Milyon kWh'lik enerji tüketime sunulmuştur. Bu enerjinin 104.285,1 Milyon kWh' i Türkiye Elektrik Santrallerinin üretimi ile sağlanmaktadır. 2.492,3 Milyon kWh'i enerji ise dış ülkelerden yapılan ithalatla sağlanmıştır. Bu tüketimin 106.506,4 Milyon kWh'ı Türkiye tüketimine aittir. 271 Milyon kWh'i ihraç edilmiştir [17].

1997 yılına ait Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücünün üretici firmalara ve kaynaklara göre dağılımı da tablo A.1' deki gibidir.

Tablo A.1 : Türkiye elektrik enerjisi kurulu gücü

KURULUŞLAR		KURULU GÜÇ (MW)	TOPLAM GÜÇ (MW)
TEAŞ	TERMİK	6.379,10	15.783,00
	HİDROLİK	9.403,90	
AYRICALIKLI ŞİRKETLER	TERMİK	106,00	716,3
	HİDROLİK	610,30	
ÜRETİM ŞİRKETLERİ	TERMİK	253,40	328,7
	HİDROLİK	75,30	
ÖZELLEŞTİRME İDARESİ			
SANTRALLERİ	TERMİK	3.284,00	3.284,00
OTOPRODÜKTÖRLER	TERMİK	1.764,30	1.777,40
	HİDROLİK	13,10	
TOPLAM	TERMİK	11.786,80	21.889,40

1997 yılı itibarıyla Türkiye elektrik enerji ihtiyacının karşılayan üretici kuruluşlar tablo A.2.'de belirtilmiştir.

Tablo A.2 : Türkiye'nin enerji ihtiyacını karşılayan kuruluşlar (1997)

KURULUŞLAR	ÜRETİM (milyon kWh)	Katkı(%)
TEAŞ	72.486,80	67,90
ÇAŞ	1.809,10	1,7
KEPEZ	404,70	0,4
ÜRETİM ŞİRKETLERİ	2.409,00	2,3
OTOPRODÜKTÖRLER	8.743,20	8,20
ÖZELLEŞTİRME İDARESİ	18.432,30	17,30
TÜRKİYE ÜRETİM TOPLAMI	104.285,10	97,7
GÜRCİSTAN	459,40	0,40
AZERBAYCAN	0,00	0
İRAN	169,80	0,2
BULGARİSTAN	1.863,10	1,7
İTHALAT TOPLAMI	2.492,30	2,3
TOPLAM TÜKETİME SUNULAN	106.777,40	100
GÜRCİSTAN	0	
AZERBAYCAN (NAHCIVAN)	271	
İHRACAT TOPLAMI	271	
TÜRKİYE ÜRETİM TOPLAMI	106.506,40	

1997 yılı verilerine göre Türkiye kurulu gücü 21.889.4 MW'dır. 1990-1997 yıllar arasındaki kurulu güç değişimi aşağıda gösterilmiştir.

Tablo A.3: Türkiye kurulu gücünün 1990-1997 yılları arasındaki gelişimi

YILLAR	TOPLAM (MW)	ARTIS (%)
1990	16.315,10	3,20
1991	17.206,60	5,5
1992	18.713,60	8,8
1993	20.335,10	8,7
1994	20.857,30	2,6
1995	20.951,80	0,5
1996	21.246,90	1,40
1997	21.889,40	3,00

Türkiye elektrik sisteminin 1997 yılı anı puantı 25 Aralık 1997, saat 17.30'da 16.926.1 MW olmuştur. 1996 yılı puantına göre %11.1'lik bir artış hesaplanmıştır.

Türkiye toplam puantına :

- TEAŞ santralleri 14.770,7 (%87,3)
- Diğer kuruluş santralleri 1.795,4 MW (%10,6)

oranında katkıda bulunmuşlardır. Tablo A.4 'de 1997 yılı puantı ile 1996 yılı puantının karşılaştırılması verilmiştir [17].

