

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Reak. güç Komp. güç Elek. Yönt. ile İnc

Yüksek Lisans Tezi

Ender Bozoglu

1988

R 152
103

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONUNUN
GÜÇ ELEKTRONİĞİ YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
MÜH.ENDER BOZOĞLU

İSTANBUL 1988

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
GENEL KİTAPLIĞI

R 152

103

Kot :
Alındığı Yer : Fen Bil. Enst.
Tarih : 14.5.1991
Fatura :
Fiatı : 6000. TL
Ayniyat No : 1/3
Kayıt No : 47654
UDC : 621.3 378.242
Ek :

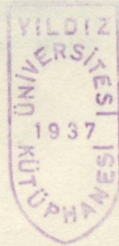


YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

YILDIZ ÜNİVERSİTESİ
D.Ş. No 45381

PREFACE

REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONUNUN
GÜÇ ELEKTRONİĞİ YÖNTEMLERİ İLE İNCELENMESİ



YÜKSEK LİSANS TEZİ

MÜH.ENDER BOZOĞLU

İSTANBUL 1988

P R E F A C E

- - - - -

This thesis consists of four main parts. In the first part, relations which are needed for Power compensation are described, then power electronics systems and methods of power compensation are examined (static compensation). In the second part, Compensation equipments are classified. Thirdly, Operation principles and current-voltage curves and definitions of various load conditions of alternating current chopper which is a member of static compensation are described. Also, reactive Power compensation used as alternating current chopper and operating principles are identified in this section.

In the last section, thyristor controlled compensation is analyzed.

I want to thank to esteemed Prof Kemal HALICI, for helping during the preparation of this thesis.

Ö N S Ö Z

Bu tez çalışmasında, Birinci bölümde güç kompanzasyonu için gerekli bağıntılar tanımlanmış sonra güç elektronikli düzenlerle güç kompanzasyonu metodları incelenmiştir (Statik Kompanzasyon). İkinci bölümde, kompanzasyon tesislerinin genel sınıflandırılması yapılmıştır. Üçüncü bölümde, Statik Kompanzasyonun temel elemanlarından olan alternatif akım kıyıcısının çalışma prensibi ve çeşitli yük durumları ile bunlara ait kıyıcı kullanarak reaktif güç kompanzasyonu ve çalışma ilkeleri açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise tristör kontrollü kompanzasyon incelenmiştir.

TEZ çalışması süresince yardımlarını esirgemeyen Değerli Hocam Sayın Prof.Y.Müh. Kemal HALICI'ya teşekkür ederim.

III-1 AC KAYIICI KULLANILARAK REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

3.1.1. Statik Faz Kaydırıcı Kompansatör

3.1.1.1. AC Kaydırıcı İÇİNDEKİLER

3.1.1.2. Stabilizator

3.1.1.3. Filtre Devresi

GİRİŞ

I- REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

- 1.1. Temel Tanımlar
- 1.2. Matematiksel Esaslar
- 1.3. Kompansasyonun Tanımı
- 1.4. Kompansasyon Tesislerinde Kondansatör
Gücü Hesabı
- 1.5. Kompansasyon Tesislerinde Tesis Elemanları
 - 1.5.1. Kondansatörler
 - 1.5.2. Anahtarlar
 - 1.5.3. Regülatörler ve Kondansatörlerin
Otomatik Ayarı
 - 1.5.4. Sigoralar, İletkenler ve Boşaltım Elemanları ..

II. KOMPANZASYON TESİSLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

- 2.1. Tesis Şekline Göre
 - 2.1.1. Ferdi Kompansasyon
 - 2.1.2. Grup Kompansasyon
 - 2.1.3. Merkezin Kompansasyon
- 2.2. Kondansatörlerin Bağlama Şekline Göre
 - 2.2.1. Seri Kondansatörlerle Kompansasyon
 - 2.2.2. Paralel Kondansatör Kompansasyon
 - 2.2.2.1. Sabit Kondansatörlerle
 - a- Doymuş reaktörlerle dengelenen
sabit kondansatörlük kompansasyon..
 - b- Güç elektronik ayarlı reaktörlerle
dengelenen sabit kondansatörlü
kompansasyon
 - 2.2.2.2. Sabit Olmayan Kondansatörlerle Kombine
Kompansasyon
 - a- Güç elektronikli devrelerle devreye
sokulup çıkarılan kondansatörlerle
kompansasyon
 - b- Kademesiz kompansasyon
 - c- Otomatik kontrollu sürekli kompansasyon

4.5. Kayıpların ve Güç Kullanma Kapasitelerinin İncelenmesi

III=I AC KİYİCİ KULLANARAK REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

- 3.1.1. Statik Faz Kaydırıcı Kompansatör
 - 3.1.1.1. AC Kiydırıcı
 - 3.1.1.2. Stabilizatör
 - 3.1.1.3. Filtre Devresi
- 3.1.2. AC Kiyıcının Sınıflandırılması
 - 3.1.2.1. Bir fazlı omik yüklü AC kiyıcı
 - 3.1.2.2. Bir fazlı endüklif yüklü AC kiyıcı
 - 3.1.2.3. Bir fazlı Omik-Endüktif yüklü AC kiyıcı
 - 3.1.2.4. Omik yüklü, bağımlı gerilim kaynağında
 - 3.1.2.5. Beslenen bir fazlı AC kiyıcısı
 - 3.1.2.6. Üç fazlı Omik yüklü AC kiyıcı

III=II

- 3.2.1. AC Kiyıcı Kullanarak Reaktif Güç Komp.
 - 3.2.1.1. AC kiyıcısında akım ve gerilim
 - 3.2.1.2. Temel ve harmonik empedanslar
- 3.2.2. AC Kiyıcısı ile Bileşken Kapasite Oluşturma
- 3.2.3. AC Kiyıcısı ile Faz Kontrollu
 - 3.2.3.1. Seri rezonans devresi
 - 3.2.3.2. Paralel rezonans devresi
- 3.2.4. Süzgeç Devreleri ile AC Kiyıcı Harmoniklerin Süzülmesi
- 3.2.5. AC Kiyıcı ile Kompanzasyonu Otomatik Kontrolü
- 3.2.6. Güç Elektronikli Devrelerini Yükleme Durumunda Simetrileme
- 3.2.7. AC Kiyıcıları ile Simetrileme
- 3.2.8. Otomatik Kontrolle Güç Kompanzasyonu

IV. TRİSTÖR KONTROLÜ KOMPANZASYON

- 4.1. Tristörlerle Kondansatörlerin Devreye Sokulup Çıkarılması
- 4.2. Reaktif Gücün Ölçülmesi ve Gösterilmesi
- 4.3. Tristör Kontrollü Şönt Kompanzatörler
- 4.4. Kontrol Sistemleri
- 4.5. Kayıpların ve Güç Kullanma Kapasitelerinin İncelenmesi

GİRİŞ

Elektrik enerji sistem ve şebekelerinde reaktif yükleme sebebi ile reaktif akım bileşenleri oluşur. Yani sistem veya şebeke gerilimi ile akımı arasında bir faz farkı teşekkül eder. Çeşitli sanayi dallarında kurulan tesisler üretim için şebekeye menfi tesir ederler. Mesela; demir-çelik endüstrisinde kullanılan ark fırınları bunların başına gelir. Burada oluşan kararsız akım, sıfır ile kısa devre akımı arasında değişir. Bu olay şebekede dalgalanmaları ve zararlı gerilim değişmelerini doğurur. (Mesela; 3 Hz ile 10 Hz'lik frekans bölgesinde yüzde 0.5'lik gerilim değişimi aydınlatmada zararlı olur ve dalgalanma insan gözü ile hissedilir). Dolayısıyla bir sistemde değişebilen endüktif yükün oluşturduğu gerilim ve reaktif akım dalgalanmalarını şebekeye aksettirmeden yok edip söndürmek maksadıyla kompanze edilmesi gerekir. Çünkü şebeke kısa devre gücü belirli sınırdan sonra büyütülememektedir.

Kompanze maksadıyla sanayiye güç katsayısını ($\cos\phi$) düzeltmek ve maximum yapabilmek için senkron makinalardan, mekanik veya elektronik kumandalı kondansatör gruplarından faydalanılmıştır.

Senkron makinalar, uyarma geriliminin hızlı değiştirilmesi ile dalgalanma hızı 100 MVar/sn civarında olan güçlerin kompanzasyonunda kullanılmıştır. Fakat kompanzasyon hızının uyarma devresinin zaman sabitine bağlı olması bunu kullanmayı sınırlamıştır. Dengesiz yük durumlarında da yetersiz kalmıştır. Sürekli rejim, senkron makinanın kompanze ettiği reaktif güçte KVar başına yapılan sabit yatırım ve hareketli parçalardan dolayı sürekli bakım-arıza masrafları ekonomik ve teknik olarak bunu kullanmayı sınırlamıştır.

Elle veya mekanik-elektronik olarak devreye sokulup çıkarılan kondansatör grupları da hassasiyet ve bakım cihetinde yeterli olmamıştır.

Bütün bu menfi sebepler ve ayrıca:

- KVar başına daha düşük tesis yatırımı (optimizasyon)
- Bir faz durumunda bile kompanze edebilme özelliği (dengesiz yükler için avantaj)
- Yüksek emniyet (hareketli parçası olmayıp statik açıp kapama)
- Büyük bir güç spektrumunda (Kondansatör ve endüktans boyutlarının değiştirilmesi ile) uygulama imkanı
- Yüksek verim
- Kompanze edilen VAR başına düşük hacim
- Yüksek hızda cevap verme süresi (Maximum yarı peryotta ortalama 1/4 peryot)

Özelliklerinden dolayı GÜÇ ELEKTRONİKLİ DEVRELERLE (THYRİSTOR'larla güç kompanze etmek en ideal durum olmuştur.

Mesela Şekil-8'de alternatif akım kıyıcısı (statik VAR generatörü) kompanze işleminde, diğer kompanzasyon metotlarından farklılığı görülür. Tek bir tristör elemanının şu andaki teknoloji ile 2 MVA'lık bir gücü 5 μ s den kısa bir sürede statik olarak açıp kapayabileceği gözönüne alınırsa, seri ve paralel tristörler kullanarak büyük güç sınırlarına erişmek mümkündür.

Şebekenin, sürekli ya da dinamik endüktif yüklenmesi durumunda $\cos\phi$ kompanzasyonunun kısa bir sürede gerçekleşmesi istendiğinde böyle bir sistem ilerideki bölümlerde bahsedileceği gibi OTOMATİK KONTROL düzeniyle birlikte düşünülp dizayn edilir.

1950'li yıllarda bulunan Tristör elemanı temin ettiği geniş imkanlarla geliştirilen güç elektroniği devreleri ile yapılan uygulamalar, güç seviyesi ve maksat bakımından oldukça gelişmiş ve halen gelişmektedir. Bu devrelerin, elektrik enerjisinin şeklinin değiştirmede şimdiye kadar kullanılan diğer elektrik makinalarının yerini almaya başlaması yukarıda bahsedilen özelliklerinden dolayı tercih edilmektedir. Son yıllarda şebekeden (özellikle 3 fazlı) beslenerek, çıkış frekansı ve gerilim değeri ayarlanabilen çıkış gerilimi üreten ara devresiz direkt çeviriciler, endüstride geniş frekans bölmesi ve büyük güçte 3 fazlı olarak asenkron ve senkron makinaların devir ayarı gibi birçok yerde kullanılmaya başlanmıştır. Ayrıca gelişen raylı taşımacılıkta bir fazlı yükü beslemede frekans değiştirici veya çevirici olarak da kullanılmaya başlanmıştır.

Saf endüktif bir yükü yüklenen alternatif akım kırıyıcısının belli çalışma şartları altında değişken endüktans olarak çalışmasından hareket ederek, bu devrenin geliştirilmesi ile, faz kontrollu reaktif güç kompanzasyonu üzerine yapılan çeşitli çalışmalar, AC-kırıyıcıları için son birkaç senede yeni bir uygulama alanı açmıştır. Elektronik kontrolün hızlı cevap vermesi ile dinamik olaylar da kompanze edilebilmiştir. Kırıyıcılarla şebekelerde yalnız reaktif güç kompanzasyonu değil, istenmeyen başka reaktif güçlerin de kompanzasyonu mümkündür. Kontrol güç sahasının 10-100 MVA olması, bu çalışmaların model devreler üzerinde yapılarak denenmesine yöneltmiştir.

Günümüzde elektrik enerjisi alternatif akım şeklinde üretilmektedir. Genelde bu şekilde üretilen elektrik enerjisi taşıma ve diğer elektrikli devre elemanlarından kolaylıklar sağlar. Böyle bir elektrik şebekesine bağlı bulunan elemanlar omik, endüktif ve kapasitiflik özelliklerine göre şebekeden faz farklı akımlar çekerler. Dolayısıyla şebekeden, bu akımların faz farkına göre, iki tür güç alınmış olur.

$$P = S \cdot \cos\phi \quad (W)$$

ile belirtilen Aktif Güç, diğeri ise

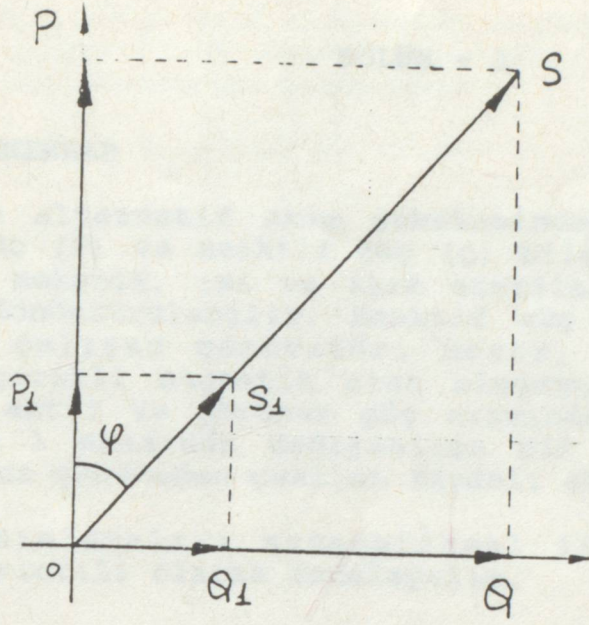
$$Q = S \cdot \sin\phi \quad (Var)$$

ile belirtilen reaktif güçtür. Şekil-1'de görülen ikisinin bileşkesi olan görünen Güç de:

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

$$\text{Aktif akım: } I_p = I \cdot \cos\phi \quad (A)$$

$$\text{Reaktif akım: } I_q = I \cdot \sin\phi \quad (A)$$



Şekil-1: Şebeke endüktif yüklü halde güç vektörleri
(Faz Diyagramı)

Burada sözkonusu olan açık gerilim ile çekilen yük akımı arasındaki faz açısıdır. $\cos\varphi$ ise Güç Faktörü olarak isimlendirilir. Güç Faktörü kontrolü, bir yükün zamana göre sabit yada değişken olan reaktif gücün, hemen yükün yanında güç faktörü kompanzasyon yardımı ile üretmektir.

Bütün sanayi tesisleri veyahut şebekelerde reaktif güç fazlalığından dolayı aşırı yüklenmeler ve dalgalanmalar oluşur. Bunu önleme maksadıyla da $\cos\varphi$ güç katsayısının ideal olarak maximum yapmak için çalışırlar. Bu de çeşitli REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU METODLARIYLA yapılır.

BÖLÜM - 1

1.1. TEMEL TANIMLAR

Tüketicilerin alternatif akım şebekesinden çektikleri Görünür güç (S), Aktif güç (P) ve Reaktif güç (Q) bileşenlerinden oluşur. Aktif güç bileşeni mekanik, ısı ve ışık enerjisi şeklinde faydalı enerji şekillerine dönüştürülebilir. Reaktif güç bileşeni ise, endüksiyon prensibiyle çalışan generatör, motor, transformatör gibi tüm makinalarda gerekli magnetik alan oluşumunu sağlar. Güç katsayısı ($\cos\psi$) ise aktif ve görünür güç arasındaki bağıntıyı sağlayan ve değeri 0 ile 1 arasında değişebilen bir çarpandır. Bu değer 1'e ne kadar yakınsa şebekeden çekilen faydalı aktif güç o kadar fazladır.

Şimdi bu tanımlamaları matematiksel ifadeleri ve diyagramlar yardımıyla ayrıntılı olarak inceleyelim.

1.2. MATEMATİKSEL ESASLAR

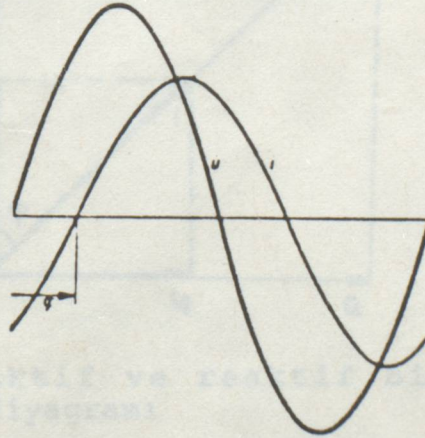
Bir tüketicinin üç fazlı alternatif akım şebekesinden çektiği görünür güç:

$$S = \sqrt{3}U_h \cdot I \quad (1.1)$$

dır.

Burada U_h : iki faz arası gerilim, I : Faz akımı'dır.

Ohmik-Endüktif bir tüketicide I faz akımı U_h geriliminden ψ açısı kadar geridedir (Şekil: 1.1).



Şekil: 1.1 Ohmik-Endüktif bir tüketicide akım ve gerilim arasındaki faz farkı

Yukarıda belirtildiği gibi şebekeden endüktif reaktif güç çekilmesi halinde ('), Aktif ve Reaktif akımlar (I_p ve I_q), güçler ve aralarındaki bağıntılar şu şekildedir:

$$I_p = I \cdot \cos\psi \quad (1.2)$$

$$P = S \cdot \cos\psi \quad (1.3)$$

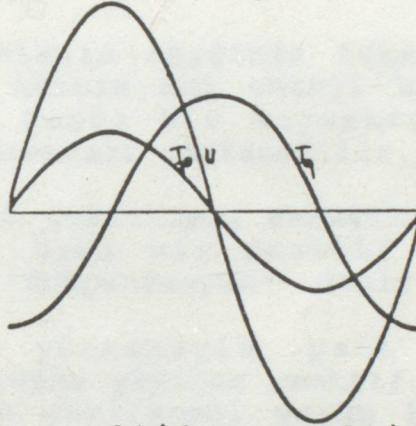
$$I_q = I \cdot \sin\psi \quad (1.4)$$

$$Q = S \cdot \sin\psi \quad (1.5)$$

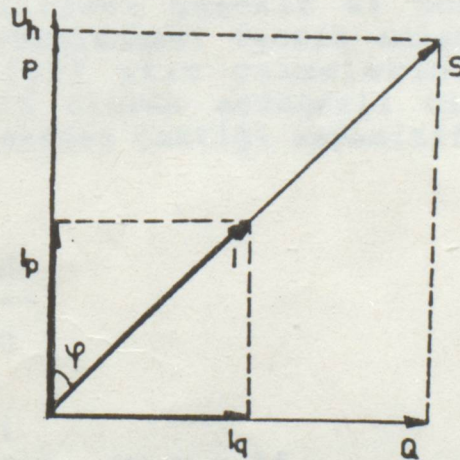
ve buradan:

$$I = \sqrt{I_p^2 + I_q^2} \quad (1.6)$$

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (1.7)$$



Şekil: 1.2. Akımın aktif ve reaktif bileşenlerine ayrılması. I_p aktif akımı gerilimle aynı fazda ve I_q reaktif akımı gerilimden 90° geri fazdadır.



Şekil: 1.3. Aktif ve reaktif bileşenlere ilişkin fazör diyagramı

('): Boşta çalışan havai hatlar ve kablolar dışında şebekeden çekilen güç genellikle endüktif karakterlidir.

Şekil: 1.2 ve Şekil: 1.3'de şebekeden çekilen reaktif gücün saf endüktif olduğu varsayılarak reaktif akım gerilime göre 90° geri fazda çizilmiştir. Burada P aktif gücüyle S görünür gücü ya da I_p aktif akımıyla I faz akımı arasındaki φ faz açısının kosinüsü güç katsayısı, ya da güç faktörü adını alır.

Birinci ayrıtta kullanım alanından söz edilen ve yukarıda matematiksel ifadesi verilen reaktif akım, aktif akımda olduğu gibi doğrudan faydalı bir enerji şekline dönüştürülemediği için şebekeyi gereksiz yere yükleyici ve verimi düşürücü bir etki yapar. Reaktif güç tarafından oluşturulan endüktif karakterli mıknatıslanma akımı gerekli magnetik alanı meydana getirmek için şebekeden çekilmekte ve bu alan ortadan kalkarken iade edilmektedir. İşte bu nedenle aktif güç üretici ve tüketici arasında şebeke frekansının iki katıyla salınım yapmaktadır.

1.3. KOMPANZASYON TANIMI

Şimdiye dek anlatılanların ışığında tüketicilerin çalışması için zorunlu olan reaktif akımın ana enerji kaynağı yerine, tüketiciye olabildiğince yakın başka bir kaynaktan sağlanmasının birçok sakıncayı ortadan kaldıracığı söylenebilir.

Tüketicilerin şebekeden çektikleri endüktif reaktif gücün, şebekeden kapasitif yük çeken özel bir reaktif güç üretici tarafından dengelenmesi olayına "Kompanzasyon" denir.

Statik faz kaydırma yöntemiyle, yani güç kondansatörleriyle tüketiciye yakın bir yerde yapılan reaktif güç kompanzasyonu sonunda reaktif güç şebekeden çekileceği yerde kondansatörler tarafından üretilmiş olur. Böylelikle aynı koşullarda şebekeden daha fazla aktif güç çekilme olanağı doğar.

Burada hemen belirtmek gerekir ki kondansatörlerin reaktif güç üretici olarak tanımlanması teorik anlamdadır. Bu, kondansatörlerin şebekeden kapasitif akım çekmelerinin şebekeye endüktif akım vermelerine teorik olarak eşdeğerli olmasından kaynaklanmaktadır. Kondansatörün şebekeden çektiği kapasitif akım:

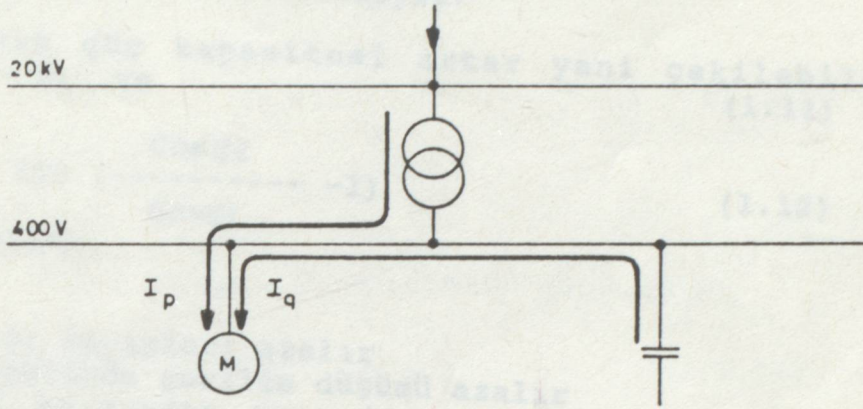
$$I_C = \frac{U}{X_C} \quad (1.8)$$

dir.

$$\text{Burada: } X_C = \frac{1}{w.C} \quad \text{ve } w = 2\pi f \quad (1.9)$$

dir.

Bu kapasitif akım, gerilime göre 90° ileri fazdadır.

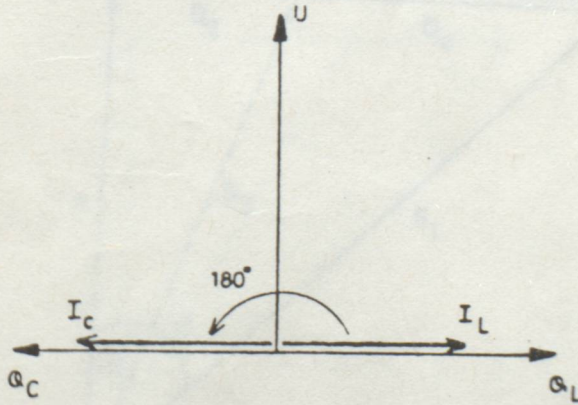


Şekil: 1.4. Alçak gerilim güç kondansatörleriyle reaktif güç kompanzasyonunun prensibi

Kondansatör gücü için ise;

$$\begin{aligned}
 Q_C &= U \cdot I_C \\
 &= U^2 \cdot \omega C \\
 &= I^2 \cdot \frac{1}{\omega C} \quad (1.10)
 \end{aligned}$$

ifadeleri yazılabilir.



Şekil: 1.5. Kapasitif ve endüktif reaktif güçlerin fazör diyagramı (Q_L endüktif reaktif gücüne göre 180° ileri fazda bulunan Q_C kapasitif reaktif gücü endüktif gücü götürerek kompanze etmektedir)

Pratikte ekonomik oluşu nedeniyle üç fazla sistemlerde kondansatörler üçgen bağlanır. (Aynı Q_C de $C_{\Delta} = 3C_{\Delta}$ dir, yani Δ bağlama halinde daha küçük kapasite değerli kondansatör imaliyle güç elde edilir).

Güç katsayısının düzeltilmesiyle:

- Şebekenin güç kapasitesi artar yani çekilebilecek aktif güç $\Delta P = P_2 - P_1$ ve (1.11)

$$\% \Delta P = 100 \left(\frac{\cos \phi_2}{\cos \phi_1} - 1 \right) \quad (1.12)$$

oranında artar.

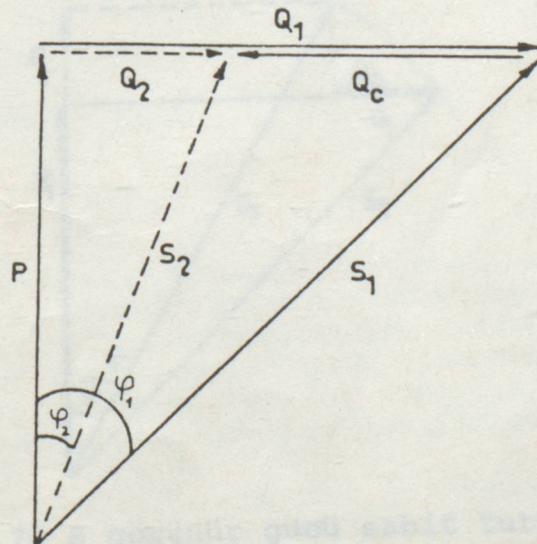
- Şebeke ısı kayıpları azalır
- Şebeke üzerinde gerilim düşümü azalır
- Tüketici açısından aynı iş makinalarıyla daha fazla aktif güç tüketilebileceğinden enerji maliyeti düşecek ve aboneler reaktif enerji bedeli ödemekten kurtulacaktır.

1.4. KOMPANZASYON TESİSLERİNDE KONDANSATÖR GÜCÜ HESABI

Bu bölümde harmoniklerin bulunmadığı ve şebekeden P aktif gücünün çekildiği bir işletmede güç faktörünün $\cos \phi$ 1'den $\cos \phi$ 2'ye yükseltilmesi için gerekli kondansatör gücü hesaplanacaktır.

Hesap iki prensibe göre yapılabilir: Ya şebekeden çekilen P aktif gücü sabit tutularak, çekilen görünür güç S_2 gibi daha küçük bir değere indirgenir (Şekil: 1.6)), ya da görünür güç sabit tutularak kompanzasyondan sonraki P_2 aktif gücünün daha büyük bir değer alması sağlanır (Şekil: 1.7).

Önce birinci yöntemi ele alalım:



Şekil: 1.6. P aktif gücü sabit tutularak, kompanze edilmemiş (1 indisli) ve kompanze edilmiş (2 indisli) bir işletmede güç diyagramı

Kompanzasyondan önce şebekeden çekilen aktif güç:

$$P = S_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad (1.13)$$

reaktif güç:

$$\begin{aligned} Q_1 &= S_1 \cdot \sin\varphi_1 \\ &= P \cdot \tan\varphi_1 \end{aligned} \quad (1.14)$$

Kompanzasyondan sonra:

$$Q_2 = P \cdot \tan\varphi_2 \quad (1.15)$$

dir. Bu durumda, gerekli kondansatör gücü için:

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = P (\tan\varphi_1 - \tan\varphi_2) \quad (1.16)$$

ifadesi yazılabilir.

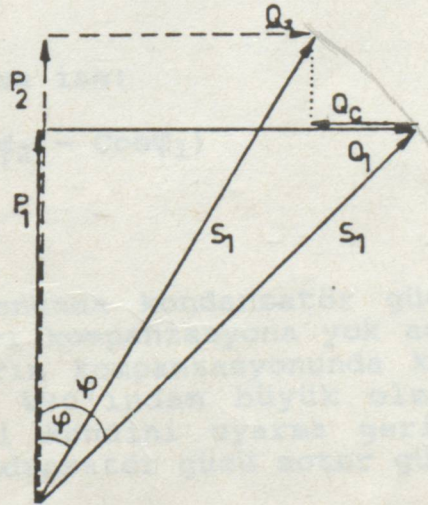
Görünür güçteki azalma ise:

$$S_1 - S_2 = P \left(\frac{1}{\cos\varphi_1} - \frac{1}{\cos\varphi_2} \right) \quad (1.17)$$

dir.

Bu formüllere göre hesaplanmış ve mevcut $\cos\varphi$ değerini istenen $\cos\varphi$ değerine yükseltmek için beher kW aktif güç başına gerekli kondansatör gücü için çeşitli tablolar ve abaklar düzenlenmiştir.

Şimdi de Şekil: 1.7 deki fazör diyagramını inceleyelim:



Şekil: 1.7. S görünür gücü sabit tutularak kompanze edilmemiş (1 indisli) ve kompanze edilmiş (2 indisli) bir işletmede güç diyagramı

Bu durumda kompanzasyondan önce çekilen aktif güç:

$$P_1 = S_1 \cdot \cos\varphi_1 \quad (1.18)$$

ve reaktif güç te:

$$\begin{aligned} Q_1 &= S_1 \cdot \sin\varphi_1 \\ &= P_1 \cdot \tan\varphi_1 \end{aligned} \quad (1.19)$$

dir.

Kompanzasyondan sonra S_1 görünür gücü sabit tutulacağına göre aktif güç:

$$P_2 = S_1 \cdot \cos\varphi_2 \quad (1.20)$$

değerini alacaktır.

Bu durumda kompanzasyondan sonraki reaktif güç fazör diyagramından da kolayca görülebileceği gibi:

$$Q_2 = \sqrt{S_1^2 - P_2^2} \quad (1.21)$$

olacaktır.

Gerekli kondansatör gücü de:

$$\begin{aligned} Q_C &= Q_1 - Q_2 \\ &= S_1 \cdot \sin\varphi_1 - \sqrt{S_1^2 - (S_1 \cos\varphi_2)^2} \\ &= S_1 (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) \end{aligned} \quad (1.22)$$

bulunur.

Aktif güçteki artma ise:

$$P_2 - P_1 = S_1 (\cos\varphi_2 - \cos\varphi_1) \quad (1.23)$$

kadar olacaktır.

Trafo kompanzasyonunda kondansatör gücü seçimi, trafo düşük yükte çalıştığında aşırı kompanzasyona yok açmayacak şekilde yapılmalıdır. Asenkron motorların kompanzasyonunda kondansatör gücü motorun boşa reaktif gücünün %90'ından büyük olmamalıdır. Aksi halde kalkış sırasındaki kendi kendini uyarma gerilim yükselmesine neden olur. Pratik olarak kondansatör gücü motor gücünün yaklaşık %35'i seçilir.

Yukarıda verilen formüllerden de görülebileceği gibi bir işletmede gerekli kondansatör gücünün hesaplanabilmesi için görünür, aktif ve reaktif güçlerden herhangi ikisinin ya da bunlardan biri ile güç katsayısının bilinmesi gerekir.

Proje aşamasındaki bir tesiste tüketicilerin etiket değerleri, verimleri ve eşzamanlık katsayısı (aynı anda devreye alınacak tüketicilerin yüzde oranı) yardımıyla hesap yapılabilir. Bir örnek olmak üzere güç katsayısı 0.7 olarak bulunan ve 0.9'a yükseltilmek istenen böyle bir tesiste gerekli kondansatör gücü sürekli çekilen aktif gücün (verim ve eşzamanlık gözönüne alınarak) yaklaşık %50'si kadardır.

işletme halindeki bir tesiste gerekli kompanzasyon gücünün saptanması çeşitli ölçüm yöntemleri ya da aylık enerji faturalarından yapılabilir. Aktif ve reaktif enerji değerleri biliniyorsa:

$$Q_C = \frac{A_q - A_p \cdot \tan \varphi_1}{t} \quad (1.24)$$

A_q : reaktif enerji (VARh)

A_p : aktif enerji (Wh)

t : işletme süresi (s)

Örnek:

Anma gerilimi 400V olan bir tesiste güç faktörü $\cos \varphi_1 = 0.6$ 'dan $\cos \varphi_2 = 0.9$ 'a yükseltsin,

A - Kompanzasyondan önce:

Aktif güç : $P = 550$ kW

Güç faktörü : $\cos \varphi_1 = 0.6$

Görünür güç : $S_1 = P \cdot \frac{1}{\cos \varphi_1} = 550 \cdot \frac{1}{0.6} = 920$ kVA

Görünür akım: $I_1 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{S_1}{U} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{920 \cdot 10^3}{400} = 1320$ A

B - Kompanzasyondan sonra:

$$\text{Güç faktörü } \cos\varphi_2 = 0.9$$

Gerekli kondansatör gücü: Aktif gücün sabit tutulduğu varsayılarak

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

$$S_2 = P \cdot \frac{1}{\cos\varphi_2} = 550 \cdot 1.11 = 610 \text{ kVA}$$

Görünür akım:

$$I_2 = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{S_2}{U} = \frac{1}{\sqrt{3}} \cdot \frac{610 \cdot 10^3}{400} = 880 \text{ A}$$

$$\frac{S_1 - S_2}{S_1} = 0.34$$

$$\frac{(I_2)^2}{(I_1)^2} = 0.44$$

S_1 görünür gücünün sabit tutarak hesap yapacak olursak kompanzayondan sonra aktif gücü:

$$P_2 = S_1 \cdot \cos\varphi_2 = 920 \cdot 0.9 = 828 \text{ kW}$$

değerine çıkar. Bu durumda gerekli kondansatör gücü:

$$Q_C = S_1 (\sin\varphi_1 - \sin\varphi_2) \approx 340 \text{ kVAR}$$

bulunur.

$\cos\varphi_1 = 0.6$ 'dan $\cos\varphi_2 = 0.9$ 'a kompanzasyonda %34 daha fazla aktif güç taşınabilir. Taşıma kayıpları %56 azalır.

Başlangıçta da belirtildiği gibi bu bölümde güç hesabı harmoniklerin bulunmadığı bir şebekede ve sinüs biçimli akıma göre yapılmıştır. Bu kabullerle bir genellemeye gitmek doğru değildir. Tesiste mevcut tüketicilerin özelliklerinin iyi araştırılması, özellikle haddehaneler, tahrik sistemleri, kaldırma sistemleri, ark, kaynak tesislerindeki elektriksel olayların gözönünde bulundurulması, belli harmoniklerde rezonans olaylarıyla karşılaşılıp karşılaşılmayacağını hesaplanması ve kompanzasyon tesislerinin bu faktörler gözönünde bulundurulması düzenlenmesi teknik ve ekonomik bir zorunluluktur.

1.5. KOMPANZASYON TESİSLERİNDE TESİS ELEMANLARI

Reaktif güç kompanzasyonu amacıyla yapılan tesislerde normal işletme koşullarının ötesinde bazı faktörlerin gözönünde bulundurulmaları gerekir. Bu faktörler, kondansatörlerin devreye sokulmaları ve çıkarılmaları sırasında meydana gelen geçici rejim olayları ile rezonans olaylarıdır. Bu faktörler nedeniyle elemanlar nominal değerlerin üzerinde boyutlandırılır.

1.5.1. Kondansatörler

Statik faz kaydırıcı adı verilen güç kondansatörleri, çok düşük kayıpları (0,2-0,5 W/kVAr), bakım kolaylığı, pratik güç artırımı olanağı gibi üstünlükleriyle reaktif güç üretimi için en uygun elemanlardır.

Bugün şebekelerde güç katsayısının düzeltilmesi için kullanılan kuvvetli akım güç kondansatörleri dört ayrı teknolojiye göre imal edilirler. kapasiteyi belirleyen ana faktör dielektriğin özelliğidir ve farklı dielektrik yapıları farklı teknolojileri oluşturur. Bunlar:

- a- Sade kağıt, askarel (saf kağıtlı emprenyeli teknoloji)
- b- Karma dielektrik yani düz polipropilen film, kağıt, askarel teknolojisi (Emprenyeli)
- c- Metalize polipropilen film, ek olarak epoxy ya da poliüretan reçineli veya bitkisel yağlı (Emprenyesiz)
- d- Pürtüklü polipropilen film, non-polar sıvıllı teknoloji (Emprenyeli)

Kondansatör imali için yukarıdaki teknolojilerden herhangi birine göre hazırlanan dielektrikler gayet ince şeritler haline (yaklaşık 10-15 mikron) getirilir ve işletme gerilimine göre birkaç kat üstüste sarılırlar. dielektriklerin üzeri 5-9 mikron kalınlığında alüminyum folye ile kaplanır. Bir çekirdek üzerine sarılan şeritler bu işlemde sonra çekirdek çıkarılarak sıkıştırılır ve saç ya da yanmaz plastil muhafaza için yerleştirilirler ve aralarında paralel bağlanırlar. Dielektrik dayanımını korumak için vakum altında (emprenyeli) ya da vakumsuz olarak bitkisel ya da sentetil yanmaz yağ emdirilir. Bu şekilde hazırlanan kondansatörlerde kayıplar nominal güçlerin %0.5'inden daha düşüktür.

