

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Statik var Kom., Ener. İle. ve
Dağ. Sİst. Uyg.

Yüksek Lisans Tezi

Aslan İnan

1992

2
2/228

YILDIZ TEKNİK UNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK VAR KOMPANZATÖRLERİNİN
ENERJİ İLETİM VE DAĞITIM
SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELK. MÜH. Aslan İNAN

İSTANBUL 1992

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
KÜTÜPHANE DOKÜMANTASYON
DAİRE BAŞKANLIĞI

Kot	: R 152 228
Alındığı Yer	: Fen Bil. Ens.
Tarih	: 17.4.95
Fatura	:
Fiyatı	: 25.000,00
Ayniyat No	: 1-5
Kayıt No	: 51084
UDC	:
Ek	:

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
D.B. No. 49920

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

69/209 arası çelikceke.

STATİK VAR KOMPANZATÖRLERİNİN
ENERJİ İLETİM VE DAĞITIM
SİSTEMLERİNE UYGULANMASI

Y. T. Ü.
KÜTÜPHANE DOK. DAİ. BAŞKANLIĞI

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELK. MÜH. Aslan İNAN

İSTANBUL 1992

ÖNSÖZ

Alternatif akım iletim ve dağıtım tesislerinde görülen en önemli sorunlardan birisi de reaktif güç kompanzasyonudur. Bu sebeple reaktif güç kompanzasyonu tanıtılmış, matematiksel esasları çıkarılmış ,teknolojik gelişmeler paralelinde ortaya çıkan modern reaktif güç kompanzasyon teknikleri incelenmiş ve uygulamaları anlatılmıştır.

Bu tez çalışmamı yaparken değerli görüş ve düşünceleri ile bana yön veren hocam Sayın Prof. Dr. Hüseyin ÇAKIR 'a teşekkürü bir borç bilirim.

ASLAN İNAN

Eylül, 1992

İÇİNDEKİLER

ÖZET

SUMMARY

BÖLÜM 1.	GİRİŞ.....	1
BÖLÜM 2.	REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU	
2.1.	Kompanzasyonun Tanımı.....	6
2.2.	İdeal Kompanzatör.....	9
2.3.	Reaktif Güç Tüketicileri.....	10
2.4.	Reaktif Güç Üretimi.....	12
2.4.1.	Dinamik Faz Kaydırıcıları.....	12
2.4.2.	Statik Faz Kaydırıcıları.....	13
BÖLÜM 3.	KOMPANZASYONUN MATEMATİKSEL ESASLARI	
3.1.	Temel Bağlıntılar.....	14
3.2.	Reaktif Güç ve Gerilim Arasındaki İlişki.....	15
3.3.	Gerilim Değişimlerinin Reaktif Güce Bağlı İfadeleri.....	17
3.4.	Kondansatörde Gerilim, Akım ve Güç İfadeleri..	21
3.5.	Kondansatör Gücü Hesabı.....	24
3.6.	Güç Kompanzasyonun Yararları.....	30
3.6.1.	Reaktif Gücün Etkileri.....	30
3.6.2.	Şebekeye ve Tüketicie Sağlayacağı Yararlar..	31
3.6.2.1.	Şebekeye Sağlayacağı Yararlar.....	31
3.6.2.2.	Tüketicie Sağlayacağı Yararlar.....	36
BÖLÜM 4.	KOMPANZASYON TESİSLERİNİN SINIFLANDIRILMASI	
4.1.	Tesis Şekline Göre Kompanzasyon.....	37
4.1.1.	Münferit Kompanzasyon.....	37
4.1.2.	Grup Kompanzasyon.....	38
4.1.3.	Merkezi Kompanzasyon.....	39
4.2.	Kondansatörlerin Bağlanma Şekillerine Göre Kompanzasyon.....	40
4.2.1.	Seri Kondansatörler İle Kompanzasyon.....	41
4.2.2.	Sabit Paralel Kondansatör İle Kompanzasyon...	42

BÖLÜM 5.	GUÇ KOMPANZASYONUNUN MATEMATİKSEL ANALİZİ	
5.1.	Tanıtım.....	43
5.2.	Yük Kompanzasyonun Esasları.....	44
5.3.	Yük Akımının Simetrili Bileşenler Cinsinden Kompanzasyon İhtiyacı.....	50
5.4.	Yük Akımı Ve Bileşenleri Cinsinden Kompanzasyon İhtiyacı.....	56
5.5	İletim Hattı Gerilim Desteği.....	60
5.6	Örnekleme.....	65
BÖLÜM 6.	STATİK VAR KOMPANZATÖRLER	
6.1.	Tanıtım.....	69
6.2.	Kompanzatör Elemanları.....	70
6.3.	Statik Var Kompanzatörlerin Temel Özellikleri.....	73
6.4.	Tristörlü Kompanzatör Konfigürasyonları.....	74
6.4.1.	Tristör Kontrollü Reaktör (TCR).....	76
6.4.2.	Tristör Anahtarlamaalı Kondansatörler (TSC)...	93
6.4.3.	Sabit Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktör (FC-TCR).....	97
6.4.3.1.	Sabit Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktörle Güç Faktörü Kondansatörün Çalışması.....	104
6.4.3.2.	Sabit Filtre-Tristör Kontrollü Reaktörün (FF-TCR) Analizi.....	115
6.4.4.	Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktör.....	124
BÖLÜM 7.	STATİK VAR SİSTEMLERİNİN KONTROLU VE MODELLEMESİ	
7.1.	Kompanzatörün Gerilim-Akım Karakteristiği...	138
7.2.	Kontrol Metodları.....	140
7.3.	Güç Elektronikinde Otomatik Kontrol.....	145
7.4.	Kontrol Aralığının Belirlenmesi.....	146
7.5.	Statik VAR Kompanzatörlerinin Modellemesi...	149
7.5.1.	Statik ve Quasi-Stasyonier Çalışma Simülasyonu.....	149

7.5.2.	Dinamik Çalışma Simülasyonu.....	149
7.6.	SVC'lerin Seçim Kriterleri ve Güç Sistem Uygulamalarındaki Rolü.....	152
BÖLÜM 8.	STATİK KOMPANZATÖRLERİN KULLANIM SAHALARI ✓	
8.1.	Temel Yaklaşımlar.....	157
8.2.	Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin SVC Yöntemi...	158
8.2.1.	Klasik Kompanzasyonda Karşılaşılan Sorunlar.....	158
8.2.2.	Kıyıcı İle Kompanzasyonda Otomatik Kontrol...	160
8.3.	Düşük Kapasiteli Güç Sistemlerinin Yüklenebilirlik Problemine Potansiyel Bir Çözüm: Kontrol edilebilir VAR Kompanzatör..	166
8.4.	Tristör Kontrollü Reaktif Güç ile İletim Kapasitesinin İyileştirilmesi.....	180
8.4.1.	Sönümün Tristör Kontrollü Kondansatörler ve Reaktörler ile İyileştirilmesi.....	181
8.4.2.	Stabilite Amaçlarına İlişkin SVC Uygulama Çalışmaları.....	194
SONUÇLAR.....		207
KAYNAKLAR		
EKLER		
ÖZGEÇMİŞ		

ÖZET

Reaktif güç, elektrik enerji sistemlerinde önemli bir problem olarak ortaya çıkmaktadır. Güç sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmak, verimliliği artırmak ve enerji tutumluluğunu sağlamada en etkin önlemlerden biri de " Reaktif Güç Kompanzasyonu " dur. Bu bakımdan kompanzasyon, teknik ve ekonomik bir zorunluluktur.

Bu tez çalışmasında ilk olarak genel bir fikir vermesi için reaktif güç kompanzasyonun matematiksel incelenmesi yapılarak sağladığı faydalar ile kompanzasyon tesisleri sınıflanmış, dengesiz yüklerin reaktif güç kompanzasyonuna ait matematiksel ifadeler çıkarılmıştır. Daha sonraki bölümlerde gerek endüstriyel sistemlerin güç katsayılarının dinamik olarak düzeltmede gerekse uç gerilim kararlılığını sağlamada yaygın olarak kullanılmaya başlanan "tristör kontrollü güç kompanzasyon" düzenleri tartışılmış ve karşılaştırılmıştır. Son olarak da bu modern kompanzasyon düzenlerine (statik var kompanzatörleri) ait uygulama örnekleri verilmiştir.

Tristör kontrollü var kompanzatörleri , özellikle hızlı değişen olaylarda (ark fırını uygulamaları vb gibi) önemli bir yer tutmaktadır. Kontrol ve kumanda esnekliğinin yanı sıra optimum çözüm ve hızlı cevap verebilme niteliği ile reaktif güç, kompanzasyon sistemleri içerisinde önemli yeri haizdir.

SUMMARY

USE OF STATIC REACTIVE POWER COMPENSATORS IN POWER SYSTEMS

In recent years, there has been a rapid increase in the number of thyristor-controlled shunt compensators used in industrial and utility systems for dynamic power factor and terminal voltage stabilization. These thyristor-controlled shunt compensators function as variable reactances operated in both the inductive and capacitive domains.

The use of static compensators in power supply networks and at load centres is concentrated mainly there where rapid and strong fluctuations in reactive load may be expected. Besides directly improving the power system quality, for instance the static and dynamic stability, the voltage maintenance and dynamic control of the reactive power flow, etc., the static compensator also makes a large contribution to more extensive utilization of the transmission capacity.

Static var compensators (SVC's) are characterized by fast response, high reliability, low operating cost and flexibility. SVC's ideally suited for applications in which fast control of reactive power is required.

Shunt compensators are used to control (or regulate) the transmission voltage at a given terminal and to provide power factor correction. The fast response of a SVC makes it an ideal solution to many voltage fluctuation problems experienced on distribution systems. Two types of compensation problems are normally encountered in practical applications. The first is load compensation where the requirements are usually to reduce or cancel the reactive power (VAR) demand of large, and fluctuating

industrial loads, such as drawn from the ac supply lines. These types of heavy industrial loads are normally concentrated in one plant and served from one network terminal. The second type of compensation is related to the voltage support of transmission lines at a given terminal in the face of disturbances of both loads and generation.

In load compensation there are three main objectives:

- Power factor correction
- Improvement of voltage regulation
- Load regulation

These systems are being applied on transmission systems to provide voltage regulation, reactive power support, and increased system stability.

Many different static VAR system configurations are possible. The choice of a configuration depends on a number of factors; reactive power requirements, loss characteristics, harmonic generation and cost. Most of the static VAR systems fall into one of following categories:

1. Thyristor-switched capacitors (TSC)
2. Thyristor-controlled reactors (TCR)
3. Thyristor-switched capacitors and controlled reactors

For any SVC scheme, the firing angle control of the thyristor banks determines the equivalent shunt admittance presented to the power system. Although the basic arrangement of compensation systems are always similar, the control circuit differs from case to case.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Dünyamızın son yıllarda karşı karşıya kaldığı enerji krizi,araştırmacıları bir yandan yeni enerji kaynaklarına yöneltirken diğer yandan daha verimli sistemlerin tasarımlanması ve boşa giden elektrik enerjisinin kazanılması yönünde yapılan çalışmaların yoğunlaşmasına neden olmuştur.

Elektrik enerjisi, bulunup kullanılabilir duruma getirildiğinden bu yana en yaygın biçimde kullanılan bir enerji türü olmuştur.Bu enerji,diğer enerji türlerine göre bazı üstünlüklere sahiptir.Öteki enerji türlerine kolayca dönüşebilir, artık bırakmaz, taşınması ve dağıtımı kolaydır,küçük birimler halinde kullanılabilir.

Bilinen enerji kaynaklarının tükenmekte oluşu,artan medeniyet seviyesi elektrik enerjisine olan ihtiyacı arttırmaktadır.Bilindiği gibi sanayileşmenin ana girdilerinden başta geleni elektrik enerjisidir.Elektrik enerjisinin kullanıma kaliteli,sürekli,yeterli ve ucuz sunulması esastır.Özellikle 1970'lerin başında görülen petrol krizi nedeniyle bu dört özelliğin sağlanmasında güçlüklerle karşılaşmıştır.Bu durum araştırmacıları,yeni enerji kaynakları bulmaya ve enerjinin kullanımı sırasında ortaya çıkan kayıpları azaltma çareleri aramaya yöneltmiştir.

Giderek artan enerji ihtiyacını karşılamak için de,yeni santraller kurulması ile birlikte,enerji ekonomisi yönünden mevcut tesislerle ihtiyacı karşılayabilmek amacıyla bazı idari ve teknik tedbirlere başvurulur.Bu tedbirler sırayla;yaz saati uygulaması,puvant zamanlarındaki enerji sarfiyatını sınırlamak için yüksek ücretli tarife konması ve en önemli teknik tedbirlerde güç katsayısının düzeltilmesi olarak özetlenebilir.

Elektrik enerjisi bugün yalnız alternatif akım enerjisi olarak üretilir ve dağıtılır.Elektrik

enerjisi, üretimden kullanıma kadar hemen her yerde kayıplara uğramaktadır. Bu kayıplar, özellikle iletkenlerin neden olduğu I^2R şeklindeki güç kayıpları ve yüksek veya çok yüksek gerilimlerin sebep olduğu korona kayıplarıdır. Üretim, iletim ve kullanım aşamalarında kullanılan cihazlar ve yükler omik dirençlerinin yanı sıra indüktif ve kapasitif dirençlere de sahiptir. Alternatif gerilimin dalga şekli referans alındığında, akımın bu eğriden ϕ açısı kadar ileride (kapasitif durum) veya geride (indüktif durum) olduğu görülür. Bu durum faz farkı ile açıklanır. Faz farkı ancak saf omik olduğu durumda sıfırdır. İşte bu fark akımın ,aktif ve reaktif gibi iki bileşene ayrılmasına neden olur. Böylelikle tüketicilerin şebekeden çektikleri alternatif akım, biri aktif akım ve diğeri reaktif akım olmak üzere iki bileşenden oluşur. Aktif akımın meydana getirdiği aktif güç, tüketici tarafından faydalı hale getirilir; örneğin motorlarda mekanik güce, ısı tüketicilerinde termik güce ve aydınlatma tüketicilerinde aydınlatma gücüne dönüşür. Reaktif akımın meydana getirdiği reaktif güç ise faydalı gücü çevrilemez. Reaktif güç, yalnız alternatif akıma bağlı bir özellik olup, elektrik tesislerine istenmeyen bir şekilde tesir eder; generatörleri, transformatörleri, hatları, bobinleri füzuli işgal eder ve lüzumsuz yere yükler. Ayrıca bunların üzerinde ilave ısı kayıplarına ve gerilim düşümlerine yol açar. Aktif güç enerjisi normal sayaçlarla tesbit edildiği halde, reaktif enerji böyle bir sayaç ile kontrol edilemez, bunu kayıt etmek için ayrı bir reaktif güç sayacına ihtiyaç vardır.

Her ne kadar reaktif güç faydalı güce çevrilemez ise de bundan tamamen de vazgeçilemez. Zira elektrodinamik prensibine göre çalışan genaratör, transformatör, bobin ve motor gibi bütün işletme araçlarının normal çalışmaları için gerekli olan magnetik alan, reaktif akım tarafından meydana getirilir. bilindiği gibi endüksiyon prensibine göre çalışan bütün makinalar ve cihazlar, magnetik alanın meydana getirilmesi için bir mıknatıslama akımı çekerler; işte bu

mıknatıslama akımı reaktif akımdır. Onun için faydalı aktif gücün yanında, mutlaka reaktif güce de ihtiyaç vardır. Bu sebeple bütün alternatif akım tesisleri, aktif gücün yanında reaktif gücün de çekileceği göz önünde bulundurularak boyutlandırılır.

Alternatif akımın sağladığı bir çok üstünlükler karşısında kaçınılmaz olarak birlikte getireceği reaktif direnç ve reaktif güç, şebekelerde ve tesislerde, istenmeyen bir çok etkenlerin oluşmasına yol açar. Bunları önlemek amacıyla kompanzasyona baş vurulur. Genel olarak indüktif karakterde olan gücü kompanze etmek için kapasitif güç üreten cihazlardan faydalanılır. Günümüzde elektrik tesislerinde kompanzasyonun yapılması teknik ve ekonomik bir zorunluluktur. Önemli bir problem olan gerilim ve reaktif güç akış kontrolü problemi ideal bir alternatif akım şebekesine sahip olabilmek için çözölmelidir. Elektrik tesislerinin ve yükün ihtiyacı olan reaktif gücün belli teknikle kullanarak karşılanması "Reaktif Güç Kompanzasyonu" olarak adlandırılır. İdeal bir alternatif akım şebekesi için reaktif güç kompanzasyonu şarttır. İdeal bir alternatif akım şebekesinde, şebekenin her noktasında gerilim ve frekans sabit ve harmoniksiz olmalıdır. Ayrıca güç faktörü de bir veya bire yakın olmalıdır. Alternatif akım şebekesine bağlı olan cihazlar veya yükler belirli gerilim frekanslarında optimum olarak çalışacak şekilde tasarlanır. Bu gerilim ve frekansın değişmesi halinde optimum çalışmazlar. Buradan hareketle, bir alternatif akım şebekesinin kalitesi beş temel kriterle ifade edilir:

- gerilim ve frekansın sabitliği
- güç faktörünün bire yakın olması
- sürekli enerji verebilmesi (kesintisiz olması)
- faz gerilim ve akımlarının dengeliliği
- harmonik miktarının belli sınırlar içinde kalması

Bu kaliteyi tatturabilmek için reaktif güç kompanzasyon cihazlarının kullanılması gerekir. Önceleri yüklerin üretim noktalarına yakın olmasından dolayı, yükün reaktif güç ihti-

yacı, üretim için kullanılan senkron generatörün uyarma akımı değiştirilerek temin ediliyordu. Zamanla talebin artması, yüklerin üretim noktalarından uzaklaşması ve kısaca şebekelerin büyümesi bu tür kontrolün ekonomik olmadığını çıkardı. Çünkü kayıplar ve iletim sistemi kayıpları artmaktadır. 1940lı yıllardan itibaren, halen günümüzde de kullanılan senkron motorlar, küçük senkron kompanzator ve iletim sistemlerinde büyük senkron kompanzatorlar gibi dinamik elemanlar kullanılmaya başlandı. Yüklerin çeşitlenmesi sonucu, yüklerin yanına sabit kapasitelerden oluşan cihazlar kondu. Dağıtım şebekelerinde kullanılan ark kaynaklarının reaktif gücünü kompanze etmek için daha etkili ve ekonomik kapasiteler geliştirildi. Yüksek gerilim hatlarının kullanılmasıyla seri kapasiteler ve şönt reaktörler önemli kompanzasyon cihazları oldular.

1970'li yıllardan itibaren özellikle endüstride elektrik enerjisi kullanımına dayanan büyük tesisler (ark fırınları yada elektrikli trenler vb.) kuruldu. Bu yükler hem büyük hem de ani değişimler gösteriyordu. Sabit kapasiteler veya senkron kondenserlerle bu güçleri anında karşılamak ve şebekeyi dengeli tutmak mümkün değildi. Ayrıca dinamik kompanzasyon cihazlarının geçici hal cevapları şebeke stabilitesini etkiliyordu. 1950li yıllarda bulunan tristörün kullanıma girmesiyle hareketli parçası olmayan "Statik Kompanzatorlar" geliştirildi. Elektronik sanayi alanındaki bu hızlı değişmelerden elektrik mühendisliği de payını almış ve yüksek güçlü tristörlerin üretilmesiyle statik kompanzatorlar gündemi işgal etmeye başlamıştır. Bu cihazlar, tristör kontrollü reaktör ve sabit veya tristör anhtarlamalı kondansatörle modern GTO ile yapılan güç konvertörleridir.

Uygulamaları genel olarak iki ana grupta toplayabiliriz. Biri enerji iletim sistemlerindeki uygulamalar için "Gerilim Kontrolü" diğeri ise yükün yakınında kurulan tesislerde "Yük Kompanzasyonu"dur. Yük kompanzasyonunda yükü karakterize eden akım ve gerilimler ölçülerek kompanzasyon yapılır. Enerji iletiminde kompanzasyon sistem empedansı yada akımları cinsinden gerçekleştirilemez Eneji iletim sistemine bir

BÖLÜM 2

REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

2.1 KOMPANZASYONUN TANIMI

Yük kompanzasyonu, çeşitli karakteristiklerdeki yükleri besleyen elektrik şebekesinin özellik kriteri olarak verilen gerilimin, güç faktörünün, faz büyüklüklerinin dengeliğinin hem sürekli hem de geçici hal durumlarında uygun sınırlar arasında kalmasını sağlamak için gerekli olan gücün kontrol edilmesidir. Elektrik şebekelerine bağlanan yüklerin değişken değerlerde büyük reaktif güç aldıkları ve dengesiz oldukları bilinmektedir. Özellikle büyük kapasiteli olan ve çelik endüstrisinde kullanılan elektrik ark ocakları değişken ve dengesiz yük oluşturan, büyük değerlerde reaktif güç çeken alıcılardır. Bu fırınların bağlı bulunduğu şebekelerde, eğer eşdeğer iç empedansları yada kısa devre açma güçleri yeteri kadar büyük değilse, gerilim değişimleri, flicker olayı ve faz dengesizlikleri, düşük güç faktörleri görülmektedir. Stasyonier işletmelerde bu gücün kontrolü artık genel olarak bilinen bir konudur. Bunu karşılık bazı sanayi dallarında modern teknolojinin uygulanması ile yeni sorunlar ortaya çıkmış özellikle hızlı değişen olaylarda reaktif güç kompanzasyonu tekrar gündeme gelmiştir. Hızlı değişen olayların gözlemlendiği işletmeler haddehaneler, tahrik sistemleri, kaldırma makinaları, elektrikli ark ve kaynak makinalarıdır. Yük değişimlerinin karsısız olduğu bu tür uygulamalarda kompanzatör her türlü olumsuz etkene cevap verebilecek uygun şekilde dizayn edilmiş olmalıdır.

Reaktif güç kompanzasyonunu, reaktif gücün kontrolü ile güç sistemlerinde kalitenin arttırılması olarak ifade edebiliriz. Burada kaliteden maksat verimlilik, işletme kolaylığı, enerji tasarrufu, reaktif güç isteğinin optimal olarak sağlanması gibi özelliklerdir. Yük kompanzasyonunu, alternatif akım güç sisteminin özellik kriterlerini iyileştirmek için reaktif gücün kontrol edilmesidir diye tanımlamıştık. Kompanzasyonun üç ana amacı vardı:

- güç faktörünü düzeltme
- yük dengesini sağlama
- gerilim regülasyonunu arttırma

Şimdi yük kompanzasyonunun amaç özelliklerini ele alalım;

- Güç Faktörü Kontrolü:

Güç faktörü kontrolü, bir yükün zamana göre sabit yada değişken reaktif gücünü kompanzasyon, sisteminin yardımı ile üretmektir. Böylece enerji iletim hatları reaktif güçle yüklenmemiş olur. Çünkü reaktif gücün santrallarda üretilmesi halinde, genellikle uzun iletim hatlarıyla alıcı yüklere bağlı olan sistemin enerji hatlarında istenmeyen kayıplara yol açar. Elektrik enerjisinin faydalı enerjisi aktif güçle orantılıdır. Reaktif gücün var olması, enerji iletim hatlarının, generatörlerin ve transformatörlerin gerçek faydalı güce düşen akımdan daha büyük akım taşımalarına yol açar. Bu ise aşırı yüklenmelere ve ısınma sınırlamasını düşünerekten daha büyük boyutta seçilmesini zorular. Böylece güç faktörü küçük olan alıcı, belli bir aktif güç için tesisatını daha büyük seçeceği gibi ek joule kayıplarının bedelini ödemek durumundadır. Bu yüzden alıcılardan güç faktörünün bir yada 0.95 civarında tutulması istenir. Belli bir aktif güç için küçük güç faktörü, büyük reaktif güce karşı gelir ve bu reaktif güç gerilim değişmelerine yol açar. Bu bakımdan güç faktörü kontrolü aynı zamanda gerilim kontrolüdür.

- Yüklün Dengelenmesi

Alternatif akım güç sistemleri üç fazlı olarak çalışırlar ve bunlara bağlı yüklerde genellikle dengeli üç fazlı yüklerdir. Bununla beraber elektirikli trenler gibi bir fazlı yüklerin üç fazlı sistemleri dengesiz olarak yükllediği ve ayrıca üç fazlı yüklerin çalışma özellikleri dolayısı ile üç fazlı şebekeye dengesiz yük uyguladıkları bilinir.

Fazların dengesizliği yani dengesiz çalışma simetrik bileşenler cinsinden pozitif, negatif ve sıfır bileşenlerinin oluşmasına neden olur. Bu bileşenler istenmeyen sonuçlar doğurur. Bu sonuçlardan başlıcaları; Motor, generatör ve trafo- larda kayıpların artması, doğrultucu sistemlerinin çıkış geri

limlerinde dalgalanma, alternatif akım makinalarında üretilen momentin dengesiz olması (moment salınımları), nötr iletkenlerinden büyük akımların akması, aşırı toprak akımları, cihazların fonksiyonlarında bozulmalardır.

-Gerilim Kontrolu

Eğer bir alternatif akım şebekesinin iç empedansı sıfır yada gücü sonsuz olsa idi, bu şebekeye hangi değerde ve hangi değişme özelliğine sahip yük bağlanırsa bağlansın gerilim yüke bağlı olmaksızın sabit kalırdı. İç empedansı sıfır yada çok küçük olan bir alternatif akım şebekesi ise ancak enerji üreten generatörlerin gücü ve sayısını arttırmak ve bunları birbirleri arasında bağlayarak enterkonnekte sistem elde etmek yolu ile gerçekleştirilir.

Gerilim değişmelerini kompanze etmek başka bir değişle gerilimi sabit tutmak için yük yada yüklerin reaktif güçlerini kompanze edecek birimleri yüklerin olduğu yere bağlamak ve gerekli reaktif gücü bunların yardımıyla yapmak hem pratik hem de en ekonomik çözümdür.

Gerilim regülasyonu, reaktif güç ihtiyacının değişmesi ile önem kazanmakta ve zaman zaman kritik durumlara gelmektedir. Yüklerin reaktif güç istekleri, oran ve şidet açısından değişir. Kompanze edilmemiş bir yükün çektiği reaktif güç ve ani reaktif güç değişimleri, iç empedansı sıfır olmayan sonlu güçlü gerçek bir şebekede gerilim değişikliklerine sebep olur. Bu gerilim değişimleri aynı noktaya bağlı diğer alıcıları olumsuz yönde etkiler ve yükün de optimum çalışma koşullarını bozar. Sabit gerilimle çalışacak şekilde dizayn edilen yükler bu yüzden verimsiz çalışacak ve istenmeyen durumlar doğacaktır. Bu gerilim değişimleri çok büyük ise alıcının çalışmaması da görülebilir. Bunu önlemek için de gerilim barasında, gerilimin ancak belli sınırlar içinde değişmesine izin verilir. Örneğin elektrik ark ocaklarının çektiği reaktif güçler 2 Hz-10Hz'lik değişmeler göstermektedir. Bu da akkor lambalarda ışık seviyesinin değişmesine neden olur. İnsan gözü 2Hz-10Hz'lik, % 0.25-% 4'lük gerilim değişmelerini algılar ve bu durum gözü çok rahatsız eder. Kompanzasyon ya-

pıldığında gerilim değişimleri istenen sınırlar içinde kalmalıdır.

2.2 İDEAL KOMPANZATÖR

İdeal kompanzatör yük ile paralel bağlabilen, güç faktörünü bir yapan, gerilimi kontrol eden, yük akımlarını yada faz garilimlerini dengeleyen bir araçtır. Bir ideal kompanzatörden doğacak harmonik distorsiyonunu yok etmesi beklenebilir. Bunu ancak uygun harmonik filtreler ile sağlarız. İdeal kompanzatörün yukarıda belirtilen üç parametreye ve bu parametrelerin ani değişimlerine kısa sürede cevap vermesi önemlidir. İdeal kompanzatör kayıpsızdır yani sıfır ortalama güç çeker.

Bu üç parametre gerçekte birbirinden bağımsız değildir. Güç faktörü kontrolü ve faz dengelenmesi bizi zaten gerilim kontrolüne götürür. İdeal bir kompanzatör;

-Yüke bağlı olarak gereken reaktif gücü gecikmesiz ve tam kontrol edip değiştirerek sisteme verebilmeli

-Bağlı bulunduğu noktada sabit bir gerilim sağlamalı

-Üç fazda bağımsız kontrol yapabilmelidir.

İdeal kompanzatör için verilen bu özellikler aynı zamanda kompanzasyon sisteminin amaç kriterlerini de vermektedir.

Gerçekte gerilim kontrolü ve güç faktörü kontrolü birbirine bağlı kontrol işlemleridir. Bilindiği gibi akımın wattsız yada reaktif bileşeni , yükün reaktif gücüne karşılık düşer. Reaktif güçlere ilişkin bu reaktif akımların reaktanslar üzerindeki gerilim düşümleri, boyuna gerilim düşümlerini meydana getirir. Boyuna gerilim düşümleri ise gerilim değişmelerine yol açarlar. Yükün aktif gücüne karşılık düşen wattlı akımlar, reaktanslarda enine gerilim düşümlerini oluştururlar ki bunların neden olduğu gerilim değişimleri ihmal edilecek kadar küçüktür. İşte bu sebeplerden dolayı gerilim kontrolü, reaktif güçlerin kompanze edilmesi ve reaktif gücün kompanze edilmesi ise güç faktörü kontrolünü doğurduğundan bu kontrol

işlemleri birbirinden ayrılmaz.

2.3 REAKTİF GÜÇ TÜKETİCİLERİ

Reaktif güç sarfiyatı bakımından tüketiciler iki ana gruba ayırabiliriz. Birincisi safi ısı enerjisi üreten tüketiciler ile akkor flamanlı lambalar , elektroliz ve galvanoplasti tesisleridir. Bunlar sadece aktif güç tüketirler. İkinci grup ise magnetik ve statik alan ile çalışan bütün işletme araçlarıdır. Bunlar aktif güç yanında reaktif güç çekerler; bazı koşullar altında da reaktif güç verirler.

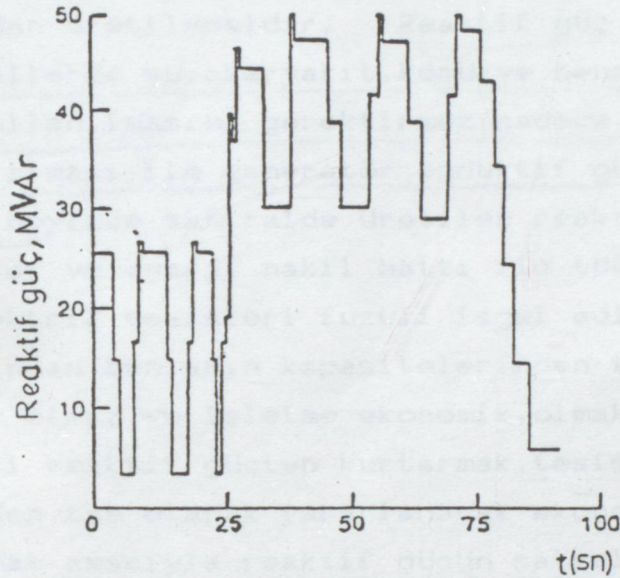
Bir yük için güç faktörü kompanzasyonunun gerekip gerekmediğine karar verebilmek için enerji tarifesini, yükün boyutlarını ve kompanze edilmemiş güç faktörünü göz önüne almak gerekir. Endüstride kompanzasyonu gerektiren yükler şunlardır:

- Düşük ikazlı senkron makinalar
- Transformatörler
- Bobinler
- Havai hatlar
- Senkron motorlar
- Redresörler
- Endüksiyon fırınları
- Endüksiyon ark ocakları
- Kaynak makinaları
- Endüksiyon kaynak makinaları
- Lamba balastları (fluoresan, sodyum ve civa buharlı)
- Haddehaneler
- Asenkron motorlar
- Darbeli büyük güçle çalışan yüksek enerji fizik tesisi (Synchrotronlar)

Bu yükler işletmede nonlinear özellik gösterirler ki harmonik üretirler, darbeli çalışırlar. Bu çeşit yüklerde reaktif güçteki değişme çok hızlı (bir kaç periyot içinde) ve reaktif güç ihtiyacı büyük değerler arasında değişir. Kullanılan kompanzator çok kısa zamanda gerekli reaktif gücü verebilmelidir. En uygun kompanzator tipi ise tristör kontrollü sta-

tik kompanzatörlerdir.

Kompanzasyon gerektiren yüklerin reaktif güç ihtiyacı genellikle zamanla değişir. Şekil 2.1'de bir haddehanedeki reaktif güç ihtiyacı ve değişimi örnek olarak verilmiştir. Burada görüleceği gibi güç değişimi oldukça küçük zaman aralıklarında ve büyük oranda gerçekleşmektedir.



Şekil 2.1 Bir haddehanenin reaktif güç ihtiyacının zamana göre değişimi

Bir kompanzasyon sisteminin kurulması sırasında göz önü
ne alınacak önemli noktaları şöyle sıralayabiliriz:

- maksimum reaktif güç gereksinimi
- tesisatın aşırı yüklenme sınırı ve süresi
- aşılmaması gereken gerilim sınırları
- frekans ve değişimi
- gerilim regülasyonu
- kompanzatorün cevap zamanı
- maksimum harmonik distorsiyonu
- dengesiz gerilim ve/veya yükte çalışma verimi
- koruma donatımı ve koordinasyonu
- işletme ve ileriye dönük genişleme olanakları
- güvenirlilik ve bakım
- çevresel faktörler:gürültü seviyesi,sıcaklık,nem,soğutma sistemi,kirlenme

2.4 REAKTİF GÜÇ ÜRETİMİ

Reaktif güç ihtiyacını karşılamak için reaktif gücün bir yerde üretilmesi gerekir. Bunun için en eski ve en klasik yol aktif güç gibi reaktif gücün de senkron generatörler tarafından üretilmesidir. Reaktif güç üretimi aktif güç gibi santrallerde su, akaryakıt, kömür ve benzeri ham enerji maddesi nin kullanılmasını gerektirmez; sadece generatör uyarmasının arttırılması ile generatör endüktif güç verecek duruma getirilir. Böylece santralde üretilen reaktif güç, generatör, transformator ve enerji nakil hattı ile tüketiciye ulaşır. Bu esna da elektrik tesisleri füzuli işgal edileceklerinden, aktif güc bakımından bunların kapasitelerinden tam olarak yararlanmak mümkün olmaz ve işletme ekonomik olmaktan çıkar. Onun için tesisleri reaktif güçten kurtarmak, tesis elemanlarının kapasitelerinden tam olarak yararlanarak ekonomik bir işletme imkanı sağlamak amacıyla reaktif gücün santralde değil de tüketim merkezlerinde üretilmesi en uygun ve ekonomik yoldur.

Tüketicilerin normal olarak şebekeden çektikleri endüktif gücün, kapasitif yük çekmek suretiyle özel bir reaktif güç üreticisi tarafından dengelenmesine kompanzasyon denir. Böylece tüketicinin şebekeden çektiği reaktif güç azalıyordu.

Reaktif güç üretimi için iki işletme aracından yararlanılır:

1- Dinamik faz kaydırıcılar

2- Statik faz kaydırıcılar (kondansatörler)

2.4.1. Dinamik Faz Kaydırıcıları:

Dinamik sistemler, senkron makina gibi döner sistemlerden oluşur. Senkron makinalar, uyarma akımının değerine göre reaktif güç alma yada verme özelliğine sahiptir. Aşırı uyarma durumunda reaktif güç üretirler, düşük uyarda ise reaktif güç çekerler. Ancak senkron makinalar bu halde aktif güç alış veriş yapmazlar.

Reaktif güç üretiminde kullanılan dinamik kaydırıcıların başında aşırı uyartılmış senkron makineler gelir. Enerji nakil hatlarının sonunda ve tüketim merkezlerinin başında şebekeye paralel bağlanırlar. Kondansatörlere nazaran kayıpları yüksek olup devamlı bakıma ihtiyaçları vardır. Ayrıca bunların güçleri çok büyük olduğu takdirde ekonomik olarak inşası ve temini mümkün olur. Bu bakımdan bugün ancak özel hallerde ve ekonomik şartların gerçekleştiği yerlerde kullanılır. Endüstride asenkron motor yerine kullanılacak senkron motor, güç faktörünün iyileştirilmesinde olumlu sonuçlar verir. Makinanın döner kısımlarında biriken kinetik enerji ani yüklenme durumlarında dalgalanmaların etkisini azaltır.

2.4.2 Statik Faz Kaydırıcıları:

Statik sistemler, kondansatör ve reaktör (reaktans bobini) yada bunların uygun kombinasyonları ile oluşmuş düzenlerdir. Özellikle kondansatörler güç faktörünü düzeltmede birkaç kVA'dan birkaç MVA'ya kadar geniş bir ölçekte kurulabilir. Reaktans bobinleri ise, şebekede üretilen aşırı reaktif gücü üzerine alır ve dengelemeyi sağlar.

Kondansatörler bir çok üstünlüğe sahiptir. Kondansatörlerin kayıpları çok küçük olup, nominal güçlerinin % 0.5'nin altındadır ve bakım masrafları yok denecek kadar azdır. Ayrıca kondansatörler ile istenen her güçte bir 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 yükü altından kurtarmak mümkün olur. Kondansatörlerin tesisleri kolaydır ve icabında kolaylıkla genişletilerek gücü arttırılabilir. İşletme emniyeti çok büyüktür, ömürleri uzundur, bakımları kolay ve ucuzdur. Yerleştirilecekleri yerde hemen hemen hiç bir özellik aranmadığından yer temini de özel bir sorun oluşturmaz. Gerekli kapasiteyi temin için birçok kondansatör elemanı bir araya getirilerek istenen değerde bir grupta teşkil edilebilir. Nakli kolay, tesisi ve bağlanması rahat olup kompanzasyon için en uygun araçtır.

BÖLÜM 3

KOMPANZASYONUN MATEMATİKSEL ESASLARI

3.1. Temel Bağıntılar

Zamanla sinüs biçiminde değişen bir gerilimin ani değer ifadesi (V_m) gerilimin maksimum değeri, (ω) açısal frekansı ve (ϕ_v) faz açısı olmak üzere;

$$v = V_m \cos(\omega t + \phi_v) \quad (3.1)$$

yazılabilir. Böyle bir gerilimle beslenen alıcının ani akımı ise benzer ifadeyle

$$i = I_m \cos(\omega t + \phi_i) \quad (3.2)$$

şeklinde yazılır. Burada (I_m) akımın maksimum değeridir.

(v) gerilimi altında (i) akımı çeken alıcının ani gü-

$$cü \quad p = vi \quad (3.3)$$

dir.

(3.1) ve (3.2) ifadeleri (3.3)de yerine konursa,

$$p = 2VI \cos(\omega t + \phi_v) \cos(\omega t + \phi_i)$$

$$p = VI \cos(\phi_v - \phi_i) + VI \cos(2\omega t + \phi_v + \phi_i) \quad (3.4)$$

bulunur. V ve I sırasıyla gerilimin ve akımın etkin değeridir.

(3.4) denkleminde ilk terim sabit güç bileşenini, ikinci terim ise ortalama değeri sıfır olan ve sinüs şeklinde değişen bileşeni gösterir. Akımla gerilim arasındaki faz farkı $\phi = \phi_v - \phi_i$ ile gösterilirse

$$P = VI \cos \phi \quad (3.5)$$

gücüne aktif (etkin) güç adı verilir. $\cos \phi$ güç çarpanı yada güç-

faktörü olarak adlandırılır. Faz farkı büyüyecek olursa aynı P aktif gücünü elde etmek için akımın, gerilimin veyahut her ikisinin büyümesi lazımdır. Ancak şebekelerde gerilim sabit olduğu için sadece akım büyüyecektir. Bunun sonucu olarak akımın geçtiği her hatta joule kayıpları artacak, hatlar, transformatörler v.b. sistemler fazladan yüklenmiş olur.

İşte bu gereksiz yüklenmenin ölçüsü,

$$Q = VI \sin \phi \quad (3.6)$$

ile belirlenir. Bu güce reaktif (tepkin) güç adı verilir.

3.2. Reaktif Güç ve Gerilim Arasındaki İlişki

Sinüsoidal gerilim ve akım fazör adı verilen $\underline{V}$ ve $\underline{I}$ kompleks büyüklükler ile ($\underline{V} = V e^{j\phi_V}$, $\underline{I} = I e^{j\phi_I}$) gösterilmiş ise $\underline{I}^*$, $\underline{I}$ 'nin eşleşniği olmak üzere,

$$\underline{S} = \underline{V} \underline{I}^* \quad (3.7)$$

çarpımına kompleks güç denir. Gerilimin ve akımın V ve I etkin değerlerinin çarpımından oluşan

$$S = VI \quad (3.8)$$

denklemini ise görünen güç adını alır. (3.7) ifadesinin reel kısmı $P = \text{Re}(\underline{V} \underline{I}^*)$ aktif gücü, sanal kısmı ise $Q = \text{Im}(\underline{V} \underline{I}^*)$ reaktif gücü gösterir.

Bir tüketicinin şebekeden çektiği zahiri güç,

$$S = 3 U_f I = \sqrt{3} U_h I \quad (3.9)$$

formülü ile bulunabilir.

Burada U_f faz gerilimi, U_h hat gerilimi ve I hat akımıdır. Aktif güçle aktif akım, gerilim ile aynı fazda oldukları halde çekilen gücün endüktif olması halinde, S zahiri gücü ve I hat akımı gerilimden ϕ açısı kadar geride kalırlar. Buna göre akım,

gerilim ve güçler arasındaki bağıntılar şöyle yazılabilir.

$$\text{aktif akım} \dots\dots\dots I_p = I \cos \varphi \quad (3.10)$$

$$\text{aktif güç} \dots\dots\dots P = S \cos \varphi \quad (3.11)$$

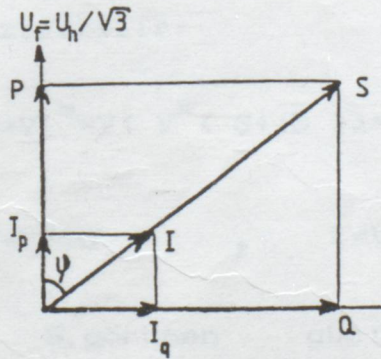
$$\text{reaktif akım} \dots\dots\dots I_q = I \sin \varphi \quad (3.12)$$

$$\text{reaktif güç} \dots\dots\dots Q = S \sin \varphi \quad (3.13)$$

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (3.14)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (3.15)$$

Şekil 3.2'de akım ve güç fazörlerinin birbirlerine göre durumları gösterilmiştir. Burada reaktif akım ve gücün saf endüktif karakterde olduğu kabul edilmiş ve gerilime göre 90° geri fazda çizilmiştir. Faz gerilimi doğrultusundaki I_p akımı (veya P aktif gücü) ile I hat akımı (veya S zahiri gücü) arasındaki φ açısına faz açısı ve bu açının kosinüsüne güç faktörü yada güç katsayısı denir. Görülüyor ki φ veya $\cos \varphi$ çekilen reaktif güç için bir kriterdir. Yükün ihtiyacı olan reaktif gücü kontrol etmek aynı zamanda gerilimi sabit seviyede tutmak demektir. Bunu ifade edebilmek için gerilim ve reaktif güç arasındaki ilişkiyi ortaya koyduk

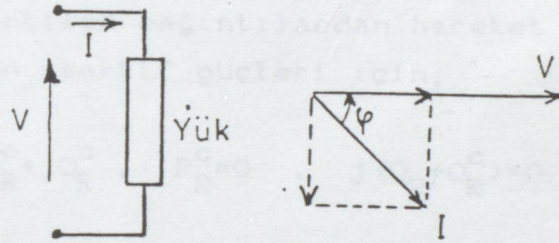


Şekil 3.2 Kompleks düzlemde akım ve güç bileşenleri
Genel olarak bir alternatif akım şebekesinde reaktif

güç, gerilim ile akımın reaktif (wattsız) bileşeninin çarpımıdır. Bu reaktif akım bileşeni gerilime diktir.

$$\text{Reaktif güç} \dots\dots\dots Q = VI \sin \phi$$

Bağıntısında Q nun birimi volt-amper-reaktif (VAR)'tir. Q reaktif gücünün işareti ϕ açısının yönünün tanımlanmasına bağlıdır. Kabul edeceğimiz kural; bir endüktif elemente sağlanan net reaktif akımın işareti pozitif işaretli olacaktır. Karşıt olarak kapasitif bir elemente sağlanan reaktif güç ise negatif işaretli olacaktır.



Şekil 3.3 Temel devre

3.3. Gerilim Değişimlerinin Reaktif Güce Bağlı İfadeleri

Üç fazlı bir yükün sürekli sinüsoidal çalışmada şebekeden aldığı ortalama aktif, reaktif ve görünen güçler şu şekilde yazılabilir:

$$S = VI^* = V (V^* (G + jB)) = V^2 G + jV^2 B \quad (3.16)$$

$$S = P + jQ, \quad I = V(G - jB) = VG - jVB \quad (3.17)$$

Burada S, görünen güç (volt-amper (VA)) G, yük kondüktansı ($1/\Omega$) ve yük süseptansı ($1/\Omega$) dır.

Dengesiz üç fazlı yük için fazlar R, S, T olmak üzere

$$S_R = P_R + jQ_R = V^2 G_R + jV^2 B_R$$

$$S_S = P_S + jQ_S = V^2 G_S + jV^2 B_S$$

$$S_T = P_T + jQ_T = V^2 G_T + jV^2 B_T$$

(3.18)

yazılabilir.

Güç faktörü kompanzasyon kontrol sisteminin çalışma ilkesi yükün dengesiz olan Q_R, Q_S, Q_T reaktif bileşenlerini tamamen yok ederek güç faktörünü bire çıkartmak şeklinde tanımlandığına ve kompanzasyon sistemi kayıpsız olduğuna göre yukarıda belirtilen bağıntılardan hareket ile gerekli Q_R^C, Q_S^C, Q_T^C kompanzasyon reaktif güçleri için;

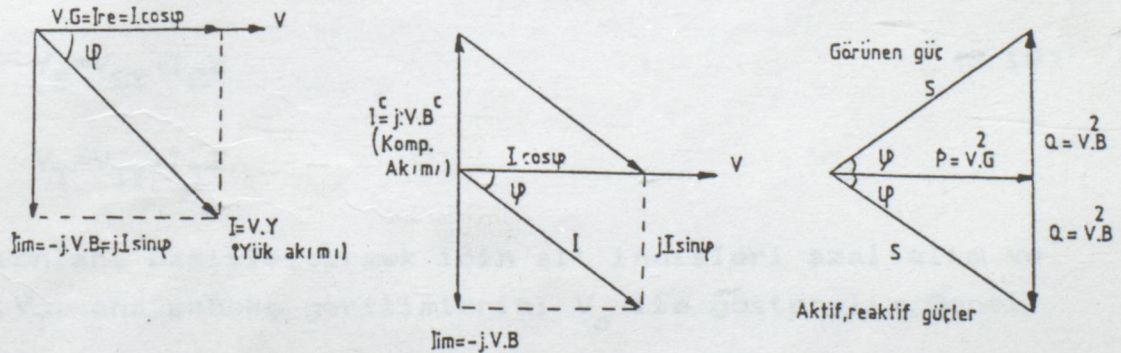
$$S_R^C = P_R^C + jQ_R^C, \quad P_R^C = 0, \quad j(Q_R + Q_R^C) = 0, \quad Q_R^C = -jV^2 B_R$$

$$S_S^C = P_S^C + jQ_S^C, \quad P_S^C = 0, \quad j(Q_S + Q_S^C) = 0, \quad Q_S^C = -jV^2 B_S \quad (3.19)$$

$$S_T^C = P_T^C + jQ_T^C, \quad P_T^C = 0, \quad j(Q_T + Q_T^C) = 0, \quad Q_T^C = -jV^2 B_T$$

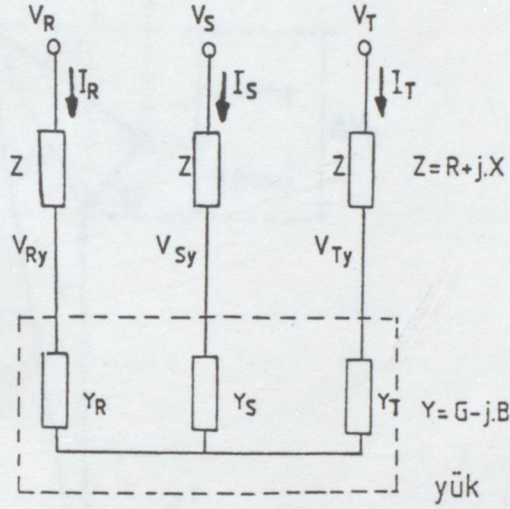
elde edilir.

Şekil 3.3'de aktif ve reaktif güçler, yük akımları ve kompanzasyon akımları gösterilmiştir.



Şekil 3.3 Genel olarak Y süseptansları cinsinden aktif ve reaktif güçler ile I^C kompanzasyon akımı

Gerilim değişimi ifadesine geçmeden önce belirtmeliyiz ki, genellikle ilgilendiğimiz durumlar gücün üretildiği nokta ile tüketildiği nokta arasındaki iletim hattıdır. Öyleyse devre, eşdeğer reaktans yada seri direnç ve reaktanslar ile ifade edilebilir.



şekil 3.4 Yükün şebekeden aldığı akımlar ve şebekenin gerilim değişmesine sebep olan Z seri empedansı

şekil 3.4'e göre her faz için gerilim denklemini yazarak yk akımlarınının yol açacağı gerilim değişmelerini bulalım ;

$$V_R = V_{Ry} + I_R Z$$

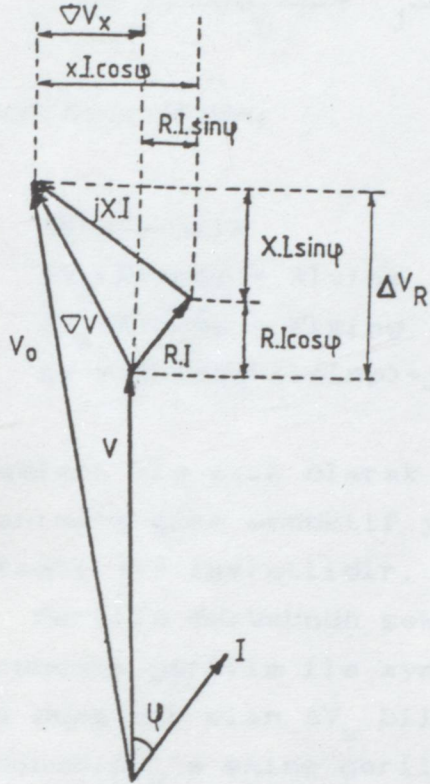
$$V_S = V_{Sy} + I_S Z \quad (3.19)$$

$$V_T = V_{Ty} + I_T Z$$

notasyonları basitleştirmek için alt indisleri azaltalım ve V_R, V_S, V_T ana şebeke gerilimlerini V_o ile gösterelim. Genel olarak;

$$V_o = V + IZ \quad (3.20)$$

yazılır.



V :Yük gerilimi

ΔV_R : Boyuna gerilim düşümü

ΔV_X : Enine gerilim düşümü

ΔV :Toplam gerilim düşümü

I :Yük akımı

Şekil 3.5 Hat empedansının sebep olduğu gerilim düşümü

V ve I arasındaki faz açısı ϕ endüktif alınır (3.20) denkleminin fazör gösterimi şekil 2.4'deki gibi olur. ZI gerilim düşümüne ΔV dersek;

$$\Delta V = ZI = V_0 - V \quad (3.21)$$

olur.

$$I = \frac{P - jQ}{V}, \quad Z = R + jX \quad \text{ifadeleri} \quad (2.20)'de \text{ yerine ya-}$$

zılırsa,

$$\Delta V = \frac{RP+XQ}{V} + j \frac{XP-RQ}{V} \quad (3.22)$$

bulunur. Aynı ifade;

$$\Delta V = \Delta V_R + j \Delta V_X \quad (3.23)$$

$$\Delta V_R = RI \cos \phi + XI \sin \phi \quad (3.24)$$

$$\Delta V_X = XI \cos \phi - RI \sin \phi \quad (3.25)$$

$$\Delta V = (RI \cos \phi + XI \sin \phi) + j (XI \cos \phi - RI \sin \phi) \quad (3.26)$$

denklemleri ile açık olarak gösterilebilir. Reaktif gücün işaret tanımına göre endüktif yük süseptansı (-), kapasitif yük süseptansı (+) işaretlidir.

Gerilim düşümünün şekil 2.4'de görüldüğü gibi, bir yükün ucundaki gerilim ile aynı fazda olan $\Delta V_R = \Delta V_{Reel}$ ve bir de buna dik olan ΔV_X bileşeni vardır. ΔV_R 'ye boyuna gerilim düşümü, ΔV_X 'e enine gerilim düşümü denir. Gerilim değişmesine asıl neden olan ΔV_R boyuna gerilim düşümüdür. Eğer bu gerilim düşümü sıfır yapılacak olursa gerilim düşmesi olmakla beraber gerilim değişmesi olmaz. Yüzde olarak gerilim değişmesi,

$$E = \frac{V_o - V}{V} \quad (3.27)$$

formülü ile ifade edilebilir. E, burada yüzde olarak gerilim değişmesidir ve ΔV_R boyuna gerilim düşümünden ileri gelir.

3.4 Kondansatörde Gerilim, Akım ve Güç İfadeleri

Kondansatörler alternatif akım şebekelerinde bir reaktans gibi tesir ederler. Ohm cinsinden kapasitif reaktans;

$$X_C = \frac{1}{\omega C} \quad (3.28)$$

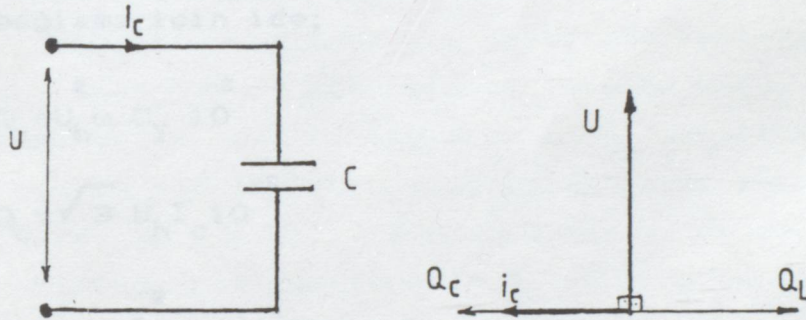
olup, C , farad cinsinden kondansatörün kapasitesi ve

$$\omega = 2\pi f$$

dairesel frekanstır. Ohm kanununa göre U gerilimine bağlanan bir kondansatörün çektiği I_C kapasitif akım,

$$I_C = \frac{U}{X_C} = U \omega C \quad (3.29)$$

formülü ile bulunur. Bu akım U gerilimine göre 90° ileridir. Şu halde şebekeye bağlı bir kondansatörün şebekeden kapasitif bir akım çekmesi, şebekeye endüktif akım vermesine eşdeğerdir. Kondansatörün bu özelliği, statik kompanzasyon elemanı olarak kullanılmasına neden olan yanıdır.



Şekil 3.6 Bir fazlı kondansatörün bağlama şeması ve fazör diyagramı

Kondansatörün gücü için;

$$Q = UI_C 10^{-3} \quad (\text{kvar}) \quad (3.30)$$

veya denklem (3.29)'i kullanarak;

$$Q_C = U^2 \omega C 10^{-3} = \frac{I_C^2}{\omega C} 10^{-3} \quad (\text{kvar}) \quad (3.31)$$

elde edilir. (Q_C) kapasitif reaktif güç, endüktif reaktif güce göre 180° ileridedir yani her iki reaktif güç aynı doğrultuda fakat ters yöndedirler. Böylece kapasitif gücün, endüktif

gücü götürerek kompanzasyon tesiri yaptığı anlaşılır.

Üç fazlı alternatif akım tesislerinde kondansatörler şebekeye veya tüketici uçlarına üçgen yada yıldız olarak bağlanabilirler. Üçgen bağlamada her iki hat arasındaki kondansatörün kapasitesi C_{Δ} ile ve yıldız bağlamada ise C_Y ile gösterilirse, üçgen bağlama için;

$$Q_c = 3 U_h^2 \omega C_{\Delta} 10^{-3}$$

$$Q_c = \sqrt{3} U_h I_c 10^{-3}$$

$$Q_c = \frac{I_c^2}{\omega C_{\Delta}} 10^{-3} \quad (\text{kvar}) \quad (3.32)$$

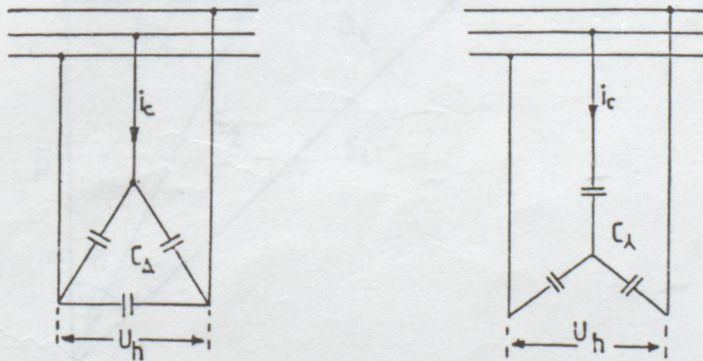
yıldız bağlama için ise;

$$Q_c = 3 U_h^2 \omega C_Y 10^{-3}$$

$$Q_c = \sqrt{3} U_h I_c 10^{-3}$$

$$Q_c = 3 \frac{I_c^2}{\omega C_Y} 10^{-3} \quad (\text{kvar}) \quad (3.33)$$

yazılabilir. Burada U_h , iki hat arasındaki gerilimi I_c kapasitif hat akımını gösterir. Şekil 3.7'de üçgen ve yıldız bağlamalar gösterilmiştir.



Şekil 3.7 Üç fazlı alternatif akım şebekesinde kondansatörlerin üçgen ve yıldız bağlanması

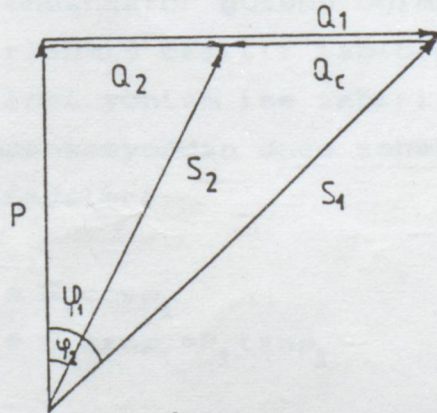
Her iki sistemde de Q_c gücünün eşit olduğu kabul edilirse

$$C_Y = 3C_{\Delta} \quad (3.34)$$

bulunur. Buradan yıldız bağlamada her bir faza bağlanan kondansatörün kapasitesi üçgen bağlamadaki kondansatör kapasitesinin üç katına eşittir sonucu çıkarılır. Bu sebeple kondansatörlerin üçgen bağlanması tercih edilir.

3.5. Kondansatör Gücü Hesabı

Bir tüketicinin veya tesisin reaktif güç ihtiyacını tesbit için önce söz konusu tüketicinin veya tesisin şebekeden çektiği S_1 zahiri gücün, buna ait $\cos\varphi_1$ güç katsayısının ve bundan güç katsayısının çıkarılması istenen $\cos\varphi_2$ değerinin bilinmesi gerekir. Güç katsayısını $\cos\varphi_2$ değerine çıkarmak için lazım olan reaktif gücü veya kondansatör gücünü tayin etmek için iki yol vardır. Bunların birincisinde; $\cos\varphi_1$ güç katsayısı altında çekilmekte olan P_1 aktif gücü sabit tutulur ve buna göre şebekeden çekilen zahiri güç S_2 gibi daha küçük bir değere düşür. İkinci hesap yolunda ise S_1 zahiri gücü $\cos\varphi_2$ güç katsayısında da aynı değeri korur ve bu durumda şebekeden çekilmekte olan aktif güç P_2 gibi daha büyük bir değer alır. Önce birinci yöntemi ele alalım;



Şekil 3.8 (P) aktif gücünün sabit olması durumunda fazör diyagramı

kompanzasyondan önce;

$$P = S_1 \cos \varphi_1$$

$$Q_1 = S_1 \sin \varphi_1 = P \tan \varphi_1 \quad (3.35)$$

kompanzasyondan sonra;

$$P = S_2 \cos \varphi_2$$

$$Q = S_2 \sin \varphi_2 = P \tan \varphi_2 \quad (3.36)$$

formülleri ile hesaplanabilir. Bu durumda gerekli kondansatör gücü için,

$$Q_c = Q_1 - Q_2 = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (3.37)$$

ifadesi yazılır. Görünür güçteki azalma ise;

$$S_1 - S_2 = P \frac{1}{\cos \varphi_1} - \frac{1}{\cos \varphi_2} \quad (3.38)$$

gerekli kondansatör gücünü bulmak için yukarıdaki formüllere göre hazırlanmış çeşitli tablolar ve abaklar mevcuttur.

İkinci yöntem ise zahiri gücün sabit olmasıdır. Bu durumda kompanzasyondan önce şebekeden çekilen aktif ve reaktif güç ifadeleri:

$$P_1 = S_1 \cos \varphi_1$$

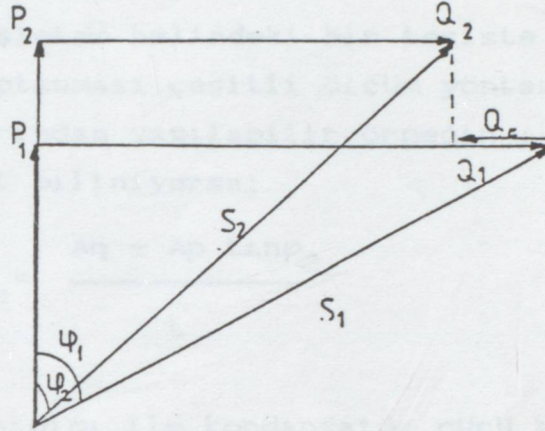
$$Q_1 = S_1 \sin \varphi_1 = P_1 \tan \varphi_1 \quad (3.39)$$

olur.

