

ENDÜSTRİYEL YÜKLERDEKİ  
REAKTİF GÜÇ İÇİN BİR KOMPANSATÖR

YÜKSEK LİSANS TEZİ  
(ELEKTRİK-ELEKTRONİK EĞİTİMİ)

Güngör BAL

Ağustos 1988

GAZİ ÜNİVERSİTESİ  
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

T. C.  
Yükseköğretim Kurulu  
Dokümantasyon Merkezi

Bu tezin Yüksek Lisans tezi olarak uygun olduğunu onaylarım.



Danışman

Prof.Dr.Doğan ÇALIKOĞLU

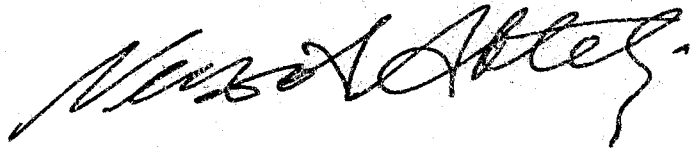
Sınav Jürisi

Başkan : Prof.Dr. Doğan ÇALIKOĞLU

Üye : Doç.Dr. Mirzahan HIZAL

Üye : Yrd.Doç.Dr. İsmail COŞKUN

Bu Tez Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Tez Yazım  
Esaslarına Uygundur.



T. C.  
Yükseköğretim Kurulu  
Dokümantasyon Merkezi

ENDÜSTRİYEL YÜKLERDEKİ  
REAKTİF GÜÇ İÇİN BİR KOMPANSATÖR  
(Yüksek Lisans Tezi)

Güngör BAL

GAZİ ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

Ağustos 1988

ÖZ

Reaktif güç isteği hızlı ve sürekli olarak değişen endüstriyel yüklerde, kademeli ayar yapan kompanseörler yetersiz kalmaktadır. Bu gibi yüklerin güç-katsayısının düzeltilmesinde statik tristör kontrollü kompanseörler kullanılmaktadır. Bu çalışmada, reaktif güç isteği hızlı ve sürekli olarak değişen yükler için sabit kondansatörlü-tristör kontrollü reaktör tipi bir kompanseör geliştirilmiştir. Bu kompanseör, yük akımının reaktif bileşenini esas alarak, reaktif güç kompanzasyonu sağlamaktadır. Kompenseör laboratuvar yüklerinde kullanılmış, hızlı ve sürekli bir kompanzasyon yaptığı görülmüştür.

A REACTIVE POWER COMPENSATOR

FOR INDUSTRIAL LOADS

(M.Sc.Thesis)

Güngör BAL

GAZI UNIVERSITY

INSTITUTE OF SCIENCE AND TECHNOLOGY

August 1988

ABSTRACT

Step compensators may be insufficient for industrial loads with fast and continuously changing reactive power. For improving the power factor of such loads, static thyristor controlled compensators are used. In this study, a thyristor controlled reactor with a fixed capacitor is designed for loads whose reactive power demands change rapidly and continuously. This compensator take into account the reactive component of current load and provides reactive power compensation. The compensator has been used on laboratory type loads, fast and continuous compensation has been observed.

## TEŞEKKÜR

Çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen sayın hocam ve tez danışmanım Prof.Dr.Doğan ÇALIKOĞLU'na, bütün çalışmalarımda yardımcı olan sayın hocam Dr.M.Emin GÜVEN'e, her zaman yardımlarını gördüğüm sayın hocam Yrd.Doç.Dr.İsmail COŞKUN'a ve Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma teşekkürlerimi sunarım.

## SEMBOLLER

<u>Sembol</u>	<u>Anlam</u>
P	Aktif güç (watt)
Q	Reaktif güç (VAr)
S	Görünür güç (VA)
$\theta$	Faz açısı (Derece)
I	Akım (Amper)
U	Gerilim (Volt)
$Q_c$	Kondansatör gücü (VAr)
C	Kondansatör kapasitesi
$I_y$	Yük akımı
$I_s$	Senkron Kompansatör akımı
$I_c$	Kondansatör akımı
$I_L$	Reaktör akımı
$I_k$	Kaynak akımı
$I_{L1}$	Reaktör akımının temel bileşeni
$I_{r(max)}$	Yükün en büyük reaktif akım bileşeni
$I_a$	Etkin akım
$I_r$	Reaktif akım
$\% P_k$	Güç kaybındaki yüzde azalma
Z	Empedans (ohm)
Y	Admitans (mho)
G	Kondiiktans (mho)
B	Süseptans (mho)

<u>Sembol</u>	<u>Anlam</u>
R	Omik direnç (ohm)
L	Endüktans (henry)
$\theta_y$	Yükün faz açısı
$\cos \theta_y$	Yükün güç-katsayısı
$\cos \theta$	Güç-katsayısı
$\alpha$	Tristör tetikleme açısı
$\omega$	Açısal hız (rad/s)
% $P_{kap}$	Yüzde olarak güç kapasitesi kazancı
$U_m$	Kaynak geriliminin tepe değeri

## İÇİNDEKİLER

ÖZ	II
ABSTRACT	III
TEŞEKKÜR	VI
SEMBOLLER	V

### BÖLÜM 1

#### GİRİŞ

1.1.Çalışmanın Tanıtımı	1
1.2.Reaktif Güç Kompanzasyonunun Tanımı ve İlkeleri	2
1.2.1.Alicıların Tek Tek Kompanzasyonu	4
1.2.2.Gurup Kompanzasyonu	4
1.2.3.Merkezi Kompanzasyon	5
1.2.4.Yük Kompanzasyonu	7
1.3.Reaktif Güç Kompanzasyonunun Yararları	9
1.4.Reaktif Güç Kompanzasyonu İle İlgili Yapılan Çalışmalar	13
1.5.Bu Tezde Yapılan Çalışmalar	14

### BÖLÜM 2

#### REAKTİF GÜÇ KOMPANSATÖRLERİ

2.1.Yarı İletken Alternatif Akım Ayarlayıcıları	16
2.2.Kademeli Reaktif Güç Kompansatörleri	19
2.2.1.Reaktif Güç Röleleri	19
2.2.2.Tristörlü Anahtarlama Kondansatörler	21
2.3.Kademesiz Reaktif Güç Kompansatörleri	23
2.3.1.Sabit Kondansatör-Tristörlü Kontrollü Reaktörler	23

2.3.2.Tristör Anahtarlamaalı Kondansatörler-Tristör	
Kontrollu Reaktörler	24
BÖLÜM 3	
SABİT KONDANSATÖR-TRİSTÖR KONTROLLU REAKTÖR TİPİ	
KOMPANSATÖR TASARIMI	
3.1.Sabit Kondansatör-Tristör Kontrollu Reaktör Tipi	
Kompansatörün Çalışma Prensipleri	26
3.2.Kontrol Devresinin Tasarımı	30
3.3.Kontrol Devresinin Gerçekleştirilmesi	33
BÖLÜM 4	
DENEYSEL SONUÇLAR VE ÇALIŞMANIN DEĞERLENDİRİLMESİ	
4.1.Kompansatörün Deneysel Sonuçları	41
4.2.Kademeli ve SK-TKR Tip Kompansatörlerin	
Karşılaştırılması	45
4.3.Çalışmanın Değerlendirilmesi	48
KAYNAKLAR	50
EK 1	
SABİT KONDANSATÖR-TRİSTÖR KONTROLLU REAKTÖR TİPİ	
KOMPANSATÖRÜN KONTROL DEVRESİ BLOK DİYAGRAMI	E1
ÖZGEÇMİŞ	

## BÖLÜM 1

### GİRİŞ

#### 1.1.Çalışmanın Tanıtımı

Bir güç sisteminin tasarımında, sistemin ekonomik, verimli ve emniyetli çalışmasına önem verilir. Sistemin güç-katsayısı bu unsurları doğrudan etkiler(1). Endüstriyel yükler kaynaktan aktif gücün yanında reaktif güç de çekerler. Reaktif gücün sebep olduğu olumsuz etkileri tamamen veya kısmen ortadan kaldırmak için güç kompanzasyonu yapan kompensatörler kullanılır.

Bu çalışmada, sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör tipi bir kompensatör tasarlanmış ve gerçekleştirilmiştir. Bu kompensatör, kapasitesi sabit tutulan bir kondansatör ile akımı kontrol edilebilen bir reaktörden ibarettir. Tristörlerin yardımı ile reaktör akımı gerekli olan değere ayarlanarak sistemin güç-katsayısı sürekli olarak ayarlanabilmektedir.

Güç kompanzasyonu yapan kompensatörlerde, gerekli kapasitif reaktif gücün tesbiti için yükün faz açısı veya yükün reaktif gücü dikkate alınmaktadır. Bu çalışmada ise, yükün faz açısı ile birlikte yük akımının büyüklüğü de dikkate alınarak gerekli reaktif akım bileşeni hesaplanmıştır. Böylece, yükün çektiği reaktif gücün karşılanması daha hassas olarak yapılabilmektedir.

Tasarlanan kompensatör laboratuvar yüklerinde kullanılmış,

T. C.

Yükseköğretim Kurulu  
Dokümantasyon Merkezi

hızlı ve sürekli kompanzasyon yaptığı görülmüştür.

Bu kompensatörün çok hızlı ve sürekli bir ayar yapabilmesi, özellikle ark fırınları gibi reaktif güç isteğinin hızlı ve sürekli değiştiği yüklerde, kademeli ayar yapan kompensatörlere nazaran tercih sebebi olmaktadır. Kademeli kondansatör bataryaları ve kontaktörleri bulunmaması da bu kompensatörün üstünlüğüdür.

## 1.2.Reaktif Güç Kompanzasyonunun Tanımı ve İlkeleri

Reaktif güç üretiminde; generatörler, senkron motorlar ve kondansatörler kullanılır(2). Şebeke gerilimi sabit kabul edilirse, kondansatörler şebekeden sabit kapasitif reaktif güç çekerler veya bağlandıkları noktada reaktif güç üretirler.Senkron motorlar ise uyartma şartlarına bağlı olarak reaktif güç alışverişi yapabilirler.

Reaktif gücün generatörler dışındaki araçlarla çok basit bir şekilde elde edilebilmesi, bu gücün ihtiyaç duyulan noktada üretilerek tüketiciden üreticiye kadar hatları, generatörleri, transformatörleri boş yere yüklememe fikrini doğurmuştur. Bu fikir doğrultusunda, endüstriyel yüklerin çektiği reaktif gücün istenmeyen etkilerinin ortadan kaldırılması için yapılan çalışmalara güç-katsayısının düzeltilmesi, reaktif gücün kompanzasyonu gibi çeşitli isimler verilmektedir(2).

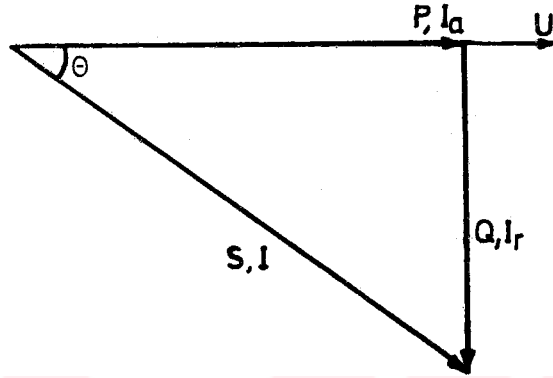
$$\text{Aktif güç, } P=UI\cos\theta \quad (1.1)$$

$$\text{Reaktif Güç, } Q=UI\sin\theta \quad (1.2)$$

Görünür güç,  $S=UI$

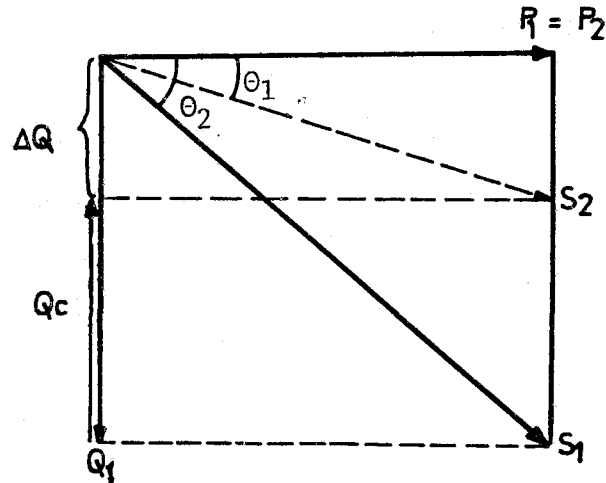
(1.3)

olmak üzere, şekil 1.1'de görüldüğü gibi aktif güç ile görünür güç arasındaki açının kosinüsüne güç-katsayısı denilmektedir.



Şekil 1.1. Güç üçgeni

Güç-katsayısının düzeltilmesinin vektörel açıklaması şekil 1.2' de görülmektedir. Faz açısı  $\theta_1$  kadar geri olan endüktif bir yükün reaktif gücünü  $\Delta Q$  değerine indirmek için kondansatörlerden yararlanılır. Kondansatörler alıcıya veya sisteme paralel olarak bağlanır. Paralel bağlanan bu kondansatörlere şönt kompanseörler denilir.



Şekil 1.2. Reaktif güç kompanseyonunun vektörel gösterilişi

Alicıya paralel bağlanacak kondansatörün gücü şekil 1.2'deki vektör diyagramından,

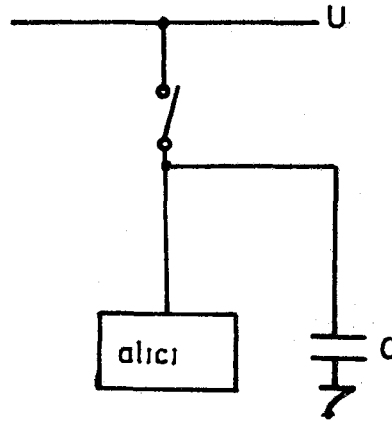
$$Q = P (\tan\theta_1 - \tan\theta_2) \quad (1.4)$$

olarak bulunur.

Reaktif güç kompanzasyonu; alıcıların tek tek kompanzasyonu, grup halinde kompanzasyonu ve alıcıların bir merkezden kompanzasyonu şeklinde yapılmaktadır.

#### 1.2.1. Alıcıların Tek Tek Kompanzasyonu

Şekil 1.3'de görüldüğü gibi, bu kompanzasyon çeşidinde her alıcıya tek tek uygun değerde kondansatör paralel bağlanır. Kondansatöre alıcı ile birlikte aynı şalter veya kontaktörden kumanda edilir. Bu tip kompanzasyon flüorasan lambalar ve sık sık devreye girip çıkmayan, sabit yüklü, büyük güçlü motorlarda kullanılır(3).

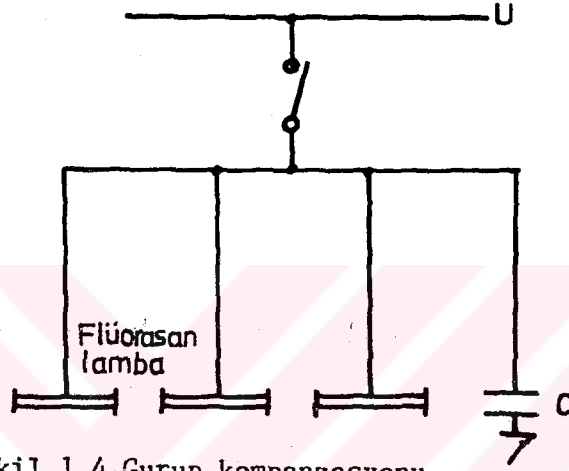


Şekil 1.3. Alıcıların tek tek kompanzasyonu

#### 1.2.2. Grup Kompanzasyonu

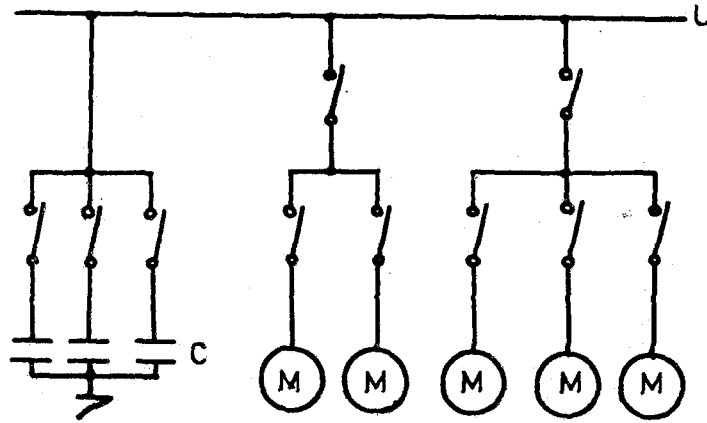
Aynı kontaktör veya şalter üzerinden devreye girip çıkan

motor, lamba ve transformatörler için müşterek kompanzasyon yapılabilir. Şekil 1.4'de görüldüğü gibi üç flüorasan lambaya gurup halinde kompanzasyon yapılmıştır. Kondansatörün gücü, guruptaki alıcıların toplam reaktif gücünü karşılayacak şekilde seçilir(3).



