

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK VAR KOMPAZASYONU SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

Elektrik Mühendisi Rıza ERSAMUT

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hacı BODUR

İSTANBUL, 2009

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

STATİK VAR KOMPAZASYONU SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ VE KARŞILAŞTIRILMASI

Elektrik Mühendisi Rıza ERSAMUT

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Makinaları ve Güç Elektroniği Programında
Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı : Prof. Dr. Hacı BODUR

Jüri Üyesi : Doç. Dr. M. Hadi SARUL

Jüri Üyesi : Y. Doç. Dr. Hamit TORPİ

İSTANBUL, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	viii
ŞEKİL LİSTESİ	ix
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖNSÖZ	xiii
ÖZET	xiv
ABSTRACT	xv
1. GİRİŞ	1
2. REAKTİF GÜÇ KOMPAZASYONU	5
2.1 Alternatif Akım Güç Sistemi	5
2.2 Reaktif Güç ve Reaktif Güç Kompanzasyonuna Giriş	7
2.2.1 Reaktif Güç Çeken Alıcılar	8
2.2.2 Reaktif Güç Kompanzasyonundan Beklenen Özellikler	9
2.2.3 Reaktif Güç İhtiyacının Belirlenmesi	10
2.3 Reaktif Güç Kompanzasyonunun Temel Prensipleri	11
2.3.1 Paralel Kompanzasyon	12
2.3.2 Seri Kompanzasyon	13
2.4 Reaktif Güç Kompanzasyonuna Gerek Duyulan Alanlar	14
2.4.1 Geçici Kararsızlık Durumunun Geliştirilmesi	15
2.4.2 Güç Dalgalanmalarının Azaltılması	17
2.4.3 Gerilim Kararsızlığının Önlenmesi	19
2.5 Reaktif Güç Kompanzasyonunun Yararları	20
2.5.1 Gerilim Düşümünün Azalması	20
2.5.2 Sistem Kayıplarının Azalması	23
2.5.3 Tesisin Yükleme Kapasitesinin Artması	23
2.6 Reaktif Güç Kompanzasyonunun Bugünü	24
3. STATİK VAR KOMPAZASYONU	26
3.1 Esnek AA İletim Sistemleri	26
3.2 Esnek AA İletim Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları	26
3.3 Esnek AA İletim Sistemi Cihazları	27
3.4 Statik VAR Kompanzasyonuna Giriş	27
3.4.1 Statik VAR Kompanzasyonunun Temel Özellikleri	28
3.4.2 Statik VAR Kompanzasyonu Kullanımının Faydaları	28
3.4.3 Statik VAR Kompanzasyonunda Güç Akışı Analizi	29
3.4.4 Statik VAR Kompanzasyonunda Tüketiciye Verilen Gerilim	30