(S_1)görünen gücü sabit tutulacağına göre kompanzasyondan sonra aktif güç:

$$P_2 = S_1 \cos \varphi_2 \quad (3.40)$$

değerini alır.



Şekil 3.9 (S) zahiri gücünün olması durumunda fazör diyagramı

fazör diyagramından görüleceği gibi kompanzasyon sonrası re-aktif güç;

$$Q_2 = \sqrt{S_1^2 - P_2^2} \quad (3.41)$$

olacaktır. Gerekli kondansatör gücü de;

$$Q_c = S_1 (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) \quad (3.42)$$

olarak bulunur. Bu durumda aktif güçteki artma ise;

$$P_2 - P_1 = S_1 (\cos \varphi_2 - \cos \varphi_1) \quad (3.43)$$

kadar olacaktır.

Yukarıdaki formüllerden görüleceği gibi bir tüketici yesiste kompanzasyon gücünü tesbit edebilmek için bu tesisin zahiri , aktif ve reaktif güçlerinden herhangi ikisinin veya bunlardan biri ile güç katsayısının bilinmesi gerekir. Buna göre gerekli kondansatör gücü bulunur. Bu işlemi yaparken te-

sis ile ilgili iki farklı durum göz önüne alınabilir.

Proje aşamasındaki bir tesiste tüketicilerin nominal veya etiket değerleri, verimleri ve eşzamanlık katsayısı (aynı anda devreye alınacak tüketicilerin yüzde oranı) yardımı ile hesap yapılabilir.

İşletme halindeki bir tesiste gerekli kompanzasyon gücünün saptanması çeşitli ölçüm yöntemleri yada aylık enerji faturalarından yapılabilir. Örneğin ; aktif ve reaktif enerji değerleri biliniyorsa;

$$Q_c = \frac{A_q - A_p \tan \phi_2}{t} \quad (3.44)$$

formülü yardımı ile kondansatör gücü hesaplanabilir. Formülde verilen değişkenler;

A_q = Reaktif enerji (Varh)

A_p = Aktif enerji (Wh)

t = işletme süresi (s)

olarak alınır.

Üç fazlı sistemlerde kondansatörler yıldız veya üçgen bağlanır. Her iki bağlama şeklinin de kullanıldığı durumlar vardır. Her elemanın gerilimi, koruma ve maliyet gibi faktörler bağlantı şeklini etkiler.

Kondansatörlerin üçgen bağlantısında her elemana, fazlar arası gerilim, yıldız bağlamada ise bu gerilimin $1/\sqrt{3}$ katı kadar gerilim gelir. (U) fazlar arası gerilim, (Q_c) kondansatör gücü ve f'de şebekenin işletme frekansı olmak üzere, yıldız bağlamada kapasite değeri,

$$C_y = \frac{Q_c}{2 \pi f U^2} \quad (F) \quad (3.45)$$

ve üçgen bağlamada ise,

$$C_{\Delta} = \frac{Q_c / 3}{2 \pi f U^2} \quad (F) \quad (3.46)$$

olarak bulunur.

Bu iki değeri orantıladığımızda $C_Y / C_{\Delta} = 3$ olmaktadır. Bu demektir ki, üçgen bağlamada kapasite değeri düşük, gerilim yüksek; yıldız bağlamada ise kapasite değeri yüksek ancak gerilim küçüktür.

Konuyu özetlersek; kompanzasyon işlemi için gerekli (Q_c) kondansatör gücü:

P aktif gücünün sabit kalması halinde,

$$Q_c = P (\tan \phi_1 - \tan \phi_2)$$

S zahiri gücünün sabit kalması halinde,

$$Q_c = P_1 \tan \phi_1 - P_2 \tan \phi_2$$

olarak bulunur.

ÖRNEK: Nominal gerilimi 400 V, aktif gücü 550 kW olan bir te-
siste güç faktörünü $\cos = 0.6$ 'dan, $\cos = 0.9$ 'a çıkarmak için
gerekli kondansatör gücünü hesaplayalım.

Kompanzasyondan önce zahiri güç ve akımı bulalım;

$$S_1 = P \frac{1}{\cos \phi_1} = 550 \frac{1}{0.6} = 920 \text{ kVA}$$

$$I_1 = \frac{S_1}{\sqrt{3} U} = \frac{920 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 1320 \text{ A}$$

kompanzasyondan sonra zahiri güç ve akım hesabı;

$$S_2 = P \frac{1}{\cos \varphi_2} = 550 \frac{1}{0.5} = 610 \text{ kVA}$$

$$I = \frac{S_2}{\sqrt{3} U} = \frac{610 \cdot 10^3}{\sqrt{3} \cdot 400} = 880 \text{ A}$$

Aktif gücün sabit tutulduğunu varsayarak gerekli kondansatör gücü;

$$Q_c = P (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) = 550 (1.33 - 0.48) = 470 \text{ kVar}$$

olarak bulunur. Eğer zahiri gücü sabit tutsaydık;

$$Q_c = S_1 (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) = 920 (0.79 - 0.43) = 340 \text{ kVar}$$

olarak bulacaktık. Bu problemde güç katsayısının 0.9'a çıkarılması aktif gücün % 34 oranında daha fazla taşınabilmesine ve taşıma kayıplarının % 56 oranında azalmasına neden olmuştur.

Burada yaptığımız güç hesabı harmoniklerin bulunmadığı bir şebeke ve sinüs biçimli akıma göredir. Bu kabüller ile bir genellemeye gitmek doğru değildir. Tesiste bulunan tüketicilerin özelliklerinin iyi araştırılması gerekir bilhassa haddehaneler, tahrik sistemleri, kaldırma makinaları ve ark kaynak tesislerindeki elektriksel olayların göz önünde bulundurulması, belirli harmoniklerde rezonans olayları ile karşılaşılıp karşılaşılmayacağının hesaplanması kompanzasyon tesislerinde göz önünde bulundurulması gereken teknik ve ekonomik bir zorunluktur.

3.6 GÜÇ KOMPANZASYONUNUN YARARLARI

3.6.1 Reaktif Gücün Etkileri

Genel halde,reaktif güç sistem kayıplarını arttırmakta,enerji iletim kapasitesini azaltmaktadır.Uretime giderek pahalılaşılan elektrik enerjisi , iletimde ucuz ve gerçekte iş gören aktif enerji olmasını gerekli kılmaktadır.Reaktif güç aslında kullanılabilir enerji türüne çevrilememektedir.Örneğin; bir indüksiyon motoru magnetik alanın temini için şebekeden reaktif akım çeker.Bu akım geçtiği yerlerde (transformatör,hatlar v.b.) gereksiz kayıplar oluşturmaktadır. Bu kayıplar ortadan kaldırılırsa, örneğin bir transformatör daha fazla yükü besleyebilecek veya belli bir yük için daha küçük kesitte kablo kullanılacaktır. Aynı zahiri güçte bir hattan geçen zahiri gücün küçük olması,hattın aktif güç iletim kapasitesini arttırır.

Görüldüğü gibi reaktif güç ekonomik bir sorun olarak ortaya çıkmaktadır.Endüstrinin gelişmesiyle beraber büyük ölçekte reaktif güç çeken yük tipleri ortaya çıkmıştır. Ark fırınları,indüksiyon fırınları,ark kaynak makinaları,haddehaneler,yer üstü maden kazıcıları,ağaç kıyma makinaları ve darbeli yüksek güç gerektiren parçacık hızlandırıcıları bu çeşit yüklerdendir.Bu çeşit yükler çalışma şekilleri açısından non-linear yük sınıfına girer ve genellikle harmonik üretirler.

Tüketicinin güç faktörü belirli limitlerin altında bulunduğu sürece besleme sisteminin ortalama güç faktörü de düşük olur.Düşük güç faktörünün etkilerini şöyle özetleyebiliriz:

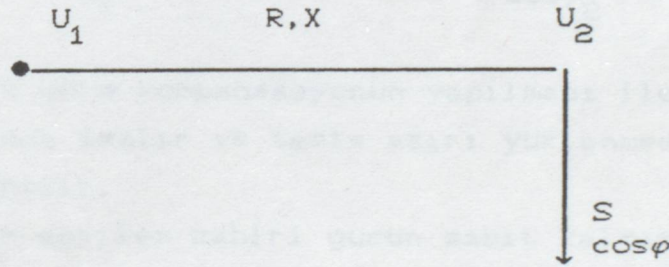
Üretici yönünden,kurulacak bir tesiste ; generatör ve transformatörlerin daha büyük güçte seçilmesine,iletkenlerin daha kalın kesitli olmasına,ölçme ve kontrol cihazların daha hassas ve büyük olmasına neden olur. Kurulu bir tesiste ise; üretim , iletim ve dağıtımında kapasite ve verimin düşmesine, iletkenlerde kayıpların ve gerilim düşümünün artmasına,gerilim regülasyonu ve işletmenin zorlaşmasına neden olur. Sonuç

olarak üretim maliyeti artar.

Tüketici yönünden,kurulacak bir tesiste;kontrol,koruma ve kumanda donanımının gereğinden daha büyük olmasına,iletkenlerin daha kalın kesitli seçilmesine neden olur. Kurulu bir tesiste ise;şebekeden daha çok reaktif güç çekilmesine,kayıpların ve gerilim düşümünün artmasına,tesisin kapasite ve veriminin düşmesine neden olur. Sonuç olarak görülen hizmet ve üretilen ürünün maliyeti artar.Reaktif gücün bu olumsuz etkilerini ancak bu gücü kompanze ederek giderebiliriz.

3.6.2 Şebekeye ve Tüketicie Sağlayacağı Yararlar

Güç katsayısını düzeltmenin şebeke ve tüketici açısından olumlu yararlar sağladığı gerçeği bu bölümde hesap yolu ile gösterilecektir.Hesaplarda kullanmak üzere şekil 2.7'deki hat ile bu hattın sonundan beslenen bir tüketici örnek alınacaktır.



Şekil 3.10 Bir besleme hattı ve direnci

R : Hattın omik direnci

X : Hattın reaktif direnci

U_1 : Hattın başındaki faz-nötr gerilimi

U_2 : Hattın sonundaki faz-nötr gerilimi

S : Hat sonundan çekilen görünen güç

$\cos \phi$: Güç katsayısı

3.6.2.1. Şebekeye Sağlayacağı Yararlar

Güç katsayısının düzeltilmesi ile üretim,iletim ve dağıtım tesislerinde sağlanan yararlar üç madde halinde özetlenebilir.

1)Şebekenin güç kapasitesinin artması;

a)Hat sonundan çekilen (P) aktif gücün sabit kalması hali:

Kompanzasyondan önce ve sonra çekilen zahiri güçler arasındaki fark:

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (3.47)$$

olmak üzere kompanzasyondan önceki değere oranı:

$$\% \Delta S = \frac{S_1 - S_2}{S_1} 100 = 100 \left(1 - \frac{\cos \phi_1}{\cos \phi_2} \right) \quad (3.48)$$

dir. Bu formüle göre kompanzasyonun yapılması ile tesisin yükü % ΔS oranında azalır ve tesis aşırı yüklenmeden % ΔS oranında yüklenebilir.

b)Hat sonundan çekilen zahiri gücün sabit kalması hali:

Kompanzasyondan önce ve sonra çekilen aktif güçler arasındaki fark:

$$\Delta P = P_2 - P_1 \quad (3.49)$$

olmak üzere kompanzasyondan önceki değere oranı:

$$\% \Delta P = 100 \frac{P_2 - P_1}{P_1} = 100 \left(\frac{\cos \phi_2}{\cos \phi_1} - 1 \right) \quad (3.50)$$

dir. Buradan yüzde olarak aktif güç artışı olduğunu görebili-

riz. Her iki durumda da şebekede oldukça yüksek kapasite artışı olmaktadır.

2) Şebeke ısı kayıplarının azalması;

Genellikle endüstriyel ve domestik dağıtım sistemlerinde I R enerji kayıpları puant ve minimum yük saatlerine, iletken kesitlerine ve uzunluklarına bağımlı olarak toplam kullanılan enerjinin % 2.5 - 7.5 arasında bir değer oluşturur.

Hat sonundan çekilen aktif gücün sabit kaldığı kabul edilirse, kompanzasyondan önceki ısı kaybı:

$$P_{z1} = \frac{R P_1^2}{2 U \cos \varphi_1} \quad (3.51)$$

kompanzasyondan sonraki ısı kaybı

$$P_{z2} = \frac{R P_2^2}{2 U \cos \varphi_2} \quad (3.52)$$

bu iki kayıp gücün farkı:

$$\Delta P_z = P_{z1} - P_{z2}$$

olur. Kompanzasyonun yapılması ile çekilen aktif güce oranla ısı kaybı cinsinden elde edilen kazanç:

$$\% z = 100 \frac{P_{z1} - P_{z2}}{P} = 100 \left(1 - \frac{\cos^2 \varphi_1}{\cos^2 \varphi_2} \right) \quad (3.53)$$

olarak bulunur. Görülüyor ki P aktif gücünün büyümesiyle yüzde olarak kayıplar azalacaktır.

Tam kompanzasyon yapılması ($\cos = 1$) haline göre, çeşitli güç katsayıları için şebeke ısı kayıplarının hangi oranda

azalacağı Tablo 2.1'de verilmiştir. TEK'in iletim ve dağıtım kayıpları % 5.5 civarında olup örneğin, 1981 yılı için mutlak değeri 1150 GWh civarındadır. Güç faktörünün 0.8'den 0.9'a çıkarılması sonucu % z=20.99 bulunur ki 1150 GWh'lık ısı kaybının teorik olarak 240 GWh'lık kısmı kazanılacak demektir.

Tablo 3.1 Tam kompanzasyonda çeşitli güç katsayıları için, ısı kayıplarındaki kazançlar

$\cos \phi_1$	% Z
1.0	0
0.9	19
0.8	21
0.7	36
0.6	64
0.5	75

Reaktif gücün iletim sistemini gereksiz, fazla akımla yüklediği söylenmişti. Şimdi bu durumu formüle etmiş bulunuyoruz. İletim sisteminde R direncinden dolayı bakır kayıplarını

$$I_{reel} = I \cos \phi$$

$$R \cdot I^2 = R \left(\frac{I_{reel}}{\cos \phi} \right)^2 = R \cdot I_{reel}^2 \left(\frac{1}{\cos^2 \phi} \right) \quad (3.54)$$

ile de ifade edebiliriz. O halde bu yaklaşımla (3.54) bağıntısına göre belli bir aktif güç elde ederken enerji iletim hatındaki kayıplar $1/\cos^2 \phi$ ile artmaktadır. Örneğin; $\cos \phi = 1$ tam kompanze edilmiş bir sistemde enerji iletim hatlarındaki kayıp $R I^2$ iken, $\cos \phi = 0.7$ olması halinde bu kayıplar iki kat ve 0.6 olması halinde ise yaklaşık üç kat artmaktadır.

ine kayıpları anlatmak için şekil 3.5'den I yük akı-

mininin efektif değeri;

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + Q^2}}{V} \quad (3.55)$$

olacaktır. Burada yük endüktif karakterlidir. ($-Q_c$ kapasitif reaktif gücünü sisteme ekleyecek olursak yük akımı;

$$I = \frac{\sqrt{P^2 + (Q - Q_c^{(c)})^2}}{V} \quad (3.56)$$

olacaktır. Demekki $Q = Q_c^{(c)}$ olduğunda kayıplar minimize edilmiş olacak ve hattan daha çok aktif güç aktarma ihtimali doğacaktır.

3) Gerilim düşümünün azalması;

İlgili şekil 3.5'de verilmiş olup, hat üzerinden çekilen P aktif gücünün sabit kaldığı kabul edilirse, oransal kayıp güç

$$\%P_z = 100 \frac{3 R I^2}{P} \quad (3.57)$$

bağıntısı göz önüne alınarak,

$$\Delta U = R I \cos \varphi + X I \sin \varphi, \text{ bağıntısı:} \quad (3.58)$$

$$\frac{\% \Delta U}{U} = \% \Sigma = 100 \left(\frac{R I \cos \varphi}{U} + \frac{X I \sin \varphi}{U} \right) \quad (3.59)$$

veya eşitliğin birinci terimindeki U yerine: $U = \frac{P}{I \cos \varphi}$ ve

ikinci terimde I yerine: $I = \frac{P}{U \cos \varphi}$ değerleri konursa,

$$\% \Sigma = 100 \left(P_z \cos^2 \varphi + \frac{P X}{U^2} \tan \varphi \right) \quad (3.60)$$

bağıntısı elde edilir.

Boyuna gerilim düşümü;

$$\Delta V_R = \frac{RP + XQ}{V}$$

ile ifade ediliyordu. $(-Q_c)$ kapasitif reaktif gücü sisteme ekleyecek olursak;

$$\Delta V_R = \frac{RP + X(Q - Q_c)}{V}$$

elde edilir.

Eğer istenirse boyuna gerilim düşümü sıfır olacak şekilde bir enerji nakli yapmak mümkündür. Bu durumda denklem (3.58)'ya göre reaktif akımın değeri;

$$I_q = -I_p \frac{R}{X}$$

veya

$$\tan \phi = -\frac{R}{X}$$

olmalıdır. Burada eksi işareti, reaktif akımın kapasitif karakterde yani faz açısının negatif olması gerektiğini gösterir.

Alçak gerilim şebekesinde reaktif direnç ihmal edildiğinden gerilim düşümü, hat akımının aktif bileşeni ile hattın omik direncinin çarpımına eşit yani

$$\Delta U = I_p R$$

olduğundan burada reaktif akımın tesiri görülmez.

3.6.2.2. Tüketiciye Sağlayacağı Yararlar

Bir işletmede tüketicilerin şebekeden çektikleri reaktif enerji bedeli normal şartlar altında reaktif enerji tarifesine göre ödenir. Fakat eğer bir işletmede güç katsayısı 0.9 olacak şekilde bir kompanzasyon tesisi kurulursa, elektrik idaresine hiçbir reaktif enerji bedeli ödemez, fakat buna karşılık kompanzasyon tesisi için ek bir yatırım yapması gerekir.

BÖLÜM 4

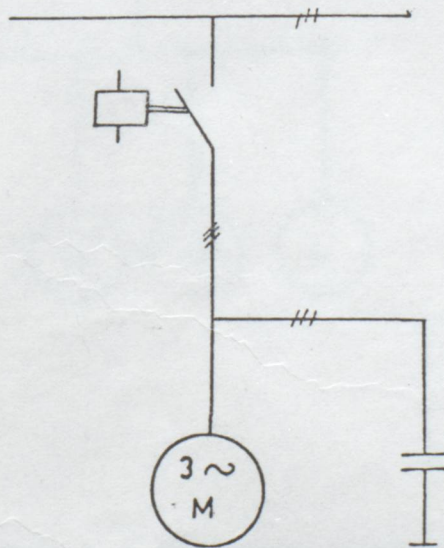
KOMPANZASYON TESİSLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

4.1 TESİS ŞEKLİNE GÖRE KOMPANZASYON

Tesise bağlı alıcıların durumuna göre, temelde üç tip kompanzasyon vardır.

4.1.1 Münferit Kompanzasyon

Bu tür kompanzasyonda tesisteki alıcılar (motor, lamba, transformatör, v.b.) ayrı ayrı kompanze edilirler. Devamlı olarak işletmede bulunan oldukça büyük güçlü tüketicilerin reaktif güç ihtiyacını temin etmek için kondansatörler tüketicinin uçlarına doğrudan doğruya paralel bağlanırlar ve ortak bir anahtar üzerinden tüketici ile birlikte işletmeye sokulup çıkarılırlar. Böylece kompanzasyonda kontrol edilecek güç azalır. Yani güç küçük parçalar halinde ayrı ayrı kontrol edilmiş olur. Kondansatörler her alıcı ile beraber devreye girip çıktığından ayrı bir açıcı cihazı, ayrı bir sigorta veya deşarj direncine ihtiyaç yoktur. kompanzasyonda büyük güçlü motorların devreye girip çıkmasından dolayı oluşan dalgalanmalar hemen yanındaki kompanzasyon ünitesinde süzülerek tesis şebekesindeki salınmanın küçük mertebede kalması temin edilir

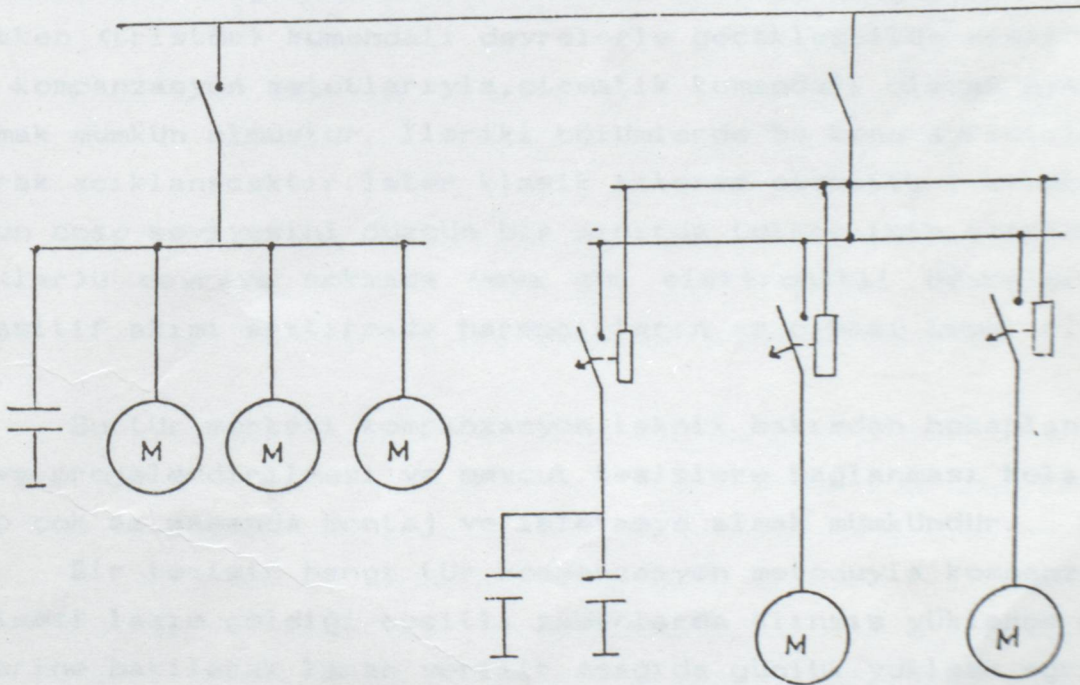


Şekil 4.1 Münferit kompanzasyon

4.1.2. Grup Kompanzasyonu

Birden fazla alıcıya aynı anahtarla devre kumandası yapıldığında grup olarak kompanzasyon yapılabilir. Yani beraber ve aynı kontaktör veya şalter üzerinden devreye girip çıkan motor, lamba ve transformatörler ortak kompanze edilebilir. Bu durumda sigorta ve deşarj dirençlerine ihtiyaç yoktur. Bir çok tüketicinin bulunduğu bir tesiste her tüketicinin ayrı ayrı kondansatörler ile donatılacağı yerde bunların ortak bir kompanzasyon tesisi tarafındam beslenmesi daha pratik ve ekonomik sonuçlar verir. Bu durumda kondansatörlerin özel anahtarlar üzerinden ve gerektiğinde kademeli olarak şebekeye bağlanması gerekir.

Bu tür kompanzasyonda gruptaki örneğin motorlar aynı anda çalışıp durmalıdır. Şayet böyle aynı anda değilse her motor ayrı olarakta çalışabiliyorsa kondansatörler de ayrı olarak bu motor kontaklarıyla devreye girip çıkabilecek şekilde dizayn edilir.



Şekil 4.2 Grup kompanzasyonu

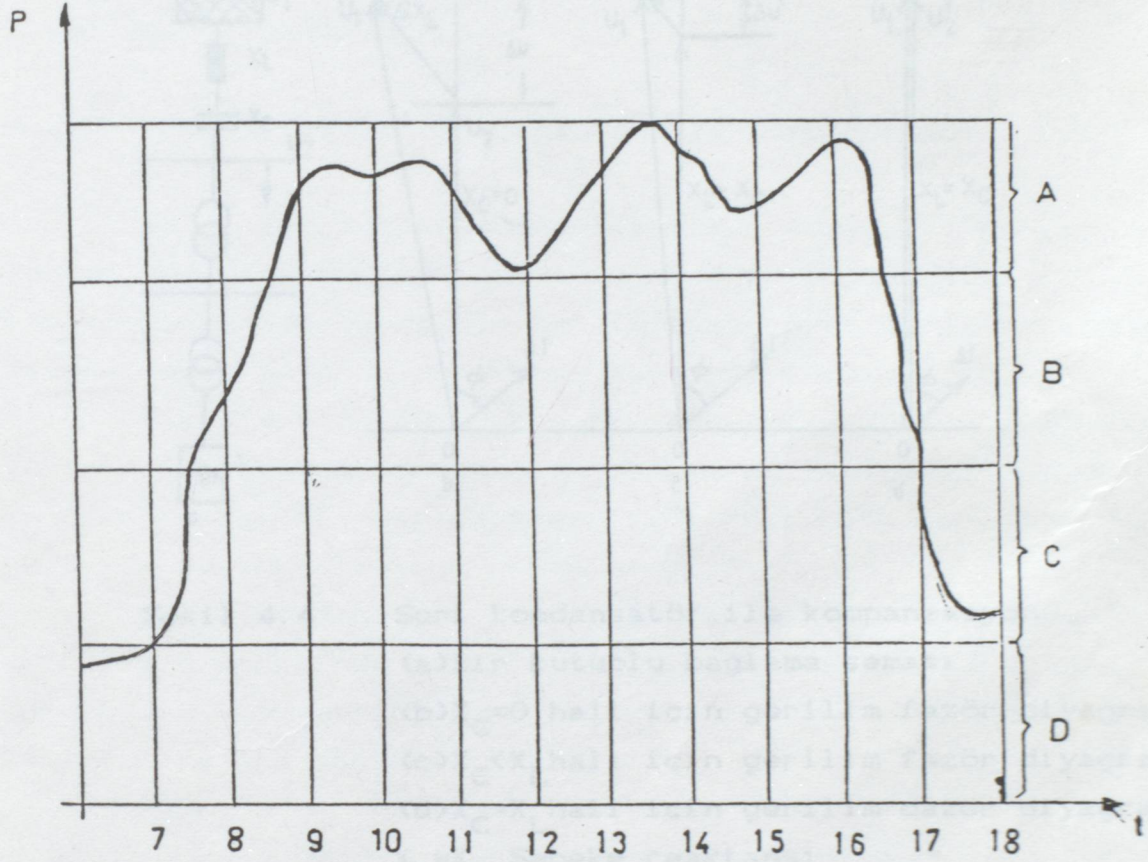
4.1.3. Merkezi Kompanzasyon

Grup kompanzasyonun bir kademe daha genişletilmesi ile merkezi kompanzasyon elde edilir. Merkezi kompanzasyonda tüketici sayısı çok olduğundan ve bunların hepsinin de sabit güçle ve sürekli olarak devrede bulunması söz konusu olmadığından yani yükler belli belirsiz zamanlarda devreye girip çıkıyorlarsa kondansatör gücünü , değişen kompanzasyon gücüne uydurmak için merkezi kompanzasyonda bir ayar düzeni bulunur. Bu sayede hem düşük hem de aşırı kompanzasyondan sakınmak mümkün olur. Örneğin güç katsayısını devamlı kontrol eden bir cihaz yardımıyla ihtiyaca göre kondansatör grupları devreye sokulup çıkarılır. Bu, yük durumuna göre ayarlı merkezi kompanzasyonun yapılması işlemidir. El ve otomatik çalışma durumları daima düzgün bir $\cos\phi$ seviyesini tutmaya çalışır. Kademeli olarak kondansatörü devreye sokup çıkarma az salınımla gerilim darbeleri yaratır. Bu ayarlı kompanzasyon klasik olarak reaktif yük rölesi ile devrede olan kondansatör grupları sayısını arttırıp azaltarak sağlamaktadır. Fakat son zamanlarda gelişen yarı iletken (tristör) kumandalı devrelerle gerçekleştirilen elektronik kompanzasyon metotlarıyla, otomatik kumandalı olarak ayar yapmak mümkün olmuştur. İleriki bölümlerde bu konu ayrıntılı olarak açıklanacaktır. İster klasik isterse otomatik kumandalı olsun $\cos\phi$ seviyesini düzgün bir sınırdaki tutmak için kondansatör(ler)ü devreye sokmada veya güç elektronikli devrelerde kapasitif akımı arttırmada harmoniklerin az olması temel alınır.

Bu tür merkezi kompanzasyon teknik bakımdan hesaplanması ve projelendirilmesi ve mevcut tesislere bağlanması kolay olup çok az zamanda montaj ve işletmeye almak mümkündür.

Bir tesisin hangi tür kompanzasyon metoduyla kompanze edilmesi lazım geldiği çeşitli zamanlarda alınmış yüklenme eğrilerine bakılarak karar verilir. Aşağıda günlük yükleme eğrisi görülmektedir. Burada prensip olarak A bölümü için otomatik merkezi kompanzasyon, B ve C bölümleri için grup veya tek tek kompanzasyon, D bölümü için de sabit kompanzasyon düşünülebi-

lır. Bu ön karardan sonra gerekli hesaplamalar ve etüdler yapılarak ne çeşit kompanzasyonun uygun olduğuna karar verilir.

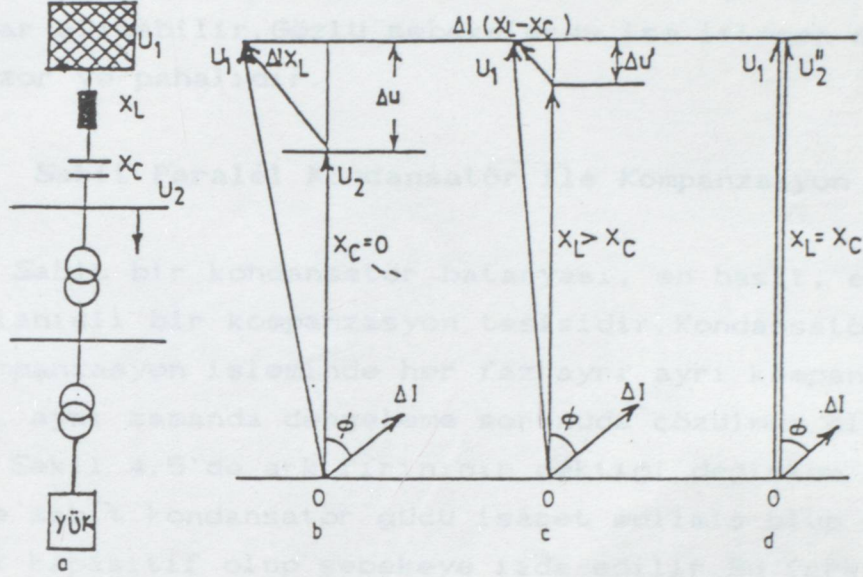


Şekil 4.3 Bir işletmenin günlük yükleme eğrisi

4.2 Kondansatörlerin Bağlama Şekline Göre Kompanzasyon

Reaktif güç üretmek ve kompanzasyon için bugün en çok kullanılan, en pratik ve en ekonomik araç kondansatördür. Bir çok kondansatörün paralel bağlanması ile istenen güçte bir bataryanın tesis edilmesi mümkün olduğu gibi bir veya birkaç kondansatörün veya kondansatör grubunun arızalanması halinde, işletmeye ara vermeden bunların kısa sürede yenileri ile değiştirilmesi imkanı vardır. Prensip olarak seri kondansatörler ve paralel kondansatörler olarak iki ana gruba ayırmak mümkündür

4.2.1 Seri Kondansatörler ile Kompanzasyon



Şekil 4.4 Seri kondansatör ile kompanzasyon

(a) Bir kutuplu bağlama şeması

(b) $X_C = 0$ hali için gerilim fazör diyagramı

(c) $X_C < X_L$ hali için gerilim fazör diyagramı

(d) $X_C = X_L$ hali için gerilim fazör diyagramı

$X_L = X_S$ Şebeke reaktansı

X_C , seri kondansatör reaktansıdır.

Endüktif karakterli $X_S = X_L$ şebeke reaktansı yüksek gerilim barasında gerilim değişmesine sebep olmaktadır. Halbuki şebeke reaktansına seri olarak, reaktansı X_C olan bir kondansatör bağlanırsa, toplam reaktans $j(X_L - X_C)$ değerini alır. Buna göre şebekenin omik direnci ihmal edilerek, yüksek gerilim barasının gerilimi için,

$$U_2 = U_1 - j\Delta I (X_L - X_C) \text{ veya gerilim değişimi olarak}$$

$$\Delta U = \Delta I (X_L - X_C) \sin \phi \quad (4.1)$$

yazılabilir. Buradan görülüyor ki, X_C büyüdükçe ΔU gerilimi değişimi azalmaktadır ve U_2 gerilimi, U_1 gerilimine yaklaşmaktadır. $X_L = X_C$ olması halinde gerilim düşümü sıfıra eşittir.

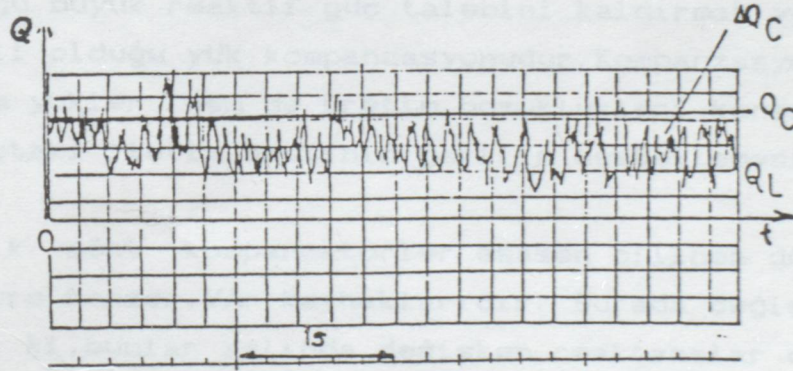
Ayrı bir paralel kondansatör bulunmadığı takdirde seri kondansatör üzerinden, çekilen akımın tamamı geçer. Bu yüzden kondansatör toprağa karşı U_2 gerilimine göre yalıtılmalıdır. Seri kondansatör dallı şebekelerde kullanıldığı zaman beklenen sonuçlar alınabilir. Gözlü şebekelerde ise istenen sonucu elde etmek zor ve pahalıdır.

4.2.2 Sabit Paralel Kondansatör ile Kompanzasyon

Sabit bir kondansatör bataryası, en basit, en ucuz ve en kullanışlı bir kompanzasyon tesisidir. Kondansatör ile yapılan kompanzasyon işleminde her faz ayrı ayrı kompanse edildiğinden, aynı zamanda dengeleme sorunuda çözülmüş olur

Şekil 4.5'de ark fırınının çektiği değişken endüktif güç ile sabit kondansatör gücü işaret edilmiş olup aralarında ki fark kapasitif olup şebekeye iade edilir. Bu fark güç, bara geriliminin yükselmesine neden olur.

Sabit kondansatör tesisi fliker olayını sınırlamadığı gibi fırın barasında gerilim değişmesini de önleyemez. Sabit kondansatör tesisinin gücünü tayin ederken oluşabilecek rezonanslarda göz önüne alınmalıdır.



Şekil 4.5 Sabit kondansatör ile kompanzasyon

Q_0 : Çekilen ortalama reaktif güç

ΔQ : Çekilen reaktif gücün değişimi

Q_C : Kondansatör gücü

Q_A : Şebekeye verilen artık kondansatör gücü

GÜÇ KOMPANZASYONUNUN MATEMATİKSEL ANALİZİ

5.1 TANITIM

Son yıllarda dinamik güç faktörü düzeltimi ve terminal gerilim stabilasyonu için endüstriyel ve elektrik idare sistemlerinde kullanılan tristör kontrollü şönt kompanzatörlerin sayısında hızlı bir artış olmuştur. Bu tür şönt kompanzatörler hem endüktif hem de kapasitif domende çalışan değişken reaktanslar gibi işlev görür. Bu yazıda, dengesiz yük kompanzasyonu ve gerilim stabilizasyonu için şartlar, simetrik bileşenlerin kullanımıyla tesbit edilmiştir.

Şönt kompanzatörler, verilen bir uçtaki iletim gerilimini kontrol (regüle) etmek veya güç faktörü düzeltimini sağlamak için kullanılır. Pratik uygulamalarda normal olarak kompanzasyon probleminin iki tipiyle karşı karşıya gelinir. Birincisi, genellikle ac besleme hattından çekilen aktif gücü dengelemek ve elektrik ark ocakları, haddehaneler gibi ani değişen yüklerin bulunduğu büyük reaktif güç talebini kaldırmak veya azaltmanın gerekli olduğu yük kompanzasyonudur. Kompanzasyonun ikinci tipi, hem yükler hem de üretim bozuklukları karşısında verilen bir uçtaki iletim hattının gerilim desteklemesiyle ilgilidir.

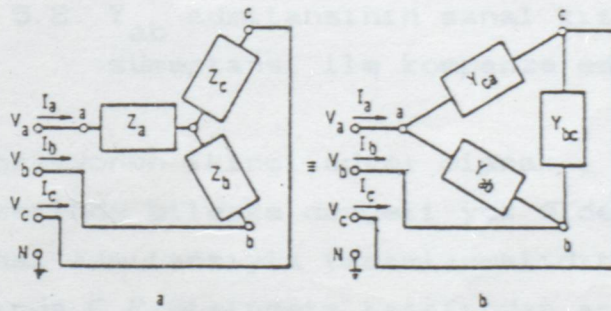
Statik şönt kompanzatörler esasen bilinen döner senkron kondensere benzer, VAR kaynaklarıdır. Burada değişken empedans tipleri ki, bunlar aslında değişken reaktanslar olarak işlev görürler, göz önüne alınmıştır. Kullanılan şönt kompanzatör tiplerine aldirmayarak temel kompanzasyon prensipleri aynıdır. Çünkü, reaktif ve negatif-sekuens yük akımlarını sağlamak (yük kompanzasyonu) için veya uç gerilimi regüle edecek (gerilim desteği) ac sistem üzerinde düşen, uygun bir gerilimi indüklemek için kontrol edilebilir VAR'ların üretimi gereklidir. Asıl amaç, tristör devresi kullanan pratik şönt kompanzatör düzenlerinin kontrolüne uygun analitik ilişkilerin çıkarılmasıdır.

5.2 YÜK KOMPANZASYONUNUN ESASLARI

Büyük ve ani değişen yüklerin kompanzasyonu için genelde iki temel sebep vardır. Bunlar, alternatif akım sisteminin, yük uçlarındaki gerilim değişimini bir seviyede tutmak için çok zayıf olması ve alternatif akım şebekesinden güç çekmenin ekonomik ve pratik olmamasıdır.

Yük kompanzasyonu, uç gerilimin harici regülasyonunu değiştirmeye kalkışmaksızın ac sistem üzerindeki tek bir yük (veya yük grubu)ün istenmeyen etkilerini azaltmaya yöneliktir.

Bir ac sistemin uçlarına bağlı Z_a , Z_b ve Z_c empedanslarıyla gösterilen topraksız üç fazlı yük düşünelim. Ac sistem şekil 5.1a'da gösterildiği gibi simetrik faz-nötr gerilimlerin ($V_a = V, V_b = Ve^{-j2\pi/3}, V_c = Ve^{-j4\pi/3}$) takımıdır. Kolaylık için Y_{ab}, Y_{bc} ve Y_{ca} ile gösterilen yükün üçgen eşdeğeri şekil 1b'de gösterilmiştir. Z_a, Z_b ve Z_c (veya Y_{ab}, Y_{bc}, Y_{ca} admitansları) empedansları genellikle zamanın fonksiyonlarıdır. Temel kompanzasyon ihtiyaçlarını kurmak için bu üç yük empedansı birbirinden farklı ve zaman değişmesizdir. Yani genel kararlı hal dengeşiz yük gösterir. Gerçekte, üç kararlı hal empedansların, belirli bir zaman anında yükü temsil etmesi olarak görülebilir. Birbirine yakın ayrı ayrı zaman anlarında yükü gösteren "kararlı hal" empedans serileri, değişen yükü yeniden kurabilir.



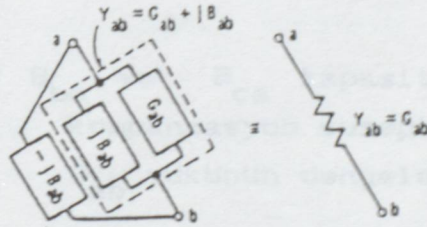
Şekil 5.1 (a) Dengesiz üç fazlı yıldız bağlı yük
(b) Yükün üçgen bağlı admitans eşdeğeri

Yukarıdaki varsayımla kompanzasyon problemi, kaynak uçlarına bağlı reel ve dengeli yüklerle gösterilecek yük admitanslarıyla kombine edilmiş şebeke reaktif admitansının bulunmasıdır. Şekil 5.1b'deki üçgen eşdeğer gösterimi kullanarak, üç yük admitansı, sanki üç tek fazlı yük gibi ayrı ayrı kompanse edilebilir. Örneğin ab fazını göz önüne alalım; Y_{ab} admitansı, reel (kondüktans) ve sanal (süseptans) bileşenlerinden oluşur.

$$Y_{ab} = G_{ab} + jB_{ab} \quad (5.1)$$

G_{ab} , yük kondüktansı ve B_{ab} , yük süseptansıdır.

Kompanzasyonun birinci adımı olarak, sanal kısmı şekil 5.2'de gösterildiği gibi Y_{ab} ile paralel bağlı kompanzasyon süseptansı $-B_{ab}$ ile yok edilebilir (Yani yükün sanal kısmı yok olur).



Şekil 5.2 Y_{ab} admitansının sanal kısmının $-B_{ab}$ süseptansı ile kompanse edilmesi

Kompanzasyonun ikinci adımı olarak, reel admitans G_{ab} ac kaynak üzerinde bileşke dengeli yük elde etmede olduğu gibi şebeke sanal admitansı ile tamamlanmalıdır. Bu problem, bu yüzyılın başında C.P. Steinmetz tarafından araştırılmıştır.

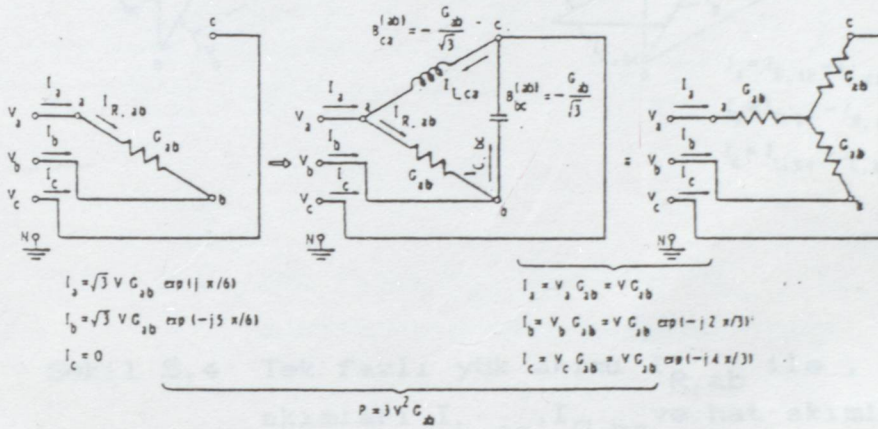
Buna göre eğer, kapasitif süseptans b-c fazları arasında

$$B_{bc} = jG_{ab} / \sqrt{3} \quad (5.2)$$

ve endüktif süseptans da c-a fazları arasında

$$B_{ca} = -jG_{ab}/\sqrt{3} \quad (5.3)$$

bağlanırsa ac şebeke üzerindeki yük dengeli olur (reel kalır). Burada, (ab) indisi ab fazını kompanse etmek için gereken süseptansları göstermek için kullanılır.



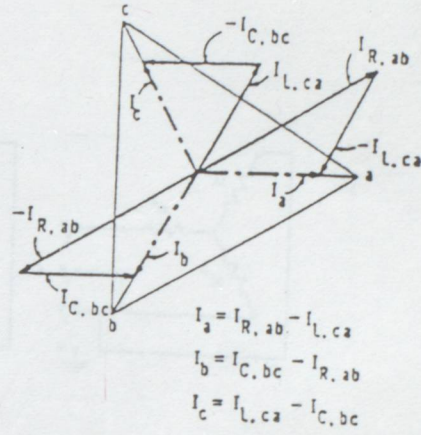
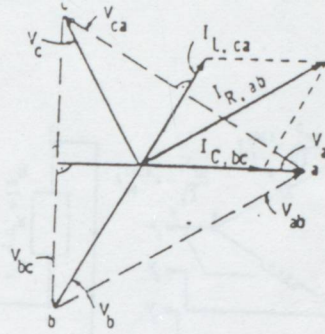
Şekil 5.3 B_{bc} ve B_{ca} kapasitif ve endüktif kompanzasyon süseptansları ile reel G_{ab} yükünün dengelenmesi

Kompanzasyondan önce ac kaynaktan sağlanan tek fazlı güç,

$$P = (\sqrt{3} V)^2 G = 3V^2 G \quad (5.4)$$

kompanzasyondan sonra istenen üç fazlı reel güç ihtiyacına eşit olması gerektiğinden kompanse edilen yük, gerçekte şekil 5.3'de gösterildiği gibi her biri G_{AB} kondüktanslı yıldız bağlı dirençler olarak gösterilebilir.

Şekil 3'de tek fazlı reel yükün, iki süseptansla dengeli üç fazlı yüke nasıl dönüştürüldüğünü gösteren fazör diyagramı şekil 5.4'de tanımlanmıştır.



Şekil 5.4 Tek fazlı yük akımı $I_{R,ab}$ ile , kompanzasyon akımları $I_{L,ca}, I_{C,bc}$ ve hat akımları I_a, I_b, I_c arasındaki ilişkiyi gösteren fazör diyagramı

Yukarıdaki taslağa benzer bir presedür , bc ve ca fazları arasındaki yük admitanslarını kompanse etmek için izlenebilir. Birinci olarak B_{bc} ve B_{ca} süseptansları sırasıyla zıt işaretli $(-B_{bc})$ ve $(-B_{ca})$ kompanzasyon süseptansı ile yok edilir. İkinci adımda G_{bc} ve G_{ca} kondüktansları sırasıyla,

$$B_{ca}^{(bc)} = jG_{bc} / \sqrt{3} \quad (5.5)$$

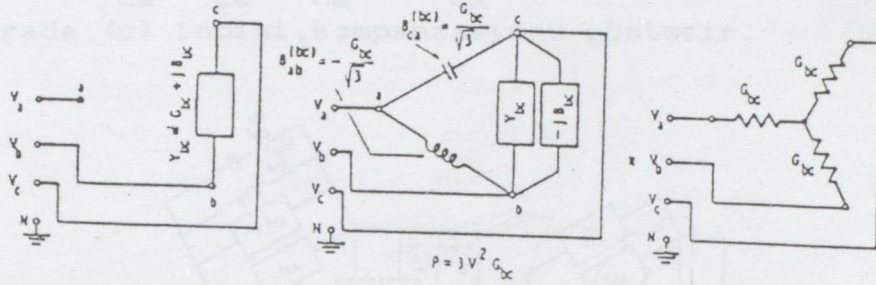
$$B_{ab}^{(bc)} = -jG_{bc} / \sqrt{3} \quad (5.6)$$

ve

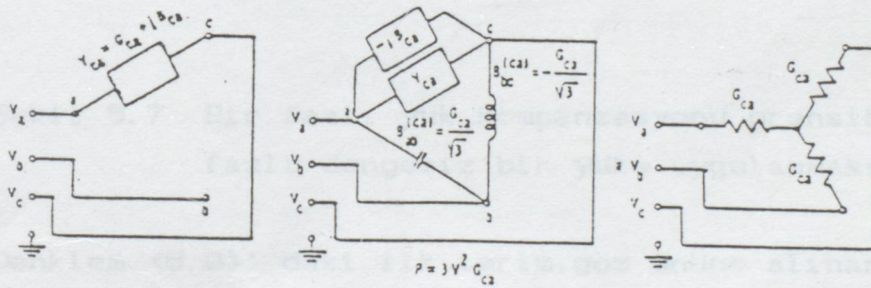
$$B_{ab}^{(ca)} = jG_{ca} / \sqrt{3} \quad (5.7)$$

$$B_{bc}^{(ca)} = -jG_{ca} / \sqrt{3} \quad (5.8)$$

iki süseptans çiftiyle dengelenir. Y_{bc} ve Y_{ca} admitanslarının kompanzasyonu şekil 5.5 ve şekil 5.6 ile gösterilebilir.



Şekil 5.5 Tek fazlı Y_{bc} yükünün $-B_{bc}$, B_{ca} ve B_{ab} süseptanslarıyla kompanzasyonu



Şekil 5.6 Tek fazlı Y_{ca} yükünün $-B_{ab}$, B_{bc} süseptansları ile kompanzasyonu

Üç fazlı yükün tam kompanzasyonu şekil 5.7'de gösterildiği gibi her faza bütün kompanzasyon süseptanslarını ekleyerek basitce elde edilebilir. Böylece elde edilen kompanzasyon süseptansları B_{ab}^C , B_{bc}^C ve B_{ca}^C her bir fazı kompanze etmek için kullanılan süseptansların toplamıdır. Aşağıda gösterilmiştir;

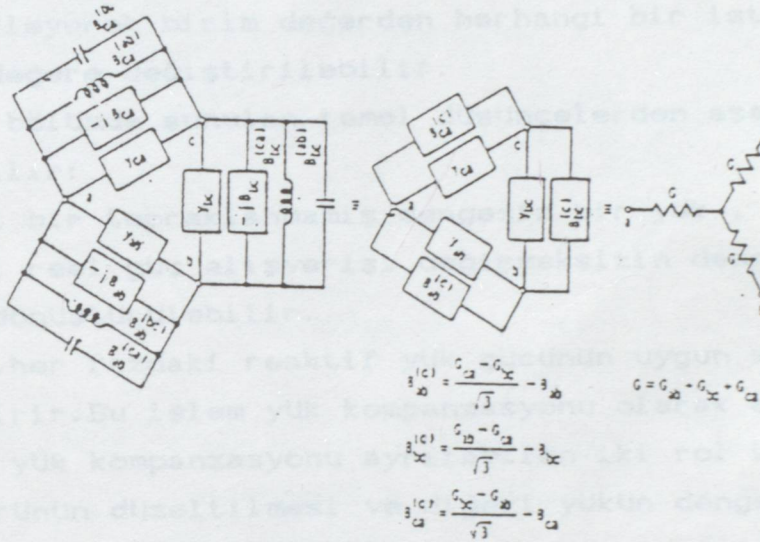
$$B_{ab}^C = -B_{ab} + B_{ab}^{(bc)} + B_{ab}^{(ca)}$$

$$B_{bc}^C = -B_{bc} + B_{bc}^{(ca)} + B_{bc}^{(ab)}$$

(5.9)

$$B_{ca}^C = -B_{ca} + B_{ca}^{(ab)} + B_{ca}^{(bc)}$$

Burada (c) indisi, kompanzasyonu gösterir.



Sekil 5.7 Bir fazlı yük kompanzasyonu prensibinin üç fazlı dengesiz bir yüke uygulanması

Denklem (5.9)'daki ilk terim, göz önüne alınan fazdaki yükün reaktif bileşenini gösterir. İkinci ve üçüncü terimler, diğer iki fazdaki yükün reel kısmını dengelemek için gerekli reaktif ihtiyacı gösterir. Genel dengesiz bir yükü kompanze etmek için gerekli süseptanslar, yük admitansının reel ve reaktif kısımları cinsinden ifade edilebilir yani;

$$B_{ab}^C = -jB_{ab} + j(G_{ca} - G_{bc})/\sqrt{3}$$

$$B_{bc}^C = -jB_{bc} + j(G_{ab} - G_{ca})/\sqrt{3}$$

(5.10)

$$B_{ca}^C = -jB_{ca} + j(G_{bc} - G_{ab})/\sqrt{3}$$

Görüleceği gibi eğer yükün reel kısmı dengeli ise (yani $G_{ab}=G_{bc}=G_{ca}$ ise) kompanzasyon problemi, her fazda yükün reaktif kısmını yok etmeye indirgenir. Genelde denklem (10)'da verilen kompanzasyon süseptansları herhangi bir lineer dengesiz yükü dengeli reel bir yüke dönüştürür. Her bir fazdaki kondüktans, orijinal üçgen yükünün ($G = G_{ab} + G_{bc} + G_{ca}$) kondüktansları toplamıdır. Bileşke yükün güç faktörü, denklem (5.10) ile tanımlanan her bir kompanzasyon süseptansa aynı kapasitif veya endüktif süseptans ekleyerek birim değerden herhangi bir istenen geri veya ileri değere değiştirilebilir.

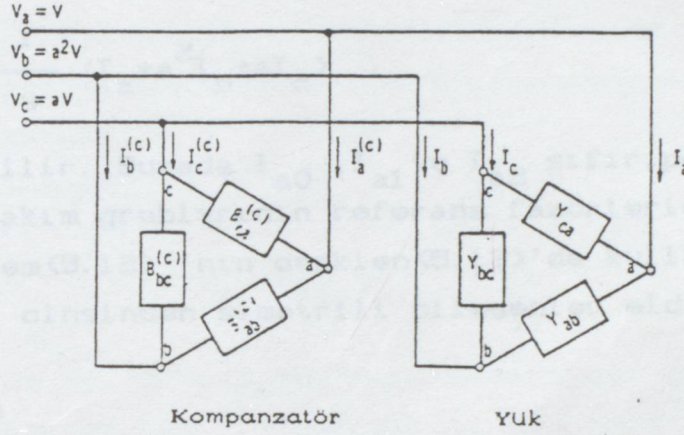
Bu bölümde sunulan temel düşüncelerden aşağıdaki sonuçlara ulaşılır:

- 1-Herhangi bir topraklanmamış dengesiz bir yük , kaynak ve yük arasındaki reel güç alışverişi değişmeksizin dengeli üç fazlı bir yüke dönüştürülebilir.
- 2-Dönüşüm, her fazdaki reaktif yük gücünün uygun modifikasyonunu gerektirir. Bu işlem yük kompanzasyonu olarak anılır.
- 3-Genelde yük kompanzasyonu ayrılabilen iki rol üstlenir; biri, güç faktörünün düzeltilmesi ve diğeri yükün dengelenmesidir. Eğer her ikisi de gerçekleşirse kompanzasyon için gerekli reaktif gücü birlikte belirlerler.
- 4-Herhangi bir dengelenmemiş lineer sürekli bir yük , üç faz arasına bağlanmış üç uygun reaktif empedanslar (kapasitif veya endüktif reaktanslar) ile kompanze edilebilir.
- 5-Eğer yük zamanla değişiyorsa kompanzasyon, değişken reaktanslar (veya diğer kontrol edilebilir VAR kaynaklar) gerektirir ki, bunlar yükün değişimiyle ayarlanabilir.

5.3 YÜK AKIMININ SİMETRİLİ BİLEŞENLER CİNSİNDEN KOMPAZASYON İHTİYACI

Bu bölümde , simetrik bileşenler cinsinden genel dengesiz bir yükün kompanzasyon ihtiyacı araştırılacaktır. Bu araştırma önceki bölümdeki temel düşünceleri tamamlar ve elde edilen sonuçların farklı bir şekilde yorumunu sağlar.

Şekil 5.1'de gösterilen dengeli üç fazlı (topraksız) bir kaynaktan beslenen genel dengesiz üç fazlı yükü tekrar ele alalım. Şimdiki analizde Y_{ab} , Y_{bc} ve Y_{ca} admitanslarıyla belirtilen yükün üçgen eşdeğeri Şekil 5.8 'de gösterildiği gibi kolaylık için aynen tekrar kullanıldı.



Şekil 5.8 Üçgen bağlı admitanslar ve üçgen bağlı kompanzatör ile gösterilen üç fazlı dengesiz yük

Belirtildiği gibi kaynak gerilimleri, pozitif faz dönüş yönünde dengeli olduğu farz edilmiştir. Yani;

$$V_a = V, V_b = a^2 V, V_c = a V \quad (5.11)$$

Yük tarafından çekilen akımlar;

$$\begin{aligned} I_a &= \left[Y_{ab} (1 - a^2) - Y_{ca} (a - 1) \right] V \\ I_b &= \left[Y_{bc} (a^2 - a) - Y_{ab} (1 - a^2) \right] V \\ I_c &= \left[Y_{ca} (a - 1) - Y_{bc} (a^2 - a) \right] V \end{aligned} \quad (5.12)$$

Üç hat akımı cinsinden simetrik bileşenler;

$$I_{a0} = \frac{1}{3} (I_a + I_b + I_c)$$

$$I_{a1} = \frac{1}{3} (I_a + aI_b + a^2I_c) \quad (5.13)$$

$$I_{a2} = \frac{1}{3} (I_a + a^2I_b + aI_c)$$

şeklinde verilir. Burada I_{a0} , I_{a1} ve I_{a2} sıfır, pozitif ve negatif-sequens akım grublarının referans fazörleridir.

Denklemler (5.12) 'nin denklemler (5.13)'de kullanılmasıyla yük admitansları cinsinden simetrik bileşenler elde edilir.

$$I_{a0} = 0$$

$$I_{a1} = (Y_{ab} + Y_{bc} + Y_{ca})V \quad (5.14)$$

$$I_{a2} = -(a^2Y_{ab} + Y_{bc} + aY_{ca})V$$

Yük kompanzasyonunun hedefi simetrik hat akım bileşenleri cinsinden aşağıdaki şekilde ifade edilebilir;

1. Negatif sequens bileşenleri elimine etmek (dengeleme)
2. Pozitif-sequens bileşenlerin reaktif kısmını elimine etmek veya azaltmak (güç faktörünün düzeltilmesi)

Önceki bölümün sonuçları gösterir ki, bu hedeflere şekil 5.8'de gösterildiği gibi reaktif devre elemanlarından oluşmuş (süseptanslar) üçgen bağlı bir kompanzasyon devresiyle ulaşılabilir. Buradaki amaç, kompanzasyon süseptanslarıyla yük akımının simetrik bileşenleri arasındaki ilişkiyi bulmaktır.

Üçgen bağlı kompanzasyon devresi tarafından çekilen akımın simetrik bileşenleri, denklem (5.14)'de verilenlere benzer şekilde kompanzasyon süseptansları cinsinden ifade edilebilir.

$$I_{a0}^c = 0$$

$$I_{a1}^c = j (B_{ab}^c + B_{bc}^c + B_{ca}^c) V \quad (5.15)$$

$$I_{a2}^c = -j (a^2 B_{ab}^c + B_{bc}^c + a B_{ca}^c) V$$

Kompanzasyonun gereği (yükün dengelenmesi ve güç faktörünün düzeltilmesi) aşağıdaki gibi matematiksel olarak olarak formüle edilebilir;

$$\text{Yükün dengelenmesi} \quad I_{a2} + I_{a2}^c = 0 \quad (5.16)$$

$$\text{G. F. Düzeltimi} \quad \text{Im}I_{a1} + I_{a1}^c = 0 \quad (5.17)$$

Denklemler (5.15) ve (5.16)'nın incelenmesi gösterir ki $\text{Im}I_{a1}$ ve I_{a1}^c imajinerken, hem I_{a2} hem de I_{a2}^c 'nin genel olarak bir reel ve imajiner kısmı vardır. Bu yüzden denklem (5.16)'da verilen şart iki eşitlik sağlar;

$$\text{Re}I_{a2} + \text{Re}I_{a2}^c = 0 \quad (5.18)$$

$$\text{Im}I_{a2} + \text{Im}I_{a2}^c = 0 \quad (5.19)$$

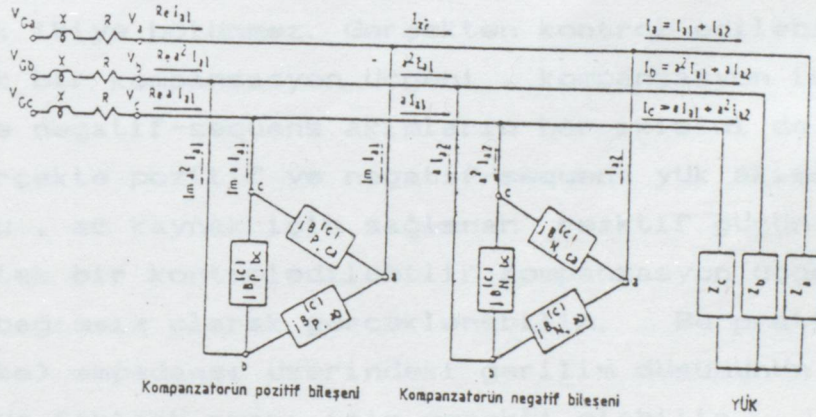
Denklemler (5.16)'dan elde edilen I_{a1} , $\text{Re}I_{a1}$, $\text{Im}I_{a2}^c$ sırasıyla 5.18, 19 ve 20'de yerine konursa ve üç kompanzasyon süseptansı için denklemlerin sonraki çözümleri yapılırsa aşağıdaki sonuçlar elde edilir;

$$B_{ab}^c (\sqrt{3} V) = - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}I_{a1} - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}I_{a2} + \text{Re}I_{a2}$$

$$B_{bc}^c (\sqrt{3} V) = - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}I_{a1} + \frac{2}{\sqrt{3}} \text{Im}I_{a2} \quad (5.20)$$

$$B_{ca}^c (\sqrt{3} V) = - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}I_{a1} - \frac{1}{\sqrt{3}} \text{Im}I_{a2} - \text{Re}I_{a2}$$

Denklemler (5.21) yük akımının simetrik bileşenler (pozitif ve negatif) cinsinden kompanseman süseptanslarını verir ve de araştırdığımız kompanseman özelliklerini açıkça gösterir. Üç kompanseman süseptansı, pozitif - sequens yük akımının imajiner kısmıyla orantılıdır. Oysa herbiri negatif-sequens yük akımının farklı bir fonksiyonudur. Pozitif ve negatif - sequens akımlarının katkısı birbirinden bağımsızdır. Bu yüzden kompanseman devresi iki bağımsız üçgen devre gibi görülebilir. Biri, pozitif-sequens yük akımını sağlar, diğeri negatif-sequens yük akımını sağlar. O halde ac kaynak sadece pozitif - sequens yük akımını sağlamak zorundadır. "Pozitif-sequens üçgen" ve "negatif-sequens üçgen" li yük kompansemanı kavramı şekil 5.9'da gösterilmiştir.