400V a kadar olan gerilimlerde kondansatör yapımı oldukça ekonomiktir. Bu gerilimde herbir KVar için gerekli hacim sabittir. (Dielektrik tabaka kalınlığı mekanik dayanım bakımından belirli bir değer altına düşürülemez).

Yüksek gerilim için yapılan kondansatörler genellikle 1.15 kV/luk kondansatörlerin seri bağlanmasıyla gerçekleşir. Bu durumda kondansatör levhalarıyla dış metal muhafaza arasında yüksek gerilimlerin oluşmaması için muhafazalar birbirlerine ve toprağa karşı yalıtılır. Böylelikle 110 kV ve daha üzerine kadar kondansatör imal edilebilir.

Kondansatörler çeşitli güç ve gerilim kademelerine göre üretildiklerinden istenen kapasite, dolayısıyla istenen reaktif güç eldesi için bunlardan belli sayıda eleman bir araya getirilerek bir batarya teşkil edilir. Gerilim kademeleri Alçak Gerilim için: 230, 400, 525, 600 V yüksek gerilim için: 3.3, 6.6, 10.5, 15.75 ve 30kV'dur. Kondansatörler sürekli olarak nominal gerilimlerinin 1.1 katına ve günde 6 saat süreyle 1.15 katına dayanabilir. Bu takdirde güçleri nominal güce göre % 21 veya % 32 oranında arttırılmış olur.

Kondansatörler normal olarak -10°C ile $+35^{\circ}\text{C}$ arasındaki sıcaklıklarda kullanılacak şekilde yapılır. Bu sıcaklık aralığının dışında özel havalandırma gereklidir.

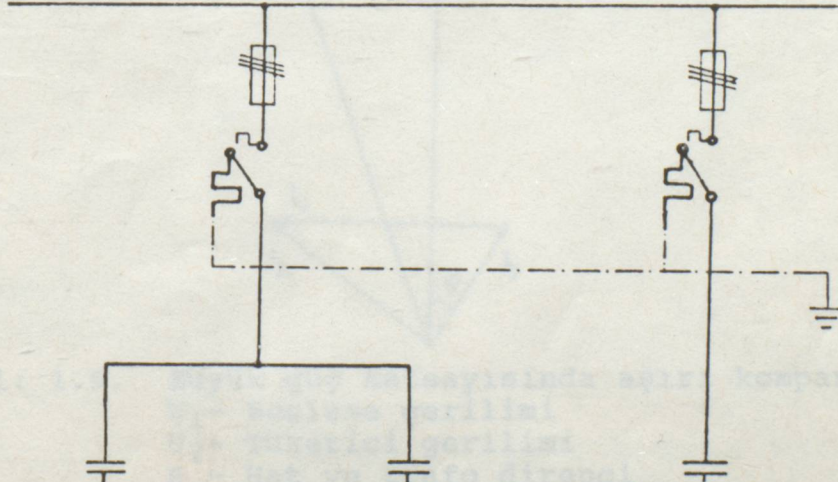
1.5.2. Anahtarlar

Tekli kompanzayonda daha önce sözedildiği gibi kondansatörler motor şalteri üzerinden devreye sokulur ve çıkarılır. Aynı bir anahtara gerek yoktur.

Ancak gerek grup, gerekse merkezi düzenlemelerde 500V'a kadar olan alçak gerilim tesislerinde kondansatörler yük anahtarları üzerinden devreye sokulup çıkarılır. Yük anahtarları, açma sırasında ark etkisiyle kontakların yanmasını önlemek için nominal kondansatör akımının 1.25-1.8 katına göre seçilir. Tablo: 4'de bu anahtarların seçimine ilişkin değerler verilmiştir.

Kondansatörlerin devreye alınmaları esnasındaki büyük kapama akımlarının sınırlandırılması amacıyla kondansatöre seri direnç bağlanır ve sonra bu direnç devreden çıkarılır. Kondansatör irtibat kabloları uzatılarak hat empedansının büyütülmesiyle de sorun çözümlenebilir. Bir diğer problem de kondansatörlerin devreden çıkmaları esnasında kalan artık elektriksel yüküdür. Bu yükün normal olarak izolasyon direnci üzerinden boşalması hem personel açısından tehlike yaratır, hem de yeniden devreye sokulma esnasında şiddetli dengeleme akımları doğurur.

Anlatılan bu zararlı etkileri gidermek amacıyla kondansatörler kontaklar kapanırken bir ön direnç üzerinden kapanan ve açılırken de kondansatör uçlarını bir boşaltma direnci üzerinden topraklayan özel tip anahtarlar kullanılmalıdır (Şekil: 1.8).



Şekil: 1.8. Kondansatörlerin özel tip anahtarlar üzerinden devreye bağlanması

Kondansatör anahtarı olarak günümüzde en yaygın uygulama kuru tip kontaktör kullanımıdır. Büyük açma hızları ve ark söndürme hücreleri sayesinde, kontaktörler yardımıyla 500V a kadar olan gerilimlerde 800-1000A'e kadar kondansatör akımları rahatça kesilebilir. Kontaktörlerin uzaktan kumanda olanağı ile Şekil: 1.11 ve 1.12'de görüldüğü gibi otomatik kondansatör tesislerinde kullanılmaya da uygundur.

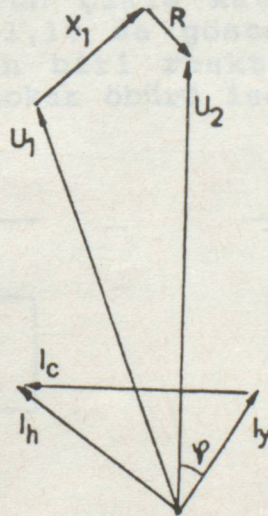
Günümüzde güç elektroniğindeki gelişmelerle kondansatörlerin devreye sokulup çıkarılmasında anahtar eleman olarak tiristör kullanımı giderek yaygınlaşmaktadır. Hareketli mekanik parçaların bulunmayışı, çok uzun ömürleri (teorik olarak sonsuz) ve geçici rejim olaylarına karşı büyük üstünlükleri nedeniyle kompanzasyon tesislerinde tiristör kullanımı önemli bir konu teşkil etmektedir.

1.5.3. Regülatörler ve Kondansatörlerin Otomatik Ayarı

Kondansatörlerin kademeli olarak devreye sokulup çıkarılmalarında reaktif güç gereksinimindeki dalgalanmaların kontrolü gerekir.

Kontrol gereksinimi iki ana nedenden kaynaklanmaktadır: Gerilimin sabit tutulmasını kolaylaştırmak ve yüksek frekanslı akımların kondansatörler tarafından yutulmasını yani kondansatörleri zorlamasını önlemek.

Şekil: 1.9'daki fazör diyagramından görülebileceği gibi, eğer bir trafonun sekonder tarafına büyük bir kondansatör bataryası bağlanırsa, yükteki azalma aırı kompanzasyona neden olur, sisteme trafo üzerinden kapasitif akım akararak tüketicilerin gerilimi sistem gerilimini aşabilir.



Şekil: 1.9. Büyük güç katsayısında aşırı kompanzasyon durumu
 U_1 - Besleme gerilimi
 U_2 - Tüketici gerilimi
 R - Hat ve trafo direnci
 X - Hat ve trafo reaktansı

Gerilimdeki artım yüzde olarak;

$$\frac{U}{U} = u_x \cdot \frac{C}{S_T} \quad (1.25)$$

formülüyle bulunabilir. Burada;

u_x' - Kondansatör yerine bağlı olarak trafo indirgenmiş reaktans üzerindeki oranlanmış gerilim düşümü (%)

Q_C - Kondansatör gücü (KVA_r)

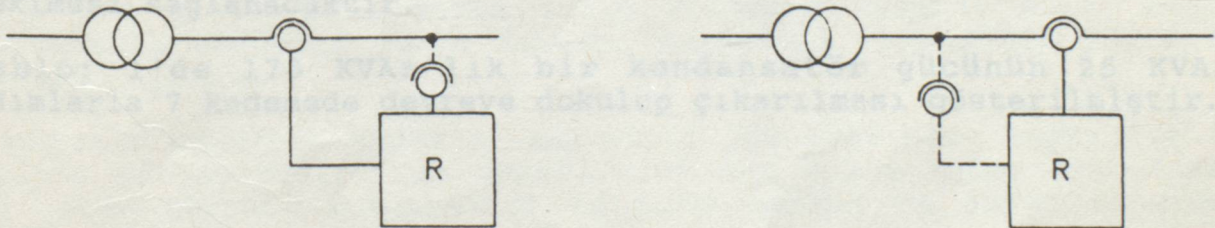
S_T - Trafo anma gücü (KVA)

dir.

Kondansatör bataryası daima, ihtiyaç fazlası kalan güç, trafo gücünün empedanstaki gerilim düşümüne bağlı olarak belirli bir yüzdesinden büyük olmayacak şekilde ayarlanmalıdır. Böylelikle harmonik akımlarının yutulması ve bu sayede de gerilim dalgasının bozulması kabul edilebilir sınırlarda kalabilir.

Otomatik kontrol, gerilime, güç faktörüne ve reaktif güce bağlı olarak yapılabilir. Reaktif güç ihtiyacında artma olmaksızın aktif gücün çok artması gerilim düşümüne yol açabilir. Bu durumda öyle bir kontrolün, gerek olmadığı halde kondansatörleri devreye sokması mümkündür. Öte yandan güç faktörüne bağlı bir kontrol de, ancak çok ince adımlarla ayar yapılacaksa düşünülebilir. Üstelik güç faktörü aktif güce bağlı olduğundan, reaktif güç sabit kaldığı fakat aktif gücün değiştiği durumlarda de böyle bir kontrol kondansatörleri devreye sokup çıkaracaktır.

Belirtilen bu hususların ışığında otomatik kontrolün reaktif güç değişimlerine göre yapılması daha iyi sonuç verecektir. Elektromekanik regülatörlerle yapılan da budur. Ancak günümüzde kullanılan elektronik regülatörlerde biraz sonra bahsedileceği gibi faz karşılaştırması esas alınarak kontrol güç faktörüne göre yapılmaktadır. Regülatörün çıkış katı iki röle grubundan oluşur (lojik kapılar). Şekil 1.10 da gösterildiği şekilde alınan ölçü işaretleriyle rölelerden biri reaktif güç gereksinimi artarken kondansatörleri devreye sokar öbürü ise ihtiyacın azalması durumunda devreden çıkarır.



gerilim ucu
akım ucu

(a)

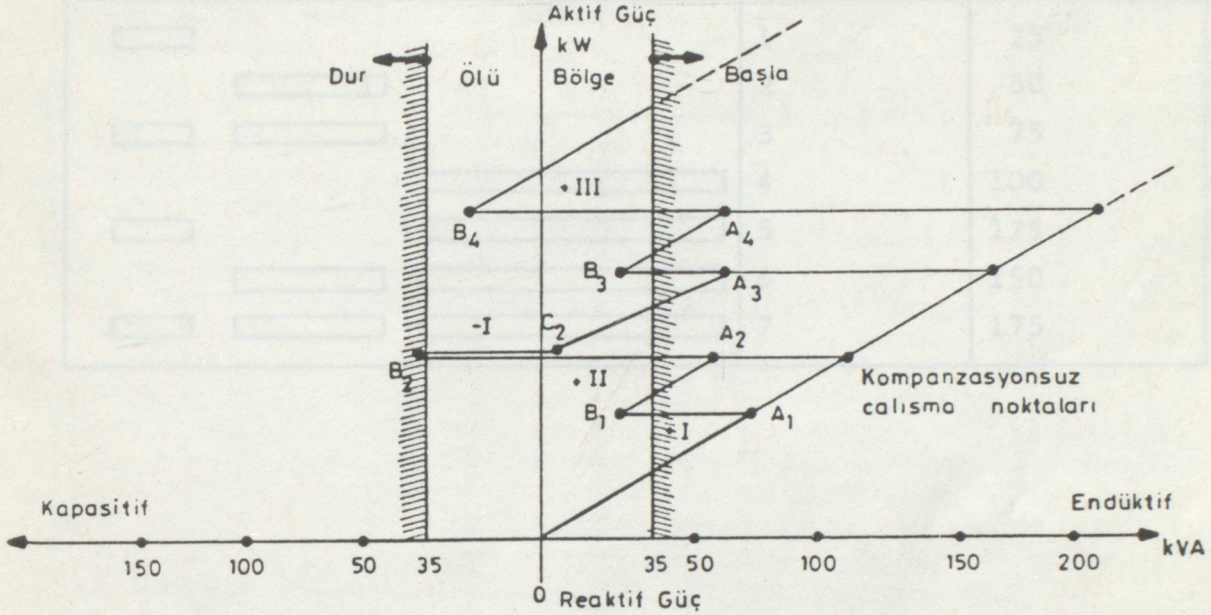
(b)

Şekil: 1.10 Reaktif güç regülatörünün akım ve gerilim uçlarının prensip bağlama şekli;

a) Doğru bağlantı

b) Yanlış bağlantı

Üretilen kontrol işaretleri zaman geciktirme röleleri üzerinden kontaktörlere gönderilir. Zaman geciktirmesi yük dalgalanmalarında hızlı açıp kapamadan korunmak için yapılır. Şekil: 1.11'de bu ayar diyagramı görülmektedir.



Şekil: 1.11 Otomatik kondansatör donanımında ayar diyagramı

Şekildeki örnekte $2 \times 35 = 70$ KVAR lık bir ölü bölge seçilmiştir. Artan endüktif güç 35 KVAR a gelince başla komutu verilmekte, artan kapasitif güç 35 KVAR'ı aşınca dur komutu verilmektedir. Ölü bölgede açma kapama sinyali üretilmez. Böylelikle otomatik kontrol salınımdan (hunting) korunmuş olur. Röle üzerindeki ayar mekanizması yardımıyla çalışma sahası yalnızca endüktif tarafa da kaydırılabilir.

Devreye alınmada en üniform güç faktörü ayarı, kondansatör gruplarının eşit adımlarla devreye sokulmasında elde edilir. Bunun için kondansatör gruplarının güçleri eşit olmalıdır, ya da oran 1:2:2 şeklinde seçilir.

Grupların eşit kapasitede olmasıyla bağlama tesisatının eş şekilde eskimesi sağlanacaktır.

Tablo: 1'de 175 KVAR'lık bir kondansatör gücünün 25 KVAR'lık adımlarla 7 kademede devreye dokulup çıkarılması gösterilmiştir.

25 KVAR 1	50 KVAR 2	100 KVAR 4	Kademe	Devredeki kond. gücü
☐			1	25
	☐		2	50
☐	☐		3	75
		☐	4	100
☐		☐	5	125
	☐	☐	6	150
☐	☐	☐	7	175

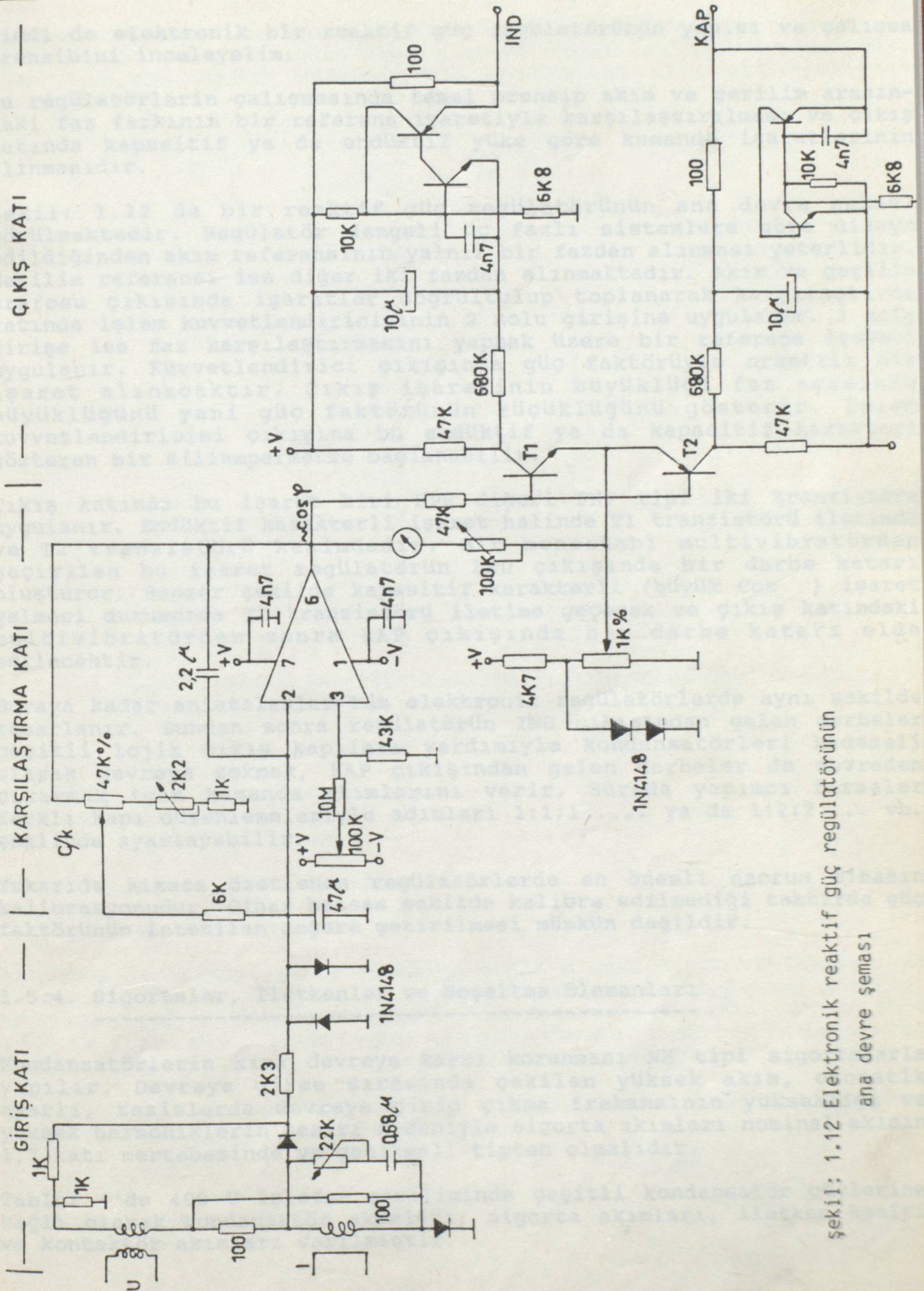
Tablo: 1 1:2:4 kademeli bir reaktif güç regülatörüyle 175 KVAR lık bir toplam kondansatör gücünün 7 kademede 25'er KVAR'lık adımlarla devreye sokulup çıkarılması

Reaktif güç regülatörü akım ve gerilim transformatörleriyle şebekeden galvanik olarak yalıtılmışlardır. Gerilim diyelim S ve T fazlarından ölçülüyorsa, akım da diğer fazdan, R fazından ölçülür. Çıkışta reaktif akımla orantılı pozitif ya da negatif bir doğru gerilim üretilir. Bunlar pozitif ya da negatif alternans aşıldığında impuls generatörüne start komutunu verir. Generatör çıkışı regülatör cinsine göre beş ya da daha fazla çıkış rölesine kumanda eder. Regülatör genellikle endüktif yükte devreyi kapayacak, kapasitif yükte açacak şekilde ayarlanır.

Regülatör üzerinde endüktif-kapasitif yük ayarından başka ikinci bir ayarda C/k ayarındadır. C/k değeri 0.01 den 0.3 e kadar ayarlanabilir. Bu değer birinci kondansatör adımının gücüne ve akım transformatörünün çevirme oranına bağlıdır ve;

$$c = \frac{1. \text{ kondansatör adımı gücü}}{k \text{ Akım trafosu çev. oranı}} \times Z \quad (1.26)$$

formülüyle belirtilir. Burada, Z, akım ve gerilim için regülatör üzerinde yazılı bir çarpandır.



şekil: 1.12 Elektronik reaktif güç regülatörünün ana devre şeması

şimdi de elektronik bir reaktif güç regülatörünün yapısı ve çalışma prensibini inceleyelim.

Bu regülatörlerin çalışmasında temel prensip akım ve gerilim arasındaki faz farkının bir referans işaretiyle karşılaştırılması ve çıkış katında kapasitif ya da endüktif yüke göre kumanda işaretlerinin alınmasıdır.

Şekil: 1.12 de bir reaktif güç regülatörünün ana devre şeması görülmektedir. Regülatör dengeli üç fazlı sistemlere göre dizayn edildiğinden akım referansının yalnız bir fazdan alınması yeterlidir. Gerilim referansı ise diğer iki fazdan alınmaktadır. Akım ve gerilim trafosu çıkışında işaretler doğrultulup toplanarak karşılaştırma katında işlem kuvvetlendiricisinin 2 nolu girişine uygulanır. 3 nolu giriş ise faz karşılaştırmasını yapmak üzere bir referans işareti uygulanır. Kuvvetlendirici çıkışında güç faktörüyle orantılı bir işaret alınacaktır. Çıkış işaretinin büyüklüğü faz açısının büyüklüğünü yani güç faktörünün küçüklüğünü gösterir. İşlem kuvvetlendiricisi çıkışına bu endüktif ya da kapasitif karakteri gösteren bir miliampermetre bağlanabilir.

Çıkış katında bu işaret biri NPN diğeri PNP tipi iki tranzistöre uygulanır. Endüktif karakterli işaret halinde T1 tranzistörü iletimde ve T2 tranzistörü kesimdedir. Bir monostabl multivibratörden geçirilen bu işaret regülatörün IND çıkışında bir darbe katarı oluşturur. Benzer şekilde kapasitif karakterli (büyük Cos ϕ) işaret gelmesi durumunda T2 tranzistörü iletime geçecek ve çıkış katındaki multivibratörden sonra KAP çıkışında bir darbe katarı elde edilecektir.

Buraya kadar anlatılanlar tüm elektronik regülatörlerde aynı şekilde tasarlanır. Bundan sonra regülatörün IND çıkışından gelen darbeler çeşitli lojik çıkış kapıları yardımıyla kondansatörleri kademeli olarak devreye sokmak, KAP çıkışından gelen darbeler de devreden çıkarmak için kumanda akımlarını verir. Burada yapımcı firmalar farklı kapı düzenlemeleriyle adımları 1:1:1 ya da 1:2:2.... vb. şeklinde ayarlayabilir.

Yukarıda kısaca özetlenen regülatörlerde en önemli sorun cihazın kalibrasyonudur. Cihaz hassas şekilde kalibre edilmediği takdirde güç faktörünün istenilen değere getirilmesi mümkün değildir.

1.5.4. Sigortalar, İletkenler ve Boşaltma Elemanları

Kondansatörlerin kısa devreye karşı korunması NH tipi sigortalarla yapılır. Devreye girme sırasında çekilen yüksek akım, otomatik ayarlı, tesislerde devreye girip çıkma frekansının yüksekliği ve yüksek harmoniklerin tesiri nedeniyle sigorta akımları nominal akımın 1,7 katı mertebesinde ve gecikmeli tipten olmalıdır.

Tablo: 4'de 400 V işletme geriliminde çeşitli kondansatör güçlerine bağlı olarak kondansatör akımları, sigorta akımları, iletken kesiti ve kontaktör akımları verilmiştir.

İletken seçiminde de darbe akımlarının tesiri gözönünde bulundurularak normal tesislere göre seçilenlerden büyük kesitte seçilmelidir. Eğer sistemde termik koruma varsa iletkenler daha alt kademeden seçilebilir.

Q_C	I_C	I_S	q	I_K
(KVar)	(A)	(A)	(mm ²)	(A)
1	1.44	6	1.5	10
5	7	16	1.5	16
10	14	25	2.5	32
15	22	36	4	32
20	29	50	6	32
25	36	63	10	45
30	43	80	16	45
40	58	100	25	63
50	72	125	35	110
75	108	200	70	170
100	144	250	95	170
125	180	315	150	-
150	216	355	150	-
200	288	500	2x95	-
250	361	630	2x150	-
300	433	800	2x240	-
350	505	1000	4x95	-
400	577	1000	4x95	-

Tablo: 2 400V işletme gerilimi için çeşitli kondansatör güçlerine ait tesis elemanlarının değerleri

Q_C - Kondansatör gücü

I_C - Kondansatör akımı

I_S - Sigorta akımı

q - İletken kesiti

I_K - Kontaktör akımı

Motor ya da transformatör uçlarına sabit olarak bağlı kondansatörler bu tüketicilerin devreden çıkmalarıyla sargıları üzerinden boşalır. Bu nedenle bir deşarj direncine gerek göstermezler. Ancak, bir sigorta anahtar üzerinden bağlı kondansatörler devreden çıkarıldığında bir boşalma direnci üzerinden topraklanır.

Şarj edilmiş bir kondansatör bir direnç üzerine bağlanırsa zamana bağlı olarak;

$$U_1 = U_2 \cdot e^{-t/T} \quad (1.27)$$

formülüne göre boşalır.

Burada;

- U_1 - Dolu kondansatör gerilimi
- U_2 - Boşalmış kondansatörün artık gerilimi
- t - Boşalma süresi
- T - Zaman sabiti ($T = R.C$)
- R - Boşalma direnci
- C - Kondansatör kapasitesidir.

Pratik olarak boşalma süresi $5.T$ kadardır. Boşaltma direnci hesabında kondansatör üzerindeki gerilimin bir dakika içinde $50V$ 'a düşmesi öngürülür. Kondansatör işletme geriliminin nominal geriliminden %15 fazla olduğu da gözönüne alınarak (1.27) formülünden boşaltma direnci için:

$$R = \frac{1}{C} \cdot \frac{60s}{\ln 1.15 \cdot U_n - I_n \frac{50}{\sqrt{2}}} \quad (1.28)$$

bulunur. Boşaltma dirençleri genellikle bugün imal edilen kondansatörlerin içinde bağlanmış durumdadır.

Deşarj için direnç yerine bobin kullanımı daha uygundur. Bunların reaktif dirençleri yüksek olduğundan sürekli kondansatör uçlarına paralel bağlı kalabilirler. Ayrıca Ohmik dirençleriyse çok küçük olduğundan kayıpları azdır. Üstelik boşalma zamanı Ohmik dirençle orantılı olduğundan boşalma süresi $1/10$ saniye mertebesinde.

BÖLÜM - 2

KOMPANZASYON TESİSLERİNİN SINIFLANDIRILMASI

Tesise bağlı olan alıcıların durumuna göre çeşitli tip kompanzasyon yapılır.

2.1. Tesis şekline göre

2.1.1. Ferdi kompanzasyon

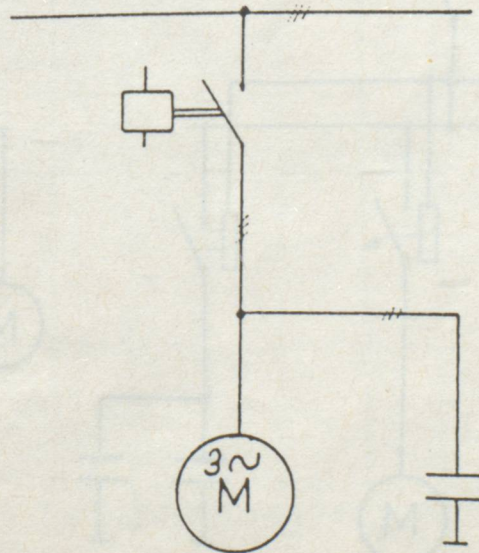
Bu tür kompanzasyonda tesisteki alıcılar (motor, lamba, transformatör v.s) ayrı ayrı kompanze edilirler. Böylece kompanzasyonda kontrol edilecek güç azalır. Yani güç küçük parçalar halinde ayrı ayrı kontrol edilmiş olur. Böyle kompanzasyonda büyük güçlü motorların devreye girip çıkmasından dolayı oluşan dalgalanmalar hemen yanındaki kompanzasyon ünitesinde süzülerek tesis şebekesinde salınmanın küçük mertebede kalması temin edilir. Bu durumda alıcı bir kısa devre motorlu (sincap kafes) asenkron motor ise, kompanzasyon gücü yaklaşık;

$$Q_C \text{ (KVar)} = 0,9 \cdot I_o \text{ (A)} \cdot U \text{ (V)} \cdot 10^{-3} \quad (2.1)$$

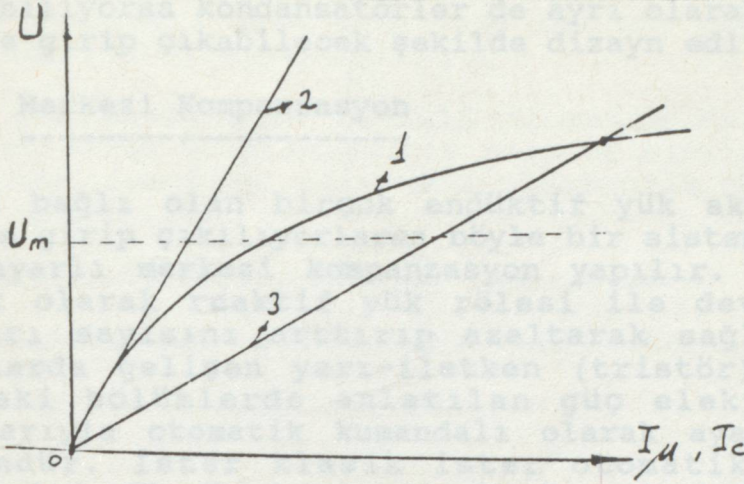
olur. Burada;

I_o : Motorun boşa çalışma akımıdır.

Böyle kompanzasyonda motorla aynı anda çalışan kondansatör, motor devreden çıkınca motora bağlı kondansatör, motoru aşırı ikaz ederek kendi kendine ikazlanma olmasına ve bu ikazlanma gerilimi kondansatör gerilim toleransını aşabilir. Bu sebepten dolayı kondansatör gücü motorun boştaki reaktif gücünün %90 ını geçmeyecek şekilde seçilmesi gerekir.



Şekil-13a: Ferdi Kompanzasyon



Şekil-13.b: Motor mıknatıslama akımı ve kondansatör akımı

I_c : Kondansatör akımı

I_u : Motor mıknatıslama akımı (kendi kendine uyarma kesişim noktasında olabilir).

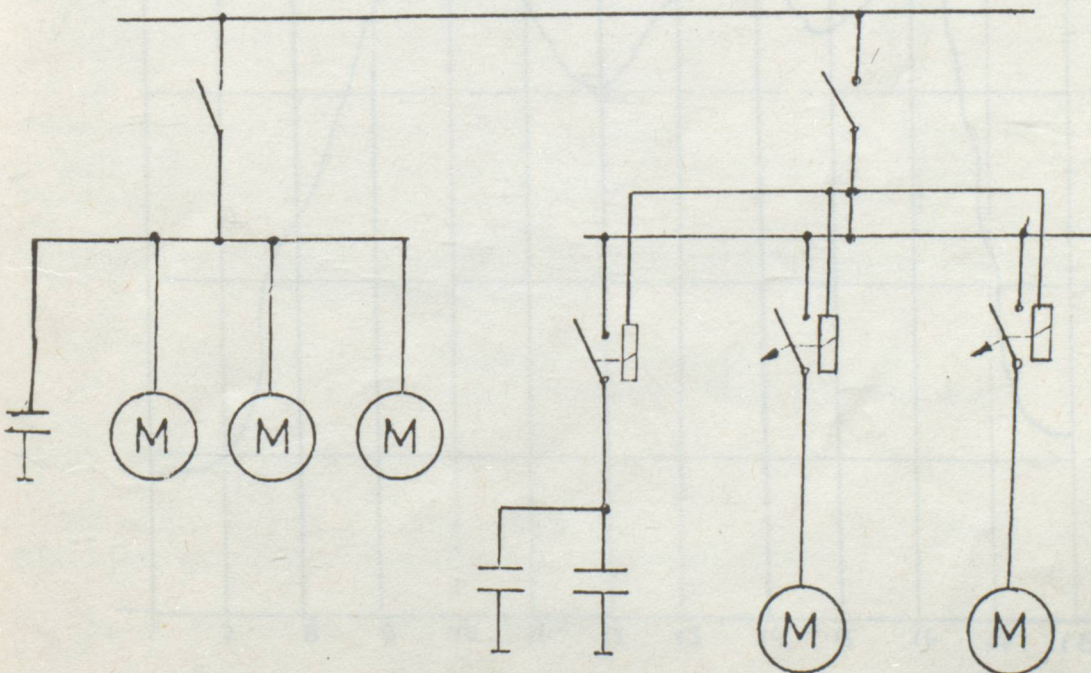
1 : Motor çalışma eğrisi

2,3: Kondansatör eğrileri

U_m : Motor nominal gerilimi

2.1.2. Grup Kompanzasyonu

Birden fazla alıcı aynı anahtarla devre kumandası yapıldığında grup olarak kompanzasyon yapılabilir.



Şekil-14: Grup Kompanzasyonu

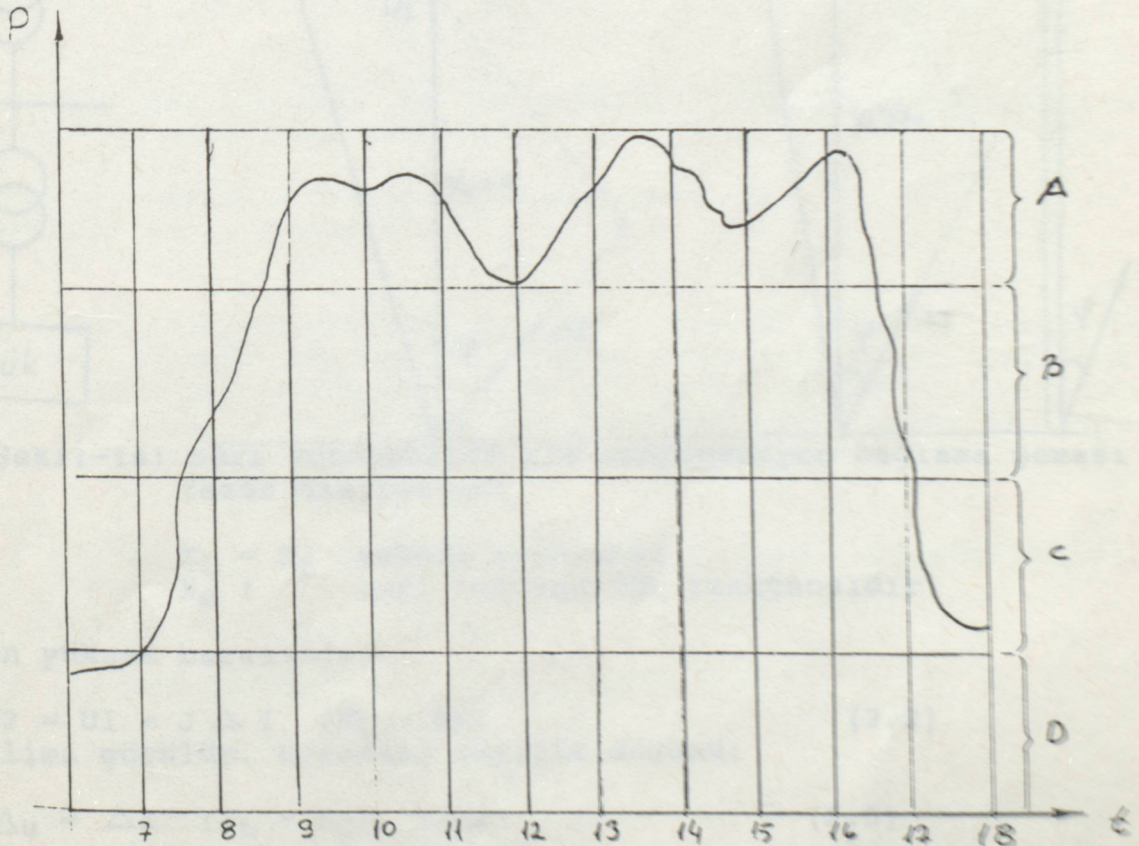
Böyle kompanzasyonda gruptaki motorlar aynı anda çalışıp durmalıdır. Şayet böyle aynı anda değilse her motor ayrı olarakta çalışabiliyorsa kondansatörler de ayrı olarak bu motor kontaklarıyla devreye girip çıkabilecek şekilde dizayn edilir.

2.1.3. Merkezi Kompanzasyon

Buraya bağlı olan birçok endüktif yük akımı çeşitli zamanlarda devreye girip çıkıyorlarsa böyle bir sistemde çekilen yük durumuna göre ayarlı merkezi kompanzasyon yapılır. Bu ayarlı kompanzasyon klasik olarak reaktif yük rölesi ile devrede olan kondansatör grupları sayısını arttırıp azaltarak sağlanmaktadır. Fakat son zamanlarda gelişen yarı-iletken (tristör) kumandalı devrelerle ilerdeki bölümlerde anlatılan güç elektronikli kompanzasyon metotlarıyla otomatik kumandalı olarak ayarlı bir şekilde yapmak mümkündür. İster klasik ister otomatik kumandalı olsun $\cos\phi$ seviyesini düzgün bir sınırdan tutmak için kondansatör devreye sokmada veya güç elektronikli devrelerle kapasitif akımı arttırmada harmoniklerin az olması esas alınır.

Böyle merkezi kompanzasyon teknik bakımdan hesaplanması ve projelendirilmesi ve mevcut tesise montajı daha kolay yapılır.

Bir tesisin hangi tür kompanzasyonla kompanze edilmesi lazım geldiğini muhtelif zamanlarda alınmış yükleme eğrilerine göre seçim yapılır.