3.4.5	Paralel Statik VAR Kompanzasyonunun Prensibi ve Geçmişi	31
3.5	Statik VAR Kompanzasyon Sistemlerinde Kullanılan Temel Elemanlar	40
3.5.1	Bobin	40
3.5.2	Kondansatör	41
3.5.3	Yarı iletken Anahtarlar	42
3.6	Statik VAR Kompanzasyonunun Sınıflandırılması.....	44
4.	TRİSTÖR ANAHTARLAMALI KONDANSATÖR	46
4.1	Kondansatörün Tristörle Devreye Alınması.....	46
4.2	Seri Bağlı Reaktör ve Kondansatörün Tristörle Devreye Alınması	47
4.2.1	Tristörlerin İletime Sokulması.....	49
4.2.2	Tristörlerin Kesime Sokulması	53
4.3	Tristör Anahtarlamaalı Kondansatörün Yapısı.....	53
4.4	İşletim Karakteristiği	55
5.	TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR	59
5.1	Tristör Kontrollü Reaktör Yapısı.....	59
5.2	Tristör Kontrollü Reaktörde Tetikleme Açısı.....	60
5.3	Tristör Kontrollü Reaktörün Akım ve Gerilim İfadeleri	61
5.4	Tristör Kontrollü Reaktörün İşletim Karakteristikleri.....	71
5.4.1	Tristör Kontrollü Reaktörün Akım ve Gerilim Karakteristiği.....	71
5.4.2	Gerilim Kontrolü Olmaksızın İşletim Karakteristikleri.....	71
5.4.3	Gerilim Kontrolü ile İşletim Karakteristiği	73
6.	REAKTÖR VE KONDANSATÖRLÜ KARMA SİSTEMLER.....	75
6.1	Tristör Kontrollü Reaktör ve Sabit Kondansatör.....	75
6.1.1	Tristör Kontrollü Reaktör ve Sabit Kondansatörün Matematiksel Modeli	76
6.1.2	İşletim Karakteristiği	77
6.1.2.1	Düşürücü Transformatörünün Olmadığı Durum	77
6.1.2.2	Düşürücü Transformatörün Olduğu Durum	79
6.1.3	Tristör Kontrollü Reaktör ve Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör Tercihi.....	80
6.2	Tristör Kontrollü Reaktör ve Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör	81
6.2.1	İşletim Karakteristiği	82
7.	SİMÜLASYON UYGULAMASI VE SONUÇLARI.....	86
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	96
	KAYNAKLAR.....	100
	ÖZGEÇMİŞ.....	102

SİMGE LİSTESİ

a, b, c	Katsayı
A	Levha yüzeyinin alanı
$A_1, A_2, A_{\text{margin}}$	Kompanzasyonsuz durumdaki enerji
$A_{C1}, A_{C2}, A_{C\text{margin}}$	Kompanzasyonlu durumdaki enerji
B_C	Kondansatör süseptansı
B_L	Bobin süseptansı
B_{TKR}	TKR bloğunun süseptansı
$B_{TKR SK}$	TKR SK bloğunun süseptansı
B_{SK}	SK bloğunun süseptansı
B_{SVK}	SVK bloğunun süseptansı
$B_{TKR SK + T}$	Düşürücü transformatörlü TKR SK bloğunun süseptansı
$B_{TKR SK + T \text{ max}}$	Düşürücü transformatörlü TKR SK bloğunun süseptansının maksimum değeri
$B_{TKR SK + T \text{ min}}$	Düşürücü transformatörlü TKR SK bloğunun süseptansının minimum değeri
B_{max}	TKR bloğunun süseptansının maksimum değeri
C	Kondansatör
f_{rn}	Rezonans frekansı
I_C	Kapasitif akım
I_{eff}	Efektif akım
I_{eff}^*	Efektif akımın transpozisi
I_h	Toplam harmonikli akım
I_L	Endüktif akım
I_m	Maksimum akım
I_{osc}	Osilasyonlu akım
I_p	Akımın aktif bileşeni
I_{p1}	Akımın temel aktif bileşeni
I_Q	Akımın reaktif bileşeni
I_{Q1}	Akımın temel reaktif bileşeni
I_{Q1}^-	Akımın temel reaktif bileşeninin alt değeri
I_{Q1}^+	Akımın temel reaktif bileşeninin üst değeri
$I_{Q1\text{alt}}$	Akımın temel reaktif bileşeninin alt sınırı