Şekil 5.9 Pozitif-sequens ve negatif-sequens admitans üçgenleri ile kompansemanın gösterilmesi

"Pozitif-sequens üçgen" ve "negatif-sequens üçgen" devre süseptansları, denklem (5.14)'ün kullanılmasıyla denklem (5.20)'den elde edilen yük admitanslarının reel ve imajiner kısımları cinsinden ifade edebiliriz, şöyle ki;

$$B_{P,ab}^C = B_{P,bc}^C = B_{P,ca}^C = -\frac{1}{3} (B_{ab} + B_{bc} + B_{ca}) \quad (5.21)$$

$$B_{N,ab}^c = -\frac{2}{3} B_{ab} + \frac{1}{3} B_{bc} + \frac{1}{3} B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{ca} - G_{bc})$$

$$B_{N,bc}^c = \frac{1}{3} B_{ab} - \frac{2}{3} B_{bc} + \frac{1}{3} B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{ab} - G_{ca})$$

(5.22)

$$B_{N,ca}^c = \frac{1}{3} B_{ab} + \frac{1}{3} B_{bc} - \frac{2}{3} B_{ca} + \frac{1}{\sqrt{3}} (G_{bc} - G_{ab})$$

Burada P ve N indisleri sırasıyla, pozitif ve negatif-sequens bileşenleri gösterir. (5.21) ve (5.22) denklemlerin toplamı, farklı bir yaklaşımla çıkarılmış, (5.10) denkleminde verilen toplam kompanzasyon süseptanslarının aynısıyla sonuçlanır.

Ekonomik sebeplerden dolayı, kompanzasyon devresi normal olarak ikiye bölünmez. Gerçekten kontrol edilebilir süseptanslı tek bir kompanzasyon üçgeni, kompanzasyon için gerekli pozitif ve negatif-sequens akımların her ikisini de sağlar.

Gerçekte pozitif ve negatif-sequens yük akımlarının kompanzasyonu, ac kaynak için sağlanan reaktif gücün kontrolünü sağlayan tek bir kontrol edilebilir kompanzasyon üçgeniyle birbirinden bağımsız olarak gerçekleştirilebilir. Bu pratikte kaynak (ac şebeke) empedansı üzerindeki gerilim düşümünün kompanzasyonu ve güç faktörü ayarı için gerekli olabilir.

Çoğu zaman kompanzasyon ihtiyacı, sadece pozitif-sequens yük akımının reaktif bileşeninin yok edilmesi olmayıp denklem (5.17)'de şart koşulduğu gibi dengeli kaynak empedansı üzerindeki aynı fazlı gerilim düşümünün sıfıra indirilmesi olarak da görülebilir. Bu şart şöyle yazılabilir;

$$\text{Re} \left[(I_a + I_{a1}^c) (R + jX) \right] = 0 \quad (5.23)$$

$$\frac{R}{X} \text{Re} I_{a1} - \text{Im} I_{a1} - I_{a1}^c = 0 \quad (5.24)$$

Burada $R + jX$, dengeli besleme şebekesi empedansıdır.

Denklem 17 ve 18'deki negatif-sequens akımlar için belirtilen şartlar tabii ki değişmez. Sonuçlar, sadece $-ImI_{a1}$ terimi $\frac{R}{X} ReI_{a1} - ImI_{a1}$ ile yer değiştirilerek denklem 5.20'den doğrudan elde edilebilir. Bu demektir ki, sıfır aynı fazlı gerilim düşümü için şart, reel yük akımıyla orantılı ac besleme şebekesi için ileri (kapasitif) akımı sağlamak suretiyle yeterli olacaktır. Diğer bir deyişle, kaynak uçlarındaki güç faktörü ileridir ve $\cos(\tan^{-1} \frac{R}{X})$ 'e eşittir.

5.4 YÜK AKIMI VE GÜÇ BİLEŞENLERİ CİNSİNDEN KOMPANZASYON İHTİYACI

Önceki iki bölümde kompanzasyon süseptansları, yük admittansları yada yük akımının simetrik bileşenleri cinsinden ifade edilmişti. İfadelerin her ikisi de pratik kontrol yaklaşımına temel sağlamakla beraber; doğrudan ölçülebilir yük akımları ve güçleri ile kompanzasyon süseptansları arasındaki denklemler gerçek kompanzasyon sistemlerinde çoğu kez tercih edilir. İfadelerin birkaç tipi, denklem(5.10 ve 5.20)'de verilen iki temel ilişki grubunun her ikisinden çıkarılabilir. Bu denklem gruplarındaki kompanzasyon süseptansları (yada akım veya reaktif güçlere uygun gelen), yük akımlarının aynı fazlı ve quadrature (dörtleme) bileşenleri yada reel ve reaktif güç niceliklerine uygun gelenler cinsinden verilir. İlk iki grup, sıfır aynı fazlı gerilim düşümü (denklem 24) ve sıfır - sequens kaynak akımı, denklem(5.18 ve 19) için şartları yeterli kılacaktır.

$$B_{ab}^c (\sqrt{3} V) = -K_1 Re \left[\frac{V_{bc}^*}{\sqrt{3} V} \right] I_b - K_2 Re \left[\frac{V_{ca}^*}{\sqrt{3} V} \right] I_a$$

$$B_{bc}^c (\sqrt{3} V) = -K_1 Re \left[\frac{V_{ca}^*}{\sqrt{3} V} \right] I_c - K_2 Re \left[\frac{V_{ab}^*}{\sqrt{3} V} \right] I_b \quad (5.25a)$$

$$B_{ca}^c (\sqrt{3} V) = -K_1 \operatorname{Re} \left\{ \frac{V_{ab}^*}{\sqrt{3} V} \right\} I_a - K_2 \operatorname{Re} \left\{ \frac{V_{bc}^*}{\sqrt{3} V} \right\} I_c$$

$$K_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} - \frac{R}{3X}, \quad K_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} + \frac{R}{3X}$$

R ve X, sırasıyla kaynak empedansının reel ve imajiner kısmıdır. $V_{ab}^*, V_{bc}^*, V_{ca}^*$ hatlararası gerilimlerin eşlenikleridir. Yani;

$$V_{ab}^* = (V_a - V_b)^*, \quad V_{bc}^* = (V_b - V_c)^*, \quad V_{ca}^* = (V_c - V_a)^* \text{ dir.}$$

$$\frac{V_{ab}^*}{\sqrt{3} V}, \quad \frac{V_{bc}^*}{\sqrt{3} V}, \quad \frac{V_{ca}^*}{\sqrt{3} V} \quad \text{ ifadeleri birim fazörleri}$$

gösterir. Böylece denklem 5.25a'da elde edilen her fazörün reel kısmı, hatlar arası gerilimle aynı fazda olan konu ile ilgili yük akımının bileşenini verir. Örneğin; $\operatorname{Re} \left(\frac{V_{ab}^* I_a}{\sqrt{3} V} \right)$, V_{ab} hatlar

$$\sqrt{3} V$$

arası gerilimle aynı fazda olan yük akımı bileşenini belirler.

(5.25a) Denklemleri fazör niceliklerini, uygun zaman fonksiyonlarına dönüştürerek farklı bir şekilde yazılabilir;

$$B_{ab}^c (\sqrt{3} V) = -K_1 i_b(t) \left| \begin{array}{l} v_{bc} > 0 \\ dv_{bc}/dt = 0 \end{array} \right. - K_2 i_a(t) \left| \begin{array}{l} v_{ca} > 0 \\ dv_{ca}/dt = 0 \end{array} \right.$$

$$\begin{aligned}
B_{bc}^c(\sqrt{3}V) &= -K_1 i_c(t) \left| \begin{array}{l} v_{ca} > 0 \\ dv_{ca}/dt = 0 \end{array} \right. - K_2 i_b(t) \left| \begin{array}{l} v_{ab} > 0 \\ dv_{ab}/dt = 0 \end{array} \right. \\
B_{ca}^c(\sqrt{3}V) &= -K_1 i_a(t) \left| \begin{array}{l} v_{ab} > 0 \\ dv_{ab}/dt = 0 \end{array} \right. - K_2 i_a(t) \left| \begin{array}{l} v_{bc} > 0 \\ dv_{bc}/dt = 0 \end{array} \right.
\end{aligned}
\tag{5.25b}$$

Örneğin;

$$i_b(t) \left| \begin{array}{l} v_{bc} > 0 \\ dv_{bc}/dt = 0 \end{array} \right. \text{ ifadesi, } v_{bc}(t) \text{ 'nin türevi sıfır ve}$$

$v_{bc}(t)$ pozitif olduğunda zamanın bir anında $i_b(t)$ akımının değerini verir. Besbelliki böylece elde edilen nicelik, $v_{bc}(t)$ gerilimiyle aynı fazdaki $i(t)$ akım bileşeninin genliğidir.

(5.24a)denkleminin incelenmesi gösterir ki; her iki tarafı $(\sqrt{3})$ ile çarparak kompanzasyon süseptansı, (ve reaktif kompanzasyon gücü) ortalama reel güç niceliği cinsinden ifade edilebilir. Ayrıca üç kompanzasyon süseptansını belirleyen ifadeler, doğal dairesel sırayı takip eden a,b,c ve ab,bc,ca indisleri hariç, benzer olduğundan dolayı sadece B_{ab}^c içinkî denklemi yazmak yeterlidir. Diğer ikisi indisleri değiştirerek basitce elde edilebilir. Böylece;

$$B_{ab}^c(3V^2) = -K_1 \operatorname{Re}(V_{bc}^* I_b) - K_2 \operatorname{Re}(V_{ca}^* I_a) \tag{5.26a}$$

K_1 ve K_2 yukarıdakiyle aynı olup $\operatorname{Re}(V_{bc}^* I_b)$ ve $\operatorname{Re}(V_{ca}^* I_a)$ ifadeleri sırasıyla I_b ve I_c akımlarına karşılık düşen (bc) ve (ca) fazlarındaki ortalama reel güç niceliklerini belirtir.

(5.26a)denkleminin, akım ve gerilimlerin reel zaman fonksiyonları olarak ifade edildiği eşdeğer şekilde de yazılabilir;

$$B_{ab}^c (3V^2) = -K_1 \frac{1}{T} \int_{\langle T \rangle} v_{ab}(t) i_b(t) dt - K_2 \frac{1}{T} \int_{\langle T \rangle} v_{ca}(t) i_a(t) dt \quad (5.26b)$$

T, burada zaman periyodudur.

(5.25 ve 26) denklemlerinin gösterdiği gibi her kompanzasyon süseptansı, iki reel güç niceliği veya iki aynı fazlı yük akımı bileşeni cinsinden ifade edilir.

Aşağıda verilen ilk iki denklem (B_{ab}^c için), yük akımlarının reaktif bileşenleri cinsinden kompanzasyon süseptanslarını ifade eder. Bunlar, $\frac{R}{X}$ oranı sıfıra ayarlanırsa (5.25a) ve

(5.25b) denklemlerinden çıkarılabilir.

$$B_{ab}^c (\sqrt{3} V) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[\operatorname{Im} \left[\frac{V_a^*}{V} I_a \right] + \operatorname{Im} \left[\frac{V_b^*}{V} I_b \right] - \operatorname{Im} \left[\frac{V_c^*}{V} I_c \right] \right] \quad (5.27a)$$

Benzer olarak;

$$B_{ab}^c (\sqrt{3} V) = -\frac{1}{\sqrt{3}} \left[i_a(t) \left| \begin{array}{l} dv_a/dt > 0 \\ v_a = 0 \end{array} \right. + i_b(t) \left| \begin{array}{l} dv_b/dt > 0 \\ v_b = 0 \end{array} \right. - i_c(t) \left| \begin{array}{l} dv_c/dt > 0 \\ v_c = 0 \end{array} \right. \right] \quad (5.27b)$$

Tabii ki bu değerler, reaktif yük akım bileşenlerinin genliğini gösterir.

Aşağıdaki benzer iki denklem, yükün reaktif faz güçleri cinsinden kompanzasyon süseptanslarını ifade eder;

$$B_{ab}^c (3V^2) = -\operatorname{Im} \langle V_a^* I_a \rangle - \operatorname{Im} \langle V_b^* I_b \rangle + \operatorname{Im} \langle V_c^* I_c \rangle \quad (5.28a)$$

$$B_{ab}^c (3V^2) = \frac{1}{\sqrt{3}} \frac{1}{T} \int_{(T)} \left[v_{bc}(t) i_a(t) + v_{ca}(t) i_b(t) - v_{ab}(t) i_c(t) \right] dt \quad (5.28b)$$

5.5 İLETİM HATTI GERİLİM DESTEĞİ

Önceki bölümlerde kompanzasyon süseptansları, kompanze edilecek yükü karakterize eden niceliklerin (admitanslar ve akımlar) fonksiyonu olarak ifade edilmişlerdi. Görüleceği gibi gibi bu ilişkiler, tek bir yükün (yada yük grubu) kompanzasyonu gereken durumlarda pratik kontrol stratejileri için faydalı temeller oluşturur.

Birçok yük sahası ve üretim birimlerini birbirine bağlayan çok uçlu elektrik iletim şebekesinde, bu ilişkiler kullanılmayabilir. Pratikte, yükü önemli ölçüde karakterize eden nicelikleri ölçmek mümkün olmayabilir. Benzer olarak kompanzasyon amacı, iletim hat akımlarına dayanarak anlatılmaz. İletim hattının ucundaki birincil ilgi noktası genellikle gerilimdir, çünkü ;

- (1) kullanılabilir ve iletilebilir gücü belirler ve
 - (2) alıcılar için bazı kalite ölçütlerini karşılayabilmelidir.
- Bu sebeple iletim şebeke kompanzasyonu , yük kompanzasyonundan farklı bir yaklaşım gerektirir. Yük kompanzasyonunda amaç, dengesiz ve genellikle birim güç faktörüne sahip olmayan yükten çekilen akımı, dengeli (reel) hat akımlarına dönüştürmektir. Yükü karakterize eden büyüklükler ölçülür ve hat akımları kontrol edilirdi. Ac sistem empedansı, uç gerilimi kontrol edemediğinden kompanzasyonda önemli bir rol oynamıyordu. Aradaki farkı göstermek üzere karşılaştıırırsak ; iletim hattı kompanzasyonun amacı, regülasyondur ve bazı durumlarda gerilimin dengesiz ol-

ma ve ani değişmesinin gerçek sebeblerine bakmaksızın uç gerilimlerin dengelenmesidir. Bu yüzden kompanzasyon süseptansları (veya akımları), uç gerilimler cinsinden tanımlanmalıdır.

Şekil 5.10'da şematik olarak gösterilen genel bir şebeke kompanzasyon problemini ele alalım. İletim hatları , regüle edilecek ve dengelenecek olan gerilim ucuna birlikte bağlanır. Yükler kadar generatörler de her iletim hattına bağlanabilir.

Terminaldeki gerilimler genellikle sıfır, pozitif ve negatif bileşenleri kapsayan dengesiz durumdadır. Bileşenler sıra ile şöyledir:

$$V_{ao}^t, V_{a1}^t, V_{a2}^t \quad (5.29)$$

Daha önce saptadığımız gibi kompenzator, pozitif-sequens reaktif akım bileşeni (I_{a1}^c) ve negatif-sequens akım bileşeni (I_{a2}^c) ni üretebilir. Sıfır-sequens kompanzator akımı (I_{ao}^c) gen bağlamadan dolayı sıfırdır. Böylece kompenzator, sıfır-sequens gerilimini doğrudan etkilemesi mümkün değildir (Zaten pratikte sıfır-sequens uç gerilimi yoktur).

Kompanzator bağlı (sw kapalı) şebeke terminalindeki geriliminin simetrili bileşenleri , kompenzator akım bileşenleri cinsinden ifade edilebilir. Orijinal terminal gerilimler aşığıdadır:

$$\begin{aligned} V_{a1} &= V_{a1}^t - Z_{11} I_{a1}^c - Z_{12} I_{a2}^c \\ V_{a2} &= V_{a2}^t - Z_{21} I_{a1}^c - Z_{22} I_{a2}^c \end{aligned} \quad (5.30)$$

Burada Z_{11} , Z_{21} ve Z_{22} şebekenin simetrili bileşen empedans katsayılarıdır. Denklem (5.30) ile kompanzasyonun amacı aşığıdaki gibi ifade edilebilir;

1-Negatif-sequens akımı elimine etmek.

2-Terminaldeki pozitif-sequens gerilimi sabit tutmak.

Matematiksel olarak;

$$V_{a2} = 0 \quad (5.31)$$

$$|V_{a1}| = V = \text{sabit} \quad (5.32)$$

Denklem (5.30), sonuç olarak gelen 5.31 ve 5.32 ifadeleriyle birlikte I_{a1}^C ve I_{a2}^C için çözülebilir ve kompanzasyon için gerekli sequens akımlar belirtilebilir. O halde;

$$I_{a1}^C = Y_{11} (V_{a1}^t - V_{a1}) + Y_{12} (V_{a2}^t - V_{a2}) \quad (5.33)$$

$$I_{a2}^C = Y_{21} (V_{a1}^t - V_{a1}) + Y_{22} (V_{a2}^t - V_{a2}) \quad (5.34)$$

Buradaki Y_{11}, Y_{21} ve Y_{22} ; Z_{11}, Z_{21} ve Z_{22} empedans katsayıları-na karşılık gelen simetrik bileşen admitans katsayılarıdır.

(5.31) ifadesinin, (5.33) ve (5.34)'de yerine konmasıyla

$$I_{a1}^C = Y_{11} (V_{a1}^t - V_{a1}) + Y_{12} V_{a2}^t \quad (5.35a)$$

$$I_{a2}^C = Y_{21} (V_{a1}^t - V_{a1}) + Y_{22} V_{a2}^t \quad (5.35b)$$

(5.35) ifadeleri, kompanzasyon sequens akımları, simetrik bileşen admitans katsayıları ve ac sistem terminalinin sequens gerilimleri arasındaki ilişkiyi verir. Bu eşitliklerin gözden geçirilmesi gösterir ki; önceki bölümde yük kompanzasyonu için çıkarılan ilişkiler genelde herhangi bir pratik kontrol yaklaşımı için uygun bir temel sağlamaz. Bunun birinci sebebi, yük ve üretim değişimlerinin olageldiği ac sistemin admitans katsayıları tam bilinmez. Benzer zorluklar, V_{a1}^t ve V_{a2}^t terminal sequens gerilimlerin belirlenmesinde de vardır. (5.36) ifadelerinin pratikte uygulanması mümkün olmamasına rağmen terminal gerilim probleminin anlaşılmasına yardımcı olur. İlk soru (5.36) ifadesinin, pozitif-sequens kompanzasyon akımı I_{a1}^C (saf reaktif yani $\text{Re} I_{a1}^C = 0$ olmalı) sınırlaması altında çözülüp çözülemeyeceğidir.

$$I_{a1}^C = j B_p^C V_{a1} \quad (5.36)$$

olarak verilirse ($B_p^C = B_p^C + B_{ab}^C + B_{bc}^C$ dir.) , (5.36a) ifadesinden;

$$V_{a1} = \frac{Y_{11}V_{a1}^t + Y_{12}V_{a2}^t}{jB_p + Y_{11}} \quad (5.37)$$

olur.

Eşitliğin payı sabit (kompleks bir sayı) olduğundan V_{a1} sequens geriliminin genliği $|V_{a1}|$, B_p^C kompanzasyon süseptansı ile (veya eşdeğer olarak I_{a1}^C pozitif-sequens kompanzasyon akımı ile) değişir. Bu yüzden, $|V_{a1}|$ şartı yeterli gelir. Bununla beraber dikkat edilmesi gerekirkki V_{a1} 'in faz açısı B_p ile değişir. (5.37) eşitliği ile verilen V_{a1} ($|V_{a1}|$ =sabit şartı için gereken B_p^C ile), (5.35b) eşitliğinde yerine konursa (5.20) eşitliğinde verilen süseptanslara karşılık düşen negatif-sequens kompanzas akımı (I_{a2}) belirlenebilir. Böylece (5.31) ve (5.32) eşitliklerinde ifade edilen hedefler, teorik olarak, göz önüne alınan kompanzasyon devresinin yerine getirilmesiyle sonuçlanır. Eğer iletim şebekesi dengeli ve fazlar arasında kublaj yoksa kompanzasyon problemi önemli ölçüde basitleşir. Bu durum, karşılıklı empedanslar sıfır olduğunda vuku bulur. (5.36) ifadeleri basitleşir;

$$\begin{aligned} I_{a1}^C &= (V^t - V_{a1})/Z_{11} \\ I_{a2}^C &= V_{a2}^t/Z_{22} \end{aligned} \quad (5.38)$$

Kompanzasyon hedeflerinin sağlamak için gerekli kompanzasyon akımları (süseptansları) analitik olarak belirlenebilmesi ne rağmen elde edilem eşitlikler, şebeke katsayılarının ne hassas olarak bilinmemesinden ne de ölçülebilir olmamasından dolayı pratik kontrol düzenlerini yerine getiremez. Bununla beraber söz konusu problem, uygun geri besleme kontrol teknikleri ile çözümlenebilir. Burada kompanzasyon akımları (süseptansları) uygun hata sinyallerine karşılık gelir. Bahsedilen analitik yaklaşıma uygun feed-back kontrol şeması şekil 12'de çizilmiştir. Görüleleceği gibi iki ayrı kontrol çevrimi kullanılmıştır.

Bir çevrimde pozitif-sequens terminal gerilimin genliği $|V_{a1}|$ ölçülür ve ($V_{P,R}$ =sabit) referansı ile karşılaştırılır. Bu iki işaret arasındaki fark , pozitif-sequens kompanzasyon akımını (I_{a1}^C) doğuran $B_{p,ab}^C, B_{p,bc}^C$ ve $B_{p,ca}^C$ kompanzasyon süseptanslarını değiştirmek için kullanılır. Kontrol çevrimindeki yüksek kazanç, ki kompanzasyon hedeflerinden birini sağlar, V_{a1} 'in $V_{P,R}$ 'e aşağı yukarı eşit olmasına sebep olur. Diğer çevrimde negatif-sequens uç geriliminin reel ve imajiner bileşenlerinin genlikleri (V_{a2}) ölçülür. Bu bileşenlerin her ikisi için de referans, (5.31) eşitliğinde belirtilen kompanzasyon şartına uygun olarak sıfırdır. Böylece kontrol, negatif-sequens uç gerilimini sıfıra indirmek için gerekli olan negatif-sequens kompanzasyon akımını üretebilmesi için $B_{N,ab}, B_{N,bc}$ ve $B_{N,ca}$ kompanzasyon süseptanslarını değiştirir.

Üç kompanzasyon süseptansının herbirini kontrol eden üç bağımsız geri-besleme çevrimiyle şebeke uçlarındaki üç hatlar arası gerilimi regüle etme tekniği daha basit olarak gerçekleştirilmiş olur. Açıkça eğer kontrol işlemi, üç hatlar arası gerilimi aynı genlikte eşit yapmayı başarırorsa, aralarındaki faz farkı da eşit olmalıdır. Sonuç olarak dengeli bir grub olmalıdırlar. Bunu başarmak için tabii ki kompanzasyon devresi, verilen bir referans ile üç hatlar arası gerilimin genlik farklarını gösteren hata işaretlerine cevaben hem pozitif hem de negatif-sequens kompanzasyon akımları oluşturmalıdır.

Geri-besleme kontrol yaklaşımı, iletim şebekesi terminal kompanzasyonu için pratik olmasına rağmen, stabilite, cevap hızı, kararlı hal arızaları, terminal gerilim ölçümleri ve hata işareti işlemesi gibi birçok problem vardır. Bu problemler karşılıklıdır, analizleri karmaşıktır ve de genellikle modellenme ve bilgisayar simulasyonu gerektirir. Temel güçlük , ac sistem ve kompenzator arasındaki dinamik etkileşimden dolayıdır. Çünkü her şeyden önce terminal gerilim kompanzasyonu , ac sistem empedansından uygun akımların geçmesini zorlayarak gerçekleştirir.

Eğer ac sistem dengeli ve kompanzasyonun amacı sadece terminal gerilim (pozitif-sequens) regülasyonu ise geri besle-

me kontrol yaklaşımı tabii ki daha az karışık olacaktır.

Pratik uygulamalarda ne yük ne de iletim şebekesi genellikle kararlı haldedir. Gerçekte ac sistem üzerindeki dinamik bozuklukları azaltmak, kompanzasyon için belirli bir ihtiyaçtır. Etkili dinamik kompanzasyon için aşağıdakiler gereklidir ;

- 1-Hızlı değişken kompanzasyon süseptansları
- 2-Yük parametreleri (yük kompanzasyonu) veya ac sistem gerilimleri (uç-gerilim regülasyonu)nin hızlı ölçümü
- 3-Hızlı işaret işleme ve/veya hızlı işleyen geri-besleme kontrolü

Statik şönt kompanzasyonun sağladığı bu özellikler ileriki bölümlerde ayrıntılı olarak ele alınacaktır.

5.6 ÖRNEKLEME

Bu uygulamada reaktif güç harcayan dengesiz bir yük için yük kompanzasyonu şartları uygulanarak, gerekli kompanzator süseptansları hesaplanacaktır. Buna bağlı olarakta kompanzasyon öncesi ve sonrasında akım ve gerilimin simetrik bileşenleri hesaplanacaktır.

Üçgen bağlı yükün admitans değerleri;

$$Y_{ab} = 2 + j4 \text{ (pu)}, Y_{bc} = 1 + j3 \text{ (pu)}, Y_{ca} = 3 + j5 \text{ (pu)}$$

olarak verilsin ve yükün dengeli bir kaynaktan beslendiği farzedilsin. (Şekil 5.8)

Kaynak faz gerilimleri:

$$V_a = 1 \angle 0^\circ \text{ (pu)}, V_b = 1 \angle -120^\circ \text{ (pu)}, V_c = 1 \angle 120^\circ \text{ (pu)}$$

dir. Yukarıdaki admitanslar (5.13) ifadesinde yerlerine konursa, hat akımları şöyle bulunur:

$$I_a = 15.14 \angle 56.56^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_b = 11.02 \angle -59.12^\circ \text{ (pu)}$$

$$I_c = 14.37 \angle -167.27^\circ \text{ (pu)}$$

Görülebileceği gibi fazlar dengesiz yüklenmiştir.

Kompanzasyon süseptanslarını , önce (5.11)'de verilmiş olan denklemlere göre,yük admitansları cinsinden hesaplayalım;

$$B_{ab}^C = -jB_{ab} + j(G_{ab} - G_{bc})/\sqrt{3} = -j4 + j(3-1)/\sqrt{3} = -j2.845 \text{ (pu)}$$

$$B_{bc}^C = -jB_{bc} + j(G_{ab} - G_{ca})/\sqrt{3} = -j3 + j(2-3)/\sqrt{3} = -j3.577 \text{ (pu)}$$

$$B_{ca}^C = -jB_{ca} + j(G_{bc} - G_{ab})/\sqrt{3} = -j5 + j(1-2)/\sqrt{3} = -j5.577 \text{ (pu)}$$

Şimdi de kompanzatör süseptanslarını , hat akımlarını simetrik bileşenleri cinsinden veren (5.20) denklemini kullanarak hesaplayalım;

Önce hat akımlarını simetrik bileşenler cinsinden ifade edelim: (5.14) ifadeleri kullanılırsa,

$$I_{a0} = 0 \text{ (pu)}$$

$$I_{a1} = 5.995 + j11.990 \text{ (pu)}$$

$$I_{a2} = 2.361 + j0.635 \text{ (pu)}$$

bulunur. Bu değerler (5.20)'de yerine yazılırsa yukarıda bulunan değerlerin aynısı elde edilir. Her iki yoldan da aynı sonuçlara ulaşırız. Kompanzasyondan sonra, şekil 5.8 'e göre yük ve kompanzatörün birlikte süseptansları aşağıdaki gibi olur;

$$Y_{ab} = 2 + j(4 - 2.845) = 2 + j1.55 \quad (\text{pu})$$

$$Y_{bc} = 1 + j(3 - 3.577) = 1 - j0.577 \quad (\text{pu})$$

$$Y_{ca} = 3 + j(5 - 5.577) = 3 - j0.577 \quad (\text{pu})$$

Bu değerleri, (5.12) 'de yerlerine tekrar yazarak hat akımları bulunursa;

$$I_a = 6 \angle 0^\circ \quad (\text{pu}), \quad I_b = 6 \angle 240^\circ \quad (\text{pu}), \quad I_c = 6 \angle 120^\circ \quad (\text{pu})$$

olur. Hat akımları hem dengeli bir yapıda hem de gerilim fazörleri ile aynı doğrultudadırlar. Yani yük için gerekli reaktif güç kompanzator tarafından sisteme verilmiştir.

Kompanzasyon öncesi ve sonrasındaki gerilimleri ve simetrik bileşenleri inceleyelim. Bunun için şekil 5.9'daki kaynak ile yük arasındaki hat empedansını belirtmek gereklidir. Direnci ihmal ederek, hattın sadece reaktanslı olduğunu farzederek değerini $X=1$ (pu) alalım. V_{Ga} , V_{Gb} ve V_{Gc} dengeli kaynak gerilimleri ve V_a , V_b ve V_c 'i ise yük uçlarındaki faz gerilimleri olarak düşünelim.

$$V_{Ga} = 1 \angle 0^\circ \quad (\text{pu}), \quad V_{Gb} = 1 \angle -120^\circ \quad (\text{pu}), \quad V_{Gc} = 1 \angle 120^\circ \quad (\text{pu})$$

Yük uçlarındaki gerilimleri fazör olarak yazarsak;

$$V_a = V_{Ga} - jXI_a$$

$$V_b = V_{Gb} - jXI_b \quad (5.39)$$

$$V_c = V_{Gc} - jXI_c$$

bulunur.

Kompanzasyondan öncesi hat akımlarını yukarıdaki (5.39) da kullanarak yük uçlarındaki gerilimler:

$$V_a = 13.628 - j8.357 \quad (\text{pu})$$

$$V_b = -9.962 - j6.524 \quad (\text{pu})$$

$$V_c = -3.666 + j14.88 \quad (\text{pu})$$

ve simetrik bileşenleri:

$$V_{a0} = 0 \quad (\text{pu})$$

$$V_{a1} = 12.989 - j5.995 \quad (\text{pu})$$

$$V_{a2} = 0.636 - j2.36 \quad (\text{pu})$$

olur. Görüldüğü gibi yük uçlarındaki gerilimler dengesizdir.

Kompanzasyon sonrası yük uçlarındaki gerilimler, (5.39) ifadelerini kullanarak şu şekilde bulunur;

$$V_a = 1 - j6 \quad (\text{pu})$$

$$V_b = -5.696 + j2.134 \quad (\text{pu})$$

$$V_c = 4.696 + j3.865 \quad (\text{pu})$$

bu yeni durum için simetrik bileşenler:

$$V_{a0} = 0, \quad V_{a1} = 1 - j6, \quad V_{a2} = 0 \quad (\text{pu})$$

dir.

Kompanzasyon olayına gerilimler açısından bakılırsa kompanzasyon işlemi sonunda, negatif bileşenli gerilim sıfır olur. Bu durum fazların dengeli olduğu yük uçlarındaki gerilimlerin de dengeli bir yapı oluşturan pozitif bileşen gerilimden meydana geldiğini gösterir.

BÖLÜM 6

STATİK VAR KOMPENZATÖRLER

6.1 TANITIM

Tanımları gereği kondansatörler, bir akım alternatif güç sistemine bağlandıklarında reaktif güç üretir, reaktörler (indüktörler) ise reaktif güç tüketir. Reaktif gücün kontrol edilmesinde mekanik anahtarlarla birlikte kullanılmaktadır. Bugün reaktif güç üretmek ve kompanzasyon için en çok kullanılan, en pratik ve en ekonomik araç, kondansatördür diyebiliriz. Sürekli değişim gösteren var üretimi ve tüketimi ilk yıllarda aşırı veya düşük uyartılmış senkron makinalarla ve daha sonraları da doymalı reaktörler ve bunlara bağlı kondansatörler ile yapılmaktaydı. Billassa son zamanlarda yüksek güçlü yarı iletkenlerin (tristör gibi) üretilmesi ile, reaktif gücün kontrolünde önemli gelişmeler sağlanmıştır. Yarı iletkenlerin kullanılması ile gerçekleştirilen sistemlere, statik var generatörleri adı verilir. O halde statik var kompanzatörü, çıkışı belirli parametreleri kontrol etmek üzere değiştirilebilen statik var generatörüdür.

"STATİK" adı, kullanılan teçhizatın döner sistemler yerine indüktivite, kapasite ve tristör gibi elemanların kullanılmasından ileri gelir. İleriki bölümlerde kullanacağımız "Faz-kaydırıcı" tabiri de yine bu elemanların gerilim ve güç faktörünün düzeltilmesinde kullanılmasından dolayı verilmektedir.

Bugün kullanılan tristör kontrollu statik var generatörleri, kondansatör ve/veya reaktörleri şebekeye sokup çıkararak değişken şönt empedans elde ederler. Uygun anahtarlama tekniklerinin kullanılması ile belirli bir şebeke geriliminde var generatörün çıkışı maksimum kapasitif durumdan maksimum indüktif duruma getirilir.

Geçmişte yük generatöre yakın yerleştirildiğinden güç şebekelerinin başlangıç yıllarında özel kompanzasyon kolaylıklarına ihtiyaç duyulmadı. Güç şebekeleri genişlerken generatör-

ler de yük merkezlerinden gittikçe artan mesafalara yerleştirildi. Güç iletimini kararlı kılmak ve onu daha verimli yapmak için senkron kondenserler gibi sabit şönt kondansatörler ve şönt reaktörler kullanarak hatların kompanzasyonun gerekliliği baş gösterdi.

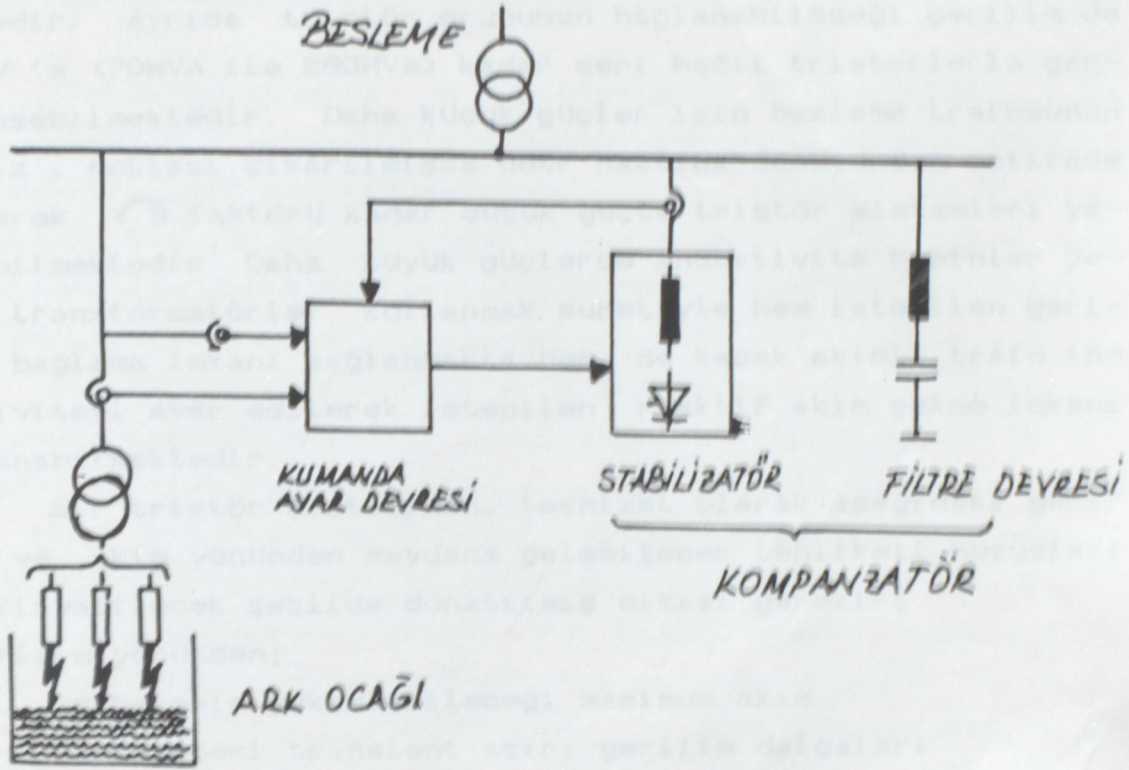
Statik var kompenzatörleri, 1970 'lerin başında ark fırınlarının ve haddehanelerin reaktif güç ihtiyacını karşılamak üzere kuruldu. O zamandan beri bu teknik , daha büyük güçlerin kontrolüne izin vermesi için geliştirildi ve faz açısı kontrollü şönt reaktörler ilave edildi. (Başlangıçta sadece tristör kontrollü şönt kapasitörler vardı.) SVS, hızlı cevap ve düşük kayıpla enerji dönüşümü vb. gibi birçok büyük avantajlara sahiptir. Dünya çapında, 30.000 Mvar'dan daha fazla güçte 300'ü geçen tesis vardır.

İleriki bölümlerde statik kompanzatörlerin çeşitli konfigürasyonları, çalışma özellikleri, işletim performansları ve karakteristikleri anlatılacaktır.

6.2 KOMPANZATÖR ELEMANLARI

- Kompenzatör üç temel eleman grubundan meydana gelir;
- 1 - Ters paralel bağlı tristörlerle gerçekleştirilen bir veya çok fazlı alternatif akım kıyıcısı
 - 2-Bu tristör grubuyla birlikte tristör sistemi önünde kullanılan endüktivite bobinlerin bulunduğu stabilizatör
 - 3-Harmonikleri elimine etmek için filtre devreleri

Stabilizatör tristör sisteminin ayarlanması ile şebeke- den devamlı olarak değişik bir reaktif akım çekmektedir. Her faz kendi başına ayarlanabildiği gibi 3-faz da müştereken simetrisiz veya simetrikli reaktif akım çekebilecek şekilde tasarlanabilir. Filtre devreleri ise bulundurdıkları kondansatörlerle sabit ve simetrikli şebeke geriliminde şebekeye reaktif akım verdikleri gibi şebekede bulunan harmonikleri de süzer. Kompanzatör sistemi aynı zamanda şebekeden çekilen simetrisiz aktif güçlere göre şebekeden çekilen reaktif gücü daima sabit tutmaya çalışır.



Sekil 6.1 Bir ark ocağı tesisinde kompanzasyonun prensip şeması

Yukarıda bahsedilen statik özellikleri dışında dinamik özellikleri içinde ; ölçü ve kumanda sisteminin zaman sabitesi ihmal edilecek olursa kompanzatörün ayar hızının ,tristör sisteminin her yarı peryotta ateşlemeye ve komütasyona bağlı olduğu söylenebilir.

Stabilizatör teçhizatlarında en önemli eleman kuşkusuz tristördür. Bugün gerek emniyet gerekse kullanım sahası olarak büyük güçleri taşıyabilecek kapasite için paralel , seri veya paralel-seri bağlama imkanları ancak ekonomiklik ışığı altında uygulamaya konulmaktadır. Ekonomiklik deyince tabii ki kayıpları, bakım, yatırım gibi hususları bir paket olarak düşünmek lazımdır ve bu sebeple bilhassa büyük güçte tristörlü sistemler döner alanlı sistemlere göre daha ekonomik görünmektedir.

Bugün 4000A 'e kadar akım taşıyan tristörler yapılabil-

mektedir. Ayrıca tristör grubunun bağlanabileceği gerilim de 30 kV 'a (70MVA ile 250MVA) kadar seri bağlı tristörlerle gerçekleştirilebilmektedir. Daha küçük güçler için besleme trafosunun yıldız , noktası çıkarılmışsa nötr hattına dönüşünden istifade edilerek $\sqrt{3}$ faktörü kadar düşük güçte tristör sistemleri yapılabilir. Daha büyük güçlerde indüktivite bobinler yerine transformatörler kullanmak suretiyle hem istenilen gerilime bağlama imkanı sağlanmakta hem de kaçak akımlı trafo indüktivitesi ayar edilerek istenilen reaktif akım çekme imkanı sağlanabilmektedir.

Bir tristör sisteminin, teçhizat olarak aşağıdaki gerilim ve akım yönünden meydana gelebilecek tehlikeli hususları karşılayabilecek şekilde donatılmış olması gerekir;

a)Gerilim yönünden;

- şebekenin yükselebileceği masimum akım
- şebekedeki transient aşırı gerilim dalgaları
- tristör ateşlemesi sırasında meydana gelebilecek R-C koruma elemanlarının katılımıyla dalgalanma
- gerilim aşırı ani değerleri

b)Akım yönünden;

- nominal akım
- harmonik akımları
- ateşleme esnasında akımın dikliği
- $-\alpha=0$ ateşleme açısındaki hatalı ateşlemeler

6.3 STATİK VAR KOMPANZATÖRLERİN TEMEL ÖZELLİKLERİ

Bugün kondansatör ve reaktörlerin uygun bağlantı kombinasyonları ile çok çeşitli kompanzatör devreleri gerçekleştirilmiştir. İdeal bir kompanzatör, sürekli reaktif güç ayarlaması yapabilen, cevap gecikmesi olmayan ve sınırsız bir aralıkta çalışabilen cihaz olarak tanımlanabilir. Kompenzatör, ayarlanabilir bir reaktör ve kondansatörden oluşur.

Statik var kompenzatörler, hızlı cevap, yüksek güvenilirlik, düşük çalışma maliyeti ve işletme esneklikleri ile karakterize edilirler. Kompenzatörün reaktif gücü, terminal gerilimdeki küçük bir değişikliğe hızla cevap verecek şekilde değişimlidir. SVC'lerin cevap verme zamanı, reaktif gücün hızlı kontrolü gereken uygulamalar için, ideal olarak yeterli olduğu, 2-3 peryot içinde gerçekleşir. Özellikle filiker etkisini azaltmak ancak çok hızlı kompanzatör tipleri ile mümkündür. Reaktif akımın değeri, ileri ve geri güç faktöründe, kompenzatörün çalışma prensibi ve tasarım özellikleriyle sınırlıdır.

Statik tristör kontrollü şönt kompenzatörler değişken reaktanslar olarak çalışırlar. Fonksiyonel olarak iki sınıfa ayrılabilir; Birincisi, spesifik yük bozukluklarını kompanze etmek. İkincisi, iletim hattı terminal gerilimini regüle etmek. Birinci sınıftaki genel amaçlar, dinamik yük dengelemesi ve güç faktörü düzeltimi; ikincisindeki amaçlar ise terminal gerilim dengelemesi ve regülasyonudur.

Yük merkezlerinde ve enerji şebekelerinde statik kompanzatörlerin başlıca kullanımı, reaktif yükte hızlı ve kuvvetli dalgalanmaların beklendiği durumlarda toplanır. Ayrıca doğrudan güç sistem niteliğini iyileştirmede örneğin; statik ve dinamik stabilite, gerilimi istenen değerde tutma, reaktif güç akışının kontrolü vb. hallerde de yaygın kullanım imkanı bulmuştur.

SVC'ler, uygulama avantajlarından dolayı sistem gerilim regülasyonunu iyileştirmek, dinamik kararlılığı arttırmak, gerilim ve akım dengesizliğini azaltmak ve gerilim oynamalarını azaltmak için büyük endüstriyel yükler ve iletim sistemlerinde

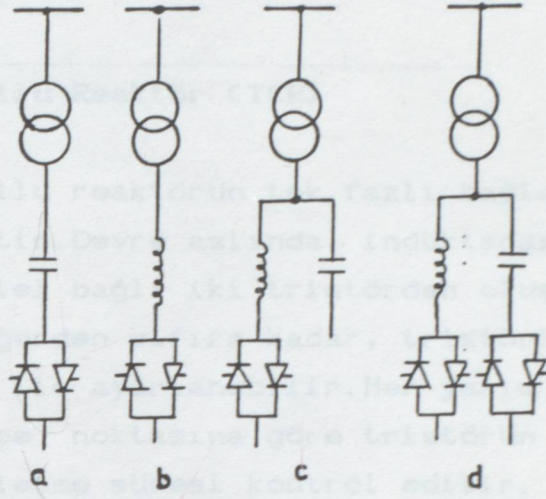
(boyut ve fiyat bakımından) geniş uygulama alanına sahiptir. Statik kompanzatör , iletim kapasitesinden geniş ölçüde faydalanmaya büyük katkı sağlar.

6.4 TRİSTÖRLÜ KOMPANZATÖR KONFIGÜRASYOLARI

Bir statik var kompenzatörü (SVC), kondansatör, reaktör, transformatör ve statik anahtarlar (tristör) gibi elemanların hızlı , sürekli ve denetlenebilir bir şönt reaktif güç kompanzasyonu sağlamak amacıyla bir araya getirilmesinden oluşmuş bir sistemdir. Tristörlü statik var kompenzatörlerin çeşitli sınıflandırmaları yapılabilmektedir. Bir çok statik var kompenzatör tipi olmasına rağmen en yaygın olarak kullanılanlardan belli başlıları şunlardır:

- 1-Tristör kontrolü reaktör (TCR)
- 2-Tristör anahtarlama kondansatör (TSC)
- 3-Sabit kondansatör-Tristör kontrollü reaktör (FC-TCR)
- 4-Tristör anahtarlama kondansatör-Tristör kontrollü reaktör (TSC-TCR)

Reaktif gücü kontrol etmek için tristör kontrollü SVC nin iki temel düzeneği vardır. Bunlardan birinde , reaktif güç tristör anahtarlama kondansatör adımlarıyla (TSC) değiştirilir (şekil 6.2a). Diğer düzende ; değişken reaktif güç tristör kontrollü reaktör (TCR) aracılığıyla kontrol edilir (şekil 6.2b). Eğer reaktif güç üretimi istenirse , sabit bir kapasitör bankı kontrollü reaktörle paralel bağlanır (şekil 6.2c). En çok istenilen tristör kontrollü şönt kompenzatör tipi , bu iki düzenin kombinasyonudur (şekil 6.2d). Transformatör , genellikle tristör gerilimindeki sınırlamalardan dolayı yüksek gerilim şebekesine bağlanması durumunda gereklidir.



Sekil6.2 Tristör kontrollu şönt kompanzasyon (SVC) için temel konfigürasyonlar

- a)Tristör anahtarlamaalı kondansatör
- b)Tristör kontrollu reaktör
- c)Sabit kondansatör-tristör kontrollu reaktör
- d)Tristör anahtarlamaalı kondansatör-tristör kontrollu reaktör

Statik kompanzatörlerin baş amacı, gerilimi istenen değerde tutmak ve reaktif güç akışını kontrol etmek olup , uygun tipin seçimi reaktif güç ihtiyacı,kayıp karakteristiği, harmonik üretimi ve maliyeti gibi bazı faktörlere bağlıdır. Optimum durumu belirlemek ve uygun seçimi sağlamak için değerlendirme ler,modern simulasyonlar üzerine kurulmuştur.Örneğin;kompanzatörün boyutu genellikle, yük akışı ve stabilitenin incelenmesi ile belirlenir.

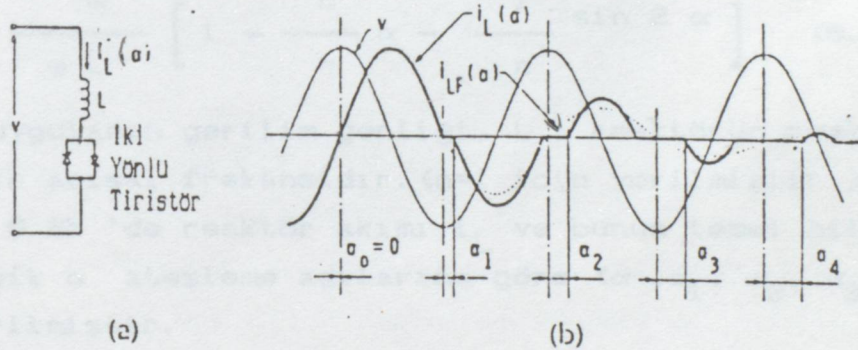
Kompanzatör tipi,şu ihtiyaçlar esası üzerine seçilir;

- Dinamik kontrol sahası
- Maksimum endüktif kısım
- Maksimum kapasitif kısım

- Maksimum izin verilebilir harmonik miktarı
- Kompanzator gücündeki maksimum kademe boyutu
- Kayıp değerlendirmesi

6.4.1 Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)

Tristör kontrollü reaktörün tek fazlı bağlantısı şekil (6.3a)'da gösterilmiştir. Devre aslında, indüktansı, L , olan bir reaktör ile ters paralel bağlı iki tristörden oluşur. Reaktörün akımı, maksimum değerden sıfıra kadar, tristörlerin ateşleme açısı (α) kontrolü ile ayarlanabilir. Her yarım peryotta, uygulanan gerilimin tepe noktasına göre tristörün ateşleme anı geciktirilerek akım iletme süresi kontrol edilir. Reaktif güç ayarı gerçekte akım iletme süresi ile orantılıdır.



Şekil 6.3 Tristör kontrollü reaktör ve dalga şekilleri

Reaktörün devreye sokulması için, gerilim tepe değerinde iken tristöre bir darbe sinyali verilirse tristör ilettime geçer ve devreden bir i_L akımı akar. Eğer reaktör devresine $v = V_m \sin \omega t$ şeklinde bir gerilim uygulandığı farzedilirse reaktör uçlarındaki gerilim,

$$v_i = L \frac{di}{dt} \quad (6.1)$$

alınır.

Tristör iletimde olduğu sürece $v_1 = v$ olur. Devreden geçen akım herhangi bir α ateşleme açısı için,

$$i_1 = \frac{V_m}{\omega L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sin \omega t d\omega t$$

$$i_1 = \frac{V_m}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (6.2)$$

olacaktır. Reaktör akımının temel bileşeninin genliği;

$$I_{LF} = \frac{V_m}{\omega L} \left[1 - \frac{2}{\pi} \alpha - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right] \quad (6.3)$$

Burada V_m : uygulanan gerilim genliği, L : reaktörün reaktansı ve ω gerilimin açısal frekansıdır. ($n=1$ için verilmiştir.)

Şekil 6.2b 'de reaktör akımı i_L ve bunun temel bileşeni I_{LF} 'nin değişik α ateşleme açılarına göre ($\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \alpha_3$) değişimi gösterilmiştir.

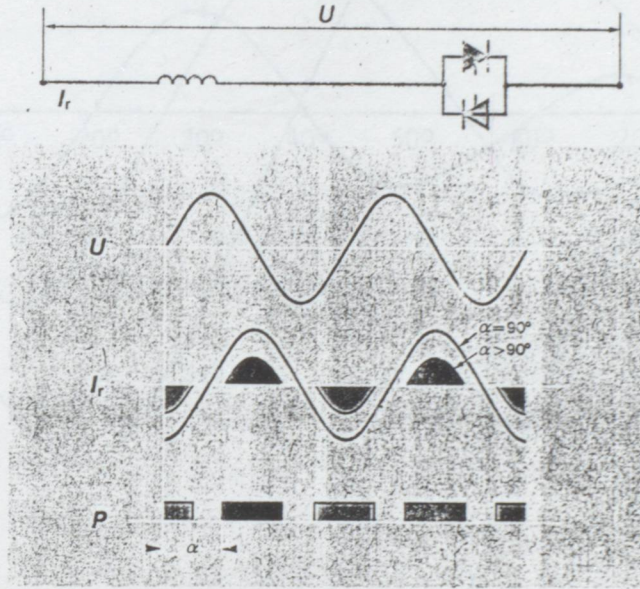
Reaktörler hem anahtarlanabilir hem de faz açısı kontrollü olabilir. Faz açısı kontrolü kullanıldığı zaman kontrol işlemi sürecinde harmonik üretimi pahasına reaktörün reaktif güç tüketiminde sürekli bir değişim elde edilir. Bununla beraber dikkat edilmesi gerekir ki, reaktör akımındaki değişim, sadece zamanın ayırık noktalarında meydana gelir (ki ayarlamaların her yarım periyotta bir defadan daha sık yapılamayacağı demektir). (Şekil 6.3)

Şekil 6.2b 'de görüleceği gibi iletim açısının kontrolü non-sinüsoidal akımların oluşmasına yol açar. Yani harmonik üretir. Ateşleme açısının arttırılması (iletim açısının azalması) akım dalga şeklini sinüs şeklinden uzaklaştırır. Akımın, simetrik şartları dikkate alınırsa sadece tek nolu harmonikler üre-

tilecektir. Harmoniklerin genlikleri de aşağıdaki genel bağıntıda olduğu gibi ifade edilir;

$$I_n = \frac{V_m}{L_n \omega L} \frac{4}{\pi} \left[\frac{\sin \alpha \cos(n\alpha) - n \cos \alpha \sin(n\alpha)}{n^3 - n} \right] \quad (6.4)$$

$$n=2k+1, \quad k=1,2,3$$



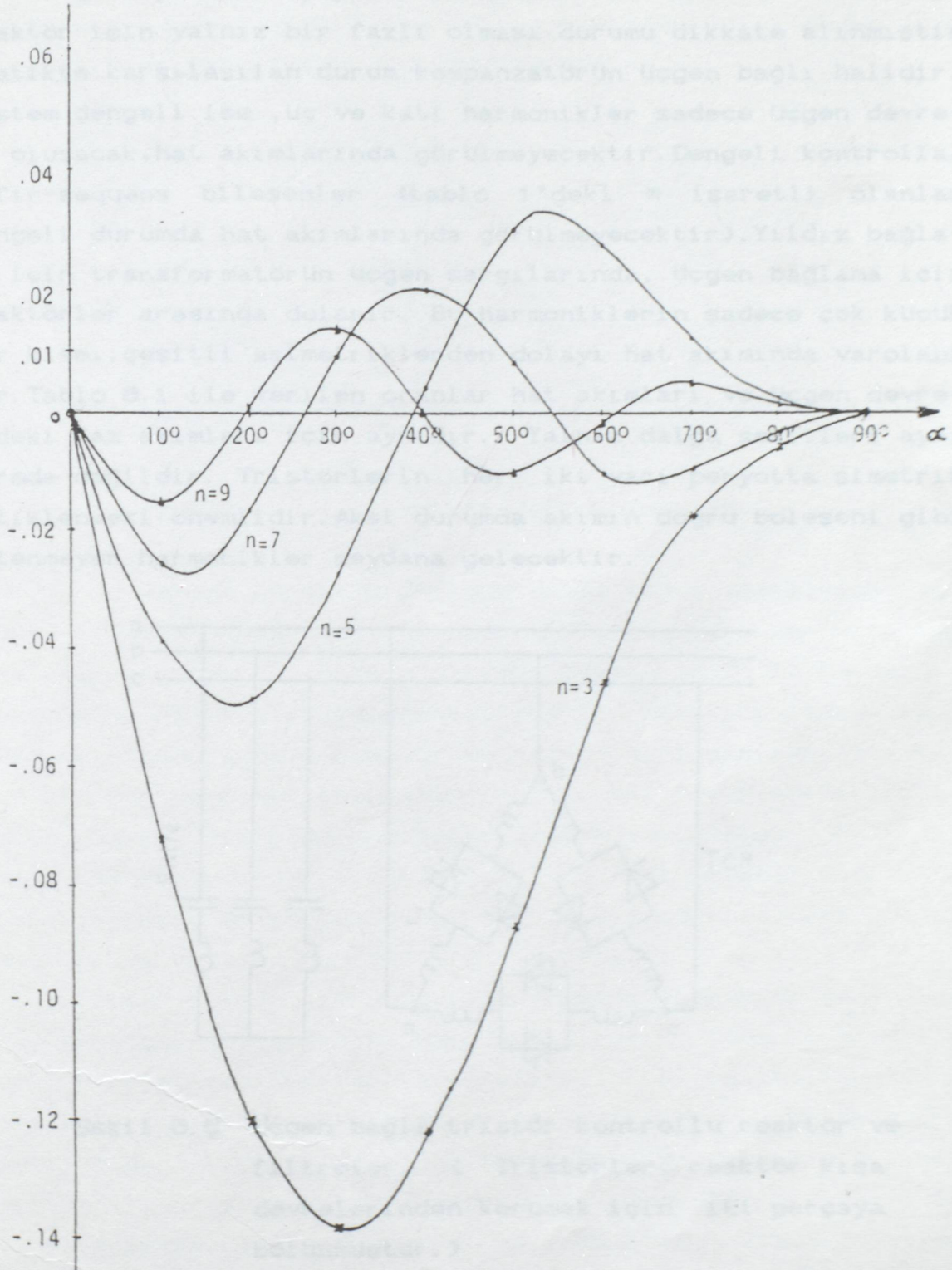
Şekil 6.3 Tristör kontrollü reaktörün çalışma modu

Şekil 6.4 'de normalize harmonik akımları verilmiştir. Burada görüldüğü gibi $\alpha = 30^\circ$ civarında kuvvetli bir harmonik mevcuttur. Yine de α tetikleme açısı 90° 'ye yaklaştıkça harmonik akımların etkisi azalmaktadır.

Harmonik akımlarının maksimum genliklerinin, 15. harmoniğe kadarki olanlar için, temel bileşenin tam iletimdeki ($\alpha=0$) değerine oranını yüzde olarak verelim;

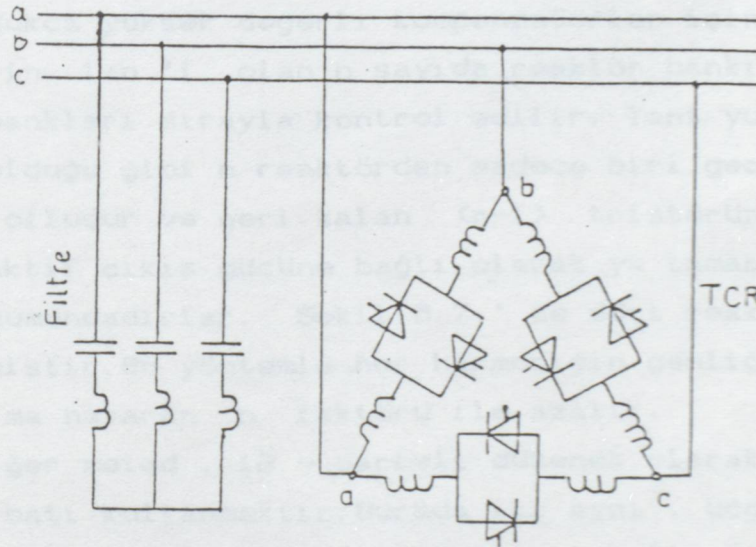
harmonik derecesi (n)	1	3	5	7	9	11	13	15
yüzde (I_n / I_L)	100	13.75*	5.05	2.59	1.57*	1.05	0.75	0.57*

Tablo 6.1 TCR'deki harmonik akımların maksimum genlikleri



Şekil 6.4 Harmonik akımlarının ($n=3,5,7,9$) α ' ya göre değişimleri

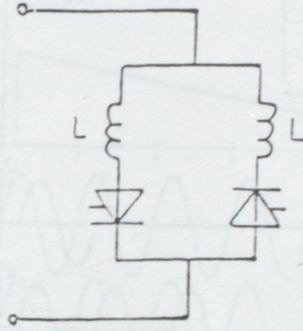
Şimdiye kadar yapılan incelemelerde tristör kontrollü reaktör için yalnız bir fazlı olması durumu dikkate alınmıştır. Pratikte karşılaşılan durum kompanzatörün üçgen bağlı halidir. Sistem dengeli ise ,üç ve katı harmonikler sadece üçgen devrede oluşacak, hat akımlarında görülmeyecektir. Dengeli kontrolle, sıfır-sequens bileşenler (tablo 1'deki * işaretli olanlar dengeli durumda hat akımlarında görülmeyecektir). Yıldız bağlama için transformatörün üçgen sargılarında, üçgen bağlama için reaktörler arasında dolanır. Bu harmoniklerin sadece çok küçük bir kısmı, çeşitli asimetriklerden dolayı hat akımında varolabilir. Tablo 6.1 ile verilen oranlar hat akımları ve üçgen devredeki faz akımları için aynıdır. Yalnız dalga şekilleri aynı formda değildir. Tristörlerin her iki yarı peryotta simetrik tetiklenmesi önemlidir. Aksi durumda akımın doğru boleşeni gibi istenmeyen harmonikler meydana gelecektir.



Şekil 6.5 Üçgen bağlı tristör kontrollü reaktör ve filtreler. (Tristörler, reaktör kısa devrelerinden korumak için iki parçaya bölünmüştür.)