Şekil 1.4. Gurup kompanzasyonu

### 1.2.3. Merkezi Kompanzasyon



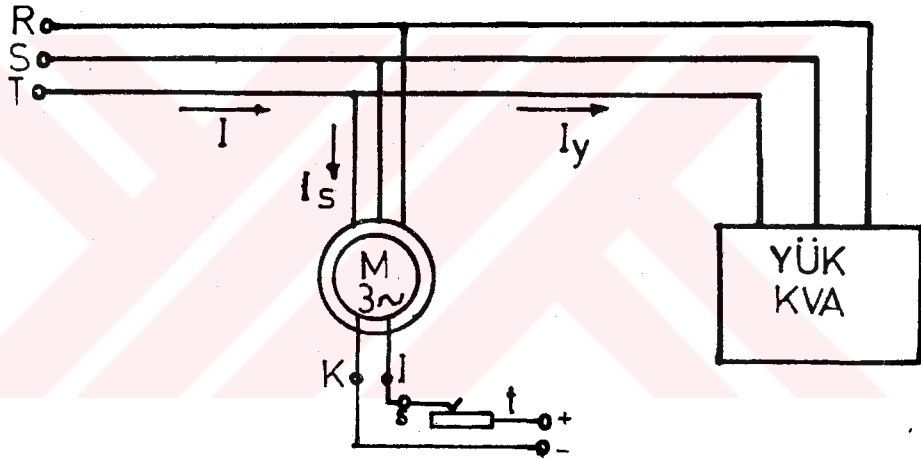
Şekil 1.5. Merkezi kompanzasyon

Bir tesiste çok sayıda motor veya reaktif güç çeken alıcı

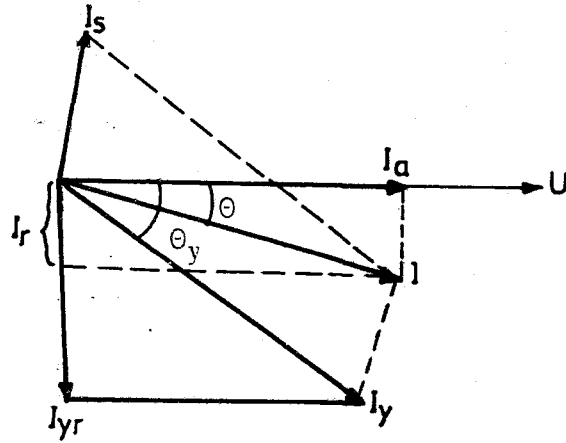
bulunuyor ve bu alıcılar çeşitli zamanlarda devreye girip çıkıyorlarsa merkezi kompanzasyona gidilir.

Bu kompanzasyon çeşidinde şekil 1.5' deki gibi kademeli çalışan kondansatör gurupları kullanılır. Kondansatör guruplarının kumandası el veya otomatik kumanda ile sağlanır(3).

Güç-katsayısının düzeltilmesi için senkron motorlar da kullanılır. Bu amaçla kullanılan motorlara senkron kompanstatör veya senkron kondansatör adı verilir(4). Şekil 1.6' da senkron kompanstatörün sisteme bağlantısı gösterilmiştir.



Şekil 1.6. Senkron kompanstatörün sisteme bağlanması

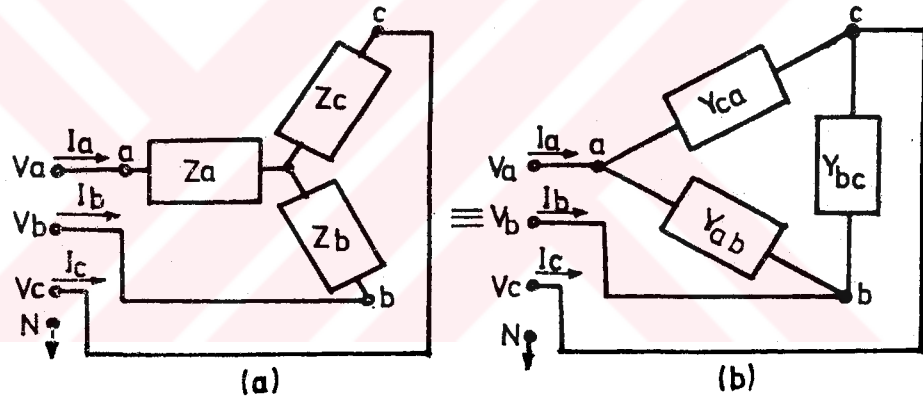


Şekil 1.7. Senkron kompanstatör ile güç-katsayısının düzeltilmesi vektör diyagramı

Şekil 1.7' den görüldüğü gibi,  $I_S$  senkron motor akımının ileriliği 90 dereceye yakındır. Önce  $I_y$  olan yük akımı, senkron motor bağlandıktan sonra  $I$  değerine, önce  $I_{yR}$  olan yükün reaktif akımı  $I_R$  değerine düşmüştür. Böylece, şebekenin yüke verdiği aktif güç çok az artarken reaktif güç azalmıştır.

#### 1.2.4.Yük Kompanzasyonu

Şönt kompasatörler güç-katsayısını düzeltmek için kullanılır. Yük kompanzasyonunda ise güç-katsayısı düzeltildiği gibi, çok-fazlı yükün dengelenmesi de yapılır(5).



Şekil 1.8.Üç-fazlı yıldız bağlı yükün  
(a) empedanslar ile  
(b) üçgen değerinin admitansları ile gösterilişi

Üç-fazlı, üç hatlı dengesiz bir yükün empedansları şekil 1.8.a'da  $Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$  olarak gösterilmiştir. Şebekenin faz gerilimleri

$$U_a=U, U_b=U.e^{-j2\pi/3}, U_c=U.e^{-j4\pi/3}$$

dür. Şekil 1.8.b'de ise yıldız bağlı yükün üçgen eşdeğeri gösterilmektedir.

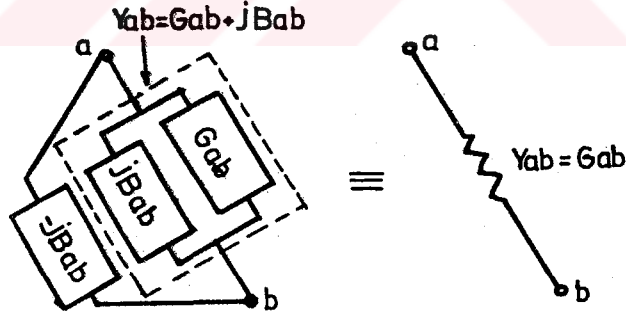
$Z_a$ ,  $Z_b$ ,  $Z_c$  empedansları veya  $Y_a$ ,  $Y_b$ ,  $Y_c$  admitansları genellikle zamanla değişik değerler alabilirler. Şekil 1.8.b'deki gibi üç-fazlı bir yükün her bir faz empedansı ayrı ayrı dengelenebilir.

Eğer  $Y_{ab}$  admitansı aktif ve reaktif bileşenlere sahip ise,

$$Y_{ab} = G_{ab} + jB_{ab} \quad (1.5)$$

olur. Şekil 1.9' dan görüldüğü gibi,  $-B_{ab}$  süseptansından faydalanılarak  $B_{ab}$  reaktif bileşeni ortadan kaldırılmaktadır.

Kompanzasyonun ikinci adımı olarak da her faz kondüktansı eşitlenmektedir. Şekil 1.10' dan görüldüğü gibi, b-c fazları arasına da  $B_{ca}^{(ab)} = -G_{ab}/\sqrt{3}$  süseptansları bağlanırsa kaynak üzerindeki yük dengeye gelir (üst yazı (ab) a ve b fazları arasındaki dengeleme süseptanslarını belirtmektedir).



Şekil 1.9.  $B_{ab}$  reaktif bileşeninin kompanzasyonu

Kullanılan kaynağın kompanzasyondan önceki akımları;

$$\begin{aligned} I_a &= 3V_a \cdot G_{ab} \cdot e^{j\pi/6} \\ I_b &= 3U_b \cdot G_{ab} \cdot e^{-j5\pi/6} \\ I_c &= 0 \end{aligned} \quad (1.6)$$

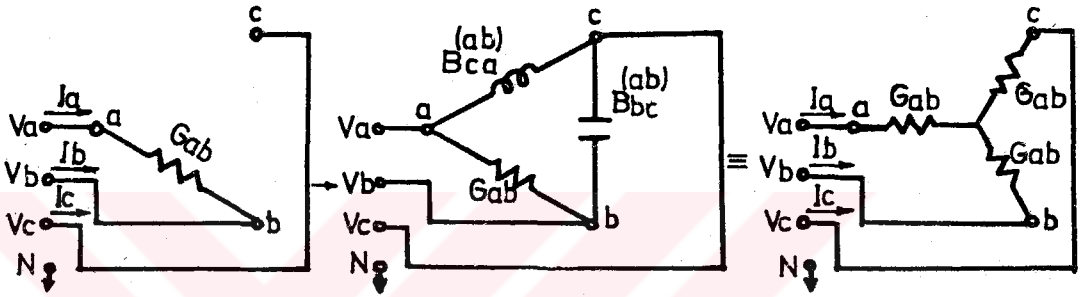
gibi dengesiz olduğu halde, kompanzasyondan sonraki akımları;

$$I_a = VG_{ab}$$

$$I_b = VG_{ab} \cdot e^{-j2\pi/3} \quad (1.7)$$

$$I_c = VG_{ab} \cdot e^{-j4\pi/3}$$

olarak dengelenmektedir.



Şekil 1.10. Bir fazlı omik yükün dengelenmesi

Böylece, yükün güç-katsayısı istenen ileri veya geri değerlere değiştirilebilir(5).

### 1.3.Reaktif Güç Kompanzasyonunun Yararları

Isınma kayıplarının azalması:

Direnci R olan hattın sonundaki faz gerilimi U, çekilen aktif güç P ve güç-katsayısı  $\cos\theta_1$  olsun. Üç-fazlı hat üzerindeki güç kaybı,

$$P_k = 3RI^2 \quad (1.8)$$

dir. Burada hat akımı,

$$I = \frac{P}{\sqrt{3} \cdot U \cdot \cos\theta_1} \quad (1.9)$$

olduğuna göre, kompanzasyonsuz durum için kayıp güç,

$$P_{k1} = \frac{R \cdot P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \theta_1} \quad (1.10)$$

olarak bulunur. Hattan çekilen gücün güç-katsayısı düzeltilerek  $\cos \theta_2$  yapılırsa, güç kaybı

$$P_{k2} = \frac{R \cdot P^2}{U^2 \cdot \cos^2 \theta_2} \quad (1.11)$$

olarak bulunur. Güç-katsayısı düzeltilmeden önceki kayba göre, g kaybındaki azalma yüzde olarak

$$\%P_k = \frac{100(P_{k1} - P_{k2})}{P_{k1}} \quad (1.12)$$

bulunur. Veya,

$$\%P_k = 100 \left( 1 - \frac{\cos^2 \theta_1}{\cos^2 \theta_2} \right) \quad (1.13)$$

olur.  $\%P_k$  hat kayıplarının g-katsayısına bağlı olarak nasıl değiştiğini vermektedir.

Tablo 1.1.  $\cos \theta_2 = 1$  yapılması halinde  $\cos \theta_1$  ile hat kayıpları arasındaki ilişki

Güç-katsayısı ( $\cos \theta_1$ )	$\%P_k$
1.0	0
0.9	19
0.8	36
0.7	51
0.6	64
0.5	75

Tam kompanzasyon yapılması halinde ( $\cos \theta_2 = 1$ ) yükün g-katsayısına bağlı olarak hat kayıplarının ne miktarda azalacağı, çeşitli güç-katsayıları için tablo 1.1'de verilmiştir.

Tesis elemanlarında kapasitenin artması:

Bir transformatörden beslenen şebekede transformatörün gücü sabit olduğuna göre güç-katsayısının  $\cos \theta_1$  olması halinde bir transformatörden çekilebilecek aktif güç,

$$P_1 = S \cdot \cos \theta_1 \quad (1.14)$$

dir. Güç-katsayısı  $\cos \theta_2$  ye yükseltirse çekilebilecek aktif güç,

$$P_2 = S \cdot \cos \theta_2 \quad (1.15)$$

olur. Kompanzasyon ile elde edilen kapasite kazancı yüzde olarak,

$$\%P_{\text{kap}} = 100 \left( \frac{P_2 - P_1}{P_1} \right) \quad (1.16)$$

veya,

$$\%P_{\text{kap}} = 100 \left( \frac{\cos \theta_2}{\cos \theta_1} - 1 \right) \quad (1.17)$$

şeklinde bulunur.

Bir tüketim merkezinin güç-katsayısını ortalama 0.7 kabul edip, bunun 0.9'a çıkarıldığı düşünüldüğünde transformatör kapasitesinde

$$\%P_{\text{kap}} = 100 \left( \frac{0.9}{0.7} - 1 \right) = 28,5$$

kadar bir artma sağlanmış olduğu görülür. Kablolar için de aynı miktarda fazla yüklenme imkanı sağlanacağı açıktır(2).

Gerilim düşümüne etkileri:

Aktif ve reaktif dirençleri olan bir hattın fazör diyagramı şekil 1.11'de verilmiştir.

Genellikle  $\delta$  açısının küçük olması nedeni ile,

$$U_1 = U_2 + \Delta U \quad (1.18)$$

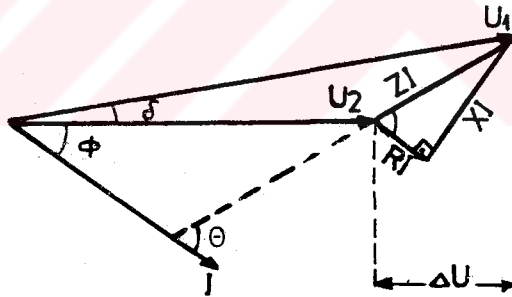
olarak alınır. Gerilim düşümü ise,

$$\Delta U = RI \cos \theta + XI \sin \theta \quad (1.19)$$

bağıntısı ile verilir. Hat üzerindeki kayıplar cinsinden ise gerilim düşümü,

$$\Delta U = p_k \frac{U}{\sqrt{3}} \cos^2 \theta + \frac{XP}{\sqrt{3}U} \tan \theta \quad (1.20)$$

olur. Burada,  $P$  hattın taşıdığı aktif gücün yüzdesi olarak güç kaybı,  $P$  hat sonundan alınan aktif güç,  $U$  hat sonu faz gerilimi,  $R$  hat direnci,  $X$  hat reaktansı ve  $\theta$  yükün faz açısıdır.



Şekil 1.11. Bir hattın gerilim düşümü fazör diyagramı

Eşitlik:1.20' den görüldüğü gibi hattın gerilim düşümü güç-katsayısı ile ilgilidir(2).

Yatırımlara etkisi:

Elektrik enerjisinin üretimi ve dağıtımı ile uğraşan kuruluşlar için reaktif enerjinin ihtiyaç duyulan yerde veya

ihtiyaç noktalarına yakın yerlerde üretilmesi hem ekonomik hem de teknik yönden önemli faydalar sağlamaktadır. Güç kompanzasyonu yapılarak kurulacak bir tesiste, alternatör ve transformatörlerin küçük değerlerde, iletkenlerin ince kesitte, kumanda-kontrol ve koruma cihazlarının daha küçük değerde seçilmesi sağlanmış olur. Sonuç olarak, imal edilen ürünün maliyeti azalır(2).

#### 1.4.Reaktif Güç Kompanzasyonu İle İlgili Yapılan Çalışmalar

Reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili ilk çalışmalar XX.yüzyılın başından itibaren başlamıştır. Endüstride kullanılan elektrik makinalarının hızla artması, elektriğin daha geniş sahalarda kullanılması ile her yüke göre kompanzasyon çeşitleri geliştirilmiştir.

İlk olarak, sabit kondansatör ünitelerinin kullanılmasına 1914 yılında başlanmıştır(1). O tarihlerde motor, lamba, transformatör gibi alıcılar kendilerine paralel bağlı kondansatörlerle tek tek kompanzasyon yapılmıştır.