$I_{Q1_{üst}}$	Akımın temel reaktif bileşeninin üst sınırı
I_{Q1_d}	Akımın temel reaktif bileşenindeki değişim
I_R	Yük akımı
I_S	Sistemin akımı
I_{SVK}	SVK akımı
I_{TAK}	TAK bloğunun akımı
I_{TKR}	TKR bloğunun akımı
I_{TKR1}	TKR bloğu akımının temel bileşeni
I_{TKRn}	TKR bloğu akımının n. bileşeni
$I_{TKR SK}$	TKR SK bloğunun akımı
i_C	Kondansatör akımı
$i_{C1}, i_{C2}, i_{C3}, i_{C4}$	TAK bloğunun akımı
i_L	Bobin akımı
L	Bobin
L_1, L_2, L_3, L_4	Bastırma endüktansı
L_{eq}	Eşdeğer endüktans
M	Moment
n	Güçlendirme faktörü
p	Filtre reaktör faktörü
P, P_1, P_2	Aktif güç
P_E	Generatör çıkış gücü
P_M	Generatör giriş gücü
P_{max}	İletilen maksimum aktif güç
P_R	Yükün aktif gücü
P_T	Toplam aktif güç
P_{Z1}, P_{Z2}	Kayıp güç
ΔP_Z	Kayıp güç farkı
Q, Q_1, Q_2	Reaktif güç
Q_C	Kapasitif reaktif güç
Q_{filtre}	Filtrenin reaktif gücü
Q_H	Şebekeden çekilen reaktif güç
Q_L	Endüktif reaktif güç
Q_R	Yükün reaktif gücü
Q_S	Sistemin reaktif gücü

Q_{TKR}	Tristör kontrollü reaktörün reaktif gücü
R	Direnç
R_S	Sistem Direnci
S, S_1, S_2	Görünür güç
S_R	Yükün görünür gücü
$SW_1, SW_2, SW_3,$ $SW_4, SW_5, SW_6,$ SW_n, SW_{n+1}	Tristör
T	Periyot
u	Gerilim regülasyonu
V_2, V_2'	Hat sonu gerilimi
v_C	Kondansatör gerilimi
V_{C0}	Kondansatör başlangıç gerilimi
V_{COMP}	Seri kompanzasyon için kondansatör yerine kullanılan gerilim kaynağı
V_{eff}	Efektif gerilim
v_L	Bobin gerilimi
V_m	Maksimum gerilim
V_M	Orta nokta gerilimi
V_P	Gerilimin aktif bileşeni
V_Q	Gerilimin reaktif bileşeni
V_R	Yük gerilimi
V_{ref}	Referans gerilimi
V_S	Kaynak gerilimi
V_T	Tristör uçlarındaki gerilim
V_{TAK}	TAK bloğunun gerilimi
V_{TKR}	TKR bloğunun gerilimi
V_{TKRmax}	TKR bloğu geriliminin üst sınırı
V_{TKRmin}	TKR bloğu geriliminin alt sınırı
v_T	Tristör anot katot gerilimi
ω	Açısal frekans
ω_0	Sönümlenme açısal frekans
ω_n	Nominal frekans
X	Reaktans
X_{filtre}	Filtrenin reaktansı

X_C	Kondansatör reaktansı
X_L	Bobin reaktansı
X_{TKR}	TKR reaktansı
$X_{TKR\max}$	TKR reaktansı üst sınırı
$X_{TKR\min}$	TKR reaktansı alt sınırı
Z	Empedans
Z_S	Sistem empedansı
Z_{TKR}	TKR empedansı
α	Tetikleme açısı
α_{alt}	Tetikleme açısının alt sınırı
$\alpha_{üst}$	Tetikleme açısının üst sınırı
ΔV	Gerilim düşümü
ΔV_r	Direnç üzerindeki gerilim düşümü
ΔV_x	Reaktans üzerindeki gerilim düşümü
$\delta, \delta', \delta_1, \delta_2,$ $\delta_3, \delta_{C1}, \delta_{C2}, \delta_{C3}$	Güç açısı
$\delta_{crit}, \delta_{Crit}$	Kritik güç açısı
ϵ	Dielektrik katsayısı
ϵ_0	Boşluğun dielektrik sabiti
ϵ_r	Malzemenin dielektrik sabiti
θ	Kondansatör tarafından depolanan yük
σ	İletim açısı
φ	Faz farkı
φ_1, φ_2	Faz açısı
φ_i	Akım faz açısı
φ_v	Gerilim faz açısı
Φ	Manyetik akı