Harmonikleri azaltmak, devre modifikasyonları veya filtreler ile gerçekleştirilebilir. Bir metod, her biri nominal gücün yarısı için tasarlanmış iki tristör kontrollü reaktör kul-

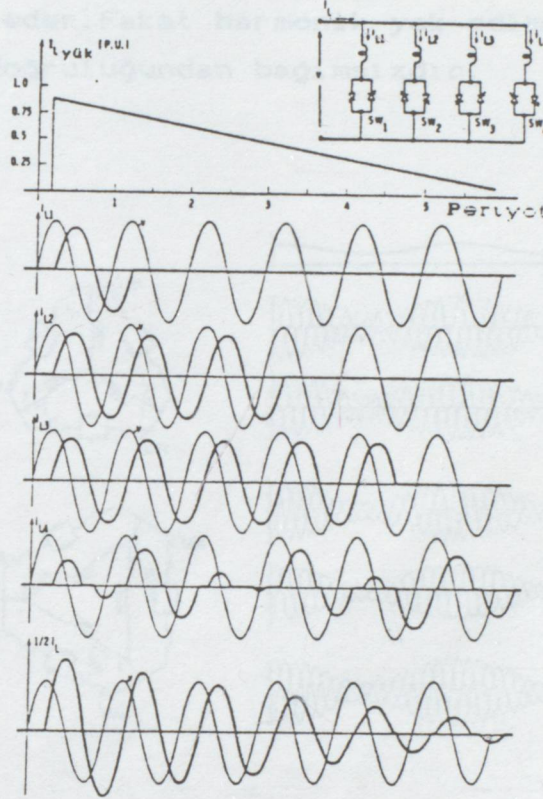
lanmaktadır. Reaktörlerden bir tanesi tam olarak ya iletimdeyken ya da kesimdeyken diğeri faz açısı kontrollüdür. Bu düzen bütün harmonik genliklerini yarıya indirecektir.



Şekil 6.6 İki ayrı reaktörden oluşmuş TCR

Bu metodu genelleştirirsek şöyle ifade edebiliriz; bil-hassa oldukça yüksek değerli kompanzatörler için her biri toplam değerin $1/n$ 'i olan n sayıda reaktör bankı kullanmaktır. Reaktör bankları sırayla kontrol edilir. Yani yukarıdaki basit düzende olduğu gibi n reaktörden sadece biri gecikme (iletim) açısı kontrollüdür ve geri kalan $(n-1)$ tristörün herbiri , gerekli reaktif çıkış gücüne bağlı olarak ya tamamen "on" yada "off" konumundadırlar. Şekil 6.7 ' de dört reaktör bankı için gösterilmiştir. Bu yöntemle her harmoniğin genliği, maksimum değerli akıma nazaran n faktörü ile azalır.

Diğer metod , 12 - darbeli düzenek olarak da adlandırılan tertibatı kullanmaktır. Burada iki aynı , üçgen bağlı tristör kontrollü reaktör bankları kullanılır. Birisi, kaynak transformatorünün yıldız bağlı sargılarından diğeri , üçgen bağlı sargılardan çalıştırılır. İki transformator sargısının ilgili gerilimleri arasındaki 30° faz farkı nedeniyle 5. , 7. , 17. 19. yada genel olarak $6(2k-1)-1$ ve $6(2k-1)+1$ ($k=1,2,3...$) dereceli harmonikler yok olur.



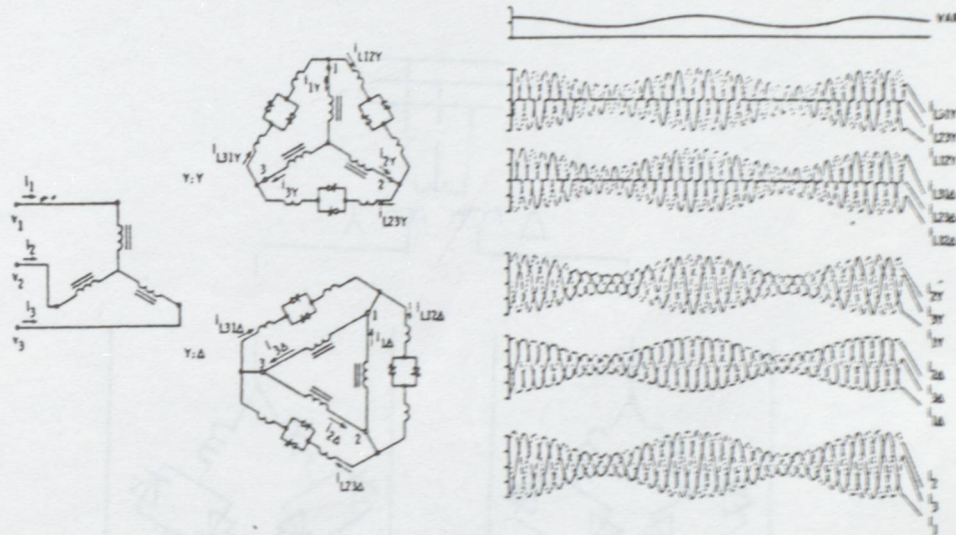
Şekil 6.7 Harmonik azaltımını sağlamak için reaktör banklarının sırasıyla kontrol edilmesini gösteren dalga şekilleri

Şekil 6.8 'de akım dalga şekilleriyle gösterildiği gibi bütün gecikme açılarında yaklaşık sinüsoidal çıkış akımı sağlanır.

Dahası harmonik yok edimi teorik olarak , uygun şekilde faz farklı gerilimlerden oluşmuş üç,dört veya daha fazla üçgen bağlı tristör kontrollü reaktör banklarının (temel 6-darbeli devre grupları) çalıştırılmasıyla mümkündür.

Bununla beraber 18-,24- vb.darbeli devre düzenleri pratikte karmaşıklığını haklı göstermek için yeterli derece harmonik azaltımını gerçeklemede faz doğruluğu ve devre simetrisi için gerekli olanları karşılamak oldukça zordur. Dikkat et-

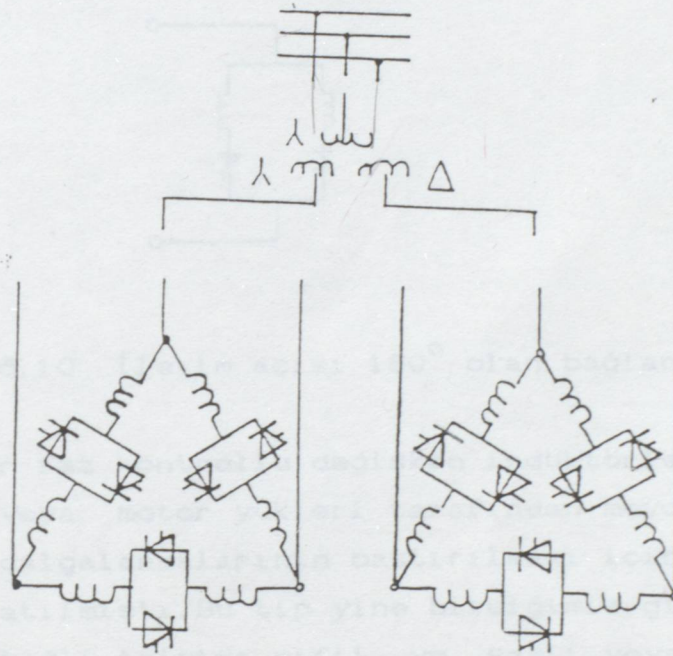
mek gerekir ki birinci metod, dahili olarak üretilen harmoniklerin hepsini azaltır. Böylece bu metod, tek fazlı kontrolla dengesiz sistemlere uygulanabilir. İkinci metod, çıkışta üretilmiş harmonikleri yok eder. Fakat harmonik yok edimi, devre dengesinden ve kontrol doğruluğundan bağımsızdır.



Şekil 6.8 Dengeli şartlar altında tristör kontrollü reaktörlerin 12-darbéli düzenlemesi ve ilişkin dalga şekilleri

Harmonik azaltımı, filtreleme ile de gerçekleştirilebilir. Tristör kontrollü reaktör tabii olarak harmoniklere şönt bir geçiş sağlayan normal olarak sabit bir kondansatörle paralel bağlı olduğundan bu metod yaygın olarak kullanılır. Çeşitli harmoniklerde güç sistem empedansı ve kapasitans değerine bağlı olarak bu tabii filtreleme bazı uygulamalarda yeterli olabilir. Bununla beraber güç sistemindeki mümkün rezonanslarla ilgili bir veya birkaç kompenzator kondansatörü ile yüklenme ve uygun harmoniklerin bileşke amplitasyonu genellikle bir LC veya LCR filtre devresi ile sabit kondansatörün tamamlanmasını yada yer değiştirmesini gerekli kılar. Bu filtre devresi normal

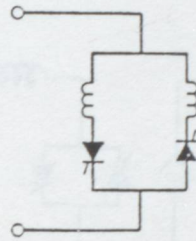
olarak, kompenzatörün uçlarını şöntleyen ayarlı seri LC filtre kollarının birkaçından oluşur. Ancak SVC güç filtresi tasarımı-
tasarımında şebeke rezonansı için özel olarak göz önüne alınacak noktalar vardır. Bu yolla 11. ve 13. harmonikler yok edilebilir. Bununla beraber filtreler yoluyla harmonikleri azaltmaya girişmekten ziyade mümkün olduğunca küçük harmonik kaynakları sağlamaya çalışmak tercih edilir.



Şekil 6.9 Sekonderi çift sargılı transformator ile TCR'nin ayarlanması

Akımın temel bileşeni , α ' ya göre değiştirilebilirken (6.4) ile verilen harmoniklerin oluştuğu söylenmişti. Akımın toplam harmonik distorsiyonunun tetikleme açısına göre değişiminden görülmüştür ki tetikleme açısı büyüdükçe yada faz kontrolunda gecikme arttıkça, distorsiyon da artar.

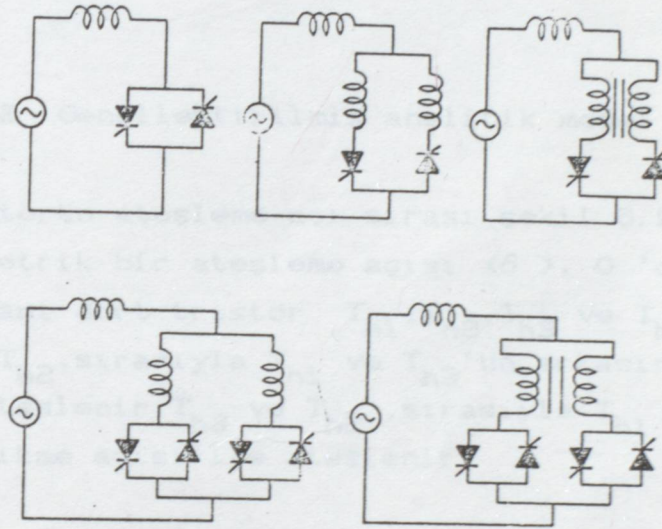
Üç fazlı sistemlerde , üç adet tek fazlı tristör kontrollü reaktör üçgen bağlı olarak kullanılır. Böylelikle üç ve üç 'ün katı olan harmonikler üçgen bağlantısının içinde kalır ve



Endüstriyel uygulamalar için orjinal özelliklere sahip olan bu model sentetik olarak ele alınmıştır.

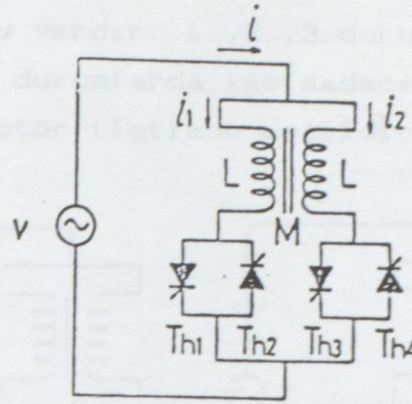
sı etkin bir teknik ile sürekli olarak değiştirilir. Pratikte endüktans lineer olarak değişmez.

Şekil 6.11 , tristör kontrollü indüktörlerin tek fazlı düzenlemelerdeki çeşitli tiplerini gösterir. (A) tipi, temel tip olup bugün kullanımdadır. (B) tipi, harmonik oluşumunu bastırmak için ileri sürülür. (C) tipi, manyetik kublajlı reaktör kullanan daha gelişmiş bir şeklidir. (D) ve (E) tipleri, reaktör ve tristörden geçen sirkülasyon akımını bastırmak içindir.



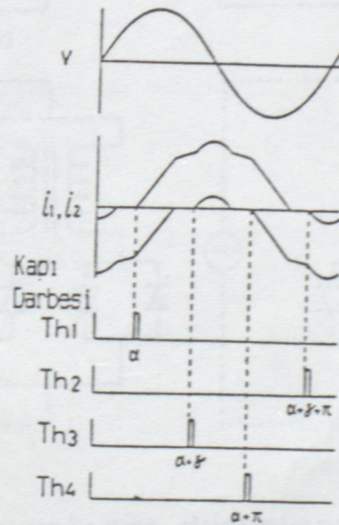
Şekil 6.11 Tristör kontrollü değişken indüktörlerin çeşitli tipleri

Endüstriyel uygulamalara adaptasyon için tristör kontrollü VI'ların performansını deneysel olarak değerlendirmek için genelleştirilmiş analitik model sunulmuştur. Şekil 6.12 gösterildiği gibi bu model ters paralel bağlı tristör çifti ve kublaj faktörü K olan ($K = M/L$) manyetik olarak kublajlanmış reaktörden oluşur. K , -1.0'dan 1.0'a kadar keyfi olarak seçilebilir. VI'daki reaktör düzeni, kublaj faktörüne bağlıdır. Ayrıca kaynak uçlarında gözlenen endüktans, bütün VI tiplerinde tam kontrolde bir birim olan endüktansın değeriyle normalize edilir.



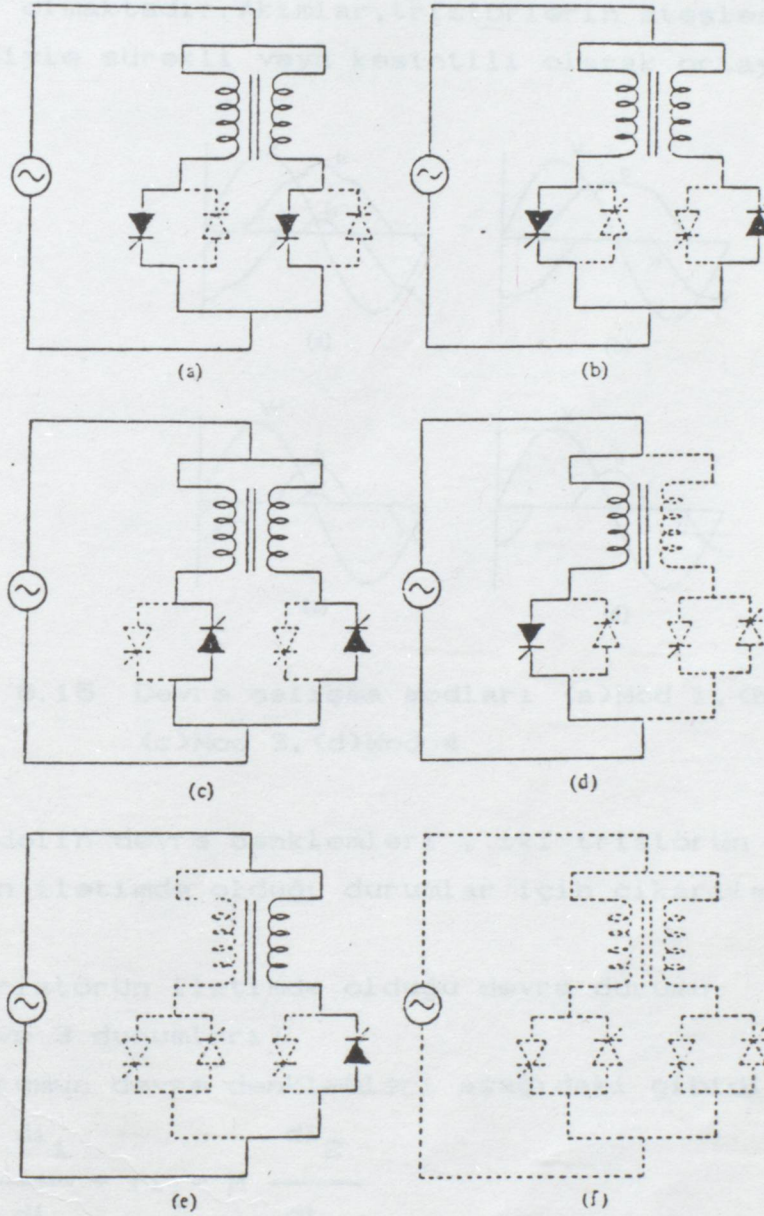
Şekil 6.12 Genelleştirilmiş analitik model

Dört tristörün ateşleme açısı sırası şekil 6.13 'de gösterilmiştir. Asimetrik bir ateşleme açısı (δ), 0 'dan 180° 'e kadar değişir. Yani dört tristör T_{h1} , T_{h2} , T_{h3} ve T_{h4} sırayla ateşlenir. T_{h4} ve T_{h2} , sırasıyla T_{h1} ve T_{h3} 'ün arkasından 180° 'lik gecikmeyle ateşlenir. T_{h3} ve T_{h2} , sırasıyla T_{h1} ve T_{h4} 'ün arkasından δ gecikme açısı ile ateşlenir.



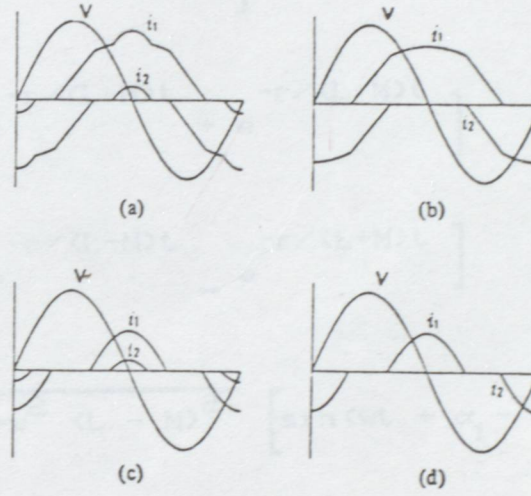
Şekil 6.13 Tristör ateşleme sırası ve dalga şekilleri

Bu modelin devre durumları, dört tristörün iletimde ol-
ma yada olmamasıyla belirlenir. Şekil 6.14 'de gösterildiği
gibi altı devre durumu vardır. 1., 2., 3. durumlarda iki tristör
iletimdedir. 4. ve 5. durumlarda ise sadece biri iletimdedir.
6. 'da ise hiç bir tristör iletimde değildir.



Şekil 6.14 Devre çalışma durumları a>durum 1, b>durum 2
c>durum 3, d>durum 4, e>durum 5, f>durum 6

Birde şekil 6.15'de gösterildiği gibi bir alternastaki devre çalışması yönünden dört devre çalışma modu vardır. A tipi, kontrol sahasının tamamında mod 4'de çalışır. B ve C tipleri 2 ve 4 modlarında çalışır. D ve E tipleri asimetrik ateşleme açısı gereğince 1,2,3 ve 4 modlarının bazılarında çalışır. Görüldüğü gibi sistemin çalışma şekline göre akım dalga şekilleri değişik olmaktadır. Akımlar, tristörlerin ateşleme anlarının değişmesiyle sürekli veya kesintili olarak ortaya çıkar.



Şekil 6.15 Devre çalışma modları (a)Mod 1, (b)Mod 2
(c)Mod 3, (d)Mod 4

Bu modelin devre denklemleri , iki tristörün ve sadece bir tristörün iletimde olduğu durumlar için çıkarılmıştır;

-İki tristörün iletimde olduğu devre durumu

(1,2 ve 3 durumları)

Bu durumun devre denklemleri aşağıdaki gibidir.

$$v = L \frac{di_1}{dt} + ri_1 - M \frac{di_2}{dt}$$

$$v = L \frac{di_2}{dt} + ri_2 - M \frac{di_1}{dt}$$

$$i = i_1 + i_2$$

Eğer endüktansların dirençleri $r_1=r_2=r$ ve her bir devre durumunda i_1 ve i_2 akımlarının başlangıç değerleri sırası ile I_{10} ve I_{20} alınır ve i_1 ve i_2 hesaplanırsa;

$$i_1 = \frac{V_m}{\sqrt{r^2 + w^2 (L - M)^2}} \left[\sin(wt + \alpha - \phi_1) - \sin(\alpha - \phi_1) e^{-r/(L+M)t} \right]$$

$$+ I_{10}/2 \left[e^{-r/(L-M)t} + e^{-r/(L+M)t} \right]$$

$$+ I_{20}/2 \left[e^{-r/(L-M)t} - e^{-r/(L+M)t} \right]$$

$$i_2 = \frac{V_m}{\sqrt{r^2 + w^2 (L - M)^2}} \left[\sin(wt + \alpha_1 - \phi_1) - \sin(\alpha - \phi_1) e^{-r/(L-M)t} \right]$$

$$+ I_{10}/2 \left[e^{-r/(L-M)t} + e^{-r/(L+M)t} \right]$$

$$+ I_{20}/2 \left[e^{-r/(L-M)t} + e^{-r/(L+M)t} \right]$$

bulunur. Burada,

$$\phi_1 = \tan^{-1} \frac{w(L-M)}{r}$$

dir.

-Sadece tek tristörün iletimde olduğu devre durumu
(4. ve 5. durumlar)

Örneğin durum 4'teki denklemler aşağıdadır;

$$v = L \frac{di_1}{dt} + ri_1$$

$$i = i_1$$

(i_1) akımının başlangıç değeri I_{10} alınır ve i_1 akımı tekrar çözülürse;

$$i_1 = \frac{V_m}{\sqrt{r^2 + \omega^2 L^2}} \left[\sin(\omega t + \alpha - \phi_2) - \sin(\alpha - \phi_2) e^{-r/L \cdot t} \right] + I_{10} \cdot e^{-r/L \cdot t}$$

bulunur. Burada,

$$\phi_2 = \tan^{-1} \frac{\omega L}{r}$$

Bu model sayesinde hesaplanan VI tiplerinin dalga şekilleri şekil 6.16'da gösterilmiştir. VI'lardan A tipi, 90° 'den 180° 'ye kadar sahada çalışır. Bu yüzden akım dalga şekli süresizdir ve daha düşük harmonik bileşenlerinin oluşumu ciddidir. B ve C tipi VI'lar, 0° 'dan 180° 'e kadar çalışırlar. Ancak performans sahaları farklıdır. Bu tip VI'larda her bir tristörün iletim periyodu 0° 'dan 360° ye kadar olduğundan sirkülasyon akımı, reaktör ve tristörlerden, nominal değerlerinin arttırılabilmesi için, akar. D ve E tipleri, harmonik üretiminin asimetrik ateşleme kontroluyla azaltılabilmesi için ilave olarak gelen tristörlere sahiptir. (α)'nın sahasına, (δ) ile karar verilir;

$$90^\circ - \frac{\delta}{2} \leq \alpha \leq 180^\circ$$

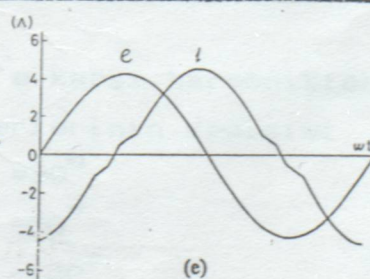
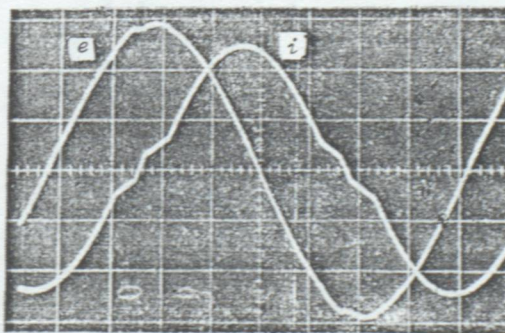
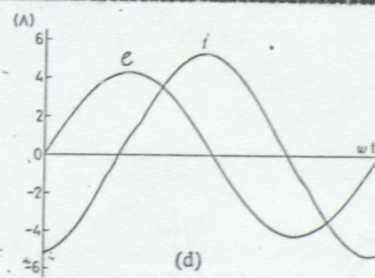
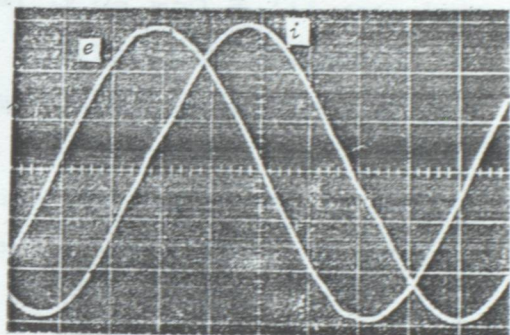
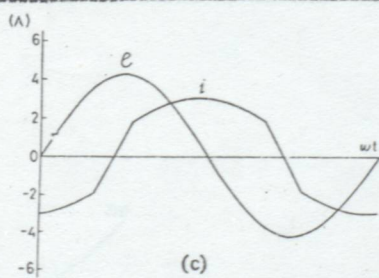
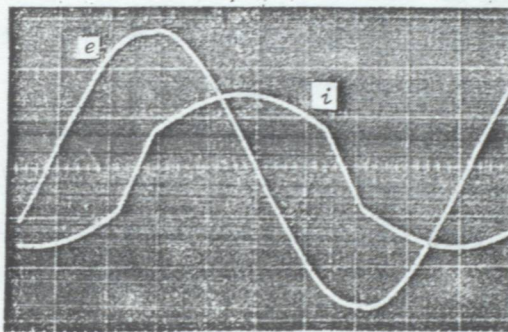
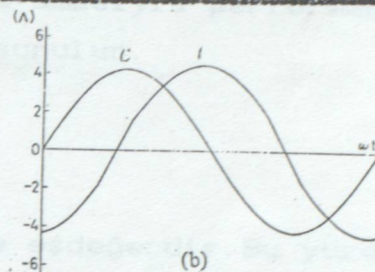
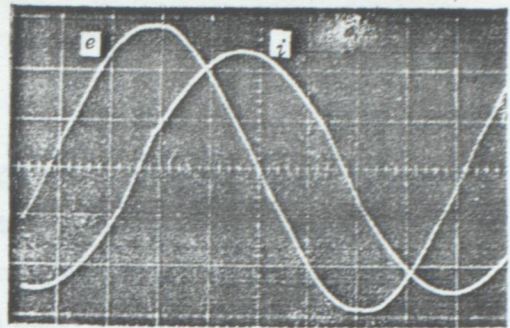
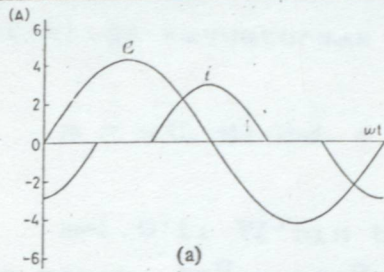
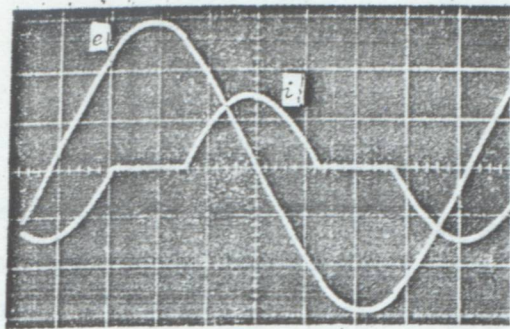


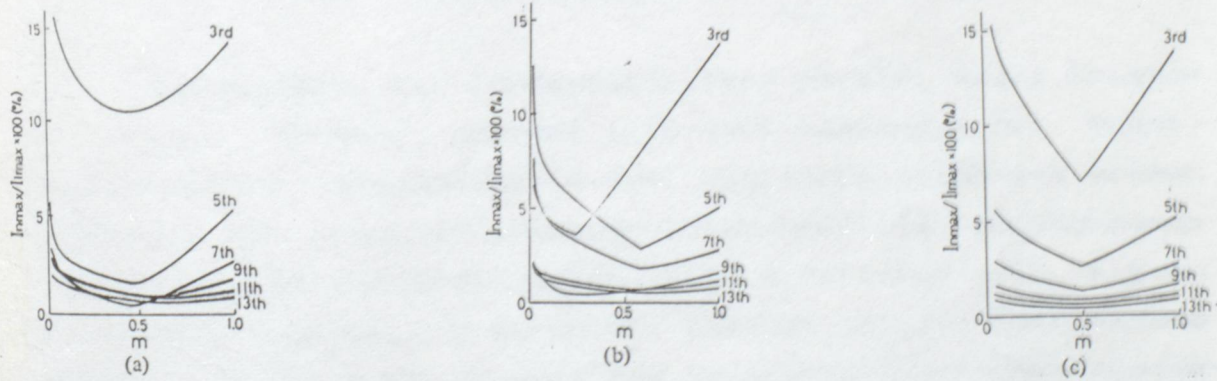
Fig. 6.16 Waveforms of various types of variable inductors calculated and measured. (a) Type A. (b) Type B. (c) Type C. (d) Type D. (e) Type E.

$\langle \delta \rangle$, 0° ve 180° arasında değiştiğinden yukarıdaki ifadenin sol tarafı 0° ve 90° arasında değişir. Normalizasyona göre; $\alpha = 90^\circ - \delta/2$ de reaktif güç m ve δ 'nin herhangi bir değeriyle aynı değerdedir. $\langle m \rangle$ parametresi, genelleme amacıyla performansı açıklığa kavuşturmak için kullanıma sunulur.

$$m = w(L-M)/2wL = (1-K)/2$$

$m=1.0$ 'lı VI'nın tipi, bilinen tipe eşdeğerdir. Bu yüzden α 'nın sahası 90° ve 180° arasındadır. $m=1.0$ ve $m=0.5$ 'li var karakteristikleri eğrisi bütün kontrol sahalarında düzgündür.

Harmonik üretimi hemen hemen $m=0.5$ 'de minumdur. Yine harmonik üretimi örneğin, $\delta=30^\circ$ için 5. ve 7. harmonikler, δ 'nin diğer değerleriyle karşılaştırıldığında çok küçüktür. 5. ve 7. harmonikler, bilinen tiptekinin (A tipi), üçte biri ve dörtte biri kadardır.



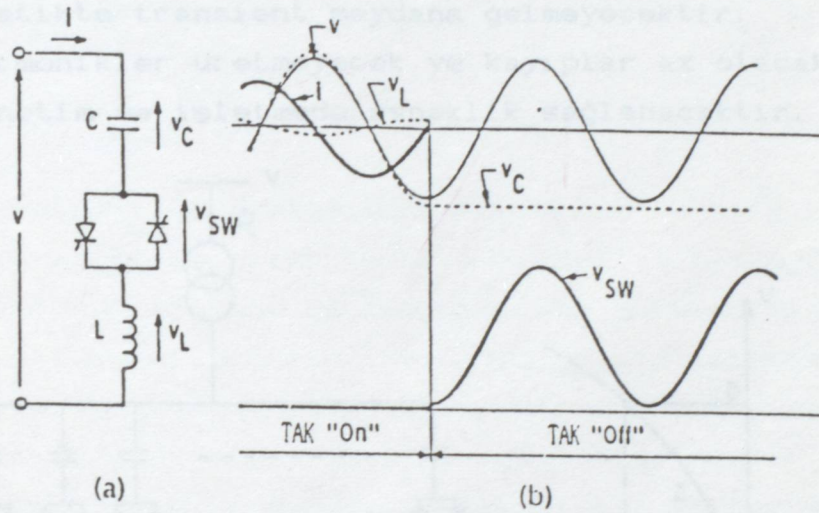
Şekil 6.17 $\langle m \rangle$ 'e karşı harmoniklerin maksimum

değerlerinin değişimi

- a) $\delta = 30^\circ$
- b) $\delta = 60^\circ$
- c) $\delta = 120^\circ$

6.4.2 Tristör Anahtarlamaalı Kondansatörler (TSC)

Tek fazlı tristör anahtarlamaalı kondansatörün şematik gösterimi şekil 6.18'de verilmiştir. Kondansatörlerin devreye girip çıkmaları, bu sistemde ters paralel bağlı tristörlerle sağlanmaktadır. Tristörün anahtar elemanı olarak kullanılması-
nın sayısız yararı vardır.



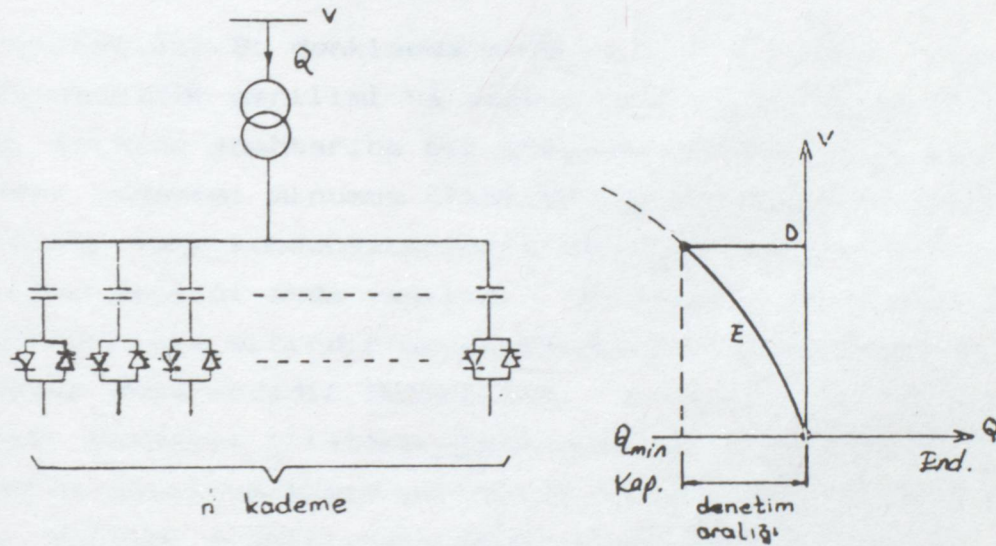
Şekil 6.18 Tristör anahtarlamaalı kondansatör

Devre, sabit bir kondansatör, ters paralel bağlı tristörler ve aşırı akımları önlemek için seri bağlanmış bir endüktanstan oluşur. Kondansatörle seri bağlanmış endüktans kısmen tristörler bir bozukluk yüzünden istenmeyen faz pozisyonunda ateşlendiğinde tristörden geçen akımı sınırlamak için, kısmen de harmonik rezonanslı problemleri önlemek içindir. Eğer sadece kapasitif reaktif güç gerekli ise ve anahtarlama uygun kademe-
lerle olacaksa kompenzator, birkaç tristör anahtarlamaalı kondansatörden oluşturulabilir. Bu düzen şekil 6.19'da gösterilmiştir. Bu şekilde aynı zamanda kompenzatorün reaktif güç karakteristiği de gösterilmiştir. (E) eğrisi, tüm kondansatörler devreye alındığında kompenzatorün kapasitif reaktif güç üretimi ($Q=YV^2$) gösterir. (D) doğru parçası ise denetim aralığını simgeler. Bu doğru parçasının sol uç noktasında tüm kapasitör

ler devrede, sağ uç noktasında ise tümü devre dışıdır. Kompanzatorün V/Q karakteristiği şekilde koyu ve kesintisiz çizgi ile gösterilmiştir.

Bu tip kompanzatorlerin temel özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Kademeli denetim yapılacaktır.
- En fazla 10 ms 'de sistemde olan reaktif güç değişmelerine tepki gösterebilecektir.
- Pratikte transient meydana gelmeyecektir.
- Harmonikler üretmeyecek ve kayıplar az olacaktır.
- Denetim ve işletmede esneklik sağlanacaktır.



Şekil 6.19 Tristör anahtarlamaalı kondansatörlerden oluşan kompanzatorlerin şematik gösterimi ve V/Q karakteristiği

Tristörler iletimdeyken devre $v = V_m \sin \omega t$ sinüsoidal gerilim altındadır. Devre denklemi;

$$v = L \frac{di}{dt} + \frac{1}{C} \int i dt \quad (6.5)$$

şeklindedir. (I_0) akımın başlangıç değeri olmak üzere akımın

ani değer ifadesi, laplace tranformasyonu ile özölürse;

$$i = V w C \left[\frac{w_0^2}{w_0^2 - w^2} \left[\cos wt - \cos w_0 t \right] \right] + I_0 \cos w_0 t \quad (6.6)$$

dir. Burada $w_0 = 1/\sqrt{LC}$ doğal frekanstır.

Akımın kararlı hal ifadesi;

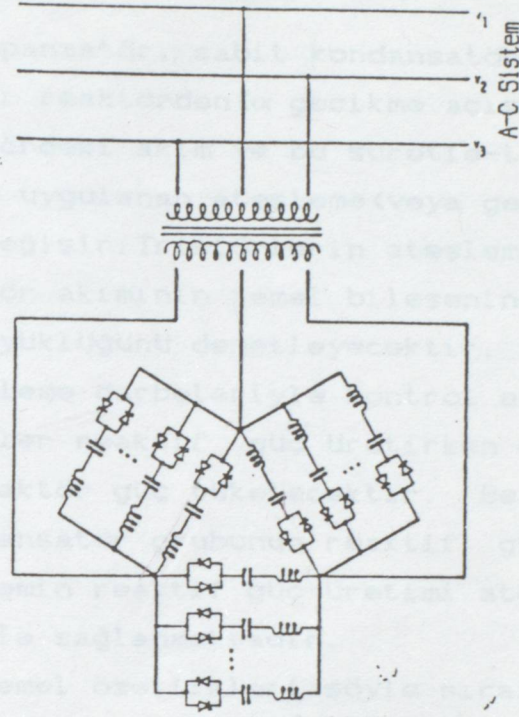
$$i = V_m \frac{n^2}{n^2 - 1} w C \cos wt \quad (6.7)$$

olarak verilebilir. Bu denklemden $n = \sqrt{x_c/x_1} = 1/\sqrt{w^2 LC}$ dir.

Kondansatör gerilimi ve şebeke geriliminin aynı olduğu anda eğer tristör anahtarına bir ateşleme darbesi uygulanırsa kondansatör kademesi minimum transientler ile devreye alınıp çıkarılabilir. Yani kondansatörlerin devreden çıkarılması akımın sıfırdan geçtiği anda yapılır. Bu anda tristör anahtarı üzerindeki gerilim sıfırdır, ancak kondansatör üzerindeki gerilim en büyük değerindedir. Değeri ise, $V_c = V_m n^2 / (n^2 - 1)$ dir. Kondansatör kademesi tristöre uygulanan ateşleme darbelerini bloke ederek maksimum yarım peryotluk bir gecikmeyle devreden çıkarılır. Tristör anahtarından geçen akım, daima akım sıfır geçişinde kesilir. Kondansatör kademesi, tepe gerilimine eşıt bir yükü ayrılır. Tristör üzerindeki gerilim sıfırla şebeke geriliminin tepeden tepeye değeri arasında değişir. Ateşleme darbeleri bloke edildiğinde tristör anahtarı kesimde kalır ve kondansatör kademesi, kendisiyle paralel bağlı olan deşarj direnci üzerinden boşalmaya başlar. Normal alışma şeklinde yüklü kondansatör uçlarındaki gerilim, şebeke gerilimine eşıt olduğunda devreye alınır. Şekil 6.19'daki her bir ünitenin devreye girişı, gerilimin tepe değerinde olacaktır. Bu nedenle kompanzatör, kompanzatörün teorik cevap zamanı devreye almada bir peryot, devreden çıkarılmada ise yarım peryottur.

Üç fazlı sistemlerde, tristör anahtarlamalı kondansatörler üçgen bağlanır. Bağlantı düzeni, şekil 6.20'de gösterilmiş-

tir.



Şekil 6.20 Tristör anahtarlama kondansatörünün
üç fazlı bağlantısı

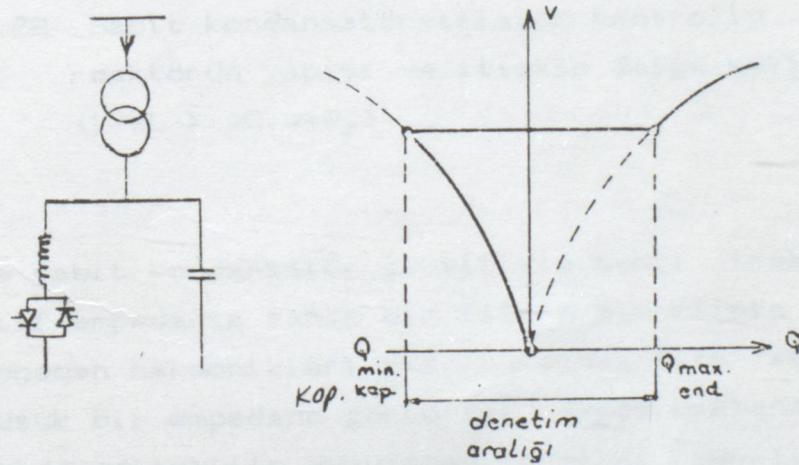
Bu tip kompanzatör, bilhassa dengesiz reaktif güç tüketiminin beklendiği durumlarda faydalı olmaktadır. Ancak teorik çekiciliğine rağmen sistemin bazı mahsurları vardır: Var kompanzasyonu sürekli değildir, her kondansatör bankına ayrı tristör grubu gerektirir ve alçaltıcı transformator kullanılmayan yüksek gerilim uygulamalarında ekonomik değildir. Ayrıca kararlı durumda, iletimde olmayan tristörler üzerinde uygulanan gerilim tepe değerinin iki katı kadar gerilim bulunur.

6.4.3 Sabit Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktör (FC-TCR)

FC - TCR tipi kompanzatör, sabit kondansatörle paralel bağlı esasen değişken bir reaktörden (α gecikme açısı ile kontrol edilen) oluşur. Reaktördeki akım ve bu suretle-toplam kompanzasyon akımı, tristöre uygulanan ateşleme (veya gecikme veya iletim) açısı kontroluyla değişir. Tristörlerin ateşleme açıları'nın değiştirilmesi reaktör akımının temel bileşenine dolayısıyla endüktif var'ın büyüklüğünü denetleyecektir. Yani reaktör akımı tristörün ateşleme darbeleriyle kontrol edilir. Bir yandan sabit kondansatörler reaktif güç üretirken diğer yandan tristör kontrollü reaktör güç tüketir. Belirli bir gerilim seviyesinde kondansatör grubunun reaktif güç üretimi sabit olduğundan, sistemin reaktif güç üretimi ateşleme açıları'nın değiştirilmesi ile sağlanmaktadır.

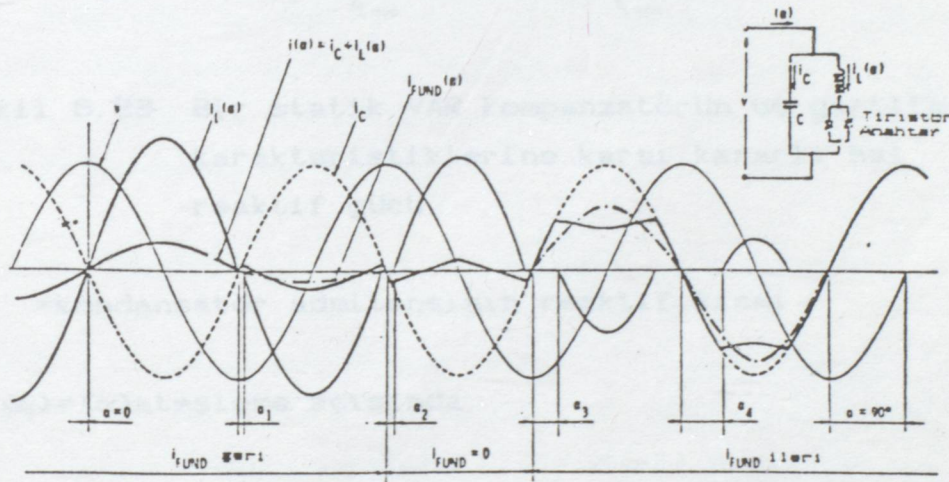
Bu kompanzatörün temel özellikleri şöyle sıralanabilir:

- Sürekli, kesintisiz denetim
- En fazla 10msde sistemde olan tepki gösterebilecektir
- Pratikte transient meydana gelmez, harmonik üretir
- Kayıplar daha yüksek olacaktır (özellikle düşük seviye de reaktif güç üretirken veya tüketirken)



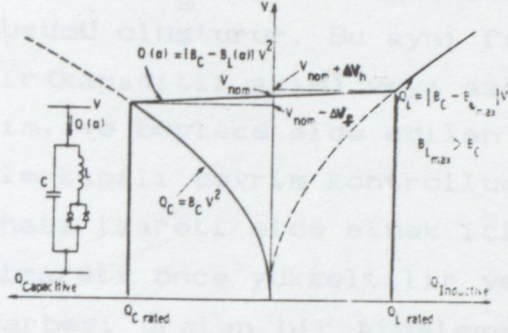
Şekil 6.21 Sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktörün V/Q karakteristiği

Farklı ateşleme açılarındaki ($\alpha, \alpha_1, \alpha_2, \dots$) kompanzatör akımının temel bileşeni, şebeke gerilimine göre ileri yada geridir. Maksimum kapasitif çıkış, $\alpha=90^\circ$ olduğu zaman elde edilir. FC-TCR kompanzatör, sabit şönt kondansatör bank(lar)lı tristör kontrollü reaktörlerin kombinasyonundan oluşan bu kompanzatörün var çıkışı sürekli değişir. Reaktördeki ateşleme açısı kontrolünden dolayı non-sinüsoidal akım dalga şekliyle ortaya çıkan harmonikleri kaldırmak için genellikle sabit kondansatör bankı, filtreler gibi çalışması için ayar edilir.



Sekil 6.22 Sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktörün yapısı ve ilişkin dalga şekilleri ($1/\omega L > \omega C, \omega = \omega_f$)

Pratikte sabit kondansatör genellikle temel frekansta gerekli kapasitif empedansa sahip bir filtre devresinin yerini alır fakat egemen harmonikleri absorbe etmek için seçilen frekanslarda düşük bir empedans gösterir. Temel frekansta bu düzenleme ile elde edilebilir uygulanan terminal gerilim kararlı hal karakteristiğine karşı reaktif güç çıkışı (VAR), şekil 6.23'de gösterilmiştir.



Şekil 6.23 Bir statik VAR kompanzatörün uç gerilim karakteristiklerine karşı kararlı hal reaktif gücü

B_C =kondansatör admitansının reaktif kısmı

$B_L(\alpha) = (\alpha)$ ateşleme açısında

Bu şekilden görülebileceği gibi çıkış VAR'ları ve uygulanan gerilim arasındaki kararlı hal ilişkisi, regülasyonun gerilim bandı üzerinde lineer olabilir. Regülasyon aralığında gerilim karakteristiğine karşı VAR'ın eğimi, ateşleme açısının kontroluyla belirlenir. Regülasyon aralığı dışında kompanzatörün gerilim karakteristiğine karşı kararlı hal çıkış VAR'ları, kondansatör (düşük gerilim) veya endüktör (yüksek gerilim) ünku ile aynıdır.

-Küçük bozukluklar altında çalışma performansı

Ac güç sistemindeki bozukluklar, uç gerilim salınımları kompanzatörün lineer çalışma sahası (regülasyon aralığı) içinde kalırsa "küçük" olarak adlandırılır. Kompanzatör aslında fonksiyonel olarak uç gerilim regülatörü gibi çalışır. Kaynak geri-

limi, gerilim bozukluğuyla seri bağılı nominal üretim geriliminden ibarettir. Gerilim bozukluğu, V_{DIST} , güç sistemindeki yük ve üretimde oluşan değişikliklerin sebep olduğu V_T uç gerilimindeki ani değişimleri gösterir. Kompanzatörün reaktif akım çıkışı (kapasitif veya endüktif) X_S kaynak reaktansı üzerindekiyle aynı fazlı gerilim düşümü oluşturur. Bu aynı fazlı gerilim, V_T uç gerilimini arttırır (kapasitif akım) veya azaltır (endüktif akım). Reaktördeki akım, ve böylece elde edilen VAR çıkışı, SVC gerilim regülatörü ile kapalı çevrim kontrollüdür. Yani ölçülen uç gerilimi, bir hata işareti elde etmek için bir referansla kıyaslanır. Hata işareti önce yükseltilir ve tristör anahtarı için ateşleme darbesi üreten bir ateşleme açısı sinyali oluşturulur. Ateşleme açısının değişimi, V_T uç gerilimini değiştirerek ki böylece kapalı çevrimi tamamlayan, SVC reaktansında bir değişime sebep olur.

-Büyük bozukluklar altında çalışma performansı

Ac güç sistemindeki bozukluklar , uç gerilim salınması kompanzatörün lineer saha (regülasyon aralığı) dışına genişlediği zaman "büyük "olarak adlandırılır. Böyle bozukluklar çoğu kez hızlı gerilim değişimleriyle karakterize edilirler (yani yüksek frekans mutevası).

Tristör anahtarının tamamen açık olduğu regülasyon bandının altındaki gerilim seviyelerinde SVC, sabit kondansatörü dejenere eder. Tristör anahtarının tamamen kapalı olduğu regülasyon bandının üstündeki gerilim seviyelerinde SVC , kararlı halde uygulanan gerimin karesiyle orantılı VAR'ları absorblayan kontrolsüz bir reaktör gibi davranır. Bu gerilim seviyelerinde kompanzatör aslında sadece tabii rezonans- frekansı altında endüktif bir admitans gösteren paralel bir LC devresidir. Tasarımla bu rezonans frekansı genellikle güç sistem frekansına yakındır. Böylece , tabii rezonans frekansı üzerindeki frekanslarda ac güç sistemine kompanzatörle sunulan admitans kapasitiftir.

FC-TCR tipi kompanzatör aslında büyük sistem bozukluk-
lukları süresince bir kondansatör gibi göz önüne alınabilir.
Bu kondansatör, ac sistem (veya transformatör) empedansı ile seri
bir LC devresi oluşturur. Büyük formlar bilgisayar simülasyonu
ile elde edilir.

SVC kontrolundan bağımsız sonuçlar elde edilmesi için
tristör anahtarlar tamamen "on" durumunda tutulur. Çünkü kont-
rol , büyük uç bozuklukları altında senkronize zamanı ve ge-
rilim ölçümleri, sinyal işlemeyle beraber muhtemel problemler
yüzünden değişken (karaasız) ateşlemelerin başlamasıyla geçici
davranışı daha da kötüleştirmeye eğilim gösterir. Ac güç sis-
temi büyük bozukluklara uğradığında çıkışın iyi durumunu ko-
ruyarak ve sıfır reaktif güç çıkışı sağlamak için simülasyon
sonuçlarıyla set edilir.

Arıza süresince, filtre devresi ve şöntlenen sistem em-
pedansı arasında yüksek harmonik akımları dolaşır. Arıza zama-
nında tristör kontrollü reaktörde depolanan enerji , devrede
kayıplar tarafından belirlenmiş olan, düşük oranda bozulan
sirkülasyon akımlarına da sebep olur.

Arıza gidermede geriliminin geçici büyüklüğü, güç sis-
tem empedansı ve giderme işleminin gerçek zaman anına bağlı
olarak çok büyük olabilir. Bu durum özellikle arıza gidermenin
yüksek aşırı gerilimle ilgili olduğunda böyledir.

Yukarıda anlatılanlardan bir karara varılabilir ki;
FC-TCR tipi kompanzatörün cevabı ve davranışı, bozukluğu izle-
yen en az birkaç saykıl süresince kontrol edilemiyebilir. Sonuç
gerilim transientleri aslında sabit kondansatör (veya LC filt-
resi) ve güç sistem empedansı ile belirlenir. Bu, güç sistemin-
de aşırı gerilim ve rezonans problemlerine götürür. Böylece SVC
kontrolunda zamanlama, gerilim ölçümü ve diğer zorluklara sebep
olur. Güç sistem empedansının katılığı (kısa devre kapasitesi)
ve karakteri (frekans bağımlılığı), büyük bozukluklara konu
olan kompanzatörün davranışı ve cevabını önemli ölçüde etkiler.

Harmonik üretimi

Tristör kontrollü reaktörün süreksiz akım iletimi harmonik akımları üretir. Üretilen harmonik akımların genliği şekil 6.24 'de gösterildiği gibi ateşleme açısının (α) bir fonksiyonudur. Dengeli üç faz çalışma şartları altında 3.harmonik akımlar (3. ,9. ve etc.) üçgen bağlı reaktörde dolaşır ve güç sistemine girmez.

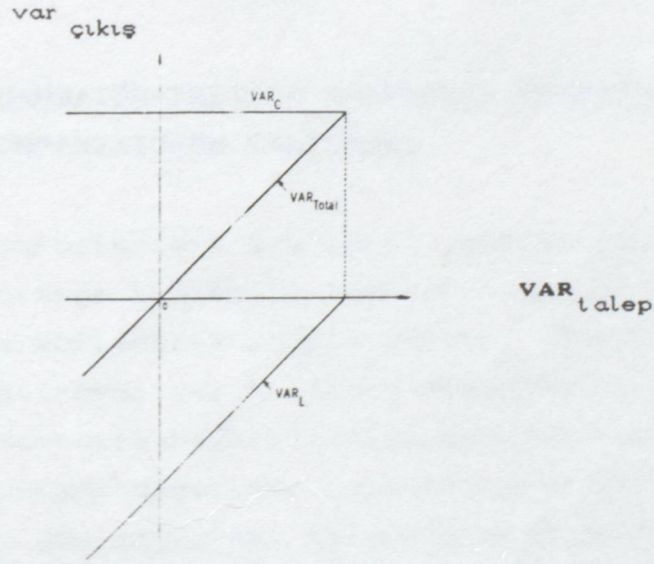
Pratik bir sistemde tam mükemmel dengeli şartlar nadiren bulunur. Dengesiz SVC çalışmaya, dengesiz şebeke gerilimleri empedansları, tristör kontrollü reaktördeki toleranslar ve gecikme (ateşleme) açısındaki yanlışlıklar tarafından sebep olabilir. SVC'nin kanonikal harmonikler (5., 7., 11., 13., vb.) üzerindeki etkisi normal olarak ihmal edilebilir. 3 .harmonikler, artık üçgen bağlı devrede tam olarak içerilmemesine rağmen tipik pratik çalışma şartları altında ac güç sistemine giren 3. - harmonik akımı %5'den daha azdır. (ve 9., 15. vb. ihmal edilebilir kadar küçüktür).

Pozitif ve negatif akım yarı periyotlarını ileten tristörlerin gecikme (ateşleme) açılarındaki farklar, direkt ve çift harmoniklerin üretimiyle sonuçlanır. Gerçekten bir SVC kontrol problemi olan bu durum, çeşitli metodlar ile önlenabilir ;örneğin pozitif ve negatif ateşleme kanallarının dikkatli bir şekilde uygunlaştırılması veya pozitif ve negatif amper saniyelerin özdeşliğinin zorlanmasıdır (uygun yardımcı geri-besleme çevrimi ile).

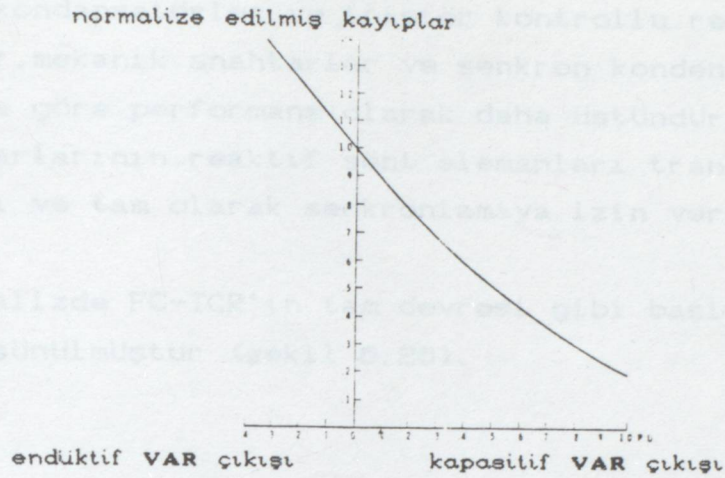
Kayıp karakteristiği

FC-TCR tipi kompanzatörün VAR çıkış karakteristiğine karşı kaybı , temel devre düzeni ve çalışma prensibiyle doğal olarak belirlenir. Sabit kondansatörün sabit VAR çıkışı (VAR_c), toplam VAR çıkışı ile sonuçlanan tristör kontrollü reaktörün VAR çıkışına (VAR_L) zıttır. Bu toplam VAR çıkışı (VAR_{toplam}), şekil 6.24 ' de gösterildiği gibi kompanzasyon için talep edilen

reaktif reaktif güç (VAR_{taleb}) eşittir. Böylece sıfır VAR talebinde kapasitif ve endüktif VAR'lar mükemmel şekilde iptal olur. Tabii ki bu demektir ki; kondansatör bankının toplam akımı, farkedilir derecede standby (yüksüz) kayıpla tristör yoluyla reaktör bankı içinde dolanır. Bu kayıplar, kapasitif VAR çıkışının (reaktör bankı ve tristör anahtarlarındaki azaltılmış akımın) artmasıyla azalır. Şekil 6.25 'de gösterildiği gibi ters olarak endüktif çıkışın artmasıyla artar. Bu tip kayıp karakteristiği genellikle ekonomik olarak, bir iletim sistemi uygulamasının birincil dinamik kompanzasyonu gereken yerlerde dezavantajdır. Gerekli ortalama VAR çıkışı normal olarak düşüktür. Bu durum, ortalama VAR çıkışı ihtiyaçlarının oldukça yüksek olduğu ark fırını kompanzasyonu gibi endüstriyel uygulamalara zıttır.



Şekil 6.24 FC-TCR tipi kompanzatörün VAR talep karakteristiğine karşı VAR çıkışı



şekil 6.25 FC-TCR tipi kompanzatörün için normalize edilmiş kayıplar ve birim VAR başına çıkış arasındaki ilişkiler

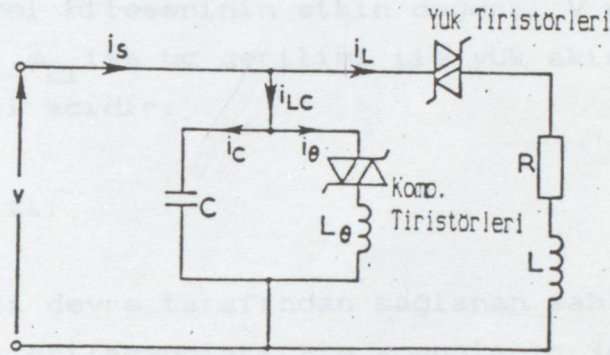
6.4.3.1 SABİT KONDANSATÖR-TRİSTÖR KONTROLLU REAKTÖRLE G   FAKTÖRÜ KOMPANZATÖRÜN  ALIşMASI

Tristör kontrollu seri R-L yüklü g   kompanzatörün sabit kondansatör-tristör kontrollu reaktör tipi, yaklaşık ve daha doğru bir devre kullanarak analiz edilir.  nemli derecede g   faktörü iyileştirmesi, y k tristörü ateşleme açısının düşük değerleri i inki devreyle başarılabilir. Bununla beraber ateşleme açısının daha yüksek değerleri için herhangi bir iyileştirme, ek olarak gelen güç kayıpları pahasına elde edilir.

Seri harmonik bastırıcı indüktörlü şönt kompanzasyon kondansatörleri , g   faktörünün düzeltilmesi ve tristör kontrollunun uç gerilim stabilizasyonu ve diğer non-linear yükler için endüstriyel kullanım dahilindedir. Böylesi düzenlerde kondansatörün ve ona birleşik indüktörlerin optimum değerleri, y k empedansına ve y k tristörlerinin ateşleme açısına bağlıdır. kondansatörün değerini değiştirmek için gerekli ateşleme açısı değişiklikleri çok sakıncalıdır. Bu, g   faktörü kompanzasyonu için reaktif voltamperlerin sürekli değişimini sağlayan bir düzenin gerekliliğini  ne sürer.

Şönt kondansatörler ve tristör kontrollü reaktörden oluşan sistemler, mekanik anahtarlar ve senkron kondenserler kullanan düzenlere göre performans olarak daha üstündür. Bu durum kartı hal anahtarlarının, reaktif şönt elemanları transient serbest anahtarlama ve tam olarak senkronlamaya izin vermesine bağlıdır.

Bu analizde FC-TCR'in tam devresi gibi basitleştirilmiş bir devre düşünülmüştür (Şekil 6.26).



Şekil 6.26 FC-TCR tipi kompanzatörün yaklaşık devresi

Şekil 6.26, tek fazlı tristör kontrollü endüktif bir yükün gücünü iyileştirmek için FC-TCR tipli kompanzatörün yaklaşık veya basitleştirilmiş devresini gösterir. Kompanzatör, ideal kondansatör, C_θ , ile paralel bağlı tristör kontrollü bir ideal bir indüktörden L_θ oluşur. L_θ ve C_θ 'nin uygun değerlerini seçerek böyle bir düzen ya değişken bir kapasitif reaktans yada değişken bir endüktif reaktans veyahut her ikisini sağlamak için kullanılabilir. Bu analizde sadece değişken kapasitif reaktans ihtiyacı düşünüldü. Bu, L_θ kolundaki kompanzatör tristörlerinin ateşleme açısını değiştirerek gerçekleştirilebilir. Bu yüzden kompanzatör, kompanzatör akımının ileri reaktif bileşeni aracılığıyla yük akımının geri reaktif temel bileşenini nötrale etmek için ateşleme açısının (θ) otomatik olarak ayarlanacak şekilde tasarlanır. Bilinirki; yük akımının geri reaktif temel bileşeni, yük tristörlerinin α ateşleme açısı ve ϕ_L yük empedans

açısına bağlıdır. Farzedelimki , gerilim kaynağı idealdir ve $v(\omega t) = V_m \sin \omega t$ olsun. Fourier serileri kullanarak şekil 6.26'daki devrenin analizi gösterirki; yük tristörü ateşleme açısı (α) ile optimum kompanzasyon için kompanzatör tristörü ateşleme açısı arasındaki ilişki,

$$I_{L_1} \sin \phi_{L_1} (\alpha) + V\omega C \left[\frac{2\theta}{\pi} - 1 - \frac{1}{\pi} \sin 2\theta \right] = 0 \quad (6.8)$$

ile verilir. Bu denklemde, θ kompanzatör tristörlerinin ateşleme açısı, I_L yük akımı temel bileşeninin etkin değeri, V uygulanan gerilimin etkin değeri, ϕ_{L_1} ise uç gerilimi ile yük akımının temel bileşeni arasındaki açıdır.