Endüstrinin gelişmesiyle, çok sayıda motor veya endüktif yüklerin değişik zamanlarda devreye girip çıktığı tesisler kurulmuştur. Böyle tesislerde merkezi kompanzasyon kullanılarak güç kompanzasyonu başarılmıştır. Merkezi kompanzasyon için değişik değerlerde kondansatör guruplarından faydalanılmıştır. Bu tip kompanzasyonda sistemin isteğine göre, regler adı verilen bir röle gereken sayıda kondansatör ünitesini devreye sokup çıkarmaktadır. Dolayısıyla kademeli kompanzasyon sağlanmış olmaktadır(5). Yukarıdaki kompanzasyon çeşitlerinin kullanımı, reaktif güç isteği çok kısa zamanda değişen sistemlerde yetersiz

kalmıştır. Hızlı değişen yükler hat geriliminde dalgalanmalara sebep olur. Bu ise istenmeyen bir durumdur. Buna örnek olarak çelik ve metal endüstrisinde kullanılan ark fırınları ve haddehaneler gösterilebilir(6). Böyle yüklerde hızlı ve kademesiz kompanzasyona gerek duyulmaktadır. Bunun için senkron kompensatörler kullanılmıştır. Fakat senkron kompensatörler yavaş tepki sağladıkları için hızlı değişen yüklerde yetersiz kalmışlardır(1).

Yüksek güçlü tristörlerin (3000 amper) geliştirilmesiyle mekanik anahtarların yerini yarı iletken anahtarlar almaya başlamıştır(1). Anahtarlama işleminin en aza indirilmesi sistemin kararlılığını arttırmaktadır. Anahtarlama işleminde, hareketli olarak çalışan kontaktörler, röleler kullanılan dinamik kompensatörlerin yerine aynı işlemin yarı iletkenlerle yapıldığı statik kompensatörlerin kullanılmasına 1970 yılından itibaren başlanılmıştır(1). Günümüzde en çok statik kompensatörler kullanılmakta ve bu konuda yapılan çalışmalar sürmektedir.

#### 1.5.Bu Tezde Yapılan Çalışmalar

Hızlı değişen endüktif yüklerin kompanzasyonunda yavaş tepki sağlayan kompanzasyon sistemleri yeterli değildir. Yükün, hızlı değişen reaktif güç çekmesi hızlı kompanzasyon sistemlerinin kurulmasını zorunlu kılmaktadır.

Bu çalışmada statik kompensatörlerden sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör tipi üzerinde durulmuş ve yük akımının reaktif bileşenini kullanarak güç kompanzasyonu sağlayacak şekilde tasarlanmıştır. Aynı zamanda, sabit kondansatör

kullanılarak alıcıların sebep olacağı harmonikler de filtre edilmiş olmaktadır.

Bu çalışmada tristör kontrol ünitesi; işlemsel yükselteçler, karşılaştırıcılar, mantık geçitleri ve zamanlayıcı entegre devreleri ile gerçekleştirilmiştir. Bu elemanların çalışmaları mekanik rölelere ve kontaktörlere göre çok hızlıdır. Bundan dolayı da hızlı bir kontrol sağlayabilmektedir.

Buradan sonraki ikinci bölümde, reaktif güç kompensatörleri incelenmiştir. Üçüncü bölümde, sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktörün çalışma esasları ile tristör kontrol ünitesi açıklanmıştır. Dördüncü bölümde ise, geliştirilen kompensatörün değişik yük değerlerinde çalışması incelenmiştir. Bu bölümün sonunda elde edilen sonuçlar ve sonuçların değerlendirilmesi yer almıştır. Ek-1' de ise gerçekleştirilen kompensatör devresinin ayrıntılı bir şeması verilmiştir.

## BÖLÜM 2

### REAKTİF GÜÇ KOMPANSATÖRLERİ

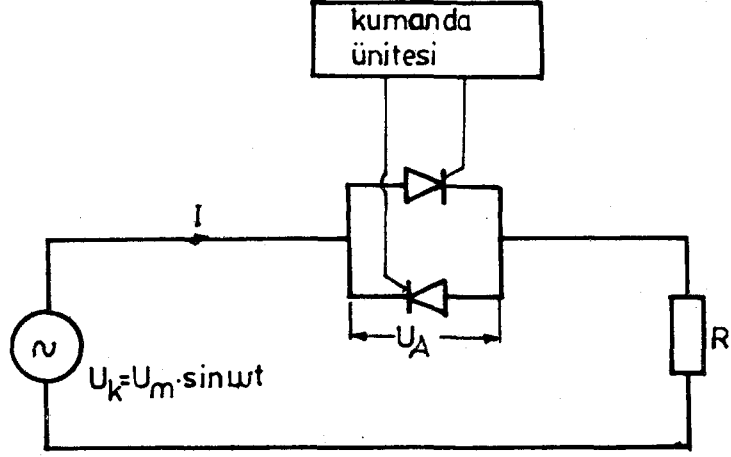
#### 2.1.Yarı İletken Alternatif Akım Ayarlayıcıları

Yarı iletken alternatif akım ayarlayıcısı olarak tristörler ve triyaklar kullanılmaktadır.

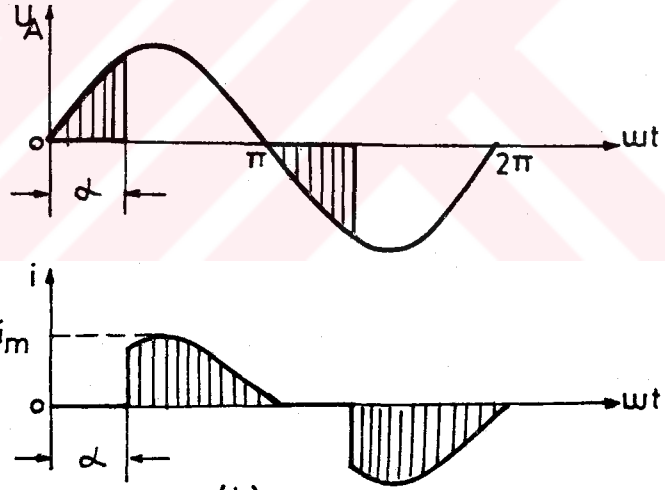
Triyaklar, ters paralel bağlanmış iki tristör gibi davranırlar. Bir tetikleme devresi ve soğutma devresi yeterlidir.Aynı kristal içinde iki ters paralel p-n-p-n zincirini gerçekleştirmek zor olduğundan, tristörler kadar büyük akım ve gerilimlerde imal edilemezler. Bugün için normal şebeke gerilimlerinde kullanılan triyaklarda 100 ampere erişilmiştir(7). Triyak tetikleme devresi palsları 100 mikro saniyeden kısa süreli ise omik yükler için tetikleme uygundur.Yük endüktif olduğu zaman bu tetikleme süresi, tristörü iletimde tutamayacaktır. Bu, yük akımının yükselme oranının çok düşük olmasındandır. Böylece, kısa geyt palslarında, triyağın sürme akımları triyağı iletimde tutamayacaktır. Bu problemi ortadan kaldırmak için uzun geyt palsları kullanılmalıdır(8,9). Bu durumda, triyak kullanılarak akım ayarı yapmak mümkün değildir. Endüktif yüklerde akım ayarı için triyak yerine ters paralel tristörlerin kullanılması daha uygun olmaktadır.

Ters paralel bağlı tristörlerle gerçekleştirilmiş bir faz akım ayarlayıcısı şekil 2.1.a'da görülmektedir. Kumanda

ünitesi, tristörlerin ayarlanabilen bir  $\alpha$  açısı kadar geç tetiklenmesini sağlamaktadır.



(a)



(b)

Şekil 2.1.(a) Omik yüklerde tristörlü faz kontrolü  
(b) Dalga şekilleri

Şekil 2.1.a'da yük bir dirençten ibarettir. Anot gerilimi  $u_A$  ve yük akımı  $i_y$  nin değişimi şekil 2.1.b'de görülmektedir. Tristörler tetiklenmeden önce anot gerilimi kaynak gerilimine eşittir ve devre akımı sıfırdır.  $\alpha = 0$  derecede tristörün birisinin

tetiklenmesi ile iletim başlar ve yük akımı, kaynak gerilimine bağlı olarak,

$$i = \frac{U_m}{R} \sin \omega t \quad (2.1)$$

şeklinde değişir. İletim yönündeki gerilim düşümü ihmal edilirse, anot gerilimi sıfır olur. Akımın negatif dalgası diğer tristörden geçerken de aynı durum tekrarlanır.  $\alpha$  açısının  $0^\circ$  ile  $180^\circ$  arasında değiştirilmesi suretiyle, yük akımı ve dolayısıyla güç akışı da sıfır ile maksimum değer arasında ayarlanabilir.

Çoğunlukla uygulamada yük, omik-endüktiftir. Böyle bir devrede, yük direnci R, endüktansı L, yük faz açısı  $\theta_y$ , tristör tetikleme açısı  $\alpha$  ise, yük akımının değişimi aşağıdaki bağıntı ile ifade edilebilir;

$$i_y = \frac{U_m}{\sqrt{R^2 + L^2}} \left[ \sin(\omega t - \theta_y) - \sin(\alpha - \theta_y) e^{-\frac{R}{\omega L}(\omega t - \alpha)} \right] \quad (2.2)$$

Akım, biri sinüsoidal, diğeri  $T=L/R$  zaman sabitine bağlı olarak sönen üstel olmak üzere iki bileşenden oluşmuştur.

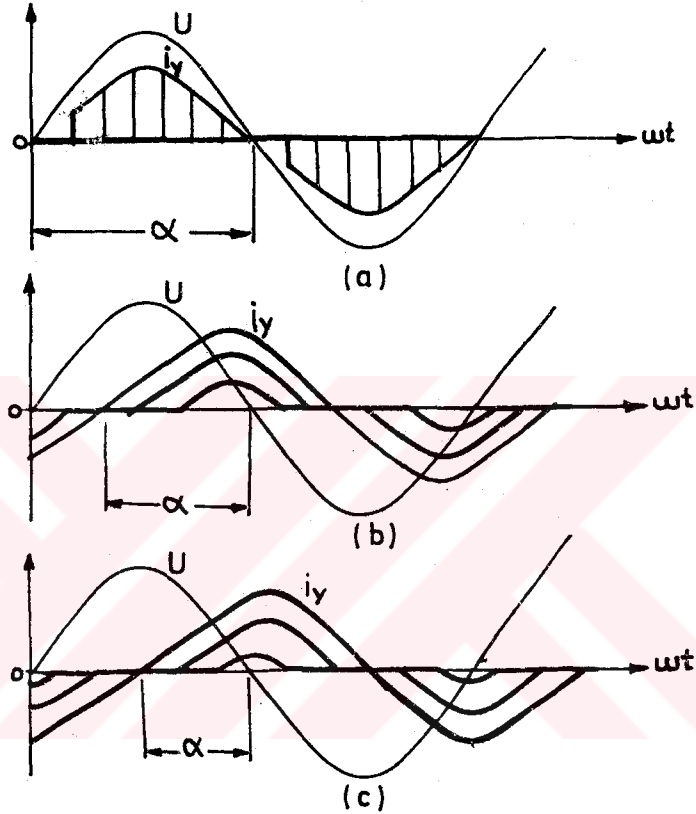
Yükün saf endüktif olması halinde eşitlik:2.2'de  $\theta_y = \pi/2$  ve  $R=0$  olur. Bu durumda yük akımının değişimi,

$$i_y = \frac{U_m}{\omega L} \left[ \sin\left(\omega t - \frac{\pi}{2}\right) - \sin\left(\alpha - \frac{\pi}{2}\right) \right] \quad (2.3)$$

olarak bulunur. Akım ile gerilim arasında  $90^\circ$  faz farkı bulunduğundan  $\alpha$  açısı ancak  $\pi/2$  ile  $\pi$  radyan arasında ayarlanabilir(7). Şekil 2.2' de yükün omik, omik-endüktif ve endüktif olması halinde, değişik  $\alpha$  açıları için akım değişimleri

görülmektedir.

Ters paralel bağlı tristörlerle akım kontrollu, statik reaktif güç kompensatörlerinde, indüksiyon motorlarında kullanılmaya elverişlidir(10).

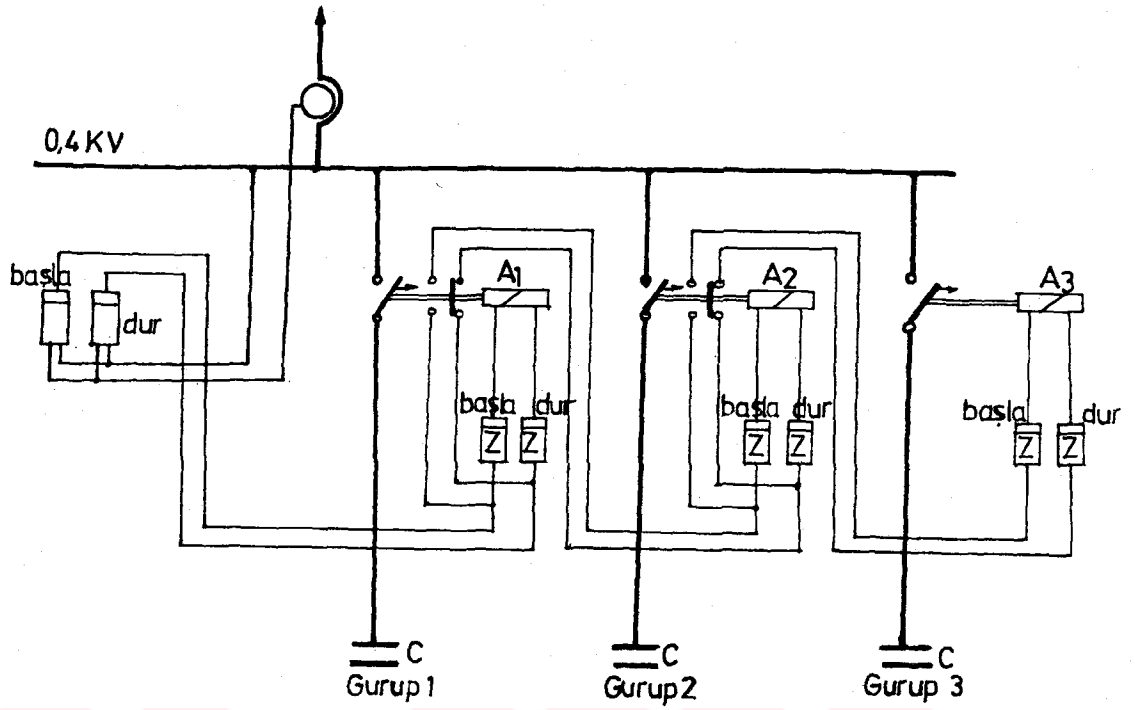


Şekil 2.2. Değişik  $\alpha$  açılarında yük akımının değişimi  
(a) Omik yük  
(b) Omik-endüktif yük  
(c) Endüktif yük

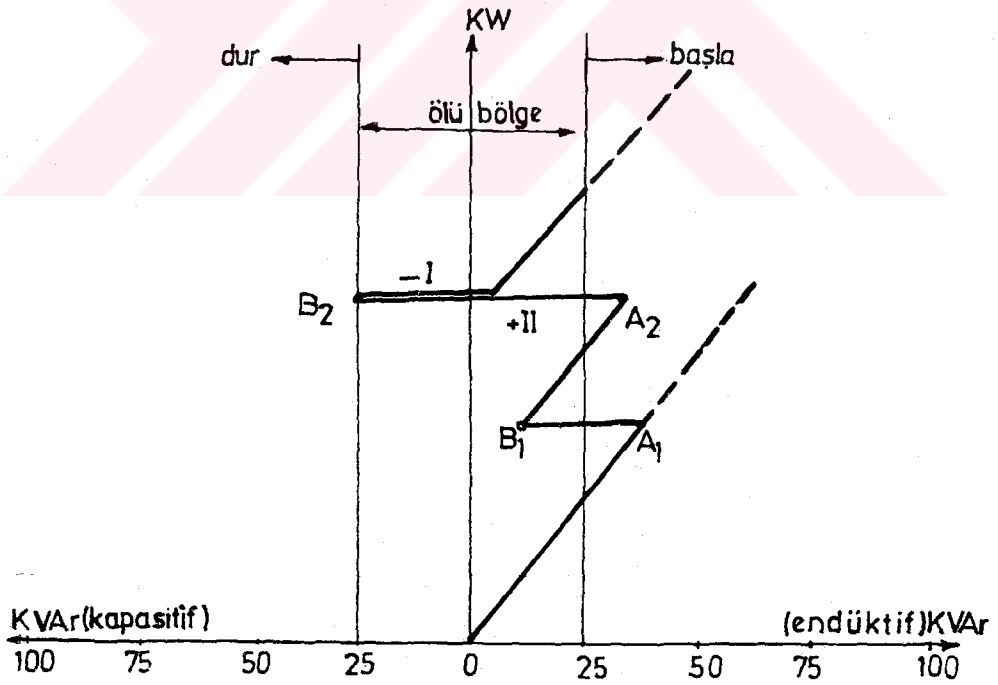
## 2.2. Kademeli Reaktif Güç Kompansatörleri

### 2.2.1. Reaktif Güç Röleleri

Reaktif güç rölesi ile kondansatör guruplarının otomatik kumandasının basit bir bağlantısı şekil 2.3'de verilmiştir. Bu



Şekil 2.3.Reaktif güç rölesi ile kondansatör gruplarının otomatik kumandası



Şekil 2.4.Reaktif güç rölesi ile kondansatör gruplarının otomatik kumanda ayar diyigramı

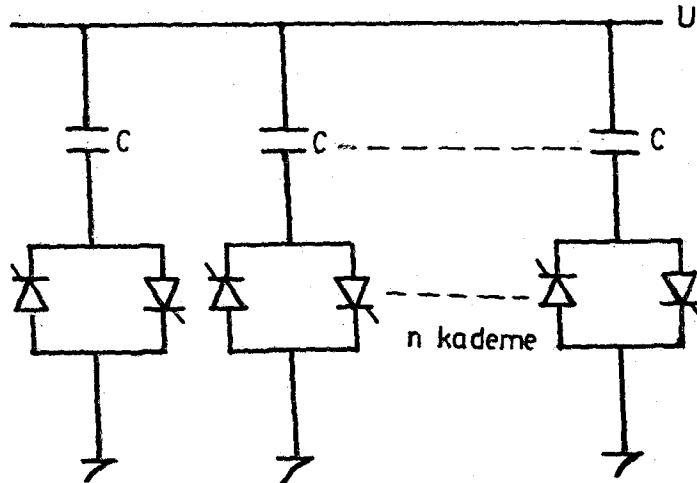
kompansatörlerde,sistemin reaktif güç isteğine göre kondansatör

gurupları kademeli olarak devreye sokulup çıkartılırlar. Şekil 2.3' de görüldüğü gibi, kontrol sinyalleri zaman geciktirme röleleri üzerinden anahtarların ve kontaktörlerin çalışma mekanizmalarına ulaşır. Bu gecikme elemanlarına, yük dalgalanmalarında sık sık açıp kapama olmasından korumak maksadı ile her kondansatör gurubu için gerek vardır(2).