KISALTMA LİSTESİ

A	Anot
AA	Alternatif Akım
BGAK	Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü
CIGRE	Büyük Elektrik Sistemleri Uluslararası Kurulu (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques)
DA	Doğru Akım
EPRI	Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute)
FACTS	Esnek AA İletim Sistemleri (Flexible AC Transmissions Systems)
G	Kapı (Gate)
GTO	Kapı Sönümlü Tristör (Gate Turn Off thyristor)
IGBT	İzole Kapılı Bipolar Transistör (Insulated Gate Bipolar Transistor)
K	Katot
MAK	Mekanik Anahtarlama Kondansatör
MCT	MOS Kontrollü Tristör (MOS Controlled Thyristor)
TAK	Tristör Anahtarlama Kondansatör
TKFAR	Tristör Kontrollü Faz Açık Regülatörü
TKR	Tristör Kontrollü Reaktör
TKR SK	Tristör Kontrollü Reaktör ve Sabit Kondansatör
TKR TAK	Tristör Kontrollü Reaktör ve Tristör Anahtarlama Kondansatör
TKSK	Tristör Kontrollü Seri Kapasitör
SCR	Silisyum Kontrollü Doğrultucu (Silicon Controlled Rectifier)
SSSK	Statik Senkron Seri Kompanzasyon
STATKOM	Statik Senkron Kompanzasyon
SVK	Statik VAR Kompanzasyonu
VAR	Volt Amper Reaktif

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2.1	Reaktif hat ile bir baraya bağlı olan bir generatöre ait (a) basit güç sistem modeli ve (b) güç iletim karakteristiği	6
Şekil 2.2	İletilen görünür gücün azaltılması durumundaki fazör diyagramı.....	10
Şekil 2.3	İletilen aktif gücün azaltılması durumundaki fazör diyagramı	11
Şekil 2.4	Temel bir AA güç sisteminde (a) kompanzasyonsuz ve (b) paralel kompanzasyonlu durumda basit güç sistemi modeli ile fazör diyagramı	12
Şekil 2.5	Temel bir AA güç sisteminde (a) kompanzasyonsuz ve (b) seri kompanzasyonlu durumda basit güç sistemi modeli ile fazör diyagramı	14
Şekil 2.6	Seri kondansatör ile gerçekleştirilen reaktif güç kompanzasyonu ve koruma sistemi	14
Şekil 2.7	Orta nokta reaktif güç kompanzasyon sistemine ait (a) iki makineli basit güç modeli ve (b) güç iletim karakteristiği	15
Şekil 2.8	Önceden Şekil 2.1(a) ve 2.7(a)' da verilen basit güç sistem modellerine ait (a) kompanzasyonsuz ve (b) kompanzasyonlu durumdaki iletilen güç değişimi	16
Şekil 2.9	Statik VAR kompanzasyon sisteminde güç dalgalanmalarının bastırılmasında (1) sadece gerilim ayarının yapıldığı ve (2) gerilimin $d(\Delta\delta)/dt$ ' nin bir fonksiyonu gibi kontrol edildiği durumlarının dalga şekilleri.	18
Şekil 2.10	Tüketici geriliminin güç faktörü ve güce bağlı olarak değişimi	19
Şekil 2.11	Tek fazlı sistemin Thevenin eşdeğeri	20
Şekil 2.12	Kompanze edilmemiş tek fazlı sisteme ait fazör diyagram	20
Şekil 2.13	Kondansatörlü durumda tek fazlı sisteme ait fazör diyagramı	21
Şekil 3.1	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) güç akış analizi için eşdeğer gösterimi	30
Şekil 3.2	AA iletim hattına ait (a) paralel statik VAR kompanzasyonu uygulanmış basit güç sistemi modeli ve (b) güç iletim karakteristiği	31
Şekil 3.3	Mekanik anahtarlama kondansatör ve tristör kontrollü reaktörün devre konfigürasyonları	32
Şekil 3.4	Mekanik anahtarlama kondansatörün simülasyonu için kullanılan Simulink devresi.....	33
Şekil 3.5	Mekanik anahtarlama kondansatör devresine ait akım ve gerilim dalga şekilleri ($t=21$ ms)	34
Şekil 3.6	Mekanik anahtarlama kondansatör devresine ait akım ve gerilim dalga şekilleri ($t=26$ ms)	35
Şekil 3.7	Standart kompanzasyon kontaktörü kullanılan mekanik anahtarlama kondansatörün simülasyonu için kullanılan Simulink devresi.....	36
Şekil 3.8	Kompanzasyon kontaktörünün kullanıldığı mekanik anahtarlama kondansatör devresine ait akım ve gerilim dalga şekilleri ($t=26$ ms)	37
Şekil 3.9	Tristör anahtarlama kondansatörün Simulink devresi	38
Şekil 3.10	Tristör anahtarlama kondansatör devresine ait akım ve gerilim dalga şekilleri	39
Şekil 3.11	Bobine ait akım ve gerilim değişimleri.....	41
Şekil 3.12	Kondansatöre ait akım ve gerilim değişimleri	42
Şekil 3.13	Yarı iletken anahtar örnekleri (a) Tristör (Silicon Controlled Rectifier, SCR) (b) Kapı Sönümlü Tristör (Gate Turn Off, GTO) (c) MOS Kontrollü Tristör (MOS Controlled Thyristor, MCT)	43