Tam devre analizi:

Şekil 6.26 'daki devre tarafından sağlanan sabit süseptans (ωC), seri harmonik osilasyonları ile sonuçlanır (özellikle önemli derecede kaynak endüktansı var olduğunda). Böyle osilasyonları önlemek için uygun bir şekilde dizayn edilmiş harmonik bastırıcı indüktör L_3 , şekil 6.27'de gösterildiği gibi C kondansatörüyle seri göz önüne alınmalıdır. Ayrıca L_3 ve L_θ indüktörleri sırasıyla R_3 ve R_θ dirençleriyle birleştirilmiştir. Güç faktörü düzeltim amaçları için temel frekansta gerekli kapasitif süseptansa imkan verecek şekilde C ve L_3 değerlerini seçmek önemlidir. Bu seri kombinasyon, temel frekanstan (ω) daha büyük frekanslarda, özellikle 2ω frekansta, gerilim için ayarlanabilir. Şimdiki durumda bu ayarlama, 2ω frekansta seçildi.

Şekil 6.27'deki gerçek devrenin fourier analizi sonucunda farklı akımların fourier katsayıları a_1, b_1, c_1 aşağıdaki gibi verilir;

Yük akımının temel fourier katsayıları:

$$a_{iL_1} = \frac{I_{mL}}{2\pi} \left[\cos(2\alpha + \phi_L) - \cos(2X + \phi_L) - 2(X - \alpha) \sin \phi_L \right]$$

$$b_{i_{L_1}} = \frac{I_{m_L}}{2\pi} \left[\sin(2\alpha + \phi_L) - \sin(2X + \phi_L) - 2(X - \alpha)\cos\phi_L \right] \quad (6.9a)$$

Kompanzator indüktör akımının temel fourier katsayıları:

$$a_{i_{\theta_1}} = \frac{I_{m_\theta}}{2\pi} \left[\cos(2\theta + \phi_\theta) - \cos(2X_\theta + \phi_\theta) - 2(X_\theta - \theta)\sin\phi_\theta \right]$$

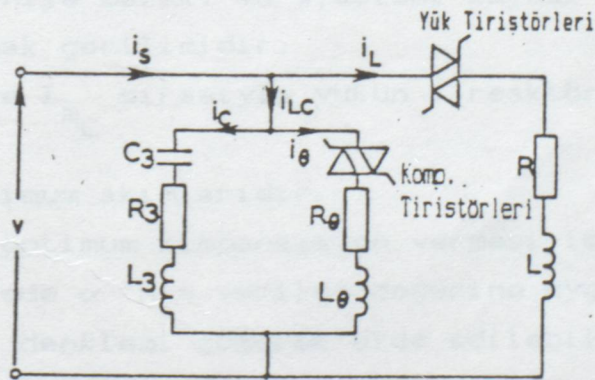
$$b_{i_{L_1}} = \frac{I_{m_\theta}}{2} \left[\sin(2\theta + \phi_\theta) - \sin(2X_\theta + \phi_\theta) - 2(X_\theta - \theta)\cos\phi_\theta \right] \quad (6.9b)$$

Kondansatör akımının temel katsayıları:

$$a_{i_{C_1}} = I_{m_C} \cdot \sin\phi_C$$

$$b_{i_{C_1}} = I_{m_C} \cdot \cos\phi_C \quad (6.9c)$$

Burada; I_{m_L} , I_m ve I_{m_C} tepe akımlarıdır. ϕ_L , ϕ_θ ve ϕ_C sırasıyla yük kolu, kompanzator tristör kolu ve kondansatör kolu empedanslarının faz açısıdır. Ayrıca X ve X_θ ise aşağıda bunlara ait denklemlerden elde edilen yük ve kompanzator tristörlerinin sö-nüm açısıdır ve aşağıdaki denklemlerden elde edilebilir;



Sekil 6.27 FF-TCR 'nin gerçek devresi

$$\sin(X - \alpha) - \sin(\alpha - \phi_L) e^{-(X - \alpha) \cot \phi_L} = 0$$

$$\sin(X - \phi_L) - \sin(\theta - \phi_\theta) e^{-(X - \theta) \cot \phi_\theta} = 0$$

(6.9) denklemlerinde kullanılan ve ileriki denklemlerde kullanılacak semboller aşağıdadır :

a_i , b_i kaynak akımının temel fourier katsayılarıdır.
 s_1 faktörü;

i_C , i_L , i_s , i_θ sırasıyla, amper olarak, ani kondansatör, yük, kaynak ve reaktör akımlarıdır.

I_L ve I_{L1} sırasıyla, amper olarak, yük akımının efektif değeri ve yük I_{L1} akımının temel bileşeninin efektif değeridir.

P_{ort} , PFL ve PFC sırasıyla ortalama güç, yük güç faktörü ve kompanze edilen güç faktörüdür.

V_m ve V sırasıyla, volt olarak, sinüzoidal generatör geriliminin tepe değeri ve sinüzoidal generatör geriliminin efektif değeridir.

ϕ_L ve ϕ_{L1} sırasıyla, radyan olarak, yük faz açısı ($\tan^{-1}(wL/R)$)

ve yük akımının temel bileşeni ile uç gerilimi arasındaki faz açısıdır.

α ve θ sırasıyla, radyan olarak, yük tristörü ateşleme açısıdır.

Z , yük empedansı olup $\sqrt{R^2 + wL^2}$ Ω 'dur.

t ; zaman, saniye olarak, ve w ; açısal kaynak frekansı, rad/s
 v , ani kaynak gerilimidir.

I_{m_L} , I_{m_θ} ve I_{m_C} sırasıyla yükün, reaktörün ve kondansa-

törün maksimum akımlarıdır.

Bu yüzden optimum kompanzasyon vermesi için şekil 6.27'deki gerçek devrede α 'nın verilen değerine uygun gelen θ 'nın değeri aşağıdaki denklemi çözerek elde edilebilir;

$$a_{i_{L1}} + a_{i_{\theta1}} + a_{i_{C1}} = 0 \quad (6.10)$$

$$B_{i_{s_1}} = a_{i_{L_1}} + a_{i_{\theta_1}} + a_{i_{C_1}}$$

Her iki devre için 6.8 ve 6.10 denklemleri , optimum kompanzasyondan sonra deplasman faktörünün "1" olacağını ima eder. Bununla beraber güç faktörü, distorsiyon etkilerinden dolayı (yani non-lineer empedansların sebep olduğu daha yüksek harmonik akımı bileşenlerinden dolayı güç faktörü yine de "1" 'den daha azdır. Güç faktörü;

$$G.F = \frac{P_{ort}}{V \cdot I_s}$$

dır.

Efektif kaynak akımı (I_s), kompanzatör akımlarına olduğu kadar yük akımının temel ve harmonik bileşenlerine bağlıdır. V , uygulanan gerilimin I_s çekilen akımının efektif değerleridir. Şekil 6.26 ve 27'deki devreler için kompanzatör akımı gibi yük akımının harmonik bileşenlerini belirleyen denklemler , ek A11 ve A12'de verilmiştir.

İdeal gerilim kaynağı ile beraber kompanzatör harmonik akım bileşenleri , L_θ kolu tarafından dahili olarak üretilir. Çünkü kompanzatör kol empedansı lineerdir. Genellikle yük akımının ve kompanzatör akımının temel bileşenleri, sırasıyla α ve θ tristör ateşleme açıları ile artan değerleriyle azalır. Bununla beraber bu akımların her ikisinin daha yüksek harmonikleri, ateşleme açıları ile epeyce değişir. α ve θ 'nin daha yüksek değerleri için toplam I_s 'in önemli bir kısmı ile aynıdır. Bundan dolayı böyle şartlar altında deplasman faktörü "1" olsa bile, daha yüksek harmonikler minimize edilmedikçe güç faktörü çok kötü olabilir.

Tablo 1

Yaklaşık ve gerçek FC-TCR kompanzatorlar için yük tristörü ateşleme açısına karşı kompanzator-tristör ateşleme açısının değişimi

θ_1 = FC-TCR'nin yaklaşık devresi, θ_2 = FC-TCR'nin tam devresi

α deg)	$\phi_L = 10^\circ$		$\phi_L = 30^\circ$		$\phi_L = 45^\circ$		$\phi_L = 60^\circ$		$\phi_L = 75^\circ$	
	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2	θ_1	θ_2
15	101.9	98.02	-	-	-	-	-	-	-	-
30	105.5	102.03	126.3	124.7	-	-	-	-	-	-
45	110.3	107.3	130.2	128.9	180	177.95	-	-	-	-
60	114.7	112.22	132.2	130.95	157.5	157.23	-	-	-	-
75	117.3	115.04	130.0	128.66	142.7	141.94	140.9	140.08	-	-
90	116.7	114.40	123.9	122.15	129.5	128.12	126.4	124.84	131.6	130.34
105	112.9	110.25	115.7	113.3	117.7	115.46	114.7	112.17	116.3	113.92
120	107.0	103.73	107.2	103.88	107.7	104.17	105.0	101.48	105.2	101.72
135	100.5	96.44	99.5	95.29	99.1	94.85	97.5	93.05	97.3	92.77
150	94.8	89.9	93.8	88.70	93.4	88.25	92.7	87.4	92.4	87.15
160	92.0	86.67	91.4	85.91	91.2	85.67	90.9	85.32	90.8	85.2
170	90.4	84.76	90.2	84.55	90.2	84.49	90.1	84.43	90.1	84.41

-Kompanzasyon performansı

Şekil 6.26 devresindeki L_θ ve C değerleri

$$wC = \frac{1}{wL} = \frac{1}{Z} \sin \phi_L \quad (6.12)$$

ilişikisine göre seçilir.

Önceki çalışmada gösterildiği gibi eğer yük faz açısı 45° den daha az olursa, θ açısının değerlerini 180° 'nin altında tutmak için gerekli kapasitif süseptansın minimum değeri,

$$wC_{\min} = \frac{1}{Z} \sin 45^\circ \quad (6.13)$$

dir.

6.12 ve 6.13 denklemlerinde verilen L_θ ve C değerlerini kullanarak 6.8 denklemini, iteratif yöntem kullanarak nümerik olarak çözülebilir. $V=Z=1$ pu. için yük faz açısının (ϕ_L) farklı değerlere için α 'ya karşı θ 'nın değişimi tablo 1 'de verilmiştir. Dikkat edilmesi gerekirkirki, α ve θ değişimleri, $\phi_L > 45^\circ$ ve $\phi_L < 45^\circ$ 'ye karşılık gelen iki farklı mod gösterir. Şekil 2.27'deki devrenin analizi gösterirki, uygun kompanzasyon için gerekli süseptans,

$$wC = \frac{1}{Z} (1+d^2) \sin \phi_L \quad (6.14)$$

ile verilir. Burada, d ; kondansatör-indüktör kolunun net reaktansının $(1/wC)$ dirence (R_θ) oranıdır. L_θ 'nin değeri,

$$wL_\theta = \frac{1 + d^2}{1 + h^2} \cdot \frac{1}{wC} \quad (6.15)$$

şeklinde olacaktır. Burada, $h = \frac{R_\theta}{wL_\theta} = 0.1$

dir.

Daha önceden tartıştığımız gibi L_3, C_3 seri kombinasyon, $2w$ 'da rezonansa getirmek için seçildi. L_3 ve C_3 in bu değerlerini gerçekleştirmek için,

$$\frac{1}{wC_3} = \frac{4}{3} \frac{1}{wC} \quad (6.16)$$

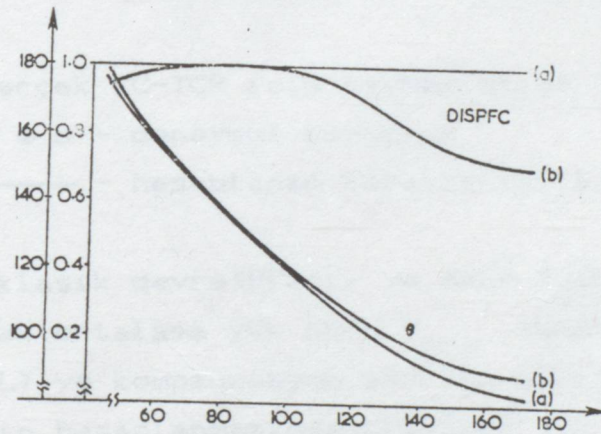
$$wL_3 = \frac{1}{3} \frac{1}{wC}$$

Ayrıca $\phi_L < 45^\circ$ için wC 'nin minumum değeri,

$$wC_{\min} = \frac{1}{Z} (1 + d^2) \sin 45^\circ$$

göre seçildi.

Şekil 6.26 ve 27 devreleri için α - θ değişimleri, her iki devre için de benzer parametrelerin seçildiği gerçeğine rağmen bazı farklar gösterir. Genellikle şekil 6.27 'deki tam doğru devre için gerekli θ 'nın değeri, aynı yük ateşleme açısı, α , için şekil 6.26 'daki yaklaşık devredekinden daha küçüktür. Şekil 6.27'deki pratik devrenin deplasman faktörünü hesaplamak için eğer şekil 6.26'daki yaklaşık devre için hesaplanan değerleri kullanırsak, deplasman faktörü şekil 6.28'deki gösterildiği gibi birim değerden sapar. Diğer bir deyişle yaklaşık ateşleme açısı kriterinin kullanılması daha yüksek ateşleme açılarında optimum güç faktörü kompanzasyonundan daha az olmasına götürür.

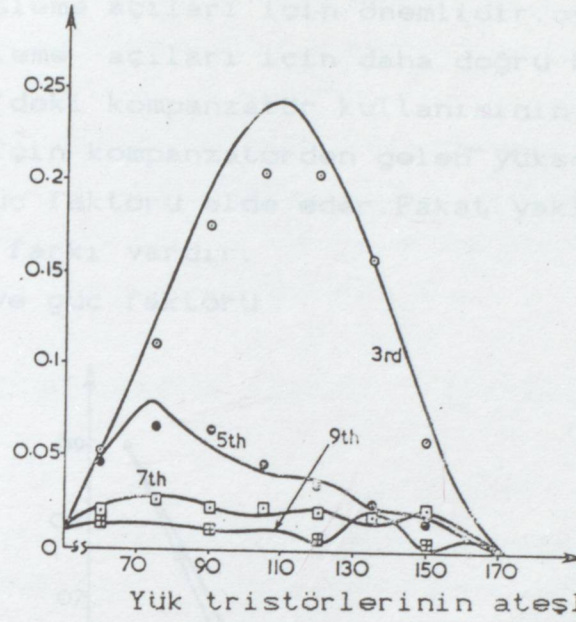


Yük tristörlerinin ateşleme açısı (α)

Şekil 6.28 Yük ateşleme açılı gerçek devre için deplasman faktörü ve kompanzatör tristör ateşleme açısı (θ)nın değişimi. $\phi_L = 45^\circ$
 (a) eğrisi, 6.8'den elde edilen θ değerleri
 (b) eğrisi, 6.10'dan elde edilen θ değerleri

Her iki devrede benzer harmonikler üretir. Şekil 6.29'da kaynak akımı harmoniklerinin hesaplanan değerleri, şekil 6.27'deki devre için gösterilmiştir.

Kaynak akımı (pu)



Şekil 6.29 Gerçek FC-TCR için kaynak akımı harmonikleri

○ ⊕ □ - deneysel sonuçlar

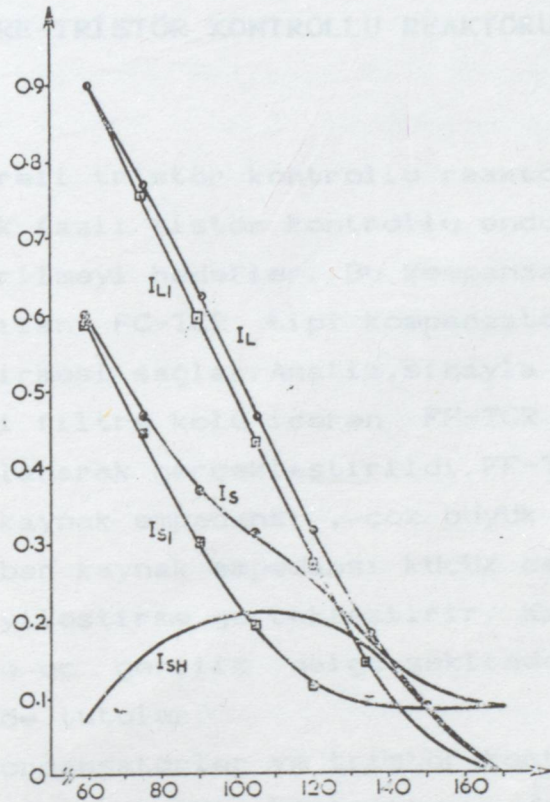
— - hesaplanan karakteristikler

Şekil 6.30, yaklaşık devre (PFC-1) ve daha doğru bir devre (PFC-2) kullanarak, ortalama yük gücü P_{ort} , kompanzasyonsuz yük güç faktörü (PFL) ve kompanzasyon sonrası yük güç faktörünü gösterir. PFC-2'nin hesaplanmasında, ortalama yük gücüne R_{θ} ve R_3 'deki kompanzator kayıpları da ek olarak gelir. Bununla beraber, eğer kompanzator devresindeki bu kayıplar hariç tutulur ve yük kompanzator devresinin giriş uçlarındaki efektif güç faktörü hesaplanırsa, şekil 6.30 'da PFC olarak adlandırılan eğriye ulaşılır. Şekil 6.30 'da görülür ki ; kompanzator kullanımı, özellikle daha düşük ateşleme açılarında güç faktöründe büyük bir iyileştirme verir.

Tam devre için şekil 6.30 'da PFC olarak adlandırılan eğride gösterilen güç faktörünün yüksek değerleri , başlıca α ile artan, kompanzatordeki güç kayıplarına bağlıdır. Dikkat edilmesi gerekirkki; α artarken yük akımı çok küçülür ve bu yüzden L_{θ} kolundaki i_{θ} akımı , toplam kompanzator akımı i_{Lc} 'yi çok küçük yapmak için yeterli büyüklükte olmalıdır. Bu, kompanzatorde daha

yüksek güç kayıpları ile sonuçlanır. Ayrıca i_{θ} 'nin harmonik içeriği, büyük ateşleme açıları için önemlidir. $\alpha < 125^{\circ} - 130^{\circ}$ 'ye kadarki yük ateşleme açıları için daha doğru hesaplama yapılırsa şekil 2.27 'deki kompanzator kullanımının faydası açıkça görülür. $\alpha > 130^{\circ}$ için kompanzator'den gelen yüksek güç kayıpları pahasına iyi güç faktörü elde eder. Fakat yaklaşık kompanzator'den çok az bir farkı vardır.

Güç (pu) ve güç faktörü



Yük tristörlerinin ateşleme açısı (α)

Sekil 6.30 Gerçek FC-TCR için tüm güç faktörü (kompanzasyondan önce ve sonra) ve ortalama güç (P_{ort}) $\phi_L = 45^{\circ}$

İki devreyi kısaca karşılaştıırırsak şunları söyleyebiliriz;

- Eğer pratik devrenin deplasman faktörünü hesaplamada, yaklaşık devrenin hesaplanan değerleri kullanırsak, deplasman faktörü

rü $\alpha > 100^\circ$ ateşleme açıları için " 1 " den sapor ve optimum güç faktörü kompanzasyonu elde edilemez.

- Her iki devrede aynı dereceli ve benzer genlikli harmonikler üretir.

- Yük ateşleme açısının düşük değerlerinde her iki devreyle de önemli iyileştirme gerçekleştirilir. Büyük α değerleri için güç faktörünü iyileştirmede gerçek devrenin performansı, yüksek kompanzasyon kayıpları pahasına elde edilir.

6.4.3.2 SABİT FİLTRE-TRİSTÖR KONTROLLU REAKTÖRÜN (FF-TCR) ANALİZİ

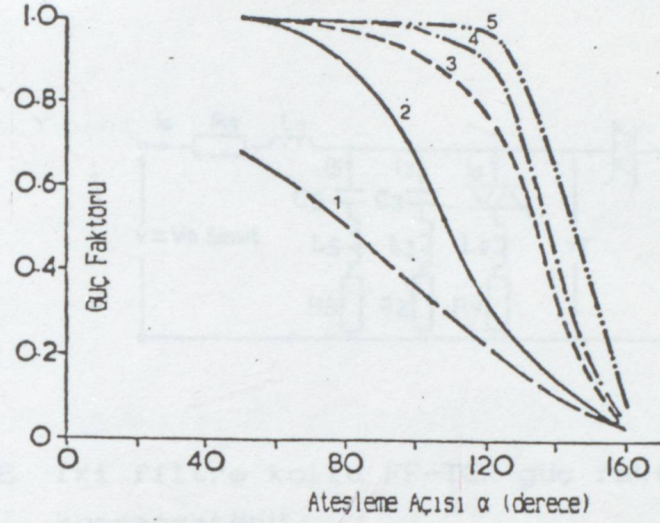
Sabit filtreli tristör kontrollu reaktör (FF-TCR) tipi kompanzatör , tek fazlı tristör kontrollu endüktif yükün güç faktörünün iyileştirilmeyi hedefler. Bu kompanzatör, genel olarak daha çok kullanılan FC-TCR tipi kompanzatörden daha iyi güç faktörü iyileştirmesi sağlar. Analiz, sırayla 3. ve 5. harmoniklere ayarlı iki filtre kolu içeren FF-TCR kompanzatörün gerçek eşdeğeri kullanarak gerçekleştirildi. FF-TCR'li güç faktörü iyileştirmesi kaynak empedansı , çok büyük olduğunda daha iyidir. Bununla beraber kaynak empedansı küçük de olsa güç faktöründe uygun bir iyileştirme gerçekleştirir. Kaynak empedansı büyük olduğunda bile uç gerilim dalga şeklindeki distorsiyon uygun sınırlar içinde tutulur.

Sabit şönt kondansatörler ve tristör kontrollu reaktörleri içeren sistemler , tristör kontrollu ve diğer non-lineer yüklerin uç gerilim stabilizasyonu ve güç faktörü düzeltimi için yaygın olarak kullanılır. Böyle bir düzende tristör kontrollu reaktör, değişken kapasitif reaktans elde etmek için sabit bir kondansatöre paralel bağlanır. Önemli derecede güç faktörü iyileştirmesi, yük tristörü ateşleme açılarının düşük değerleri için kullanılan devrede elde edilebilir. Bununla beraber ateşleme açılarının daha büyük değerleri için güç faktörü iyileştirmesi, yük ve tristör tarafından üretilen harmoniklere bağlı olarak sınırlanır. Bu yüzden, daha iyi güç faktörü iyileştirmesi, böylesi harmonikleri minimize ederek gerçekleştirilir.

Analiz, sıfır kaynak empedanslı ideal bir güç kaynağı varsayılarak gerçekleştirildi. Bununla beraber pratik güç kaynakları, iletim ve dağıtım hatlarından dolayı bazı seri empedanslara sahiptir. Böyle seri empedansların varlığı, kaynak uç gerilimini bozar ve devrenin güç faktörü ile gücü üzerinde önemli etkiye sahip olabilir. Uç geriliminin bozulması, alıcıları (lineer empedans yüklerine sahip olduklarında bile) da etkiler. Bu yüzden doğru analiz için kaynak empedansı da hesaba katılmalıdır.

Bu bölümde, önemli derecede seri empedansa sahip olan kaynaktan beslenen tek fazlı tristör kontrollü endüktif bir yükün güç faktörünü iyileştirmek için FF-TCR tipi kompanzatörün kullanımını ele alacağız. İleri sürülen kompanzatör sadece yük tarafından değişken kapasitif reaktansı sağlamakla kalmaz kaynak akımının büyük harmonik bileşenlerini shunt-out yapar, uç gerilimdistorsiyonunu büyük oranda azaltır. Böylelikle önceki FC-TCR düzenleri üzerinde bir iyileştirme gösterir.

Karşılaştırma yapmak üzere tekrar FC-TCR düzenine dönecek olursak; FF-TCR kompanzatörü ideal kondansatör (C) ile paralel bağlı tristör kontrollü indüktörden (L_θ) oluşur. Bu düzen C ve L_θ 'nin uygun değerlerini seçerek değişken endüktif veya kapasitif reaktans sağlamak için kullanılabilir. Bu durum, kompanzatör tristörlerinin ateşleme açısını (θ) değiştirmek suretiyle gerçekleştirilebilir. Bununla beraber güç faktörü, TCR gibi yükler tarafından üretilen kaynak akımının harmonik içerinden etkilenir ve "1"den az olur. Bu kollar tarafından üretilen harmonikler, α , θ ve ϕ_L değerleri ile etkilenir. İdeal bir FC-TCR ile kompanse edilmiş $\phi_L=45^\circ$ olan bir R-L yükünün güç faktörü üzerindeki bu harmoniklerin etkisi şekil 6.31 'de gösterilmiştir. Bu şekilde 1 ve 2 eğrileri, sırasıyla kompanzasyondan önce ve sonraki yük güç faktörünü gösterir. (3) eğrisi, kaynak akımının 3. harmoniğinin sıfır olduğu varsayımıyla kompanse edilmiş güç faktörünü verir. Benzer olarak 4 ve 5 eğrileri, sırasıyla kaynak akımının 3. + 5. ve 3. + 5. + 7. harmoniklerin sıfır olduğu durumlar içindir. Böylece eğer kaynak akımındaki büyük harmonikler elimine edilirse daha iyi bir güç faktörü iyileştirmesinin gerçekleştirilebileceği açıkça görülür.



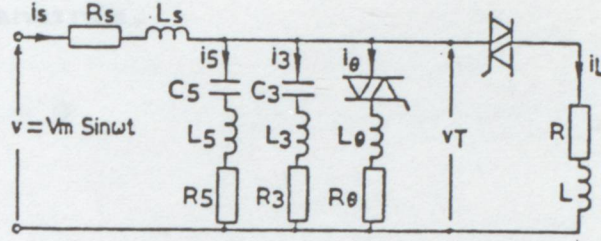
Şekil 6.31 $\phi_L = 45^\circ$ için hesaplanmış güç faktörü

Kaynak empedansının varlığında kompanzatörün sabit kondansatörü harmonik osilasyonlarına sebep verir. Böyle osilasyonları önlemek için uygun bir şekilde tasarlanan harmonik bastırıcı L_3 , C_3 kondansatörüyle seri olarak gösterilir.

FF-TCR kompanzatör

Şekil 6.31 eğer kondansatör , büyük harmoniklere ayarlı LC filtre koluyla (veya kollarıyla) yer değiştirirse FC-TCR kompanzatör performansının iyileştirilebileceğini ileri sürer. Her filtre kolu , seçilmiş harmonik frekansında seri rezonansın çift fonksiyonuna sahiptir. Bunlardan biri, seçilen harmonik frekansında rezonans diğeri de temel frekansta gerekli net kapasitif süseptans sağlamaktır. Seri kaynak empedansının varlığında bu filtreler, büyük harmonikleri o şekilde şöntler ki güç faktörünü düzeltir. Şekil 6.32 ' de iki ayarlı filtre kullanan böyle bir düzenin gerçek devresi gösterilmiştir. Tek fazlı triş-tör kontrollü yükler için büyük harmonikler 3., 5. ve 7. vb'dir. Tek bir filtre, 3w'lık bir rezonans frekansına sahip olmalıdır. Daha iyi bir düzeltme gerekliyse, 3w ve 5w da iki filtre gerekecektir. Deneyimler sadece iki filtrenin kullanımını, iyi bir güç

faktörü düzeltimi için,yeterli görülmüştür.



Sekil 6.32 İki filtre kollu FF-TCR güç faktörü kompanzatörü

Filtre parametreleri

Güç faktörünü düzeltme amacı için 3.ve 5.harmonik filtreleri yeterlidir. Temel frekansta filtrenin ideal olduğu varsayımı ile,

$$(1/wC_5 - wL_5)^{-1} + (1/wC_3 - wL_3)^{-1} - (wL_\theta(\alpha))^{-1} = wC(\alpha)$$

(6.17)

yazılabilir.

$\alpha \leq \phi_L$ için TCR, herhangi bir akım çekmez veya herhangi bir var absorbe etmez. Böylece $\alpha \leq \phi_L$ için

$$wC(\alpha) = wC \text{ ve } [wL_\theta(\alpha)]^{-1} = 0 \quad (6.18)$$

olur. Filtre bileşenleri tam iletim sinüzoidal çalışma kriteri kullanarak tasarlanır. Yani $\alpha = \phi_L$ varsayımı ile,

$$(1/wC_5 - wL_5)^{-1} + (1/wC_3 - wL_3)^{-1} = wC \quad (6.19)$$

olur.

3. harmonik frekansında,

$$1/(3\omega C_3) - 3\omega L_3 = 0 \quad (6.20)$$

5. harmonik frekansında,

$$1/(5\omega C_5) - 5\omega L_5 = 0 \quad (6.21)$$

olmalıdır.

(6.19)-(6.21) denklemleri dört bilinmeyen içerir. Ayrıca L_3, C_3, L_5 ve C_5 'i içeren ayrı bir bağımsız denklem gereklidir. Bu durum (6.19) denklemindeki iki filtre kolunun karşılıklı katkılarını şart koşarak sağlanır. Bu karar, tristörlerin nominal değerlerine bağlı olduğu gibi filtre elemanlarının fiyatından dolayı teknik sebepler kadar ekonomik sebeplere oturtulmalıdır. Şekil 6.32'deki iki filtre kolunun, temel kapasitif var ihtiyaçlarına eşit olarak katkıda bulunduğu varsayılırsa o zaman;

$$1/\omega C_5 - \omega L_5 = 1/\omega C_3 - \omega L_3 \quad (6.22)$$

yazılabilir.

(6.18)-(6.22) denklemlerinin aynı anda çözümü aşağıdaki sonuçları verir:

$$\begin{aligned} C_5 &= \frac{12}{45} C \\ C_3 &= \frac{4}{9} C \end{aligned} \quad (6.23)$$

$$\begin{aligned} L_5 &= \frac{1}{12} - \frac{1}{\omega^2 C} \\ L_3 &= \frac{1}{4} - \frac{1}{\omega^2 C} \end{aligned}$$

Devre denklemleri

Şekil 6.32'deki devre için tristör anahtarlamaına bağı-
lı olarak dört iletim durumu vardır:

Durum 1 (1,0)

yük tristörleri	açık
kompanzatör tristörleri	kapalı

Durum 2 (0,1)

yük tristörleri	kapalı
kompanzatör tristörleri	açık

Durum 3 (1,1)

yük tristörleri	açık
kompanzatör tristörleri	açık

Durum 4 (0,0)

yük tristörleri	kapalı
kompanzatör tristörleri	kapalı

Şekil 3'deki devrenin bütün kolları , anahtarlama anla-
rında kol akımlarının, sabit kalması için indüktanslar içerir.
Bununla beraber , kaynak empedansı varlığının sebep olduğu ge-
rilim değişmelerine bağılı olarak anahtarlamanın belirli anla-
rında farklı kol akımı türevlerinin değerlerinde süreksizlik
İdeal kaynak durumunda $L_s=0$ ve uç gerilimi sabit kaldığından
akım türevlerinde bir değişme olmaz.

- Hesap ve ölçüm sonuçları (referans PWRS-2,1987)

Hesaplama maksadıyla aşağıdaki per-unit değerleri seçilmiştir:

$$V_m = \sqrt{2}$$

$$|Z_L| = 1.0$$

$$\phi_L = 45^\circ$$

$$\omega C = 1/\sqrt{2}$$

$$\omega L_\theta = \sqrt{2}$$

$$\omega L_s = 0.1 \text{ ve } 0.02$$

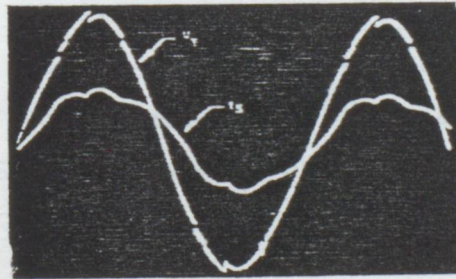
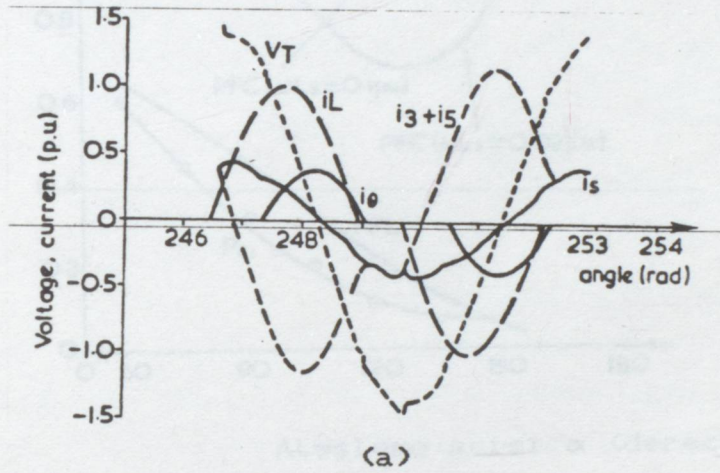
$$R_s = 0.01 \text{ ve } 0.002$$

Baz değerler olarak da aşağıdaki değerler kullanılmıştır;

$V_A=700$ VA , $V=140$ V , $I=5$ A ve $Z=28$ Ω

R_3, R_5 ve R_θ değerleri, herbirinin kendi endüktör değerlerinin %10'u olarak alındı. C_3 , C_5 , L_3 ve L_5 değerleri denklem 6.23'e göre seçildi.

Şekil 6.33, yük tristörü ateşleme açısı $\alpha = 90^\circ$ için hesaplanan ve dengeye alınarak çizilenler dalga şekillerini gösterir. Buradan, şekiller arasında iyi bir uyuşma olduğu gözlenir.



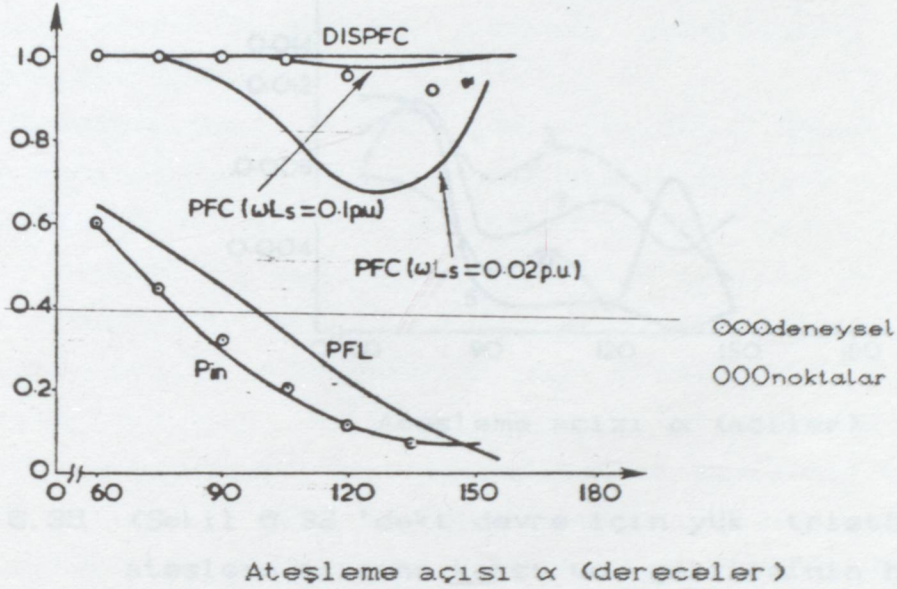
Şekil 6.33 FF-TCR kompanzatörün akım ve gerilim dalga şekilleri ($\alpha=90^\circ$, $\phi_L=45^\circ$, $\theta=128,12^\circ$, $wL_s=0.1$ p.u. ve $R_s=0.01$ p.u.)

(a) Bilgisayarla çizilen dalga şekilleri

(b) Kaynak akımı ve uç gerilimi osilogramları

Şekil 6.34, kaynak empedansının iki değeri için kompanze edilmiş (PFC) ve kompanze edilmemiş (PFL) güç faktörlerini gösterir. Ayrıca, toplam giriş gücü ve deplasman faktörü de gösterilmiştir.

per-unit



Şekil 6.34 FF-TCR kompanzatorün performansı ($\phi_L = 45^\circ$)

0-0-0 giriş gücü, P_{in}

PFL =Kompanze edilmemiş güç faktörü

PFC =Kompanze edilmiş güç faktörü

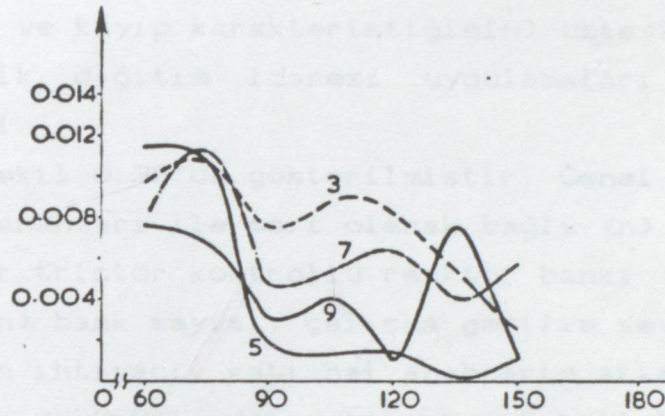
DISPFC =Kompanze edilmiş deplasman faktörü

Şekil 6.35 , Farklı ateşleme açıları için uç gerilimde (V_T) arzedilen dört büyük harmoniğin genliğini gösterir. Kaynak empedansının daha düşük değerleri için ($\omega L_s = 0.02 \text{ p.u.}$) uç gerilimdeki harmonik bileşenleri çok küçüktür ve gösterilmez.

Sonuç olarak FF-TCR güç faktörü kompanzatorün performansı FC-TCR kompanzatorünkünden daha iyidir. Bu durum , FF-TCR kompanzatorün büyük kaynak akımı harmoniklerini azaltması ve endüktif yükün temel var 'larını kompanze etmesinden dolayıdır. Büyük kaynak akımı harmoniklerinin azaltılması, kaynak empedansı

yüksek olduğunda daha çok söz edilir. Üç fazlı sistemlerde üçün katlarındaki harmonikler hat akımlarında gözükmezler. Bu yüzden sözü edilen iki filtre 5. ve 7. harmonik frekanslarına ayarlanması gerekir.

rms harmonik gerilimi (p.u.)



Ateşleme açısı α (açılar)

Şekil 6.35 (Şekil 6.32 'deki devre için yük tristörü ateşleme açısına karşı uç geriliminin hesaplanmış harmonik bileşenleri ($\phi_L = 45^\circ$, $\omega L_S = 0.1$ p.u. ve $R_S = 0.001$ p.u.)

Pratik FF-TCR kompanzatör direnç içerir ve güç kayıplarını çağrıştırır. Bu kayıplar, yük tristörü ateşleme açısıyla (α) artar. Bu kayıplara bağlı olarak, α 'nın yüksek değerlerinde FF-TCR pratik kompanzatörün güç faktörü gerçekten α ile artar. Bu durum Şekil 6.34 'de gösterilmiştir. Bu yüzden güç faktöründeki bu düzeltme, daha yüksek ateşleme açılarında kompanzatör kayıpları pahasına sağlanır.

Son olarak; FF-TCR kompanzatörün ileri sürülen düzeni, güç faktörünü düzeltmede çok uygundur. Performansı, özellikle kaynak empedansı yüksek olduğunda, kaynak akımı ve uç gerilimi harmoniklerini minimum değerde tutmada oldukça iyidir. Pratik FF-TCR 'ler, yük tristörü ateşleme açılarının bütün değerlerinde güç faktörünü aşağı yukarı "1"de tutmak için kullanılabilir.

6.4.4 TRİSTÖR ANAHTARLAMALI KONDANSATÖR-TRİSTÖR KONTROLLU REAKTÖR

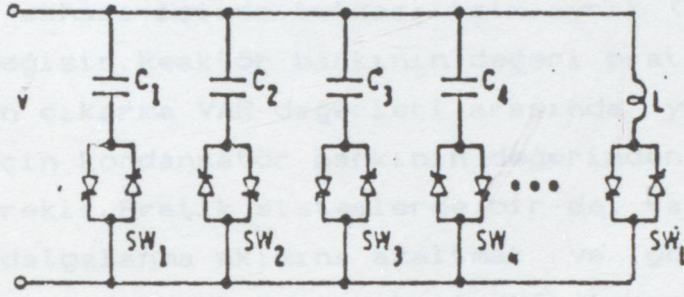
Triatör anahtarlamaalı kondansatör-tristör kontrollu reaktör tipi "hibrit" yapıya sahip kompanzatör, sabit kondansatör kullanan kompanzatörün iki büyük eksikliğinin (büyük bozukluklar altındaki davranışı ve kayıp karakteristiğinin) üstesinden gelme niyetiyle elektrik dağıtım idaresi uygulamaları için özel olarak geliştirildi.

TSC-TCR şeması, şekil 6.36'da gösterilmiştir. Genel olarak , herbiri katıhal anahtarı ile seri olarak bağlı (n) adet kondansatör bankı ve bir tristör kontrollu reaktör bankı (veya banklarından) oluşur. (n) bank sayısı, çalışma gerilim seviyesi, maksimum kompanzasyon ihtiyacı, katı-hal anahtarın akım değeri vs'yi içeren pratik düşünüşlerden yola çıkarak belirlenir. Reaktör bankıyla seri bağlı katı-hal anahtarı, ters paralel bağlı tristör çiftinden oluşur. Tabii ki pratik bir sistemde böyle birçok tristör çiftleri , yeterli gerilim değeri sağlamak için seri olarak bağlanır. Bunlar, sıfırdan maksimum nominal değere kadar reaktördeki akımı sürekli olarak kontrol etmeye yeterlidir. Bir kondansatör bankıyla seri bağlı herbir katı-hal anahtarı, ya ters paralel bağlı tristör çiftinden (reaktör bankında kullanılana benzer) yada bir diyotla ters paralel bağlı bir tristörden oluşur. Bu ikinci söylenen düzen, daha az karmaşık ve daha az pahalıdır. Bu yüzden bazı pratik uygulamalarda tercih edilebilir. Bununla beraber, ters paralel bağlı tristör çiftinden oluşmuş katı-hal anahtar daha büyük çalışma esnekliği sunar.

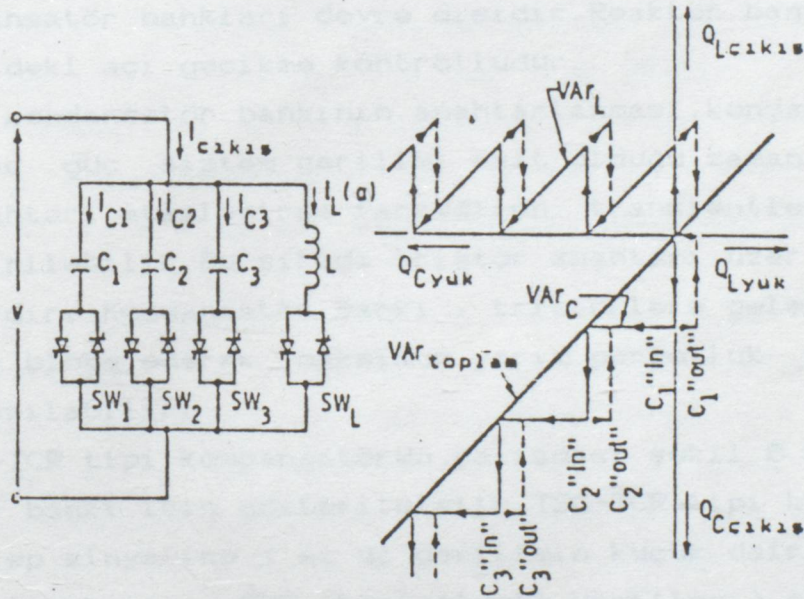
Şekil 6.36a'da gösterilen statik kompanzatörün çalışması şekil 6.36b yardımıyla aşağıdaki yöntemle açıklanabilir.

Toplam kapasitif çıkış bölgesi, (n) kullanılan kondansatör banklarının sayısı olmak üzere, n çalışma aralığına bölünür. Birinci çalışma aralığında, kompanzatörün çıkışı sıfır ila VAR_{max} / n sahasında kontrol edilebilir. VAR_{max} , bütün kondansatör bankları tarafından sağlanan toplam değerdir. Bu aralıkta bir kondansatör bankı anahtarlanır ve aynı zamanda tristör

kontrollü reaktör bankındaki akım, kondansatör bankının (pozitif) VAR çıkışı ile reaktör bankının (negatif) VAR çıkışı arasındaki toplam VAR kompanzasyon ihtiyacına eşit olacak şekilde ayarlanır.



Şekil 6.36a TSC-TCR Kompanzator



Şekil 6.36b TSC-TCR 'nin çalışma karakteristiği

Kompanzatör çıkışı, ikinci, üçüncü ..., ve n. çalışma aralıklarında VAR_{max}/n ila $2VAR_{max}/n$, $2VAR_{max}/n$ ila $3VAR_{max}/n$..., $(n-1) VAR_{max}/n$ ila VAR_{max} sahasında artık kapasitif VAR'ları absorbe etmek için tristör kontrollü reaktör bankı kullanarak ve sırasıyla ikinci, üçüncü, ..., ve n. kondansatör banklarını anahtarlayarak kontrol edilebilir.

Bu düzen, reaktör bankı nominal değerinin oldukça küçük tutulduğu alışılmış kontrollü reaktör gibi düşünüldü. Kondansatör bankının değeri, reaktör bankının çalışmasını onun normal kontrol sahası içinde tutması için ayrık (tek tek) adımlar halinde değişir. Reaktör bankının değeri pratikte, devreye alma ve devreden çıkarma VAR değerleri arasında yeterli bindirme sağlamak için kondansatör bankının değerinden biraz daha düşük olması gerekir. Pratik sistemlerde bir de, katı-hal anahtarındaki mümkün dalgalanma akımını azaltmak ve güç sistem empedanslı rezonansların büyük harmonik frekanslarında yer almaması sağlamak için her kondansatör bankıyla seri bağlı küçük bir reaktör bağlamak gerekli olabilir.

Dikkat edilmelidir ki, bu tip kompanzatör doğal olarak reaktör bankının nominal değeriyle belirlenen sıfırdan maksimum değere kadar endüktif VAR'ları sağlar. Bu durumda tabii ki, bütün kondansatör bankları devre dışıdır. Reaktör bankı, alışlagelen haldeki aç gecikme kontrollüdür.

Bir kondansatör bankının anahtarlanması, kondansatör gerilimi ve ac güç sistem gerilimi eşit olduğu zaman anlarında tristör anahtarı ateşlenirse farkedilen transiyentler olmadan gerçekleştirilebilir. Bu sırada tristör anahtarı üzerindeki gerilim sıfırdır. Kondansatör bankı, tristörlere gelen ateşleme darbelerini bloke ederek maksimum yarım periyotluk gecikmeyle devreden ayrılabilir.

TSC-TCR tipi kompanzatörün çalışması şekil 6.36'da dört kondansatör bankı için gösterilmiştir. TSC-TCR tipi kompanzatör, bir VAR talep sinyaline (ac uç gerilimin küçük dairesel modülasyonu azaltmak için SVC kontroluyla üretilen) cevaben pürüzsüz değişen reaktif çıkış akımı sağlamaya yeterliklidir. Lineer çalışma sahasında TSC-TCR tipi kompanzatörün karakteris-

tiği,sabit kondansatör tipi kompanzatörüyle aynıdır.

-Küçük bozukluklar altında çalışma karakteristiği

Güç sistemlerindeki küçük gerilim bozuklukları için TSC-TCR tipi kompanzatörün performansı ve cevap zamanı,sabit kondansatör kullanan eşdeğerine benzer.Kompanzatör yine gerilim regülatörü olarak işlev görür. VAR çıkışı,uç gerilim ile referans arasındaki hatayı azaltmak için kapalı çevrim kontrollüdür.Küçük uç gerilim değişimleri için TSC-TCR'nin cevap zamanı pratik olarak aynıdır.Nominal ac gerilim seviyesi, bozukluktan sonra bir periyot içinde tekrar kurulmalıdır.

-Büyük bozukluklar altında çalışma karakteristiği

TSC-TCR tip kompanzatörün önemli özelliği,hem kapasitif hem de endüktif VAR çıkışlarını hızlı ve bağımsız olarak kontrol etme kabiliyetidir. Bu kabiliyet , güç sistemlerinde büyük bozukluklar (arıza ve yük atımı) süresince optimum performans sağlama için kontrol stratejileri tasarlamada maksimum avantaj verir.Kondansatör bankı,güç sisteminde dikkate değer bozukluklara bakmaksızın hızlı bir şekilde devreye alınıp çıkarılabileceğinden salınım şarj/deşarj işlemi önlenabilir ve böylece kompanzatörün sebep olduğu transienler minimize edilebilir. Bu yolla çıkış,sistem stabilitesini iyileştirmek veya aşırı gerilim sınırlaması olarak gerilim desteği sağlamak için kullanılabilir.

Sabit kondansatör bankı,tristör kontrollü reaktörün işleyişine bakmaksızın salınımsal durumda kaçınılmaz olarak ac sistemle karşılıklı olarak etkileşir.Bu karşılıklı etki,iletim şebekesinde aşırı gerilim durumunu kötüleştiren transient uç gerilimleri sonucunda ortaya çıkar.Aşırı gerilim uygulaması altında FF-TCR tipi kompanzatör,geçici olarak iletim sistemi üzerindeki aşırı gerilim baskısını artırır (ac şebeke ile bu SVC'nin kondansatör bankı arasındaki salınımsal karşılıklı etkiden dolayıdır.)oysa TSC -TCR tipi kompanzatör azaltır (Çünkü

SVC,ac şebekeye tamamen saf endüktif bir yük sunmaya yeterliklidir.

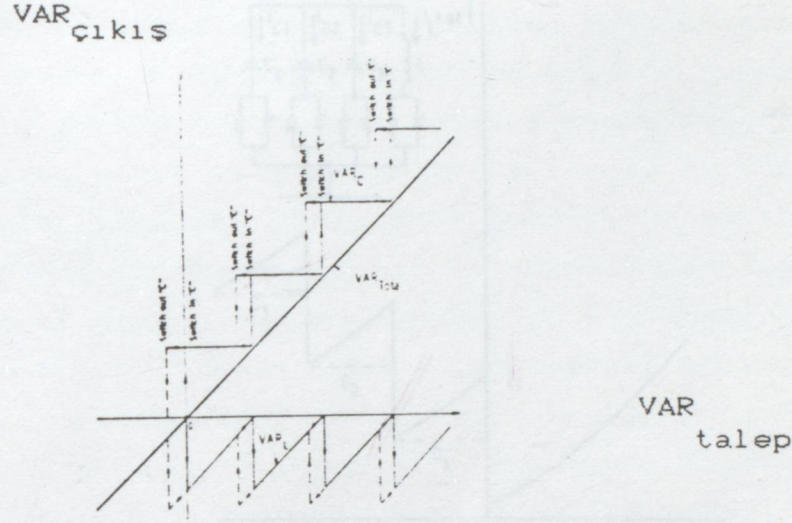
Harmonik üretimine gelince TSC-TCR tipi kompanzatör,gecikme açısı kontrollu reaktör banklarını kullandığından dolayı, harmonik üretimi ve zayıflatılması FF-TCR ' de anlatılanlarla aynıdır. Bununla beraber,reaktör değerlerinde önemli bir fark vardır.Bu kompanzatördeki reaktör değeri,aynı kapasitif ve endüktif çıkış değerleri için sabit kondansatör kullanan kompanzatörde ihtiyaç duyulanın tipik olarak yaklaşık dörtte biridir.

Örneğin , kompanzatörün maksimum çıkış değerleri 1 p.u. ve $1/3$ p.u. endüktif ise,anahtarlamalı kondansatör düzeni için kondansatör bankının değeri 1 p.u.,reaktör bankının değeri $1/3$ p.u.'dır oysa sabit kondansatör düzeni için kondansatör bankının değeri $1 \frac{1}{3}$ p.u. olur. Kompanzatörün kapasitif değeriyle kıyaslandığında tristör kontrollu reaktörün nispeten düşük değeri,dahili harmonik üretiminin düşük olmasını sağlar. Bu yüzden özel devre düzenlemesi veya filtrelemeye duyulan ihtiyacı azaltabilir.

Kayıp karakteristiği

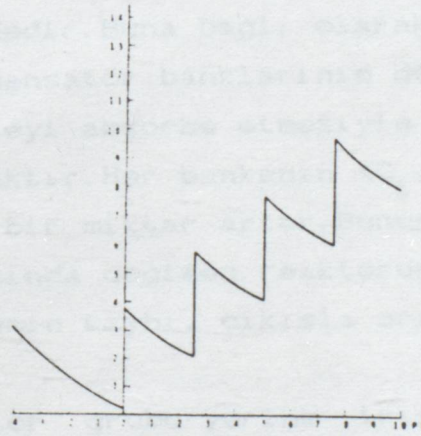
Önceden tartıştığımız gibi (n) anahtarlamalı kondansatör bankının olduğu TSC-TCR düzeninde tek bir kontrollu reaktör kullanılır. Reaktörün değeri kondansatör bankınıninki kadar düşük olabilir ve hatta kompanzatörün toplam kapasitif VAR sahasında sürekli olarak değişen çıkış sağlayabilir.Şekil 6.37 de şematik olarak gösterildiği gibi kapasitif var çıkışı (VAR_C) net kapasitif VAR kalanıyla beraber VAR talebine yaklaştırmak adım adım arttırılır. Ve sadece oldukça küçük endüktif VAR çıkışı (VAR_L),arta kalan kapasitif var'ları yok etmek için gereklidir. TSC-TCR tipi kompanzatörün VAR çıkış karakteristiğine karşı kayıp eğrisi,bu temel çalışma prensibinin sonucudur. Sıfır VAR çıkışındaki kayıplar düşüktür (ihmal edilebilir) ve şekil 6.38'de gösterildiği gibi genellikle VAR çıkışıyla orantılı olarak artar.Kayıp karakteristiğinin bu tipi, kompanzatörün dinamik kompanzatör olarak kullanıldığı elektrik dağıtım uygu-

lamalarında genellikle avantajdır ve normal olarak çalışan güç sistemleri için , yüksek ortalama VAR çıkışını korumak gerekli değildir.



Şekil 6.37 TSC-TCR kompanzatorün VAR talep karakteristiğine karşı VAR çıkışı

Normalizedilmiş
kayıplar

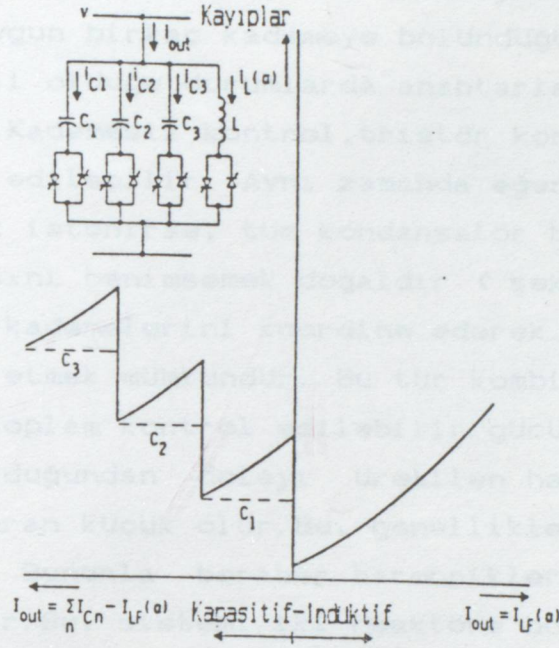


Endüktif VAR çıkışı

Kapasitif VAR çıkışı

Şekil 6.38 TSC-TCR Tipi kompanzator için per-unit VAR çıkış ve normalize edilmiş kayıplar arasındaki ilişkiler (dört kondansatör bankı için)

Şekil 6.39'de sistemin çıkış karakteristiği ve kayıpları birarada gösterilmiştir.



Şekil 6.39 TSC-TCR'nin çıkış ve kayıp karakteristiği

Sıfır veya sıfıra çok yakın çıkış durumunda , tüm kondansatör bankları devre dışıdır ve reaktörün akımı sıfır yada ihmal edilebilir değerdedir. Buna bağlı olarak kayıplar sıfıra çok yakındır. Kondansatör banklarının devreye alınması ve reaktörün artık kapasiteyi absorbe etmesiyle beraber, sistemin kapasitif çıkışı artacaktır. Her bankanın ($C_1, C_2, \dots$) devreye girilmesiyle kayıplar sabit bir miktar artar. Bunun yanı sıra bir de sıfır ile maksimum arasında değişen reaktörün kayıplar vardır. Böylelikle bütün sistemin kaybı, çıkışla orantılı bir değişim gösterir.

Sabit kondansatör grubu yerine tristör anahtarlamalı kondansatörlerin kullanılması ile sağlanabilecek faydalar şu şekilde özetlenebilir:

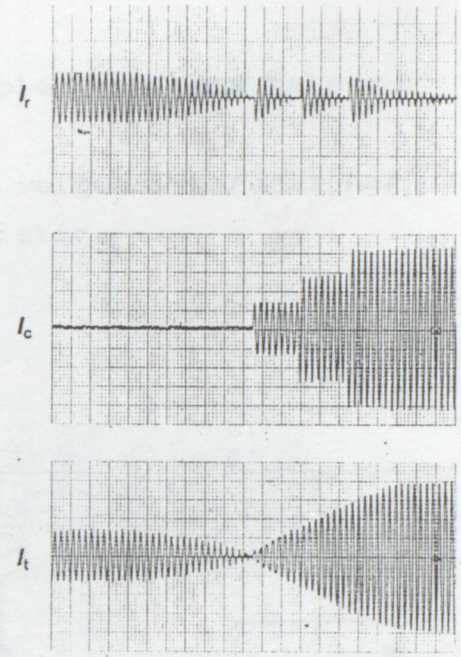
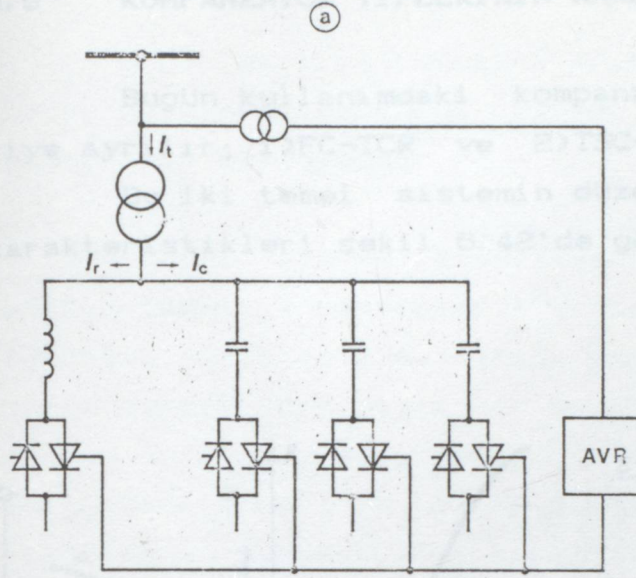
- Endüktif bölgede denetim aralığı genişleyecektir.
- Kayıplar azalacaktır.

Bu faydalarına karşın, böyle bir sistemin daha yüksek bir yatırım bedeli isteyeceği açıktır.

Bir çok durumda optimum çözüm, tristörlerle devreye sokulup çıkarılan kondansatörlerle (tristör anahtarlamaalı kondansatörler) tristör kontrollu reaktörlerin kombinasyonudur.

Reaktif gücün uygun birkaç kademeye bölündüğü ve bu nedenle değişimin kademeli olduğu durumlarda anahtarlamaalı kondansatörler kullanılır. Kademesiz kontrol, tristör kontrollu reaktör bileşimiyle elde edilebilir. Aynı zamanda eğer biraz reaktif güç absorbe etmek istenirse, tüm kondansatör banklarının tristörle anahtarlamaasını benimsemek doğaldır (şekil 6.40). Reaktör ve kondansatör kademelerini koordine ederek tam olarak kademesiz kontrol elde etmek mümkündür. Bu tür kombine sistemdeki reaktörün boyutu, toplam kontrol edilebilir gücün daha küçük bir kısmını oluşturduğundan dolayı üretilen harmonikler, toplam temel akıma nazaran küçük olur. Bu, genellikle göz önüne alınmayabilir demektir. Bununla beraber harmonikleri azaltmak yine de gerekli olabilir. Bu, sistemi iki reaktöre bölmek suretiyle veya 12-darbeleri bağlantı kullanarak yapılabilir. Kombine sistemde, kontrollu olarak hem reaktif hem de kapasitif kısmın hızlı bir şekilde devreye alınması ve devreden çıkarılması- nı gerçekleştirmek mümkündür.