Şekil 2.4'de kondansatör guruplarının otomatik kumandasının ayar diyagramı verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi, kompansatörün kararlı çalışması için ölü bir bölge seçilmiştir. Sistemin reaktif güç isteği bu ölü bölgenin dışına çıktığında gerekli kondansatör gurubu devreye sokulmaktadır. Ölü bölge içinde reaktif güç kontrolü mümkün değildir. Bu kompansatör yavaş tepki, kademeli bir kontrol sağlamakta olup, hızlı ve sürekli değişen endüstriyel yüklerde yetersiz kalmaktadır.

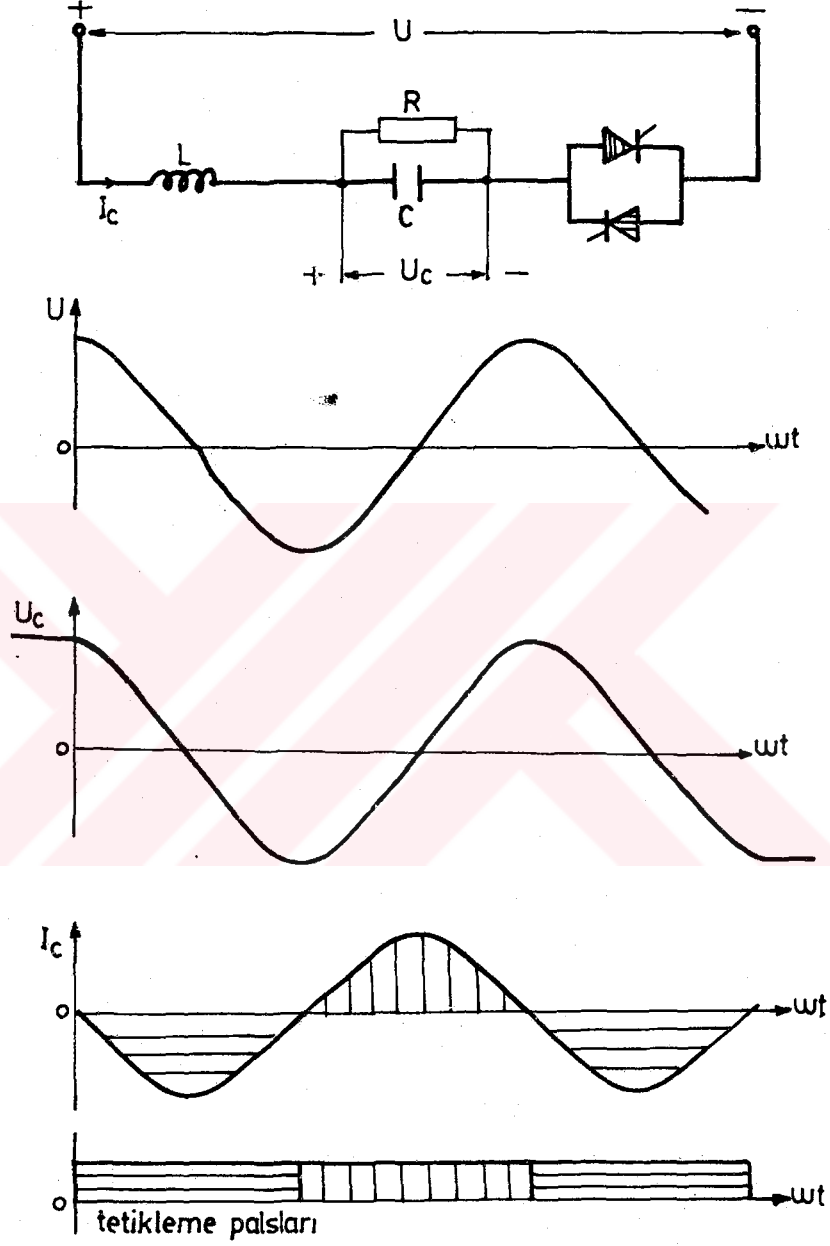
#### 2.2.2.Tristör Anahtarlmalı Kondansatörler

Bu tip kompansatörlerde, yüke paralel bağlanan kondansatör ünitesi şekil 2.5'deki gibi küçük kademelere ayrılır.



Şekil 2.5.Tristör anahtarlmalı kondansatörler

Tristörler vasıtasıyla her bir kondansatör gurubu ayrı ayrı devreye sokulur.



Şekil 2.6. Tristör anahtarlama kondansatörlerinin çalışma prensipleri

Şekil 2.6'daki gibi, kondansatöre uygun değerde bir reaktör seri bağlanır. Kondansatörün şarjsız veya ters şarjlı olduğu

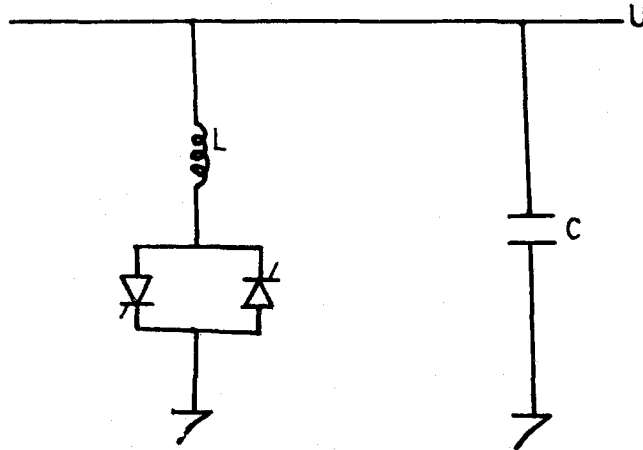
durumlarda, tristörlerden geçecek fazla akımı sınırlamak için seri reaktör bağlanır. Bu tip kompensatörün özellikleri şöyle sıralanabilir(11):

1. Kademeli kontrol sağlarlar
2. Harmonik üretmezler
3. Sadece kapasitif reaktif güç çekerler
4. Kayıplar çok düşüktür
5. Tepki süresi 10 milisaniyeye indirilebilir.

### 2.3.Kademesiz Reaktif Güç Kompensatörleri

#### 2.3.1.Sabit Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktörler

Şekil 2.7' de görüldüğü gibi bu kompensatör, sabit bir kondansatör ile paralel bağlı tristör kontrollü bir reaktörden oluşmuştur. Kondansatör ve reaktör değeri, sistemin en büyük reaktif güç isteğine göre seçilmektedir. Reaktör akımı, kendisine seri bağlı tristörlerin tetikleme açıları değiştirilerek kontrol edilmektedir.



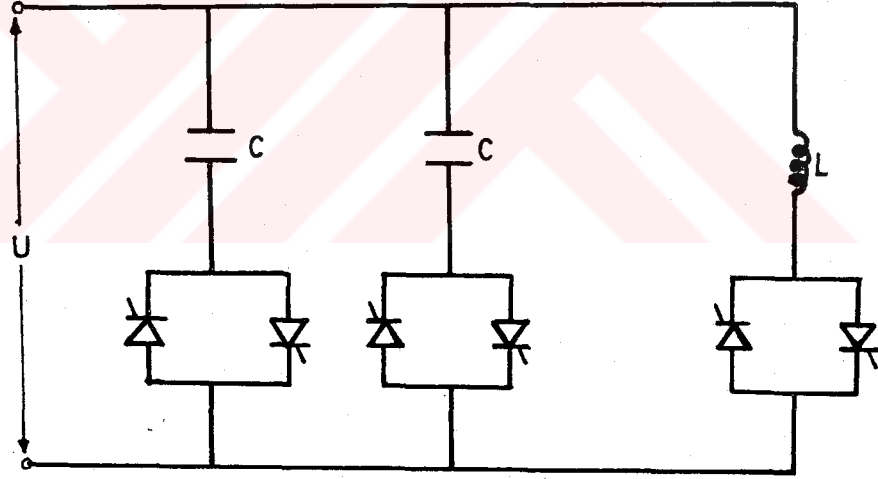
Şekil 2.7.Sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör

Tristör tetikleme açısı, sistem akımının reaktif bileşenine

göre tesbit edilmektedir. Reaktör akımının kontrolü, şekil 2.2.c'den de görüldüğü gibi tristörlerin tetikleme açısı  $\pi/2$  ile  $\pi$  radyan arasında değiştirilerek sağlanmaktadır. Bu kompensatörün çalışma prensipleri ve kontrol devresi üçüncü bölümde ayrıntılı olarak açıklanacaktır.

### 2.3.2. Tristör Anahtarlamaalı Kondansatörler-Tristör Kontrollü Reaktörler

Şekil 2.8'deki kompensatörün çalışması, sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör tipi kompensatöre çok benzerdir. Burada sabit kondansatör yerine tristör anahtarlamaalı kondansatörler kullanılmaktadır.



Şekil 2.8. Tristör anahtarlamaalı kondansatörler-tristör kontrollü reaktör

Bu kompensatörün kullanılmasıyla; kayıplar azaltılır, devamlı kontrol sağlanır, harmonikler çok az ortaya çıkar(11). Bu faydalar sağlanırken sistemin ilk kuruluş masraflarının da yüksek olacağı açıktır(11,12).

Bu bölümde kısaca açıklandığı gibi, her kompensatörün özellikleri birbirinden farklıdır.

Kademeli reaktif güç kompensatörleri, kademeli bir kontrol sağlamalarının yanısıra seçilen ölü bölge sınırları içinde kontrol sağlayamamaktadırlar. Ayrıca, her bir kondansatörün devreye girip çıkması esnasında şebekede gerilim salınımlarına sebep olmaktadır. Reaktif güç isteği hızlı ve sürekli değişen yüklerde yetersiz kalmaktadırlar. Bunlara karşılık güç kayıpları çok düşüktür.

Kademesiz reaktif güç kompensatörleri, sürekli ve hızlı kontrol sağlamaktadırlar. Bu tip kompensatörlerde, reaktörün iç direncinden dolayı tüketilen aktif güç, kademeli kompensatörlere göre fazladır. Bu tip kompensatörler, bütün yüklerde kullanıldığı gibi bilhassa harmonik üreten yüklerde kullanılmaya çok daha elverişlidir.

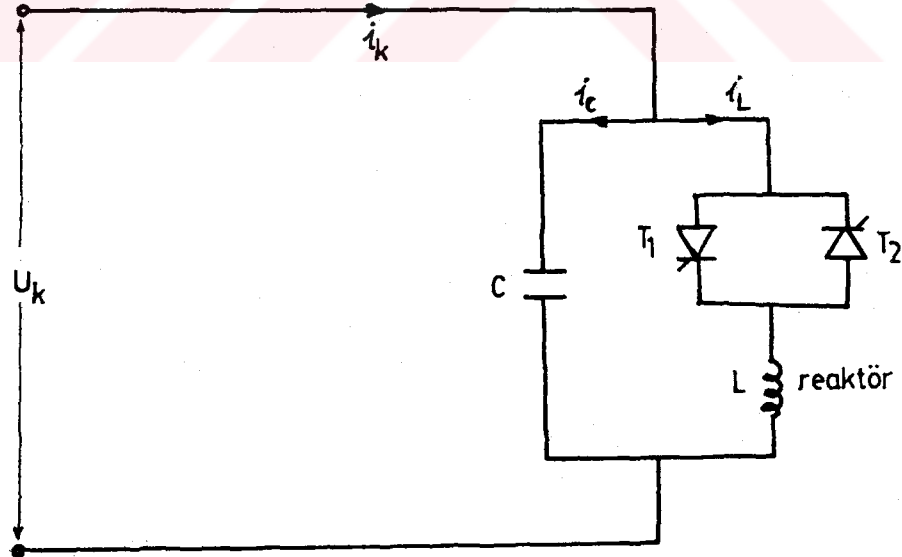
## BÖLÜM 3

### SABİT KONDANSATÖR-TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR TİPİ

#### KOMPANSATÖR TASARIMI

#### 3.1.Sabit Kondansatör-Tristör Kontrollü Reaktör Tipi Kompansatörün Çalışma Prensipleri

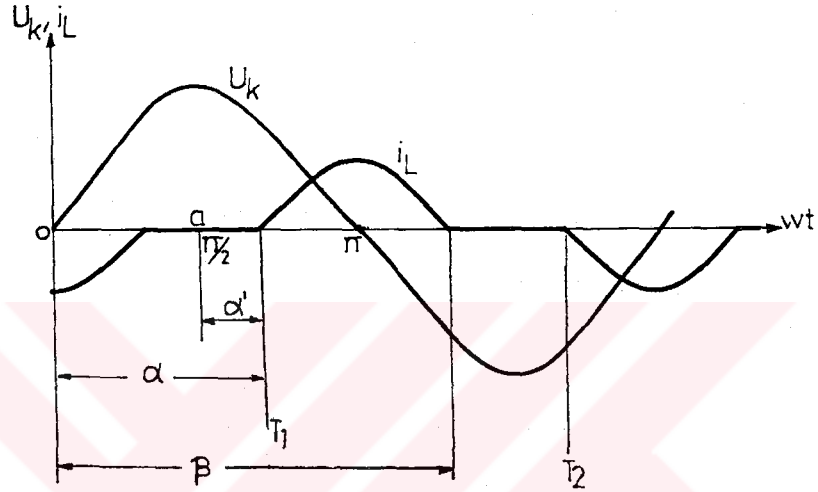
Tristör kontrollü reaktör ile paralel sabit bir kondansatörün temel bağlantı şeması şekil 3.1' de verilmiştir. Kondansatör kaynaktan sabit akım çektiğine göre, reaktöre seri bağlı tristörlerin iletim aralıklarının kontrol edilmesiyle, kaynaktan çekilen reaktif akım kontrol edilir(7).



Şekil 3.1.Sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör tipi kompansatör devresi

Kaynak gerilimi ve reaktör akımının dalga şekilleri, tristör

tetikleme açısı  $\alpha$  nın değişik değerleri için şekil 3.2' de gösterilmektedir.  $\alpha$  nın değişim bölgesi 90 ile 180 derece arasındadır.  $\alpha=90^\circ$  olduğunda reaktör akımı sinüsoidaldır ve gerilimden  $90^\circ$  geridedir.  $\alpha>90^\circ$  olduğunda ise bu akım tam sinüsoidal değildir.