Tablo A.4 : 1996-1997 puant yüklerinin karşılaştırılması

Puant	1997 yılı MW	Gün-Saat	1996 yılı MW	Artış(%)	Ort Güç	Çalışma Süresi	Yük faktörü
Ani	16.926,10	25-17:30	15.230,70	11,1			
Saatlik	16.717,00	22-18:00	15.136,00	10,4	11.904,70	6.238,30	71,2

Türkiye Enerji İletim Sistemindeki Şönt Reaktörler ve Değerleri:

1. Ankara II (Sincan) - Elbistan hattında 1x 120 MVar
2. Ankara II (Sincan) - Elbistan II B hattında 1x 100 MVar
3. Ankara II (Sincan) - Kayabaşı hattında 1x 60 MVar
4. Atatürk - Elbistan II B hattında 1x150 MVar
5. Çarşamba - Kayabaşı hattında 1x 80 MVar
6. Elbistan - Ankara II (Sincan) hattında 1x 80 MVar
7. Elbistan II B - Ankara II (Sincan) hattında 1x120 MVar
8. Erzin - Andırın hattında 1x 60 MVar
9. Karakaya - Atatürk hattında 1x 72 MVar
10. Kayabaşı - Çankırı hattında 1x80 MVar
11. Kayabaşı - Ankara II (Sincan) hattında 1x80 MVar
12. Keban - Kayseri kapasitör hattında 2x 120MVar
13. Keban - Elbistan hattında 1x 60 MVar
14. Osmana - Çankırı hattında 1x80 MVar
15. Seydişehir - Adana hattında 1x 60 MVar
16. Seyitömer 380kV bara' da 1x 120 MVar
17. Yeşilhisar - Temelli hattında 1x 150 MVar
18. Temelli - Gebze hattında 1x 150 MVar

değerinde şönt reaktörler bulunmaktadır.

Türkiye Enerji İletim Sistemindeki Seri Kapasitörler ve Değerleri

1. Gölbaşı - Kayseri kapasitör 380kV çift devre hattında 2x 35Ω
2. Ankara II (Sincan) - Elbistan II B 380kV hattında 2x 33,3Ω
3. Kayabaşı - Çankırı 380kV hattında 33Ω
4. Kayabaşı - Ankara II (Sincan) 380kV hattında 33Ω
5. Kayabaşı - Sivas D.Ç 380kV hattında 33Ω
6. Gebze - Temelli 380kV hattında 25Ω

değerinde seri kapasitörler bulunmaktadır.

Türkiye Enerji İletim Sistemindeki 154kV gerilim seviyesindeki bazı şönt kapasitörler ve değerleri

1. Dudullu -10 MVAR
2. Davutpaşa-40 MVAR
3. Denizli2-10 MVAR
4. Eskişehir2-10MVAR
5. G.Antep2-10 MVAR
6. G.Antep-20 MVAR
7. Işıklar-40 MVAR
8. Gemlik-10 MVAR
9. Karamürsel-10 MVAR
- 10.Kartal-20 MVAR
- 11.Küçükbakkalköy-20 MVAR
- 12.Kuleönü10 MVAR
- 13.Mamak-20 MVAR
- 14.Sağmalcılar-40 MVAR
- 15.Ümraniye-30MVAR
- 16.Y.Bosna—40MVAR
- 17.Yalova-10MVAR
- 18.Diyarbakır2-10 MVAR
- 19.Çinkur-5 MVAR
- 20.Aydın-5 MVAR
- 21.Akköprü-40 MVAR
- 22.Büyükçekmece-20 MVAR
- 23.Balıkesir1-5 MVAR
- 24.Bandırma10 MVAR
- 25.Bursa3-20 MVAR
- 26.BursaSan-21 MVAR
- 27.Çan-5 MVAR
- 28.Çankaya-20 MVAR
- 29.Silahtar-20 MVAR
- 30.Kars-10 MVAR

Base Solution:

SYSTEM POWER BASE

100.0 OTHER COMMENTS HERE

Loading factor -> 0

AC buses -> 551

PV buses -> 54

AC elem. -> 714

V Reg. Trf. -> 54

PQ Reg. Trf. -> 0

DC buses -> 0

DC lines -> 0

SVC's -> 0

TCSC's -> 0

No. Areas -> 0

Iterations -> 9 (Maximum = 50)

Max. p.u. mismatch -> 8.317e-07 (Tolerance = 0.0001)

Reference Bus(es) -> 2201 Gokcekay (Angle= 0.00 deg.)