Şekil-15: Yükleme Eğrisi Örneği

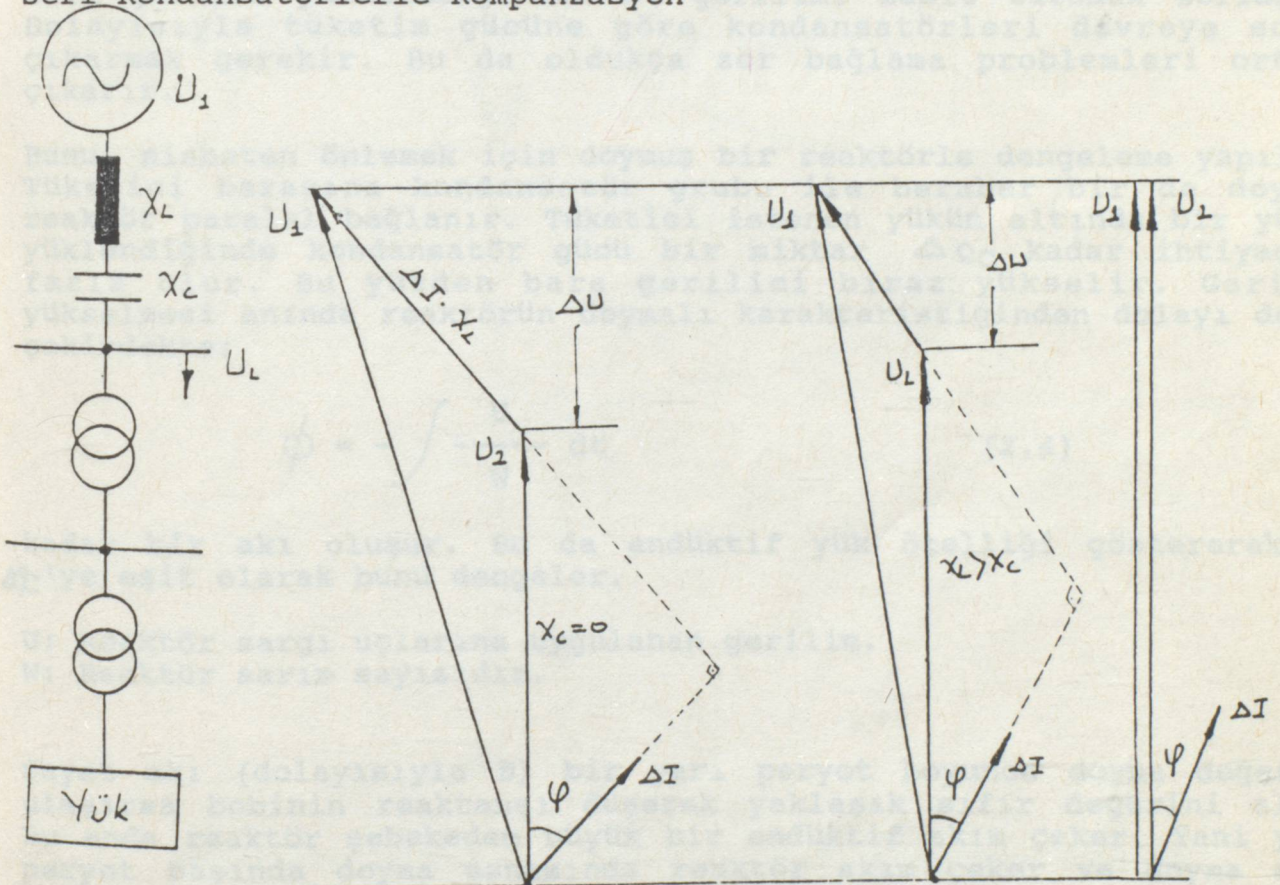
Prensip olarak şekilde A bölümünde otomatik merkezi kompanzasyon, B ve C bölümleri için grup veya tek tek kompanzasyon D bölümü için sabit kompanzasyon yapılır.

Fakat güç elektronik devreli otomatik kontrollu kompanzasyondan endüktif akıma göre kapasitif akım tristörlerle sınırlandırıldığından bütün durumlar için güç elektronik devrelerle kompanzasyon yapmak geçerlidir.

2.2. Kondansatörlerin Bağlama Şekline Göre

Kompanzasyon seri veya paralel kondansatörlerle yapılabilir.

Seri Kondansatörlerle Kompanzasyon



Şekil-16: Seri kondansatör ile kompanzasyon bağlama şeması ve fazör diagramları

$X_L = X_{\text{ş}}$ şebeke reaktansı

X_c : seri kondansatör reaktansıdır

Yükün yüksek barasında;

$$U_2 = U_1 - j \Delta I (X_L - X_c) \quad (2.2)$$

gerilimi görülür. Buradaki gerilim düşümü:

$$\Delta u = \Delta I (X_L - X_c) \sin \varphi \quad (2.3)$$

dir. $X_L = X_c$ olması halinde yani şebeke reaktansına eşit reaktansa sahip bir kondansatör bağlandığında gerilim düşümü sıfıra yakın olur. Bu tip kompanzasyonda yük akımının tümü kondansatör üzerinden

2.2.2. Paralel Kondansatörler ile Kompanzasyon

2.2.2.1. Sabit Kondansatör ile:

a) Doymuş reaktörle dengelenen sabit kondansatör:

Yük barasına paralel olarak kondansatör grupları bağlanır. Her faza ayrı kondansatör grubu bağlandığından paralel kondansatör ile nisbeten dengesizliklerde önlenir.

Yalnız, bu tip kompanzasyonda kondansatör grupları devamlı devrede olduklarından tesis az yüklendiğinde beya yüklenmediği zaman dizayn ve hesap edilen kondansatör gücü fazla gelir. Bu durumda tüketici bara gerilim yükseleceğinden bu gerilimi sabit tutumak zorlaşır. Dolayısıyla tüketim gücüne göre kondansatörleri devreye sokup çıkarmak gerekir. Bu da oldukça zor bağlama problemleri ortaya çıkarır.

Bunu, nisbeten önlemek için doymuş bir reaktörle dengeleme yapılır. Tüketici barasına kondansatör grubu ile beraber bir de doymuş reaktör paralel bağlanır. Tüketici istenen yükün altında bir yükle yüklendiğinde kondansatör gücü bir miktar ΔQ_C kadar ihtiyaçtan fazla olur. Bu yüzden bara gerilimi biraz yükselir. Gerilim yükselmesi anında reaktörün doymalı karakteristiğinden dolayı demir çekirdekte;

$$\phi = - \int \frac{U}{W} dt \quad (2.4)$$

kadar bir akı oluşur. Bu da endüktif yük özelliği göstererek bu ΔQ_C 'ye eşit olarak bunu dengeler.

U: Reaktör sargı uçlarına uygulanan gerilim.

W: Reaktör sarım sayısıdır.

Şayet akı (dolayısıyla B) bir yarı peryot boyunca doyma değerine ulaşırsa bobinin reaktansı düşerek yaklaşık sıfır değerini alır. Bu anda reaktör şebekeden büyük bir endüktif akım çeker. Yani yarı peryot başında doyma esnasında reaktör akım çeker ve doyma sona erince akımda tekrar sıfır olur. Karakteristikte;

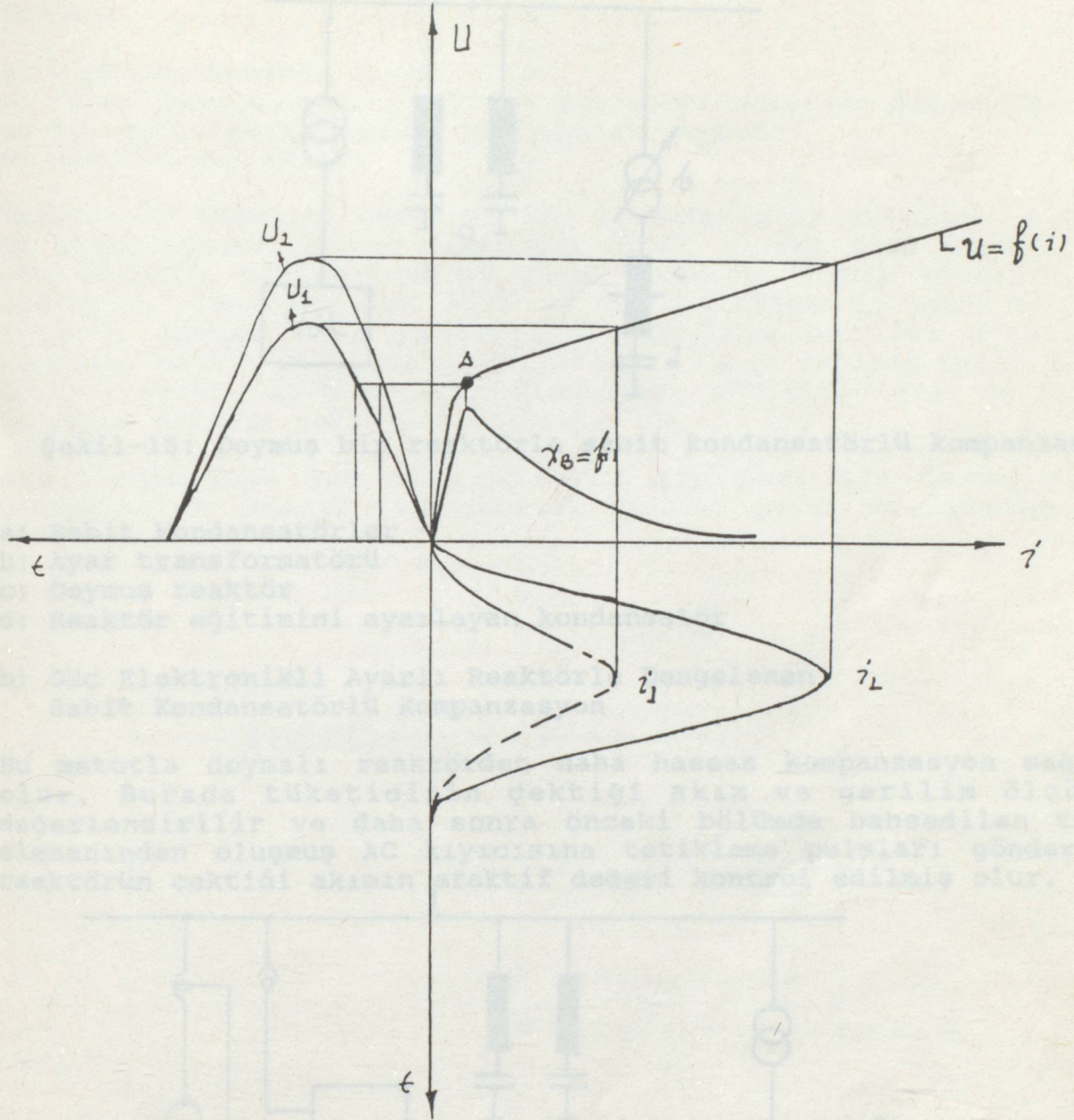
U = f (i) eğrisi doymuş reaktörün mıknatıslama karakteristiği

A : Doymanın başlangıç noktası

XB= f (i) reaktörün reaktans karakteristiği

U₁; U₂; Reaktöre uygulanan gerilimler

Yük var olduğunda U₁, yük değişiminde kondansatörlerden dolayı yükselen gerilim ise U₂ olur.

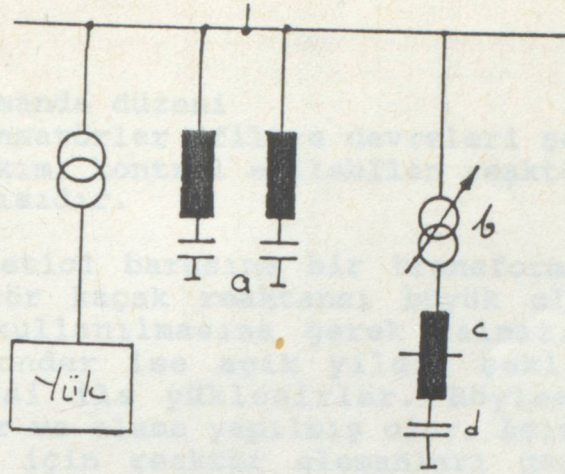


Şekil-17: Doymuş bir reaktörün yarı peryotta akım ve gerilim karakteristiği

i_1, i_2 : U_1 ve U_2 gerilimlerinin bulunduğu zaman reaktörün çektiği akımlardır.

Böyle çalışmakla otomatik bir ölçme ve ayar ünitesi görevini yapar. Böyle bir kompanzasyonda reaktör uçlarındaki gerilim değişimleri alıcı reaktif gücüne göre daha az olduğundan tam ideal bir kompanzasyon olmaz.

Doymuş reaktörler gerilim değişmelerine karşı hassas olduklarından alıcı barasına bir ayar transformatörü üzerinden bağlanır. Ayrıca çok gürültülü çalışması, üzerindeki kayıpların büyük olması ve harmonikler üretmesi mahzurları arasındadır.

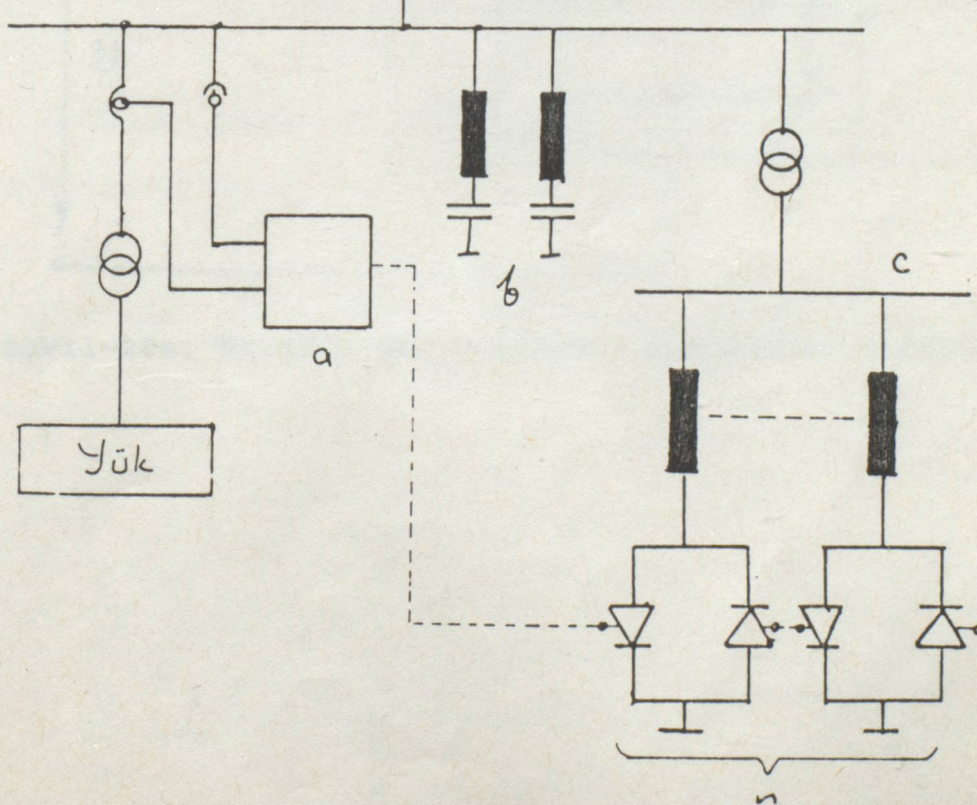


Şekil-18: Doymuş bir reaktörle sabit kondansatörlü kompanzasyon

- a: Sabit kondansatörler
b: Ayar transformatörü
c: Doymuş reaktör
d: Reaktör eğitimi ayarlayan kondansatör

b) Güç Elektronikli Ayarlı Reaktörle Dengelenen Sabit Kondansatörlü Kompanzasyon

Bu metotla doymalı reaktörden daha hassas kompanzasyon sağlanmış olur. Burada tüketicinin çektiği akım ve gerilim ölçülerek değerlendirilir ve daha sonra önceki bölümde bahsedilen tristör elemanından oluşmuş AC kıyıcısına tetikleme pulsları gönderilerek reaktörün çektiği akımın efektif değeri kontrol edilmiş olur.



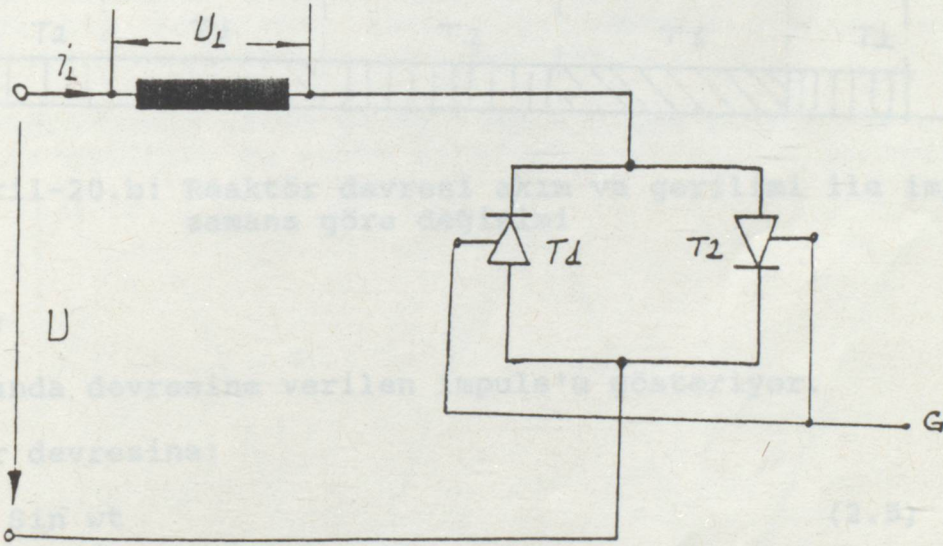
Şekil-19: Güç Elektronik kumandalı reaktör ile kompanzasyon prensip şeması

Burada:

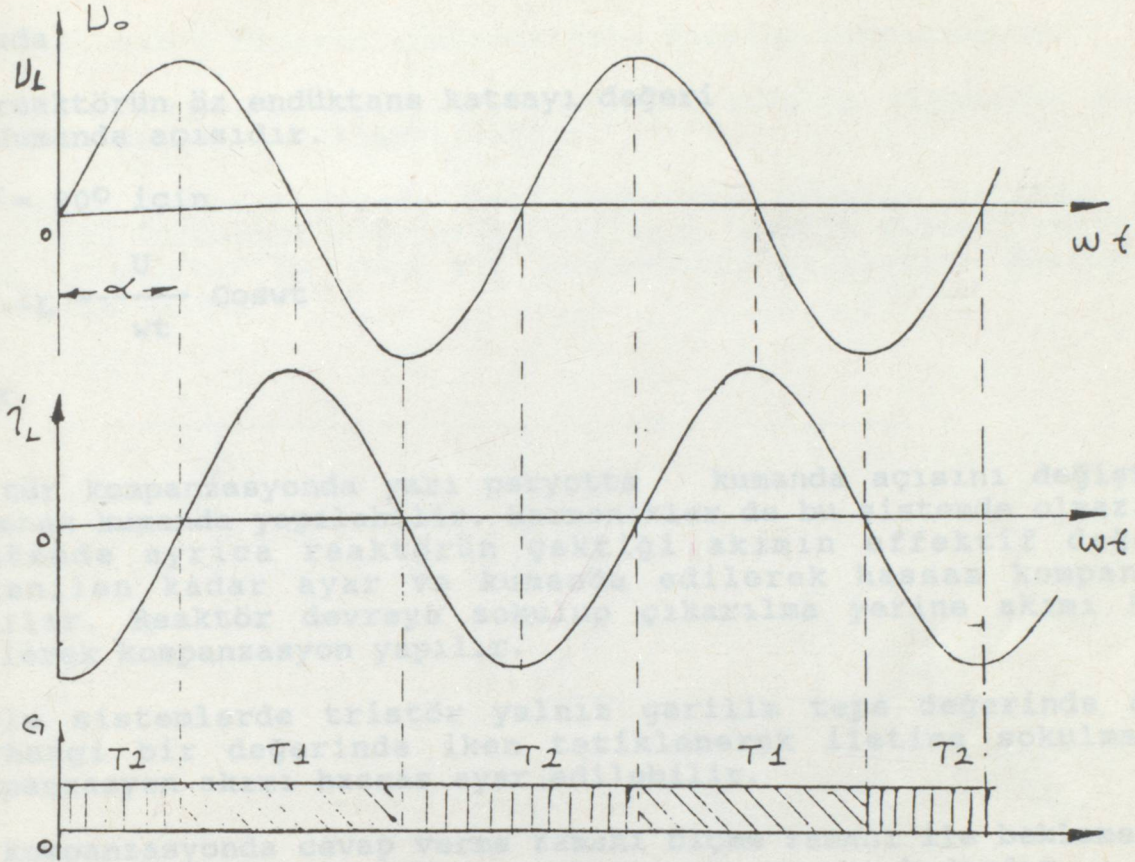
- a: Ölçme ve kumanda düzeni
- b: Sabit kondansatörler (filtre devreleri şeklinde düzenlenmiştir)
- c: Tristörle akımı kontrol edilebilen reaktör
- n: Reaktör sayısıdır.

Reaktörler tüketici barasına bir transformator üzerinden bağlanır. Bu transformator kaçak reaktansı büyük olarak özel imal edilmişse reaktörlerin kullanılmasına gerek kalmaz. Primer sargılar üçgen bağlanır. Sekonder ise açık yıldız şeklinde üç adet bir fazlı tristör devresi ile yüklenirler. Böylece her faz ayrı olarak kompanze edilir ve eleme yapılmış olur. Aşırı bağlama gerilimlerinin oluşturulmaması için reaktör elemanları gerilimin (-) ve (+) tepe değerine devreye sokulup çıkarılır.

Gerilimin tepe değerine tristör kapısına bir darbe sinyali gönderilerek tristör tetiklenerek ilettime geçer ve devreden bir i akımı çeker.



Şekil-20a: Tristör (AC kıyıcısı) kısmındaki reaktör devresi



Şekil-20.b: Reaktör devresi akım ve gerilimi ile impulsların zamana göre değişimi

Burada;

G: Kumanda devresine verilen impuls'u gösteriyor.

Reaktör devresine:

$$u = U \cdot \sin \omega t \quad (2.5)$$

gibi sinsoidal bir gerilim uygulanırsa reaktör uçlarındaki gerilim

$$U_L = \frac{d i_L}{dt} \quad (2.6)$$

akım ise:

$$i_L = \frac{1}{\omega L} \int_{\alpha}^{\omega t} \hat{U} \cdot \sin \omega t \, d(\omega t) \quad (2.7)$$

$$= \frac{\hat{U}}{\omega L} (\cos \omega t - \cos \alpha) \quad (2.8)$$

Burada;

L : reaktörün öz endüktans katsayı değeri

α : Kumanda açısıdır.

$\alpha = 90^\circ$ için

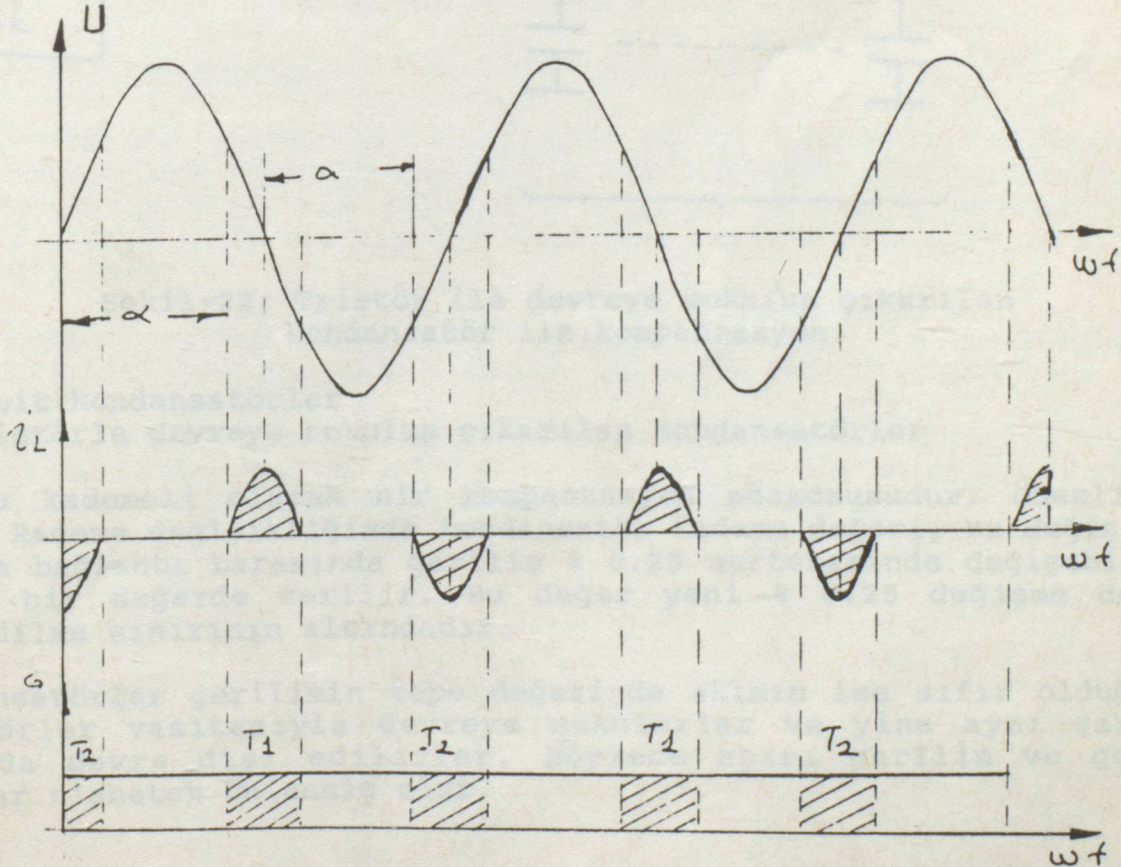
$$i_L = -\frac{U}{\omega L} \cos \omega t$$

olur.

Bu tür kompanzasyonda yarı peryotta kumanda açısını değiştirerek istenen kumanda yapılabilir. Harmonikler de bu sistemde olmaz. Böyle sistemde ayrıca reaktörün çektiği akımın efektif değeri de istenilen kadar ayar ve kumanda edilerek hassas kompanzasyon yapılır. Reaktör devreye sokulup çıkarılma yerine akımı kontrol edilerek kompanzasyon yapılır.

Böyle sistemlerde tristör yalnız gerilim tepe değerinde değilde herhangi bir değerinde iken tetiklenerek ilettime sokulması ile kompanzasyon akımı hassas ayar edilebilir.

Bu kompanzasyonda cevap verme zamanı ölçme zamanı ile bekleme zamanı toplamına eşittir. Bu zaman ortalama yarı peryot kadardır.

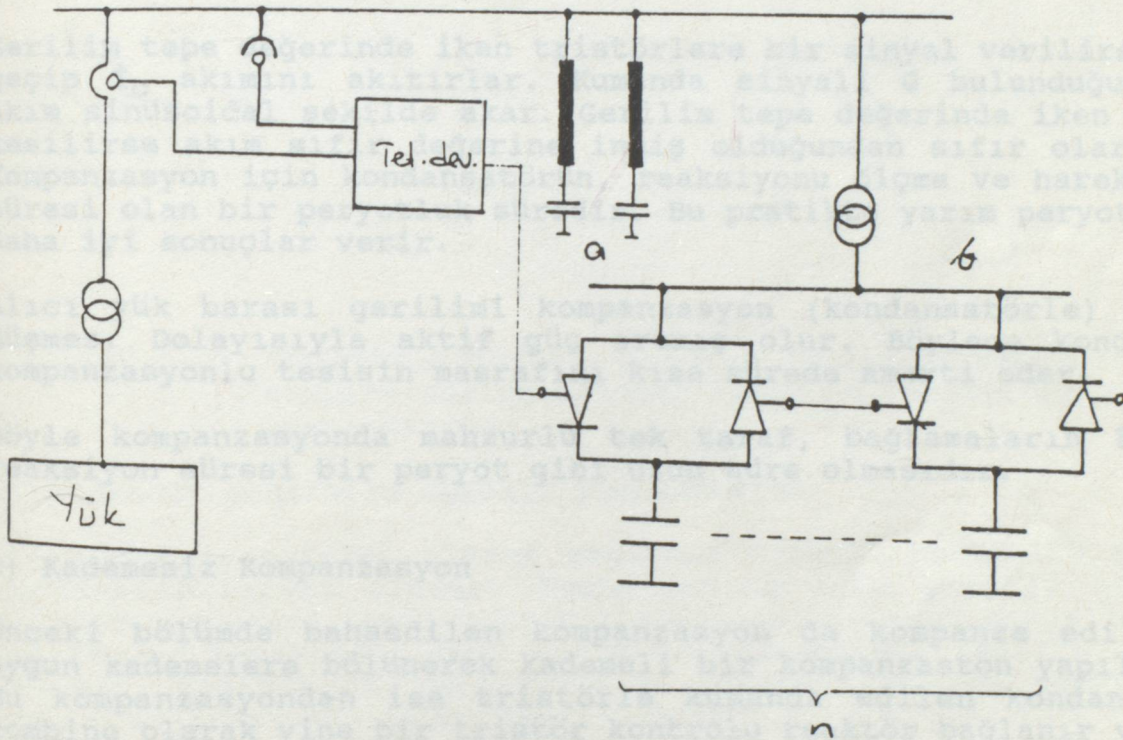


Şekil-21: Tristör kumandalı devrenin gerilimi ile kumanda açısına göre akımın değişimleri

2.2.2.2. Sabit Olmayan Kondansatörle Kombine Kompanzasyon

a) Güç elektroniği devrelerle devreye sokulup çıkarılan kondansatörle dengelenen kompanzasyon:

Bu çeşit kompanzasyonda her faza ayrı gruplar halinde tristör kontrollü kondansatör grupları bağlanır. Herbir fazdaki reaktif yüke göre tristörler bu faza ait kondansatör gruplarını devreye sokar veya çıkarırlar.



Şekil-22: Tristör ile devreye sokulup çıkarılan kondansatör ile kompanzasyon

a: Sabit kondansatörler

b: Tristörle devreye sokulup çıkarılan kondansatörler

Burada kademeli olarak bir kompanzasyon söz konusudur. Önemli bir husus kademe değişikliğinde kondansatör kademe değeri, bu değişiklik anında bağlantı barasında gerilim % 0.25 mertebesinde değişebilecek kadar bir değerde serilir. Bu değer yani % 0.25 değişme değeri hissedilme sınırının altındadır.

Kondansatörler gerilimin tepe değerinde akımın ise sıfır olduğu an tristörler vasıtasıyla devreye sokulurlar ve yine aynı şartlar altında devre dışı edilirler. Böylece aşırı gerilim ve geçici olaylar nisbeten önlenmiş olur.

Kondansatör gerilimi sinüsoidal ise uçlarında;

$$U_C = -\frac{1}{C} \int i_C dt \quad (2.9)$$

gibi bir gerilim oluşur. Akım ise

$$i_C = \omega C \cdot \hat{U} \cdot \cos \omega t \quad (2.10)$$

şeklindedir.

Gerilim tepe değerinde iken tristörlere bir sinyal verilirse ilettime geçip i_C akımını akıtırlar. Kumanda sinyali G bulunduğu müddetçe akım sinüsoidal şekilde akar. Gerilim tepe değerinde iken G sinyali kesilirse akım sıfır değerine inmiş olduğundan sıfır olarak kalır. Kompanzasyon için kondansatörün, reaksiyonu ölçme ve harekete geçme süresi olan bir periyotluk süredir. Bu pratikte yarım periyot alınırsa daha iyi sonuçlar verir.

Alıcı yük barası gerilimi kompanzasyon (kondansatörle) esnasında düşmez. Dolayısıyla aktif güç artmış olur. Böylece kondansatörlü kompanzasyonlu tesisin masrafını kısa sürede amorti eder.

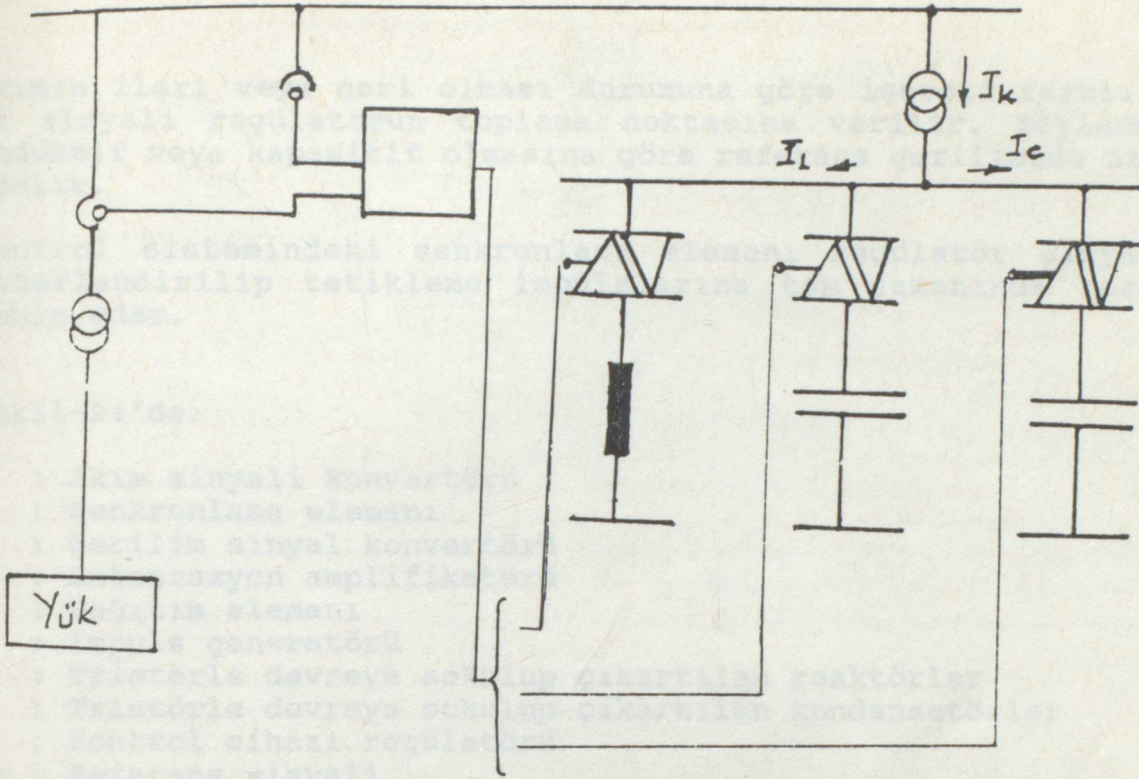
Böyle kompanzasyonda mahzurlu tek taraf, bağlamaların % 25 inde reaksiyon süresi bir periyot gibi uzun süre olmasıdır.

b) Kademesiz Kompanzasyon

Önceki bölümde bahsedilen kompanzasyon da kompanze edilecek güç uygun kademelere bölünerek kademeli bir kompanzasyon yapılmaktadır. Bu kompanzasyondan ise tristörle kumanda edilen kondansatörlere kombine olarak yine bir tristör kontrolü reaktör bağlanır ve sürekli güç ayarı yapılır.

Böyle kompanzasyonda yavaş bir değişimde tam endüktif bir yükten tam kapasitif bir yüke kademesiz olarak bir ayar yapmak mümkündür.

Tristörler, kondansatörlerin ve reaktörlerin süratle devreye sokulup çıkarılmalarını temin ederler. Kademesiz ve sürekli kontrol yapılabilir. Geçici parazit yok denecek kadar azdır.



Şekil-23: Tristörle devreye sokulup çıkarılan kondansatörle kombine edilen tristör kontrolü reaktörden oluşan kompanzasyon

c) Otomatik Kontrollü Sürekli Kompanzasyon

Yük barasına paralel olarak bağlanan tristör kontrollü reaktör ve kondansatörlerden oluşur. Kompanzasyon için çeşitli büyüklükler ölçülerek bunlara bağlı olarak kompanzasyona uygun sinyaller vererek tristörler tetiklenir veya tetikleme sinyalleri kesilir. Bu ölçme, kontrol, kumanda ve ayar işlerini otomatik olarak yapan devreler dizayn edilerek bunlardan faydalanılır.

Regülatör girişi esas büyüklüğü yük barası gerilimidir. Bu gerilim baraya bağlı üç fazlı bir gerilim transformatoru ile ölçülerek konverter üzerinden u gibi bir DC sinyaline dönüştürülür. Buradaki sinyal konverteri prensip olarak bir dönüştürücü transformatoru ile 6 darbeli bir redresör ve zaman sabitesi 1.5 μs mertebesinde olan bir alçak geçiriciden oluşur. Bu alçak geçirici konverterde, şebeke gerilimindeki hızlı geçici olayları kısıtlar. Bu sinyal regülatör toplama noktasında u referans sinyali ile karşılaştırılır. Fark olursa u gibi bir hata sinyali çıkar. Bu sinyal entegreasyon amplifikatörüne verilir. Bu entegrasyon amplifikatör çıkışı ise u 'nun işaretine bağlı olarak $u=0$ ($u=u_r$) oluncaya kadar artar veya azalır. Bu amplifikatör bir komparatör gibi çalışır. Bu çıkış sinyali şebeke gerilimini istenilen değerde tutmak için gerekli reaktif güç üretiminin veya tüketiminin ölçülmesi görevini yapar.

Bu çıkış sinyali büyüklüğü dağıtım elemanında, tristör tarafından kumanda edilen kapasitörler ile reaktör için üç dijital sinyale ve tristör tarafından kumanda edilen reaktör için bir analog sinyale çevrilir. Bu sinyaller ile darbe (impuls) generatörleri üzerinden tristörlere kumanda sinyali verilir.