Şekil 3.2. Kaynak gerilimi ve reaktör akımının dalga şekilleri

Kaynak gerilimi,

$$U_k = \sqrt{2} \cdot U \cdot \sin \omega t \quad (3.1)$$

olduğuna göre, reaktör akımının temel bileşeninin etkin değeri

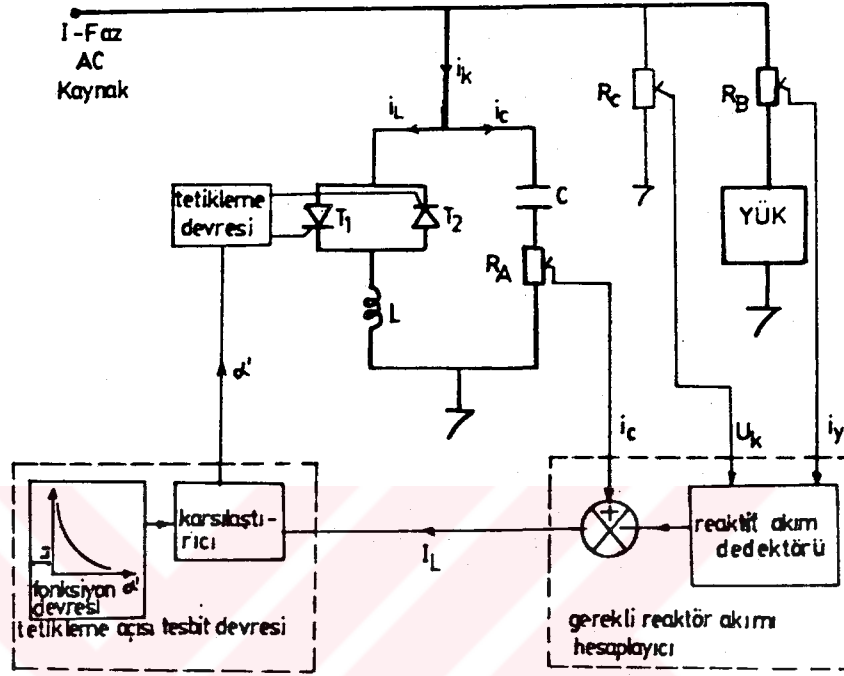
$$I_{L1} = \frac{U}{\pi \omega L} (2\pi - 2\alpha + \sin 2\alpha), \quad \pi/2 < \alpha < \pi \quad (3.2)$$

olur. Burada,  $U$  kaynak geriliminin etkin değeridir.  $I_{L1}$  akımı, reaktörün reaktansından dolayı daima  $90^\circ$  geridedir. Başlangıç açısını  $\omega t = \pi/2$  radyan olarak kabul etmek daha uygun olacaktır. Bu nokta şekil 3.2'de 'a' ile gösterilmiştir. Bu duruma göre yeni tetikleme açısı  $\alpha'$  ile gösterilerek,

$$\alpha = \alpha' + \pi/2$$

(3.3)

bağıntısı yazılır. Bu bağıntı eşitlik:3.2' de kullanılarak,



Şekil 3.3.Kompansatör ve kontrol ünitesi blok diyagramı

reaktör akımının temel bileşeninin etkin değeri,

$$I_{L1} = \frac{U}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha' - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha' \right) \quad (3.4)$$

olarak bulunur. Buradan, kompansatörün kaynaktan çektiği toplam akımın temel dalga bileşeninin büyüklüğü,

$$I_k = I_c - I_{L1}$$

den,

$$I_k = U \left| \omega C - \frac{1}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha' - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha' \right) \right| \quad (3.5)$$

olur. Burada C kondansatörün kapasitesidir. Eşitlik:3.5' den

görüldüğü gibi reaktör akımının temel bileşeninin kontrol edilmesiyle statik reaktörlü kompanseör, kaynaktan kapasitif veya endüktif bir akım çeker. Sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktör tipi kompanseörün, gerekli kompanzasyonu yapabilmesi için reaktör akımının kontrol edilmesi gereklidir. Reaktör akımı kendisine seri bağlı tristörlerin tetikleme açılarının değiştirilmesi ile kontrol edilebilir. Tetikleme açısının bulunması için ileri beslemeli kontrol sisteminden faydalanılmıştır. Bu sistem, statik reaktif güç kompanseörlerine kolaylıkla uygulanabilir(1).

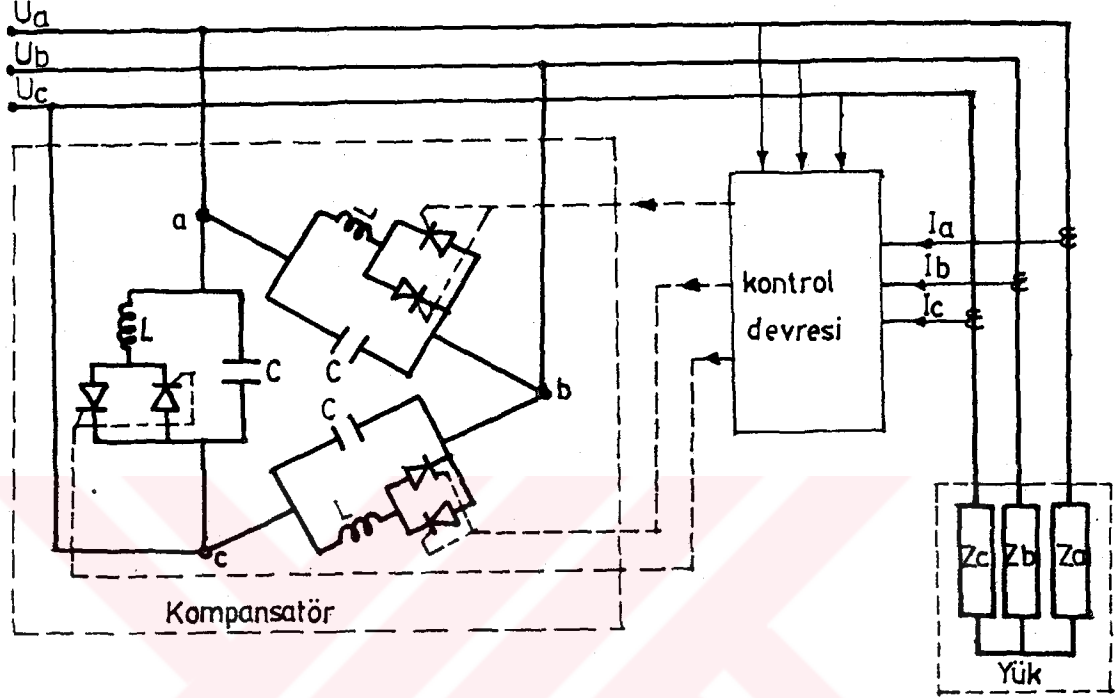
Bu açıklamalara bağlı olarak, bir fazlı yük için bir kompanseör geliştirilmiş ve bunun blok diyagramı şekil 3.3' de gösterilmiştir.  $U_k$  sistemin geriliminin,  $i_y$  yük akımının,  $i_c$  de kondansatör akımının ani değerleri olarak ölçülüp, bu değerler gerekli reaktör akımı hesaplayıcısı devresine uygulanır. Bu devrede yük akımının reaktif bileşeni ile kondansatör akımı arasındaki fark alınır. Bu fark akımı  $I_L$ , "tetikleme açısı tesbit devresine" uygulanır. Tetikleme açısı tesbit devresinde reaktör akımının temel bileşeni olan,

$$I_{L1} = \frac{U}{\omega L} \left( 1 - \frac{2}{\pi} \alpha' - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha' \right) \quad (3.6)$$

fonksiyonu elde edilmektedir. Bu fonksiyon ile  $I_L$  karşılaştırılarak tetikleme açısı  $\alpha'$  belirlenir. Bu  $\alpha'$  değeri tetikleme devresine aktarılır. Tetikleme devresi geyt palslarını üretir. Böylece tristörler  $\alpha'$  ne bağlı olarak tetiklenir.

Şekil 3.4'de ise ileri beslemeli kontrol kullanılarak üç-fazlı AC devrede reaktif güç kompanzasyonu şeması verilmiştir.

İleri beslemeli kontrol hızlı ve kararlı bir çalışma sağlamakta olup reaktif güç isteği hızlı değişen yüklerde reaktif güç kompanzasyonu için kullanılmaya elverişlidir(5).



Şekil 3.4. Sabit kondansatör-tristör kontrollü reaktörün üç-fazlı devreye bağlantısı

### 3.2. Kontrol Devresinin Tasarımı

Kontrol devresi, güç-katsayısının düzeltilebilmesi için gerekli olan reaktör akımını hesaplar ve reaktörden bu akımın çekilebilmesi için tristör tetikleme açısını belirler.

Gerekli reaktör akımı, yükün reaktif akım bileşenine göre hesaplanır. Yük akımının reaktif bileşeni şekil 3.5'den görüldüğü gibi,

$$I_r = I_y \cdot \sin\theta_y \quad (3.7)$$

dir. Bu reaktif bileşenin karşılanması, yüke paralel bağlanan bir

kondansatörün akımı ile sağlanır. Kondansatör akımı, yük akımının alabileceği en büyük reaktif bileşenine eşit olmalıdır. Buradan,

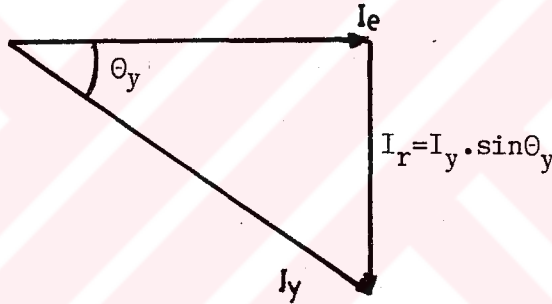
$$I_c = I_r(\max) \quad (3.8)$$

olur ve gerekli olan kondansatörün kapasitesi de

$$C = \frac{I_c}{\omega U} \quad (3.9)$$

olmaktadır.

Reaktör akımının alabileceği en büyük değeri de yükün faz açısının sıfır olduğu duruma göre belirlenir. Bu durumda reaktör



Şekil 3.5.Yük akımının bileşenleri

akımı, kondansatör akımını tamamen karşılaması gerekeceğinden

$$I_{L(\max)} = I_c \quad (3.10)$$

olmalıdır. Buradan reaktörün endüktansı,

$$L = \frac{U}{\omega \cdot I_{L(\max)}} \quad (3.11)$$

olur.

Sistemin güç-katsayısının bir olabilmesi için yükün herhangi

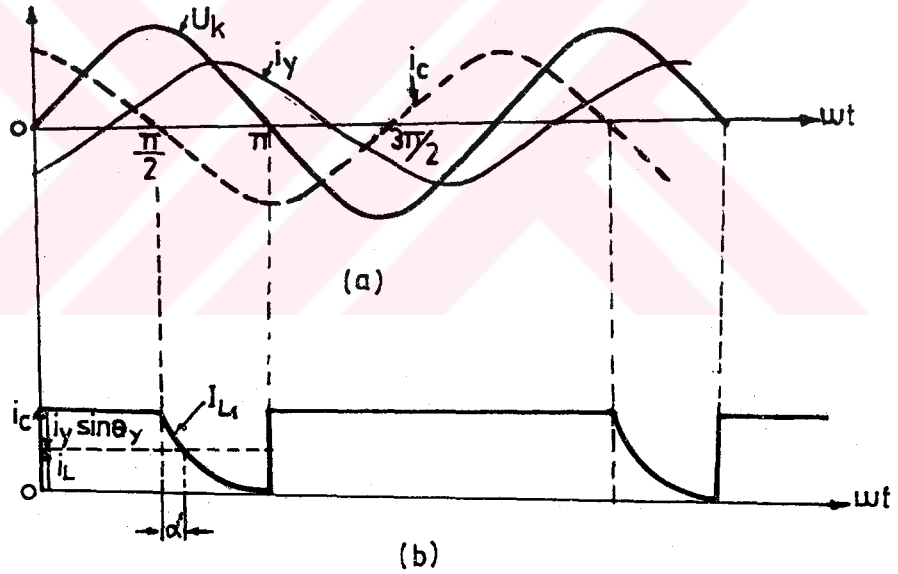
bir güç-katsayısındaki reaktif akım bileşeni,

$$I_y \cdot \sin\theta_y = I_c - I_L \quad (3.12)$$

olmalıdır. Buradan,

$$I_L = I_c - I_y \cdot \sin\theta_y \quad (3.13)$$

olarak bulunur. Hesaplanan bu gerekli reaktör akımına bağlı olarak reaktörün çekeceği akımın temel bileşeni kontrol edilir. Reaktör akımının temel bileşeni eşitlik:3.4' de tanımlanmıştır. Bu eşitlikte görüldüğü gibi reaktör akımının temel bileşeni sadece  $\alpha$ ' tetikleme açısına bağlıdır.



Şekil 3.6. Tetikleme açısının bulunması

Sistemin güç-katsayısının bir yapılabilmesi için hesaplanan gerekli reaktör akımı, reaktör akımının temel bileşenine eşit olmalıdır:

$$I_{L1} = I_L \quad (3.14)$$

$$I_L = \frac{U}{\omega L} \left(1 - \frac{2}{\pi} \alpha' - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha'\right) \quad (3.15)$$

$I_L$  ile  $I_{L1}$  in eşitlenmesi sadece  $\alpha'$  tetikleme açısının değiştirilmesi ile sağlanır.

Şekil 3.6.a'da gerilim sıfır fazlı olarak alındığında, yük ve kondansatör akımlarının değişimleri gösterilmiştir. Şekil 3.6.b'de ise, eşitlik:3.13'e göre hesaplanan gerekli reaktör akımının elde edilebilmesi için, eşitlik:3.4' deki fonksiyondan tetikleme açısının bulunması görülmektedir. Tetikleme açısının değişimi sıfır ile  $\pi/2$  radyan arasındadır.

### 3.3.Kontrol Devresinin Gerçekleştirilmesi

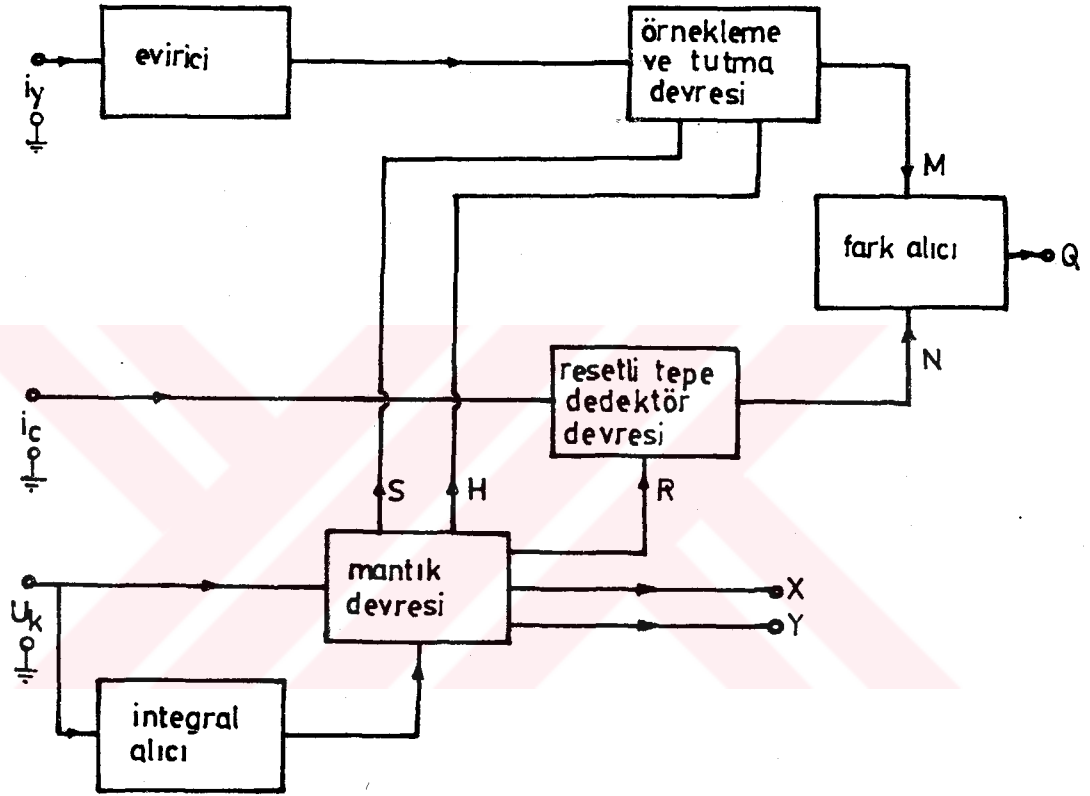
Şekil 3.3' deki kontrol ünitesinin ayrıntılı olarak açıklanması bu kısımda yapılacaktır.

Gerekli reaktör akımının hesaplanması:

Gerekli reaktör akımının değeri eşitlik:3.13'de verilmişti. Buradan görüldüğü gibi gerekli reaktör akımının hesaplanabilmesi için, yükün ve kondansatörün akımlarının ölçülmesi gerekmektedir. Bunun için şekil 3.3' de görüldüğü gibi  $R_A$  ve  $R_B$  sezici dirençleri kullanılmaktadır. Ayrıca yükün faz açısının tesbiti için de kaynak geriliminin ölçülmesi bir gerilim bölücü devre ile sağlanmıştır. Ölçülen bu büyükler, şekil 3.7'deki gerekli reaktör akımı hesaplayıcı devresinin girişleridir. Bu devrenin çeşitli noktalarındaki sinyallerin dalga şekilleri şekil 3.8' de gösterilmiştir.