Aynı sonuç, sabit kondansatörle paralel bağlı tristör kontrollu reaktörle de elde edilebilir (şekil 6.41). Bu düzenin dezavantajları düşük reaktif güçte yüksek kayıplar ve reaktör tüm dinamik sahayı oluşturduğundan dolayı yüksek harmoniklerin üretimi ve de kondansatör bankı üzerinde mümkün olabilen kontrolün hızlı olmamasıdır. Tristör kontrollu reaktörün sistemde kullanılması durumunda elde edilecek reaktif güç sürekli değil de kademeler halinde değiştirileceğinden üretilen ve harcanan reaktif güç arasındaki fark besleme şebekesini yükleyecektir.



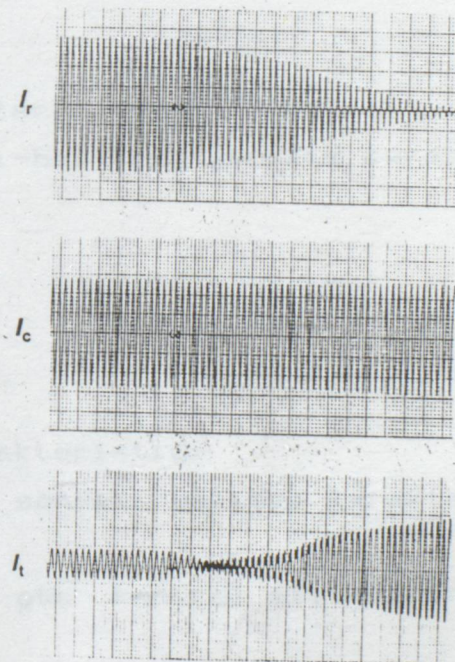
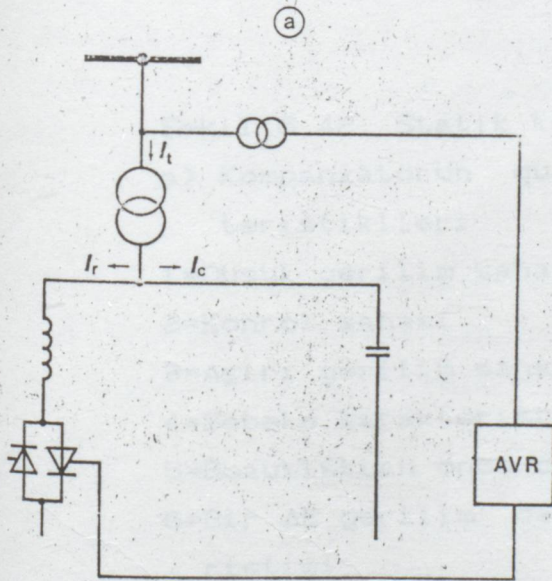
(a)

(b)

a)şematik diyagram , I_r =reaktör akımı , I_t =kompanzasyon akımı

b)çalışma modu , I_c =kondansatör akımı,AVR=otomatik gerilim reg.

Şekil 6.40 Tristör kontrollü reaktörle kombine edilmiş
TSC tipi bir statik kompanzator şeması



a)şematik diyagram

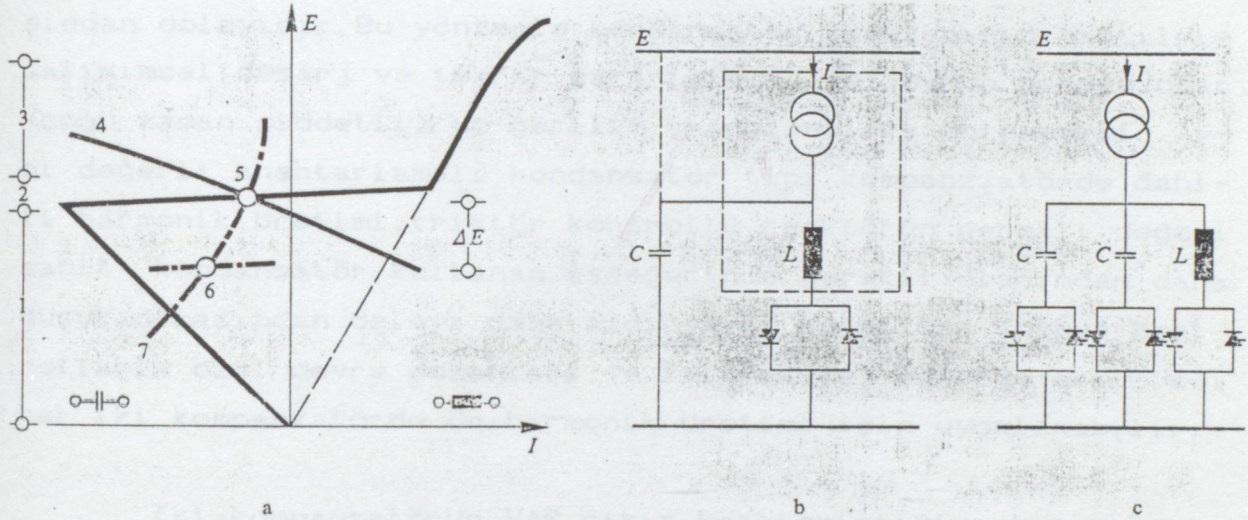
b)çalışma modu

Şekil 6.41 Sabit kondansatör bankıyla paralel bağlı
TCR tipi statik kompanzator şeması

6.5 KOMPANZATÖR TİPLERİNİN KARŞILAŞTIRILMASI

Bugün kullanımdaki kompanzatör tipleri iki ana kategoriye ayrılır; 1)FC-TCR ve 2)TSC-TCR

Bu iki temel sistemin düzenekleri ve quasi-kararlı hal karakteristikleri şekil 6.42'de gösterilmiştir.



Şekil 6.42 Statik kompanzatörlerin temel düzeni

a) Kompanzatörün quasi-kararlı-hal akım/gerilim karakteristikleri

1=Düşük gerilim sahası

2=Konrol sahası

3=Aşırı gerilim sahası

4=Şebeke karakteristiği

5=Bozukluktan önce çalışma karakteristiği

6=Bir ΔE gerilim değişiminden sonraki çalışma karakteristiği

7=Üstüste bindirilmiş reaktif güç kontrol sisteminin karakteristiği

b) FC+TCR

c) TSC+TCR

Küçük gerilim bozukluklarına kompanzatörün cevabı ve kararlı-hal karakteristiği lineer sahada çalışmaları durumunda pratikteki ile aynıdır.

Büyük sistem bozuklukları altında (arıza , yük atımı) anahtarlama kondansatör tipi kompanzatörün ulaşılabilir performansı ve çalışma davranışı daha yüksektir. Bu durum,kondansatör banklarının hızlı bir şekilde devreye alınıp çıkarılmasından dolayıdır.Bu yöntemle kondansatör banklarının uzatılmış salınımsal deşarj ve tekrar şarj işlemi ve bunun sonucu olan (çoğu zaman şiddetli) uç gerilim transientleri önlenabilir. Aynı değerli anahtarlama kondansatör tipi kompanzzatörde dahili harmonik üretimi,ristör kontrollü reaktörün gerekli değeri sabit kondansatör kullanan eşdeğerinde gerekli olanından daha düşük olmasından dolayı daha azdır.Aynı teknikler (uygun kontrollerle özel devre düzenleri ve filtreleme) eğer gerekli ise, her iki kompanzatörde de harmonik üretimi için uygulanabilir.

İki kompanzatörün VAR çıkış karakteristiğine karşı kaybı bütünleyicidir. Sabit kondansatörlü tip , VAR çıkışı artarken azalan VAR çıkışı sıfırda yüksek kayıplara sahiptir.Anahtarlama kondansatör tipinde VAR çıkışı sıfırda düşük kayba sahiptir (pratik olarak sıfırdır).

Kayıplar ortalama olarak VAR çıkışıyla orantılı bir şekilde artar. Kompanzatörün dinamik performansı birincil olarak, geçici stabiliteyi düzeltmek , gerilimi desteklemek ve aşırı gerilimi sınırlamak için dağıtım uygulamalarında kullanıldığından dolayı ortalama VAR çıkışı normal olarak düşük olabilir. Bu yüzden anahtarlama kondansatör tipi kompanzatör, sabit kondansatör tipli eşdeğeri üzerinde önemli bir avantaja sahiptir.

Aşağıdaki tabloda iki temel sistemin niteliksel karşılaştırması yapılmıştır:

Kompanzatör Tipi	
FC-TCR Tipi	TSC-TCR Tipi
Harmonikler	
Yüksek harmonik akımları	Düşük harmonik akımları
Filtreler çoğu kez gerekli	Filtreler daha az gerekli
Filtreler	
Mevcut kondansatör bankı	Filtre zorunlu olduğunda
fitre olarak tasarlanabilir	ek filtre kondansatörünü gereklidir.
Kayıplar	
Kapasitif sahada düşük kayıp	Kapasitif sahada yüksek kayıp
Endüktif sahada yüksek kayıp	Endüktif sahada düşük kayıp
12-Darbeli devreler	
Sadece ufak extra maliyetle mümkün	Mümkün ama daha yüksek fiatla
Tertibi	
Reaktör transformatorü	Çok kompleks 12-darbeli
kullanıldığında basit	devreler için özel dizayn
Kondansatör anahtarlama	
Anahtar bulunduğu sadece	Hızlı anahtarlama
yavaş anahtarlama mümkün	
Kontrol	
Yüksek hız (max 1-5 peryot)	Yüksek hız (max 1-5 peryot)

Tablo 1: Statik reaktif güç kompanzatörlerinin iki temel tipinin karşılaştırılması

Aşağıdaki diğer tabloda ise çeşitli kompanzatör tiplerinin özellikleri karşılaştırmalı olarak verilmiştir. Ancak her bir kompanzatör çeşitli özellikte tasarlanabildiğinden birinin

diğerine göre daha üstün olduğuna dair genel bir karar verilemez. Örneğin reaktif güç tesbit edilmeden tristör anahtarlama kondansatör kayıplarının tristör kontrollü reaktörden daha az olduğu söylemek anlamsızdır. Benzer şekilde , senkron kompanzatrün düşük cevap hızına sahip olduğu bilinir. Oysa bu hız, uyarma geriliminin üst sınırının arttırılması ile yükseltilebilir. Minumum bakım bakımdan doymuş reaktörlü kompanzatör bir üstünlüğe sahiptir ama kontrol esnekliği yoktur.

Tablo 2: Çeşitli Kompanzatörlerin Özellikleri

Nitelik	Senkron Komp.	TCR	TSC	Doymuş Reaktör
Yapı	Dönen makina	Tristörlü statik reaktör	Tristörlü statik kondansatör	Şönt kondansatörlü transformatorlu
Reaktif Güç Kapasitesi	İleri/geri	İleri/geri	İleri/geri	İleri/geri
Kontrol	Sürekli	Sürekli	Süreksiz	Sürekli
Cevap Hızı	yavaş	Hızlı ancak sistem bağımlı	Hızlı ancak sistem bağımlı	Hızlı
Harmonik	Çok iyi	Filtre gerekli	İyi	İyi
Kayıplar	Orta	İyi ancak geri akımla artar	İyi ancak ileri akımla artar	İyi ancak geri akımla artar

Nitelik	Senkron Komp.	TCR	TSC	Doymuş Reaktör
Faz Dengeleme	Sınırlı	İyi	Sınırlı	Sınırlı
Aşırı Gerilim	İyi	Orta	Yok	İyi
Sınırla- ması				
İşletme- ye alma	Yavaş	Hızlı	Hızlı	Hızlı
Kompan- zasyon				
Yakla- sıklığı	İyi	Çok iyi	İyi	İyi

Daha spesifik bir inceleme için statik kompanzatörle-
rin senkron kapasitöre olan üstünlükleri şöyle sıralanabilir.

- Genellikle daha düşük yatırım maliyeti
- Genellikle daha az kayıp
- Daha düşük bakım ve onarım giderleri
- Eşit yada daha yüksek güvenilirlik
- Daha kısa zamanda tepki gösterme yeteneği
- Her faz ayrı ayrı denetlenebilir
- Eylemsizlik momenti yoktur kendinden uyarım olmaz

Senkron kapasitörlerin ise şu üstünlükleri vardır;

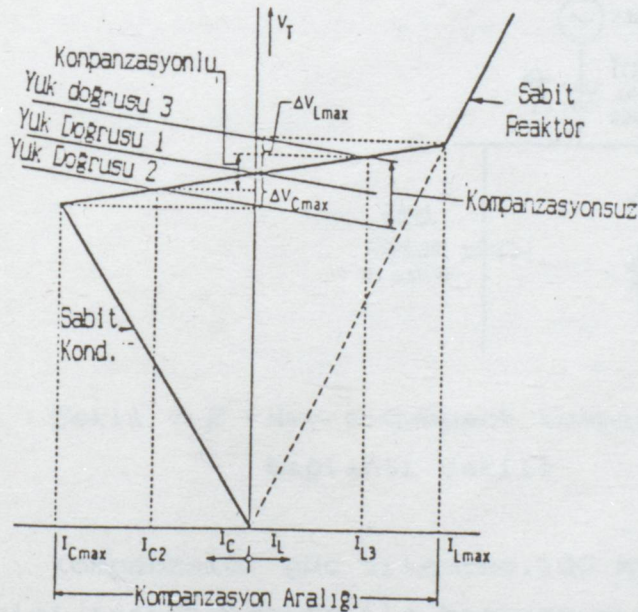
- Bağlandığı noktadaki kısa devre kapasitesini arttırır
- Kısa süreler için nominal gücünün üzerinde reaktif güç üretebilir.

STATİK VAR SİSTEMLERİNİN KONTROLU VE MODELLEMESİ

7.1 KOMPANZATÖRÜN GERİLİM-AKIM KARAKTERİSTİĞİ

Bir güç sisteminin kompanzasyonunda , verimli bir sonuç almak için statik var generatörün çıkışı kontrol edilir. Kontrol devresi kompanzasyonu sağlamak için , tristörlerin ateşleme anlarını çeşitli parametreleri değerlendirerek belirler. Bu parametreler, gerilim ve güç faktörü gibi büyüklüklerdir.

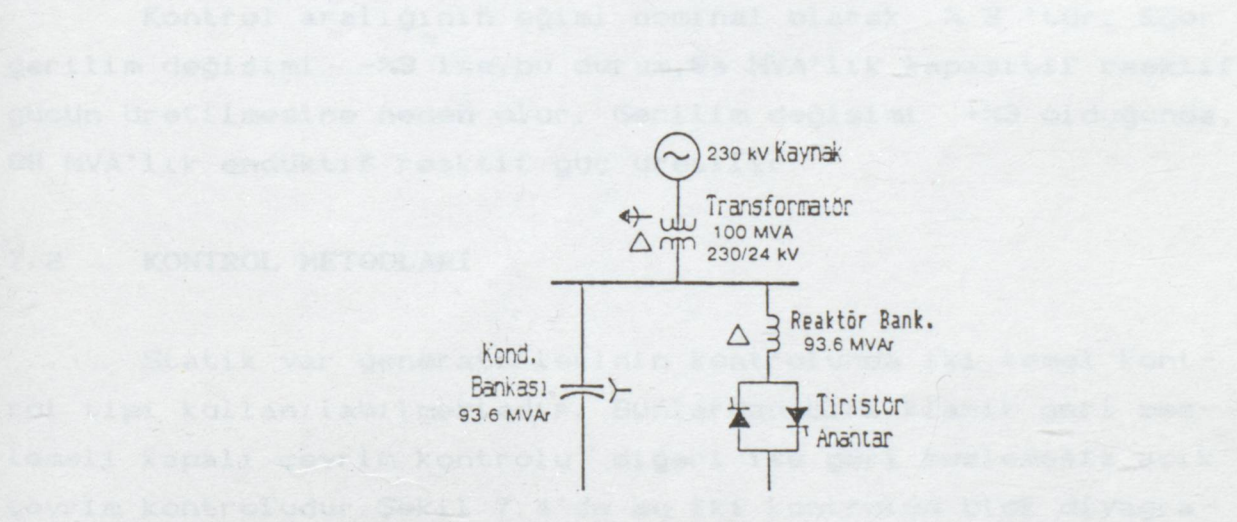
Statik var generatörün gerilim-akım karakteristiği ($v-i$) ile yük doğrusu kompanzasyonun kontrol aralığını belirler. Şekil 7.1 'de bir statik var generatörünün $v-i$ karakteristiği ve çeşitli yük doğruları verilmiştir.



Şekil 7.1 Statik var kompanzatorün $v-i$ karakteristiği

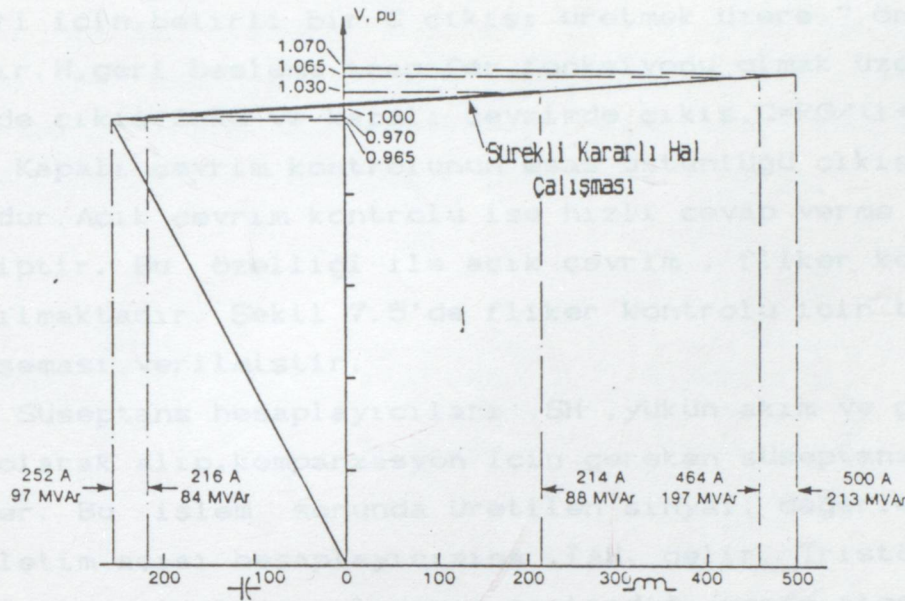
Bir nolu yük doğrusu, $v-i$ karakteristiğini nominal gerilim noktasında keser. Bu durumda kompanzatörün çıkış akımı sıfırdır. İki nolu yük doğrusu ise, güç sistemi geriliminin azalması dolayısıyla bir nolu yük doğrusunun altındadır. Bu eğri, $v-i$ karakteristiği ile kapasitif kompanzasyon akımının I_{c2} olduğu noktada kesişmektedir. Güç sistemi geriliminin artması dolayısıyla üç nolu yük doğrusu bir nolu yük doğrusunun üzerindedir. Bu doğru ise, endüktif kompanzasyon akımı I_{l3} noktasında var generatörün $v-i$ karakteristiği ile kesişir. İki ve üç nolu yük doğrularının dikey eksenle (gerilim eksen) kesişim noktaları , kompanzasyonsuz durumdaki uç gerilim değişmelerini gösterir. Kompanzasyonlu durumda ise, uç gerilim değişimi regülasyon eğimi ile belirlenir.

Şekil 7.2 'de 230 kV'ta kurulmuş Hydro-Quebeck kompanzatörünün (sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör) bağlantı şekli verilmiştir.



Şekil 7.2 Hydro-Quebeck kompanzatörünün temel bağlantı şekli

Kompanzatör güç sistemine, 100 MVA gücünde 230/24 kV 'luk indirici transformatör ile bağlanmıştır. Kompanzatör, üç fazlı yıldız bağlı 93.6 MVA'lık kondansatör bankı ile yine 93.6 MVA'lık üçgen bağlı TCR'den oluşmuştur. Bu kompanzatörün $v-i$ karakteristiği şekil 7.3'de gösterilmiştir.

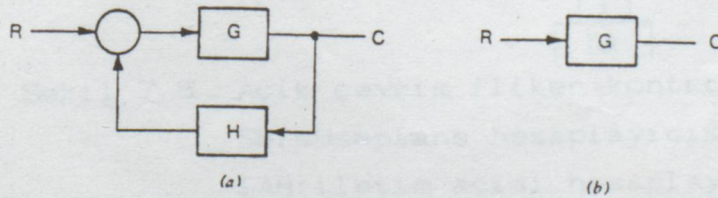


Şekil 7.3 Hydro Quebec kompanzatörünün v-i karakteristiği

Kontrol aralığının eğimi nominal olarak $\%3$ 'tür. Eğer gerilim değişimi $-\%3$ ise, bu durum, 84 MVA'lık kapasitif reaktif gücün üretilmesine neden olur. Gerilim değişimi $+\%3$ olduğunda, 88 MVA'lık endüktif reaktif güç üretilir.

7.2 KONTROL METODLARI

Statik var generatörlerinin kontrolunda iki temel kontrol tipi kullanılabilir. Bunlardan biri klasik geri beslemeli kapalı çevrim kontrolü diğeri ise geri beslemesiz açık çevrim kontrolüdür. Şekil 7.4'de bu iki kontrolün blok diyagramı verilmiştir.

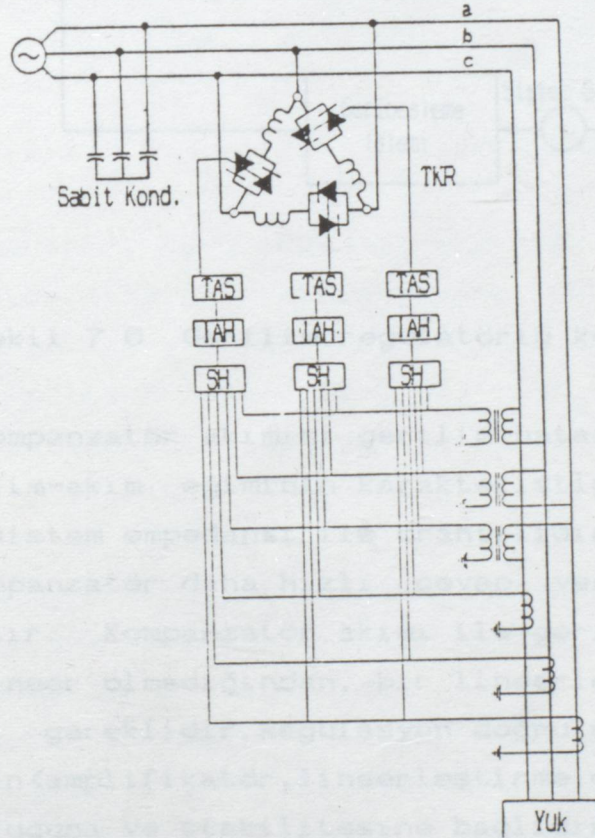


Şekil 7.4 Kontrol yöntemleri a)kapalı çevrim b)açık çevrim

İleri yön transfer fonksiyonu ,G , verilen bir referans R, değeri için, belirli bir C çıkışı üretmek üzere " önceden hesaplanır. H, geri besleme transfer fonksiyonu olmak üzere , açık çevrimde çıkış, $C=RG$ ve kapalı çevrimde çıkış, $C=RG/(1+HG)$ 'dir.

Kapalı çevrim kontrolünün esas üstünlüğü çıkışının doğruluğudur. Açık çevrim kontrolü ise hızlı cevap verme özelliğine sahiptir. Bu özelliği ile açık çevrim , fliker kontrolunda kullanılmaktadır. Şekil 7.5'de fliker kontrolu için temel bağlantı şeması verilmiştir.

Süseptans hesaplayıcıları ,SH ,yükün akım ve gerilimini giriş olarak alıp, kompanzasyon için gereken süseptansları tesbit eder. Bu işlem sonunda üretilen sinyal, değerlendirilmek için iletim açısı hesaplayıcısına ,İAH, gelir. Tristörler için gerekli olan ateşleme anlarının saptandığı yerde ateşleme sistemi için, TAS, sinyal üretir.



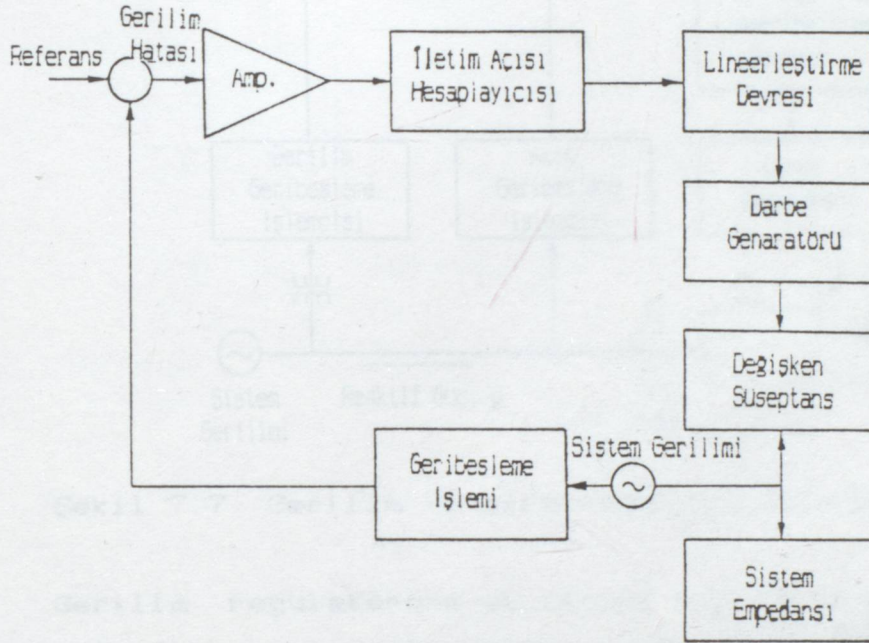
Şekil 7.5 Açık çevrim fliker kontrolu

SH: süseptans hesaplayıcısı

İAH: iletim açısı hesaplayıcısı

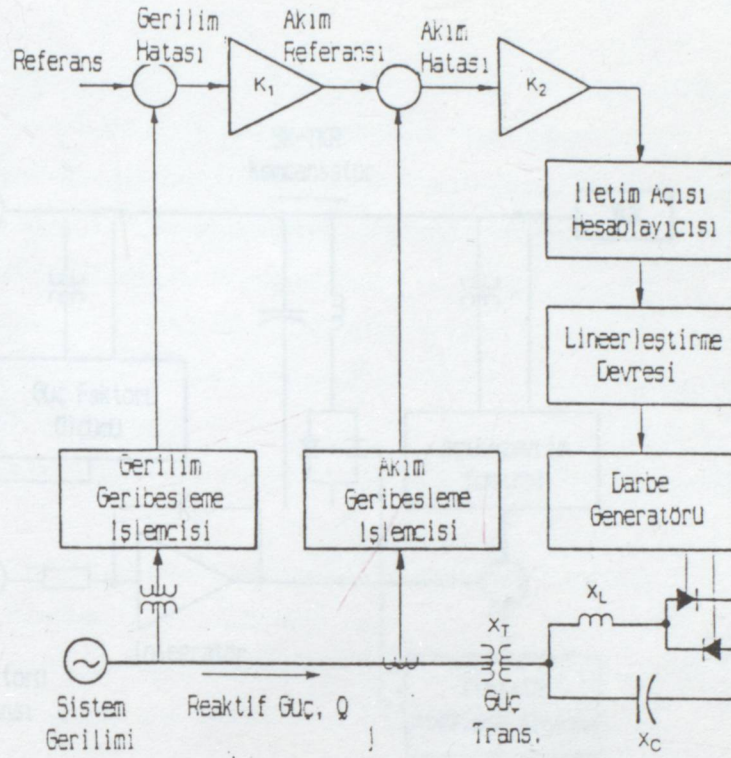
TAS: tristör ateşleme sistemi

Kapalı çevrim kontrolü, gerilim regülasyonunun esas alındığı durumlarda kullanılır. Gerilim hata sinyali (gerçek sistem gerilimi ile kompanzatöre uygulanan referans arasındaki fark), kompanzatörün üreteceği süseptansın hesaplanmasında kullanılır. Şekil 7.6'da bu kontrolün blok şeması verilmiştir.



Şekil 7.6 Gerilim regülatörlü kompanzatör

Kompanzatör akımını gerilim hatasına oranı, kompanzatörün gerilim-akım eğiminin karakteristiğini belirler. Çevrimin kazancı sistem empedansı ile orantılıdır. Sistem empedansı arttıkça kompanzatör daha hızlı cevap verecek ancak kararlılığı azalacaktır. Kompanzatör akımı ile gerilim hatası arasındaki ilişki lineer olmadığından, bir lineerleştirme devresinin kullanılması gereklidir. Regülasyon doğruluğu, şekil 7.6'daki bileşenlerin (amplifikatör, lineerleştirme devresi, ...) lineerliğine, doğruluğuna ve stabilitesine bağlıdır. Kondansatör, reaktör transformatörlerin empedansları bilinmeli ve özellikle sabit olmalıdır. Bir çok kontrollü uygulamalarda doğruluğu arttırmak için iki kontrol çevrimi birlikte kullanılmaktadır. Bu durum şekil 7.7'de gösterilmiştir.



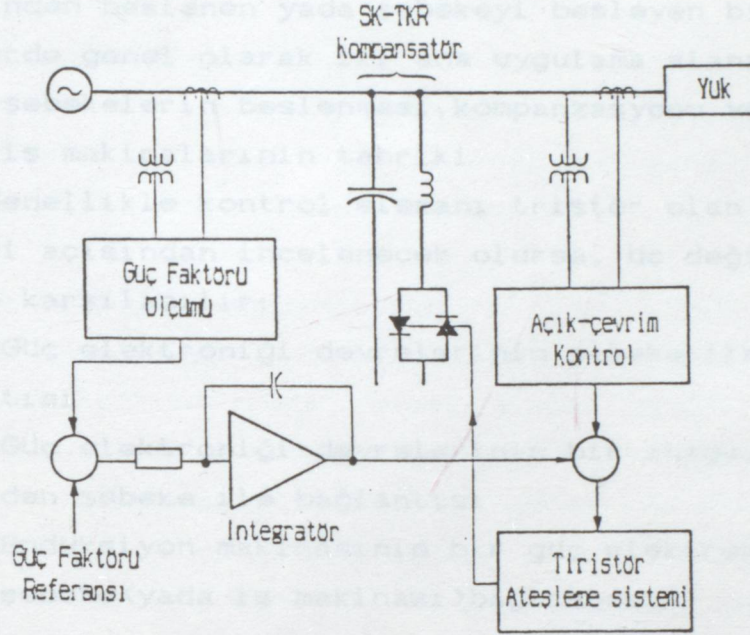
Şekil 7.7 Gerilim ve akım regülatörlü kompanzator

Gerilim regülatörüne ek olarak bir de akım regülatörü eklenmiştir. Akım çevriminin kazancı çok yüksek ise, akım hatası ihmal edilebilir. Bu durumda kontrol edilen reaktif akım, gerilim hatası ile orantılı ve X_L , X_C ve X_T 'den bağımsız olacaktır. Kontrol karakteristiğinin eğimi, K_1 kazancı ile belirlenir. Akım hatası amplifikatörü (K_2), akım hatasını sıfır yapmak üzere bir integratör olarak seçilir. Açık çevrim ve kapalı çevrim kontrolü çoğu kez birlikte kullanılır. Örneğin, açık çevrim kontrolüne sahip bir yük kompanzatorüne, bazı büyüklükleri belirlenmiş ortalama değerlerde tutmak için kapalı çevrim kontrolü eklenir. Bir diğer imkan da, tüm güç faktörünü (ortalama olarak) regüle etmektir. Şekil 7.8'de açık ve kapalı çevrimin kombinasyonu verilmiştir.

Yük değişimlerinde açık çevrim kontrolü hızlı bir kompanzasyon yapabilir. Tipik olarak, açık çevrim kontrolü bir periyotluk zaman içerisinde cevap verebilir. Oysa kapalı çevrim kontrolü bir saniyede cevap verebilir.

7.3 GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE OTOMATİK KONTROL

Güç elektroniğinde otomatik kontrol uygulanan ya da elektrik şebekesinden beslenen ya da besleyen bir ve bir fazlı sistemlerde, otomatik kontrol devreleri kullanılarak, güç elektroniği devreleri, belirli bir çalışma noktasında, belirli bir yükte, belirli bir gerilimde çalıştırılabilir.



Şekil 7.8 Açık ve kapalı çevrimin birlikte kullanımı

Çoğu uygulamalarda uç gerilimin, kompanzasyon akımı ile değişmesine izin verilir. Bu durumun birkaç sebebi vardır. Birincisi regülasyon azalmasına izin verildiğinde kompanzatörün lineer çalışma aralığı (maksimum kapasitif ve endüktif aralık) uzatılabilir. Buradaki regülasyon azalmasının anlamı, tam kapasitif kompanzasyon durumunda nominal değerinden daha az olmasına izin verilmesidir. Bunun tersi olarak, kompanzasyonun tam endüktif olduğu durumda, geriliminin nominal değerinden daha yüksek olmasına izin verilir. İkincisi, regülasyon eğimi diğer gerilim regülatörlerinde olduğu gibi statik var kompanzatörleri arasında otomatik yük paylaşımını zorlamaya yönelir.

Sonuç olarak kompanzasyon sistemlerinin temel düzenlemeleri benzer olmasına rağmen kontrol devresi durumdan duruma değişir.

7.3 GÜÇ ELEKTRONİĞİNDE OTOMATİK KONTROL

Güç elektroniğinde otomatik kontrol uygulanan ve elektrik şebekesinden beslenen yada şebekeyi besleyen bir ve üç fazlı sistemlerde genel olarak iki ana uygulama alanı vardır:

- şebekelerin beslenmesi, kompanzasyonu ve simetrlenmesi
- iş makinalarının tahriki

Genellikle kontrol elemanı tristör olan güç elektroniği devreleri açısından incelenecek olursa, üç değişik bağlama düzeni ile karşılaşılır:

- Güç elektroniği devrelerinin şebeke ile direkt bağlantısı
- Güç elektroniği devrelerinin bir süzgeç devre üzerinden şebeke ile bağlantısı
- Endüksiyon makinasının bir güç elektroniği devresi ile şebeke(yada iş makinası)bağlantısı

Çıkışında herhangi bir şekilde müde edilmiş doğru gerilimden alternatif gerilim oluşturan eviriciler birinci gruba girerler. Ayrıca bu grupta, bu çalışmada sözü edilen, tek ve üç fazlı şebekede kompanzasyon ve de simetruleme işlemini gerçekleştiren alternatif akım kıyıcıları da vardır.

İkinci grupta ise, güç elektroniği devresi ile şebeke arasında bir filtre vardır. Böyle bir düzen, eviricilerde uygulama alanı bulur. Filtre devresi evirici çıkışında oluşan harmonikleri süzer. Böylece çıkış gerilimi sinüsoidal bir şekil alır. Burada filtre devresi, kontrol devrelerinin dinamiğine büyük ölçüde etki ettiğinden tüm kontrol devresinin bu filtre devresinin özelliğine göre ayarlanması gerekir.

Üçüncü devre tipi ise , bir güç elektroniği devresi ile şebeke yada iş makinası arasında kullanılan endüksiyon makinası ile belirlenir. Bu gruba giren önemli bir uygulama alanı ise elektrik santrallerinde kullanılan generatörlerdir. Belli kontrol düzenleri ile endüksiyon makinaları da önem kazanmaktadır.

Güç elektroniği devreleriyle ilgili olan otomatik kontrol problemlerinde, belli bir çalışma noktası ,birçok uygulama-

larda, aynı anda birden fazla kontrol büyüklüğü ile belirlenebilir. Örneğin asenkron makinalarında aktif ve reaktif akım ya da mıknatıslama ve rotor akımı akımı gibi.

Bir kontrolda kullanılan kontrolör sayısı;

-Kontrolü yapılacak vektörel büyüklüklerin sayısına

-Konrol edilecek bileşenlerin sayısına

-Kontrol devrelerinin sayısına

bağlıdır.

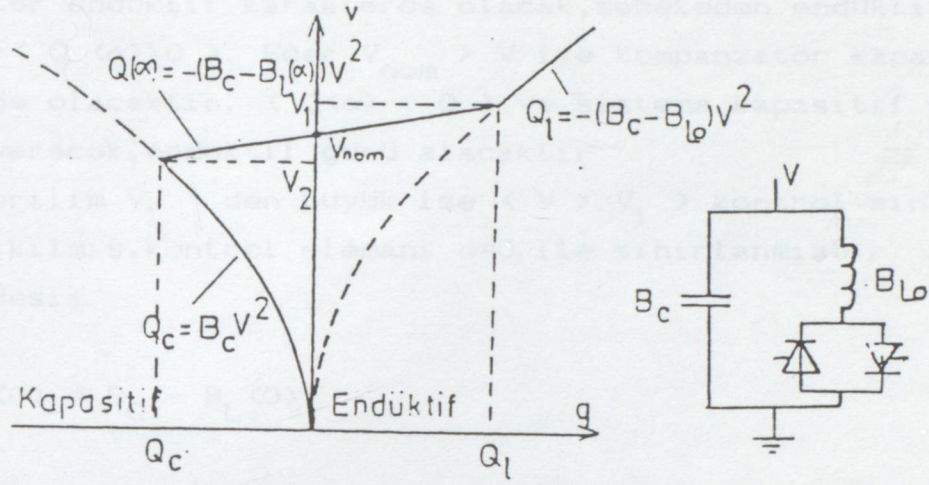
Reaktif güç kompanzasyonu işlemi, alternatif akım kıyıcılarının kontrol gerilimi ile yapıldığından kontrol devresine düşen görev, kontrol büyüklükleri olarak üç fazlı sistemden aldığı akım ve gerilim değerlerini uygun şekilde işlemektir. Kıyıcının simetrik çalışma ilkesine göre, kontrol devresinin her kıyıcı için bir tane tetikleme işareti üretmesi gerekir. Örneğin kontrol büyüklükleri olarak fazlar arası akımlardan hareket edilebilir. Kontrolü faz akımları üzerinden yapmak bir diğer yöntemdir.

Kontrol büyüklüğü olarak fazlar arası akımların seçilmesi durumunda; kuvvetli akım devresindeki bu akımların elektronik olarak işlenebilmesi için bir yöntem, akımların optokopler yardımıyla yalıtılmış şekilde alıp normlaştırılmasıdır.

7.4 KONTROL ARALIĞININ BELİRLENMESİ

Statik VAR kompanzatörler genelde iki amaç için kullanılır; yük kompanzasyonu ve enerji iletim sisteminde gerilim desteklenmesi. Kompanzatör bir noktada enerji iletim sistemine bağlanacaktır. Yük sebebiyle sistemde gerilim değişmesi meydana gelecektir. Bu nedenle kompanzatörün reaktif gücü ile terminal gerilim arasındaki ilişki bilinmelidir (Şekil 7.9)

Bu bölümde genel olarak bir terminale bağlı ve zaman içinde değişen bir yükün kompanzasyonu ele alınacak ve çıkarılan kontrol şemasında genelde enerji iletim sisteminde gerilim kontrolü için kullanılabileceği anlatılacaktır.



Şekil 7.9 Sürekli halde kompanzatorün gerilim-reaktif güç bağıntısı

Kompanzatorün kontrolünde üç bölge vardır. Birinci bölge gerilimin V_1 ve V_2 gerilimleri arasında kontrol edildiği alandır. Gerilim ve reaktif güç arasında lineer değişim vardır. Tri-störlerin ateşleme açısı α 'ya göre $\alpha=0$ iken (Q_L, V_1) noktasından $\alpha = \pi/2$ olduğunda (Q_C, V_2) noktasına kadar lineer olarak değişim gerçekleştirilebilir. Bu bölgede kompanzator kapasitif veya endüktif karakterde olabilir. α 'ya bağlı süseptans bağıntısı;

$$B(\alpha) = B_C - B_L(\alpha) \quad (7.1)$$

şeklindedir. (7.1) bağıntısı, süseptansın α ile değişimini verir. Reaktif gücün α ile değişimi;

$$Q(\alpha) = -(B_C - B_L(\alpha)) \cdot V^2 \quad (7.2)$$

dir. Burada B_C , sabit kondansatör süseptans değeri $B_L(\alpha)$ yalnızca tri-tör kontrollü reaktörün α ile değişen süseptansı, V ise terminal gerilimidir. Birinci bölgedeki lineer değişimin bir eğimi vardır. Bu eğim α tetikleme açısının uygun şekilde kontrolü ile sağlanır. Aynı zamanda bu eğim gerilimdeki değişmeye göre kompanzatorün ne kadar reaktif gücü devreye sokaca-

nı gösterir. Eğer gerilim nominal gerilim üzerinde ise ($V > V_{nom}$) kompanzatör endüktif karakterde olacak, şebekeden endüktif güç alacaktır ($Q(\alpha) > 0$). Eğer $V_{nom} > V$ ise kompanzatör kapasitif karakterde olacaktır. ($Q(\alpha) < 0$) ve sisteme kapasitif reaktör güç verecek, endüktif gücü alacaktır.

Gerilim V_1 'den büyük ise ($V > V_1$) kontrol sınırları dışına çıkmış, kontrol elemanı $\alpha=0$ ile sınırlanmıştır. Süseptans ifadesi;

$$B(\alpha) = B_C - B_L(\alpha)$$

$$B_L = B_C - B_{L0} \quad (7.3)$$

dır. Süseptans endüktif karakterlidir. Reaktif güç ise;

$$Q_L = -(B_C - B_{L0}) \cdot V^2 \quad (7.4)$$

şeklinde değişir. Görüleceği gibi kompanzatör artık V gerilim değişmelerini kontrol edememektedir.

Gerilim V_2 'den küçük ise ($V < V_2$), $\alpha=\pi/2$ 'dir ve kompanzatör yine kontrol sınırları dışındadır. Süseptans ve reaktif güç ise;

$$B(\pi/2) = B_C \quad (7.5)$$

$$Q_C = -B_C V^2$$

şeklinde verilebilir.

7.5 STATİK VAR KOMPANZATÖRLERİNİN MODELLEMESİ

7.5.1 STATİK VE QUASI-STASYONER ÇALIŞMA SİMULASYONU

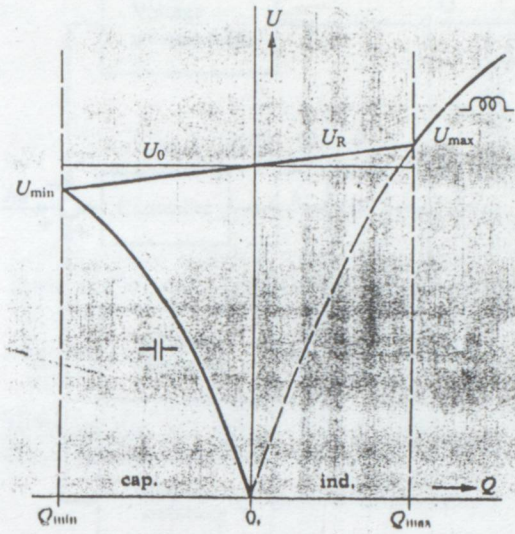
SVC 'nin klasik genel kararlı-hal karakteristikleri şekil 7.10'da gösterilmiştir. Statik ve quasi-stasyonier simulas-yon için kullanılan SVC,kotrollu gerilim (U_R) ve VAR limitleri $Q_{Limitleri} (= Q_{max} \text{ ve } Q_{min})$ ile bir PU barası olarak yük akışı içinde gösterilir. V_R -Q eğimi (SVC kontroluna bağıli olarak), $Q_{sınırlar}$ ' ı arasında lineerdir ve sifıra ayarlanabilir. $Q_{sınırlar}$ ' ı ötesinde SVC, şönt reaktör (Q_{max} için) veya şönt kondansatör (Q_{min} için) olarak modellenir. $Q_{sınırları}$ 'nın sifır olduğı herhangi bir durumda böyle bir sınır ihlali,artık bara-daki gerilim kontrol edilemiyeceğı anlamına gelir.

7.5.2 DİNAMİK ÇALIŞMA SİMULASYONU

SVC normal güç salınımları süresince temel frekans dav-ranışıyla (yani harmonik üretimini ihmal ederek) yeterli dere-cede gösterilebilir.SVC 'nin gösterimi için birkaç model sunu-labilir. Bununla beraber statik VAR kompanzatörün bütün tiple-rini göstermek için universal bir model geliştirilmiştir.

Şekil 7.10'da gösterilen model,sabit bir reaktansın(X_s) arkasında kontrollu gerilim büyüklüğüne sahip ataletsiz bir kaynaktır. E_s , daima uç gerimiyle aynı fazdadır. Modelin farklı parametreleri,gerekli modellemenin seviyesi üzerine olduğı ka-dar SVC'nin spesifik tipine de bağılıdır. Bütün durumlarda,har-monik enjeksiyonunun uygun filtrelerle absorblanacağı varsayı-larak sadece temel akım davranışı göz önüne alınmıştır.

Sabit şönt kondansatörler ve/veya reaktörler, sabit em-pedanslı şönt elemanlar olarak ayrı bir şekilde modellenir.Böy-le bir universal modelde bütün sistem empedansı sabit kalır ve değıştirilmesine ihtiyaç yoktur.



Şekil 7.10 Bir statik VAR kompanzatörün kararlı-hal karakteristikleri

Tristör kontrollü bir reaktör için;

X_s = Reaktör tam olarak "on" durumundayken toplam reaktans

$$f(h) = U \cdot h$$

$$A = 1$$

$$B = 0$$

Bir süseptans lineazörü kullanıldığında aynı model için;

h = Tristörlerin ateşleme açısı

$$f(h) = U(-1 + (2h - \sin 2h) / \pi)$$

$$A = \pi$$

$$B = \pi / 2$$

Tristör anahtarlama kondansatör bankları için;

X_s = Bütün kondansatör banklarının toplam reaktansı

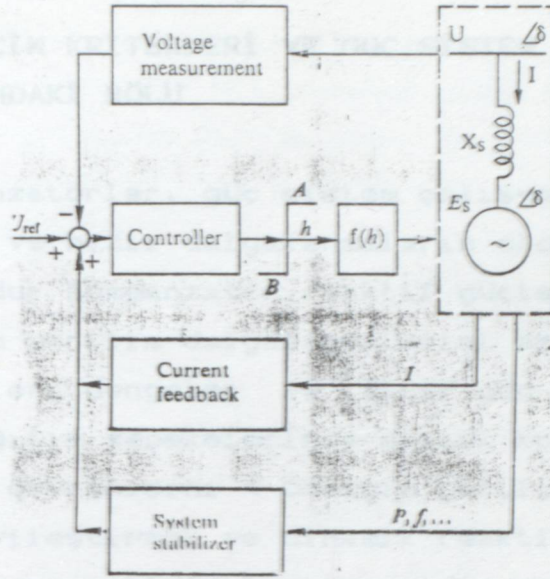
h = Toplam bank sayısı (M) 'nın bir frakşını olarak bağlı kondansatör bankları

$$A = 1$$

$$B = 0$$

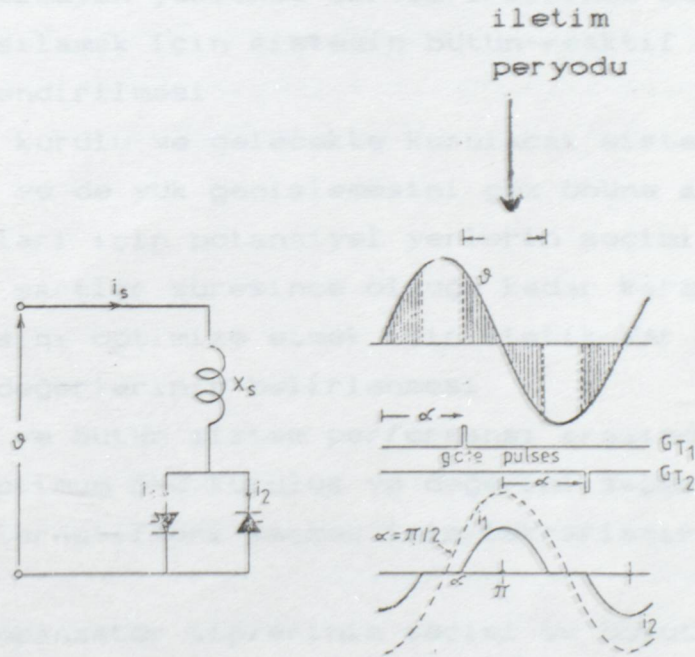
$$f(h) = U(1 + N/M)$$

$N = hM$. Açık banklarının sayısı



Şekil 7.11 Statik VAR kompanzatörlerin tümleşik modeli

SVC'nin çalışma prensibi, çeşitli ateşleme açıları için $(90^\circ \leq \alpha \leq 180^\circ)$ şekil 7.12'de gösterilmiştir.



Şekil 7.12 Tek faz şeması ve $\pi/2 \leq \alpha \leq \pi$ için çalışması

7.6 SVC'LERİN SEÇİM KRİTERLERİ VE GÜÇ SİSTEM UYGULAMALARINDAKİ RÖLÜ

Statik kompanzatörler, güç sistem çalışmasını bozan reaktif güçteki büyük ve hızlı dalgalanmaların olduğu her yerde kullanım için uygundur. Kompanzatör, reaktif güçteki dalgalanmalar sonucunda oluşan gerilim dalgalanmalarını azaltır. Aynı zamanda asimetrik yükleri dengeler ve aktif güç salınımlarının etkisini azaltır. Dağıtım şebekelerinde statik kompanzatörün ek bir avantajı şebeke davranışını (Örneğin gerilimi istenen değerde tutulmasını iyileştirmek ve dinamik reaktif güç kontrolü ile seçicilik imkanı sunmak) iyileştirmesidir.

Statik VAR kompanzatörlerinin nominal değerleri ve kuruluş planlamasında aşağıdaki prosedür kullanılabilir;

a) Muhtemelen önemli çalışmalar süresince olduğu kadar azami ve azami olmayan yüklenme şartları altında bulk sistem zorlamalarını karşılamak için sistemin bütün reaktif güç ihtiyaçlarının değerlendirilmesi

b) Önceden kurulu ve gelecekte kurulacak sistem cihazlarının eklenmesi ve de yük genişlemesini göz önüne alarak değişken VAR kaynakları için potansiyel yerlerin seçimi

c) Dinamik şartlar süresince olduğu kadar kararlı-halde sistem performansını optimize etmek için statik VAR kompanzatörlerinin nominal değerlerinin belirlenmesi

d) Ekonomi ve bütün sistem performansı arasında en iyi uzlaşmayı veren optimum SVC kuruluş ve değerini seçmede b ve c adımları diğer alternatifleri seçmek için tekrarlanır.

Statik kompanzatör tiplerinin seçimi ve boyutlandırılması aşağıdaki kriterler üzerine dayanır:

- Sistem iyileştirmeleri
- Kuruluş masrafları
- Çalışma masrafları

Başlıca değerlendirme, teknik olarak kabul edilebilir ve ekonomik olarak savunulabilir bir çözüm elde etmek yukarıda bahsedilen kriterler arasında bir uzlaşma bulmayı gerektirir. Bütün çözümler özel projeler için spesifik ve diğer bir şebekeye transfre edilemezler.

-Sistem iyileştirmeleri

Şebekeye bağlı olarak değişebilen hedeflerin birkaçını aynı anda gerçekleştirerek , şebekenin işletme güvenirliliği önemli derecede arttırılır.

Komplex simülasyon sistemlerinin bütün sahası , gerekli değerlendirmeler için elverişlidir. Bu, kısa devre, yük akışı ve stabilite programları içerir. Geçici olaylar, özel program sistemleriyle incelenir (Örneğin elektromagnetik geçici olaylar).

-Kuruluş masrafları

Kuruluş masraflarının doğru belirlenmesi, faz boyutlandırmasının ve tasaramının tamamlayıcı kısmının oluşturur. Maliyetler büyük ölçüde aşağıdaki faktörlerle belirlenir;

- Çalışma sahası
- Servis gerilimi
- Aşırı yük ihtiyacı
- Harmoniklerin sınırlandırılması

Anahtarlamalı kondansatörler tarafından karşılanacak daha yüksek gerilim ihtiyaçlarına bağlı olarak TSC 'nin farklı şekilleri için kuruluş masrafları genellikle daha yüksektir.

Statik kompanzatör , indirici transformatörsüz üçüncü devre sargısı yoluyla mevcut şebekeye direkt bağlandığında gerilim seviyesi , santral maliyetleri üzerinde önemli bir tesir gösterir. Eğer transformatör kullanılırsa maliyet, uygun bir sekonder gerilimi seçerek minimize edilebilir.

Kompanzatörler tarafından üretilen akım harmoniklerini hesaplamak için kompleks incelemeler gereklidir. Uygun harmonik filtreler veya 6-darbeli devreler yerine 12-darbeli devreler sağlanmalıdır.

Genellikle söylenebilirki; TSC varyantları ek filtresiz 6-darbeli sistemler sonucunda daha az harmonikler üretir. Bununla beraber FC-TCR kompanzatörlerle kullanılan filtreler daha az pahalıdır. Örneğin kondansatörü bir filtre olarak tasarlamak mümkündür.

-Çalışma maliyetleri

Kompanzatör sistemlerinin ekonomisi sadece para masrafları olmayıp statik faz kompanzatörün aktif kayıpları ile belirlenen çalışma masraflarıdır.

Statik kompanzatöre uygulanan bir diğer önemli kriter, çalışma süresince kayıpların bir sonucu olarak oluşan maliyetleri gerektirir. Kayıplar kWh fiyatının fonksiyonu olarak kuruluş maliyetlerinin büyüklük derecesini belirleyebileceğinden kayıpların tam olarak bilinmesi önemlidir. Kayıplar konusunda TSC varyantı, kompanzatörün büyük ölçüde endüktif çalışması beklendiğinde çok uygundur. FC varyantı daha düşük kayıplar gösterir. Bu konu ileride daha geniş olarak ele alınacaktır.

Sonuç olarak, sistem güvenirliliği ve sistem davranışını iyileştirme için statik kompanzatörlerin kullanımı birçok konuyu kuşatır. Aslında kompanzatör sisteminin seçimi büyük ölçüde bir maliyet sorunudur.

Yukarıki bölümlerde sıralanan statik kompanzatörlerden birinin tüm uygulamalar için en iyi çözüm olduğu söylenemez. Bir çoğu denetim aralığı, denetim şekli ve kayıplar açısından değişik özellikler gösterdiğinden, kompanzasyon probleminin niteliğini en uygun olanının seçilmesi gerekmektedir.

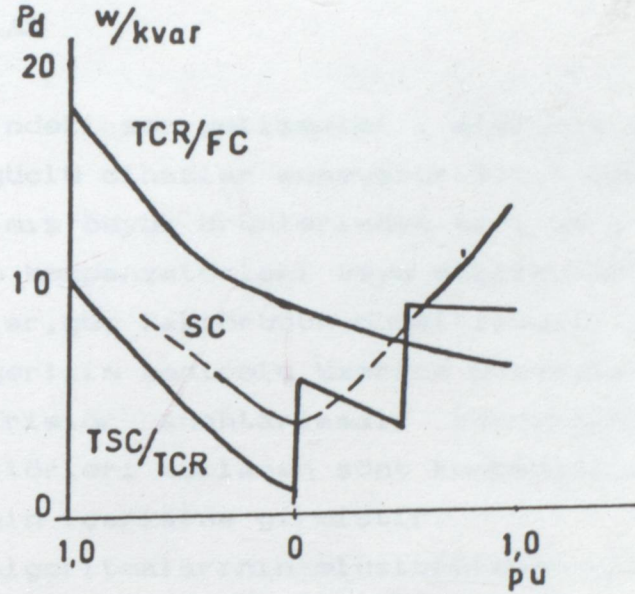
Belirli bir uygulama için en elverişli statik kompanzatörün seçimi, aşağıda sıralanan aşamalardan geçilmesini gerektirir:

- Problemin tanımlanması
- Denetim aralığının belirlenmesi
- Teknik açıdan değişik sistemlerin olumlu ve olumsuz yanlarının sıralanması
- Kompanzatörün gücünü ve tipinin seçimi
- Güvenirliliğinin ve yatırım bedelinin saptanması
- Kompanzatörün kararlı ve geçici durumunun teorik olarak saptanması

Bir çok durumda daha ekonomik olan sabit kondansatörle (FC)tristör kontrollü reaktör kombine edilir. Aynı temel şartlar verildiğinde kontrollü endüktif güç FC-TCR ile artar. Diğer taraftan yarı iletkenlerin maliyeti daha düşüktür. Nominal 40 kV üzeri yüksek gerilim şebekelerindeki uygulamalar için bir indirici transformatör,yarı iletkenlerin elektrikselse verilerini uyumlaştırmak için gereklidir.Eğer transformatör yüksek bir kısa devre reaktansına sahipse TCR için ayrı bir reaktör gerekli değildir.

Kompanzatör devresinin seçimi, büyük ölçüde çalışma kayıplarıyla belirlenir.Kullanım için en ekonomik çözümün bulunması amacıyla kompanzatörün kayıpları tek tek analiz edilir. Statik kompanzatörlerin iki temel tipinin çalışma maliyetleri arasındaki farklar,üretilen kompanzatör gücünün bir fonksiyonu olarak tek tek kayıp analizleri referans alınarak açıklanır.

Bu bakımdan farklı tipte tristör kontrollü şönt kompanzatörlerinin karşılaştırılmasında göz önüne alınacak birincil husus kayıplardır. Şekil 7.13 dinamik kontrol aralığı (tamamen endüktiften tamamen kapasitife geçiş aralığı) için kayıpları gösterir. Hemen hemen tüm kontrol aralığı boyunca kombine sistemdeki kayıpların azlığı şekilden açıkça görülür.



Sekil 7.13 Farklı tipteki kompanzatorler için reaktif güç kayıplarının (P_d) değişimi. (Sola doğru endüktif sağa doğru kapasitif). Kayıp eğrilerinde, bir ara transformatorün etkisi de dahil edilmiştir.

- FC-TCR : Tristör kontrollü reaktör (2pu) ve sabit kondansatör (1pu)
- SC : Senkron kondansatör
- TSC-TCR : Tristör anahtarlamaalı kondansatör (2x0.5pu) ve tristör kontrollü reaktör (2x0.5pu).

Kapasitif bölgede TSC-TCR varyantındaki kayıplar, FC-TCR varyantındaki kayıplara baskın gelir. Oysa endüktif bölgedeki şartlar için durum karşılıklıdır. Eğer TSC-TCR ile kapasitif reaktif gücü tekrar alt bölümlere ayırmak mümkün olursa kapasitif alt bölgede bu varyantın çalışma kayıpları daha da azaltılabilir. Özel bir durum için hangi varyantın en ekonomik olduğu kompanzator en sık kullanılan çalışma moduna bağlıdır.

BÖLÜM 8

STATİK KOMPANZATÖRLERİN KULLANIM SAHALARI

8.1 TEMEL YAKLAŞIMLAR

Güç elektroniğindeki son gelişmeler , elektrik enerjisi iletim ve dağıtımına güçlü cihazlar sunmuştur. Yakın zamanlarda uygulananmaya başlanılmış büyük ürünlerinden biri de , tristör kontrollü reaktif güç kompanzatörleri veya statik VAR kompanzatörleridir. Bu cihazlar, güç faktörünün düzeltilmesi, yük dengelenmesi ve dinamik gerilim kontrolü üzerine başarılı bir şekilde uygulanmıştır. Tristör anahtarlamalı kondansatörler ve tristör kontrollü reaktörleri kullanan şönt kompanzasyon artık güç sistem şebekelerinin içerisinde girmiştir.

Yeni kontrol algoritmalarının oluşturulması ile önemli uygulama sahaları doğmuştur. Bunlar;

- Gerilim regülasyonu
- Sistem dinamiği ile geçici ve kararlı-hal stabilitenin iyileştirilmesi

- Güç iletim kapasitesinin artırılması

- Güç osilasyonlarının söndürülmesi

- Şebeke gerilimini istenen değerde tutmak

- vs.

olarak sıralanabilir.

SVC sistemleri için, iki temel devre şeması ve bunların kombinasyonları düşünülmüştür. Daha önceki bölümlerde bu tipler ayrıntılı olarak açıklanmıştı.

Aşağıdaki tabloda statik kompanzatörlerinin kilit uygulama alanları listelenmiştir.

Güç sistem uygulamaları için:

- Gerilim koruma
- Dinamik reaktif güç kontrolü (Örneğin hatların reaktif güç ihtiyaçları için kompanzasyon)
- Geçici ve statik stabiliteyi iyileştirmek için
- İletim kapasitesini arttırmak
- Senkronaltı rezonansları (SSR) ve torsional osilasyonların sönümü

Endüstriyel şebekeler için:

- Gerilim koruma
- Dinamik reaktif güç kontrolü (Statik konvertör, asenkron motorlar durumunda reaktif güçteki hızlı dalgalanmaların kompanzasyonu)
- Geçici ve statik stabiliteyi iyileştirmek için
- Fliker'in azaltılması (örneğin ark fırınları)
- Dengesiz yüklerin kompanzasyonu

8.2 REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU İÇİN SVC YÖNTEMİ

8.2.1 KLASİK KOMPANZASYONDA KARŞILAŞILAN SORUNLAR

Elektrik şebekelerinde, endüktif yüklenmeler nedeni ile reaktif akım bileşeni oluşur. Örneğin demir-çelik endüstrisinde kullanılan ark ocaklarında, fırının çalışma özelliğine bağlı olarak oluşan kararsız akım, en genel şekilde sıfır ile kısa devre akımı değeri arasında değişir. Özellikle kısa devre olayı bir eritme işlemi süresince birkaç defa olduğundan, bu şekilde bir yük değişimi, şebekede gerilim dalgalanmalarına da sebep olur ve diğer yükleri etkiler. Örneğin aydınlatmada 3 Hz ile 10 Hzlik frekans bölgesinde %0.5'lik gerilim değişimi zararlı kabul edilir ve insan gözü ile hissedilir. Ark ocaklarının çalış-

ması ile oluşan dalgalanmalar da bu frekans bandındadır. Ayrıca özelli ile tetikleme açıları sürekli değişen alternatif akım kıyıcıları, yarı iletken güç elektroniği devreleri ile , örneğin- hızı sürekli değiştirilen veya yük momenti değişen endüksiyon makinaların ve çeşitli amaçlarla kullanılan kapasitif ve endüktif filtre devreleri de, şebekeyi dengeli yükledikleri kabulü ile , hızlı değişen dinamik reaktif akım bileşenleri oluşturur. Bu arada üç fazlı şebekenin dengesiz yüklenmesi ve bunun simetrlenmesi ayrı bir sorundur.