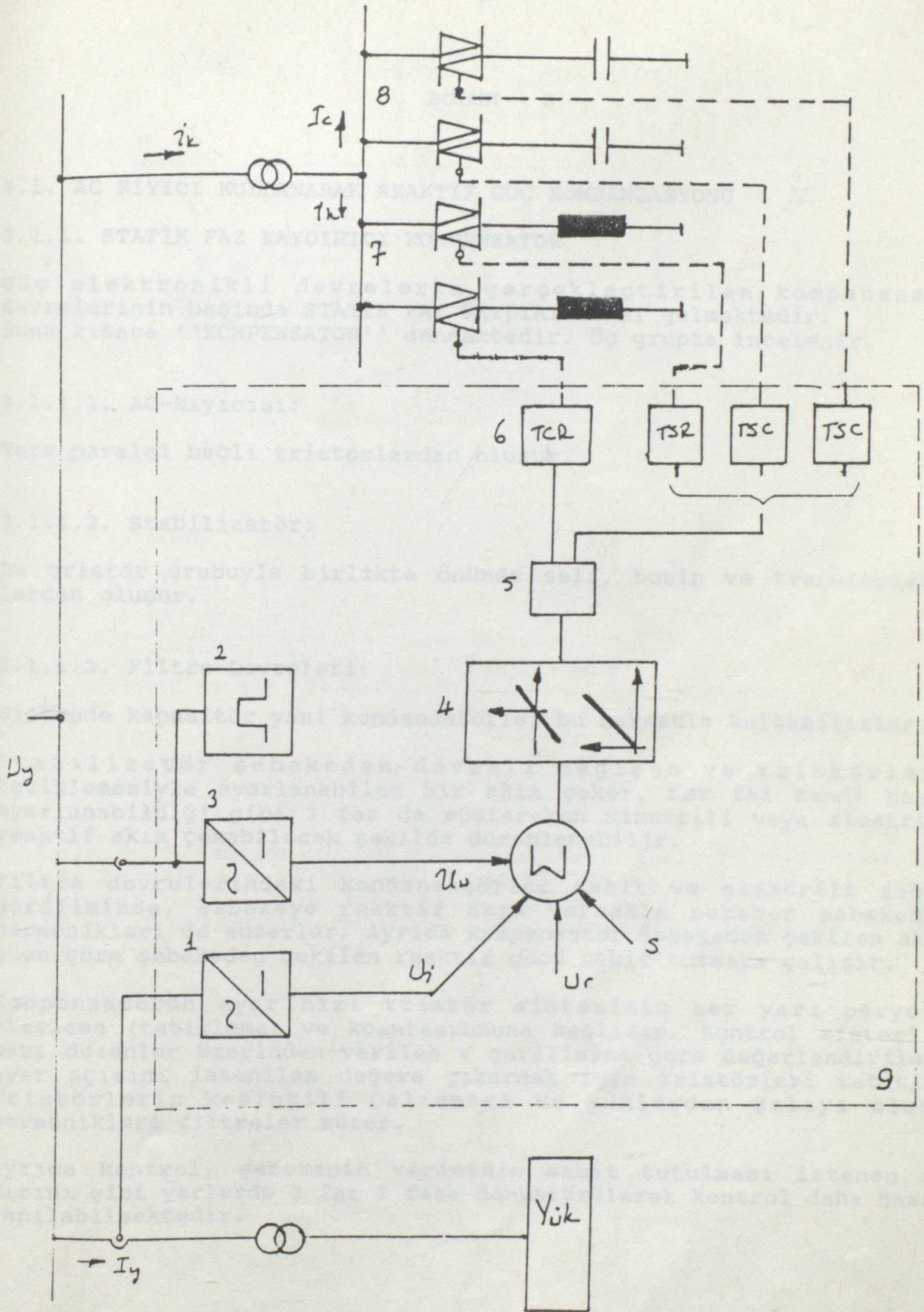
Akımın ileri veya geri olması durumuna göre işareti farklı olan bu ui sinyali regülatörün toplama noktasına verilir. Böylece akımın endüktif veya kapasitif olmasına göre referans gerilimide artar veya azalır.

Kontrol sistemindeki senkronlama elemanı regülatör sinyallerinin değerlendirilip tetikleme impulslarına tam zamanında verilmesini temin eder.

Şekil-24'de:

- 1 : Akım sinyali konvertörü
- 2 : Senkronlama elemanı
- 3 : Gerilim sinyal konvertörü
- 4 : Entegrasyon amplifikatörü
- 5 : Dağıtım elemanı
- 6 : Impuls generatörü
- 7 : Tristörle devreye sokulup çıkartılan reaktörler
- 8 : Tristörle devreye sokulup çıkartılan kondansatörler
- 9 : Kontrol cihazı regülatörü
- Ur : Referans sinyali
- S : Başka sinyaller
- TOR: Tristör kontrollü reaktör
- TSR: Tristörle devreye sokulan reaktör
- TSC: Tristörle devreye sokulan kondansatör
- Uy : Yük barası gerilimi
- Iy : Yük akımı
- Ik : Kompansatör akımı
- Ic : Kapasitif akım
- IL : Endüktif akım

dır.



Şekil-24: Tristorla kontrollü kombine reaktor vekondonsatörlü kompanzasyon blok diyagramı

BÖLÜM - 3

3.1. AC KİYİCİ KULLANARAK REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

3.1.1. STATİK FAZ KAYDIRICI KOMPENSATOR

Güç elektronikli devrelerle gerçekleştirilen kompanzasyon devrelerinin başında STATİK FAZ KAYDIRICILARI gelmektedir. Buna kısaca ''KOMPENSATOR'' denmektedir. Üç grupta incelenir.

3.1.1.1. AC-kıyıcısı:

Ters paralel bağlı tristorlardan oluşur.

3.1.1.2. Stabilizatör:

Bu tristör grubuyla birlikte önünde self, bobin ve transformatorlardan oluşur.

3.1.1.3. Filtre Devreleri:

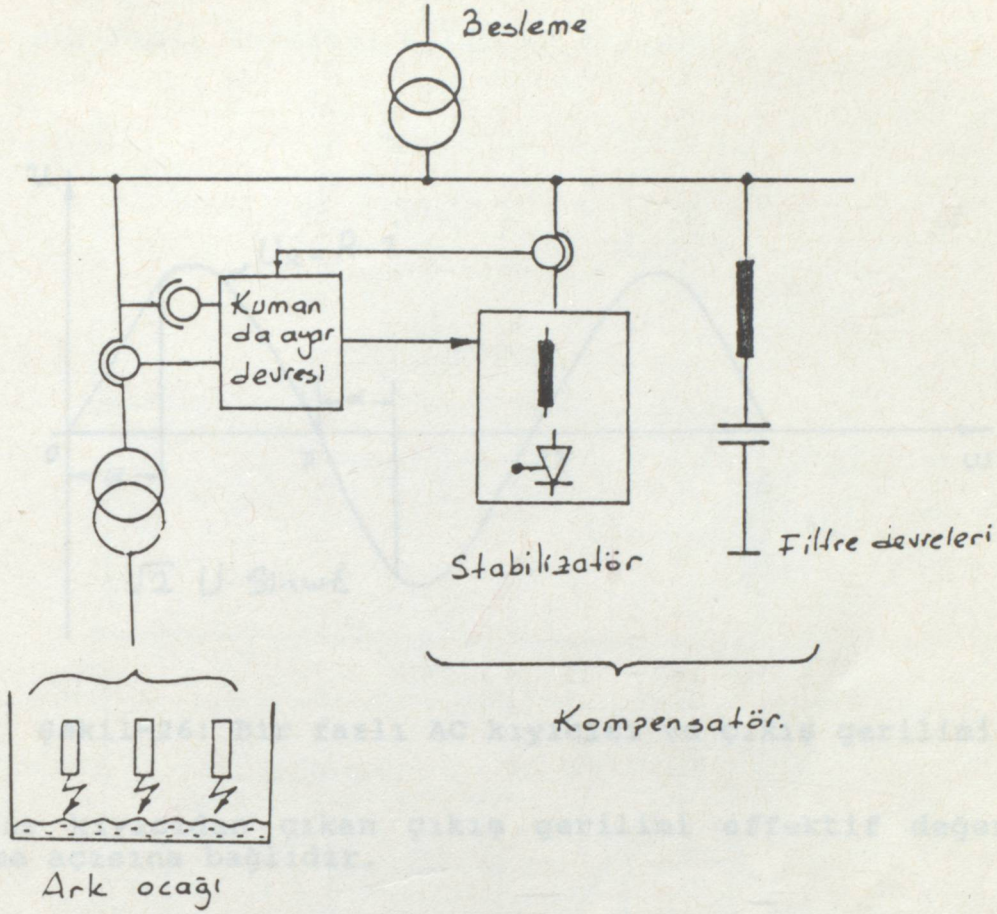
Sistemde kapasitör yani kondansatörler bu maksatla kullanılırlar.

Stabilizatör şebekeden devamlı değişen ve tristörlerin tetiklemesiyle ayarlanabilen bir akım çeker. Her faz kendi başına ayarlanabildiği gibi 3 faz da müştereken simetrikli veya simetrisiz reaktif akım çekebilecek şekilde düzenlenebilir.

Filtre devrelerindeki kondansatörler sabit ve simetrikli şebeke geriliminde, şebekeye reaktif akım vermekle beraber şebekedeki harmonikleri de süzerler. Ayrıca kompensatör şebekeden çekilen aktif güce göre şebekeden çekilen reaktif gücü sabit tutmaya çalışır.

Kompensatörün ayar hızı tristör sisteminin her yarı periyotta ateşleme (tetikleme) ve komutasyonuna bağlıdır. Kontrol sistemi de bazı düzenler üzerinden verilen V gerilimine göre değerlendirilerek ayar açısını istenilen değere çıkarmak için tristörleri tetikler. Tristörlerin kesintili çalışması ve yüklerden dolayı oluşan harmonikleri filtreler süzer.

Ayrıca kontrol, şebekenin veriminin sabit tutulması istenen ark fırını gibi yerlerde 3 faz 2 faza dönüştürülerek kontrol daha hassas yapılabilmektedir.



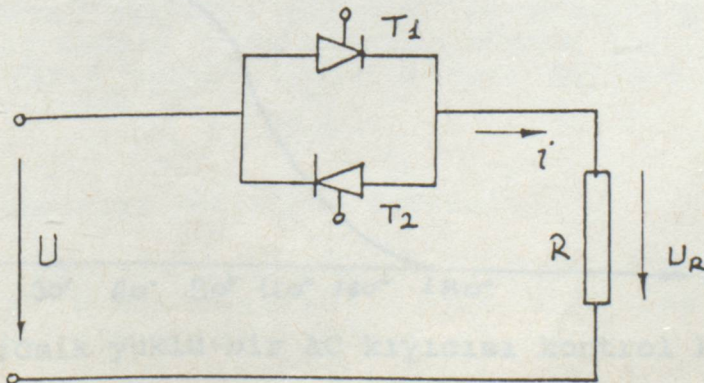
Şekil-25: Bir tüketicide (ark ocağı) kompanzasyonun Prensi Şeması

Stabilizörün özelliklerinden önemli olanı tristörlerin durumudur. 'Seri', 'Paralel' ve 'Seri paralel' bağlanabilmektedir. Böyle bağlamalar neticesinde, 800-4000 Ampere kadar yapılan tristörler 30 KV'a (70 MVA ile 250 MVA) kadar bağlama yapılabilmektedir.

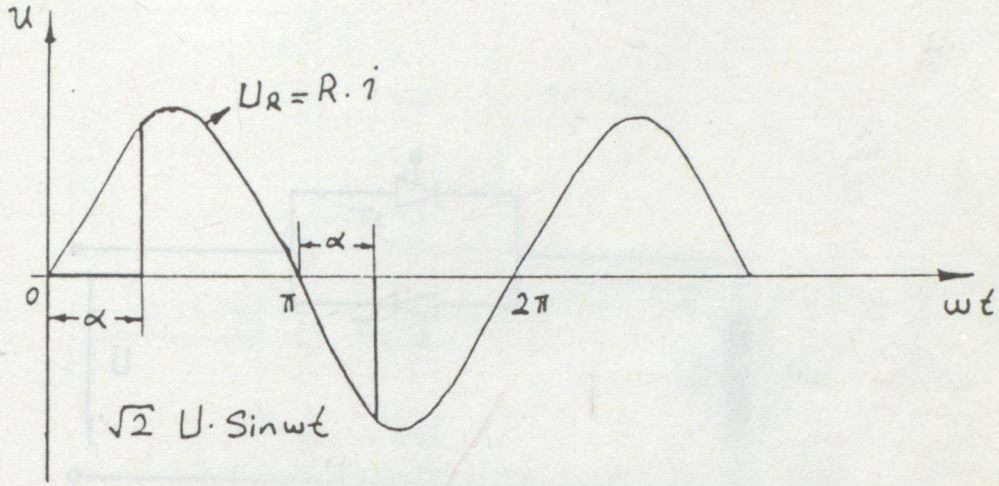
3.1.2. AC KIYICILARININ SINIFLANDIRILMASI

Yük geriliminin efektif değerini ayar eden elektronik devrelerdir.

3.1.2.1. Bir Faz Omik Yüklü AC Kıyıcısı:



3.1.2.3. Bir Fazlı Endüktif Yüklü AC Kırıcısı:



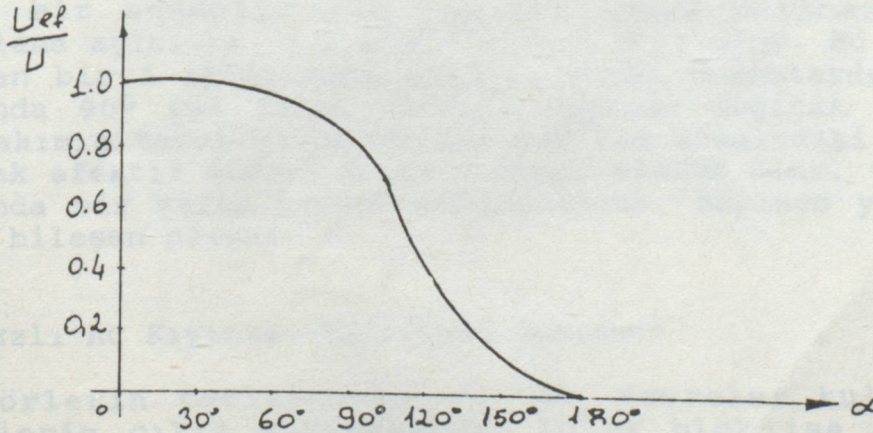
Şekil-26: Bir fazlı AC kırıcısı ve çıkış gerilimi

Böyle bir kırıcıdan çıkan çıkış gerilimi efektif değeri kırıcı tetikleme açısına bağlıdır.

$$U_{\text{ref}} = \sqrt{\frac{1}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi} 2 \cdot U^2 \sin^2(\omega t) d(\omega t)}$$

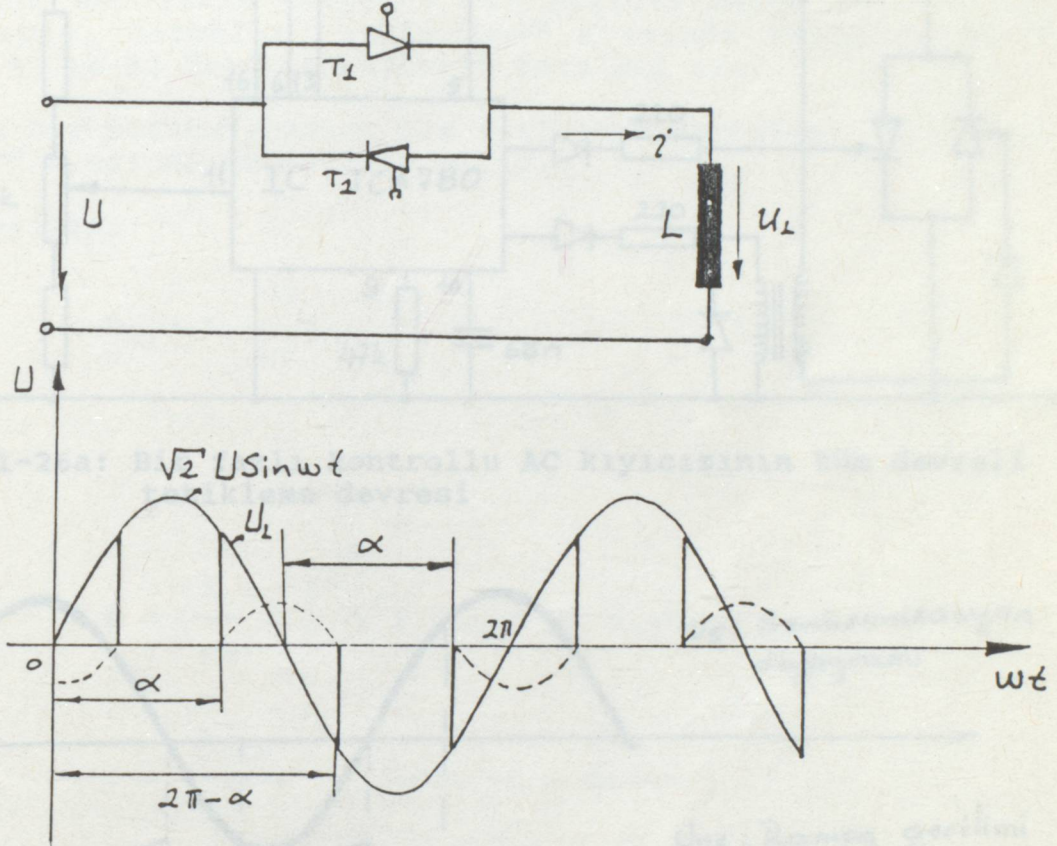
$$= U \sqrt{1 - \frac{\alpha}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha}{2\pi}}$$

Buna göre kontrol karakteristiği aşağıdaki gibi olur.



Şekil-27: Omik yüklü bir AC kırıcısı kontrol karakteristiği

3.1.2.2. Bir Fazlı Endüktif Yüklü AC Kıyıcısı:

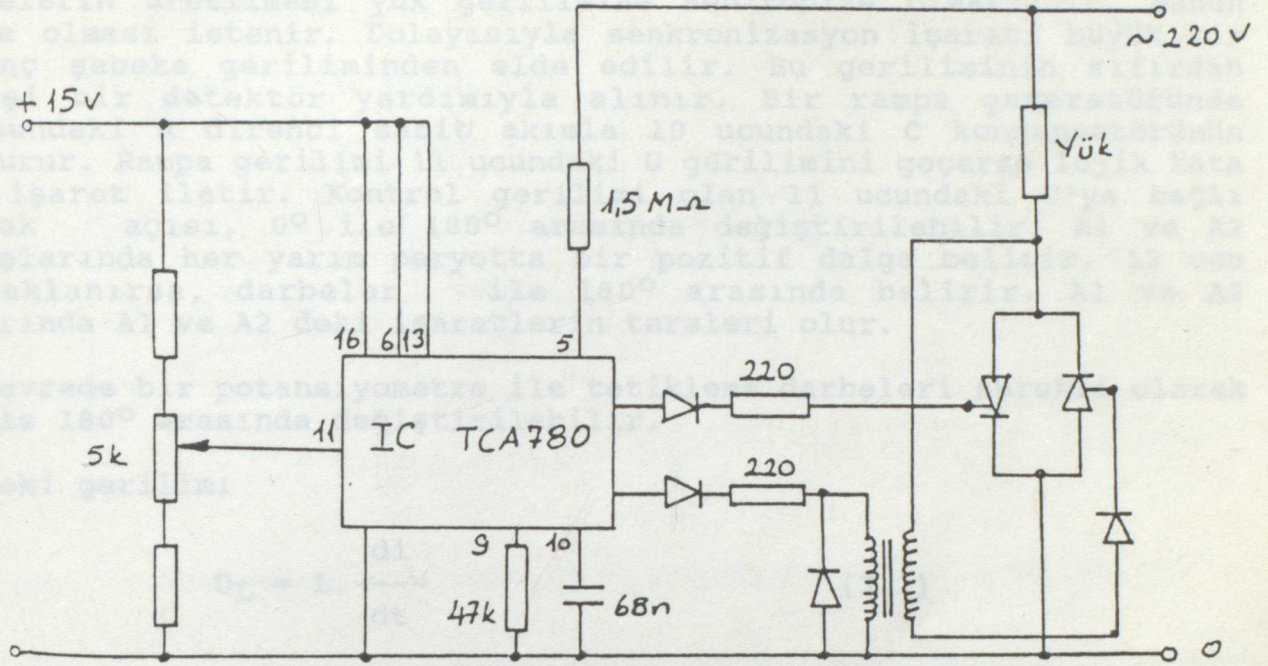


Şekil-28: Endüktif yüklü AC kıyıcısı ve çıkış büyüklüğü

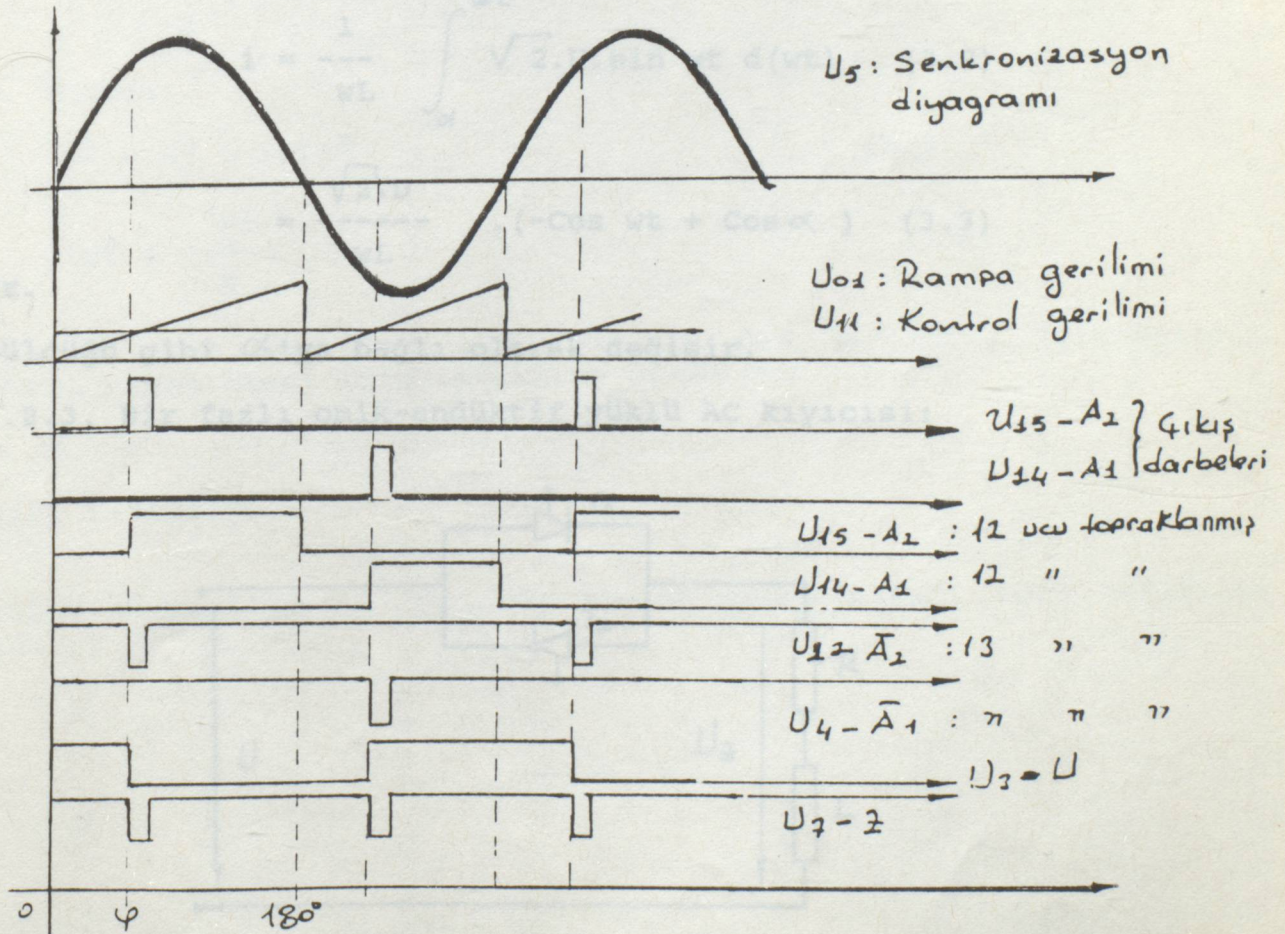
Böyle bir endüktif yük ile yüklenmiş bulunan AC kıyıcısında tetikleme açısı $\alpha > \pi/2$ dir. $\alpha_{\min} = \pi/2$ olur. Bu durumda kesintili olmayan bir i akımı elde edilir. Bütün durumlarda gerilim u ile i arasında 90° faz farkı vardır. Böylece değişik tetikleme açıları için akımın temel bileşeni ile gerilim arasındaki faz farkı $\varphi = 90^\circ$ kalarak efektif değeri kontrol etmek mümkün olur. $\alpha < \pi/2$ için çıkış akımında bir yarım periyot tetiklenemez. Böylece yükten akan akımda doğru bileşen oluşur.

Bir Fazlı AC Kıyıcısı Tetikleme Devresi:

Tristörlerin tetiklenmesinde tüm devreler kullanılır. Bu tüm devrelerin çıkış katlarındaki lojik blok ise ayrıca, üretilen darbenin sayısal işlenmesini sağlar.



Şekil-26a: Bir fazlı kontrollu AC kıyıcısının tüm devreli tetikleme devresi



Şekil-27b: Bir fazlı kontrollu AC kıyıcısının darbe diagramı

Darbelerin üretilmesi yük gerilimine senkronize olmaktadır. Bunun böyle olması istenir. Dolayısıyla senkronizasyon işareti büyük bir direnç şebeke geriliminden elde edilir. Bu geriliminin sıfırdan geçişi bir detektör yardımıyla alınır. Bir rampa generatöründe 9 ucundaki R direnci sabit akımla 10 ucundaki C kondansatörünün doldurur. Rampa gerilimi 11 ucundaki U gerilimini geçerse lojik kata bir işaret iletir. Kontrol gerilimi olan 11 ucundaki U'ya bağlı olarak açısı, 0° ile 180° arasında değiştirilebilir. A1 ve A2 çıkışlarında her yarım peryotta bir pozitif dalga belirir. 12 ucu topraklanırsa, darbeler 0° ile 180° arasında belirir. A1 ve A2 uçlarında A1 ve A2 deki işaretlerin tersleri olur.

Bu devrede bir potansiyometre ile tetikleme darbeleri sürekli olarak 0° ile 180° arasında değiştirilebilir.

Yükteki gerilim:

$$U_L = L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3.1)$$

Akım ise:

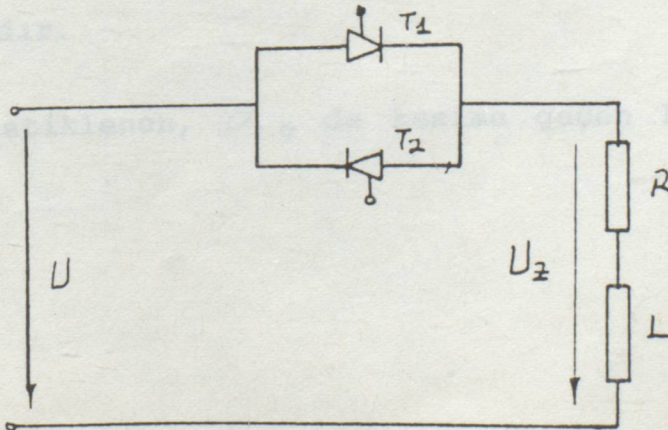
$$i = \frac{1}{\omega L} \int_{\alpha}^{\omega t} \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \, d(\omega t) \quad (3.2)$$

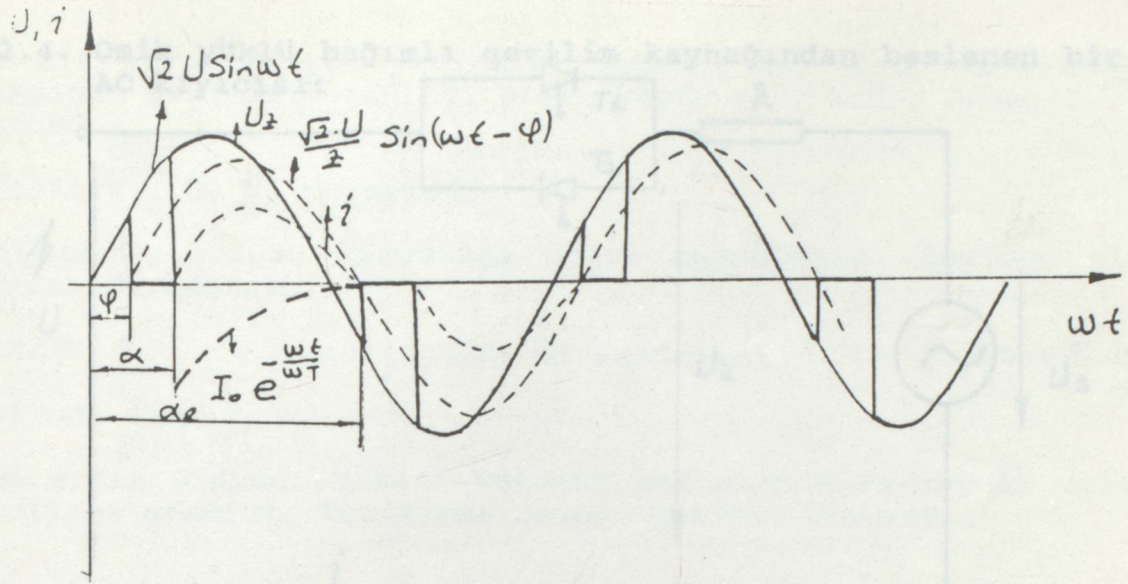
$$= \frac{\sqrt{2} \cdot U}{\omega L} \cdot (-\cos \omega t + \cos \alpha) \quad (3.3)$$

olur.

Görüldüğü gibi α 'ya bağlı olarak değişir.

3.1.2.3. Bir fazlı omik-endüktif yüklü AC kıyıcısı:





Şekil-27: Omik-endüktif yüklü AC kıyıcısı ve çıkış büyüklükleri

R-L yüklü AC kıyıcısından sürekli rejim ve iki tristörün de iletimde olması durumunda;

$$i = \frac{\sqrt{2} \cdot U}{Z} (\sin(\omega t - \varphi)) \quad (3.4)$$

dır. Burada;

$$Z^2 = R^2 + (\omega L)^2 \quad (3.5)$$

$$\tan \varphi = \frac{\omega L}{R} \quad (3.6)$$

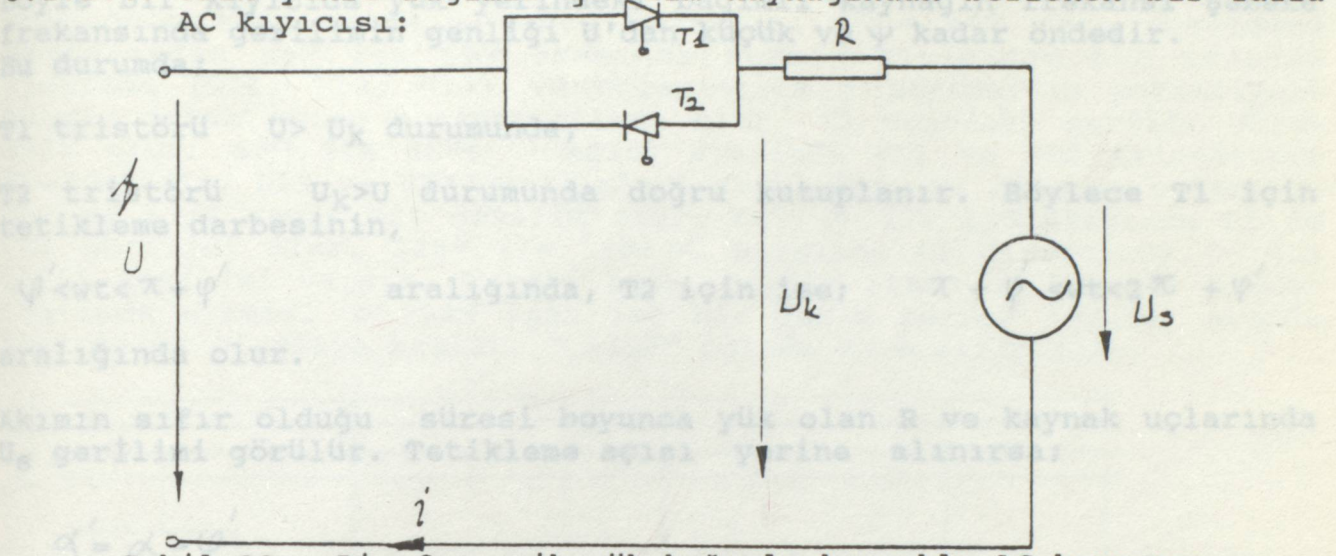
dır. φ akım ile gerilim arasındaki faz farkıdır. Tristörlerin kontrol yapabilmesi için tetikleme açısı α ;

$$\alpha > \varphi$$

olması lazımdır.

Şekilde α tetiklenen, α_e de kesime geçen kıyıcı için tetikleme açısıdır.

3.1.2.4. Omik yüklü bağımlı gerilim kaynağından beslenen bir fazla AC kıyıcısı:

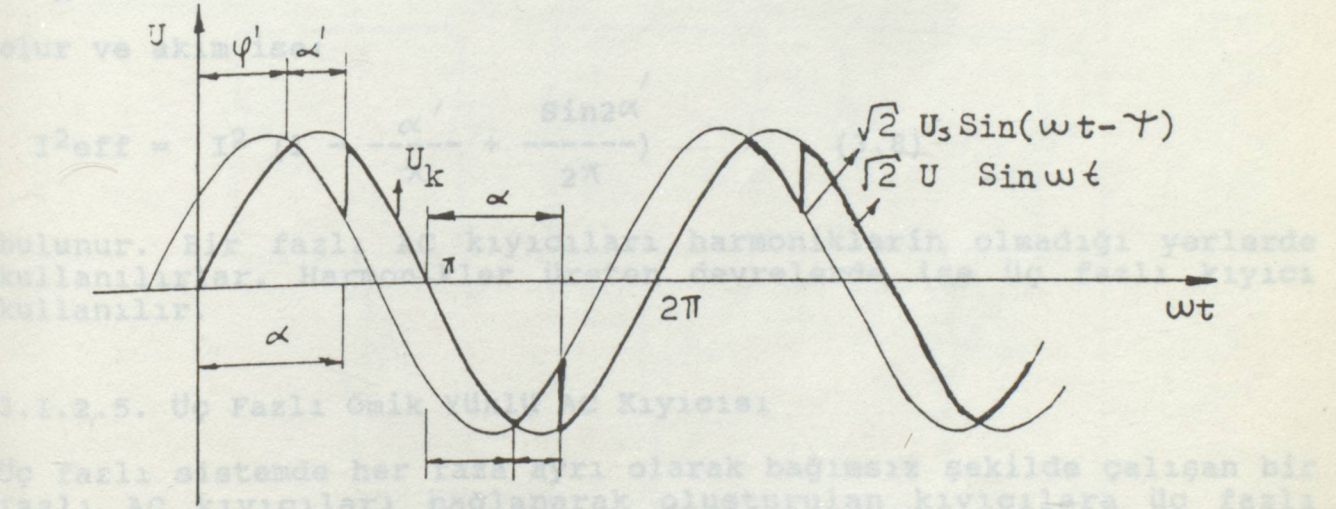


Şekil-28a: Bir faz omik yük bağımlı kaynaklı AC kıyıcısı

dirençteki güç:

$$P_R = R \cdot I_{eff}^2$$

(3.7)



3.1.2.5. Üç Fazlı Omik Yüklü AC Kıyıcısı:

Üç Fazlı sistemde her fazı ayrı olarak bağımsız şekilde çalışan bir fazlı AC kıyıcısı bağlanarak oluşturulan kıyıcılara üç fazlı kıyıcılar denir. Her fazı ayrı olarak bir fazlı kıyıcı bağlandıktan sonra kıyıcılar yıldız bağlanarak yıldız noktası şebekesinin yıldız noktasıyla birleştirilir.

Bu tip kıyıcı her hangi bir t anında yalnız bir triyör tetiklenir ve akım akar. Çünkü U_0 'ye doğru akım vardır. Böyle tip kıyıcılar bağımsız olarak bir ya da birden çok fazlı gibi Δ bağlanarak beslenebilirler. Fakat orta kutup olan bir bağlantı olan akımın olması bir fazdan diğerine olacaktır ve dolayısıyla bu tip devrede herhangi bir t anında en az 2 triyör iletimde olmalıdır. Bir yük besleyen üç fazlı bir AC kıyıcısında orta nokta topraklanmadığından devrede her an en az iki triyörün iletimde olması gerekir.

Şekil-28b: Bir faz, omik yük, bağımlı kaynaklı AC kıyıcısının yük gerilimi ve akımı şekilleri

Böyle bir kıyıcıda yük yerindeki bağımlı kaynağın frekansı şebeke frekansında gerilimin genliği U 'dan küçük ve ψ kadar öndedir. Bu durumda;

T1 tristörü $U > U_k$ durumunda,

T2 tristörü $U_k > U$ durumunda doğru kutuplanır. Böylece T1 için tetikleme darbesinin,

$$\varphi' < \omega t < \pi + \varphi' \quad \text{aralığında, T2 için ise; } \pi + \varphi' < \omega t < 2\pi + \varphi'$$

aralığında olur.