***** AC RESULTS *****

		L=lower limit		H=higher limit		O=over limit		U=under limit			
A	i	Bus	V(pu)	Pg(MW)	Pload	Pshunt	j	Bus	C	Pi(j	Plusses
n		Name	d(deg)	Qg(MVAR)	Qload	Qshunt		Name	k	Qi(j	Qlosses

0 1700	AliagaII	1.0292	0.00	0.00	0.00	0.00	1705	Aliaga2 3	236.95	0.00	1.0259	
		-11.02	0.00	0.00	0.00			Aliaga2 1	40.85	41.93	0.00	Aliaga2
							1705		243.09	0.00	1.0000	V 1705
							1800	Soma 1	78.54	44.97	0.00	
									-199.22	0.90		
							1702	Izmir 1	-113.81	-35.62		
									-93.52	0.10		
									7.62	-41.81		
							1701	Isiklar 1	-187.29	0.38		
									-13.20	-21.44		
0 2701	Altinkay	1.0200	637.11	0.00	0.00	0.00	2705	Altinkay 1	106.39	0.00	1.0000	V 2705
		22.99	-186.41	0.00	0.00				-6.42	9.06	0.00	Altinkay
							2304	Kayabasi 1	418.37	4.11		
									-65.97	-15.33		
							2702	Carsamba 1	112.35	0.29		
									-114.01	-57.27		
0 1200	AmbarDG	1.0104	0.00	0.00	0.00	0.00	1206	AmbarDGA 2	28.40	0.00	1.0000	V 1200
		-6.82	0.00	0.00	0.00				-37.02	1.71	0.00	AmbarDG
							1202	Ikitelli 1	-28.40	0.01		
									37.02	-11.73		
0 3001	Ataturk	1.0500	2150.75	0.00	0.00	0.00	3017	Ataturk2 1	356.61	0.00	1.0259	V 3017
		34.84	349.56	0.00	-165.38				125.81	47.99	0.00	Ataturk2
							4001	Goksun 2	494.36	5.24		
									86.31	-39.52		
							3008	G.Antep 1	823.62	10.32		
									87.51	51.85		
							3010	Karakaya 1	5.55	0.00		
									-52.06	-103.16		
							3003	ElbistanIIB 1	470.60	5.72		
									-63.38	-52.59		
0 1500	Balikesir	1.0304	0.00	0.00	0.00	0.00	1501	Balikes2 2	243.95	0.00	1.0259	V 1501
		-9.87	0.00	0.00	0.00	5.31			94.10	47.01	0.00	Balikes2
							1800	Soma 1	-103.30	0.40		
									-145.14	-31.04		
							1400	Bursan 1	-140.65	0.67		
									56.35	-50.25		