Endüstride bu şekilde hızlı değişebilen bir yük ve buna bağlı reaktif güç durumunda, gerilim dalgalanmalarını minimumda tutabilmek için, elektrik şebekesinin kısa devre gücü büyütelemediği sürece, oluşan reaktif akım dalgalanmalarının olduğu yerde dinamik olarak kompanze edilmesi gerekir. Bu amaç için , endüstride güç katsayısını düzeltmek ve hatta maksimum yapmak üzere senkron makinalardan yararlanılmıştır. Örneğin senkron makinalarda uyarma geriliminin hızlı değiştirilmesi ile dalgalanma hızı 100 MVar/s olan reaktif güçlerin kompanzasyonu öngörülmüş ve uygulanmıştır. Ancak kompanzasyon hızının makinanın uyarma devresinin zaman sabitine bağlılığı, istenilen seviyede bir çözüm getirmemiştir. Aynı yöntem dengesiz yük durumlarında da yetersiz kalmıştır.

Ayrıca sürekli rejimde, senkron makinanın kompanze ettiği reaktif güçte kVar başına yapılması gereken sabit yatırım masrafları ve hareket eden bir sistemin getirdiği sürekli bakım ve arıza gibi zorluklardan doğan işletme masrafları, ekonomik ve teknik olarak makinanın kullanımını sınırlamıştır. Elle kumandalı kondansatör gruplarını inceleme dışı tutarak, mekanik ya da elektronik olarak devreye sokulup çıkarılabilen kondansatör grupları da istenilen hassasiyeti , öngörülen dinamizm ile sağlayamamıştır.

Alternatif akım kıyıcısının elektronik olarak kontrol edilebilen kapasite özelliği vardır. Tek bir tristörün bugünkü teknoloji ile 2 MVA'lık bir gücü, 5 mikrosaniyeden kısa bir sürede statik olarak açıp-kapayacağı göz önüne alınırsa, paralel ve seri tristörler kullanarak oldukça büyük güç sınırına eriş-

mek mümkündür." Statik VAR generatörü " olarak adlandırılan bu devrenin diğer reaktif güç kompanzasyon tekniklerine göre üstünlükleri, aşağıdaki şekilde özetlenebilir:

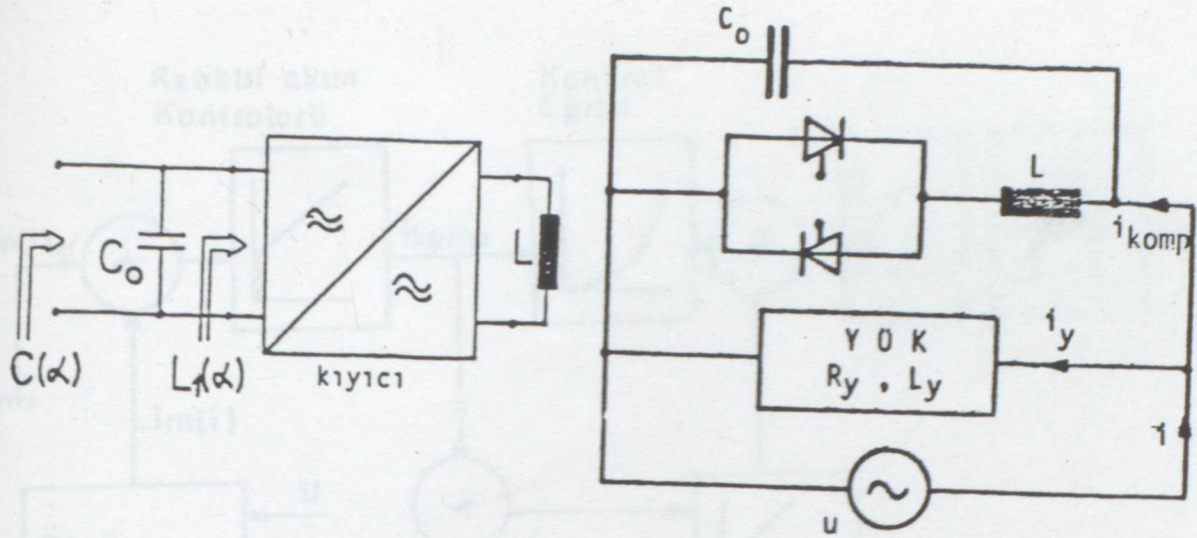
- KVAR başına daha düşük tesis yatırımı
- Bir fazı da kompanze edebilme özelliği (dengesiz yük uygulamalarında bir avantaj)
- Yüksek güvenilirlik (statik açma-kapama)
- Kondansatör ve endüktans boyutlarının değiştirilmesi ile büyük bir güç spektrumunda uygulama imkanı
- Yüksek verim
- Kompanze edilen VAR başına düşük hacim
- Yüksek hızda cevap süresi (maksimum yarım periyot, ortalama dörtte bir periyot)

8.2.2 KIYICI İLE KOMPAZASYONDA OTOMATİK KONTROL

Şebekenin, sürekli ya da dinamik endüktif yüklenmesi durumunda $\cos\phi$ kompanzasyonunun kısa sürede gerçekleşmesi istendiğinden, böyle bir sistemi otomatik kontrol düzeni ile birlikte düşünmek gerekir.

u gerilimi ile beslenen endüktif bir yükte $\cos\phi$ kompanzasyonu şekil 8.1'deki düzene göre gerçekleştirilir. R_y ve X_y dinamik olarak değişebilen devre elemanlarıdır. Örneğin böyle bir yükü, 50 Hz elektrik şebekesinden beslenen ve karakterini besleme hattının uzaklığına göre sürekli olarak değiştiren bir elektrikli tren lokomotifi oluşturabilir.

Uygulanması gereken kapalı çevrim kontrolunda kararlı-hal hatası sıfır olan PI-tipi kontrolör kullanılabileceğinden hareket edilirse, otomatik kontrol düzeni için, şekil 8.2 de verilen devrede, u kaynağından çekilen i akımının reaktif bileşeninin bir ölçü devresi üzerinden ölçülmesi gerekir. Amaç, bu bileşeni sıfır yapmaktır. Şekil 8.2'deki kapalı çevrim blok şemasına göre ölçü devresinden akımın reaktif bileşeni elde edilmekte, PI kontrolör çıkışında ise I_{komp}^* referans değeri oluşturulmaktadır.



Şekil 8.1 Kıyıcı ile $\cos\phi$ kompanzasyonu

Normalize kapasite bağıntısından hareketle

$$C(\alpha) = C_0 \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (8.1)$$

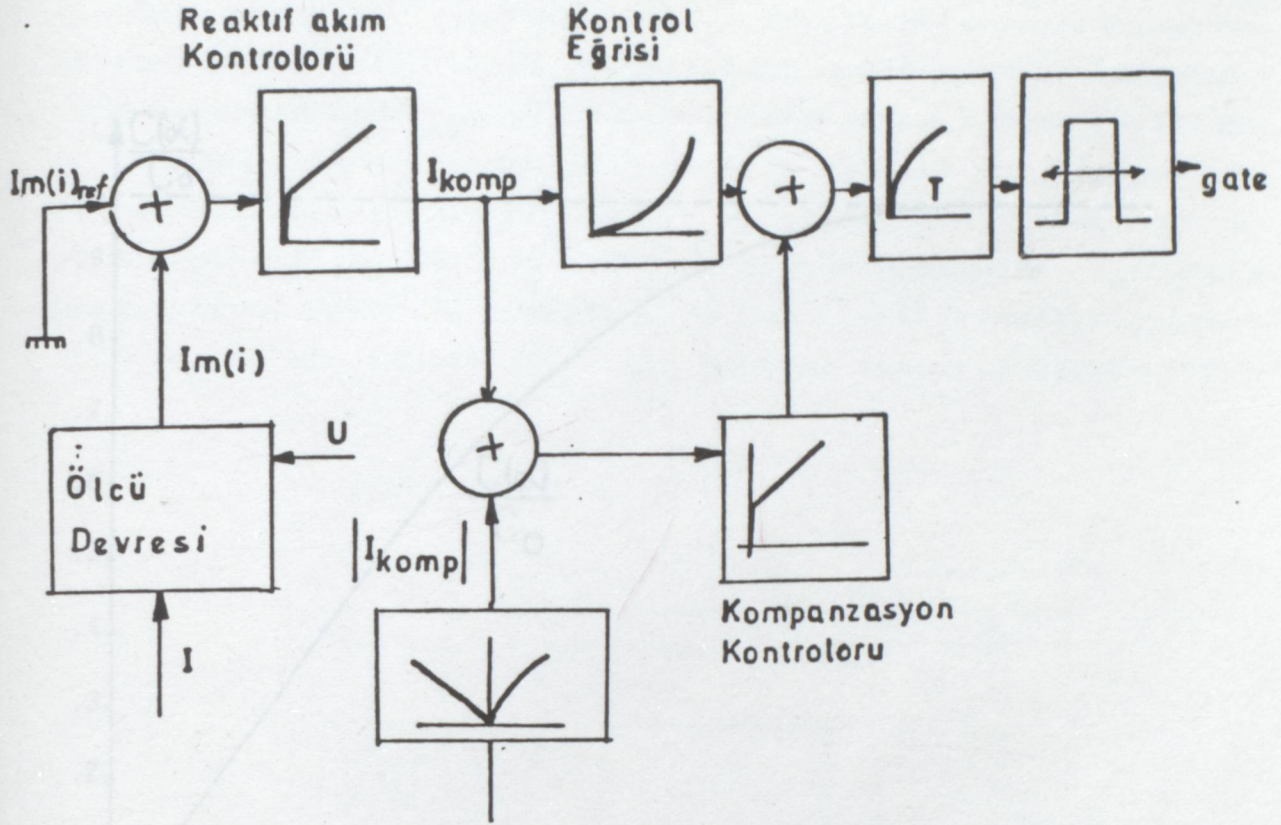
ifadesi

$$I_{komp} = \frac{U}{Z_c(\alpha)} = w U C(\alpha)$$

bağıntısında yerine konulursa

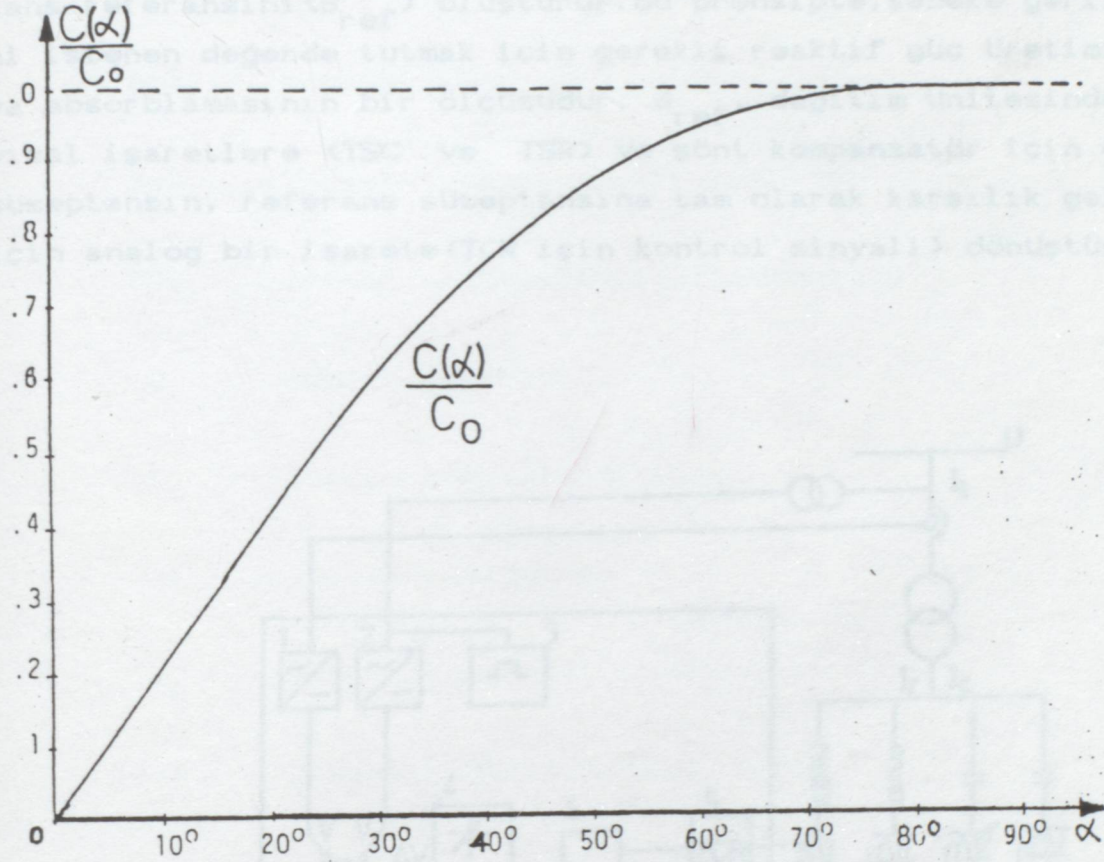
$$I_{komp} = \frac{w U C_0}{\pi} (2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (8.2)$$

kompanzasyon akımı, α 'nın fonksiyonu olarak elde edilir. Kompanzasyon akımı I_{komp}^c belli olduğunda, son bağıntıdan α bulunabileceğinden 8.2 bağıntısının tersi $\alpha = f(I_{komp})$ eğrisine göre tetikleme açılarının belirleneceği açıktır. $\alpha = f(I_{komp})$ kontrol eğrisinin değişimi şekil 8.3'de verilen $C = f(\alpha)$ eğrisinin tersidir.



Şekil 8.2 Cosφ kompanzasyonu için kontrol blok şeması

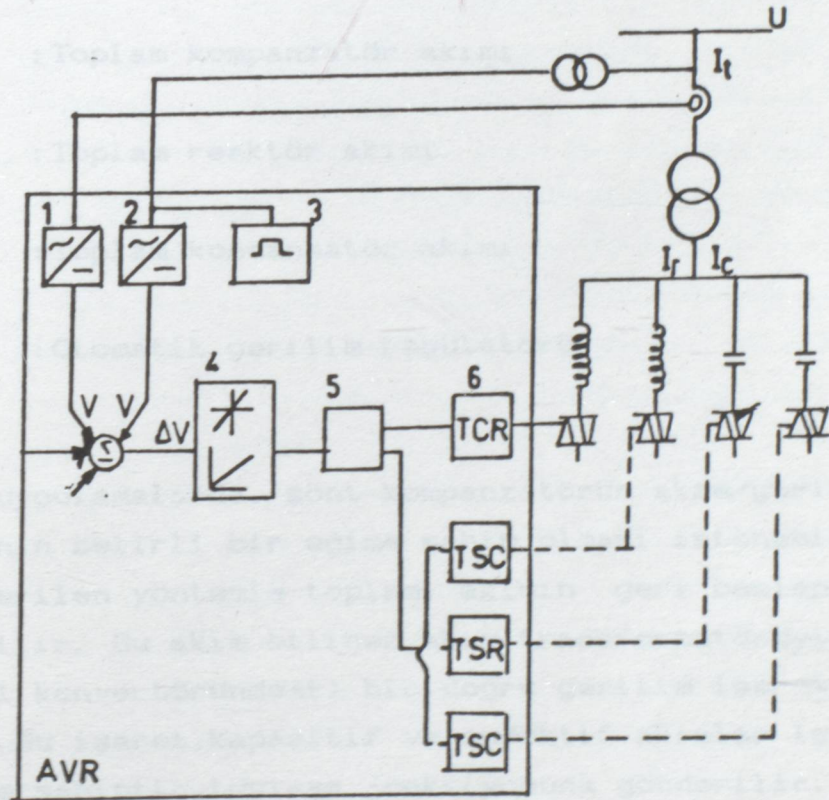
Böyle bir kontrol ile , bir ölçü büyüklüğü kullanarak, kompanzasyon belli bir hata ile gerçekleştirilebilir. Kontrolde $\alpha = f(I_{komp})$ değişiminin elektronik olarak gerçekleştirilmesinde her hata $\Delta\alpha$ hatası, sistemde kompanzasyon hatası oluşturacağından, hassas bir kompanzasyon için kompanzasyon akımı I_{komp} unda ölçülerek (bütün kontrol doğru gerilimler ile yapıldığından) bu büyüklüğün doğrultulduktan sonra geri-besleme işareti olarak diğer bir kontrolör üzerinden $\alpha = f(I_{komp})$ eğrisi çıkışına uygun şekilde eklenmesi gerekir. Kompanzasyon kontrolünün kullanılması durumunda anılan eğrinin kabaca gerçekleştirilmesi yeterlidir.



Sekil 8.3 Normalize kapasitenin α ya göre değişimi

Sekil 8.4 ' de tristör kontrollü şönt kompanzator için kontrol sisteminin basitleştirilmiş blok diyagramını gösterir. Otomatik gerilim regülatörüne gelen giriş sinyali, transformatorün yüksek gerilim tarafındaki gerilimdir (U). Bilinen gerilim transformatorü ile (her fazda) ölçülür ve bir sinyal konvertöründe doğru gerilim sinyaline (V) dönüştürülür. Bu sinyal konvertörü aslında, bir gerilim adaptasyon transformatorü, bir 6-darbeli doğrultucu ve şebeke gerilimindeki hızlı transientleri azaltmak için 1,5 ms ' lik zaman sabitli alçak geçiren bir filtreden oluşur. Gerilim cevabı (V), regülatörün toplama fonksiyonunda karşılaştırılır. Eğer gerilim cevabı referanstan sapıyorsa bir hata sinyali (ΔV) elde edilir. Bu işaret bir integral

alıcı kuvvetlendiriciyi besler. Çıkış sinyali $\Delta V = 0$ ve $V = V_{ref}$ oluncaya kadar ΔV ' ye bağlı olarak azaltılır veya arttırılır. İntegratörden gelen çıkış sinyali, şönt kompanzator için süseptans referansını (B_{ref}) oluşturur. Bu prensipte, şebeke gerilimini istenen değerde tutmak için gerekli reaktif güç üretimi veya absorblamasının bir ölçüsüdür. B_{ref} , dağıtım ünitesinde sayısal işaretlere (TSC ve TSR) ve şönt kompanzator için etkin süseptansın, referans süseptansına tam olarak karşılık gelmesi için analog bir işarete (TCR için kontrol sinyali) dönüştürülür.



Şekil 8.4 Tristör kontrollü reaktör ile kombineli TSC tipi tristör kontrollü bir şönt kompanzator için kontrol sistemi

- 1-2 : Sinyal çevirme birimi
- 3 : Senkronizasyon birimi

- 4 : Kontrol kuvvetlendirici birimi
5 : Dağıtım birimi
6 : Darbe generatörü

TCR : Tristör kontrollü reaktör

TSR : Tristör anahtarlama reaktör

TSC : Tristör anahtarlama kondansatör

U : Şebeke gerilimi

I_t : Toplam kompanzatör akımı

I_r : Toplam reaktör akımı

I_c : Toplam kondansatör akımı

AVR : Otomatik gerilim regülatörü

Bazı uygulamalarda, şönt kompanzatörün akım/gerilim karakteristiğinin belirli bir eğime sahip olması istenebilir. Bu şekilde gösterilen yöntemle toplam, akımın geri beslenmesiyle gerçekleştirilir. Bu akım bilinen akım transformatörüyle ölçülür ve sinyal konvertöründe (1) bir doğru gerilim işaretine (V_1) dönüştürülür. Bu işaret, kapasitif ve endüktif akımlar için farklı işaretlere sahiptir, toplama jonksiyonuna gönderilir. Öyle ki endüktif ve kapasitif akım için sırasıyla gerilim referansında bir arttma ve azalmaya karşılık gelsin. Kontrol sistemi aynı zamanda, regülatör işaretlerinin o andaki durumlarını ve ateşleme darbelerinin tam olarak doğru anlarda uygulandığını sağlayan bir senkronizasyon birimi içerir.

8.3 DÜŞÜK KAPASİTELİ GÜÇ SİSTEMLERİNİN YÜKLENEBİLİRLİLİK PROBLEMİNE POTANSİYEL BİR ÇÖZÜM: KONTROLEDİLEBİLİR VAR KOMPANZATÖR

Radyal iletim hatlarının alıcı uçlarındaki gerilim stabilitesi, bu uca bağlanacak yükün karakter ve miktarı üzerine bir sınır koyar. Statik var kompanzatör yük ucundaki gerilimi destekler ve bu yüzden hatların yüklenebilirlikleri artar.

Bazı güç kaynağı düzenlerinde ana yük barası, üretim yerinden uzaktır. Böyle güç, radyal iletim hattı aracılığıyla iletilir. Böyle bir hat, uzun iletim mesafesine (örneğin birkaç yüz kilometre) sahipse ve yük ucunda yeterli bir gerilim desteği olmadıkça bu uçta gerilim karasızlığı problemi olacaktır. Bu problem, bağlı yükün reaktif güç talebini uygun adımlarla karşılamak kaynağın yetersizliğine bağlıdır. Bu konuda güç kaynağı düşük kapasiteye sahip kaynak olarak düşünülebilir veya genellikle düşük kısa devre güç kaynağı olarak adlandırılır.

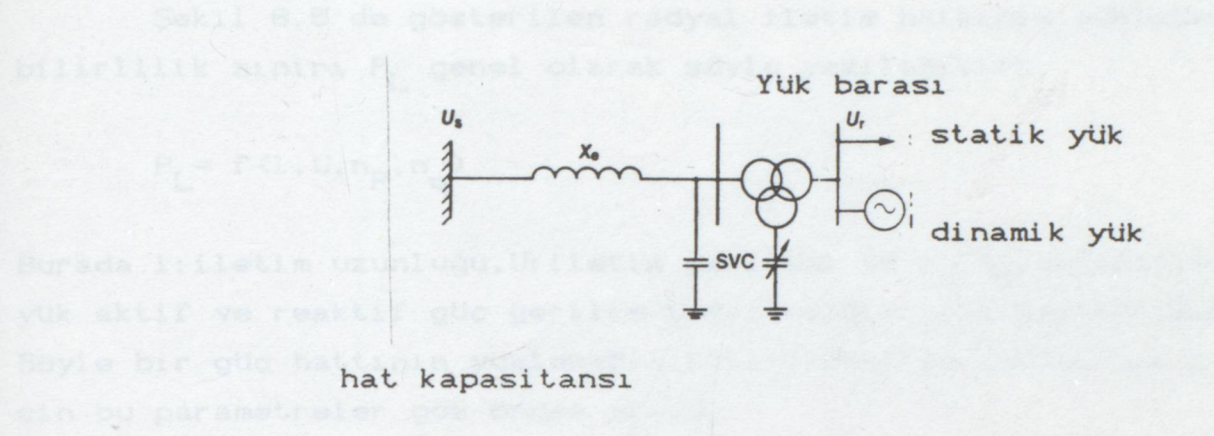
Bağlı yükün reaktif güç talebiyle uygun doğru miktarda reaktif güç üretebilecek veya absorblayabilecek iyi bir gerilim desteği (yük ucunda), elbette yük ucundaki gerilim yetersizlik problemini çözecektir.

Bu yazıda, radyal güç hatlarının geçici yüklenebilirlik sınırlarını arttırmada yük ucundaki kontrol edilebilir kompanzatörün durumunu belirlemektir. Değerlendirme amacı için, yük ucundaki kompanzatörün sabit bir değer ve kontrol edilemeyecek olma durumunda yüklenebilirlik sınırları, bir referans olarak göz önüne alınmıştır.

Analiz Modeli

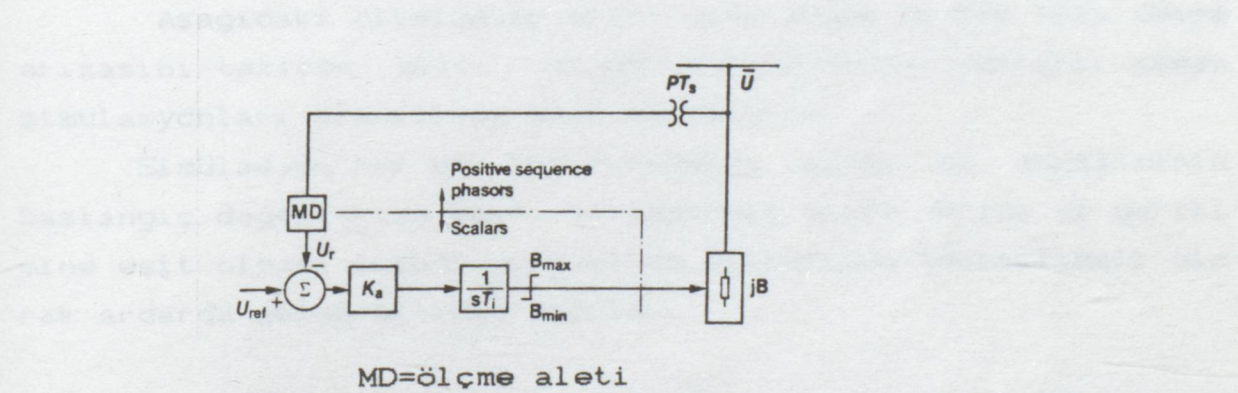
Analizde düşünülen güç kaynak sistemi, şekil 8.5'de gösterilmiştir. Bir yük sahası, sosuz barayla gösterilen çok büyük bir sistemden gelen uzun mesafe iletim hattı yoluyla beslenir. Düşünülen yük tipi birleşik haldedir: empedans karakterli statik parça ve tipik parametre değerlerine sahip eşdeğer indüksiyon motorla gösterilen dinamik parça. Bu sistemin parametreleri

ekte listelenmiştir.



Şekil 8.5 Düşünülen güç sistemi

İki çalışma durumu vardır; biri yük ucundaki var kompanzatörün sabit olduğu (referans durum) ve kompanzatörün kontrol edilebilir var kompanzatör olduğu durum. Kontrol edilebilir kompanzatör, tristör kontrollü statik var (SVC) alınmıştır. Şekil 8.6'da kontrol modeli gösterilmiştir.



Şekil 8.6 Düşünülen statik var kompanzatörün (SVC) şematik blok diyagramı

Bu kontrol modeli, lineer olarak ve sürekli olarak kontrol edilebilir süseptansla kontrol edilebilir. Süseptans, zaman sabiti T_i ve kazancı K_a olan integratör tipli gerilim regülatörüdür.

Yüklenebilirliği arttırmada SVC

Şekil 8.5'de gösterilen radyal iletim hattının yüklenebilirlik sınırı P_L genel olarak şöyle yazılabilir:

$$P_L = f(l, U, n_p, n_q)$$

Burada l : iletim uzunluğu, U : iletim gerilimi ve n_p, n_q sırasıyla yük aktif ve reaktif güç gerilim bağımlılığının bileşenleridir. Böyle bir güç hattının yüklenebilirlik sınırını arttırmak için bu parametreler göz önüne alındı.

İletim hattı uzunluğunun bir fonksiyonu olarak SVC

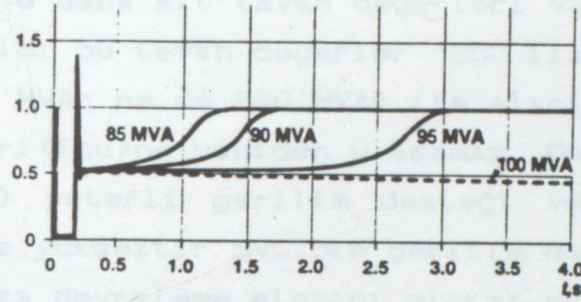
İletim gerilimi 130 kV olarak seçildi ve yükün birleşik kısımlarından empedans karakterli ($n_p=2$, $n_q=2$) statik parça %50 ve eşdeğer endüksiyon motorla gösterilen parça %50 olarak varsayıldı. Yükün birleşik güç faktörü de yaklaşık olarak 0,88 geridir.

Aşağıdaki çizelgeler, alıcı uçta 200ms üç faz kısa devre arızasını takiben alıcı uç gerilim cevabının tekrarlı zaman simülasyonları aracılığıyla elde edilmiştir.

Simülasyon her bir yük durumunda alıcı uç geriliminin başlangıç değeri (kısa devre arızasından önce) verici uç gerilimine eşit olması için (1 pu) yükleme miktarında tekrarlamalı olarak ardarda gelen artımla yapıldı.

Şekil 8.7, yük ucunda sabit var kompanzatörlü 250 km'lik iletim hattının yüklenebilirlik sınırını belirleyen böylesi zaman simülasyonların sonuç örneklerini gösterir. Şekilden görüleceği gibi 100 MVA yükte alıcı uç gerilimi stabilite kriterini yerine getirmediği için yüklenebilirlik sınırı 95 MVA'dır. 95 MVA yükte verici uç gerilimine eşit başlangıç alıcı uç gerilimini korumak için gerekli sabit kondansatör boyutu 80 MVar'dır.

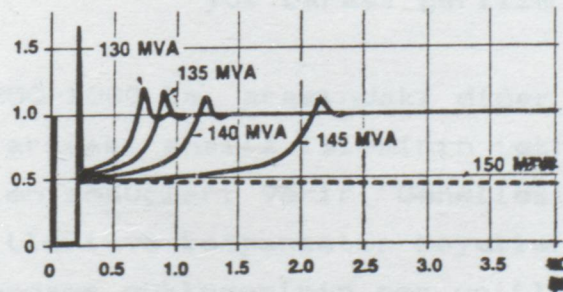
Yük barasındaki gerilim



Şekil 8.7 Sabit kompanzatorle farklı yük seviyelerinde yük barası gerilim cevap zamanı

Sabit kondansatör bir SVC ile yerdeğiştirdiğinde karşılık gelen zaman simülasyon sonuçları şekil 8.8'de gösterilmiştir. Bu durumda yüklenebilirlik limiti 145 MVA yüküdür. SVC nin (B_{max} , şekil 8.5) tavan değeri 130 kV'ta 250 MVA'dır.

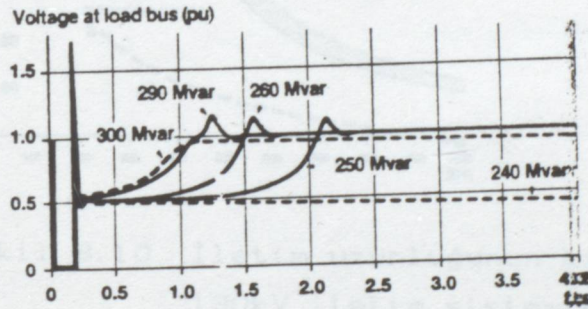
Yük barasındaki gerilim



Şekil 8.8 SVC 'li farklı yük seviyelerinde yük barası gerilim zaman cevabı

150 MVA yükte,tekrarlı zaman simülasyonları SVC'nin daha yüksek tavan değerleriyle yapılabilmiştir. Diğer taraftan 145 MVA yük için,gerilim stabilite kriterini yerine getirebilmede daha üst ve daha alt tavan değerleri vardır.Şekil 8.9 'da gösterildiği gibi bu tavan değerler 250 ila 290 MVar kapasitifdir.Ne 250 MVar ne de 290 MVar ile alıcı uç gerilimi, onun başlangıç değeri (1pu)ne yeniden ulaşamaz. Daha düşük değerliyen (240 MVar) yeterli gerilim desteği vermez.300 MVar ise yeterinden daha yüksektir.SVC,bir gerilim destekleme elemanından çok bir kısa devreleme elemanı olarak görünür.

Yük barasındaki gerilim

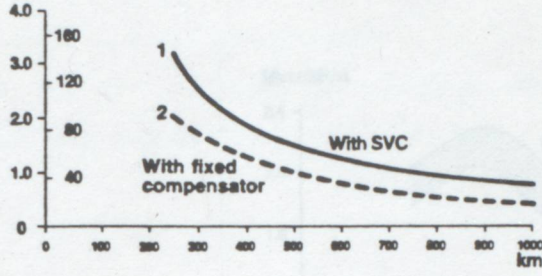


Şekil 8.9 SVC'nin farklı tavan değerleri ile (şekil 8.2'deki B_{max}) 145 MVA yükte yük barası gerilim cevap zaman

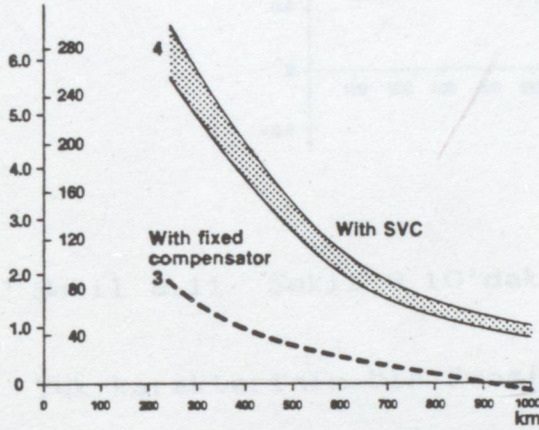
250-1000 km arasındaki diğer iletim hattı uzunlukları için yukarıdaki analiz işleminin tekrarlanması şekil 8.10 'da gösterilen sonuçları verir. Genelleştirme için yüklenebilirlik limitleri ve kompanzator boyutları, iletim sisteminin dalgalı empedans yüklemesinin per unitleri halinde ifade edilir.

SVC , kompanzator sabit olduğu zamankinden yaklaşık 1,5 kat bir faktörle yüklenebilirlik sınırını arttırmaya imkan verir.Bu,reaktif güç talebini sağlamada SVC 'nin esnekliği dolayısı ile gerçekleşir.

SIL MVA



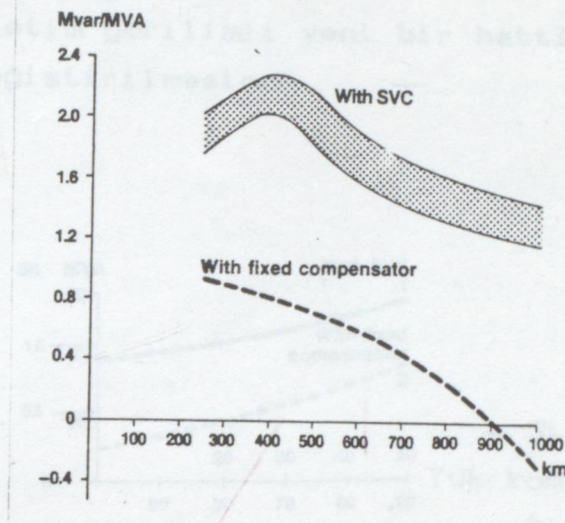
SIL MVA(kapasitif)



Şekil 8.10 İletim uzunluğunun bir fonksiyonu olarak 130kV iletim sisteminin MVar ihtiyacı (3,4) ve geçici yüklenebilirlik limitleri (1,2)

Şekil 8.11, Şekil 8.10'da gösterilen sonuçların bir yorumudur. Bu şekil, iletim hat uzunluğunun fonksiyonları olarak MVA yük sınırına karşılık gelenle ilgili olarak MVar kapasitif kompanzasyon karakteristiklerini gösterir. İlginç olanı şudur ki; SVC 'li durumda MVar/MVA oranının maksimum değere sahip olduğu yerde bir kırılma uzunluğu vardır. Bu kırılma uzunluğu, bir taraftan MVA yük sınırı başına MVar kompanzasyon talebi ve diğer taraftan hat kapasitesi tarafından üretilen reaktif gücün katkısı arasında bir denge noktası tanımlar.

MVar/MVA karakteristikleri



Şekil 8.11 Şekil 8.10'daki sonuçların MVar/MVA oranı

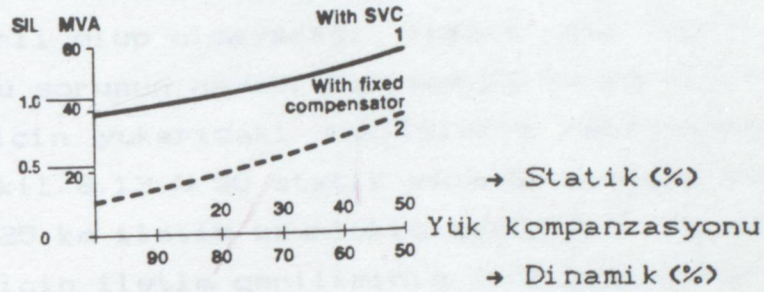
Yük karakterinin bir fonksiyonu olarak SVC

Aynı analiz işlemlerini takip ederek yük karakterinin bir fonksiyonu olarak yüklenebilirlik sınırları aynı şebeke için belirlenmiştir. SVC çözüm imkanının bir örneği olarak 625 km uzunluğunda bir iletim hattı ve 130 kV'luk bir iletim gerilimi seçildi. Yük karakter değişimi, statığın dinamik muhtevaya oranı ile yük kompanzasyonundaki değişiklikler aracılığıyla gösterilmiştir. Belirlenmiş yüklenebilirlik sınırları ve bunlara ait MVar ihtiyaçları şekil 8.12'de gösterilmiştir.

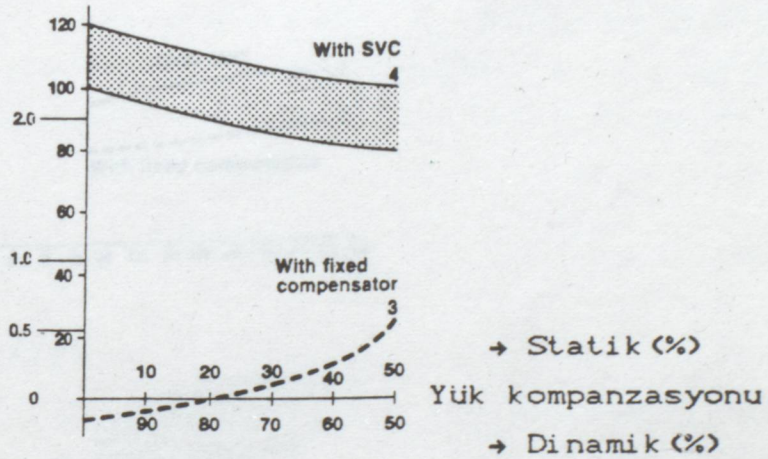
Bu sınırlardan görebilirizki; yük ucunda SVC'nin varlığı yük başlıca dinamik bir yük olduğunda yüklenebilirlik sınırı arttırmada çok önemli bir imkan verir. Saf dinamik bir yükte SVC'li yüklenebilirlik sınırı, sabit kompanzatorün yaklaşık 4 katıdır.

Böylesi bir çözümün ekonomikliği ilk bakışta şüpheye düşürebilir. Bununla beraber basit bir maliyet analizi açıkça gösterirki aşağıdaki gibi diğer ticari çözümler karşılaştırıldığı zaman (rekabete dayalı) çok iyi sonuçlar sağlar.

- a) Mevcut hatta paralel olarak yeni bir iletim hattı inşasında
- b) Daha yüksek iletim geriliminde çalışmak için mevcut iletim sistemini iyileştirmede
- c) Daha yüksek iletim gerilimli yeni bir hattla mevcut iletim hattının yer değiştirilmesinde



SIL MVar (kapasitif)



Şekil 8.12 Yük kompanzasyonun bir fonksiyonu olarak 130 kV , 625 km 'lik iletim hattının MVar ihtiyaçları (3,4) ve geçici yüklenebilirlik sınırları (1,2)

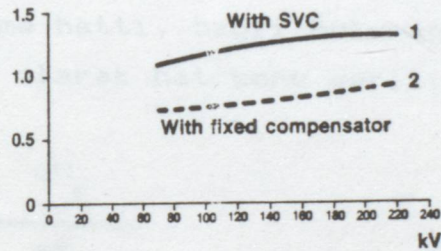
%30 statik,%70 dinamik yük içeren yük kompanzasyonunda şekil 8.12'nin referansıyl birlikt bir örnek olarak sunacak olursak ; 100 MVar lik SVC ,geçici yüklenebilirlik sınırını 25 MVar'dan 50 MVA'ya kadar arttırma imkanına sahiptir. Böyle-

si bir SVC 'nin tahmin edilen kuruluş masrafı , yukarıdaki alternatiflerin herhangi birisi için tahmin edilen maliyetin % 10 ile %20 arasında oynar.

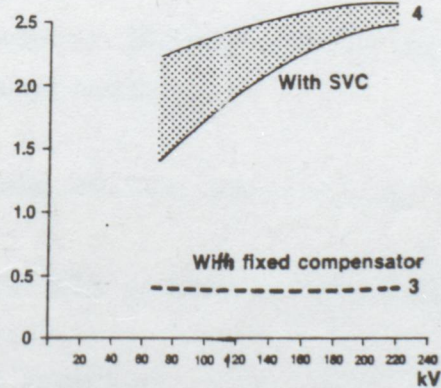
İletim geriliminin bir fonksiyonu olarak SVC

130 kV luk iletim gerilimi için şekil 8.11 ve 8.12 de belirlenmiş yüklenebilirlik sınırlarının, diğer iletim gerilimleri için geçerli olup olmayacağı apaçık bir soru olarak karşımıza çıkar. Bu sorunun cevabı basitçe, 70 kV ve 220 kV iletim gerilimleri için yukarıdaki analizlerin tekrarlanmasıyla belirlenmiştir. Şekil 8.13, % 50 statik ve % 50 dinamik yük kompanzasyonulu ve 625 km iletim uzunluklu şekil 8.5 'de gösterilen güç sistemi için iletim geriliminin fonksiyonu olarak, gerekli kompenzator boyutu ve yüklenebilirlik sınırını gösterir.

SIL



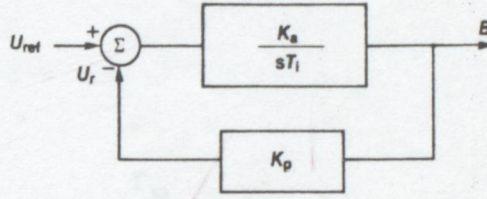
SIL (kapasitif)



Şekil 8.13 İletim geriliminin fonksiyonları olarak MVar ihtiyaçları (3,4) ve geçici yüklenebilirlik sınırları (1,2)

Reaktif güç kompanzasyonu için hat sonu gerilim hassasiyeti

Güç frekansı düşünüldüğünde şekil 8.5 'de verilen güç sistemiyle şekil 8.6'da tanımlanan SVC'nin integrasyonu, şekil 8.14'de gösterilen kapalı çevrim kontrol sistemini verir.



Şekil 8.14 SVC kapalı çevrim kontrol sistemi

Bu çevrimde güç sistemi, kompanzator kontrol modelinin geribesleme hattını oluşturur ve bir K_p sabitiyle gösterilir. Bu geri besleme hattı, bağlı bulunan süseptanstaki değişikliklere karşılık olarak hat sonu gerilimini verir. Bu nedenle K_p ,

$$K_p = \frac{dU_r}{dB} \quad (8.3)$$

olarak ifade edilir. Burada U_r =hat sonu gerilimi, B =bu uçta bağlı bulunan süseptansdır.

Göz önüne alınan güç sistemi için K_p 'nin türetilmesi

8.5'deki güç sistemi, şekil 8.15 'de gösterilen eşdeğer devreye sahiptir.

B , yük endüktif kısmının, iletim hattı süseptansı ve kompanzator süseptansının bileşke süseptansını temsil eder.

R , yükün aktif güç bileşenini gösteren eşdeğer direnç

X_e , iletim hattı reaktansdır

Hatbaşı gerilimi (U_s) per unit cinsinden

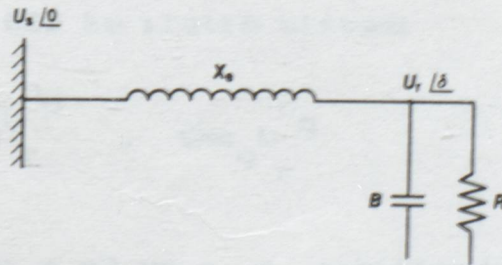
$$U_r = \frac{R}{\sqrt{R^2 (1-X_e B)^2 + X_e^2}} = \frac{R}{|Z|} \quad (8.4)$$

ile verilir.

$$\frac{dU_r}{dB} = K_p = \frac{f_B}{|Z|^2 - f_R \frac{dR}{dU_R}} \quad (8.5)$$

Burada, $f_R = |Z| - \frac{R^2 (1-X_e B)^2}{|Z|}$

$$f_B = \frac{R^3 X_e}{|Z|} (1-X_e B)$$



Şekil 8.15 Reaktif kompanzaasyona göre hat sonu gerilim duyarlılığını geliştirmede kullanılan eşdeğer devre

Kompanzatör kazancı

Şekil 8.14'deki kontrol sisteminin kapalı çevrim transfer fonksiyonu;

$$\frac{B}{U_{ref}} = \frac{1}{K_p} \cdot \frac{1}{1 + sT_{eq}} \quad (8.6)$$

Burada T_{eq} , cevap zaman gecikmesidir.

$$T_{eq} = \frac{T_i}{K_a \cdot K_p} \quad (8.7)$$

(8.7) denklemi, makul bir cevap zaman gecikmesi elde etmek için K_p ile aynı adımlı regülatör kazancı (K_a) ayarlamasının önemini ifade eder. Önceki analizde K_a değerleri, $1/K_p$ 'ye adapte edilmişti.

Şekil 8.5 'de gösterilen güç sisteminin bir çalışma durumu için K_p 'nin hesaplanması ve böylece K_a 'nın bulunması aşağıdaki örnekte verilmiştir.

Veriler:

-130 kV, 625 km iletim sistemi

$$\text{-Yük: } P = c_p U_r^{n_p}, \quad Q = c_q U_r^{n_q}$$

Burada $n_p=1, n_q=2$ ve c_p, c_q sabitlerdir.

130 kV'ta 100 MVA per unit bazıyla beraber,

$$X_e = 1.51 \text{ pu}$$

$$P = 0.36 \text{ pu}$$

$$U_s = U_r = 1.0 \text{ pu}$$

Hesaplama:

$$P = c_p U_r \text{ olarak, böylece,}$$

$$R = \frac{U_r}{r_p} = \frac{1}{0.36} = 2.8 \quad (8.8)$$

$$\frac{dR}{dU_r} = \frac{1}{c_p} = \frac{1}{0.36} = 2.8$$

$$P = \frac{U_s U_r}{X_e} \sin \delta \quad (8.9)$$

$U_s = U_r$ olarak, yük endüktif kısmının, iletim süseptansı ve kompanzatör süseptansının bileşke süseptansı,

$$B = P \tan \frac{\delta}{2} \quad (8.10)$$

ile verilir. (8.9)'dan $\delta = 33^\circ$ ve (8.10)'dan $B = 0.106 \text{ pu}$ bulunur.

Böylece,

$$|Z| = \sqrt{R^2 (1 - x_{eB})^2 + x_e^2} = 2.8 \text{ pu}$$

$$f_R = 0.82 \text{ pu}$$

$$f_B = 9.94 \text{ pu}$$

$$K_P = \frac{f_B}{|Z|^2 - f_R \frac{dR}{dU_r}} = 1.8 \text{ (pu/pu)}$$

ve

$$K_a = 0.56 \text{ (pu/pu)}$$

Sonuç olarak, radyal güç iletim hatlarının yüklenebilirliğini attırmada bu hatların sonuna konulan kontrol edilebilir VAR kompanzator SVC 'nin etkinliği gösterilmiştir. Uzun mesafe güç iletim verimliliğini daha iyi yapmada destek sağlayacağı umulur.

8.4 TRİSTÖR KONTROLLU REAKTİF GÜÇ İLE İLETİM KAPASİTESİNİN İYİLEŞTİRİLMESİ

Bu yazı, tristör kontrollu reaktif gücün büyük güç sistemlerinin sönümünü iyileştirmede etkili bir alet olarak kullanılabileceğini gösterir. Eğer tristör anahtarlama kondansatörler kullanılırsa, ek olarak, bu kullanım geçici kararlılığa pozitif yardımda bulunacaktır. Sönümlerin ciddi faktör teşkil ettiği güç sistemlerin örnekleri araştırılmış ve ilave generatör kontrolü ve reaktif güç kontrolünün kullanımı incelenmiştir.

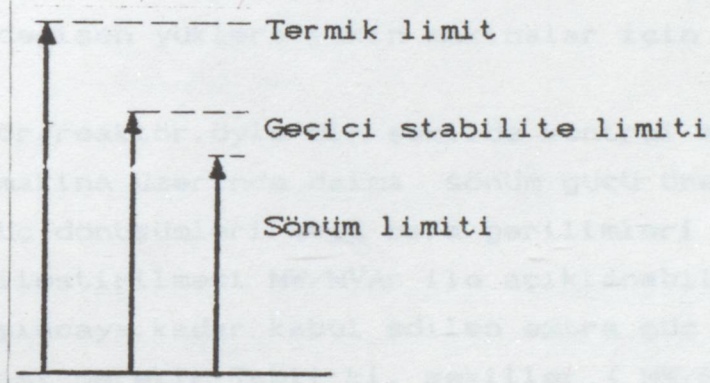
Bir güç sisteminin transfer kapasitesini belirlerken, güç salınımlarının sönümü temel faktördür. Öncelikle sistem normal işlem altında pozitif sönüme sahip olmalıdır. Ayrıca sönüm, şebeke arızalarından sonra, güç sistemini kararlı çalışma durumuna geri getirmede de başarılı olmalıdır. Bir çok durumda sönüm kritik değildir. Termik limitler veya geçici kararlılık boyutlandırılabilir. Bununla beraber burada sönümü ve nasıl iyileştirilebileceği incelenecektir. Sönümün tehlikeli olduğu şebeke örnekleri verilecektir.

Enterkonnekte Nordel sistemi, yerleşik bulunan 60000 MVA kapasitesiyle İsveç, Fillandiya, Norveç ve Danimarka milli sistemlerinden oluşmuştur. Ortak Nordel planlama kriterleri, bir şebekenin, kararlılık kaybı ve yük atımı olmaksızın, belirli tipteki (tek kutup hat arızaları, bara arızaları ve generatör tripping vb.) arızalara dayanmasını ister. Bu ölçüt hem sönümün hem de geçici kararlılığın yeterli olması anlamına gelir.

Genişleyen Nordel güç sisteminin bazı safhalarında sönüm kritik bir faktördür. 60'lı yıllarda bağ-hatları çoğunlukla kıyaslanamayacak kadar zayıftı ve sönüm kötüydü. Küçük bozucu etkiler bile sönümsüz salınımlar oluşturabiliyordu. Şimdi bağlar daha kuvvetlendi. Ancak hala sönüm, yakın gelecekte şebekenin genişlemesi benzer olmaksızın büyük birimler, birçok bölgede kurulurken hala kritik olacağı görünüyor. Ciddi şebeke arızalarından sonra özel ölçümler alınmazsa sistemin uzak bölgeleri arasındaki sönüm başarısız olacaktır.

Sönüm tehlikeli bir faktör olduğu zaman , güç transfer limiti şekil 8.16'da gösterildiği gibi belirlenir. Sonra şu soru ortaya çıkar; Sistemin sönümünü iyileştirmek için hangi ölçümler alınabilir? Sırayla şunlar söylenebilir:

- Sönüm yeni hatlar inşa etmeksizin kontrol metodlarıyla iyileştirilebilir.
- Böyle metodlar, generatörün uyarma sisteminde ilave kontrol sinyalleri olabilir.
- Tristör tekniği büyük kondansatör banklarının ve reaktörlerin kontrol edilmesini sağlar. Bunlar güç sisteminin sönümünü iyileştirmek için etkili araç olarak kullanılabilir. Bununla beraber geçici kararlılığa ulaşmada pozitif katkıları vardır.



Şekil 8.16 Transfer kapasite limiti

8.4.1 SÖNÜMÜN TRİSTÖR KONTROLLU KONDANSATÖRLER VE REAKTÖRLER İLE İYİLEŞTİRİLMESİ

Küçük sönüm gücü

Büyük bir enterkonnekte güç sisteminde, örneğin 50.000 MVA kurulu, bozukluklardan sonraki salınımlar tepeden tepeye 1.000 MW civarında olabilir. Generatör damper sargıları, regülatör ve gerilim kontrolünden gelen sönüm güç katkıları çok küçüktür. Toplam olarak yeterli sönüm gücü tepeden tepeye 50-100 MW civarındadır. Şu halde, şebekenin toplam kapasitesiyle karşılaştırılırsa , sadece küçük miktarda sönüm gücü oluşturulmalıdır.

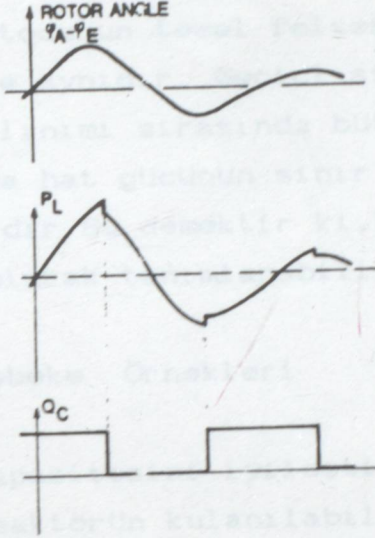
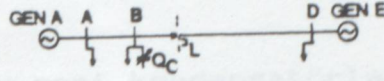
Sönüm, TSC/TCR ile nasıl gerçekleştirilir?

Reaktif elemanların birleşimi, gerilimi ve böylece sistem generatörlerini etkileyecektir. Prensipte olarak TSC/TCR ile gerçekleştirilen sönüm katkıları aşağıdaki gibidir:

1. adım: Bir kondansatör/reaktörün anahtarlama, sistem gerilimini ani olarak etkileyecektir
2. adım: Generatörlerin elektriksel çıkışları hemen iki yolla değiştirilir; ya transfer şebeke geriliminin değiştirilmesi gibi direkt olarak (iki generatör içeren şebekte $P = E_1 E_2 \sin \phi / X$ ifadesini kıyaslayın) veya ikinci olarak yüklerin, gerilim değişiminden etkilenmesi dolayısıyla. İkinci durumda generatör elektrik çıkışı, değişen yüklere yakın makinalar için en etkili olacaktır.
3. adım: Kondansatör/reaktör, öyle bir şekilde kontrol edilmelidir; osilasyon yapan makina üzerinde daima sönüm gücü üretir. Çoğu durumlarda hat güç dönüşümleri veya bara gerilimleri kullanılabilir. Sönümün iyileştirilmesi MW/MVar ile açıklanabilir. Bu, sönüm limitine ulaşıncaya kadar kabul edilen extra güç transferi olarak yorumlanması gerekir. Tabii ki, şekiller (MW/MVar), ya komple bir şebeke veya bozulmuş bir şebekenin servis dışı hatlarlar birlikte düşünüldüğüne bağlı olarak değişebilir.

TSC/TCR 'nin kontrol metodu

Yukarıda açıklanan sonuçlara ulaşmak için, TSC/TCR nasıl kontrol edilmesi gerekir? İlk önce sistemin davranışını tanımlayan uygun bir kontrol sinyali kullanılmalıdır. Kontrol metodu, osilasyonun doğru anlarında sinyali ve anahtarlama sırasını analiz edebilmelidir. Bir metod, aşağıda açıklanmıştır. Ana fikir, birkaç şekilde gösterilmiştir. Çok basit iki enterekte makina şebekesini ele alalım (şekil 6). Kontrol edilebilir kondansatör bankı, TSC, 8 barasına yerleştirilmiştir. Bunun üç aşamada kontrol edileceği varsayılır. Kontrol sinyali, transfer gücü, P_L , dir,



Şekil 8.17 Kontrol metodunun prensipleri

Mode 1. Normalde küçük osilasyonlar oluştuğunda, kondansatör bankı V_B gerilimine göre anahtarlanır yani yavaş bir reaktif back-up olarak hizmet görür.

Mode 2. Güç salınımı başladığında yani dP/dt türevi pozitif ve belli bir değer olan D_2 'nin ötesinde olduğu zaman, kondansatör, her 0,04 saniyede bir kademeye bağlanır.

Mode 3. Takipden salınımlar süresince bir veya birkaç kondansatör kademesi P maksimuma ulaştığı zaman ayrılır, P minimuma ulaştığı zaman tekrar bağlanırlar. Extrem değer geçilmiş olduğundan emin olmak için bir $|dP/dt|$ şartı kullanılabilir. Tekrar bağlanacak kademe sayısı, osilasyonun büyüklüğüne, örneğin, en son tepeden tepeye değer, bağlıdır. Bu bağlama sırası ile sönüm, iyileştirilir.

Mode 4. Giriş sinyali bozulmalarında TSC'nin istenmeyen çalışmasını önlemek için özel filtreleme yapılmalıdır. Örneğin; çok büyük türevler, $|dP/dt| > D_1$, ihmal edilebilir.

Tanımlanan metod ile sönüm, iyileştirilebilir (mode 2

ve 3).Eğer kondansatörler kullanılırsa,geçici stabilite de hafif derecede iyileştirilebilir.

Kontrollu seri kondansatörler

Kontrol metodunun temel felsefesi , birçok yönden şönt kondansatörler ile aynıdır. Geçici stabiliteyi arttırmak için, P_L 'nin ilk güç salınımı sırasında bütün bank bağlanmalıdır.Salınımlar esnasında hat gücünün sınır değerlerinden sonra,anaharlama yapılmalıdır.Bu demektir ki,kontrol metodu,sürekli bir bangbang metodu olarak tanımlanabilir.

Şebeke Örnekleri

İletim kapasitesini iyileştirmek için tristör kontrollu kondansatör/reaktörün kullanılabildiği iki tip şebeke sunulur. Birinci durumda şebeke, güç kuruluşu ile kıyaslanan zayıf bağlı tipik bir enterkonnekte güç sistemidir.İkinci durumda,şebeke bir ağgözlü ve uzun mesafeli transfer şebekesidir.

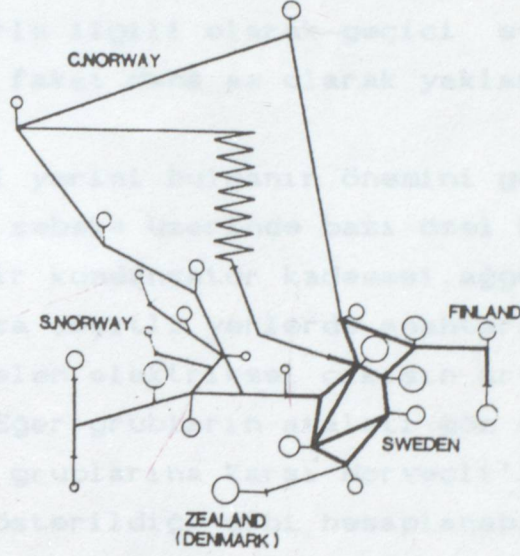
Hesaplamalar,bir geçici stabilite komputer programı ile yapılmıştır.

1. Zayıf bağlı hatlarla enterkonnekte güç sistemi

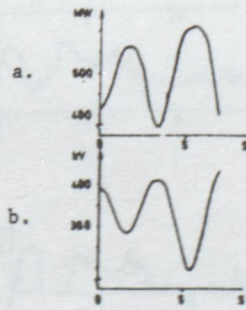
1960'larda Nordel sistemi,nispeten zayıf bağlara sahipti.Diğer taraftan merkezi İsveç sistemi,oldukça iyi ağgözlüydü. Toplam sistemin nitelikleri,şebekenin basitleştirilmiş reaktans diyagramıyla açıklanır (şekil 8.17). Bu sistemde güney Norveç-İsveç ve Zealand-İsveç bağ hatlarının sönümü ve geçici kararlılığı sınırlandırılmıştır.

Güney Norveç'e ait bağ-hattı,400 kVluk bir hattır.Çalışılan durumda sönüm,çok zayıftır.Bozulmamış şebekenin kararlı-hal limiti yaklaşık 300-400 MW 'tır. Eğer Norveç'te 140 MW lık bir yük ayrılırsa yaklaşık 300-400 MW lık güç transferlerinde şekil 8.18 ' de gösterildiği gibi sönümsüz salınımlar başlar. Osilasyon frekansı,yaklaşık 0,35 Hz'dir.

Eğer Norveç'te başlatılan yükün 10 kademe 300 MW'lık bir TSC yerleştirilirse önceki şekil 8.18'de gösterildiği gibi önemli ölçüde iyileştirilebilir. Yaklaşık 300 MW extra güç transfer edilebilir yani iyileştirme yaklaşık 1 MW/MVA'dır. Ciddi geçici arızaların önlenmesi için geçici stabilite için de iyileştirilebilir fakat bu kadar yaklaşıp 0.9 MW/MVA'dır.