Akımın sıfır olduğu süresi boyunca yük olan R ve kaynak uçlarında U_s gerilimi görülür. Tetikleme açısı yerine alınırsa;

$$\alpha' = \alpha - \varphi'$$

dirençteki güç:

$$P_R = R \cdot I_{\text{eff}}^2 \quad (3.7)$$

olur ve akım ise:

$$I_{\text{eff}}^2 = I^2 \left(1 - \frac{\alpha'}{\pi} + \frac{\sin 2\alpha'}{2\pi} \right) \quad (3.8)$$

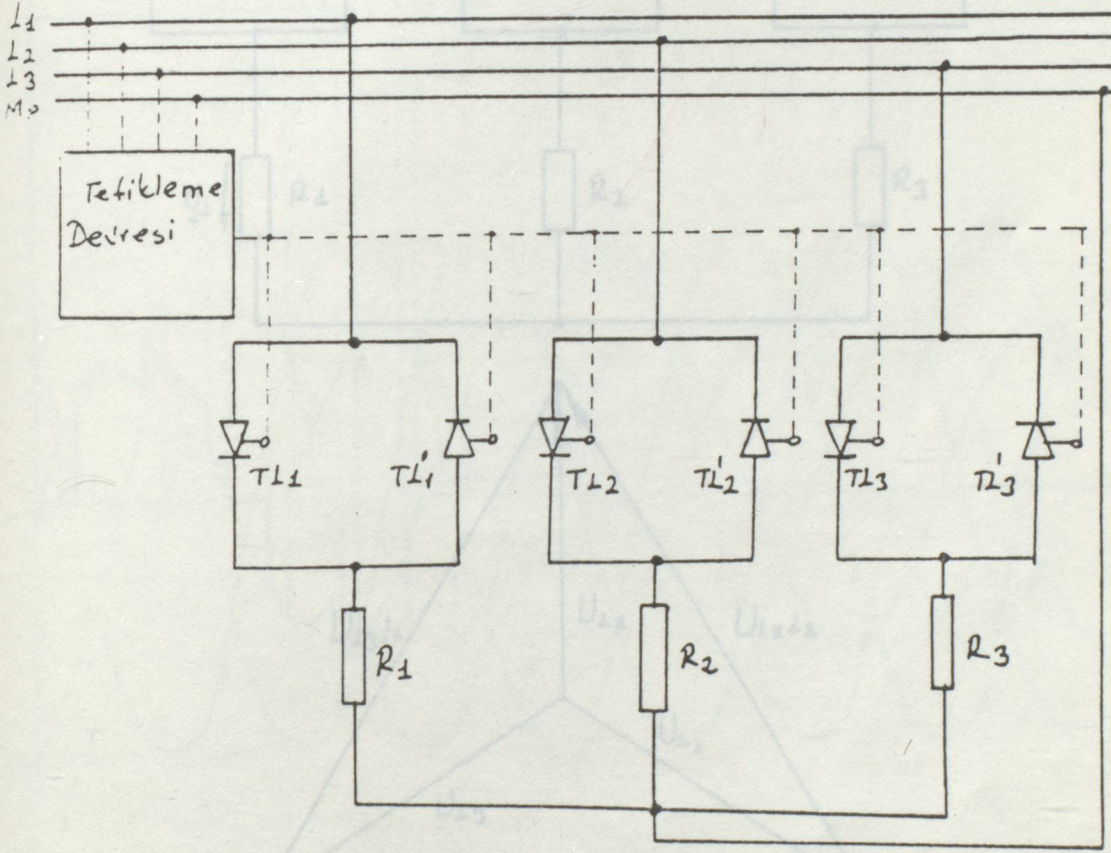
bulunur. Bir fazlı AC kıyıcıları harmoniklerin olmadığı yerlerde kullanılırlar. Harmonikler üreten devrelerde ise üç fazlı kıyıcı kullanılır.

3.1.2.5. Üç Fazlı Omik Yüklü AC Kıyıcısı

Üç fazlı sistemde her faza ayrı olarak bağımsız şekilde çalışan bir fazlı AC kıyıcıları bağlanarak oluşturulan kıyıcılara üç fazlı kıyıcılar denir. Her faza ayrı olarak bir fazlı kıyıcı bağlandıktan sonra kıyıcılar yıldız bağlanarak yıldız noktası şebekenin yıldız noktasıyla birleştirilir.

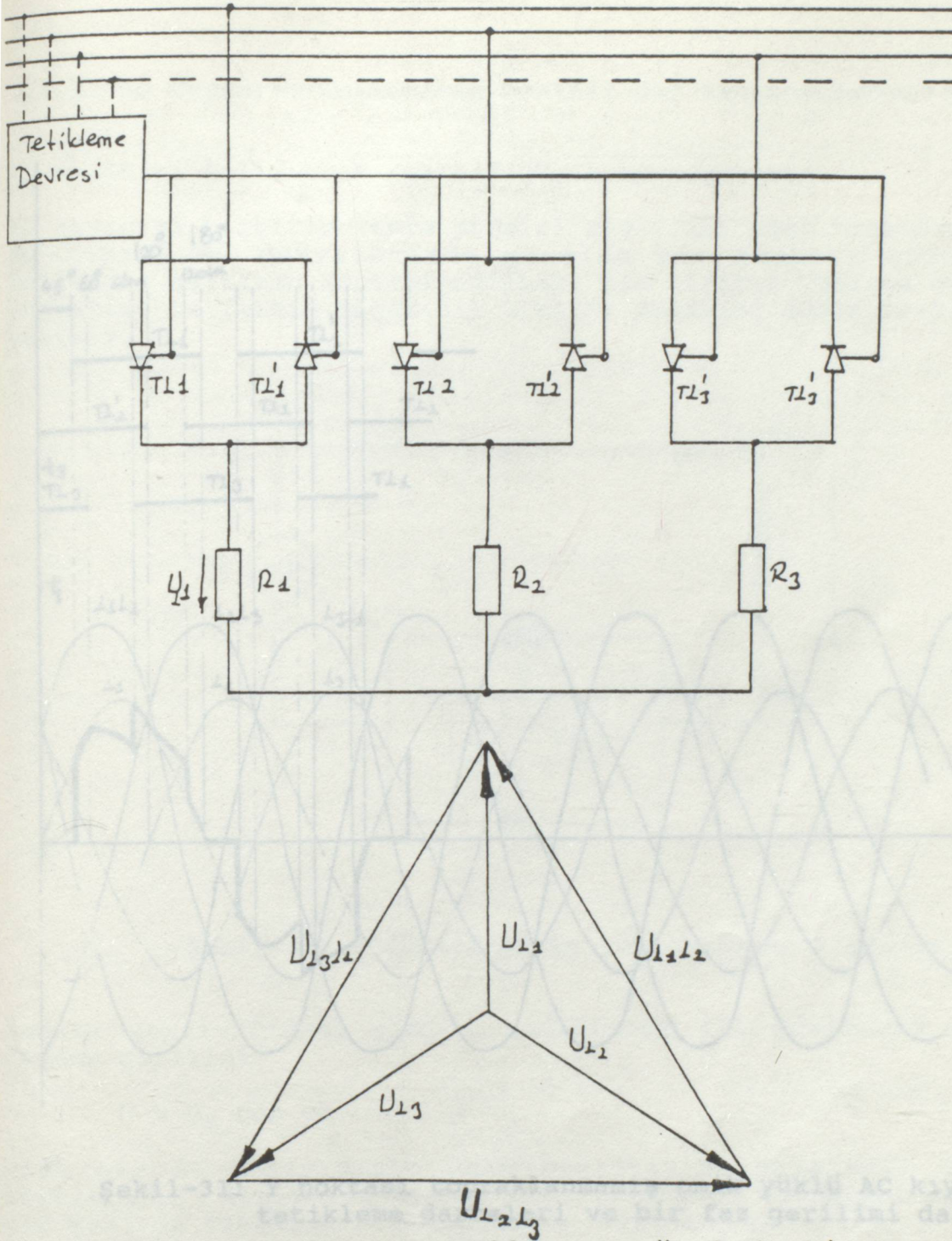
Bu tip kıyıcıda herhangi bir t anında yalnız bir tristör tetiklenirse de akım akar. Çünkü U_p 'ye doğru akma imkanı vardır. Böyle tip kıyıcılar Δ bağlı yükleri kolay bir şekilde besledikleri gibi $\triangle$ bağlı yükleride besleyebilirler. Fakat orta kutup olmayan bir bağlantı olacağından akımın akması bir fazdan diğerine olacaktır ve dolayısıyla bu tip devrede herhangi bir t anında en az 2 tristör iletimde olmalıdır. Bir yükü besleyen üç fazlı bir AC kıyıcısında orta nokta topraklanmadığından devrede her an en az iki tristörün iletimde olması gerekir.

Tetikleme darbelerinin süreleri, o darbe ile tetiklenecek olan tristörün akım akıttığı süre kadardır. $\alpha = 45^\circ$ için şekildeki darbelerden 45° ile 60° arasında her bir kıyıcıdan bir tristör iletimde (TL1, TL2, TL3) ve dolayısıyla Y noktasının potansiyeli şebeke ortak kutup potansiyelinde olur. R2 ucundaki gerilim UL1'e eşit olur. 60° ile $60^\circ + \alpha$ açısı arasında TL1 ve TL2 tristörleri iletimdedir. UL1 ve UL2 gerilimleri farklıdır. R1 direnci uçlarında UL1 ve L2/2 kadar bir gerilim olur. $60^\circ + \alpha$ ile 120° arasında R1 de UL1 gerilimi olur. 120° ile $120^\circ + \alpha$ arasında R1 direncinde (- UL3 L1/2) gerilimi vardır. $\alpha > 60^\circ$ için, hiçbir zaman üç tristör birden iletimde olamaz. $\alpha > 90^\circ$ için ise bir yarım periyot içinde, akımda kesintiler oluşmaya başlar. $\alpha > 150^\circ$ içinde akım sıfır olur.

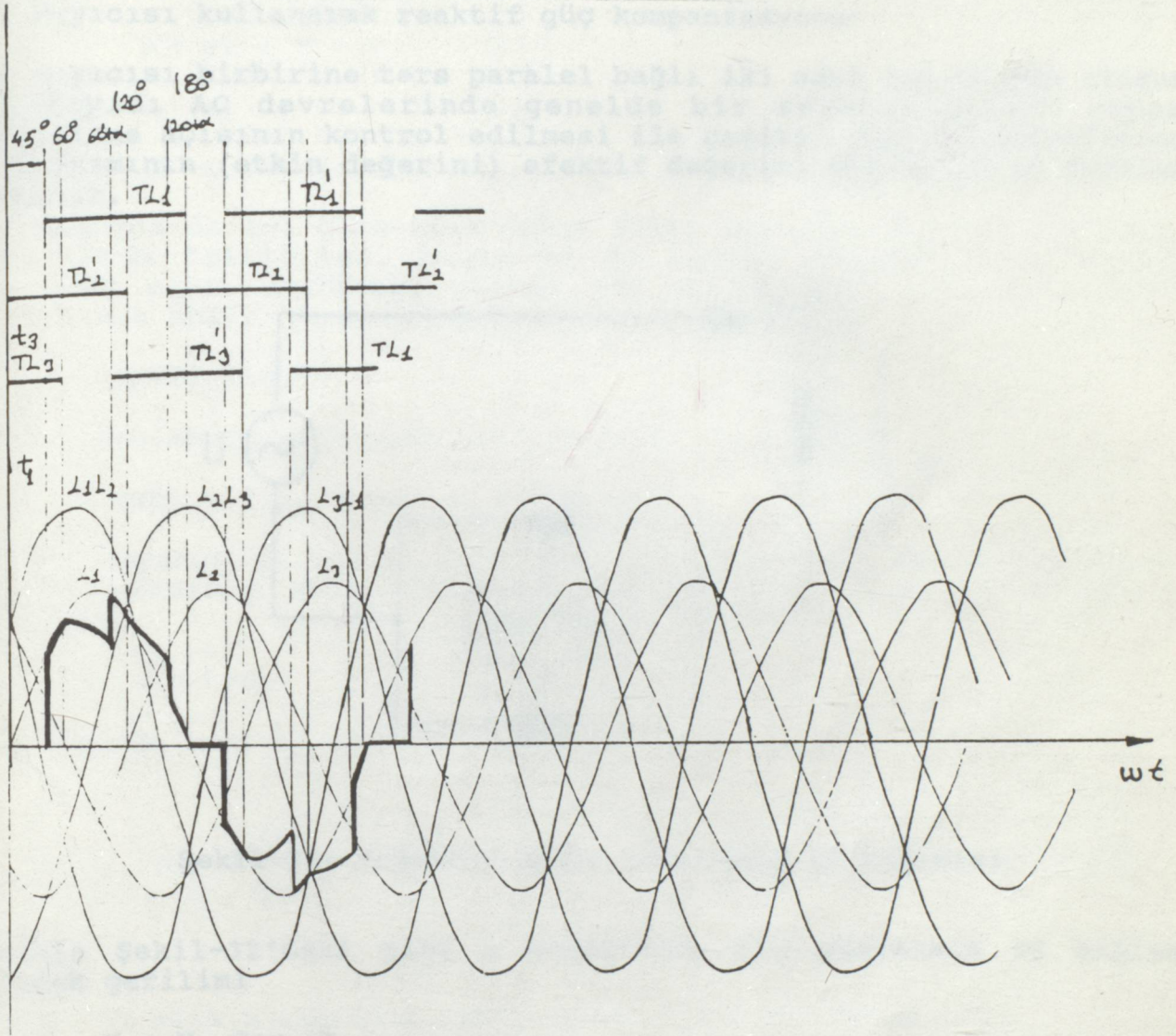


Şekil-29: Omik yüklü Y noktası topraklı üç fazlı bir AC kıyıcısı

AC kıyıcılarında yapılan faz kontrolü sebebiyle tetikleme gecikmesinden dolayı akımın temel bileşeni ile ilgili faz gerilimi arasında faz farkına, dolayısıyla şebekenin reaktif yüklenmesine sebep olur.



Şekil-30: Y noktası topraklanmamış üç fazlı bir AC kıyıcısı

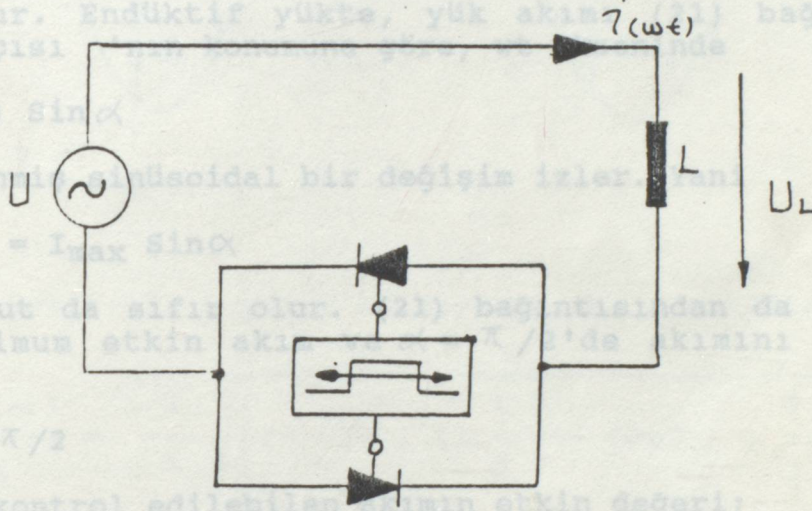


Şekil-31: Y noktası topraklanmamış omik yüklü AC kıyıcısı tetikleme darbeleri ve bir faz gerilimi dalga şekli

3.2.1. AC Kıyıcısı Kullanarak Reaktif Güç Kompanzasyonu

AC kıyıcısı kullanarak reaktif güç kompanzasyonu:

AC kıyıcısı birbirine ters paralel bağlı iki adet tristörden oluşur. Bu kıyıcı AC devrelerinde genelde bir anahtar görevi yapar. Tetikleme açısının kontrol edilmesi ile çeşitli yükleme durumlarında yük akımının (etkin değerini) efektif değerini değiştirerek ayarlama yapılır.



Şekil-32: Endüktif yükle yüklenmiş AC kıyıcısı

Mesala Şekil-32'deki gibi L endüktansı ile yüklenmiş ve besleme kaynak gerilimi

$$U = U_m \cos \omega t$$

olan bir AC kıyıcısının akım bağıntısını yazarsak; tristörler, birbirinden kadar faz farklı olan tetikleme darbeleri ile simetrik bir şekilde tetiklendiklerini kabul edersek, yani;

$$0 \leq \alpha = \alpha_1 \leq \frac{\pi}{2}$$

ve

$$\pi \leq \alpha_1 + \pi = \alpha_2 < 3\pi/2 \quad \text{olmak üzere}$$

$$i(\omega t) = \frac{U_m}{\omega L} (\sin \omega t - \sin \alpha)$$

olur.

Bu devrede $\alpha = 0$ olduğu zaman gerilim ile akım arasında $\pi/2$ kadar bir faz farkı olduğundan tetikleme açısı olan α açısı $0 - \pi/2$ aralığında simetrik olarak değiştirilebilir. (21) bağıntısındaki akım denklemi

$$\alpha < \omega t < \pi - \alpha$$

aralığında (+) ve

$$\pi + \alpha < \omega t < 2\pi - \alpha$$

aralığında da (-) olan akım dalga şekli için geçerlidir. Geri kalan sürelerde tristörler, kesim ya da tıkama konumunda olacağından $i(\omega t) = 0$ olur. Endüktif yükte, yük akımı (21) bağıntısı gereği tetikleme açısı α 'nın konumuna göre, ωt ekseninde

$$(U_m/WL) \sin \alpha$$

kadar ötelenmiş sinüsoidal bir değişim izler. Yani

$$i(\omega t) = I_{\max} \sin \alpha$$

olur. Veyahut da sıfır olur. (21) bağıntısından da görüldüğü gibi $\alpha = 0$ 'da maksimum etkin akım ve $\alpha = \pi/2$ 'de akımını sıfır olacağı görülür.

$$0 < \alpha < \pi/2$$

aralığında kontrol edilebilen akımın etkin değeri;

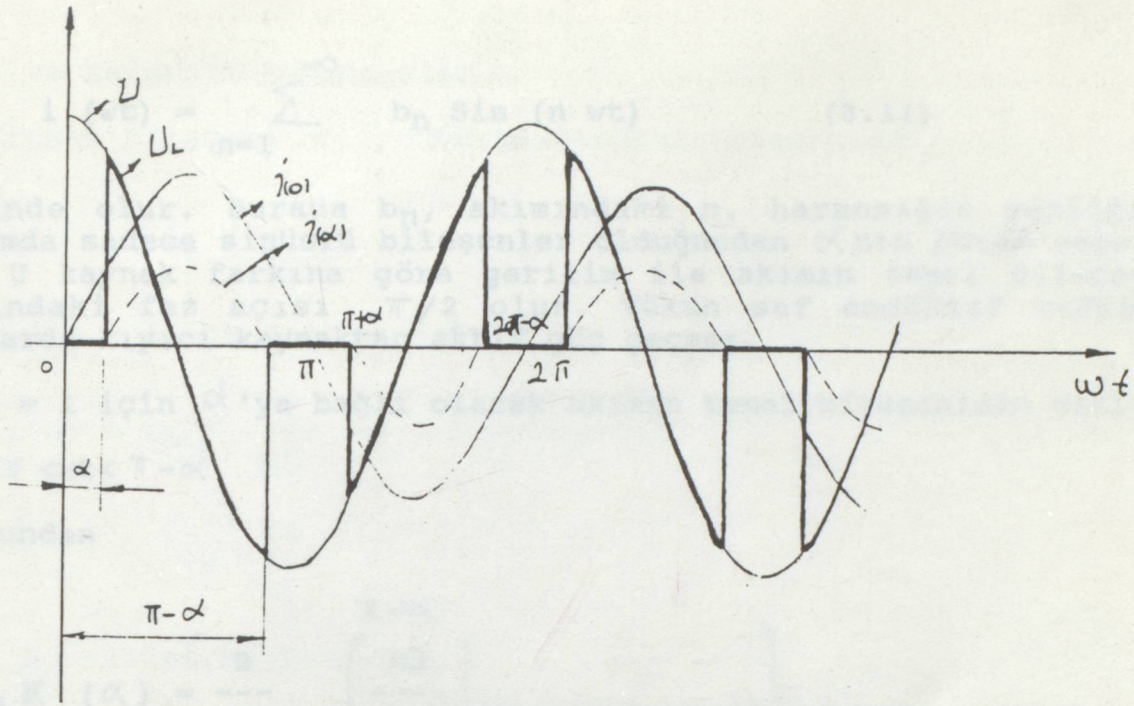
$$I_{\text{eff}}(\alpha) = \frac{U_m}{WL} \sqrt{\frac{1}{\pi} \left[(\pi - 2\alpha) \left(1 - \frac{1}{2} \cos 2\alpha\right) - \frac{3}{2} \sin 2\alpha \right]}$$

(3.9)

olur. Bu akımın maksimum etkin değeri $\alpha = 0$ da olacağından

$$I_{\text{eff}}(0) = I_{\text{oeff}} = \frac{U_m}{\sqrt{2}WL}$$

olur. Etkin değer değişiminin, maksimum etkin değerine oranı, L_2 ile yüklenmiş kıyıcının etkin akımı cinsinden kontrol karakteristiğini verir.



Şekil-33: L yüklü AC kıyıcısı U, i şekilleri

$$\frac{I_{eff}(\alpha)}{I_{oeff}} = \frac{2}{\pi} \sqrt{\left[(\pi - 2\alpha) \left(1 - \frac{1}{2} \cos 2\alpha \right) - \frac{3}{2} \sin 2\alpha \right]}$$

$U_L(\alpha)$ geriliminin etkin değeri şekilden:

$$U_{Leff}(\alpha) = \frac{U_m}{\sqrt{2}} \sqrt{\frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}}$$

Kontrol edilen bu gerilimin maksimum etkin değeri:

$$U_{Leff}(0) = U_{Loeff} = \frac{U_m}{\sqrt{2}}$$

olduğundan kontrol karakteristiği kontrol edilen gerilim cinsinden

$$\frac{U_{Leff}}{U_{Loeff}} = \sqrt{\frac{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)}{\pi}} \quad (3.10)$$

AC kıyıcısındaki akım ve gerilim

Faz kontrolu yapılan kıyıcıda harmonikler oluşur. L ile yüklenmiş AC kıyıcısında yük uçlarındaki gerilim ve akım ($U_L(\omega t)$ ve $i(\omega t)$) temel bileşenlerle beraber harmonikleri de içine alırlar. (21) bağıntısında verilen AC kıyıcısı akımının simetri şartları da gözönüne alınarak incelenirse, sadece sinüslü bileşenler ve mertebesi

$$n = 2k + 1 \quad (k = 0, 1, \dots)$$

olan harmoniklerden oluştuğu anlaşılır. O halde akım

$$i(wt) = \sum_{n=1}^{\infty} b_n \sin(n wt) \quad (3.11)$$

şeklinde olur. Burada b_n , akımındaki n . harmoniğin genliğidir. Açınımında sadece sinüslü bileşenler olduğundan α 'nın bütün değerleri için U kaynak farkına göre gerilim ile akımın temel bileşeninin arasındaki faz açısı $\pi/2$ olur. Yükün saf endüktif olduğu bu şartlarda kıyıcı kaynaktan aktif güç geçmez.

$n = 1$ için α 'ya bağlı olarak akımın temel bileşeninin genliği

$$\pi < wt < \pi - \alpha$$

olduğundan

$$i_1(\alpha) = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} \frac{U_m}{WL} \left[(\sin wt - \sin \alpha) \right] \sin wt \, d(wt) \quad (3.12)$$

$$\hat{i}_1(\alpha) = \hat{I}_1 = U_m/WL \cdot \frac{\pi - 2\alpha - \sin(2\alpha)}{\pi}$$

$n > 1$ için $n=2k+1$ ($k=1,2,3, \dots$)

olmak üzere harmonik akımların genliğinin bağıntısı

$$i_n(\alpha) = \frac{2}{\pi} \int_{\alpha}^{\pi-\alpha} \frac{U_m}{WL} \left[(\sin wt - \sin \alpha) \sin(nwt) \right] d(wt)$$

$$\hat{i}_n = \hat{I}_n(\alpha) = \frac{4 U_m}{\pi WL} \left(\frac{\cos(n\alpha) \sin \alpha - n \sin(n\alpha) \cos \alpha}{n^3 - n} \right) \quad (3.13)$$

olur. Burada, yük geriliminin temel bileşeninin ve harmoniklerinin bağıntıları wt 'ye göre;

$$u_1(\alpha, wt) = U_m \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi} \cos wt \quad (3.14)$$

$$U_n(\alpha, wt) = \frac{4 U_m}{\pi} \cdot \frac{(\cos(n\alpha) \sin \alpha - n \sin n\alpha \cos \alpha)}{n^2 - 1} \cos nwt$$

olur.

Temel ve Harmonik Empedanslar

Akım temel bileşeni $\alpha, \pi - \alpha$ aralığındaki integralden

$$i_1(\alpha) = I_1 = \frac{U_m}{WL} \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$$

idi. $\alpha = 0$ da bu değer

$$\begin{aligned} i_1(0) = I_{1\alpha=0} &= \frac{U_m}{WL} \frac{\pi - 2 \cdot 0 - \sin 2 \cdot 0}{\pi} \\ &= \frac{U_m}{WL} \end{aligned}$$

olur. Normalize edilirse:

$$\frac{\hat{I}_1}{\hat{I}_{1\alpha=0}} = \frac{U_m}{WL} \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi} \cdot \frac{WL}{U_m} = \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$$

bulunur. Harmonik bileşen için ise;

$$I_n(\alpha) = I_n \frac{4U_m}{\pi WL} \cdot \frac{(\cos n\alpha \cdot \sin \alpha - n \sin n\alpha \cdot \cos \alpha)}{n^3 - n}$$

$\alpha = 0$ da I_1 ile normalize edilirse

$$\begin{aligned} \frac{\hat{I}_n}{\hat{I}_{1\alpha=0}} &= \frac{4U_m}{\pi WL} \cdot \frac{(\cos n\alpha \cdot \sin \alpha - n \sin n\alpha \cdot \cos \alpha)}{n^3 - n} \cdot \frac{WL}{U_m} \\ &= \frac{4}{\pi} \frac{(\cos n\alpha \cdot \sin \alpha - n \sin n\alpha \cdot \cos \alpha)}{n^3 - n} \end{aligned} \quad (3.15)$$

akımının temel bileşeni I_1 , (27) bağıntısında, kıyıcı ile L endüktansının herhangi bir tetikleme açısındaki Temel Bileşen Empedansı:

$$Z_1(\alpha) = W L_1(\alpha) \quad (3.16)$$

denirse I_1 bağıntısını

$$\hat{I}_1 = \frac{U_m}{WL_1(\alpha)} \quad (3.17)$$

şeklinde yazabiliriz. Bu I_1 'ler eşitlenirse,

$$\hat{I}_1 = \hat{I}_1 = > \frac{U_m}{W_{L1}(\alpha)} = \frac{U_m}{WL} \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$$

$$L_1(\alpha) = \frac{L \cdot \pi}{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha} \quad (3.18)$$

temel bileşen endüktansı olur. Harmonik empedanslar:

$$\frac{Z_n(\alpha)}{WL} = \frac{\pi}{4} \left(\frac{n^3 - n}{|\cos n\alpha \cdot \sin \alpha - n \cdot \sin n\alpha \cdot \cos \alpha|} \right) \quad (3.19)$$

$Z_{eff} \alpha = 0$ da minimum etkin empedans ise

$$\frac{I_{eff}(\alpha)}{I_{oeff}} = \frac{Z_{oeff}}{N_{eff}(\alpha)} \quad (3.20)$$

yazılabilir. (3.19) ve (3.20) den etkin empedans ise;

$$\frac{Z_{eff}(\alpha)}{WL} = \frac{1}{\sqrt{\frac{2}{\pi} \left[(\pi - 2\alpha) \left(1 - \frac{1}{2} \cos 2\alpha\right) - \frac{3}{2} \sin 2\alpha \right]}}$$

olarak bulunur. Kırılcının akımları:

$$I_{eff}^2(\alpha) = I_1^2(\alpha) + I_3^2(\alpha) + I_5^2(\alpha) + I_7^2(\alpha) + \dots + I_n^2(\alpha) \quad ()$$

buradan her tarafı $I_{21\alpha=0}^2$ 'ye bölünürse

$$\frac{I_{2eff}^2(\alpha)}{I_{2eff10}^2} = \frac{I_1^2(\alpha)}{I_1^2(\alpha_{=0})} + \frac{I_3^2(\alpha)}{I_1^2(\alpha_{=0})} + \dots + \frac{I_n^2(\alpha)}{I_1^2(\alpha_{=0})}$$

$$\frac{I_{2eff}^2(\alpha)}{I_{2oeff}^2} + \frac{I_1^2(\alpha)}{I_1^2 \alpha=0} + \frac{I_3^2(\alpha)}{I_1^2 \alpha=0} + \frac{I_5^2(\alpha)}{I_1^2 \alpha=0} + \dots + \frac{I_n^2(\alpha)}{I_1^2 \alpha=0}$$

yazılabilir.

$$\hat{I}_n = \frac{U_n \alpha}{n \cdot w \cdot L}$$

$$\hat{I}_1 = \frac{U_m}{WL} = \frac{\hat{U}_1}{WL}$$

$$I_{eff}(\alpha) = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot Z_{eff}}$$

$$I_{\text{oeff}} = \frac{U_m}{\sqrt{2} \cdot W_L}$$

bağıntıları 39 da yerine konursa

$$\left(\frac{W_L}{Z_{\text{eff}}(\alpha)} \right)^2 = \left(\frac{W_L}{W_1 \cdot U_m / U_1 \alpha} \right)^2 + \left(\frac{W_L}{3W_1 \cdot U_m / U_2^2 \alpha} \right)^2 + \dots + \left(\frac{W_L}{nW_1 U_m / U_n \alpha} \right)^2 \quad (3.21)$$

burada:

$$Z_1(\alpha) = W_L \cdot \frac{U_m}{U_1(\alpha)} \quad (3.22)$$

olarak temel bileşen empedans saf endüktiftir. Harmonik empedanslarda saf endüktif olarak

$$Z_n(\alpha) = n \cdot w \cdot \frac{U_m}{|U_n(\alpha)|} \quad (3.23)$$

burada:

$$L_1(\alpha) = L \cdot \frac{U_m}{|U_n(\alpha)|}$$

denirse;

$$Z_n(\alpha) = n \cdot w \cdot L_n(\alpha)$$

şeklinde gösterilebilir. Denklem 40'da

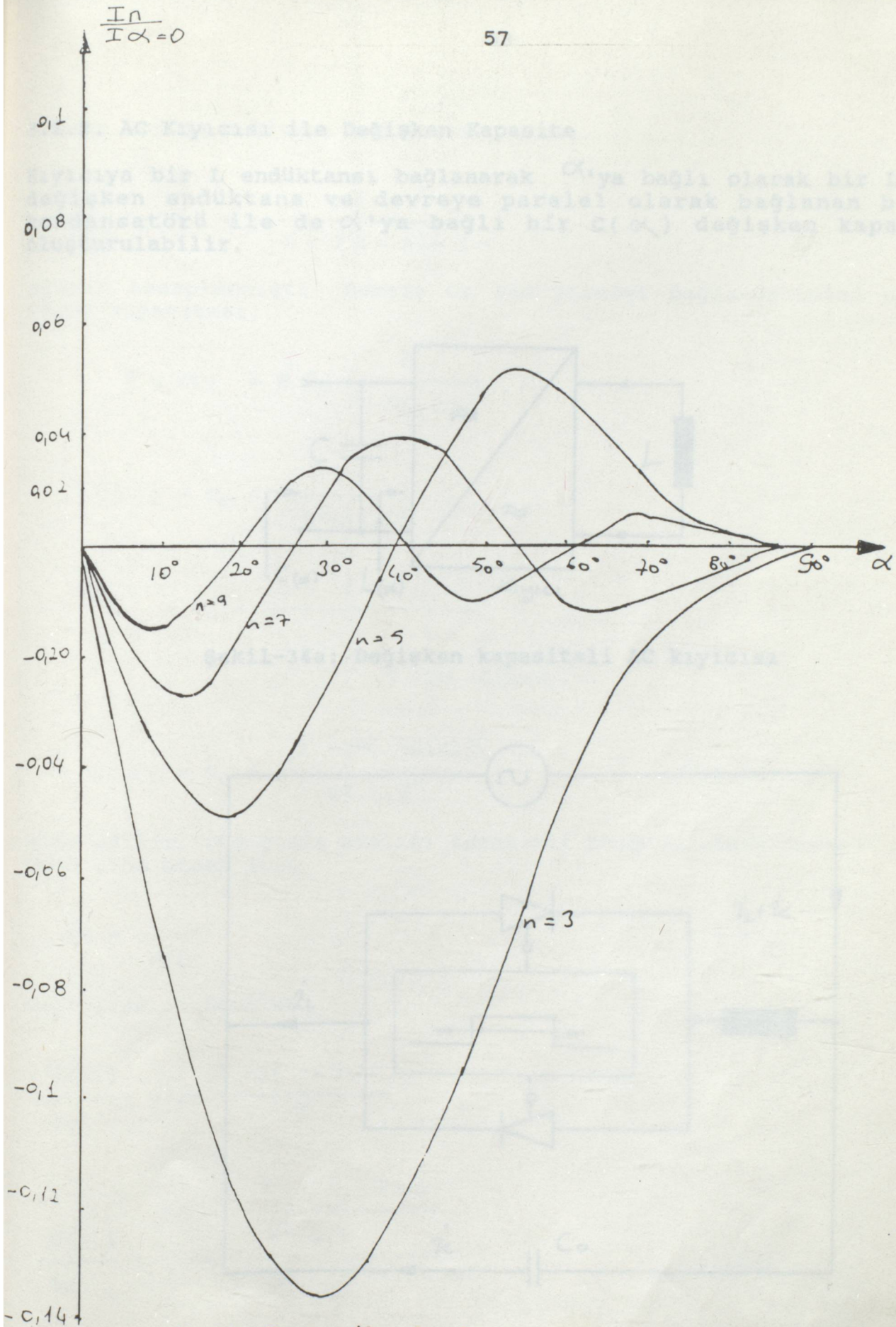
$$W_n = n \cdot w$$

denirse

$$\left(\frac{1}{Z_{\text{eff}}} \right)^2 = \left(\frac{1}{W_1 L_1(\alpha)} \right)^2 + \left(\frac{1}{W_3 L_3(\alpha)} \right)^2 + \dots + \left(\frac{1}{W_n L_n(\alpha)} \right)^2$$

$$\left(\frac{1}{Z_{\text{eff}}(\alpha)} \right)^2 = \sum_{n=1}^{\infty} \left(\frac{1}{W_n L_n(\alpha)} \right)^2$$

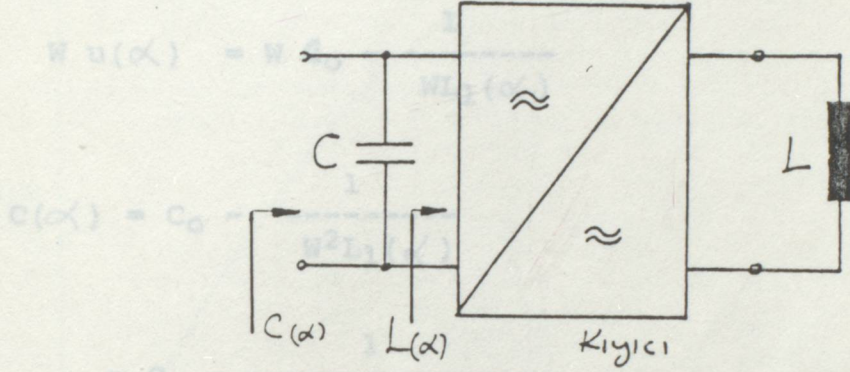
bulunmuş olur. Buda, harmoniklerden dolayı L yüklü kıyıcıdan akan i_n (wnt) akımlarından dolayı oluşan $W_n L_n(\alpha)$ empedansları cinsinden empedans olur.



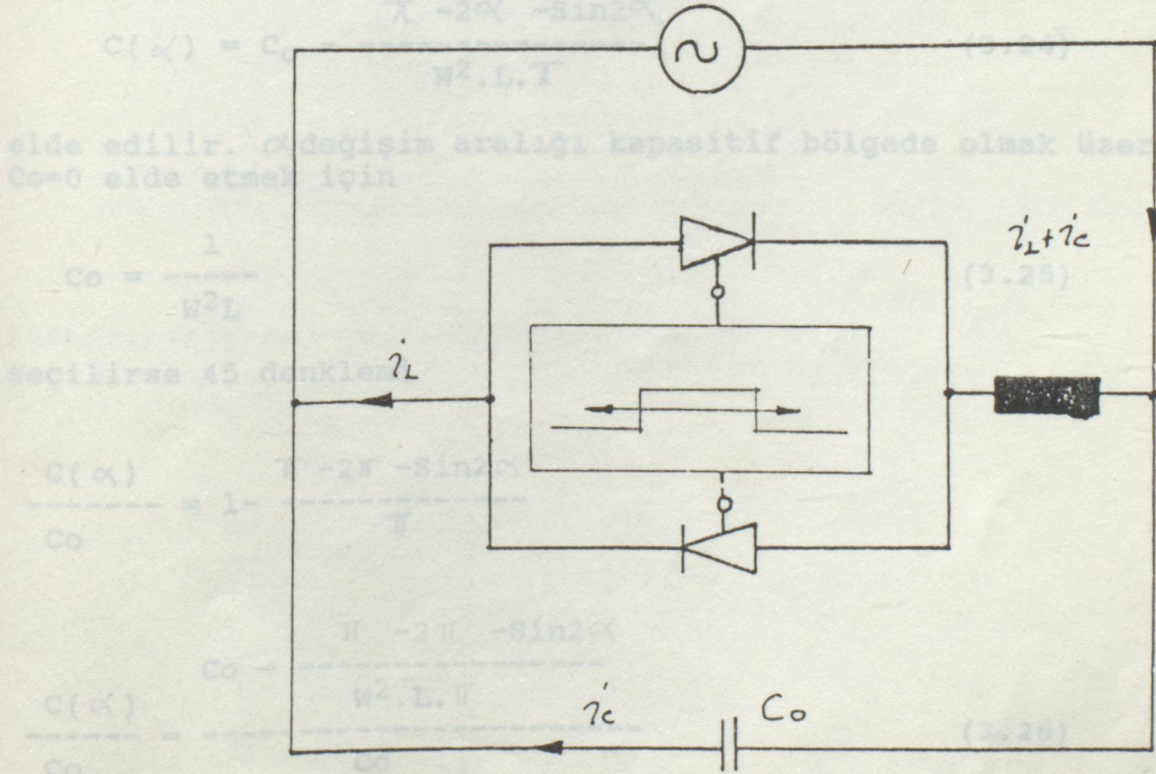
Şekil-33: Harmonik akımların ($n=3,5,7,9$)'a göre yaklaşık değişimleri

3.2.2. AC Kıyıcısı ile Değişken Kapasite

Kıyıcıya bir L endüktansı bağlanarak α 'ya bağlı olarak bir $L(\alpha)$ değişken endüktans ve devreye paralel olarak bağlanan bir C kondansatörü ile de α 'ya bağlı bir $C(\alpha)$ değişken kapasite oluşturulabilir.