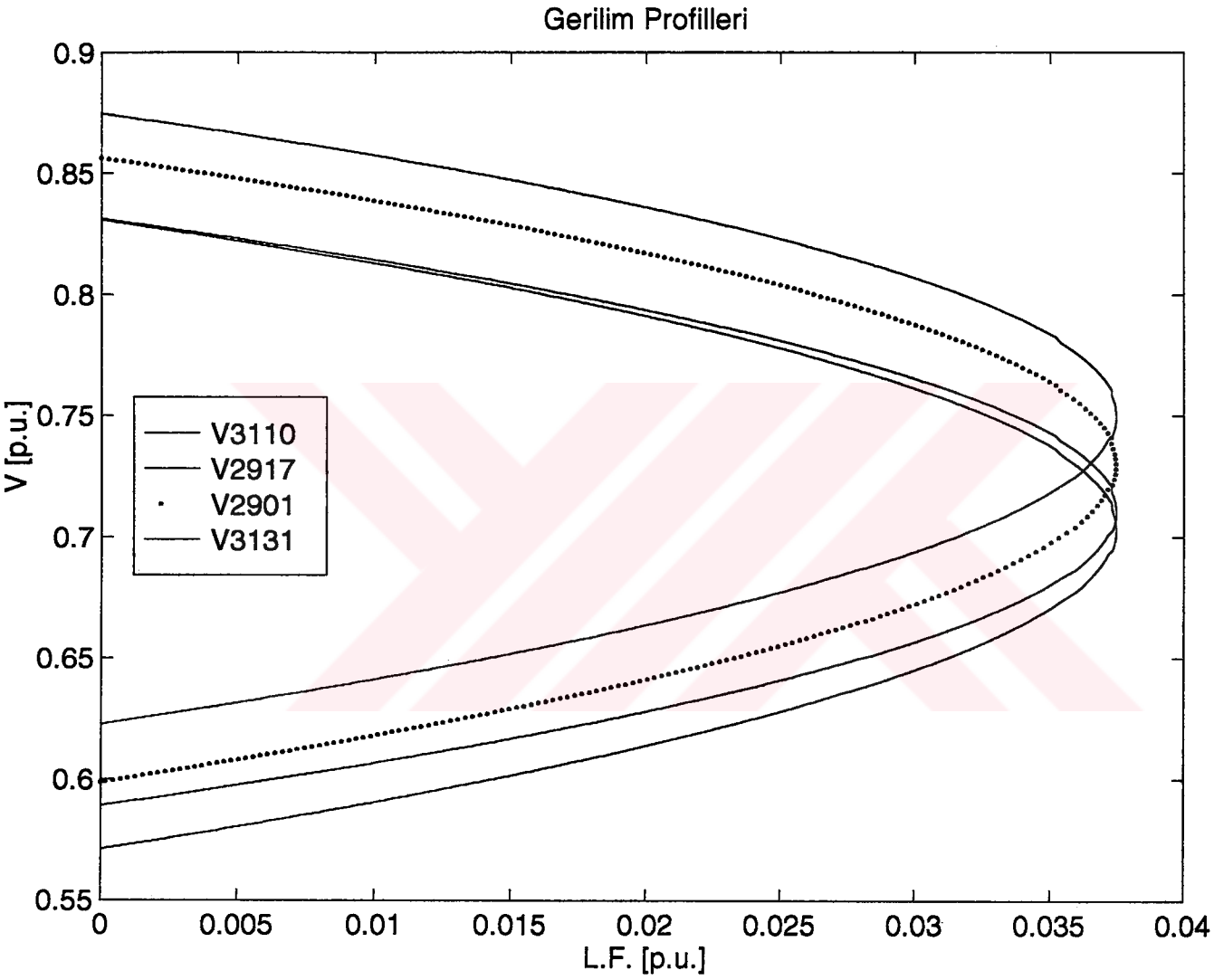
[illegible]

0 1807	Morsan	0.8624	0.00	35.50	0.00	5025	BornovHU	1	0.00	0.00	0.00	0.00
		-30.76	0.00	11.80	0.00	1806	Manisa	1	-35.50	0.06	-1.32	-1.32
0 5025	BornovHU	0.8627	0.00	0.00	0.00	1807	Morsan	1	0.00	0.00	0.00	0.00
		-30.77	0.00	0.00	0.00				0.00	-1.32	-1.32	-1.32
0 1513	Gobel	0.9758	0.00	16.60	0.00	1505	Bandirma	1	53.41	0.89	0.89	0.89
		-24.41	0.00	5.00	0.00	1501	Balikes2	1	-70.01	1.76	-0.30	-0.30
									-3.00	1.78	1.78	1.78
0 1514	Gonen	0.9743	0.00	14.20	0.00	1507	Can	1	74.54	0.78	0.78	0.78
		-25.66	0.00	4.90	0.00	1501	Balikes2	1	-88.74	1.22	2.11	2.11
									-12.89	4.84	4.84	4.84
0 1505	Bandirma	0.9614	0.00	30.00	0.00	1515	Narlikoy	1	22.52	0.10	0.10	0.10
		-27.47	0.00	12.00	9.24	1513	Gobel	1	-52.52	0.89	-1.59	-1.59
									1.70	-0.30	-0.30	-0.30
0 1515	Narlikoy	0.9593	0.00	7.00	0.00	1506	Biga	1	15.42	0.14	0.14	0.14
		-28.22	0.00	2.00	0.00	1505	Bandirma	1	-22.42	-4.92	-4.92	-4.92
									2.87	0.10	0.10	0.10
0 1506	Biga	0.9550	0.00	11.10	0.00	1507	Can	1	4.19	0.01	0.01	0.01
		-29.86	0.00	5.20	0.00	1515	Narlikoy	1	-15.29	-2.71	-2.71	-2.71
									-0.05	0.14	0.14	0.14
0 1507	Can	0.9570	0.00	32.00	0.00	1508	Canakmt	1	25.30	-4.92	-4.92	-4.92
		-30.13	0.00	4.20	4.58	1509	Canakkal	1	3.85	0.15	0.15	0.15
						1514	Gonen	1	-0.03	-3.40	-3.40	-3.40
						1506	Biga	1	-73.76	0.26	0.26	0.26
									-5.87	-4.78	-4.78	-4.78
									-4.18	0.78	0.78	0.78
									2.11	2.11	2.11	2.11
									-4.18	0.01	0.01	0.01
									2.44	-2.71	-2.71	-2.71