Şekil 3.14	Ters paralel bağlı iki tristör.....	43
Şekil 3.15	Yarı iletken güç elemanlarının gerilim ve güç aralıkları	44
Şekil 4.1	Tristör anahtarlama kondansatöre ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) akım ile gerilim dalga şekilleri	46
Şekil 4.2	Seri reaktörlü tristör anahtarlama kondansatör sistemi	47
Şekil 4.3	Tristör anahtarlama kondansatör sisteminde temel frekans için güçlendirme faktörü	48
Şekil 4.4	Tetiklemenin (a) $v(t) = V_{C0}$ veya $V_T = 0$ iken ve (b) $v(t)$ ' nin tepe değerinde yapılması durumlarında, V_{C0}/V_m parametre olmak üzere, I_{osc}/I_m ve n arasındaki değişim.....	50
Şekil 4.5	Seri reaktörlü tristör anahtarlama kondansatör modelinde, tristör tetikleme stratejilerinin (a) $V_C > V_m$, (b) $V_C = V_m$, (c) $V_C < V_m$ ve (d) $V_C = 0$ olması durumlarındaki akım ve gerilim dalga şekilleri.....	51
Şekil 4.6	Tristör anahtarlama kondansatörde tristörün söndürülmesine ait akım ve gerilim dalga şekilleri	52
Şekil 4.7	Tristör anahtarlama kondansatöre ait (a) basit devre modeli ile (b) akım ve gerilim dalga şekilleri	54
Şekil 4.8	Tristör anahtarlama kondansatörün Simulink devresi	55
Şekil 4.9	Tristör anahtarlama kondansatörün akım ve gerilim karakteristiği.....	55
Şekil 4.10	Diyotlu ve tristör anahtarlama kondansatörün Simulink devresi	56
Şekil 4.11	Diyotlu ve tristör anahtarlama kondansatörün akım dalga şekilleri (a) B_1 , (b) B_2 , (c) B_3 , (d) B_4 kolunun ve (e) tüm sistemin akımı.....	58
Şekil 5.1	Tristör kontrollü reaktörüne ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) tetikleme açısı α ' ya göre akım değişimleri.....	59
Şekil 5.2	Tristör kontrollü reaktörüne ait (a) $\alpha = 90^\circ$ ve $\sigma = 180^\circ$, (b) $\alpha = 100^\circ$ ve $\sigma = 160^\circ$, (c) $\alpha = 130^\circ$ ve $\sigma = 100^\circ$, (d) $\alpha = 150^\circ$ ve $\sigma = 60^\circ$ durumlarındaki akım dalga şekilleri.....	60
Şekil 5.3	Tristör kontrollü reaktör modeline ait (a) $\alpha = 105^\circ$ ve (b) $\alpha = 150^\circ$ için akım ve gerilim dalga şekilleri	61
Şekil 5.4	Tristör kontrollü reaktör süseptansı B_{TKR} ' nin tetikleme açısı α ' ya göre değişimi.....	64
Şekil 5.5	Tristör kontrollü reaktörde akım harmonikleri	65
Şekil 5.6	Tristör kontrollü reaktörde I_{L1} ve I_h akımları	65
Şekil 5.7	Tristör kontrollü reaktöre ait (a) basit devre modeli ve (b) akım ve gerilim dalga şekilleri	67
Şekil 5.8	(a) $I_Q/(V_S/\omega.L)$ (b) L_{eq}/L değerlerinin, tetikleme açısı α ' ya göre değişimleri.....	67
Şekil 5.9	Tristör kontrollü reaktöre ait Simulink devresi.....	69
Şekil 5.10	Tristör kontrollü reaktöre ait akım ve gerilim değişimleri.....	70
Şekil 5.11	Tristör kontrollü reaktöre ait akım ve gerilim karakteristiği	71
Şekil 5.12	Tristör kontrollü reaktöre ait (a) basit devre modeli ve (b) eşdeğer devre	72
Şekil 5.13	Tristör kontrollü reaktöre ait (a) akım ve gerilim karakteristiği ve (b) süseptans karakteristiği.....	72
Şekil 5.14	Tristör kontrollü reaktörüne ait (a) gerilim kontrolü modeli ve (b) işletim karakteristiği	73
Şekil 6.1	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait (a) basit devre modeli ve (b) akım dalga şekilleri.....	75