Şekil-34a: Değişken kapasiteli AC kıyıcısı



Şekil-34b: AC Kıyıcısı ile oluşturulan değişken kapasite model şeması

önceki konuda değişken endüktans olarak;

$$L_1(\alpha) = \frac{L\pi}{\pi - 2\pi - \sin 2\alpha}$$

olarak hesaplanmıştı. Burada C_0 nin paralel bağlanmasından oluşan $C(\alpha)$ kapasitesi;

$$W u(\alpha) = W G_0 - \frac{1}{WL_1(\alpha)}$$

$$C(\alpha) = C_0 - \frac{1}{W^2 L_1(\alpha)}$$

$$= C_0 - \frac{1}{W^2 \frac{L\pi}{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}}$$

$$C(\alpha) = C_0 - \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{W^2 \cdot L \cdot \pi} \quad (3.24)$$

elde edilir. α değişim aralığı kapasitif bölgede olmak üzere $\alpha = 0$ 'da $C_0 = 0$ elde etmek için

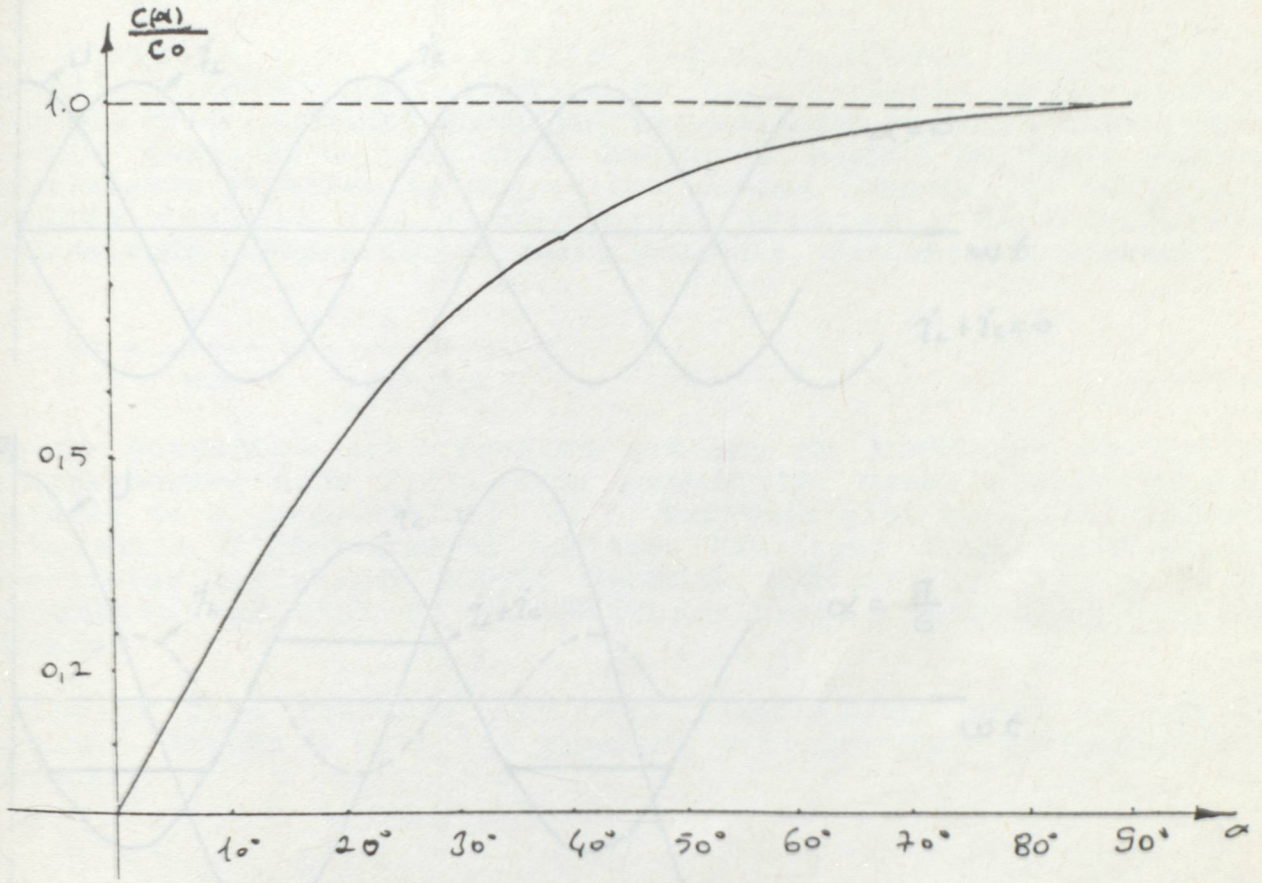
$$C_0 = \frac{1}{W^2 L} \quad (3.25)$$

seçilirse 45 denklemi

$$\frac{C(\alpha)}{C_0} = 1 - \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$$

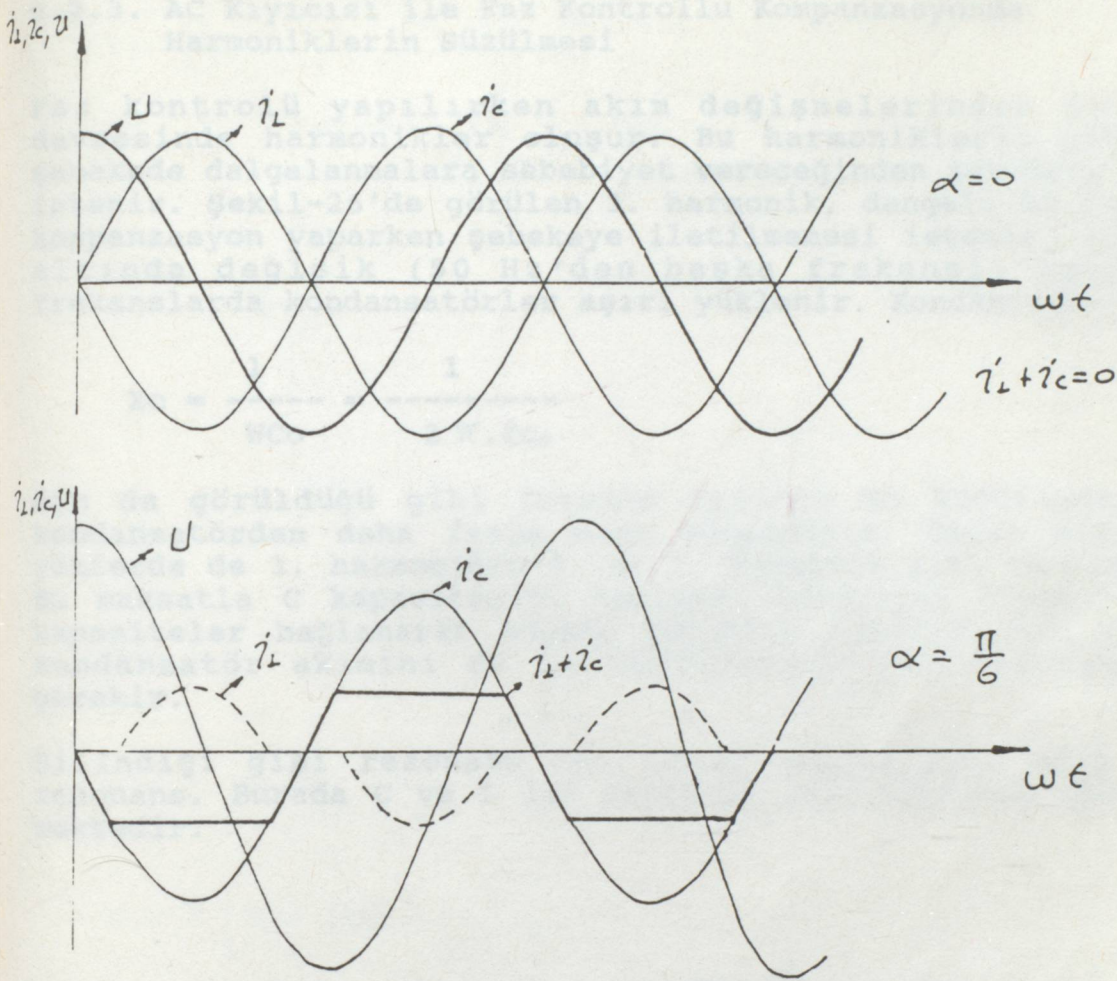
$$\frac{C(\alpha)}{C_0} = \frac{C_0 - \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{W^2 \cdot L \cdot \pi}}{C_0} \quad (3.26)$$

elde edilir. Bu da normalize kapasite olmuş olur.



Şekil-35: Normalize kapasite $\frac{C(\alpha)}{C_0}$ in α 'ye göre değişimi

bağıntı (47) den görüldüğü gibi $\alpha = 0^\circ$ de 0
 $\alpha = 90^\circ$ da 1 olur.



Şekil-36: Kapasitif çalışan AC kıyıcısının $\alpha=0$ ve $\alpha = \pi/6$ için akım, gerilim dalga şekilleri

Bu tip çalışmada α 'nın büyük değişim aralığında C (α) kapasitesinin kontrolü imkanı doğar. Bu AC kıyıcısı $f = 50$ Hz bir şebekede çalışırsa α her yarım periyotta bir değiştirilebileceğinden bu düzenin cevap süresi:

$$T = \frac{1}{f} = \frac{1}{50} = 20 \text{ ms}$$

her periyotta iki ayar olabileceğine göre;

$$t_{\max} = \frac{T}{2} = \frac{20}{2} = 10 \text{ ms}$$

olur. Ortalama cevap süresi 5 ms olmuş olur.

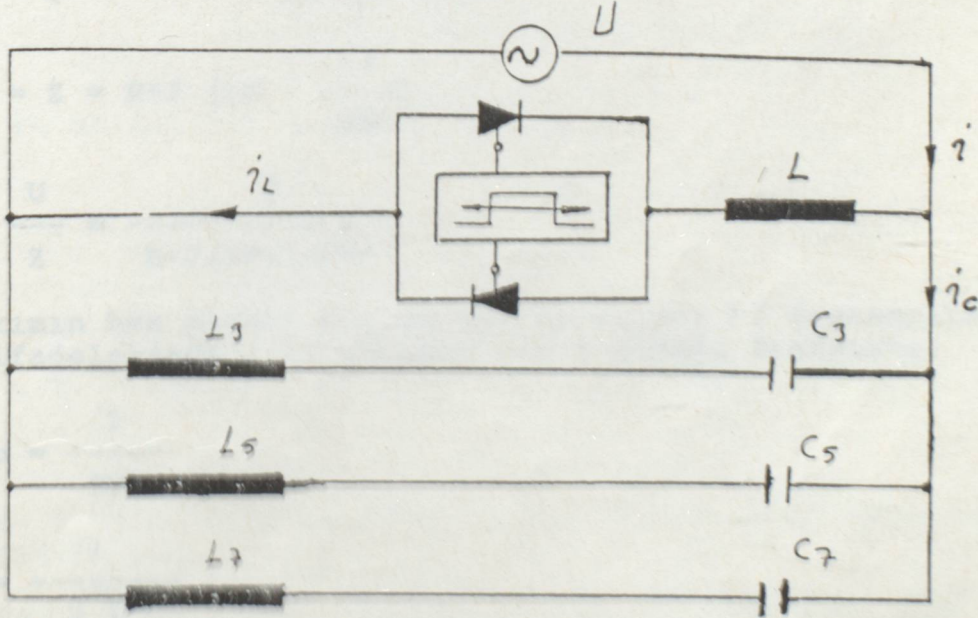
3.2.3. AC Kıyıcısı ile Faz Kontrollu Kompanzasyonda Harmoniklerin Süzülmesi

Faz kontrolü yapılırken akım değişmelerinden dolayı kıyıcı devresinde harmonikler oluşur. Bu harmoniklerin büyük olanları şebekede dalgalanmalara sebebiyet vereceğinden şebekeye iletilmemesi istenir. Şekil-26'de görülen 3. harmonik, dengeli üç fazlı sistemde kompanzasyon yaparken şebekeye iletilmemesi istenir. Bu harmonikler altında değişik (50 Hz'den başka frekanslı harmoniklerde, frekanslarda kondansatörler aşırı yüklenir. Kondansatör direnci:

$$X_c = \frac{1}{WCo} = \frac{1}{2 \pi \cdot f \cdot c_0}$$

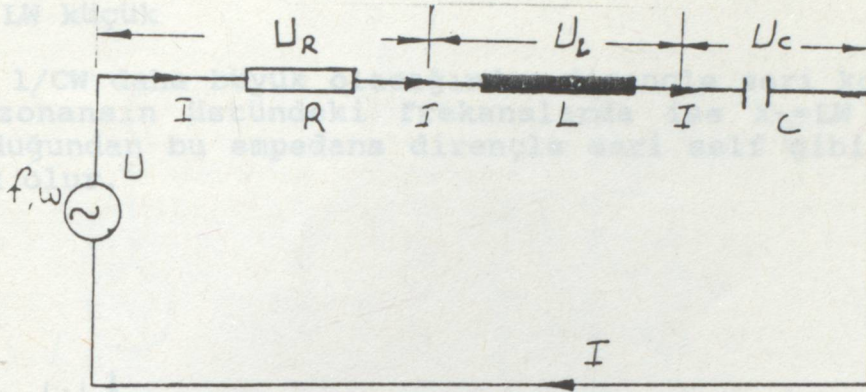
dan da görüldüğü gibi frekans artınca X_c küçülecek ve böylece kondansatörden daha fazla akım geçecektir. Genel olarak dengesiz yüklerde de 3. harmoniğin 5. ve 7. harmonik gibi süzülmesi istenir. Bu maksatla C kapasitesini toplamı kendisini oluşturacak paralel kapasiteler bağlanarak süzgeç devreler kullanılır. Ayrıca herbir kondansatör akımını da L_n endüktanslarıyla rezonansa getirmek gerekir.

Bilindiği gibi rezonans iki türlü olmaktadır. Seri ve paralel rezonans. Burada C ve L ler arasında seri rezonans gerçekleştirilmektedir.



Şekil-37: Kontrol esnasında teşekkül eden harmonikleri süzen süzgeç devrenin AC kıyıcısına bağlanması

3.2.3.1. Seri Rezonans



Şekil-38: Seri Rezonans

$$U = I.R + I.JL\omega + \frac{1}{C\omega} - \frac{J}{C\omega}$$

$$U = I.(R + JL\omega - \frac{J}{C\omega})$$

$$U = I \left[R + J \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right) \right]$$

$$U/I = Z = R + J \left(L\omega - \frac{1}{C\omega} \right)$$

$$I = \frac{U}{Z} = \frac{U}{R + J(L\omega - 1/C\omega)}$$

Geçen akımın hem modülü hem de faz açısı $\omega = 2\pi f$ frekansına bağlıdır. Z ve I ifadelerinde J'li terimin sıfır olduğu frekansta;

$$L\omega_0 = \frac{1}{C\omega_0}$$

olur.

$$\omega_0 = \frac{1}{\sqrt{LC}}$$

ve

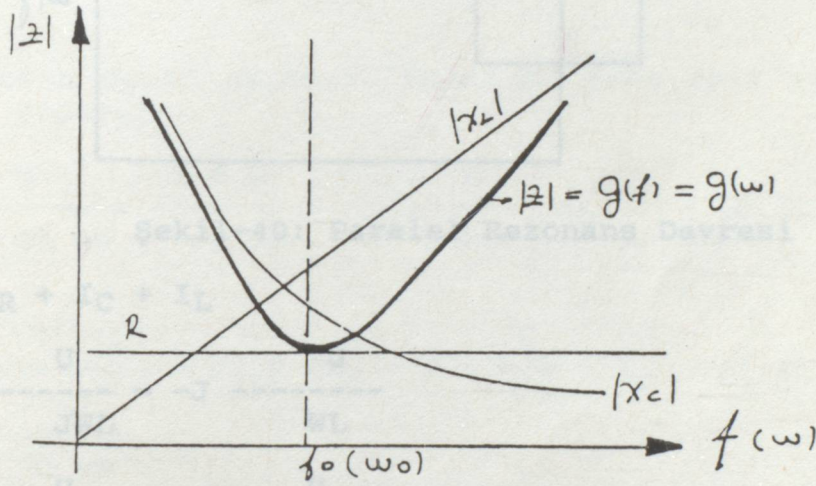
$$f_0 = \frac{\omega_0}{2\pi} = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}}$$

$$Z = R + J \left(L\omega_0 - \frac{1}{C\omega_0} \right)$$

Devre empedansı; rezonans frekansı f_0 altındaki (daha küçük) frekanslarda;

$$X_L = L\omega \text{ küçük}$$

$X_C = 1/C\omega$ daha büyük olacağından dirençle seri kondansatör gibi olur. Rezonansın üstündeki frekanslarda ise $X_L = L\omega$ büyük $X_C = 1/C\omega$ küçük olduğundan bu empedans dirençle seri self gibi davranır. $f = f_0$ da $Z=R$ olur.



Şekil-39: Seri Rezonans Eğrisi

$f = f_0$ da self ve kapasite gerilimleri:

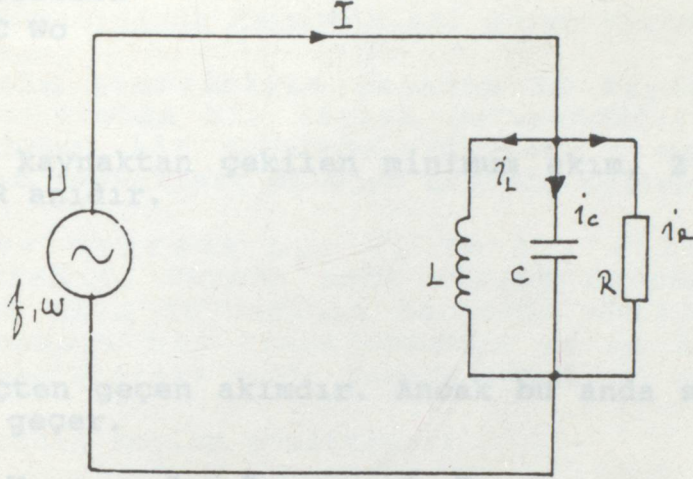
$$U_{L0} = I \cdot J L \omega_0 = \frac{U}{R} \cdot J L \omega_0 = J \frac{L \omega_0}{R} \cdot U \quad (3.27)$$

$$U_{C0} = I \cdot \frac{-J}{C \omega_0} = \frac{U}{R} \cdot \frac{-J}{C \omega_0} = \frac{-J(L \omega_0) U}{R} \quad (3.28)$$

$f = f_0$ da $L \omega_0 \gg R$ olduğundan bu U_{L0} ve U_{C0} , U 'ya nazaran çok büyük olabilecektir.

Kompanzasyonda şebeke frekansı sabit kaldığından $f = f_0$ durumu devamlı geçerli olur. Ancak frekansı değiştirilerek ayar yapılan asenkron motorlarda kompanzasyon yapılacaksa kıyıcı frekans dönüştürücüden önce yani şebeke girişinde olmalıdır. Yoksa her ayar frekansında $f \neq f_0$ dan dolayı rezonans bozulacaktır.

3.2.3.2. Paralel Rezonans



Şekil-40: Paralel Rezonans Devresi

$$I = I_R + I_C + I_L$$

$$I_L = \frac{U}{j\omega L} = -j \frac{U}{\omega L} \quad (3.31)$$

$$I_C = \frac{U}{-j/\omega C} = j \frac{U}{L/\omega C} = j\omega C U \quad (3.32)$$

$$I = \frac{U}{R}$$

Rezonans devresi empedansı:

$$Z = \frac{\frac{-j}{\omega L} \cdot R}{\frac{-j}{\omega L} + j\omega C + \frac{R}{\omega L}} \quad (3.29)$$

$$Z = \frac{\frac{L}{C} R}{\frac{L}{C} + j(L - \frac{1}{\omega C}) R}$$

$X_L = X_C$ nin eşit olduğu şebeke frekansında (dolayısıyla rezonans frekansında) $f = f_0$

$$L\omega_0 = \frac{1}{C \omega_0}$$

$$Z_0 = R$$

$f = f_0$ da kaynaktan çekilen minimum akım, Z 'in maximum olduğu an olan $Z_0 = R$ anıdır.

$$I_0 = \frac{U}{R}$$

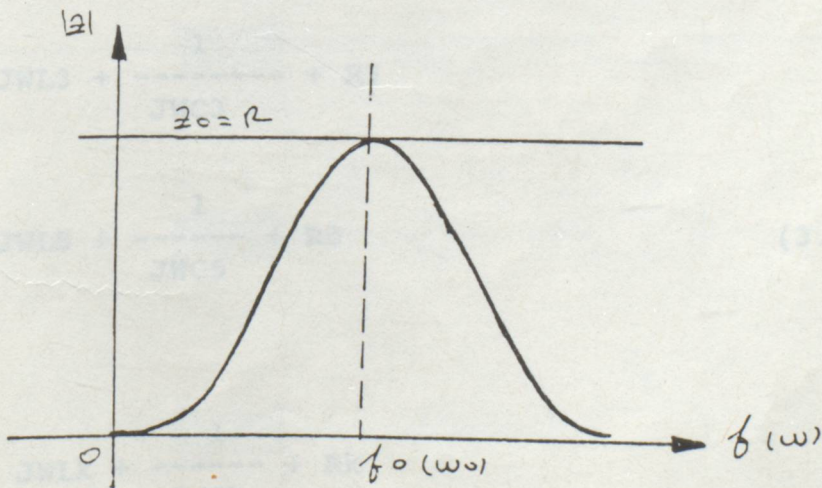
olan dirençten geçen akımdır. Ancak bu anda self ve kondansatörden de akımlar geçer.

$$I_{L0} = \frac{U}{JL \omega_0} = \frac{I_0 R}{JL \omega_0} = - \frac{J R}{L \omega_0} I_0 \quad (3.30)$$

$$I_{C0} = \frac{U}{-J \frac{1}{C \omega_0}} = J I_0 R C \omega_0 = J \frac{R}{L \omega_0} I_0 \quad (3.31)$$

$$I_C = -I_L \quad (3.32)$$

dır.



Şekil-41: Paralel Rezonans Eğrisi

Bu sistemde ayrı ayrı seri rezonans şeklinde bağlanan kondansatörler toplanarak kendi aralarındaki toplamı $C(\omega)$ toplam değişken kapasiteyi oluştururlar.

3.2.4. AC Kıyıcısında Harmonikleri Süzen Filtre Devreleri

Faz kontrolu prensibiyle çalışan AC kıyıcısı şebekeye karşı, harmonikler üreten bir kaynak durumundadır. Bu sebeple, kıyıcı yerine herhangi bir şebekte, akımları L ve açısına bağlı olan bağımlı akım kaynakları eşdeğer devrede kullanılabilir.

Bu eşdeğer devrede L_k , C_k ve R_k , k inci süzgeç devreyi oluşturmaktadır. Herbir seri süzgeç devresi kendisine ilişkin frekanstaki akım kaynağının harmonik akımını süzmeye yarar. Bu sistem şebekeye bir transformator ya da komutasyon endüktansı üzerinden bağlanırsa; sonlu şebeke empedansı R_o , L_o ile gösterilir.

Süzgeç devrenin toplam admittansı:

$$Y = Y_3 + Y_5 + Y_7 + \dots + Y_k$$

Burada;

Y_k : k inci süzgeç devrenin admittansıdır.

$$k = 2n+1 \quad \text{ve } n = 1, 2, 3, \dots$$

$$Y = \sum_{k=1}^{\infty} Y_k \quad (3.33)$$

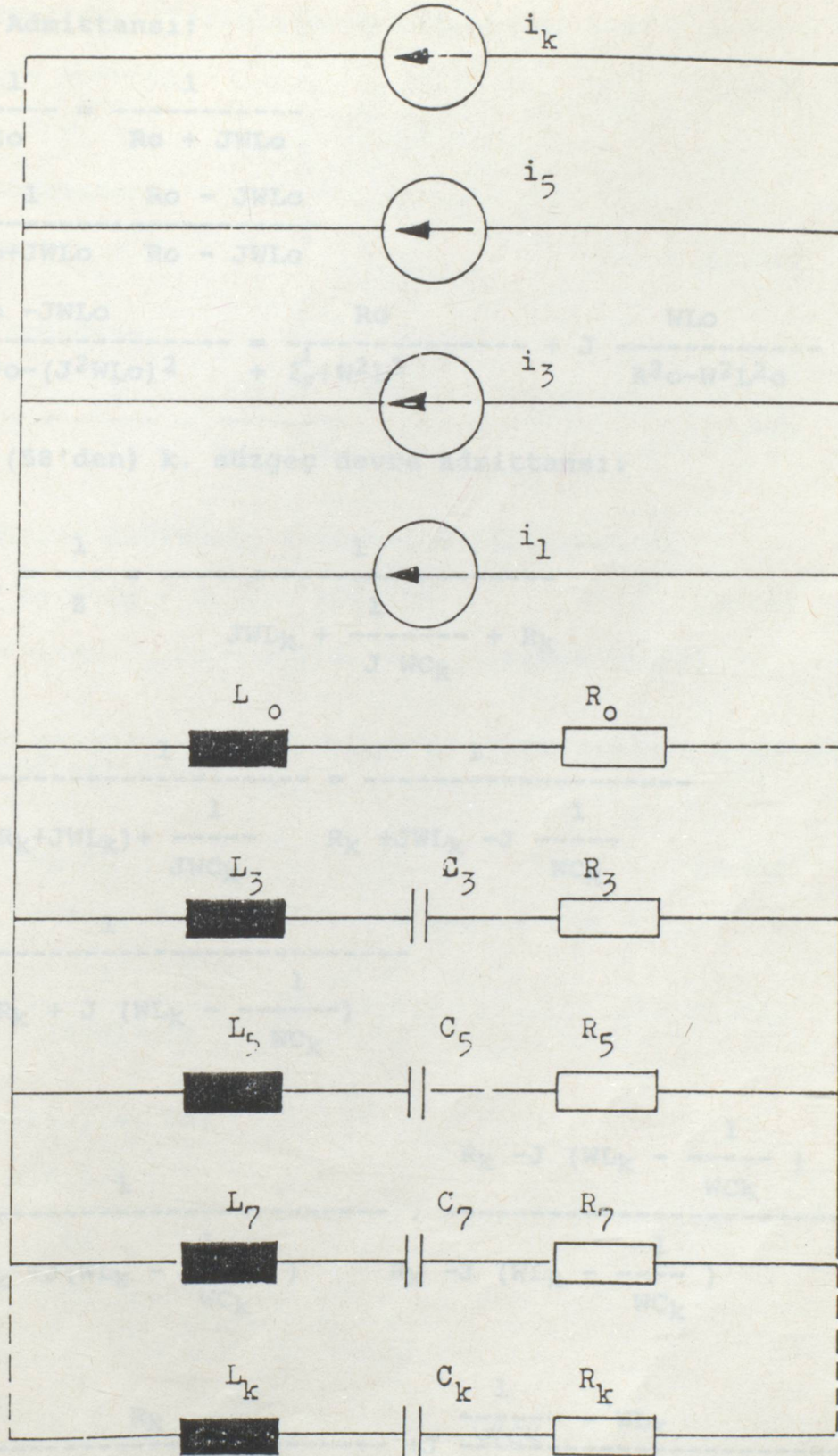
$$Z_o = R_o + j\omega L_o \quad (3.34)$$

$$Z_3 = j\omega L_3 + \frac{1}{j\omega C_3} + R_3$$

$$Z_5 = j\omega L_5 + \frac{1}{j\omega C_5} + R_5 \quad (3.35)$$

.

$$Z_k = j\omega L_k + \frac{1}{j\omega C_k} + R_k$$



Şekil-42: Kırıyıcı yerine bağımlı kaynaklar konarak oluşturulan eşdeğer devre

Şebeke Admittansı:

$$\begin{aligned}
 Y_o &= \frac{1}{Z_o} = \frac{1}{R_o + j\omega L_o} \\
 &= \frac{1}{R_o + j\omega L_o} \cdot \frac{R_o - j\omega L_o}{R_o - j\omega L_o} \\
 &= \frac{R_o - j\omega L_o}{R_o^2 - (j\omega L_o)^2} = \frac{R_o}{R_o^2 + \omega^2 L_o^2} + j \frac{\omega L_o}{R_o^2 - \omega^2 L_o^2} \quad (3.36)
 \end{aligned}$$

Z_k den (58'den) k . süzgeç devre admittansı:

$$Y_k = \frac{1}{Z} = \frac{1}{j\omega L_k + \frac{1}{j\omega C_k} + R_k}$$

$$= \frac{1}{(R_k + j\omega L_k) + \frac{1}{j\omega C_k}} = \frac{1}{R_k + j\omega L_k - j \frac{1}{\omega C_k}}$$

$$= \frac{1}{R_k + j \left(\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k} \right)}$$

$$= \frac{1}{R_k + j \left(\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k} \right)} \cdot \frac{R_k - j \left(\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k} \right)}{R_k - j \left(\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k} \right)}$$

$$= \frac{R_k}{R_k^2 + \left(\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k} \right)^2} + j \frac{\frac{1}{\omega C_k} - \omega L_k}{R_k^2 + \left(\omega L_k - \frac{1}{\omega C_k} \right)^2} \quad (3.37)$$

olur.

Tüm süzgeç devrelerin toplam admittansı ise:

$$Y_{5ü} = \sum_{k=1}^{\infty} Y_k \quad (3.38)$$

Toplam admittans:

$$Y_T = Y_{5ü} + Y_O \quad (3.39)$$

Toplam empedans:

$$Z_T = \frac{1}{Y_T} = \frac{1}{Y_{5ü} + Y_O} \quad (3.40)$$

olur. Süzgeç devredeki kondansatörler arasında

$$C_O C_3 + C_5 + \dots + C_k \quad (3.41)$$

$$k = 2n+1 \quad (n = 1, 2, 3, \dots \text{ olmak üzere})$$

Harmonik akımların temel bileşene göre maximum genlikleri % olarak G_k ile gösterilirse:

$$C_k = G_k \cdot C_O \quad (3.42)$$

olur. k. süzgeç devre endüktans değeri ise

$$L_k = \frac{1}{(k.W)^2 \cdot C_k} \quad (K = 3, 5, 7, \dots) \quad (3.43)$$

İyilik katsayısı da;

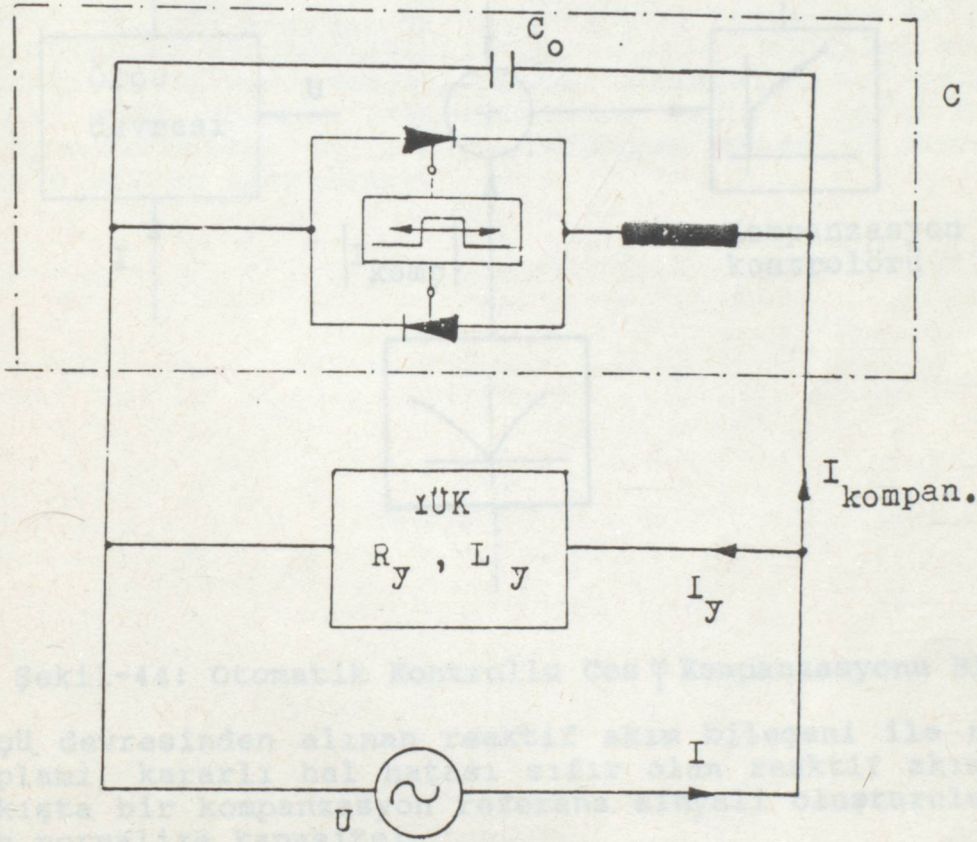
$$Q_k = \frac{k.W.L.k}{R_k} \quad (3.44)$$

olur. k ve Q_k gerilimle beslenen yük (R_k, L_k) bu güç ve $\cos \phi$ bölgesi geniş bir şekilde değişebilmektedir. Böyle bir yükte otomatik olarak $\cos \phi$ kompanzasyonu gerçekleştirilebilir.

Otomatik kontrol düzeninde ϕ kaynağından çekilen i akımı $i_{\cos \phi}$ olarak alınarak bir blok devresinde değerlendirilir. Bu i akımının reaktif bileşeni belirlenerek bu bileşen $i_{\cos \phi}$ akımıyla $\cos \phi$ kompanzasyonu gerçekleştirilir.

3.2.5. AC Kıyıcısı İle Kompanzasyonda Otomatik Kontrol

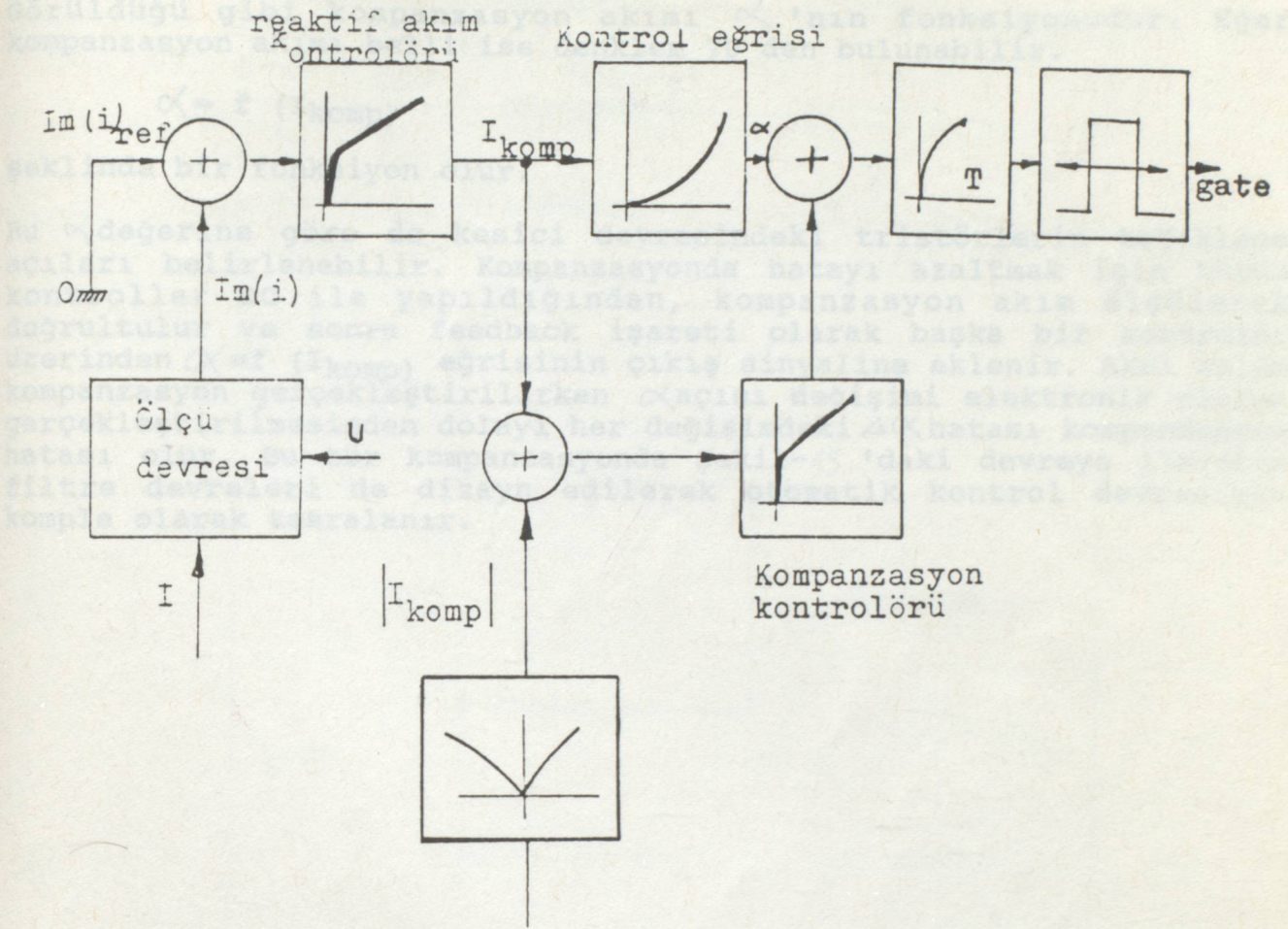
Şebekede endüktif yükleme olduğunda $\cos \varphi$ kompanzasyonunun kısa sürede gerçekleşmesi istenir. Endüktif bileşen reaktif güç kaybı olduğu gibi bazı şebeke dalgalanmalarını da doğurur. Bu bakımdan kompanzasyonun kısa sürede gerçekleşmesi için AC kıyıcısı ile kompanzasyon sistemi otomatik kontrol düzeni ile beraber dizayn edilir.