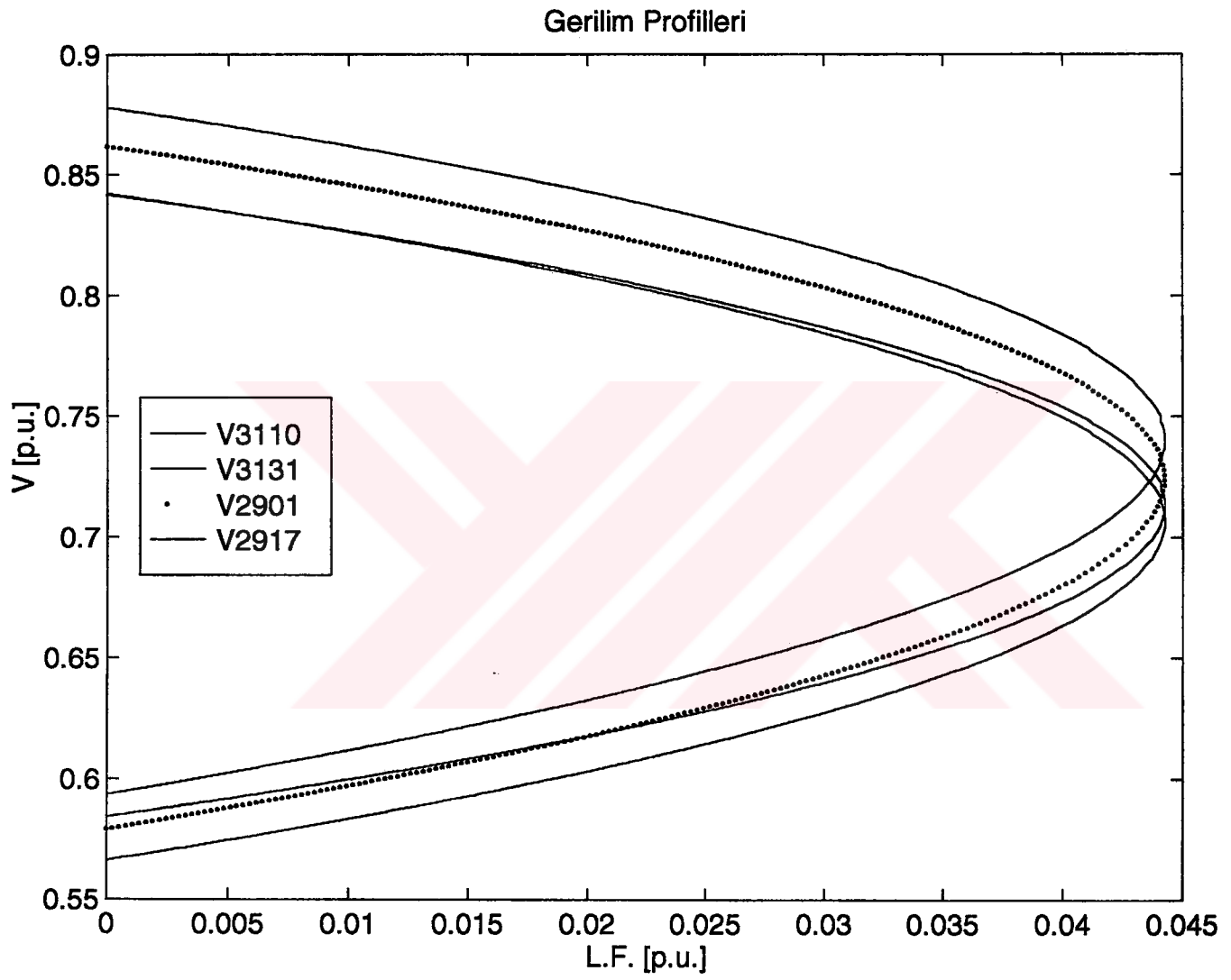
0 3114	Ergani	1.0034	0.00	21.50	0.00	3121	Maden 1	19.87	0.03
		25.20	0.00	2.50	0.00	3109	Diyar3A 1	0.32	-0.78
								-41.37	0.58
								-2.82	-1.98
0 3104	Batman	0.9959	1.32	91.00	0.00	3130	Siirtcim 1	24.22	0.22
		23.86	0.00	15.00	0.00	3109	Diyar3A 1	9.40	-2.60
								-74.38	0.40
								-21.54	-3.29
						3109	Diyar3A 1	-39.52	0.85
								-2.85	-3.28
0 3130	Siirtcim	0.9776	0.00	24.00	0.00	3104	Batman 1	-24.00	0.22
		22.65	0.00	12.00	0.00			-12.00	-2.60
0 3106	Bingol	0.8854	0.00	9.90	0.00	3124	Mus 1	80.89	4.72
		8.71	0.00	0.50	0.00	3116	Ferrokro 1	3.76	10.55
								-90.79	4.51
								-4.26	10.52
0 3124	Mus	0.8370	0.00	26.10	0.00	3131	Tatvan 1	50.07	1.49
		-2.37	0.00	3.80	0.00	3106	Bingol 1	-10.60	1.70
								-76.17	4.72
								6.80	10.55
0 3131	Tatvan	0.8309	0.00	12.00	0.00	3110	Dodan 1	-11.41	0.09
		-8.02	0.00	0.00	0.00	3112	Engil 1	1.73	-3.15
								29.09	0.68
								-4.67	-1.93
						3102	Adilceva 1	18.90	0.21
								-9.35	-1.91
						3124	Mus 1	-48.58	1.49
								12.29	1.70
0 3102	Adilceva	0.8342	0.00	0.00	0.00	3113	Ercis 1	18.70	0.18
		-9.93	0.00	0.00	0.00	3131	Tatvan 1	-7.45	-1.94
								-18.70	0.21
								7.45	-1.91
0 3112	Engil	0.8196	0.00	8.80	0.00	3134	Van 1	19.62	0.13
		-12.46	0.00	3.30	0.00	3131	Tatvan 1	-6.03	-1.10
								-28.42	0.68
								2.73	-1.93