Şekil 6.2	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde gerilim ile reaktif güç değişimi	76
Şekil 6.3	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde düşürücü transformatörün olmadığı durumdaki (a) basit devre modeli, (b) akım ve gerilim karakteristiği ve (c) süseptans karakteristiği	78
Şekil 6.4	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde düşürücü transformatörün olduğu durumdaki basit devre modeli ve (b) akım ve gerilim karakteristiği	80
Şekil 6.5	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde düşürücü transformatörün olduğu durumdaki kayıplar	81
Şekil 6.6	Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatöre ait basit devre modeli	82
Şekil 6.7	Bir adet tristör kontrollü reaktör ve üç adet tristör anahtarlama kondansatörün kullanıldığı kompanzasyon örneği.....	82
Şekil 6.8	Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatöre ait akım ve gerilim karakteristiği	83
Şekil 6.9	Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatöre ait akım karakteristiği.....	84
Şekil 7.1	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör Simulink devresi.....	87
Şekil 7.2	Simulink devresinde (a) 1. yük, (b) 1. ve 2. yük ve (c) 1., 2. ve 3. yük devredeyken kaynak gerilimi ve akımına ait dalga şekilleri	94
Şekil 7.3	Tristör kontrollü reaktörde tristör gerilimi, reaktör gerilimi ve akımı dalga şekilleri	95
Şekil 7.4	Simulink devresindeki reaktif güçlerin, tetikleme açısı α 'nın ve güç faktörü $\cos \varphi$ 'nin değişimleri.....	96
Şekil 7.5	Kaynak ve yük noktasındaki gerilim değeri	97

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 7.1	Simülasyon sonuçlarının ve hesaplamaların karşılaştırılması	93
-------------	---	----

ÖNSÖZ

Her geçen gün elektrik enerjisinin üretimi için farklı yöntemler geliştirilirken, buna paralel olarak üretilen enerjinin en verimli bir şekilde kullanılabilmesi için de değişik teknik ve yöntemler araştırılmaktadır. “Statik VAR Kompanzasyonu” bu yöntemlerden birisi olarak bilinmekte ve yaygın olarak kullanılmaktadır. Yüksek Lisans Tezi olarak yaptığım bu çalışmada, bu konuyla ilgili teorik inceleme ve araştırmaların yanında, simülasyon uygulaması da yapmış bulunmaktayım. Bu çalışmanın konuyla ilgilenen kişilere yararlı olmasını dilerim.