Şekil-43: AC Kıyıcısı ile $\cos \varphi$ Kompanzasyonu

Burada U gerilimiyle beslenen yük (R_y , L_y) ün güç ve $\cos \varphi$ bölgesi geniş bir şekilde değişebilmektedir. Böyle bir yükte otomatik olarak $\cos$ kompanzasyonu gerçekleştirilebilir.

Otomatik kontrol düzeninde U kaynağından çekilen i akımı örnekleme alınarak bir ölçü devresinde ölçülmektedir. Bu i akımının reaktif bileşeni belirlenerek bu bileşen sıfır yapılmakla $\cos \varphi$ kompanzasyonu gerçekleştirilmiş olur.



Şekil-44: Otomatik Kontrollü Cos φ Kompanzasyonu Blok Diyagramı

Ölçü devresinden alınan reaktif akım bileşeni ile referans sinyali toplamı, kararlı hal hatası sıfır olan reaktif akım kontrolöründen çıkışta bir kompanzasyon referans sinyali oluşturulur. Denklem (47) den normalize kapasite:

$$\frac{C(\alpha)}{C_0} = 1 - \frac{\pi - 2\pi \sin 2\alpha}{\pi}$$

den;

$$C(\alpha) = C_0 \frac{2\alpha + \sin 2\alpha}{\pi} \quad (3.45)$$

dir.

$$I_{komp} \frac{U}{Z_C(\alpha)} = WUC(\alpha) \quad (3.46)$$

Buradaki $C(\alpha)$ yerine denklem 68'deki değeri konursa;

$$I_{komp} = \frac{W.U.C_0}{\pi} (2\alpha + \sin 2\alpha) \quad (3.47)$$

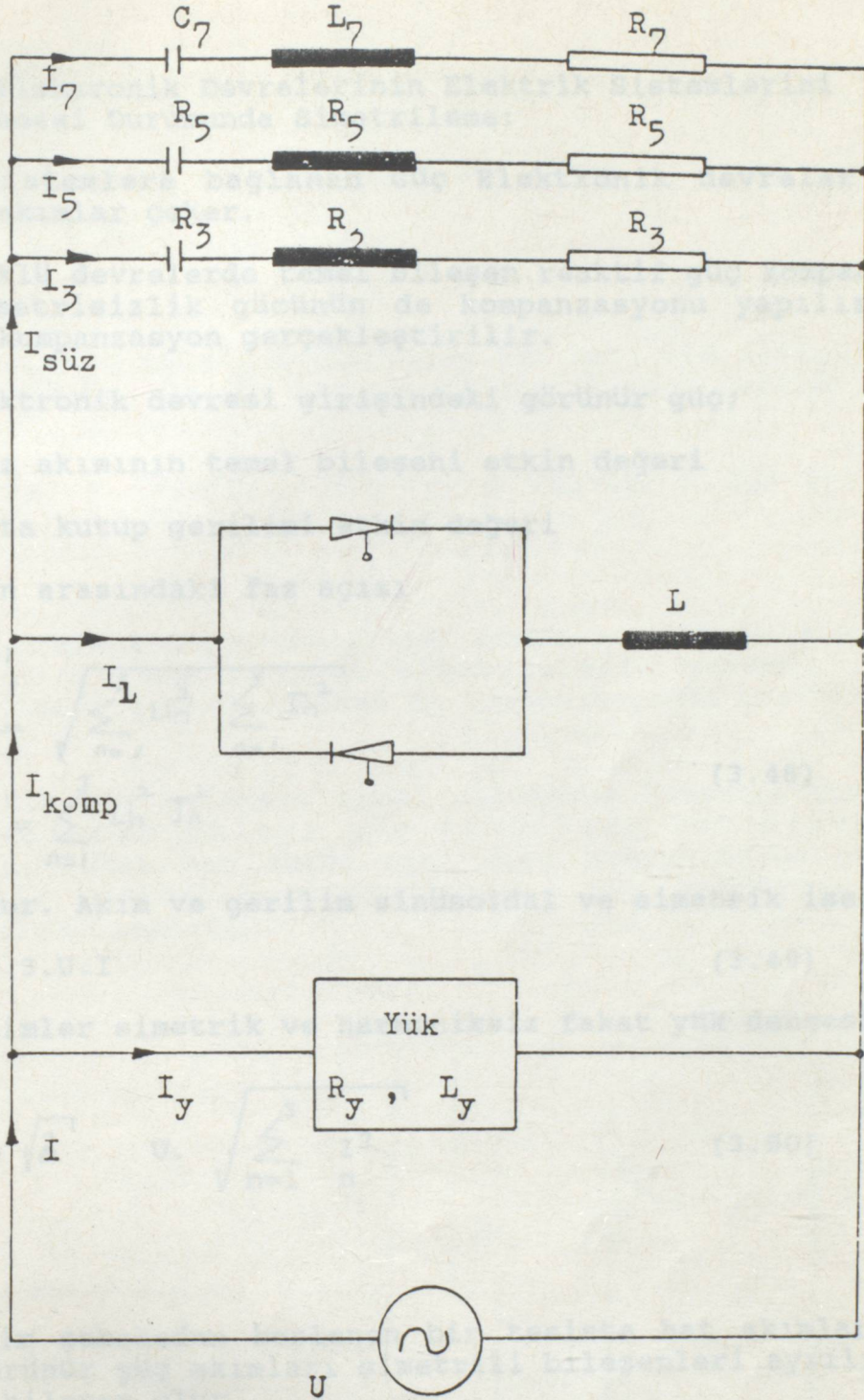
elde edilir.

Görüldüğü gibi kompanzasyon akımı α 'nın fonksiyonudur. Eğer kompanzasyon akımı belli ise denklem 70 den bulunabilir.

$$\alpha = f(I_{komp})$$

şeklinde bir fonksiyon olur.

Bu α değerine göre de kesici devresindeki tristörlerin tetikleme açıları belirlenebilir. Kompanzasyonda hatayı azaltmak için bütün kontroller DC ile yapıldığından, kompanzasyon akım ölçülerek doğrultulur ve sonra feedback işareti olarak başka bir kontrolör üzerinden $\alpha = f(I_{komp})$ eğrisinin çıkış sinyaline eklenir. Aksi halde kompanzasyon gerçekleştirilirken α açısı değişimi elektronik olarak gerçekleştirilmesinden dolayı her değişimdeki $\Delta\alpha$ hatası kompanzasyon hatası olur. Bu tür kompanzasyonda Şekil-45 'daki devreye ilaveten filtre devreleri de dizayn edilerek otomatik kontrol devresiyle komple olarak tasralanır.



Şekil-45: R_y, L_y Değişken Güç ve $\cos \phi$ ye Sahip Yüğü
Kompanze Eden AC Kılıyıcısı ve Filtre Devreleri

3.2.6. Güç Elektronik Devrelerinin Elektrik Sistemlerini Yükleme Durumunda Simetrisizlik:

Üç fazlı sistemlere bağlanan Güç Elektronik devreler şebekeden harmonikli akımlar çeker.

Dengesiz yüklü devrelerde temel bileşen reaktif güç kompanzasyonunun yanında simetrisizlik gücünün de kompanzasyonu yapılır veya her fazda ayrı kompanzasyon gerçekleştirilir.

Bir güç elektronik devresi girişindeki görünür güç;

I_n : bir faz akımının temel bileşeni etkin değeri

U_n : Faz-orta kutup gerilimi etkin değeri

φ_n : I_n , U_n arasındaki faz açısı

olmak üzere;

$$S_e = \sqrt{\sum_{n=1}^3 U_n^2 \sum_{n=1}^3 I_n^2} \quad (3.48)$$

$$= \sum_{n=1}^3 U_n^2 I_n^2$$

olarak okunur. Akım ve gerilim sinüsoidal ve simetrik ise:

$$S_e = 3.U.I \quad (3.49)$$

olur. Gerilimler simetrik ve harmoniksiz fakat yük dengesiz ise:

$$S_e = \sqrt{3} \cdot U \cdot \sqrt{\sum_{n=1}^3 I_n^2} \quad (3.50)$$

olur.

Üç fazlı bir şebekeden beslenen bir tesiste hat akımları simetrik değilse, görünür güç akımları simetrik bileşenleri ayrılır. Görünür güç de iki bileşen olur.

$$S_e^2 = S_t^2 + S_{sims}^2 \quad (3.51)$$

S_t : Temel bileşen görünür gücü

$$S_t^2 = P^2 + Q^2$$

S_{sims} : Simetrisizlik gücü

$$U = U_R + U_S + U_T$$

olduğuna göre;

$$P = U \cdot (I_R \cdot \cos \varphi_R + I_J \cdot \cos \varphi_S + I_T \cdot \cos \varphi_T)$$

$$P = P_R + P_S + P_T$$

olur.

Simetrisizlik gücü şebeke frekansının iki katı ile değişir.

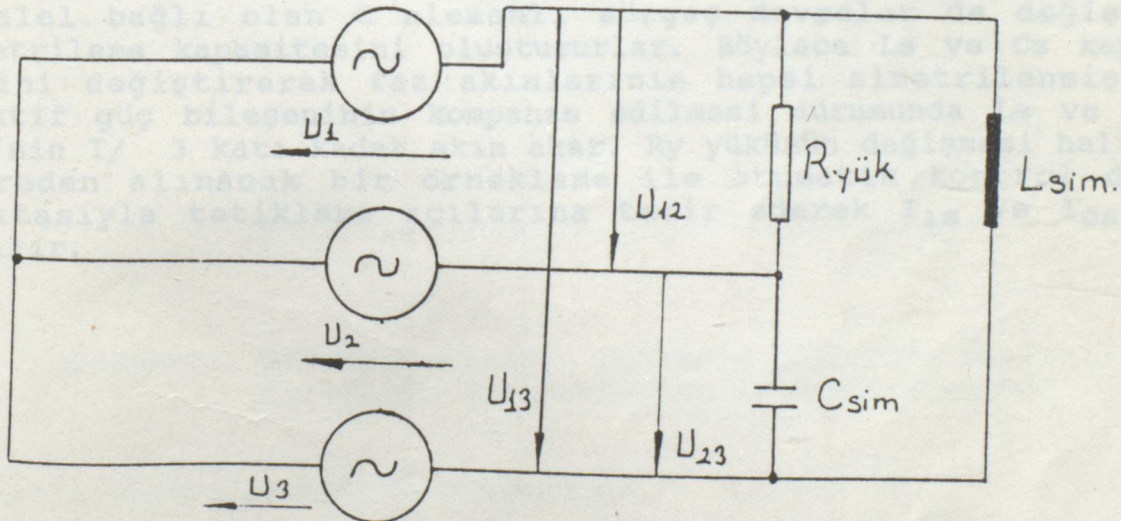
Reaktif güçler: Q_R , Q_S , Q_T ise simetrisizlik gücü denklem ' den;

$$S_{sim}^2 = (P_R - P_S)^2 + (P_S - P_T)^2 + (P_T - P_R)^2 + (Q_R - Q_S)^2 + (Q_S - Q_T)^2 + (Q_T - Q_R)^2$$

olur.

Elektrik sitemlerinde reaktif güç kompanse etmede temel bileşen reaktif gücü Q nin yanında simetrisizlik gücünün (S_{sim}) de kompanse edilmesi gerekir. Bunun da kompanzasyonda güzönüne alınması gerekir.

Dengesiz yüklü bir şebekede temel bileşende kompanzasyon yapılırsa simetrisizlikten dolayı güç katsayısı istenilen değerde olamayabilir. Fakat her fazda ayrı ayrı kompanzasyon yapıldığında simetrisizlik sözkonusu olmayacağından güç katsayısı istenilen değerde yapılabilir.



Şekil-46: Kompanzasyonu Gerçekleştirilmiş Bir Yüken Simetrisizlenmesi

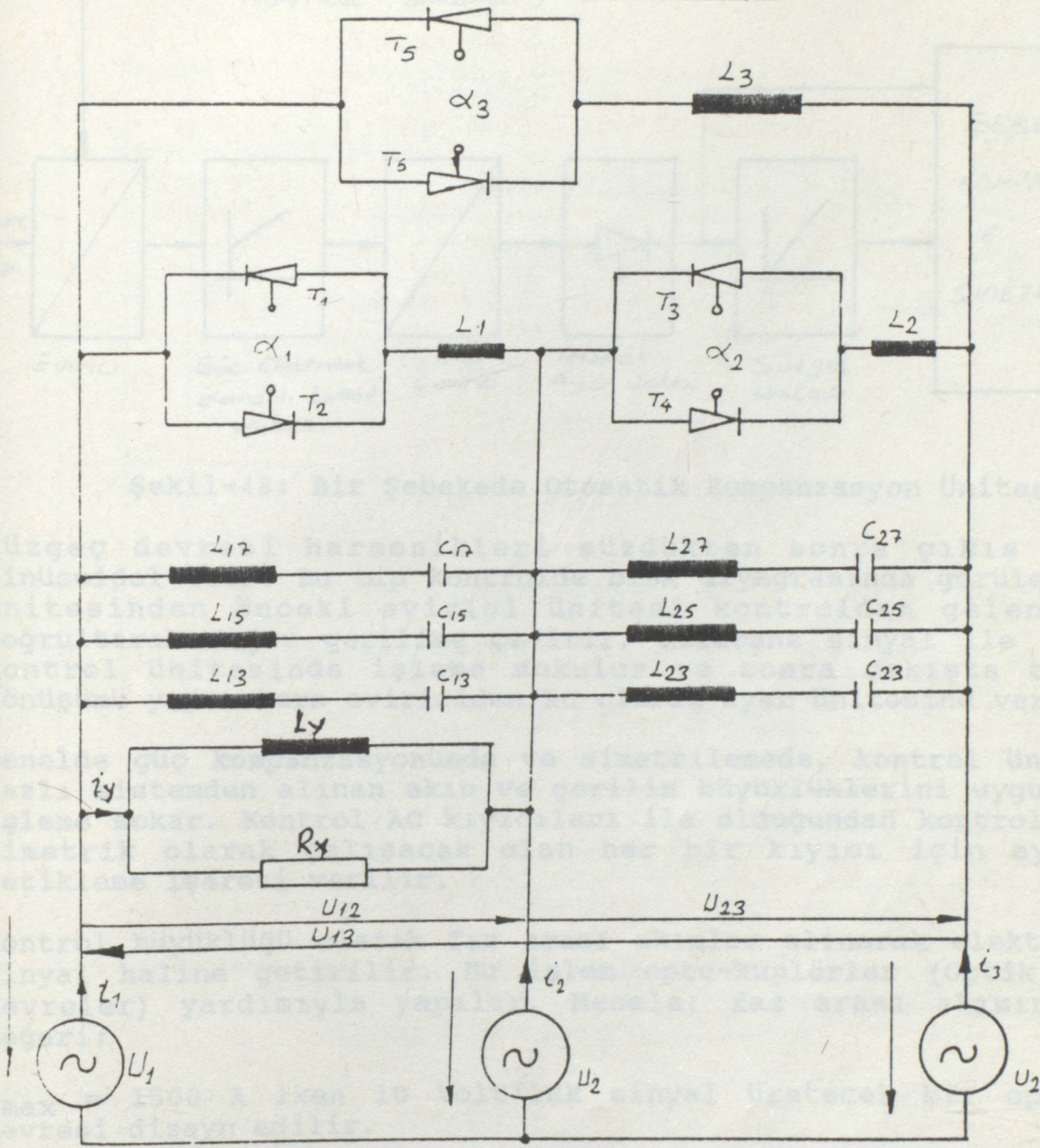
Kompanze edilecek yük sadece omik (R_y) değilde (Z_y) omik-endüktif bir empedansın olması halinde yine bu simetrileme geçerlidir. Yalnız o zaman L_{sim} daha büyük C_{sim} daha küçük değerler alacaktır.

3.2.7. AC Kıyıcılarla Simetrileme

AC kıyıcılarıyla kompanzasyonu yapılmış bir R_y , L_y (Z_y) yükünün simetrik olmayan şebekeden beslenmesi durumunda bu sistemi simetrilemek gerekmektedir. Simetrileme için yine bir AC kıyıcısı kullanılabilir. Kıyıcı tristörlerinin tetikleme açılarını değiştirerek simetrileme büyük bir aralıkta hızlı olarak yapılabilir.

(R_y , L_y) (Z_y) yükü iki faz arasından beslenmiş olursa şebeke reaktif olarak simetrisiz yüklenir. Bu simetrisizlik kompanzasyonla beraber simetrileme yapılır. Bunu AC kıyıcısıyla hem büyük aralıkta ve hem de hızlı ayarlama yapacak kıyıcı gruplarını her faza bağlanmış olarak yapmak mümkündür. Ayrıca kıyıcılar simetrileme ile beraber kompanzasyonu da gerçekleştirmiş olurlar.

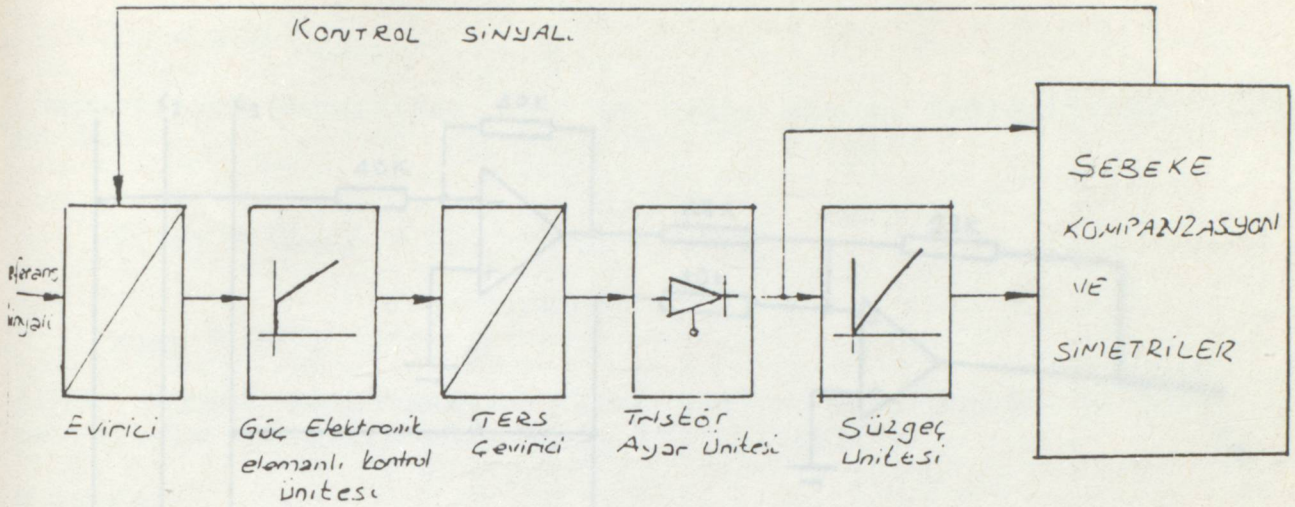
Şekil- da görüldüğü gibi üç fazlı simetrisi yüklenmiş bir şebekeyi AC kıyıcısıyla kompanze ve simetrileme yaparken T1 ve T2 tristörlerinin oluşturduğu kıyıcı L1 ile bir değişken (α ya bağlı olarak) endüktans oluştururken buna paralel olan C17 kondansatörleri de R_y , L_y yükünü kompanze edecek paralel bir kapasite oluştururlar. Böyle bir kıyıcılı kumanda ile $\cos \varphi$, 1'e yaklaştırılarak kompanzasyon büyük bir aralıkta yapılır. Bu kondansatörlere seri bağlı L bobinleri ile oluşan süzgeç devreleri harmonikleri süzer T4 ve T5'in oluşturduğu L3 endüktansı ile elde edilebilen değişken endüktans, simetrileme endüktansı olan L_s yerine geçer. T3 ve T4 ile paralel bağlı olan C elemanlı süzgeç devreler de değişken C_s simetrileme kapasitesini oluştururlar. Böylece L_s ve C_s kapasitelerini değiştirerek faz akımlarının hepsi simetrlenmiş olur. Reaktif güç bileşeninin kompanze edilmesi durumunda L_s ve C_s den I_{R_y} 'nin $1/3$ katı kadar akım akar. R_y yükünün değişmesi halinde bu devreden alınacak bir örnekleme ile otomatik kontrol devresi vasıtasıyla tetikleme açılarına tesir ederek I_{1s} ve I_{Cs} ayarı yapılır.



Şekil-47: AC Kıyıcılarıyla Dengesiz Yüklenmiş Üç Fazlı Şebekenin Kompansasyonu ve Simetrlenmesi

Otomatik Kontrolla Güç Kompansasyonu

Tristorlu kontrollu yapılan güç kompanzasyonunda güç büyüklüklerini ve faz açılarını sıhhatli olarak kontrol etmek ve şebekenin büyüklüklerini referanslarla mukayese etmek için otomatik kontrol sistemleri kurulur. Şebekeye; DC gerilimi AC gerilime çeviren eviriciler grubu ve kompanzasyon işlemini gerçekleştirecek olan AC kıyıcıları gibi güç elektroniği devreleri bağlanır. Ayrıca bu güç elektroniği devrelerinden önce şebekeye harmonik akımlarını süzecek olan süzgeç devreleri konur.



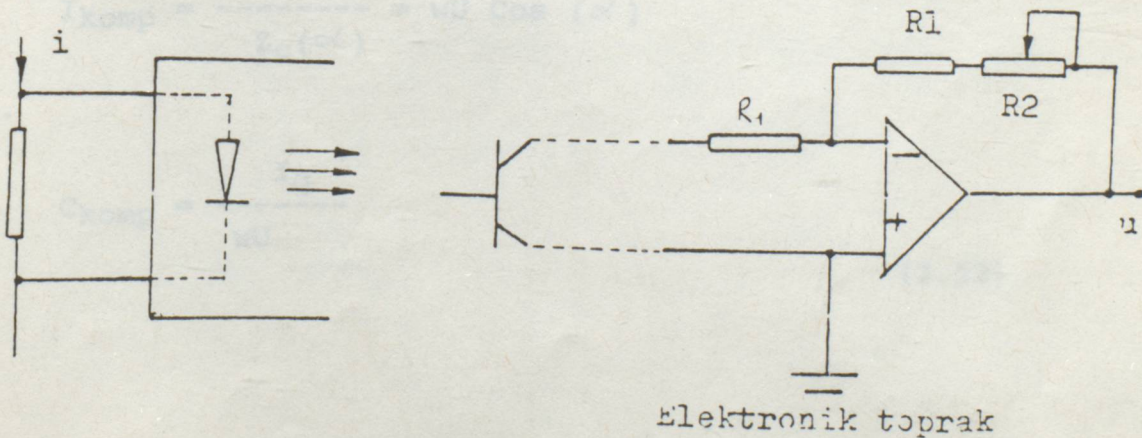
Şekil-48: Bir Şebekede Otomatik Kompanzasyon Ünitesi

Süzgeç devresi harmonikleri süzdükten sonra çıkış gerilimi sinüsoidal olur. Bu tip kontrolde blok diyagramında görülen kontrol ünitesinden önceki evirici ünitesi kontrolden gelen sinyali doğrultarak doğru gerilime çevirir. Referans sinyal ile bu sinyal kontrol ünitesinde işleme sokulur ve sonra çıkışta tekrar AC dönüşümü yapan ters eviriciden AC olarak ayar ünitesine verilir.

Genelde güç kompanzasyonunda ve simetrilemede, kontrol ünitesi, üç fazlı sistemden alınan akım ve gerilim büyüklüklerini uygun şekilde işleme sokar. Kontrol AC kıyıcıları ile olduğundan kontrol ünitesi; simetrik olarak çalışacak olan her bir kıyıcı için ayrı birer tetikleme işareti verilir.

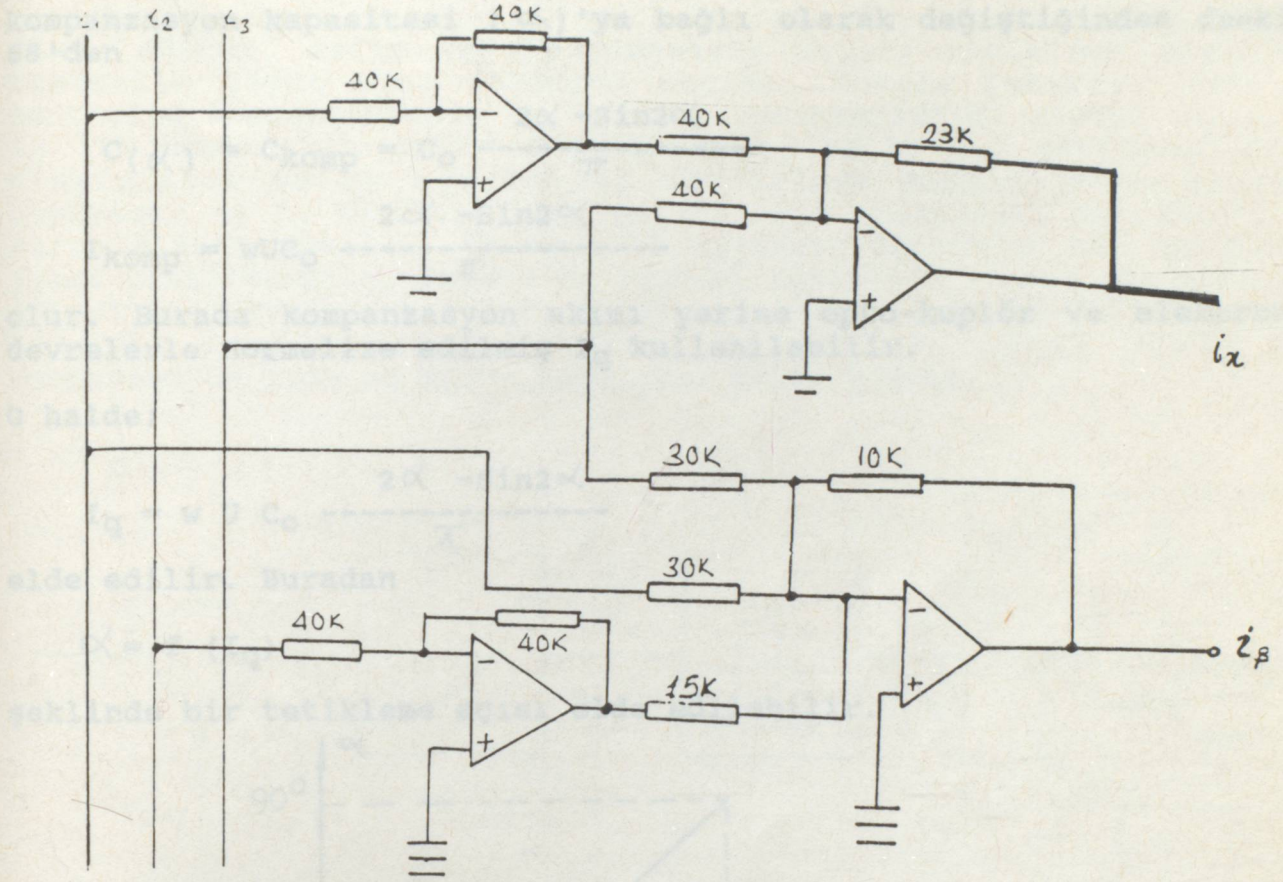
Kontrol büyüklüğü olarak faz arası akımlar alınarak elektronik bir sinyal haline getirilir. Bu işlem opto-kuplörler (Optik kuplajlı devreler) yardımıyla yapılır. Mesela; faz arası akımın maximum değeri;

$I_{\max} = 1500 \text{ A}$ iken 10 Volt'luk sinyal üretecek bir opto-kuplör devresi dizayn edilir.



$$\begin{aligned} 0 < i &< 1500 \text{ A} \\ 0 < u &< 5 \text{ V} \end{aligned}$$

Şekil-49: Bir akımın normlaştırılarak elektronik bir gerilim



Şekil-50: Üç fazlı fazlararası akımı iki bileşenli (dengeli ve dengesiz) sinyal sistemine dönüştüren elektronik devre

Denklem 69'dan

$$I_{komp} = \frac{U}{Z_C(\alpha)} = wU \cos(\alpha)$$

idi.

$$C_{komp} = \frac{I_q}{wU}$$

(3.52)

$$I_q = W U C_{komp}$$

kompanzasyon kapasitesi (α)'ya bağılı olarak değiştiğinden denklem 68'den

$$C(\alpha) = C_{komp} = C_0 \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$$

$$I_{komp} = w U C_0 \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$$

olur. Burada kompanzasyon akımı yerine opto-kuplör ve elektronik devrelerle normalize edilmiş I_q kullanılabilir.

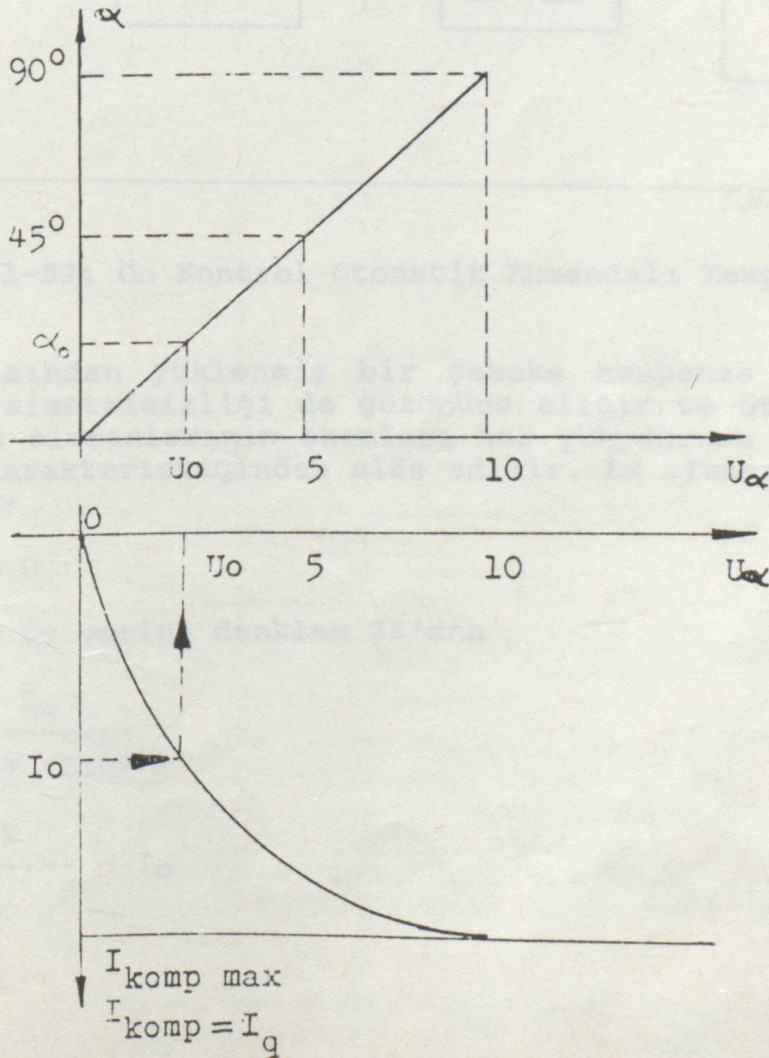
0 halde;

$$I_q = w U C_0 \frac{2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$$

elde edilir. Buradan

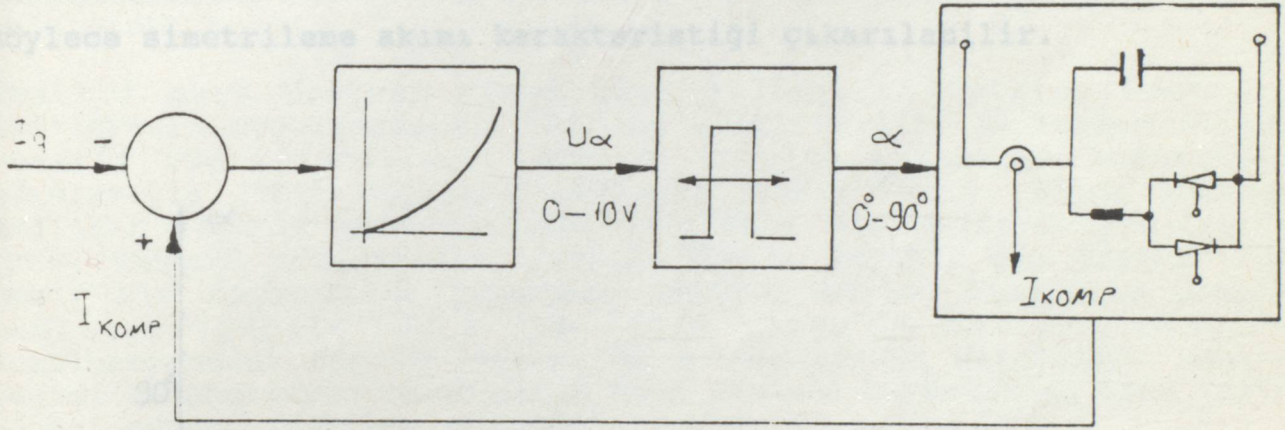
$$\alpha = f(I_q)$$

şeklinde bir tetikleme açısı elde edilebilir.



Şekil-51: Kompanzasyon akımında tetikleme açısına

Kompanzasyonun hassas olarak gerçekleştirilmesi işleminde kontrol çok önemli yer alır. Bir ön kontrol ile yapılan kompanzasyonda ön kontrol elemanları çekilen yük akımına göre kompanzasyon akımına tesir ederek, artıp veya azalmasıyla kıyıcı tetikleme açısından kontrolle büyük ayar imkanını sağlar. Mesela Şekil-52'deki ön kontrollu kompanzasyonda ön kontrol karakteristiği girişi I_{komp} ve I_q ile beslenerek endüktif yüklerde I_q belli bir tetikleme açısı oluşturacak ve bu açı kıyıcı devresinde kompanzasyon akımını büyütecek ve I_q küçülecektir. Bu iki akım arasındaki her farkta I_q sıfır olacak şekilde, ön kontrol karakteristiğinden bir tetikleme açısı üretilecektir. Burada ön kontrol eğrisinin lineer olmamasından dolayı bazı küçük hataları doğabilir. Bunları da çok küçük de olsa belirli kompanzasyon hataları oluşturur. Fakat basit bir kompanzasyon için bu küçük hataların önemi yoktur.



Şekil-52: Ön Kontrol Otomatik Kumandalı Kompanzasyon

Tek faz arasından yüklenmiş bir şebeke kompanze ediliyorsa, faz akımlarının simetrisizliği de gözönüne alınır ve örnekleme akımları ile L_s ve C_s elemanlarının akımları her yük durumu için belirli bir ön kontrol karakteristiğinden elde edilir. L_s elemanının simetrileme akımı I_s ise;

$$\omega L_s \cdot I_s = U$$

olur. Burada L_s yerine denklem 35'den

$$L_s = \frac{L_0 \pi}{n - 2\alpha - \sin 2\alpha}$$

$$\frac{U}{\omega L_0} = I_0$$

denirse;

$$I_s = \frac{U}{\omega L_s}$$

$$= U / \left[\omega \left(\frac{10 \cdot \pi}{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha} \right) \right]$$

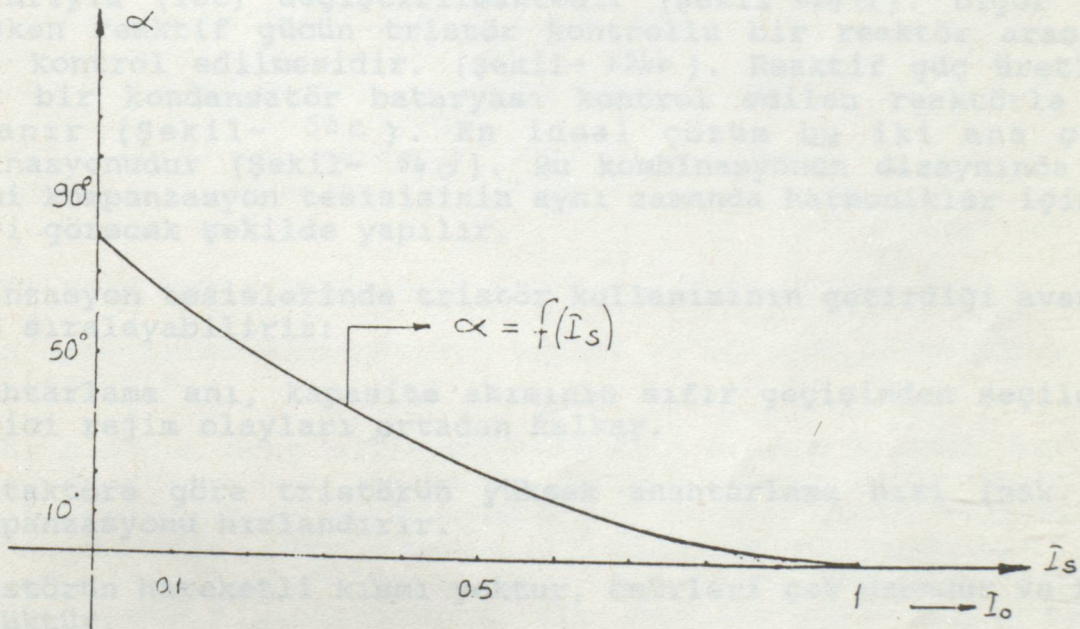
$$\frac{U (\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha)}{\omega L_0 \pi}$$

(3.52)

$$I_s = I_0 \frac{\pi - 2\alpha - \sin 2\alpha}{\pi}$$

elde edilir.