0 3110	Dodan	0.8314	0.00	3.20	0.00	3129	Slirt 1	-14.71	0.06
		-6.51	0.00	0.00	0.00	3131	Tatvan 1	4.88	-1.03
								11.51	0.09
								-4.88	-3.15
0 3129	Slirt	0.8309	0.00	8.90	0.00	3126	PS3 1	-23.66	0.52
		-5.81	0.00	1.90	0.00	5052	SlirtcHU 1	4.81	-2.80
						3110	Dodan 1	0.00	0.00
								-0.81	-0.81
								14.76	0.06
								-5.91	-1.03
0 5052	SlirtcHU	0.8310	0.00	0.00	0.00	3129	Slirt 1	0.00	0.00
		-5.82	0.00	0.00	0.00			0.00	-0.81
0 5011	Diyar3B	0.9702	0.00	0.00	0.00	3108	Diyar2 1	121.10	1.10
		20.15	0.00	0.00	0.00	3108	Diyar2 1	21.49	2.82
								117.81	1.07
								20.75	2.70
						3100	Diyarbak 2	-238.91	0.00
								-42.24	45.83
								0.00	1.0000
								0.00	0.00
0 3108	Diyar2	0.9571	0.00	77.00	0.00	3128	PS4 1	74.64	4.67
		18.60	0.00	13.00	9.16	3115	Etifosfa 1	14.12	8.27
						5011	Diyar3B 1	85.10	2.87
						5011	Diyar3B 1	18.76	5.73
						5011	Diyar3B 1	-120.00	1.10
						5011	Diyar3B 1	-18.67	2.82
						5011	Diyar3B 1	-116.74	1.07
								-18.04	2.70
0 3115	Etifosfa	0.9077	0.00	18.40	0.00	3122	Mardin 1	63.83	1.37
		12.97	0.00	3.80	0.00	3108	Diyar2 1	9.23	1.88
								-82.23	2.87
								-13.03	5.73
0 3128	PS4	0.8735	0.00	14.90	0.00	3122	Mardin 1	-22.25	0.22
		7.50	0.00	3.20	0.00	3127	PS3A 1	-0.07	-2.12
								77.32	1.52
						3108	Diyar2 1	2.72	3.28
								-69.97	4.67
								-5.85	8.27