Şekil 8.17 Birinci durumlu şebekenin basitleştirilmiş reaktans diyagramı (Nordel şebekesinin ilk durumu)

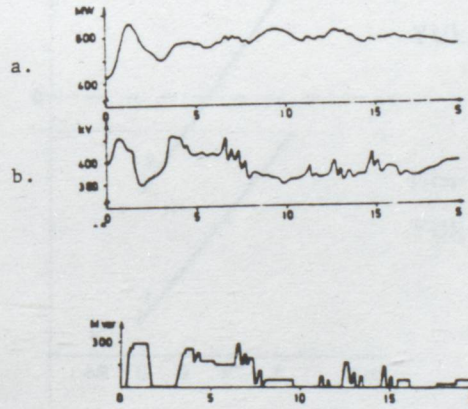


Şekil 8.18 140 MW yük atımından sonraki osilasyonlar (Norveç'te)

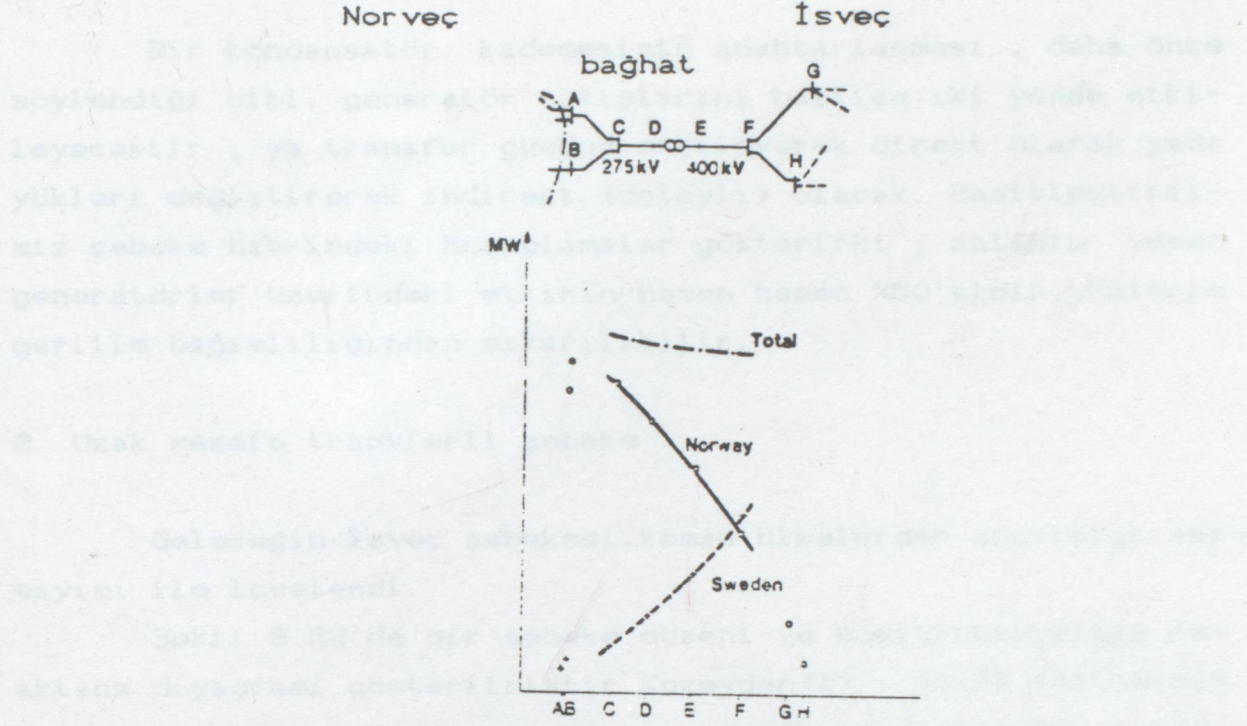
- a) Bağıhat gücü
- b) Bağıhat ucundaki gerilim

Eğer Norveç 'te bağ hattına yakın 10 kademeli 300 MVar bir TSC yerleştirilirse sönüm, şekil 8.19 'da gösterildiği gibi önemli ölçüde iyileştirilebilir. Yaklaşık 300 MW extra güç transfer edilebilir yani iyileştirme yaklaşık 1 MW/MVar'dır. Ciddi geçici arızalarla ilgili olarak geçici stabilite limiti de iyileştirilebilir fakat daha az olarak yaklaşık 0,3 MW/MVar'dır.

TSC'nin en iyi yerini bulmanın önemini göstermek için , basitleştirilmiş bir şebeke üzerinde bazı özel hesaplar yapılmıştır. 20 MVar'lık bir kondansatör kademesi, ağgözlü şebekelerde ve bağhattı boyunca çeşitli yerlerde anahtarlanmıştır. Generator gruplarından gelen elektriksel çıkışın artışı, şekil 8.20 de gösterilmiştir. Eğer grubların ataleti göz önüne alınırsa, İsveçli'lerin makina grublarına karşı Norveçli'lerin bağlı ivmesi şekil 8.21'de gösterildiği gibi hesaplanabilir. Örneğin bu şekil gösterirki; D'de kurulu TSC/TCR , F 'de kurulu olanından yaklaşık 2-3 defa daha etkilidir.

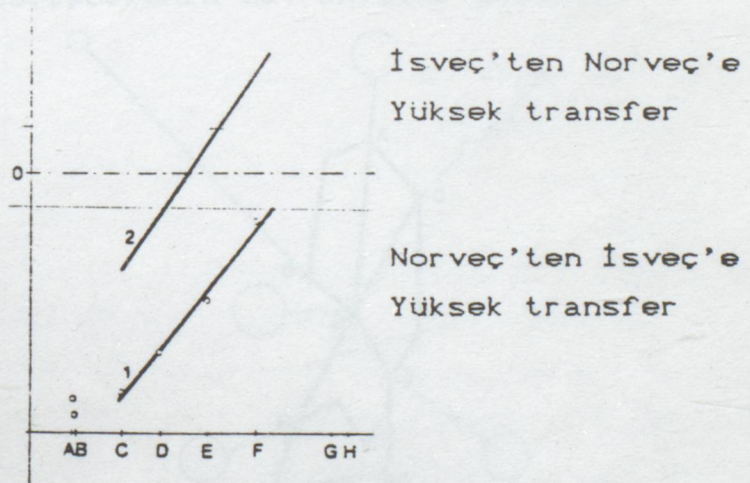


Şekil 8.19 Norveç'te bağ hattına yakın TSC'li (300 MVar) 140 MW yük atımından sonra osilasyonlar
a) Bağhat gücü
b) Bağ hattı ucundaki gerilim
c) Reaktif güç



Sekil 8.20 Bir 20 MVar kondansatör A,B,... baralarına bağlandığında,generator çıkışının ani değişimi

Bağıl ivme (Norveç-İsveç)



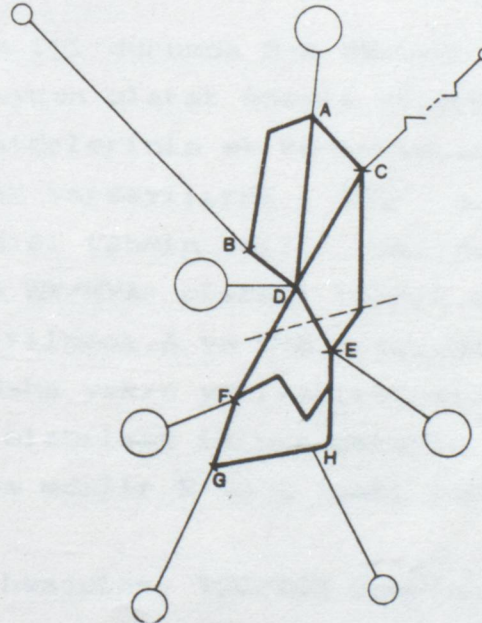
Sekil 8.21 Eğer 20 MVar kondansatör A,B,... baralarına bağlanırsa İsveç'tekilerine karşı Norveç'teki generatörlerin bağıl ani ivmesi

Bir kondansatör kademesinin anahtarlanması , daha önce söylendiği gibi, generatör çıkışlarını başlıca iki yönde etkileyecektir ; ya transfer gücünü etkileyerek direkt olarak yada yükleri değiştirerek indirekt (dolaylı) olarak. Basitleştirilmiş şebeke üzerindeki hesaplamalar gösterirki ; salınım yapan generatörler üzerindeki etkinin hemen hemen %50'sinin, yüklerin gerilim bağımlılığından çıkarılabilir.

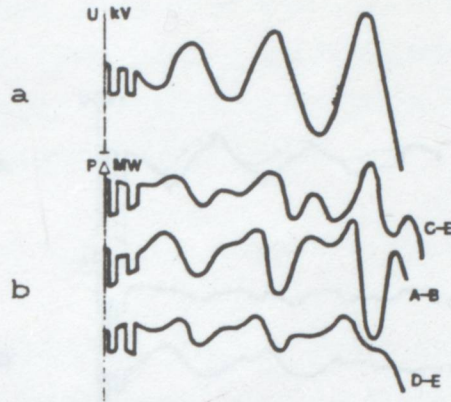
2. Uzak mesafe transferli şebeke

Geleceğin İsveç şebekesi, komşu ülkelerden ayrıldığı varsayımı ile incelendi.

Şekil 8.22'de bir şebeke düzeni ve basitleştirilmiş reaktans diyagramı gösterilmiştir. Kuzeyden (A) , (E+F) sisteminin merkezi kısmına kadarki transfer yeteneği incelenmiştir. D bölgesinde bir şebeke arızası olma durumunda , ana osilasyonlar A ve D+E arasında vuku bulacaktır. İncelemeler gösterir ki; küçük geçici arızalar durumunda, tek kutup hat arızaları gibi, eğer sorun herhangi bir yolla iyileştirilmez ise tehlikeli bir faktör olacaktır. Şekil 8.23, şebekenin davranışını gösterir.



Şekil 8.22 İkinci durumdaki şebekenin basitleştirilmiş reaktans diyagramı (gelecekteki, bağısız İsveç modeli)



Şekil 8.23 PSS ve TSC/TCR 'siz D bölgesinde hat arı-
zasından sonraki osilasyonlar
a)C bölgesindeki gerilim
b)Hat transferleri

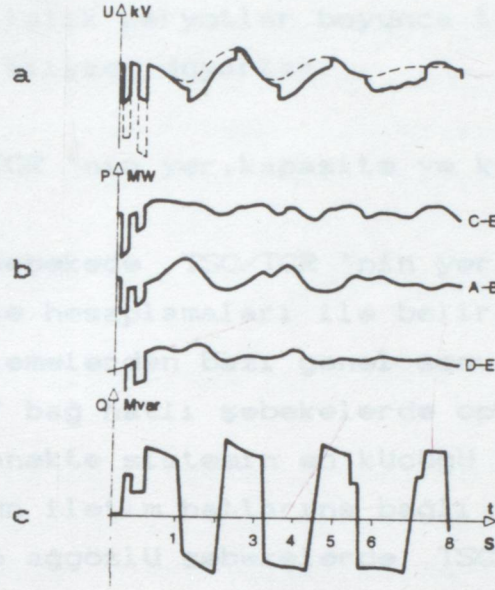
Güç sistemi stabilizatörlerinin (PSS) büyük bir bölümü sönümü iyileştirmede çok faydalıdır. Tercihen A'da kurulmaları lazımdır.

TSC ile sönüm, en iyi durumda 3-4 MW/MVar 'lık daha yüksek güç transferlerine uygun olarak önemli ölçüde iyileşir. Fakat eğer gerilim regülatörlerinin ek kontrolü, sönümü iyileştirmek için esas yol olarak varsayılırsa, TSC 'nin sönümü, 1-2 MW/MVar daha iyileştirdiği tahmin edilir. Geçici stabilitenin artışı, yaklaşık 0,2-0,4 MW/MVar olacağı tahmin edilir.

TSC'nin yerleştirilmesi, A ve D+E arasında bir yerde olmalıdır. Tercihen A'ya daha yakın yerleştirilmesi gerekir. Geçici stabiliteye faydalı olabilmek için, şebekenin zayıf bölümündeki yerleştirme tavsiye edilir. B ve C 'deki yerleştirmeler avantajlı olabilir.

Şekil 8.24'deki hesaplar, TSC/TCR kombinasyonun, C bölgesinde yerleştirildiği ve kullanıldığı durumu gösterir. Bara gerilimi, sistemin ana parçaları arasındaki osilasyonları gösterdiği için kontrol sinyali olarak kullanılır. Tek bir hattın

P_L gücü, yerel makinelerin osilasyonlarını içerir ve uygun değildir.



Şekil 8.24 C bölgesindeki TSC/TCR ile D bölgesinde hat arzasından sonra osilasyonlar

a) A bölgesindeki (çizgili) ve C bölgesindeki gerilim

b) Hat transferleri

c) Reaktif güç

Kontrol edilebilir seri kondansatörler de incelenmiştir. D'den F+E'ye kadar bütün büyük hatlar üzerindeki kondansatör banklarının 1/3 'ünün kontrol edilebilmeye sahip olduğu varsayılmıştır. Sonuçlar, sönüm üzerinde önemli ölçüde etki gösterir. Eğer kondansatörler yerel güç hattı tarafından kontrol edilirse, çeşitli hatlar ve kondansatörler birbirini bozarlar. Ortak kontrol sinyali bu problemi çözecek ve sönüm iyileştirmesi, MW/MVar olarak ifade edilen şönt kondansatörlerin ki kadar iyi olacaktır. Bununla beraber banklara böyle bir kontrol sinyalinin iletimi gerçekçi olmayan bir çözümdür. Büyük kontrol-edilebilir stand-by kondansatörlere sahip birkaç önemli hattın kontrol edilmesi daha pratik olacaktır.

Geçici stabilite, seri kondansatörlerle, stand-by çalışma halinde sağlanan şönt kondansatörlerden daha çok etkili bir şekilde iyileştirilebilir. Anahtarlanabilir seri kondansatörler, birkaç dakikalık peryotlar boyunca tam yük için sadece boyutlandırılma ihtiyacı duyarlar.

TSC/TCR 'nin yer, kapasite ve kontrol seçimi

Bir şebekede TSC/TCR 'nin yerleşim yeri normalde dinamik stabilite hesaplamaları ile belirlenir. Fakat burada tercih edilen incelemelerden bazı genel sonuçlar çıkarılabilir.

Zayıf bağ hatlı şebekelerde optimal yerleşim, tercihen iki enterkonnekte sistemin en küçüğü içinde bağ hattına yakın olanıdır. Uzun iletim hatlarına bağlı zayıf sönümlü makina gruplarına sahip ağgözlü şebekelerde TSC/TCR 'nin en iyi yerleşim yeri, iletim bölümünde fakat osilasyon yapan makina grubuna yakındır. TSC/TCR birimlerinin, ayrı baralara bağlı iki gruba ayrılması tavsiye edilir. Eğer TSC/TCR yerleşim yerine yakın bir yük bölgesi varsa, kontrol daha etkili olacaktır.

Geçici stabilitede en iyi etki, TSC (TCR değil)'nin bara geriliminin şebeke bozulmalarına duyarlı olduğu iletim sisteminin bir kısmında yerleştirildiği zaman sağlanır.

TSC/TCR 'nin tipik kapasitesi 100-400 MVar'dır. TSC kullanıldığı zaman 3-5 kademeye bölünmesi gerekir.

Kontrol sinyalleri

TSC/TCR'ye kontrol sinyali ana şebekeden sağlanmalıdır. Bağ-hattı problemleri durumunda bağ-hattının aktif güç transferi çoğu kez uygundur. Ağgözlü sistemde bu, daha karmaşıktır. Bara gerilimi, sistemin esas osilasyonunu takip edecektir. Bazı şehirlerarası hatlar üzerindeki aktif güç toplamı da kullanılabilir. Gerilimin kullanılması durumunda, kondansatör anahtarlama ve reaktör kontrolünden gelen geri-beslemeyi önlemek için extra dikkat gösterilmelidir.

Diğer faktörler

Genellikle büyük türbin generatörleri ve şebeke arasındaki senkronaltı rezonans, SSR, bazı özel şartlar altında oluşur. Bize göre, TSC/TCR 'nin kontrol metodu, SSR 'nin herhangi bir riskine sebep olmaz. Sadece tristör anahtarlama seri kondansatörler kullanıldığı zaman bazı riskler vardır. Bunların anahtarlama, türbin generatörleri ile rezonansa sebep olan güç sisteminin rezonans frekansını değiştirecektir.

Kararlılığı iyileştirmek için farklı yöntemlerin kıyaslanması

Yeni hatlar kurarak şebekenin genişlemesi, transfer kapasitesini arttırmak için en doğal yoldur. Fakat ekonomik ve çevresel düşüncüler başka yollar bulmayı önemli hale getirmiştir. Kararlılığın, özellikle sönümün, sınırlama faktörü olduğu durumda aşağıda tablo'da gösterildiği gibi bazı metodlar bulunabilir.

Metod	İyileştirme	
	geçici stabilite	sönüm
Güç sistem stabilizatörü (SSR)	0 veya (-)	+++
Senkron komp. (normal kontrol)	+	0 veya +
Senkron komp. (özel kontrol)	+	++
TSC	+	++++
TCR	0	+++
Seri kondansatör (statik)	++	+
Seri kondansatör (Tristör anahtarlama)	++	+++

Güç sistem stabilizatörleri (PSS), gerilim regülatörlerine ek bir sinyal üretirler ve generatör çıkışında sönüm gücü yaratılır. Bu alet kıyaslanabilir derecede ucuz ve makinalar veya makina grupları arasındaki osilasyonların sönümünü iyileştirmek için temel metod olarak kullanılması gerekir.

Senkron kompanzatörler, başlıca hem şebekenin normal çalışması hem de bozulmalarında gerilim seviyesini kontrol etmek için kullanılır. Bununla beraber böyle kompanzatörün PSS tarafından özel kontrolü incelenmiştir. Bu durumda PSS, bir bağ-hat gücü ile kontrol edilmiştir. Büyük dahili zaman sabitlerinden dolayı kompanzatörün hızlı cevabı sınırlanmıştır. Başka sebeplerden dolayı eğer kompanzatörün ekonomik olduğu düşünülürse bir senkron kompanzatörün böyle özel kontrolü tavsiye edilir. Eğer birincil kullanımı, sönümün iyileştirilmesi ise statik kompanzatörün gözönüne alınması gerekir.

Tristör kontrollü kondansatörler/reaktörler (TSC/TCR) yukarıda fazlaca tartışıldı. Bunlar, eğer sönüm büyük problem ise düşünülmelidir. Kondansatörler bir dereceye kadar geçici stabiliteyi de iyileştirecektir.

Tristör kontrollü seri kondansatörler, eğer hem sönüm hem de geçici stabilite iyileştirilecekse düşünülmelidir. Ayrıca seri kondansatörlerin statik bankları önceden kurulmuşsa veya planlanmışsa kullanımları en doğalıdır.

Sonuç olarak sönümün, transfer kapasitesinde kritik faktör olduğu güç sistemleri incelenmiştir. Örnekler, Nordel ve İsveç güç sistemlerinden alınmıştır. Büyük güç sistemlerinde sönümü ve geçici stabiliteyi iyileştirmek için kontrollü reaktif güç uygulamaları incelendi ve diğer metodlarla kıyaslandı. Kısa sonuçlar çıkarılabilir:

-Bir güç sisteminde sönümü iyileştirmek için temel yol, generatör gerilim kontrolüne ait ek sinyallerin kullanımıdır. Bunlar, güç sistem stabilizatörleri (PSS) olarak da adlandırılır. Fakat onun katkısı, frekans sahasına bağlı olarak sınırlanır.

-Tristör kontrollü kondansatörler ve reaktörler, TSC/TCR, hem zayıf bağ-hatlı güç sistemlerinde hem de uzun mesafe transfer

şebekelerinde sönümü iyileştirmek için çok iyi bir metod olabilir. İncelemeler, 1-2 MW/MVar 'lık bir iyileştirme gösterir. Bu, TSC/TCR 'nin kurulu MW/MVar başına sönüme bağlı olarak izin verilen extra MW transferi olarak yorumlanır.

-Tristör anahtarlama kondansatörler, TSC ,geçici stabiliteye de pozitif katkı vereceklerdir. İyileştirme, ciddi geçici arızalarda 0,2-0,3 MW/MVar olabilir.

-Tristör anahtarlama seri kondansatörler hem sönümü hem de geçici stabiliteyi iyileştirir. Sönümün etkili olduğu kontrolden emin olmak için kontrol stratejilerine özel dikkat gösterilmesi gerekir.

8.4.2 STABİLİTE AMAÇLARINA İLİŞKİN SVC UYGULAMA ÇALIŞMALARI

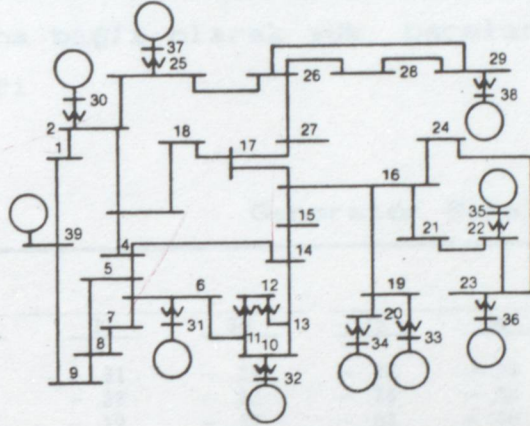
Statik VAR kompanzatörleri aracılığı ile sistem stabilitesinin gelişme imkanı, New England Test Sistemi olarak adlandırılan şekil 8.25 'in çalışma sistemi kullanılarak gösterilebilir.

Açıklanacak çalışma sonuçları, statik VAR kompanzatörlerinin sonucu olabilecek arttırılmış geçici stabilite sınırları ve eşzamanlı güç akış osilasyonlarının kararsız modları için iyileştirilmiş sönümü gösterir. Bu çalışmalar ayrıca SVC 'lerin yerleşim yerleri, regülasyon eğimleri, tepe reaktif güç ihtiyaçları ve yardımcı kontroller içeren genel spesifikasyonlarının geliştirilmesinde faydalı analitik metodlar gösterir. Metodlar, gerilim duyarlılık hesaplamaları, eigenvalue hesaplamaları ve zaman-domeni stabilite hesaplamaları gerektirir.

Gerilim hassasiyet hesaplamaları

Zayıf gerilim regülasyonun olduğu baraları tesbit etmek kararsızlığa katkıda bulunabilir. Generatördeki artan değişimlere eşlik eden artan bara gerilim değişimlerini bilmek istenen durumdur. Böyle değişimler, yükler ve generatörlerle ilgili aktif ve reaktif güç lineer yaklaşımlar kullanarak çözülmüş yük akışından gelen herhangi bir çalışma durumu için hesaplanabilir.

Sunulan sonuçlar, mükemmel olarak regüle edilmiş ve bu yüzden sabit olan generatör uç bara gerilimine izin vermesi gerekir. Yükler, empedanslar gibi ele alınmıştır.



Şekil 8.25 New England Test System 'i için tek hat diyagramı

Çalışma sisteminin gerilim duyarlılığı, artan oranlar içeren ve belirli bir çalışma durumu için tablo 1'de gösterilmiştir.

$$r_{1K} = \Delta V_I / \Delta P_K, I=1,2,\dots,29; K=30,31,\dots,39 \quad (8.11)$$

Negatif bir oran, güçteki bir artım için gerilimde bir düşme belirtir.

Tablo 1'deki oranlarla, stabilite davranışı arasında kesin bir bağlantı yoktur. Bununla beraber bu oranlar, kararlılığı iyileştirmede muhtemel faydalanmayı sağlayacak SVC 'nin yerini gösterir. Örneğin, 38 barasındaki üretimde bir yükselmeye eşlik eden 26, 27, 28 ve 29 baralarındaki oldukça büyük gerilim düşümleri, bu baralardaki daha iyi regülasyonun, 38 barasındaki generatörün stabilitesini önemli ölçüde etkileyeceği anlamına gelir. Gerilim regülasyonunu ters olarak etkileyen çalışma değişiklikleri, tablo 1'den açıkça görülür. Böylece 26, 27, 28 ve 29 baralarındaki oldukça kötü regülasyon, 38 barasındaki üretim se-

viyesini tablo 1'e uygun olarak 830 MW 'ın üzerine arttırılmasıyla muhtemelen kötüleşecektir. (38) barasındaki üretimin daha yüksek seviyeleri için, 26,27,28 ve 29 baralarındaki artan gerilimin 38 barasında artan gerilime oranı tablo 2'de gösterilmiştir.

Tablo 1- 1000 MW başına % olarak generatör baralarında güç artışlarına bağlı olarak yük baralarındaki gerilim değişimleri

Yük Baraları	Generatör Baraları									
	30	31	32	33	34	35	36	37	38	39
1	-.27	.05	-.04	-.31	-.29	-.32	-.33	-1.14	-.81	.88
2	.36	.18	.07	-.27	-.22	-.28	-.32	-2.04	-1.37	.53
3	-.11	-.05	-.25	-.59	-.50	-.62	-.70	-1.35	-1.17	.26
4	-.08	-.74	-1.09	-.63	-.56	-.66	-.72	-.64	-.66	.18
5	-.09	-1.13	-1.30	-.53	-.48	-.55	-.60	-.43	-.47	.23
6	-.09	-1.15	-1.32	-.52	-.47	-.54	-.58	-.39	-.44	.22
7	-.10	-1.13	-1.28	-.52	-.48	-.54	-.58	-.40	-.45	.26
8	-.11	-1.11	-1.25	-.53	-.49	-.55	-.59	-.40	-.45	.26
9	-.10	-.58	-.63	-.30	-.28	-.31	-.32	-.22	-.25	.14
10	-.06	-.73	-1.51	-.48	-.43	-.50	-.55	-.33	-.39	.14
11	-.08	-.85	-1.52	-.51	-.46	-.53	-.58	-.36	-.42	.17
12	-.06	-.78	-1.48	-.51	-.45	-.53	-.58	-.35	-.41	.15
13	-.07	-.77	-1.53	-.55	-.48	-.57	-.63	-.38	-.44	.12
14	-.07	-.71	-1.32	-.73	-.64	-.77	-.85	-.47	-.57	.12
15	-.09	-.29	-.59	-1.25	-1.06	-1.31	-1.48	-.41	-.68	.09
16	-.07	-.15	-.33	-1.39	-1.16	-1.47	-1.68	-.36	-.69	.09
17	-.14	-.14	-.31	-1.11	-.94	-1.17	-1.33	-.59	-1.20	.08
18	-.12	-.10	-.29	-.95	-.81	-1.00	-1.12	-.87	-1.20	.16
19	-.03	-.06	-.13	-1.52	-.88	-.55	-.63	-.14	-.26	.03
20	-.01	-.03	-.06	-.76	-.95	-.28	-.31	-.07	-.13	.02
21	-.02	-.08	-.20	-.93	-.77	-2.01	-2.13	-.23	-.46	.08
22	-.00	-.03	-.10	-.50	-.41	-1.57	-1.81	-.12	-.24	.05
23	-.01	-.04	-.11	-.52	-.43	-1.50	-2.32	-.12	-.25	.05
24	-.05	-.12	-.28	-1.26	-1.05	-1.71	-2.08	-.32	-.63	.09
25	-.94	-.40	-.43	-.34	-.30	-.35	-.39	.57	-.25	-.45
26	-.55	-.18	-.24	-.41	-.33	-.44	-.51	-.26	-2.78	-.20
27	-.38	-.11	-.22	-.64	-.52	-.68	-.79	-.47	-2.20	-.06
28	-.28	-.09	-.12	-.21	-.17	-.22	-.25	-.13	-3.71	-.10
29	-.18	-.05	-.08	-.14	-.11	-.14	-.17	-.08	-3.16	-.06

Tablo 2- 1000 MW başına % olarak 26,27,28 ve 29 baralarının-
daki artan gerilimin, 38 barasındaki artan gerilime
oranları

(38) barasındaki üretim					
Bara	830MW	1080MW	1330MW	1580MW	
26	-2,78	-5,12	-8,01	-12,19	
27	-2,20	-4,01	-6,23	-9,45	
28	-3,71	-6,21	-9,31	-13,72	
29	-3,16	-5,18	-7,71	-11,32	

Oldukça kötü gerilim regülasyonu, zorunlu olarak yeterli olmayan stabilite davranışı anlamına gelmez. Bununla beraber bu sistem , 38 barasındaki daha yüksek üretim seviyeleri ile birlikte kararsız osilasyon moduna sahiptir. 38 barası yakınında iletim hattı arızası için geçici stabilite performansı , 38 barasının daha düşük üretim seviyelerin de bile şüpheli durumdadır. Bu durum, SVC aracılığı ile gerilim regülasyonun stabilite faydalarını tecrübe etmek için bir fırsat sağlar.

Bu çalışmada 26,27,28 ve 29 baralarında SVC için regülasyon eğimi, tablo 3'de listelendiği gibidir ve

$$|h| = 1.33/X_{SC}$$

formülünden elde edilir. Burada 1.33 sabiti keyfi olarak seçilmiş olup kritik olarak göz önüne alınmaz.

SVC'lerin etkilerini gösteren artan gerilimin artan üretime oranları, tablo 4'de gösterilmiştir.

Tablo 3- 26,27,28 ve 29 baralar sistemine uygulanan SVC için kısa devre reaktansı ve regülasyon eğimi

Bara Numarası	100 MVA baz üzerinde per-unit olarak X_{SC}	Regülasyon eğimi MVAR/Yüzde Gerilim
26	0,0225	59,11
27	0,0227	58,59
28	0,0375	35,47
29	0,0329	40,43

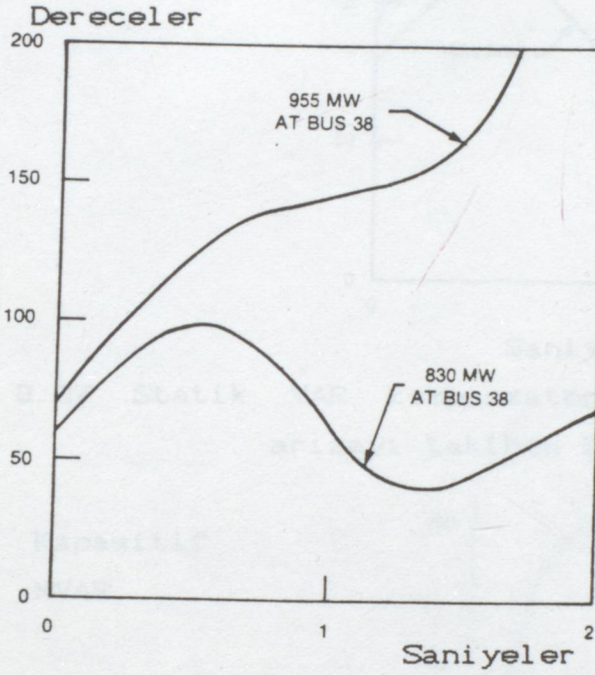
Tablo 4- 1000 MW başına % olarak 26,27,28 ve 29 baralarındaki artan gerilimin 38 barasındaki artan gerilime oranları

Bara	(38) barasındaki üretim			
	830MW	1080MW	1330MW	1580MW
26	-0,91	-1,71	-2,56	-3,60
27	-0,60	-1,70	-1,57	-2,16
28	-1,43	-2,29	-3,23	-4,35
29	-1,49	-2,32	-3,25	-4,36

Zaman domeni stabilite hesaplamaları

Sunulacak stabilite sonuçları, 26 barasında bir üç-faz arızası için (38)barasının geçici stabilite sınırı ile ilgilidir. Bu çalışmalar, 26,27,28 ve 29 baralarında SVC 'lerin sonucu olabilen geçici stabilite sınırındaki artımı ve bu baralardaki kontrollü reaktif güç ihtiyacını belirlemek için yapıldı. Regülasyon eğimleri, tablo 3'de listelenlerdir. Her SVC daima kendi regülasyon sahasında çalışır. Yardımcı kontrol, 38 barasındaki üretim 1580 da iken bir simulasyon için kullanıldı. Aksi durumda yardımcı kontrol kullanılmadı. Her SVC için reaktif gücün başlangıç değeri sıfırdır.

Şekil 8.26'da ki salınım eğrileri, SVC'siz iki simülasyondan çıkmadır ve 39 barasındaki generatörün rotor açısına ilişkin 38 barasındaki generatörün rotor açısını gösterir. Sistem, 38 barasında 830 MW ile kararlıdır ve 955 MW ile kararsızdır. SVC 'siz geçici stabilite sınırının yaklaşık 900 MW olduğu tahmin edilir.

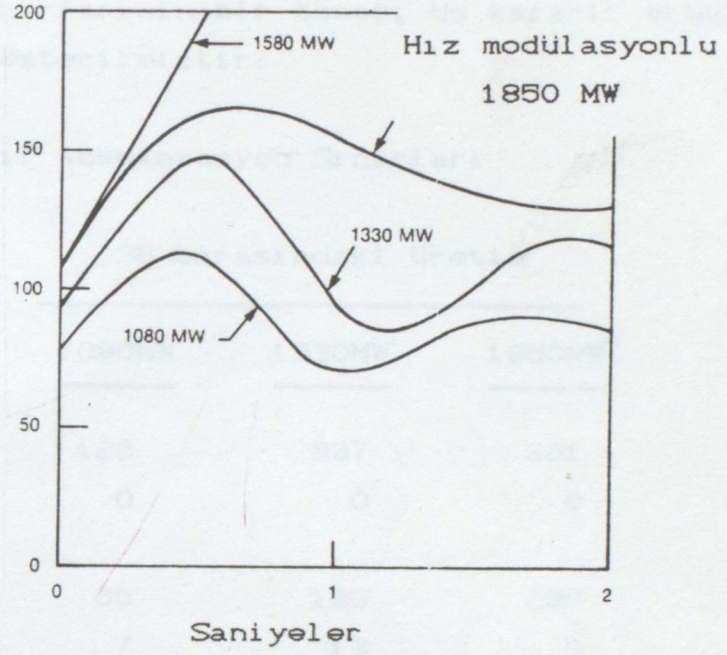


Şekil 8.26 Statik VAR kompanzatorsüz 26 barasındaki arızayı takiben 38 barasındaki rotor açısı

Şekil 8.27 'deki salınım eğrileri, 26,27,28 ve 29 baralarında SVClı dört simülasyondan çıkmadır. Stabilité, generatör hız sapması yüzünden SVC reaktif güçlerini modüle ederek (38) barasındaki 1580 MW lı bu arızayı takiben gerçekleştirilir. Bu, giriş değişkeni olarak generatör hızıyla beraber her SVC için bir yardımcı kontrol kanalı aracılığı ile gerçekleşir.

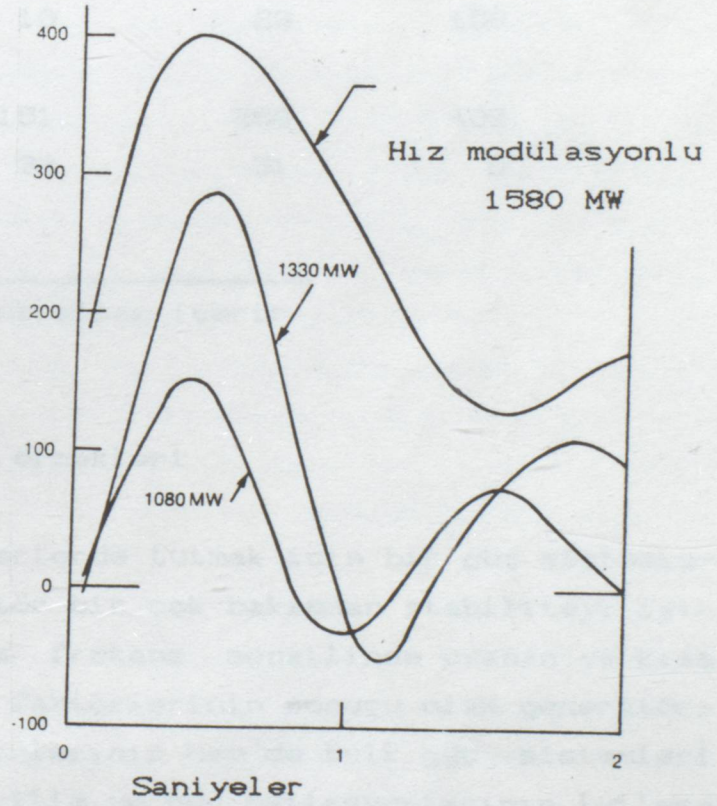
Uç kararlı simülasyon için 29 barasındaki kontrollü reaktif güç, şekil 8.28 'de gösterilmiştir. Daha küçük reaktif güç değişimleri 26 , 27 ve 28 baralarında oluşur.

Dereceler



Şekil 8.27 Statik VAR kompanzatorle 26 barasındaki arızayı takiben 38 barasındaki rotor açısı

Kapasitif
MVAR



Endüktif
MVAR

Şekil 8.28 (26)barasındaki arızayı takiben 29 barasında SVC için reaktif güç

Regüle edilen baraların her birisindeki kontrollü reaktif kompanzasyon sınırlarının bir özeti, üç kararlı simülasyon için tablo 5'de gösterilmiştir.

Tablo 5- Reaktif Kompanzasyon Sınırları

		38 barasındaki üretim		
Bara		1080MW	1330MW	1850MW*
26	Kapasitif	122	237	361
	Endüktif	0	0	0
27	Kapasitif	68	129	236
	Endüktif	7	13	0
28	Kapasitif	95	173	218
	Endüktif	10	29	150
29	Kapasitif	151	288	403
	Endüktif	32	51	0

* Hız duyarlı yardımcı kontrolları içerir

Diğer tip uygulama örnekleri

Gerilimi uygun değerlerde tutmak için bir güç sisteminde kurulmuş olan kompanzator bir çok bakımdan stabiliteyi iyileştirir. Hem, 0,5 ile 2 Hz frekans menziline uzanan ve kısa devreler ve diğer bozulma faktörlerinin sonucu olan generatörlerin tipik rotor osilasyonlarının hem de bulk güç sistemleri için tipik yavaş (slow) gerilim ve güç osilasyonlarının iyileştirilmiş sönümleri, bunun bir örneğidir. Diğer bir avantajı, generatörlerin arttırılmış statik stabilite sahasıdır. Statik kom-

panzatorlerle mümkün olan etkili sistem iyileştirmeleri en iyi, örneklerle gösterilir.

Örnek 1

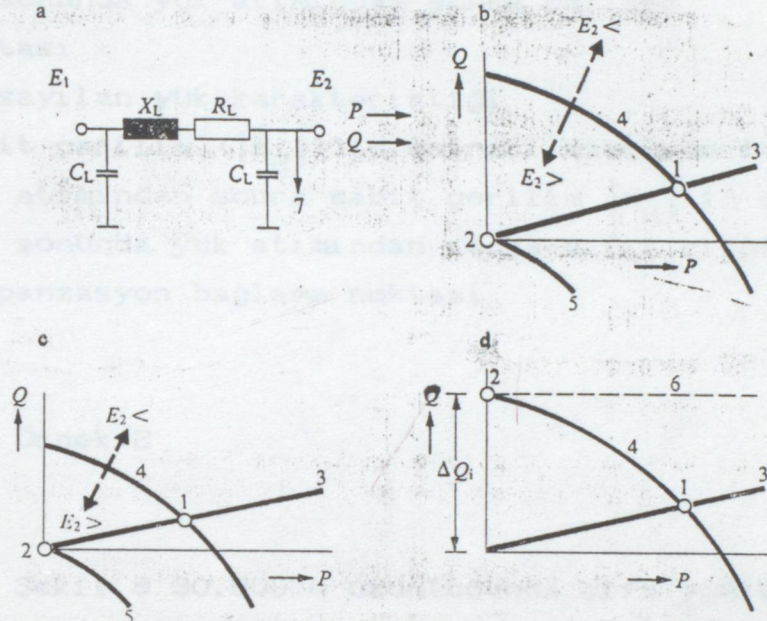
İlk örnek , gerilimi korumak amacı için iletim şebekelerindeki güç faktörü kompanzasyonuyla ortaya çıkan problemleri gösterir (şekil 8.29). Bir iletim hattının hat sonunda P-Q düzlemindeki gerilim daire diyagramı, statik kompanzatorün pozitif özelliklerini gösteren üç farklı durum için verilir.

-Göz önüne alınanlar altındaki sistem,şekil 2a 'da gösterilmiştir. Basitlik amacıyla, hatbaşı gerilim E_1 ve hatsonu gerilimi E_2 sabit varsayılır ; E_1 ve E_2 gerilimleri arasındaki açı değişir.

-Şekil 2b, P-Q düzleminde (1,2)kompanze edilmemiş iletim hattı için yük atımından önce ve sonra sabit gerilim daire-sine uygun gelen hat sonundaki çalışma noktasını gösterir. Yük atımından sonra hat sonundaki gerilim (E_x), $|E_x| = k_1 |E_2|$ ilişkisinden elde edilir. K_1 ,bu durum için yük atımı faktörü olur. Bir çok durumda hat sonundaki yüksüz gerilim E_x çok yüksektir. Yük atımından önce ve sonra iki periyot arası mesafe, beklenen gerilim artışının ve yük atımının bir ölçüsüdür.

-İletim gücü,yük atımı faktörünün daha düşük bir değere sahip olduğu ilk durumdakinden daha düşük olmasına rağmen sağlanırlar ve aynı gerilim dairesi (E_2) ve $\cos\phi$ verilir (şekil 2c). Yük atımını takiben E_x gerilimi,birinci durumdakinden daha küçüktür ($|E_x| = k_2 |E_2|$, $k_2 < k_1$)

Bir statik kompanzatorün avantajları şekil 2d'den görülebilir.Hat sonunda kompanzator, E_x gerilimini E_2 değerinde tutmaya çalışır.Bu ,kompanzatorün kullanılabilir endüktif yeteneği (ΔQ_1) oldukça yeterli olduğu zaman sağlanır.Ayrıca hat üzerinde iletilebilen güç,kompanzasyonsuz olduğu durumla aynıdır.



Şekil 8.29 Hat sonu gerilim daire diyagramında çeşitli kompanzasyon metodlarının karşılaştırılması

a: Basitleştirilmiş hat modeli

b: Kompanzasyonsuz

c: Sabit reaktörlü

d: Statik kompanzatorlü

P =Aktif güç

Q =Reaktif güç

ΔQ_i =Endüktif güç

C_L =Hat kapasitansı

R_L =Hat direnci

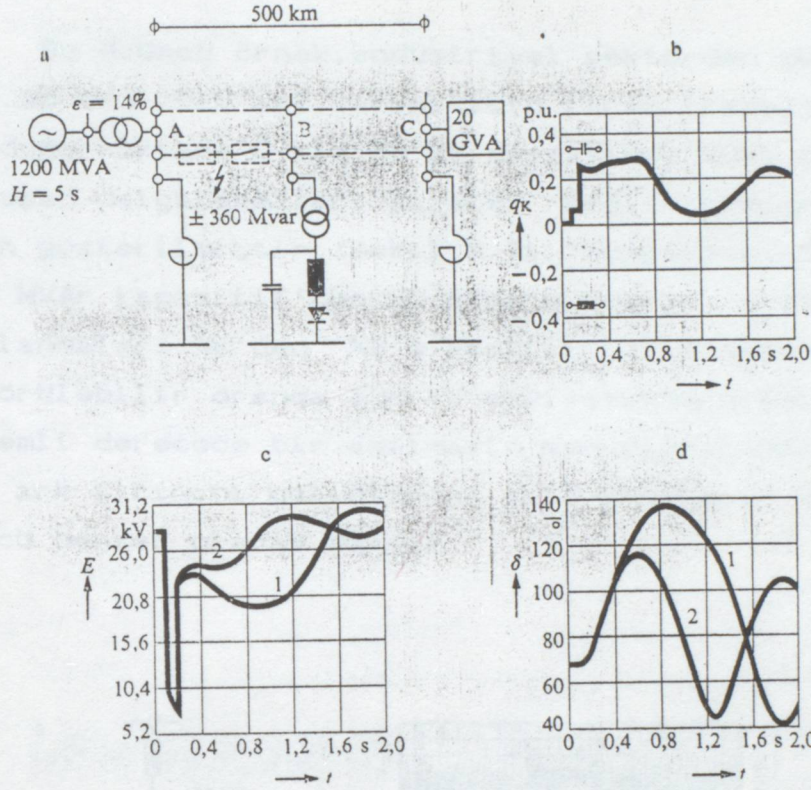
X_L =Hat reaktansı

- 1 =Hatsonunda yük atımından önce çalışma noktası
- 2 =Hatsonunda yük atımından sonra çalışma noktası
- 3 =Varsayılan yük karakteristiği
- 4 =Sabit gerilim $\langle |E_2| \rangle$ 'in dairesi üzerinde $P=f(Q)$
- 5 =Yük atımından sonra sabit gerilim $|E_2|$ 'in dairesi
- 6 =Hat sonunda yük atımından sonra sıfır çizgisi
- 7 =Kompanzasyon bağlama noktası

Örnek 2

Şekil 8.30,500km uzunluğunda çift yönlü bir hattın merkezinde kurulmuş statik kompanzatörün çalışma yöntemini gösterir. 80 ms süreli bir üç fazlı arızanın,iki hattın biri üzerinde A'dan B'ye kadar varsayıldı.Arızalı hat ayrıldıktan sonra otomatik tekrar kapama vuku bulmadı. Şekil 8.30 'da verilen simulasyon sonuçlarından görülebilir ki nominal değeri ± 360 MVar olarak varsayılan kompanzatör , sistemin dinamik cevabı üzerinde çok uygun bir etkiye sahiptir. Esas itibariyle sadece gerilim cevabı iyileştirilmekle kalmayıp rotor açısı osilasyonunun da sönümü sağlandı.Stabilite nedenleri için izin verilebilir maksimum iletim gücü bu yüzden termik sınıra doğru artar. O halde söz konusu olan, generatör kademe dışına çıkıncaya kadar kritik kısa devre zamanı 5'den 7 peryota artar.

Bir çok durumda statik kompanzatör kullanımı şebeke genişletmesi artık ne olursa olsun gerekli olduğunda, o derece gelir ki,iletim kapasitesini artırır.Statik kompanzatör örneğin yeni bir hattın inşasından çok daha ucuz olduğundan dolayı bu avantajlar öncelikli olarak ekonomiktir.



Şekil 8.30 500 km uzun bir iletim hattının merkezinde kurulu olan statik kompanzatörün çalışması

a: İncelenen 500 kV sistem (80 ms arıza süreli)

b: Kompanzatörün reaktif gücü (1 pu=1200 MVar)

c: Generatör ucundaki gerilim

1= Kompanzatorsüz

2= Kompanzatörlü

d: Generatör rotor açısı

1= Kompanzatorsüz

2= Kompanzatörlü

H = Atalet sabiti

E = Uç gerilimi

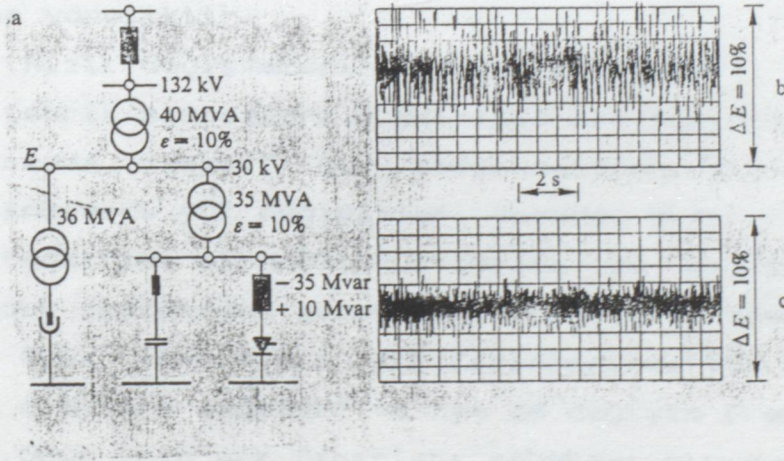
ϵ = Birim Transformatorün kısa devre gerilimi

δ = Rotor açısı

q_k = Kompanzatörün reaktif gücü

Örnek 3

Bu üçüncü örnek, endüstriyel sektörden gelen bir uygulamadır. 36 MVA 'lık ark fırını için fırın transformatörünün bağlı olduğu noktada 0 ila 30 Hz menziline 30kV gerilim barasında oluşan dalgalanmalar, paralel bağlı kompanzatör varken ve yokken gösterilmiştir (Şekil 8.31.) Kompanzatörün kontrol sahası 35 MVar kapasitif'den 10 MVar endüktif 'e kadardır. Gerilim dalgalanmaları %8'den %3'e azaltılır. Titreşimlerde insan gözü ile görülebilir oranda 132 kV seviyesinde, ortak bağlama halinde, önemli derecede bir azalmayla sonuçlanır. Güç sistemini bozmadan ark fırınına çalıştırmak için şebekenin gerekli kısa devre gücü benzer olarak azalır.



Şekil 8.31 (36) MVA'lık ark fırını ile bağlı statik kompanzatörün çalışması

a: Sistem düzeni

b: 30 kV bara üzerinde kompanzatörsüz 0-30 Hz frekans sahasındaki gerilim dalgalanmaları

c: 30 kV bara üzerinde kompanzatörlü 0-30 Hz frekans sahasındaki gerilim dalgalanmaları

E = Gerilim

e = Kısa devre gerilimi

SONUÇLAR

Büyüyen ve karmaşıklaşan elektrik sistemlerinin üretim iletim ve dağıtım kapasitelerinin arttırılması , reaktif güç akışının neden olduğu kayıpların en alt düzeye indirilmesi ve kullanıma sunulan elektrik enerjisinin daha nitelikli bir hale getirilmesi amacıyla reaktif güç kompanzasyonu gün geçtikçe daha da önemli hale gelmiştir. Tesislerden en fazla yararlanma gereği ve isteği ekonomik sebeplerden kaynaklanmaktadır.

Uygulamalarda başlıca iki tür kompanzasyon problemi ile karşılaşılmalıdır. Bunlardan ilki reaktif güç isteğinin hızlı bir şekilde dalgalandığı büyük endüstriyel yüklerin (ark ocakları, hadde makinaları vb.) bu istekleri karşılamaya yönelik yük kompanzasyonudur. İkinci kompanzasyon tipi ise hem yük hem de generatör tarafından bozucu etkenlerle karşılaşan iletim hatlarındaki gerilim düzenlenmesi ve kararlılığının sağlanması amacına yöneliktir.

Hızlı değişmelerin olduğu işletmeler ; haddehaneler, çeşitli tahrik sistemleri, elektrikli ark fırınları ve kaynak makinalarında reaktif güç kompanzasyonu daha da önem arzeder. Haddehanelerde yük değişimleri önceden bilinir ve ona göre gerekli tedbirler alınabilir ; ayrıca bu değişmelerin frekansı çok küçük olduğundan şebeke üzerine etkisi önemli değildir.

Oysa elektrikli ark fırınlarında yük değişimi hem tesadüfi olaylara bağlıdır ve hem de değişim frekansı daha yüksektir. Onun için ark fırınları şebekeyi olumsuz yönde etkiler.

Simetrik bileşenler yardımıyla asimetrik yüklerin dengeli hale getirilmesi ve yük kompanzasyonu sağlanmıştır.

Reaktif güç kompanzasyonu amacıyla saniyede güç katsayısını düzeltmek ve maksimum yapabilmek için senkron makinalarından, mekanik veya elektronik kumandalı kondansatör gruplarından faydalanılmıştır.

Senkron makinalar uyarma geriliminin hızlı değiştirilmesi ile dalgalanma hızı 100 MVar/sn olan güçlerin kompanzasyonunda kullanılmıştır. Fakat kompanzasyon hızının uyarma devresinin zaman sabitine bağlı olması bunu kullanmayı sınırlan-

mıştır. Dengesiz yük durumlarında yetersiz kalmıştır.

Elle veya elektronik olarak devreye sokulup çıkarılan kondansatör grupları da yeterli hassasiyeti ve bakım kolaylığını gösterememiştir.

Yarı iletken devre elemanlarının kullanılmaya başlanmasıyla güç kompanzasyonunda yeni ufuklar doğmuştur. Tristör elemanının yarattığı geniş imkanlarla geliştirilen güç elektroniği devreleriyle yapılan güç kompanzasyonu için en ideali olmuştur. Güç elektroniği devrelerinin veriminin yüksek oluşu, hızlılığı, hareketli yanı olmayışı, bakım gerektirmemesi, birim güç başına dönen sistemlere göre daha küçük hacimli olması, maliyetinin düşüklüğü ve yüksek güvenirliliği gibi nedenlerle, bu devreler tercih edilir olmuştur.

Bu bakımdan reaktif güç üretim ve kontrolünde statik VAR kompanzatörleri vazgeçilmez araçlar olmuştur. Bunların ticari başarı kazanmalarının nedeni, uygun fiyatları, kontrol esneklikleri, az bakım gerektirmeleri, işletme kolaylıkları ve hızlı cevap vermeleridir.

Şebekelerde, etkin bir gerilim ve güç akışı olabildiğince hızlı olmak zorundadır. Statik VAR kompanzatörleriyle hızlı değişen yüklerde reaktif güç kontrolü ve sistemin dengelenmesi yüksek kalite faktörü ile gerçekleştirilebilir. Arıza durumunda kompanzatör sisteminin tümünü değiştirmek yerine, belli parçasının onarılması, işletme masraflarını epeyce azaltır. Ancak çoğu kompanzatör, kısa devre gibi özel durumlar karşısında sistem gerilimini kontrol altında tutma bakımından sınırlıdır.

En uygun kompanzatörün seçilmesi; denetim aralığının belirlenmesi, gücünün ve yatırım bedelinin tesbiti, geçici ve kararlı durumlarının saptanması ile yapılabilir. Seçilecek kompanzatörde, kondansatör değerinin reaktör değerinden büyük seçilmesi iç harmonik üretimini düşürecektir. Reaktif gücün, ihtiyaç duyulan en yakın noktada üretilmesi, elektrik sisteminin en iyi şartlarla işletilmesi açısından büyük yarar vardır.

Kısacası reaktif güç kompanzasyonunda statik VAR kompanzatorlerinin kullanılması aşağıda ifade edilen pozitif özellikleri sağlayacaktır.

- İletim hatlarının kararlı durumunda aktif güç iletim kapasitelerini arttırmak
- İletim hattının geçici durum kararlılığını iyileştirmek (kısa devre, yükün devre dışı kalması, hattın devreye alınması vb. geçici durumlarda)
- Değişken yük, az yük, hattın devreye alınması gibi çalışma şartlarında gerilim düzenlemesini sağlamak
- KVAR başına daha düşük tesis yatırımı (optimizasyon)
- Bir faz durumunda bile kompanse edebilme özelliği (Dengesiz yükler için avantajlı)
- Yüksek emniyet (Statik açma kapama)
- Yüksek verimli işletme
- Büyük güç spektrumlarında uygulanabilirlik (kondansatör ve endüktans boyutlarının değiştirilmesi ile geniş bir kapasitif/endüktif aralıkta çalışma)
- Kompanse edilen VAR başına düşük hacim
- Yüksek hızda cevap verme süresi (maksimum 1/2 periyot) ortalama 1/4 periyot)
- İyi bir fliker kontrolü ile gerilim ve güç akış kontrolü

KAYNAKLAR

- (1) Reaktif Güç Kompanzasyonu Seminer Notları, T. M. M. O. B. Elektrik Mühendisleri Odası Şubesi, 1983.
- (2) GYUGYI, L., "Reactive Power Generation and Control by Thyristor Circuits", IEEE Trans., on Industry Applications, Vol. IA-15, No. 5, Sept/Oct. 1979.
- (3) GYUGYI, L., "Characteristics of Static Thyristor Controlled Shunt Compensators for Power Transmission System Applications", IEEE Trans., on Power Apparatus and System, Vol. PAS-99, No. 5, Sept/Oct. 1980.
- (4) GYUGYI, L., OTTO, R. A., PUTMAN, T. H., "Principles and Applications of Static, Thyristor-Controlled Shunt Compensators", IEEE Trans., on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-97, No. 5, Sept/Oct. 1978.
- (5) BAYRAM, M., "Güç Katsayısının Düzeltilmesi ve Güç Kondansatörleri", Elektroteknik Mecmuası, Mart 1977.
- (6) EL SADEK, M. Z., "Balancing of Unbalanced Load Using Static VAR Compensators", Electric Power System Research, pp.137-148, December 1987.
- (7) HIMEI, T., NAKANISHI, S., FUNABIKI, S., "Generalized Analytical Model for Thyristor Controlled Variable Industry Applications", Vol. IA-19, No. 4, July/August 1983.
- (8) ÇELTEKLİGİL, U., "Alternatif Akım Kırıyıcıları ile Reaktif Güçlerin Kompanzasyonu ve Bunun Bir Direkt Çeviriciye Uygulanması", Doçentlik Tezi, İ. T. U., Elektrik Fakültesi, 1981.

- (9) Bayram, M. , " Harmoniklerin Kompanzasyon Tesislerindeki Tesirleri ", Elektroteknik Mecmuası, Eylül 1984.
- (10) GUETH, G. , ENSTEDT, P. , REY, A. MENZIES, R. W. , " Individual Phase Control of a Static Compensator for Load Compensation and Voltage Balancing and Regulation", IEEE Trans. , on P. S. , Vol. PWRS-2, No. 4, November 1987.
- (11) MILLER, T. J. , " Reactive Power Control in Electric Systems, John Wiley and Sons, 1982.
- (12) BYERLY, R. T. , POZNANIAK, D. T. , TAYLOR, E. R. , "Static Reactive Compensation for Power Transmission Systems", IEEE Trans. , on Power Apparatus and System, Vol. PAS-101, No. 10, October 1982.
- (13) EDRIS, A. , "Controllable VAR Compensators: A Potantial Solution to Loadability Problems of Low Capacity Power Systems", IEEE Trans. , on P. S. , Vol. PWRS-2 , No. 3 August 1981.
- (14) DASH, P. K. , SHARAF, A. M. , HILL, E. F. , "An Adaptive Stabilizer of Thyristor Controlled Static VAR Compensators for Power Systems", IEEE Trans. , on Power Systems Vol. 4, No. 2, May 1989.
- (15) WONG, W. K. , OSBORN, D. L. , McAVOY, J. K. , " Applications of Compact Static VAR Compensators to Distribution System", IEEE Trans. , on Power Delivery, Vol. 5, No. 2, April 1990.
- (16) HAUTH, R. L. , MISKE, S. A. , NOZARI, F. , " The Role and Benefits of Static VAR Systems in High Voltage Power Systems Applications", IEEE Trans. , on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-101, No. 10, October 1982.

- (17) HAMMAD, A. E. , " Analysis of Power System Stability Enhancement by Static VAR Compensators ", IEEE Trans. , on Power System, Vol. PWRS-1, No. 4, November 1986
- (18) WIRTH, E. , ROESLE, B. , SADEK, K. , " Use of Static Reactive Power Compensators in Power Systems ", Brown-Boveri Review, Vol. 69, March 1982.
- (19) HAQUE, S. E. , MALIK, N. H. , "Analysis and Performance of a Fixed Filter Thyristor Controlled Reactor (FF-TCR) Compensator", IEEE Trans. , on Power Systems, Vol. PWRS-2 No. 2, May 1987
- (20) HAQUE, S. E. , MALIK, N. H. , SHEPHERD, W. , " Operation of a Fixed Capacitor-Thyristor Controlled Reactor (FC-TCR) Power Factor Compensator", IEEE Trans. , on Power Apparatus and systems, Vol. PAS-104, No. 6, June 1985.

EK-A FOURIER SERİLERİNİN TEMEL BAĞINTILARI

Sinüsoidal olmayan periyodik bir fonksiyon, sonsuz sayıda sinüsoidal harmonik terimlerinin toplamı olarak yazılabilir. 2π periyotlu $e_L(wt)$ fonksiyonu için Fourier serilerinin genel şekli aşağıda verilmiştir.

$$e_L(wt) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} (a_n \cos nwt + b_n \sin nwt)$$

Hem sinüs hem de cosinüs serilerinin varlığı durumunda Fourier serisi alternatif şekilde yazılabilir.

$$e_L(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_n \sin(nwt + \phi)$$

Burada,

$$\frac{a_0}{2} = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} e_L(wt) d(wt)$$

$$a_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e_L(wt) \cos nwt \cdot d(wt)$$

$$b_n = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} e_L(wt) \sin nwt \cdot d(wt)$$

$$c_n = \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad \text{ve} \quad \phi_n = \tan^{-1} (a_n / b_n), \quad n=1, 2, 3, \dots$$

EK-B

Düşünülen güç sisteminin parametreleri;

Statik yük

$$P = c_p U_r^2, \quad Q = c_q U_r^2$$

Dinamik yük

Düşünülen indüksiyon motoru, aşağıdaki parametrelere sahiptir. (per-unit olarak)

Nominal güç < 11 kV 'ta 10-100 MVA için

$$R_1 = 0,038 \text{ pu}, \quad R_2 = 0.037 \text{ pu}$$

$$X_1 = 0.14 \text{ pu}, \quad X_2 = 0.12 \text{ pu}$$

$$X_m = 3.4 \text{ pu}$$

$$H = 0.3 \text{ Ws/VA}$$

Nominal güç > 11 kV 'ta 10-100 MVA için

$$R_1 = 0.015 \text{ pu}, \quad R_2 = 0.012 \text{ pu}$$

$$X_1 = 0.12 \text{ pu}, \quad R_2 = 0.17 \text{ pu}$$

$$X_m = 4.0 \text{ pu}$$

İletim hattı

kV	$R_t (\Omega/\text{Km})$	$X_t (\Omega/\text{Km})$	$B_t (\mu\text{mho}/\text{Km})$
70	0.104	0.381	3.01
130	0.07	0.408	2.89
220	0.04	0.314	3.77 (çiftli iletkenler)

ÖZGEÇMİŞ

Aslan İnan 1968 yılında Amasya'da doğdu. İlk ve orta okulu Kayseri'de, liseyi ise Siirt'te tamamladı. 1985 yılında girdiği ÖYS sınavında başarılı olarak Yıldız Üniversitesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nü kazandı. 1990 yılında mezun olarak aynı yıl Yüksek Lisans (master) programına başladı. Halen bu programa devam etmektedir.

Y. T. O.
KÜTÜPHANE DOK. DAL. BAŞKANLIĞI