Böylece simetrileme akımı karakteristiği çıkarılabilir.



Şekil-53: Simetrileme Akımı (L_0 'a bağlı) Karakteristiği

Bunun gibi C_s elemanı için de ön kontrol karakteristiği verilebilir. Böylece dengesiz yüklü bir üç fazlı şebekede faz arası akımlar ön kontrol ile simetritilmiş olurlar. Kompanzasyonda süzgeç devreleri salınımları süzerek kararlı çalışma sağlanmış olur. Ayrıca kontrol üniteleri için gerekli gerilim ve akım sinyalleri opto-kuplörler ile sağlandığından kontrol ve tetikleme devreleri optik olarak güç kısmından yalıtılmış olur.

Böyle durumlarda yük akımı reaktif bir akım, I_{komp} ise kapasitif bir akım olduğundan yük yaklaşık omik akım gibi bir akım çeker. Dolayısıyla $\cos 1$ 'e yaklaşır.

BÖLÜM - 4

4.1. TRİSTÖR KONTROLLU KOMPAZASYON

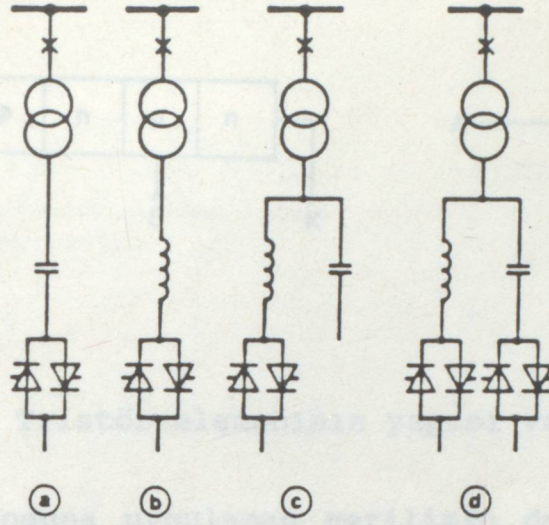
Şimdiye kadar sözettiğimiz kompanzasyon tesislerinde anahtar elemanı olarak kullanılan kontaktörlerle dengeli ve dengesiz yük değişimleri için kompanzasyonu sağlamak mümkündür. Ancak bu kompanzasyon yavaş olacaktır. Tristörlerin anahtar elemanı olarak kullanılmasıyla dengeli ve dengesiz yük değişimlerinde hızlı kompanzasyon sağlanır.

Özellikle hızlı değişen elektriksel olayların olduğu ark, endüksiyon fırınlarının bulunduğu tesislerde 1970'lerden itibaren tristör kullanım tekniği giderek gelişmiş ve tristör kontrollü şönt kompanzatorlar Statik VAR sistemi - SVS) endüstride kullanım olanağı bulmuştur.

Reaktif gücü kontrol etmek için kullanılan tristör kontrollü SVS'lerinin uygulanmasında iki ana çizgi vardır. Bunlardan birinde reaktif güç tristörlerle devreye sokulup çıkarılan kondansatör adımlarıyla (TSC) değiştirilmektedir (Şekil 54a). Diğer yöntemse değişken reaktif gücün tristör kontrollü bir reaktör aracılığıyla (TCR) kontrol edilmesidir. (Şekil- 54b). Reaktif güç üretimi için sabit bir kondansatör bataryası kontrol edilen reaktörle paralel bağlanır (Şekil- 54c). En ideal çözüm bu iki ana çizginin kombinasyonudur (Şekil- 54d). Bu kombinasyonun dizaynında reaktör seçimi kompanzasyon tesisinin aynı zamanda harmonikler için filtre görevi görecek şekilde yapılır.

Kompanzasyon tesislerinde tristör kullanımının getirdiği avantajları şöyle sıralayabiliriz:

- Anahtarlama anı, kapasite akımının sıfır geçişinden seçildiğinden geçici rejim olayları ortadan kalkar.
- Kontaktöre göre tristörün yüksek anahtarlama hızı (max. 20 ms) kompanzasyonu hızlandırır.
- Tristörün hareketli kısmı yoktur, ömürleri çok uzundur ve kayıplar küçüktür.
- Dengesiz yük harcamalarında (reaktif güç) tristör kullanımı çok daha iyi sonuç verir.



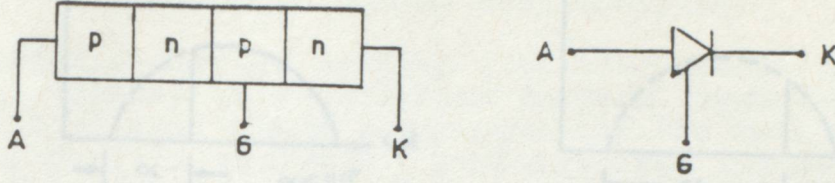
Şekil-54: Tristör kontrollü şönt kompanzasyon için (SVS) ana yollar

- a) Tristör anahtarlama kondansatör (TSC)
- b) Tristör kontrollü reaktör (TCR)
- c) Sabit bir kondansatör bataryasıyla kombineli tristör kontrollü reaktör (TCR/FC)
- d) Tristör kontrollü reaktörle kombineli tristör anahtarlama kondansatör (TSC/TCR)

Tristörlerle Kondansatörlerin Devreye Sokulup Çıkarılması

Burada önce tristör elemanının yapısı ve çalışma prensibinden kısaca sözedilecektir.

Tristör elemanı dört silisyum tabakadan oluşan üç uçlu bir p-n-p-n yapısıdır. Uçlar anot, katot ve kontrol elektrodudur (Şekil 54). Yarı iletken jonksiyonunda akım ancak p---n yönünde akabileceğinden anottan katoda akım akması ortadaki p tabakasının negatif taşıyıcılarla bastırılması sayesinde olur. Katot tarafındaki p tabakası kontrol elektrodundan bir yardımcı akım verilerek eleman iletime geçirilebilir.



Şekil-55: Tristör elemanın yapısı ve sembolik gösterilimi

Kontrol elektroduna uygulanan gerilimin değerine göre, elemanın iç yapısında iletme geçme kontrol edilerek elemanın istenilen zamanda tetiklenmesi sağlanır. Yani tristör kısaca, akım aktarabilme özelliği kontrol edilebilen bir diyot gibi davranır.

Alternatif akım devresinde elemanın iletme geçmesi anot-katot gerilimi $U_{ak} > 0$ ve yeterli kontrol gücüyle mümkün olduğundan, elemanın akım akıtabilmesi gerilimin pozitif yarı periyotlarında mümkündür. O halde tristör diyot gibi çalışacak fakat iletme geçmesi, kontrol işaretinin fonksiyonu olarak (α) açısı kadar gecikecektir. $\alpha = \omega \cdot t_1$ dir.

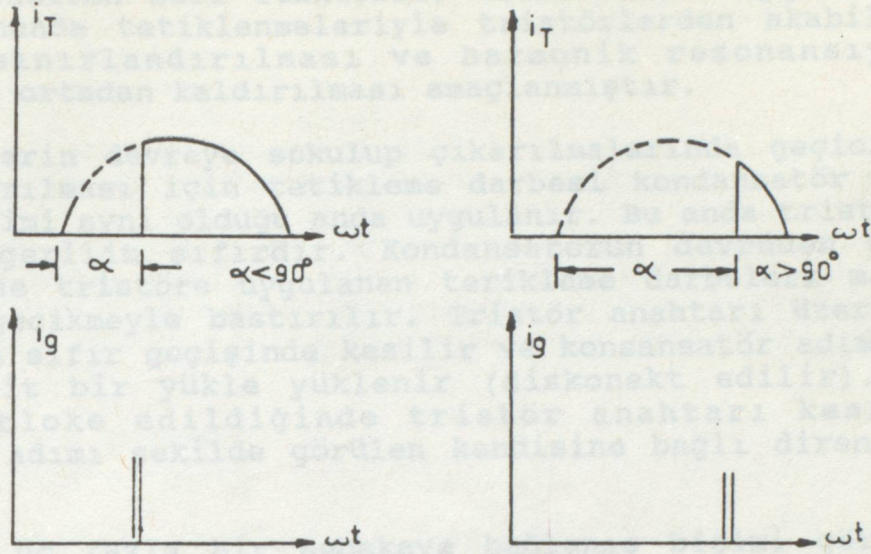
t_1 zamanında tetikleme işareti uygulanmaktadır. Tristörden akan akım, tristör karakteristik tutma akımı I_H değerinin altına düşünce eleman kesime geçer. Bu aynı zamanda tristör geriliminin de pratik olarak pozitif değerden sıfıra erişmesi demektir. Tristörlerin antiparalel bağlanmasıyla elemanın heriki alternansta da akım akıtabilmesi mümkündür.

Kontrol genellikle yatay tetiklemeyle yapılır. Burada tetikleme, fazı kaydırılabilen bir tetikleme darbesiyle sağlanır (Şekil-55). Tetikleme darbesinin yeri 0° ile 180° arasında değiştirilebilir. Seçilecek darbe, taşıdığı güç bakımından en küçük anot-katot geriliminde bile tristörü iletme geçirecek kadar büyük olmalıdır.

Şekil-57: Tristör Antiparalel Bağlanması

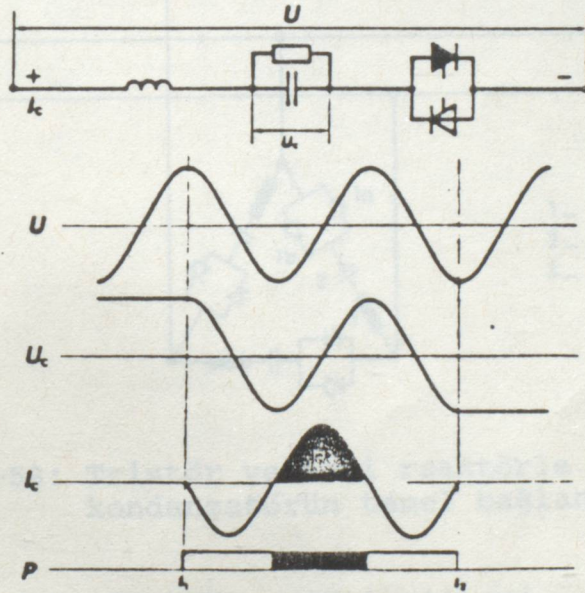
Çalışma Modu:

- U - Şebeke gerilimi
- U_G - Kontrol gerilimi
- I_G - Kontrol akımı
- P - Akım darbesi
- t_1 - Kontrol darbesi bağlama anı
- t_2 - Akım darbesi bağlama anı



Şekil-56: Yatay Tetikleme

Antiparalel tristörlerin kullanımıyla kondansatörler devreye sokulabilir ve çıkarılabilirler (Şekil-).



Şekil-57: Tristör Anahtarlamaalı Kapasitörün

Çalışma Modu:

- U - Şebeke gerilimi
- UC - Kondansatör gerilimi
- IC - Kondansatör akımı
- P - Ateşleme darbesi
- t₁ - Kond.ün devreye bağlanma anı
- t₂ - Kond.ün devreden çıkma anı

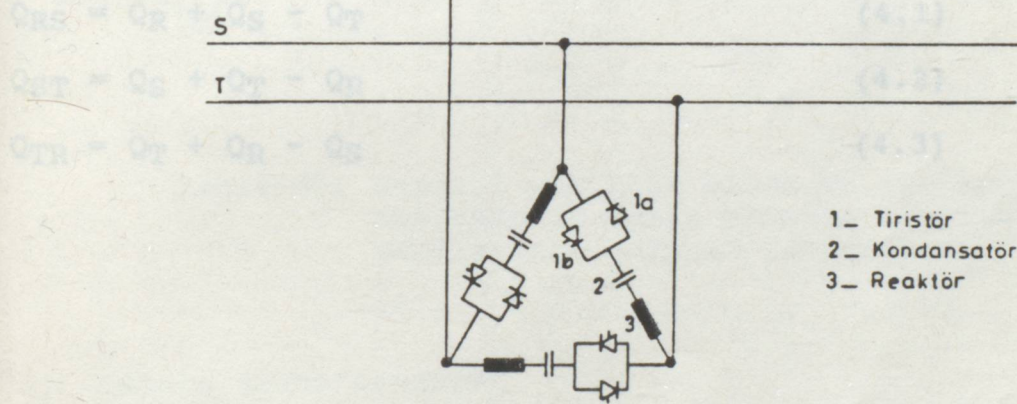
Devrede kullanılan seri reaktörle; tristörlerin uygun olmayan bir faz pozisyonunda tetiklenmeleriyle tristörlerden akabilecek büyük akımların sınırlandırılması ve harmonik rezonansıyla ilgili problemlerin ortadan kaldırılması amaçlanmıştır.

Kondansatörlerin devreye sokulup çıkarılmalarında geçici olayların minimumlaştırılması için tetikleme darbesi kondansatör gerilimiyle şebeke gerilimi aynı olduğu anda uygulanır. Bu anda tristör anahtarı üzerindeki gerilim sıfırdır. Kondansatörün devreden çıkarılması sırasında ise tristöre uygulanan terikleme darbeleri maksimum $1/2$ periyotluk gecikmeyle bastırılır. Tristör anahtarı üzerindeki akım daima akımın sıfır geçişinde kesilir ve kondansatör adımı gerilimin tepesine eşit bir yükte yüklenir (diskonekt edilir). Tetikleme darbeleri bloke edildiğinde tristör anahtarı kesimdedir ve kondansatör adımı şekilde görülen kendisine bağlı direnç üzerinden deşarj olur.

Şekil-58'de üç fazla bir şebekeye bağlantı biçimi görülmektedir. Anahtarlama süresi 50 Hz de 0-20 ms'dir.

Dengeli kompanzasyon için her faza eşit güçte kondansatör bağlanmalıdır.

Farklı fazlar için gerekli kompanzasyon güçleri:



Şekil-58: Tristör ve seri reaktörle üç fazlı kondansatörün temel bağlantı şekli

4.2. Reaktif Gücün Ölçümü ve Gösterilmesi

Üncü ayırtta sözedildiği gibi gerekli kondansatör gücü reaktif harcaması ölçülerek belirlenebilir. Reaktif güç hızlıysa ölçme sistemi kompanzasyon minimum gecikmeyle olacak şekilde tasarlanır. Magnetik alan değişimlerinin elektriksel işaret değişimlerine dönüştürülmesi prensibiyle çalışan Hall generatörleriyle böyle bir ölçme sistemi yapılabilir. Bu generatörler devreye Var'metre gibi bağlanırlar. Çıkış DC'dir. Bu DC işaretin seviye ve polarite reaktif gücü üzerine binmiş alternatif gerilim verir.

Reaktif güç harcaması iki tip gösterime ve ölçüme bağlıdır:

Dengeli Yükleme Durumu:

Toplam reaktif güç iki Varmetre gibi bağlanmış Hall generatörleriyle ölçülür ve çıkış sinyalleri toplanır (Şekil-50) Yük tam dengeliyse çıkış hiçbir AC bileşkesi içermez. Küçük bir dengesizlik varsa az bir süzmeyle çıkışta yine DC alınabilir. Ölçme sinyali seviye gösterme devresine verilir. Bunlar, bağlanacak kondansatör sayısını belirler. Seviye gösterme devresinden çıkan sinyal bir kontrol birimine gider. Bu ünite ise tam sıfır geçişinde bağlanmayı kontrol eder (Bölüm: 4.2).

Dengesiz Yükleme Durumu:

Üç fazlı dağıtım şebekeleri genellikle dengeli yükler için tasarlanır. Yani aktif ve reaktif güçler her üç fazda eşit dağılımlıdır. Dengesi bir yükleme durumunda tristör bağlantısı kondansatörleri devreye sokup çıkarır, böylece kompanzasyon ve üç fazlı şebeke dengelenir.

Farklı fazlar için gerekli kompanzasyon güçleri:

$$Q_{RS} = Q_R + Q_S - Q_T \quad (4.1)$$

$$Q_{ST} = Q_S + Q_T - Q_R \quad (4.2)$$

$$Q_{TR} = Q_T + Q_R - Q_S \quad (4.3)$$

1) Şebeke transformatoru

2) Yük

3) Hall generatörleri

4) Süzme devresi

5) Seviye gösterme devresi

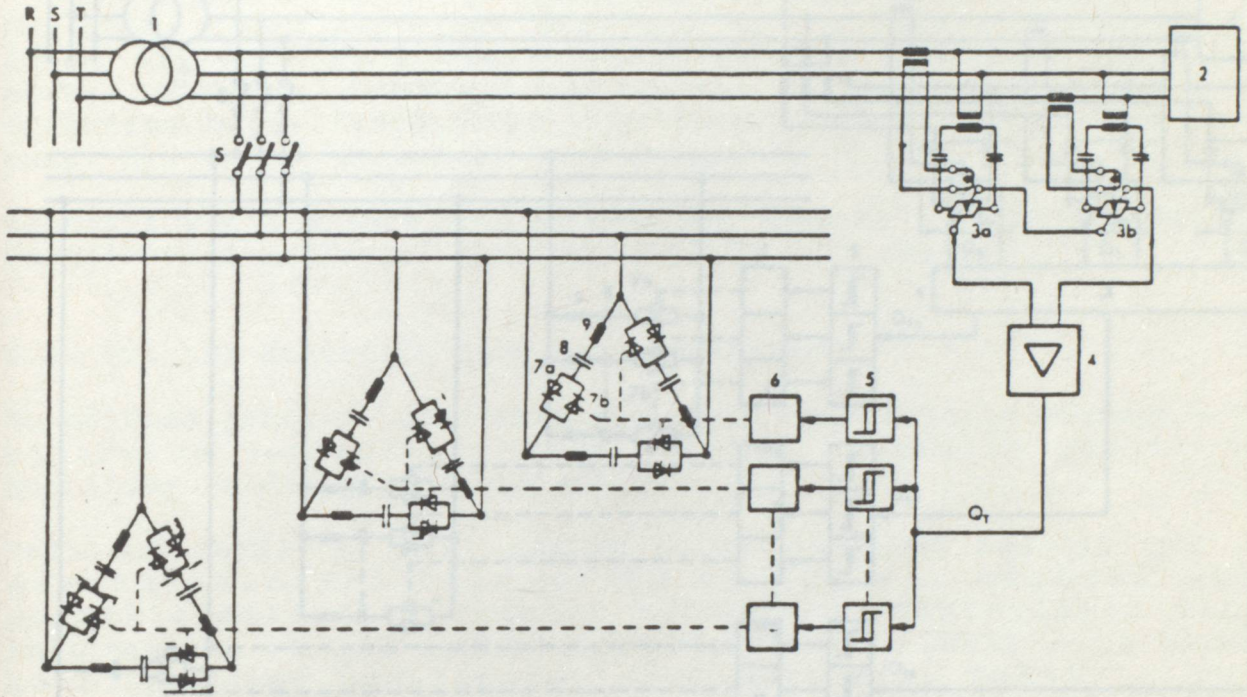
6) Kontrol ünitesi

7) Tristör

8) Kondansatör

9) Reaktif güç

10) Toplam reaktif güç



Şekil-59: Dengeli yük için ölçme ve gösterme aletleriyle birlikte üç fazlı tristör kontrollü kondansatör adımlarının şematik gösterilimi

- 1) Şebeke transformatörü
- 2) Yük
- 3) Hall generatörü
- 4) Kuvvetlendirici
- 5) Seviye gösterme devreleri
- 6) Kontrol ünitesi
- 7) Tristör
- 8) Kondansatör
- 9) Reaktör
- QT) Toplam reaktif güç

Burada Q_R , Q_S ve Q_T fazların reaktif gücü (her fazdan çekilen reaktif güç) Q_{RS} , Q_{ST} , Q_{TR} de fazlar için gerekli kompanzasyon güçleridir. Ölçme sistemi herbiri tek fazlı Varmetre gibi bağlanan üç aletten oluşur (Şeki-60).

Bunlardan çıkan sinyaller Q_{RS} , Q_{ST} ve Q_{TR} yukarıdaki denklemlerde ifade edildiği gibi oluşabilecek şekilde toplanır. Q_{RS} işareti seviye gösterme devreleri ve kontrol birimi aracılığıyla R ve S fazlarına bağlı kondansatörlerin devreye girip çıkmalarını kontrol eder. Q_{ST} ve Q_{TR} de benzer biçimdedir.

Dengesiz yük kompanze edildiğinde her fazdaki reaktif ve aktif akım dengelenmesi sağlanır. Akımlar üç fazda eşit dağılır.

4.3. Tristör Kontrollü Şönt Kompanzatörler:

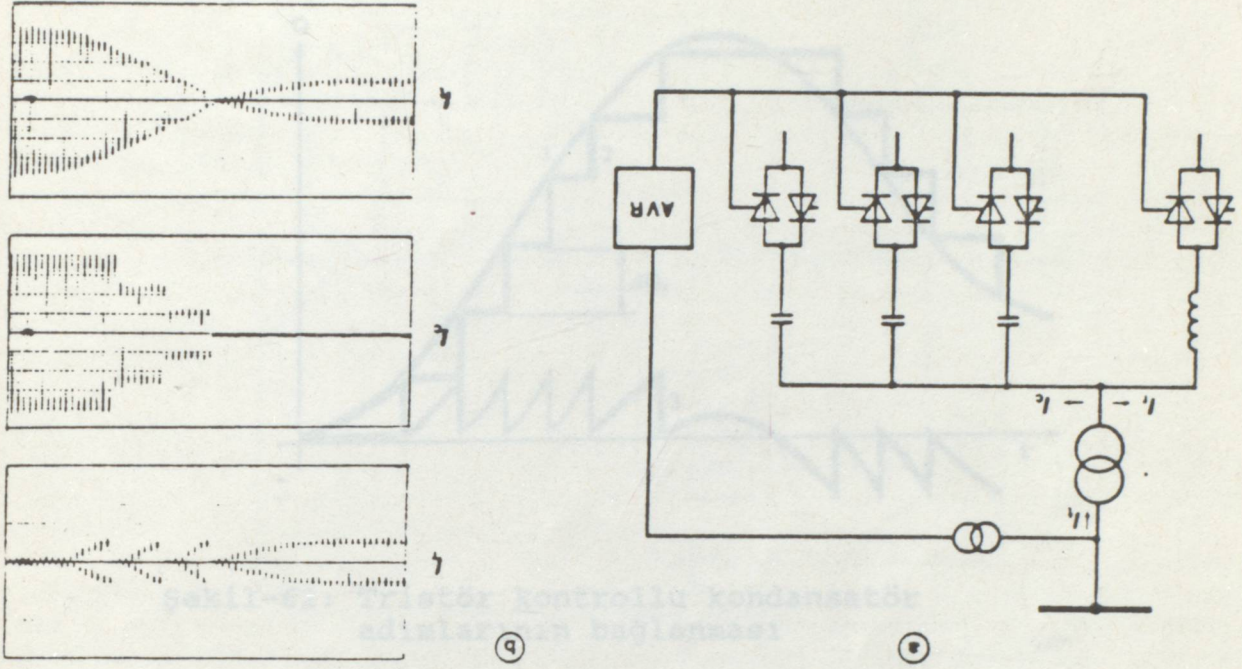
Bu bölümde Şekil-61'deki durumdan, yani tristörlerle devreye sokulup çıkarılan kondansatörlerle tristör kontrollü reaktörlerin kombinasyonundan sözedilebilecektir.

Yalnızca Şekil-61'deki sistem kullanıldığında reaktif güç uygun sayıda adımlara bölünmekte ve değişim adımsal olarak gerçekleşmektedir. Tristör kontrollü reaktörlerin sisteme katılmasıyla adımsız kontrol gerçekleştirilir. Şekil-62'de böyle bir kombinasyonun uygulanması görülmektedir. Şekil-63'de ise referanstaki yavaş bir değişimin sonucu görülmekte ve bu değişim maksimum endüktiften maksimum kapasitif kontrole doğru olmaktadır. Reaktör ve kondansatör adımları arasındaki kontrolün koordinesiyle tamamen adımsız bir kontrol elde etmek mümkündür.

Bu tür kombine bir sistemdeki reaktör gücü toplam kontrol edilebilir gücün küçük bir kısmını oluşturduğundan oluşan harmonikler temel akıma göre küçük olacaktır.

Tristör kontrollü reaktörlerin sistemde bulunmamasının doğuracağı sonuçları şöyle açıklamak mümkündür:

Reaktör kullanılmaması durumunda kompanzasyon tesisinden elde edilecek reaktif güç sürekli değil de adımlar halinde değiştirilebileceğinden üretilen ve harcanan reaktif güç arasındaki fark besleme şebekesini yükleyecektir.



Şekil-61: Tristör kontrollü reaktörle kombine olan TSC tipi bir statik kompanzasyon tesisi (TSC/TCR)

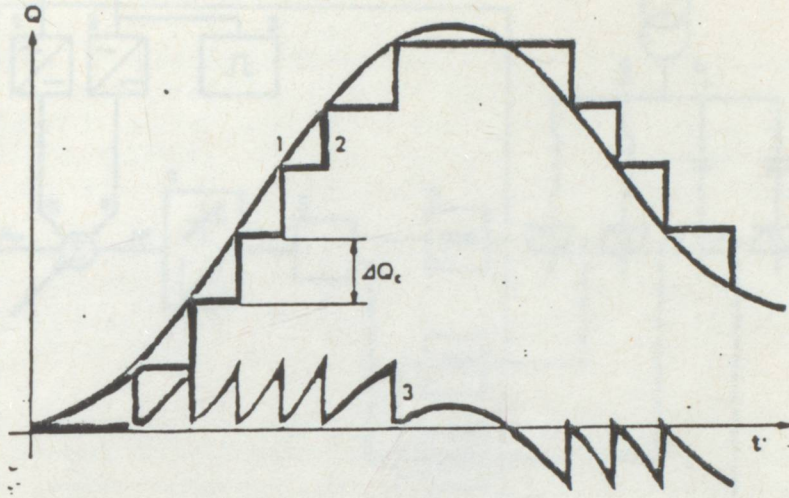
- a) Şematik diyagram
- b) Çalışma modu
- I_r) Reaktör akımı
- I_c) Kondansatör akımı
- I_t) Kompanzator akımı
- AVR) Otomatik gerilim regülatörü

Şekil 61 de ise şebekeden alınan reaktif gücün kompanzasyonu için bir örnek verilmiştir. Burada, oluşan gerilim değişimi hesaba katılmalıdır. Çünkü besleme şebekesinde bazı maksimum gerilim değişimlerine izin verilebileceği kritik bir nokta vardır. Özellikle insan gözü besleme gerilimindeki değişimlere karşı duyarlıdır. 2-8 Hz'de duyarlık maksimumdur. Göz gerilimdeki %0.3'lük bir değişimi algılar.

İzin verilen maksimum bağıl gerilim değişimi (U/U biliniyorsa, her bir üç fazlı kondansatör adımı için gerekli kondansatör gücü yaklaşık olarak:

$$Q_C = S_k \cdot U/U$$

$$(4.4)$$



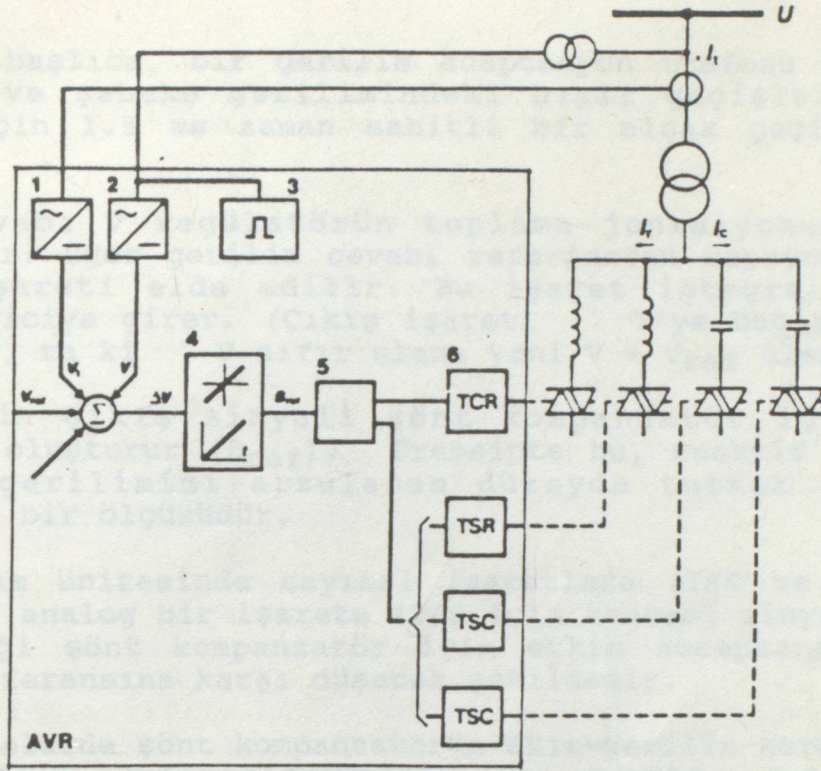
Şekil-62: Tristör kontrollu kondansatör adımlarının bağlanması

- 1) Yüken reaktif güç harcaması
- 2) Kondansatörün reaktif güç üretimi
- 3) Şebekenin bileşke reaktif gücü
- Q) Reaktif güç
- Q_C) Kondansatör adımlarının boyu

4.4. Kontrol Sistemleri:

Şekil- 63 de tristör kontrollu şönt kompanzasyonun kontrolüne ilişkin basit blok şema görülmektedir.

Her faz için bir tane olmak üzere gerilim trafolarıyla otomatik gerilim regülatörü (AVR) girişine gelen giriş sinyali buradaki bir çeviriciyle DC işarete dönüştürülür.



Şekil-63: Tristör kontrollu reaktör ile kombine biçimde TSC tipi tristör kontrollu bir şönt kompanzator (SVS) için kontrol sistemi

- 1-2) Sinyal çevirme birimi
- 3) Senkronizasyon birimi
- 4) Kontrol kuvvetlendiricisi birimi
- 5) Dağıtım birimi
- 6) Darbe üretici
- TCR) Tristör kontrollu reaktör
- TSR) Tristör anahtarlama reaktör
- TSC) Tristör anahtarlama kondansatör
- U) Şebeke gerilimi
- I_t) Toplam kompanzator akımı
- I_r) Toplam reaktör akımı
- I_c) Toplam kondansatör akımı
- AVR) Otomatik gerilim regülatörü

Dönüştürücü başlıca, bir gerilim adaptasyon trafosu bir 6 darbeli doğrultucu ve şebeke gerilimindeki hızlı geçişleri (transient) küçültmek için 1.5 ms zaman sabitli bir alçak geçiren filtreden oluşur.

Gerilim cevabı V regülatörün toplama jonksiyonunda V_{ref} ile karşılaştırır. Eğer gerilim cevabı referanstan sapıyorsa V kadar bir hata işareti elde edilir. Bu işaret integral alıcılı bir kuvvetlendiriciye girer. (Çıkış işareti V 'ye bağlı olarak artar ya da azalır, ta ki V sıfır olana yani $V = V_{ref}$ olana kadar).

Entegratörün çıkış sinyali şönt kompanzatör için suseptans referansını oluşturur (B_{ref}). Prensipde bu, reaktif güç üretimini ve şebeke gerilimini arzulanan düzeyde tutmak için gerekli absorsiyonun bir ölçüsüdür.

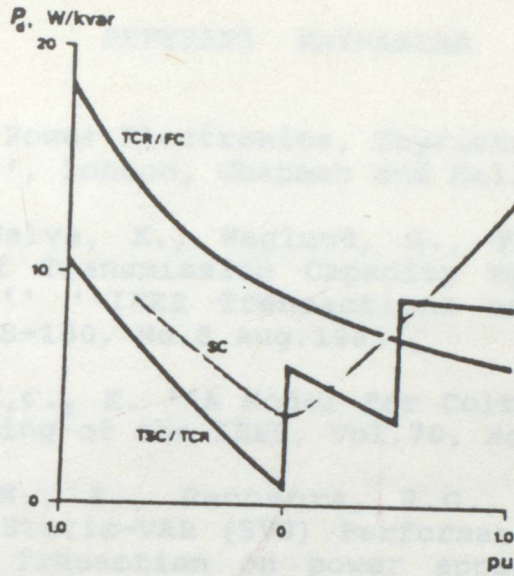
B_{ref} , dağıtım ünitesinde sayısal işaretlere (TSC ve TSR için) ve aynı zamanda analog bir işarete (TCR için kontrol sinyali) çevrilir. Bunun genliği şönt kompanzatör için etkin suseptansı tam olarak suseptans referansına karşı düşecek şekildedir.

Bazı uygulamalarda şönt kompanzatörün akım-gerilim karakteristiğinin belli bir eğimi olması istenebilir. Bu, şekilde gösterildiği gibi toplam akım I ye bir geri besleme vasıtasıyla elde edilebilir. Bu akım daha sonra bilinen akım trafolarıyla ölçülür ve bir işaret çeviricisinde DC akım trafolarıyla ölçülür. Bu işaret, endüktif ve kapasitif akımlar için farklı işaretlere sahip toplama jonksiyonuna gönderilir. Öyle ki endüktif ve kapasitif akımların durumlarına göre gerilim referansında bir artma (endüktif akım için) ve azalma (kapasitif akım için) karşı düşsün.

Kontrol sistemi aynı zamanda bir senkronizasyon birimi içerir. Bu da regülatör işaretlerinin o andaki durumunun belirlenmesi ve tetikleme darbelerinin tam gerekli anda uygulanmasını sağlar.

4.5. Kayıpların ve Güç Kullanma Kapasitelerinin İncelenmesi

Farklı tipte tristör kontrollü şönt kompanzatörlerin karşılaştırılmasında gözönünde bulundurulacak hususlardan biri de kayıplardır. Şekil: de dinamik kontrol aralığı için (tamamen endüktiften tamamen kapasitife geçiş aralığı) kayıplar görülmektedir. Aşağı yukarı tüm kontrol aralığı boyunca kombine bir sistemdeki kayıpların azlığı şekilden açıkça belli olmaktadır.



Şekil-64: Farklı tipte kompanzatörler için reaktif güç kayıplarının (P_d) değişimi (Sola doğru endüktif sağa doğru kapasitif). Kayıp eğrilerinde bir ara transformatörü de dahil edilmiştir.

- TCR/FC) Tristör kontrollü reaktör
(2pu) ve sabit kapasitör (1pu)
SC) Senkron kondansatör
TSC/TCR) Tristör anahtarlamalı kapasitör
(2x0.5 pu) ve tristör kontrollü
reaktör (2x0.5 pu)

Güç tristörlerinin hızlı teknik gelişimi, özellikle bunların güç kullanma kapasitesi açısından belli bir tristör vanası boyutu için daha çok kullanma olanağını vermektedir. Güç kullanma kapasitesindeki bu artış silisyum pul boyutundaki artmaya ve rated geriliminin artmasına bağlı olarak gerçekleşmektedir. Ayrıca diğer faktörler, örneğin geliştirilmiş üretim teknikleri ve daha etkin soğutma sistemleri bu gelişmeye önemli katkılarda bulunmuştur.

Yukarıda ana hatlarıyla incelediğimiz kompanzasyon tesislerinde tristör kullanımı oldukça ileri düzeyde bir teknolojiyi gerektirmesine ve kontrol sistemlerinin karmaşıklığına rağmen, özellikle hızlı reaktif güç değişimi gösteren tesislerde yadsınamayacak büyük avantajlar sağlamaktadır. Ülkemizde henüz bu tür kompanzasyon tesislerinin uygulaması görülmemekle beraber, yakın bir gelecekte yapımcı firmaların bu konuya eğilmeleri beklenmektedir.

REFERANS KAYNAKLAR

- 1- RAMSHAW, R.S. 'Power Electronics, Thyristor Controlled Power For Electric Motors'', London, Chapman and Hall 1973
- 2- OLWEGARD, A., Walve, K., Waglund, G., Frank, H., Torseng, S. 'Improvement of Transmission Capacity by Thyristor Controlled Reactive Power.' 'IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems, Vol. PAS-100, No.8 Aug.1981.
- 3- ZOHDY, AA.A, MAK,C., K. 'A Model for Voltage and Reactive Power Control' Proceeding of the IEEE, Vol.70, No.11., Nov.1982.
- 4- MC Granaghan, M., I., Reomora, R.G., Koeptinger, J., G., 'Simulation of Static-VAR (SVS) Performance a Transient Network Analyzer' IEEE Transaction on power apparatus on system, Vol. PAS-101, No.9 September. 1984.
- 5- Mc GRANAGHAN, M., F., RACOMARA, R.G., BALLEY, J.R. 'Design of a Generalized Static-VAR System Model for TNA Simulation' IEEE Transaction and Power Apparatus and System Vol, PAS-101, No.9 September 1982.
- 6- BYERLY, R.T., POZNANIYAK D.T. TYLOR E.R. 'Static Reactive Compensation for Power Transmission Systems' IEEE Transactions on Power Apparatus and Systems Vol, PAS-101, No.9 January 1982.
- 7- 'Reaktif Güç kompanzasyonu Seminer Notları' TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası, İSTANBUL şubesi 1983.
- 8- Torseng,S., 'Shunt-Connected Reactors and Capacitors Controlled by Thyristors'', IEEE Proc, Vol.128 November 1981.
- 9- ÇELTEKLİĞİL, U. 'Güç Elektroniği Devreleri Ders Notları' İTÜ Elektrik Fakültesi, İSTANBUL 1981.
- 10- Prof.Dr.Mustafa BAYRAK 'Güç Katsayısının Düzeltilmesi ve Güç Kondansatörleri).

ÖZGEÇMİŞ

1963 yılında Eynesil'de doğdum. İlk ve orta öğrenimimi Zonguldak'ta tamamladım. 1981 yılında Yıldız Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'ne girdim. 1985 yılında mezun olarak, aynı yıl aynı üniversitede Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Bölümünde yüksek lisans öğrenime başladım. Halen özel bir şirkette araştırma mühendisi olarak çalışmaktayım.