0	3127	PS3A	0.8556	0.00	12.00	0.00	0.00	3126	PS3 1	63.80	1.92	
			3.87	0.00	0.60	0.00				-1.16	3.44	
								3128	PS4 1	-75.80	1.52	
										0.56	3.28	
0	3126	PS3	0.8337	0.00	37.70	0.00	0.00	3133	Uludere 1	0.00	0.00	
			-1.80	0.00	6.00	0.00				-3.00	-3.00	
								3129	Siirt 1	24.18	0.52	
										-7.61	-2.80	
								3127	PS3A 1	-61.88	1.92	
										4.61	3.44	
0	3122	Mardin	0.8808	0.00	40.00	0.00	0.00	3128	PS4 1	22.46	0.22	
			9.30	0.00	9.40	0.00				-2.05	-2.12	
								3115	Etifosfa 1	-62.46	1.37	
										-7.35	1.88	
0	3133	Uludere	0.8360	0.00	0.00	0.00	0.00	3126	PS3 1	0.00	0.00	
			-1.85	0.00	0.00	0.00				0.00	-3.00	
0	3134	Van	0.8191	0.00	34.00	0.00	0.00	3113	Ercis 1	-14.51	0.17	
			-13.64	0.00	0.00	0.00				-4.93	-3.40	
								3112	Engil 1	-19.49	0.13	
										4.93	-1.10	
0	3017	Ataturk2	1.0397	0.00	0.00	0.00	0.00	3018	Ataturk 1	26.66	0.00	
			27.71	0.00	0.00	0.00				-2.05	-0.05	
								3054	Urfacim 1	190.86	3.76	
										60.98	25.19	
								3013	Adiyacmt 1	25.61	0.05	
										-0.69	-2.35	
								3020	Birecik 1	113.48	4.33	
										19.58	9.94	
								3001	Ataturk 1	-356.61	0.00	1.0259 V 3017
										-77.82	47.99	Ataturk2
0	3020	Birecik	0.9848	0.00	43.30	0.00	0.00	3051	Suruc 1	65.85	1.44	
			20.98	0.00	7.50	0.00				5.22	1.19	
								5034	G.Ant2HU 1	0.00	0.00	
										-3.08	-3.08	
								3017	Ataturk2 1	-109.15	4.33	
										-9.64	9.94	



EK D



ÖZGEÇMİŞ

Aysu Özyürek 17.11.1974 tarihinde Manisa’da doğdu. Haziran 1992’de Nişantaşı Anadolu Lisesini bitirdi. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği bölümünde eğitime başladı. Haziran 1996’da mezun olup, aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği programında Yüksek lisans eğitimine başladı. Şu anda yüksek lisans tez çalışmalarını sürdürmektedir.