$R_A$  direnci ile sezilen yük akımı bir evirici ile ters

çevrilip, örnekleme ve tutma devresine uygulanır. Bu devre mantık devresinden sağlanan S sinyalinin pozitif alternansı boyunca yük akımını örnekler. H sinyalinin pozitif alternansı boyunca ise yük akımının reaktif bileşenini tutar. Böylece yük akımının reaktif bileşenini veren M sinyali bulunmuş olur.

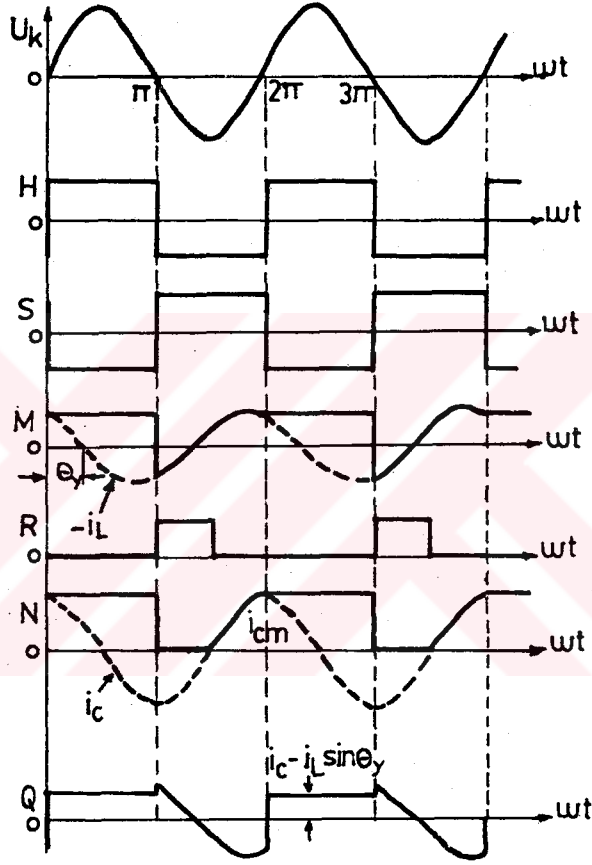


Şekil 3.7. Gerekli reaktör akımı hesaplayıcı devresi blok şeması

$R_B$  direnciyle sezilen kondansatör akımının her pozitif alternansındaki tepe değerini bulmak için resetli tepe dedektör devresi kullanılır. Bu devreye R sinyali girilerek, çıkıştan kondansatör akımının tepe değeri  $\Pi$  radyanlık sürede tutulmuş ve ölçülmüş olur (N sinyali).

Hesaplanan yük akımının reaktif bileşeni (M sinyali) ile

kondansatör akımının tepe değeri (N sinyali) bir fark alıcı devreye uygulanır. Fark alıcı devrede 0.707 kazancı da kullanılarak, bu iki akım arasındaki farkın etkin değeri (Q sinyali) bulunmuş olur. Bulunan bu fark akımı, gerekli reaktör akımıdır.

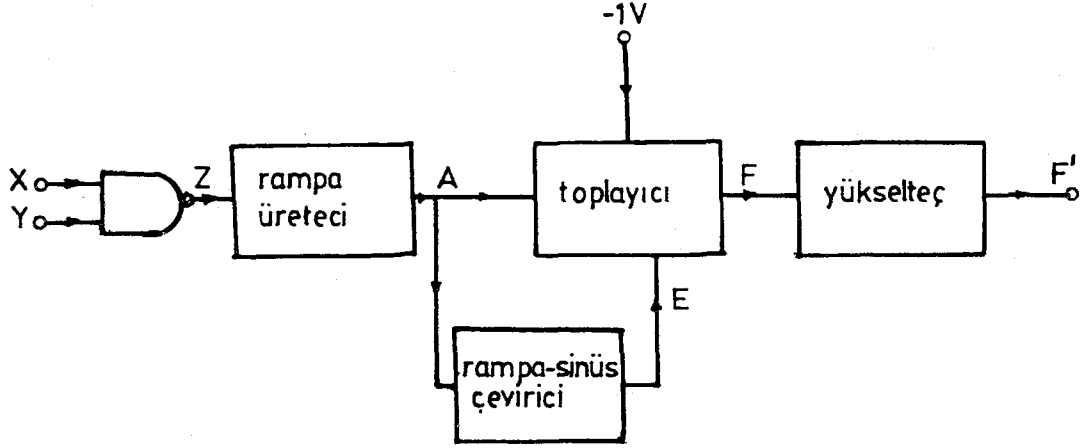


Şekil 3.8.Şekil 3.7'deki devrenin çeşitli noktalarındaki sinyallerin dalga şekilleri

Fonksiyon devresi:

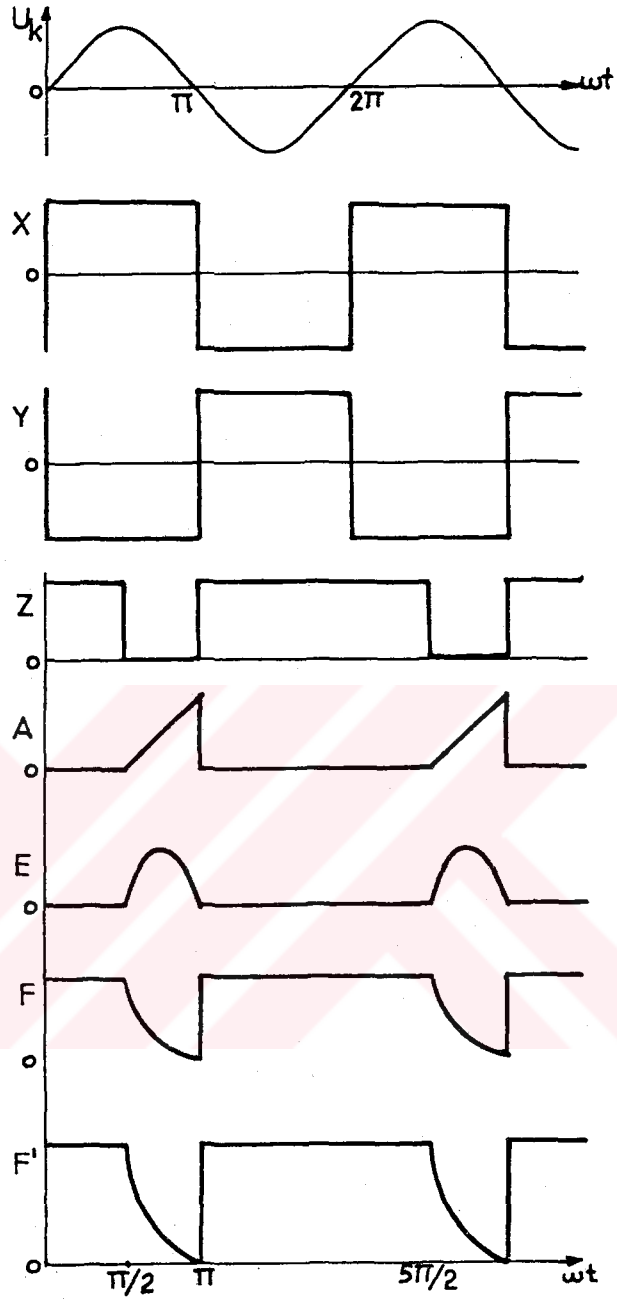
Fonksiyon devresi, eşitlik:3.4'de verilen reaktör akımının temel bileşenini hesaplamak için kullanılır. Bunun için gerçekleştirilen devre şekil 3.9' da ve bu devrenin çeşitli

noktalarındaki sinyal şekilleri ise şekil 3.10'da verilmiştir.



Şekil 3.9.Fonksiyon devresi blok şeması

Reaktör akımının temel bileşenini veren eşitlik:3.4'deki tek değişen tetikleme açısıdır. Bu açının  $\pi/2$  radyan ile  $\pi$  radyan arasında değiştiği daha önce belirtilmişti. Bu değişim bölgesini belirtmek için kaynak geriliminden türetilen şekil 3.7'deki X ve Y fonksiyonları kullanılır. Bu fonksiyonlardan  $Z=\overline{X.Y}$  fonksiyonu üretilir. Z fonksiyonundan faydalanılarak şekil 3.9' daki A noktasının sinyali olan  $(2\alpha'/\pi)$  rampa fonksiyonu elde edilir. Rampa-sinüs çevirici kullanılarak, E noktasında  $\frac{1}{\pi} \sin 2\alpha'$  fonksiyonu üretilir. Eşitlik:3.4 gereğince  $1, (-2\alpha'/\pi)$  ve  $(-\frac{1}{\pi} \sin 2\alpha')$  fonksiyonlarının toplamından F fonksiyonu bulunur. Bu fonksiyon  $U/wL$  ile çarpılarak F' noktasındaki  $I_{L1}$  akım fonksiyonu elde edilir. Böylece reaktör akımının  $\alpha'$  tetikleme açısına bağlı olan temel bileşeni bulunmuş olmaktadır.

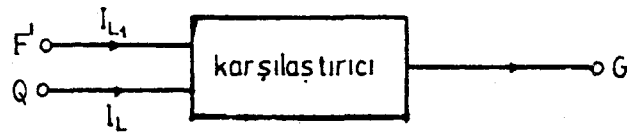


Şekil 3.10. Fonksiyon devresinin çeşitli noktalarındaki sinyallerin dalga şekilleri

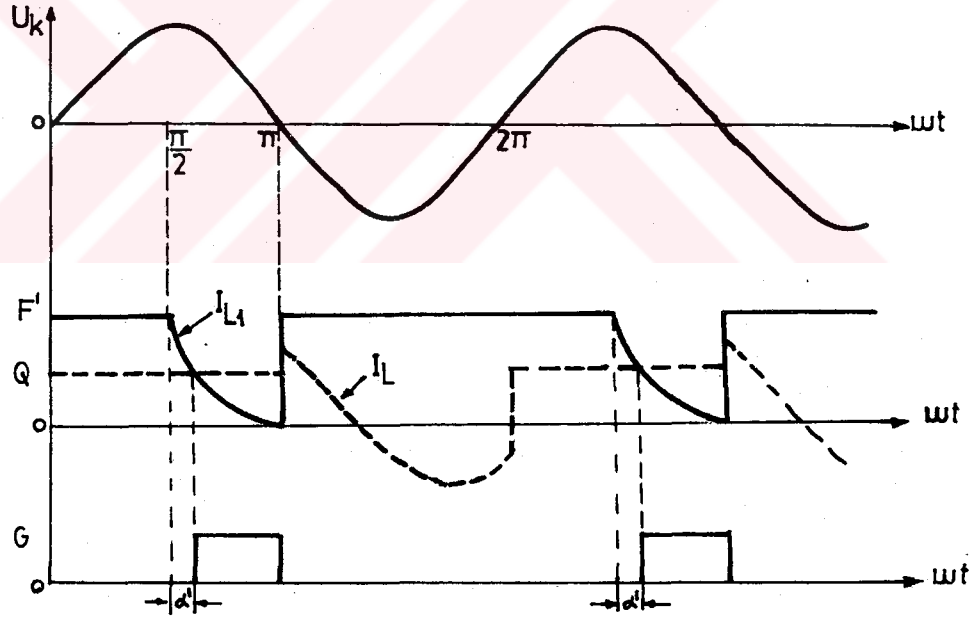
Karşılaştırma devresi ile tetikleme açısının bulunması:

Şekil 3.9'daki F' noktasında elde edilen reaktör akımının temel bileşeni ile şekil 3.7'deki Q noktasından elde edilen gerekli reaktör akımı, şekil 3.11'deki karşılaştırıcı devresine

girilir. Şekil 3.12' deki dalga şekillerinden görüldüğü gibi karşılaştırıcı devre,  $I_{L1}$  ile  $I_L$  eşit olduğu andan itibaren çıkış vermektedir. Çıkış süresi  $I_{L1}$ 'in yeniden  $I_L$  'ye eşit olduğu ana kadar devam etmektedir. Karşılaştırıcı devre çıkışında elde edilen  $G$  sinyalinin başlangıç kenarı ile  $\pi/2$  radyan arasındaki açı tristör tetikleme açısına eşittir. Böylece gerekli tetikleme açısı bulunmuş olmaktadır.



Şekil 3.11. Tetikleme açısının bulunması



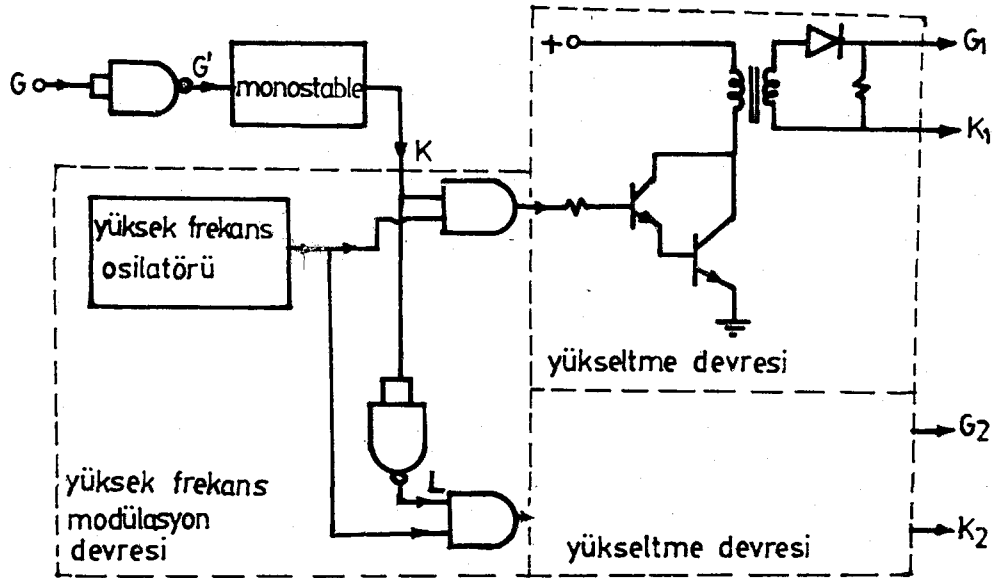
Şekil 3.12. Şekil 3.11' deki devrenin giriş ve çıkış sinyalleri dalga şekilleri

Tristör tetikleme devresi:

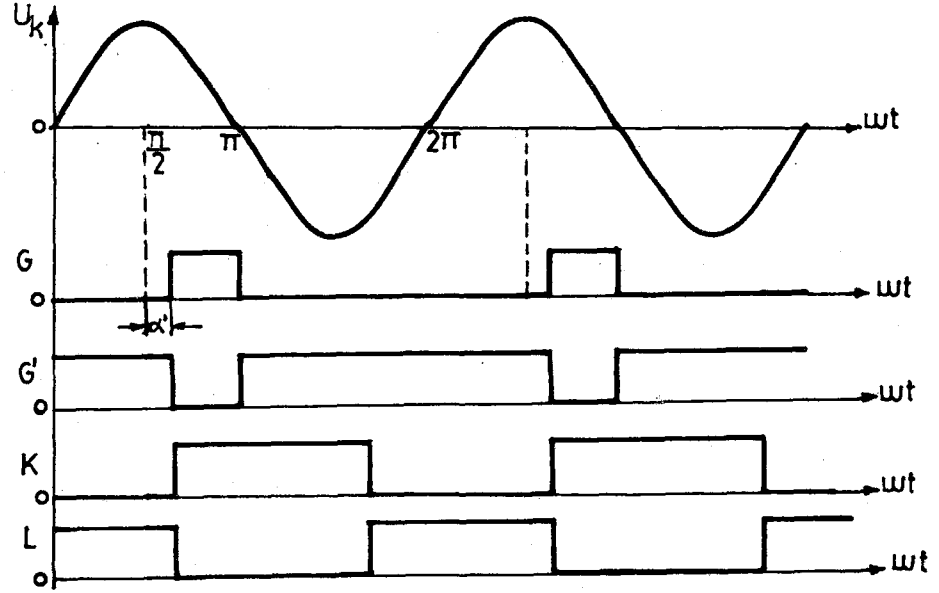
$\alpha'$  açısı tristörlerin tetikleme açısıdır. Tristörlerin

güvenli bir şekilde tetiklenmesi için geýt gerilimlerinin pozitif yarım devir olması daha uygun olmaktadır(1). Bunun için şekil 3.13'deki devre gerçekleştirilmiştir.

Şekil 3.13'deki devrenin çeşitli noktalarındaki sinyallerin dalga şekilleri şekil 3.14'de verilmiştir. Şekil 3.11'deki devrenin çıkışı olan G sinyali bir VEDEĞİL geçitinden geçirilerek G' sinyali elde edilir. Bu sinyal monostable devresine uygulanır. Monostable devresi çıkışınının başlama kenarı şekil 3.12'deki G sinyalinin başlama kenarı ile aynıdır. Dolayısıyla K sinyali de aynı noktadan başlayıp yarım devir sürecektir. Bu, birinci tristörün tetikleme palsıdır. İkinci tristörün tetikleme palsını sağlamak için de, K noktasındaki sinyal bir VEDEĞİL geçitinden geçirilir. Bu yolla elde edilen K ve L sinyallerinin güçleri geýt kumandası için yeterli değildir. Bu sinyalleri yükseltmek için yüksek frekans modülasyon devresi ile yükseltme devrelerinden



Şekil 3.13. Tristör tetikleme devresi blok şeması



Şekil 3.14.Şekil 3.13'deki devrenin değişik noktalarındaki sinyallerin dalga şekilleri

faidalanılır. Yüksek frekans osilatörüyle üretilen yüksek frekans VE geçitlerinden faydalanılarak K ve L sinyalleri ile modülasyon yapılır. Elde edilen yüksek frekanslı sinyaller küçük güçlü transistörlerin beyzlerine uygulanır. Darlinkton bağlı transistörlerin yükü bir pals transformatörüdür. Pals transformatörü vasıtasıyla düşük güçlü tetikleme sinyali yeterli güce yükseltilmiş olur. Pals transformatörü aynı zamanda tristör güç devresi ile kumanda devresi arasındaki izolasyonu sağlamaktadır(13).

Böylece, tetikleme açısına bağlı olarak tristörler ilettime geçirilerek reaktif güç kompanzasyonu sağlanmış olacaktır.

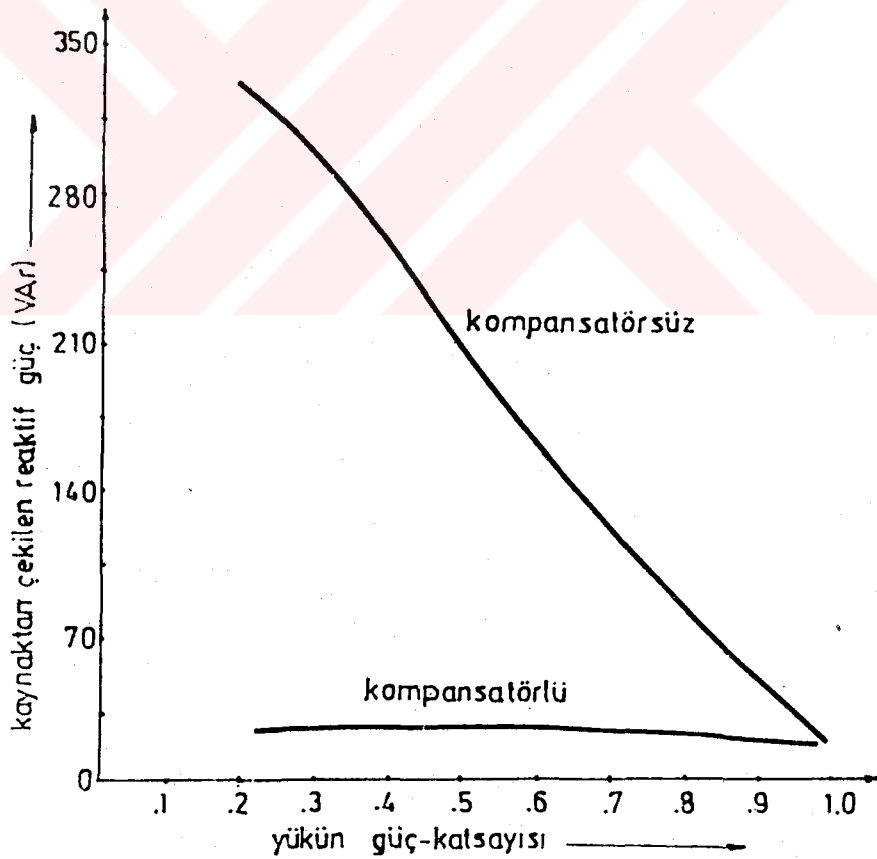
Tristör kumanda devresinin ayrıntılı bir şeması Ek-1'de verilmiştir.

## BÖLÜM 4

### DENEYSEL SONUÇLAR VE ÇALIŞMANIN DEĞERLENDİRİLMESİ

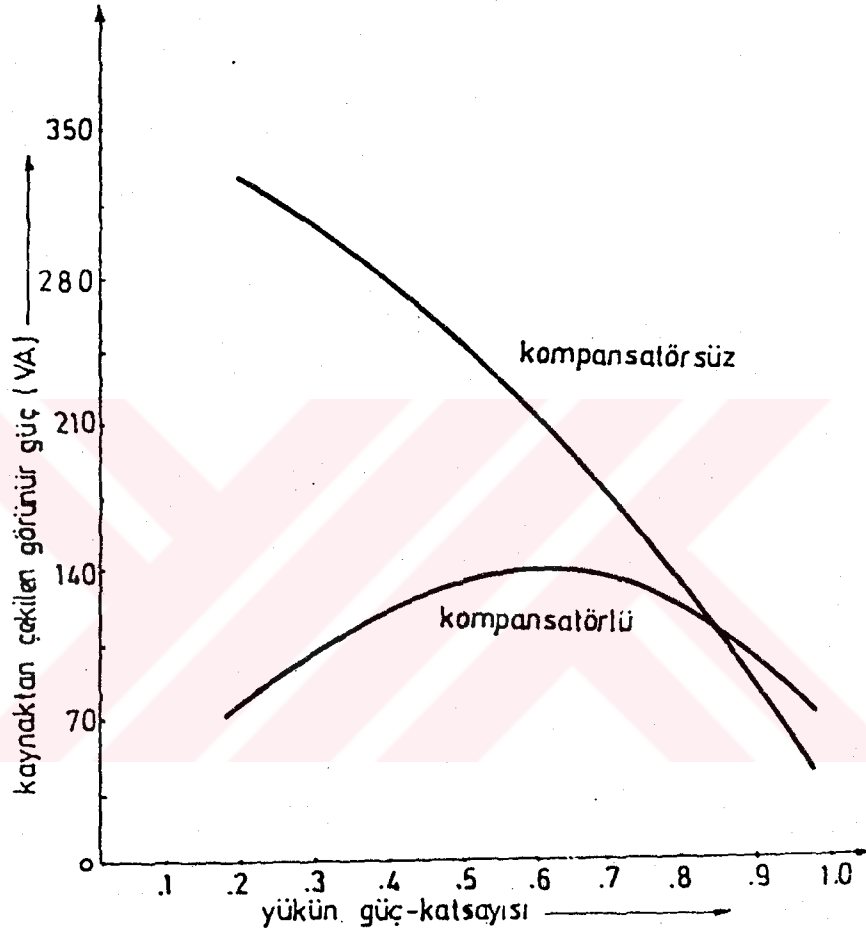
#### 4.1. Kompansatörün Deneysel Sonuçları

Geliştirilen kompansatörün deneyinde, yük olarak direnci değiştirilebilen bir bobin kullanılmıştır. Bobinin reaktansı 100 ohm ve direnci 5-990 ohm arasında değişebilmektedir. Bu yük için,



Şekil 4.1. Kompansatörsüz ve kompansatörlü durumlarda yükün güç-katsayısına göre, kaynaktan çekilen reaktif gücün değişimi

kompansatörde kullanılan reaktör ile kondansatörün reaktansları, 3.9 ve 3.10 nolu eşitlikler kullanılarak 100 er ohm olarak bulunmuştur.

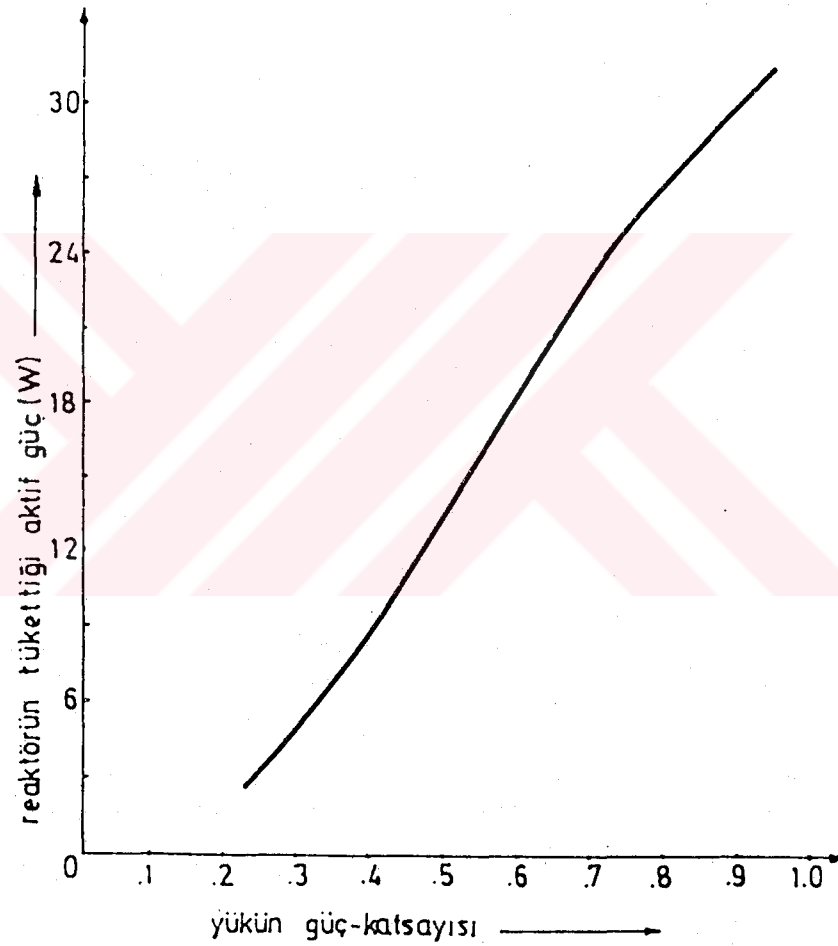


Şekil 4.2. Kompansatörsüz ve kompansatörlü durumlarda yükün güç-katsayısına göre, kaynaktan çekilen görünür gücün değişimi

Deney kompansatörsüz ve kompansatörlü olarak ayrı ayrı yapılmıştır. Her iki durumda da alınan değerlere göre, şekil 4.1, şekil 4.2 ve şekil 4.3'deki eğriler çizilmiştir. Yükün güç-katsayısına göre, kaynaktan çekilen reaktif gücün değişimi şekil 4.1'de ve görünür gücün değişimi de şekil 4.2'de görülmüştür.

Şekil 4.1'de görüldüğü gibi kompensatör yükün güç-katsayısını ortalama 0.97 yaparak yükün reaktif gücünün tamamına yakınına karşılık gelmektedir.

Şekil 4.2'de, yükün güç-katsayısı 0.85'in üzerinde olduğunda kaynaktan çekilen görünür gücün arttığı görülmektedir.



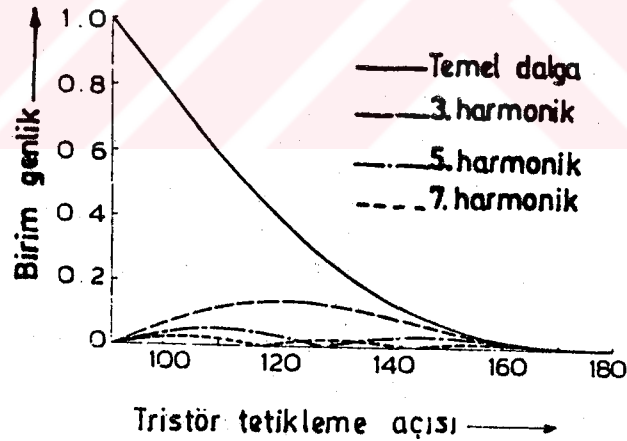
Şekil 4.3. Yükün güç-katsayısına göre kompensatörün tükettiği aktif gücün değişimi

Şekil 4.3' de yükün güç-katsayısına göre, kompensatörün tükettiği aktif gücün değişimi verilmiştir. Buradan görüldüğü gibi, yükün güç-katsayısı arttıkça kompensatörün tükettiği aktif

güç, reaktör akımının karesiyle orantılı olarak artmaktadır. Yüknün güç-katsayısının 0.85'in üzerindeki durumlarda kompansatörün tükettiği aktif güç karşıladığı reaktif güçten fazla olmaktadır.

Deneyi yapılan kompansatörün, güç-katsayısı 0.85'in altındaki yüklerde verimli olduğu görülmüştür. Reaktörün iç direnci azaltılarak, bu rakam 0.90'na yaklaştırılabilir.

Tristör kontrollü reaktörler 3,5,7,9,11 ve 13. harmonikleri üretmekte olup bunların genlikleri sırasıyla % 13.8, % 5, % 2.5, % 1.6, % 1.0, % 0.7 dir. Şekil 4.4'deki eğride tristör tetikleme açısı ile harmoniklerin ilişkisi verilmiştir. Bu eğriden de görüldüğü gibi tristör tetikleme açısı 180 dereceye doğru yaklaştıkça harmoniklerin değerleride azalmaktadır(5, 11).



Şekil 4.4. Tristör kontrollü reaktörlerin ürettiği harmonikler

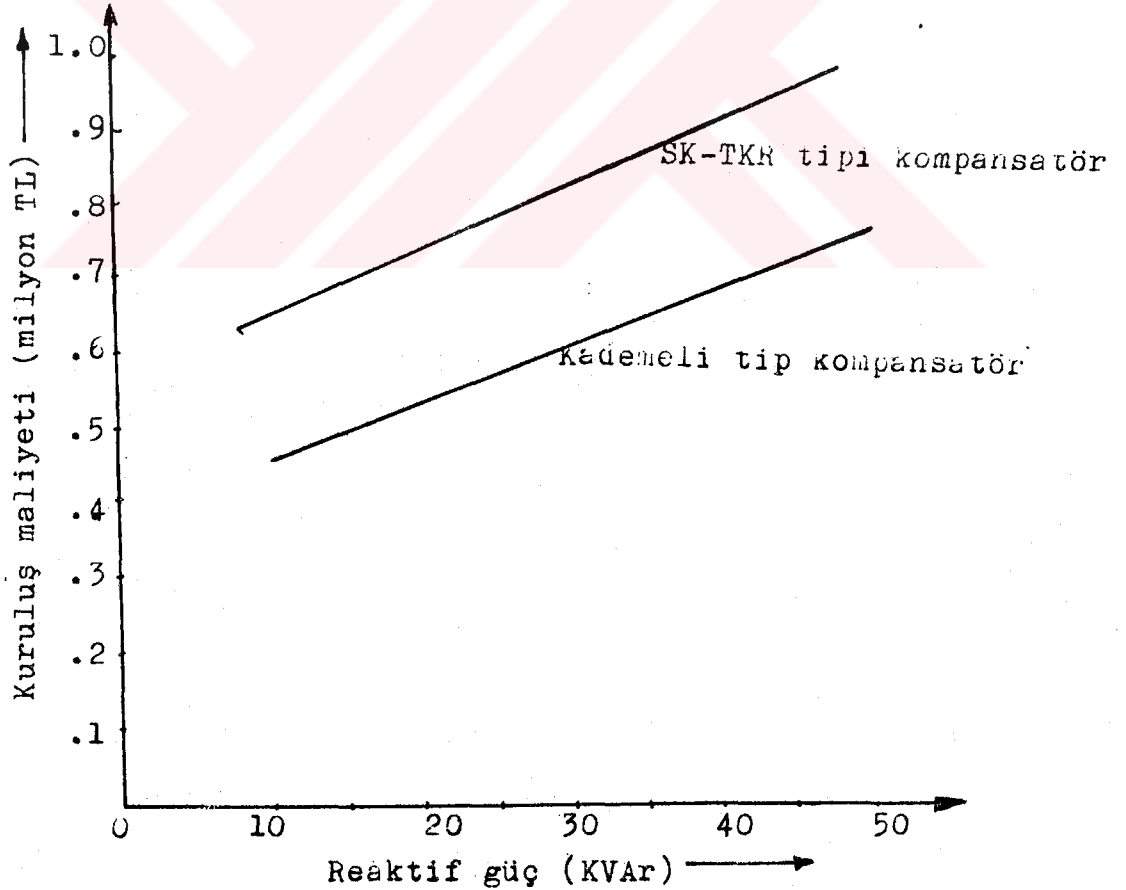
Tristör kontrollü reaktörlerin ürettiği harmonikler şebekede istenmeyen olumsuzluklara sebep olur. Bunun için, üç-fazlı yüklerde sabit kondansatörler üçgen bağlanarak 3 ve 9.

harmonikler yok edilir. Gerekirse 5. harmonik için de filtre devresi kurulur(5,11).Diğer harmoniklerin etkileri çok az olduğu için ihmal edilebilirler.

#### 4.2. Kademeli ve SK-TKR Tip Kompansatörlerin Karşılaştırılması

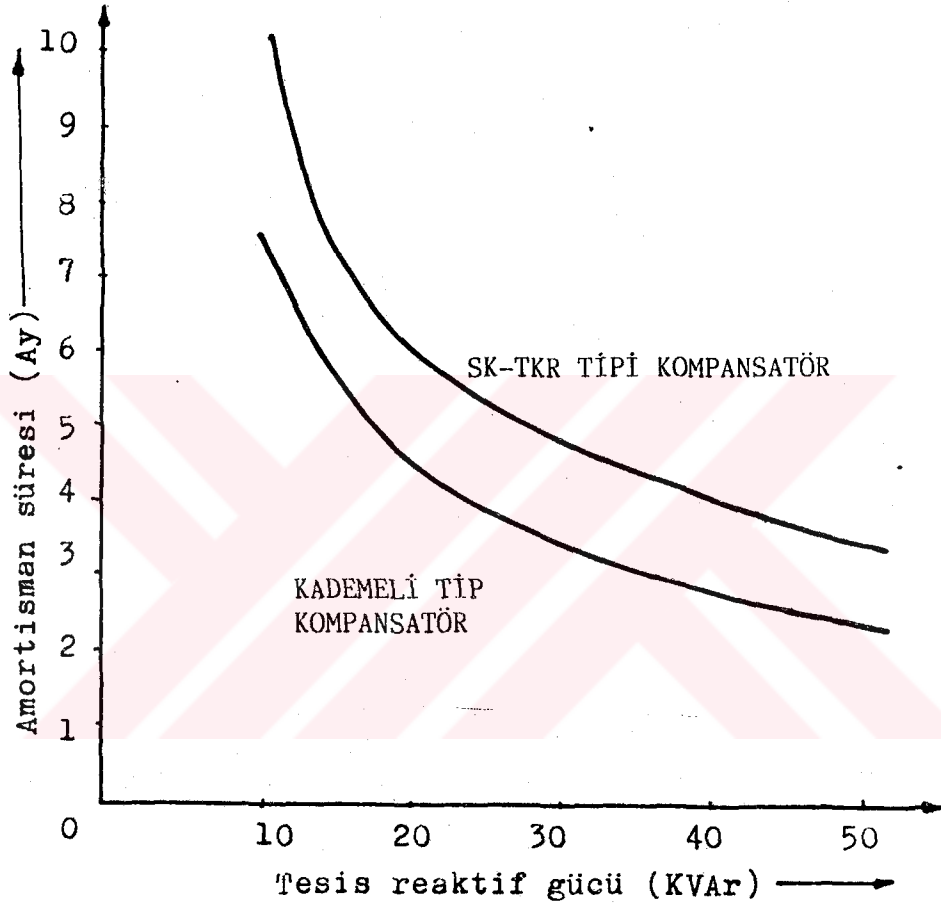
Bu kısımda, kademeli tip ile SK-TKR tipi kompansatörler, kuruluş maliyeti, amortisman ve verimlilikleri bakımından karşılaştırılmaktadır.

Kademeli tip ile SK-TKR tipi kompansatörlerin kuruluş maliyeti ile ilgili bir eğri şekil 4.5'de verilmiştir. Şekilden



Şekil 4.5. Kademeli tip ve SK-TKR tipi kompansatörlerin kuruluş maliyet hesabı

görüldüğü gibi SK-TKR'ün kuruluş maliyeti kademeli kompensatöre göre yaklaşık % 20 daha pahalıdır. Bu iki kompensatörün kuruluş maliyetlerini karşılaması için gerekli zaman şekil 4.6' da verilmiştir. Burada tesisin ayda 150 saat çalıştığı kabul edilmiştir.

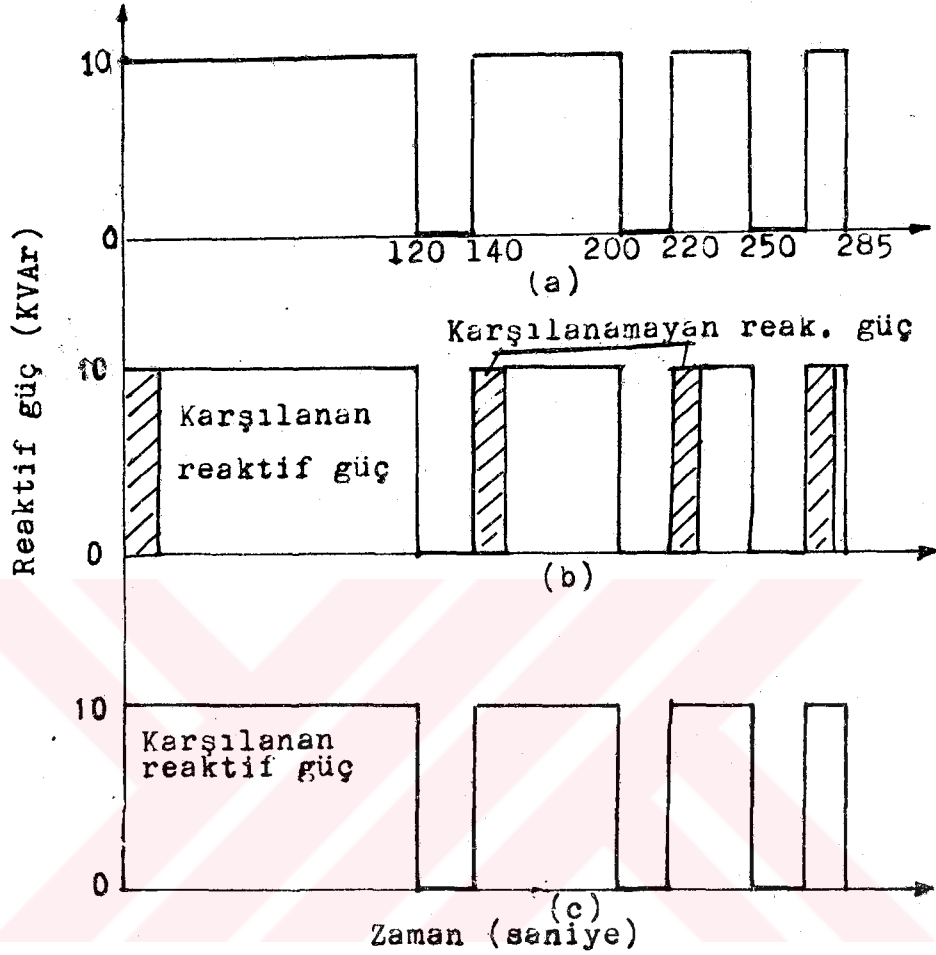


Şekil 4.6. Kademeli tip ile SK-TKR tipi kompensatörün amortisman eğrisi

Şekilden görüldüğü gibi kademeli tip kompensatör SK-TKR tipi kompensatöre nazaran kuruluş maliyetini daha kısa zamanda amorti etmektedir.

Kademeli tip ve SK-TKR tipi kompensatörlerin alıcının güç-katsayısını bir yaptığı ve kademeli kompensatörün tepki süresi 10

saniye olarak kabul edilerek şekil 4.7'deki eğriler çizilmiştir.



Şekil 4.7. Kademeli ve SK-TKR tipi kompensatörlerin yük değişimine karşı davranışları

- Alıcının zamana göre reaktif güç değişimi eğrisi
- Kademeli tip kompensatörün kullanılmasıyla karşılanan reaktif gücün zamana göre değişimi
- SK-TKR tipi kompensatörün kullanılmasıyla karşılanan reaktif gücün zamana göre değişimi

Şekil 4.7.b'de görüldüğü gibi tesisin reaktif güç çekme süresi 120 saniyede bir olduğunda karşılanamayan reaktif güç % 12 dir. Reaktif gücün değişimi 15 saniyede bir olduğunda ise bu oran %66' dır. Görüldüğü gibi yükün değişim hızı arttıkça kademeli kompensatörün verimi düşmektedir. Buna karşılık SK-TKR'de ise tepki süresi ihmal edilirse reaktif gücü karşılama oranı % 100'e

yaklaşmaktadır. Şekil 4.7'deki eğrilere göre, yükün reaktif güç isteği kısa aralıklı ve hızlı olan alıcılarda SK-TYR tipi kompensatör, yükü sabit olan alıcılarda ise kademeli tip kompensatörün kullanılması uygun olmaktadır.

#### 4.3. Çalışmanın Değerlendirilmesi

Geliştirilen bu kompensatörle, yükün reaktif gücünün geniş sınırlar içinde değişimine karşılık, kaynaktan çekilen reaktif gücün kompanzasyonu sağlanmaktadır. Bu kompensatör tek tek alıcılarla, grup alıcılarla kullanılabilirdiği gibi merkezi kompanzasyonda da kullanılmaya elverişlidir. Kademeli kompensatörlere göre hızlı ve sürekli bir kompanzasyon sağlamaktadır. Ayrıca hareketli eleman kullanılmadığından bakım masrafları da düşüktür. Güç-katsayısı 0.85'den küçük olan sistemlerde verimli olmaktadır.

Bu tip kompensatörün olumsuz yanlarından birincisi, tristör kontrollü reaktörün iç direncinden dolayı bir güç tüketiminin bulunmasıdır. Bundan dolayı, yükün güç-katsayısı 0.85'den büyük olduğu durumlarda kompensatörün tükettiği aktif güç artmaktadır. Zaten güç-katsayısı 0.90'ın üzerindeki yüklerde güç kompanzasyonuna gerek görülmemektedir(14). Olumsuz yanının ikincisi ise, tristörlerin tetikleme açıları büyüdükçe harmoniklerin artmasıdır. Kondansatörlerin üçgen bağlanmasıyla ve filtre devreleriyle bu olumsuzluk giderilebilir.

Geliştirilen kontrol devresi ile yük akımının değişiminden en erken 20 milisaniye sonra gerekli kompanzasyon işlemi sağlanmaktadır. Bu süreyi 10 milisaniyeye indirmek mümkünse de

ekonomik olmadığı için buna gerek görülmemiştir.

Sonuç olarak, sabit yüklü endüktif alıcılarda kademeli tip kompensatör, değişken yüklü endüktif alıcılarda ise SK-TKR tipi kompensatör kullanımı uygun olmaktadır.



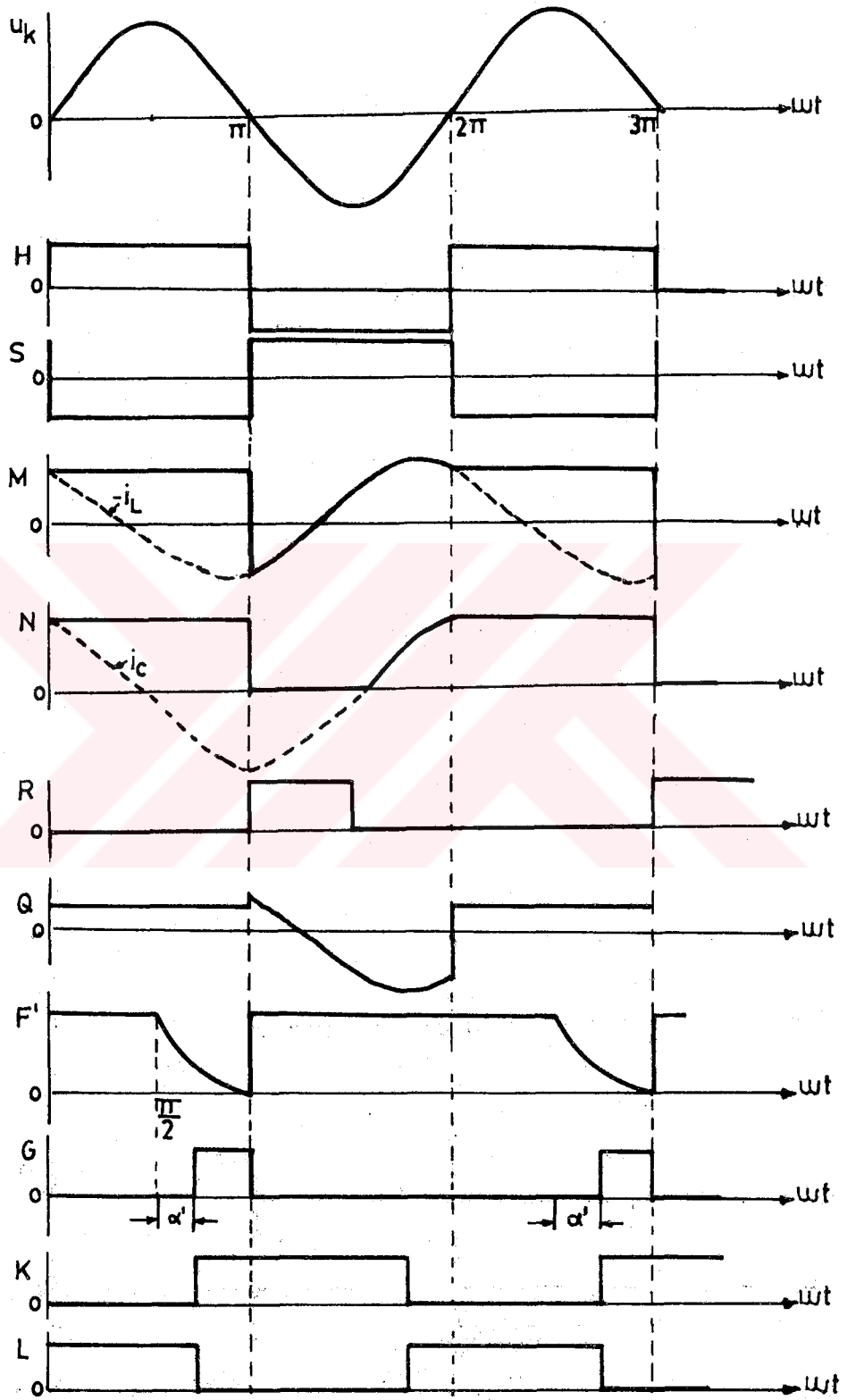
## KAYNAKLAR

- 1- Borrald,S.R.,Patel,B.K., "A thyristor reactive power compensator for fast-varying industrial loads"Int.J.Electronics.,VOL.51, NO.6,763-767,(1981)
- 2- Ilisu,I., "Reaktif güç kompanzasyonunda otomatik kondansatör tesisleri" Elektroteknik Mecmuası.,sayı 8,(1975)
- 3- Onat,H., "Reaktif güç kompanzasyonu" Reaktif güç kompanzasyonu semineri,TMMOB İstanbul Şubesi,30-50,Istanbul,1983
- 4- Peşint,M.A., Elektrik Mekanikleri-4,YTÖÖ,105-106,1982
- 5- Gyugly,L.,Otto,R.A.,and Putmann,T.H., "Principles and application of static thyristor controlled shunt compensators" IEEE Trans.Pow.App.Sys.,VOL.PAS-97,NO.95,1935-1944,(1978)
- 6- Bayram.M., "Hızlı değişen olaylarda reaktif güç kompanzasyonu" Reaktif güç kompanzasyonu semineri,TMMOB İstanbul Şubesi,138-168,Istanbul,1983
- 7- Gülgün,R.,Güç Elektronığıne Giriş, Genişletilmiş 3.baskı, İstanbul,1987
- 8- Penketh,J.R., Electronic Power Control, First Published,53, 1982
- 9- Haque,S.E.,Malik,N.H., "Operation of fix capacitor-thyristor controlled reactor power factor compensator",IEEE Transac.

- on Pow.App.Systems,VOL.PAS-104,NO.6,1385,(1985)
- 10- Faeka,M.,Donald,W.,"An equivalent-circuit model for phase back voltage control of AC machines" IEEE Tran.on Ind.App. VOL.IA.22,NO.5,(1986)
- 11- Torseng,S.,"Shunt connected reactors and capacitors controlled by thyristors"IEEE PROC.,VOL.128,Pt-C.,NO.6,366-367,(1981)
- 12- Gyugly,L.,"Control of shunt compensation with reference to new desing concepts" IEEE PROC.,VOL.128,Pt-C,NO.6,376,(1981)
- 13- General Electric,SCR Manuel, Sixth Edition,115-116, 1982
- 14- T.E.K Yük Tevzi ve Satış Dairesi, T.E.K' dan elektrik alan tüketicilerin uymak oldukları koşullar,ANKARA, 1979







Şekil E.2.Şekil E.1'deki devrenin çeşitli noktalarındaki sinyallerin dalga şekilleri



ÖZGEÇMİŞ

## ÖZGEÇMİŞ

1959 yılında Denizli'nin Çardak ilçesine bağlı Çaltı köyünde doğdu. İlk öğrenimini doğduğu yerde, orta öğrenimini Çardak'ta tamamladı. Denizli Endüstri Meslek Lisesini bitirdikten sonra 1979 yılında Yüksek Teknik Öğretmen Okulu'na girdi. 1983 yılında Elektrik-Elektronik Eğitimi Bölümünden mezun oldu. 1984 yılından itibaren Gazi Üniversitesi Teknik Eğitim Fakültesi'nde Araştırma Görevlisi olarak çalışmaktadır.



**Y. C.**  
Yükseköğretim Kurulu  
Dokümantasyon Merkezi