Tez çalışmalarım süresince yardımlarını esirgemeyen, beni daima destekleyen ve yönlendiren, tez danışmanım ve hocam Prof. Dr. Hacı BODUR Bey’e teşekkürlerimi sunuyorum.

Hayatımdaki en büyük destekçim olan, bana maddi ve manevi her türlü imkanı sağlayan aileme şükranlarımı sunuyorum.

Ayrıca Güç Elektroniği Laboratuvarı ile Elektrik Makinaları Laboratuvarı’nda bulunan bütün hocalarım ve Araştırma Görevlisi arkadaşlarıma da teşekkür ederim.

ÖZET

Prensip olarak, yarı iletken güç elemanları kullanılarak reaktif gücün kontrol edilmesine Statik VAR Kompanzasyonu (Static VAR Compensation, SVK) ve bunu gerçekleştiren sistem veya devreye de Statik VAR Kompanzasyon Sistemi denilir.

Yarı iletken güç elemanları ile bir reaktör ile bir kondansatörden oluşan statik VAR kompanzasyon sistemlerinin temel türleri, tristör kontrollü reaktör, tristör anahtarlama kondansatör, tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör, tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatör olarak sınıflandırılabilir. Reaktif güç gereksinimi, kayıp karakteristiği, harmonikler ve maliyet gibi faktörler dikkate alınarak belirlenir.

Gecikmesiz ve kademesiz olarak reaktif gücün kontrol edilebildiği statik VAR kompanzasyonunun önemli özellikleri, geçici olayların en aza inmesi, harmoniklerin oluşmaması, kayıpların az olması, kontrol esnekliği, yedekleme olanağı, güvenilirliğinin yüksek olması şeklinde sıralanabilir.

VAR kompanzasyon sistemleri, elektrik tesislerinin her bölümünde ihtiyaç duyulan önemli bileşenlerindendir. Bu çalışmada, akademik ve endüstriyel olarak son yıllarda büyük önem kazanan statik VAR kompanzasyonu sistemleri incelenmiş, tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörle ilgili olarak simülasyon çalışması yapılmış ve bu konuda ortaya çıkan yeni gelişmeler ele alınmıştır.

Anahtar Kelimeler: Statik VAR kompanzasyonu, statik VAR kompanzasyonu sistemleri, tristör kontrollü reaktör, tristör anahtarlama kondansatör.

ABSTRACT

As a principle, by using semiconductor power devices to control the reactive power is called Static VAR Compensation and the system or circuit which is performing this is called Static VAR Compensation System.

The basic types of static VAR compensations that consist of semiconductor power devices, a reactor and a capacitor can be classified as the thyristor controlled reactor, the thyristor switched capacitor, the thyristor controlled reactor and the fixed capacitor, the thyristor controlled reactor and the thyristor switched capacitor. The selection of reactive power need is made by taking factors into account such as the loss characteristics, harmonics, cost etc...

The important features of static VAR compensation systems of which reactive power can be controlled without any delay and step can be sorted as; temporary events can be minimized, harmonics do not occur, less losses, control flexibility, the possibility to back up, and reliability.

VAR compensation systems are important components of electrical facilities needed in each section of these facilities. In this study, static VAR compensation systems that have become important as academic and industrial in recent years have been reviewed. Simulation work has been carried out regarding to the thyristor controlled reactor and the fixed capacitor, and emerging new developments on this issue have been addressed.

Keywords: Static VAR compensation, static VAR compensation systems, thyristor controlled reactor, thyristor switched capacitor.

1. GİRİŞ

Tristör kontrollü paralel kompanzasyon sistemlerinin görevleri temel olarak ikiye ayrılır. Biri yükleri kompanze etmek, diğeri de iletim hattındaki gerilimin ayarlanmasıdır. Sabit kondansatörlerin yüksek değerli kayıpları vardır. Tristör anahtarlama kondansatörlerindeki kayıp oranı daha düşüktür (Gyugyi vd., 1978).

Modern güç elektroniği teknolojisinin en önemli ürünü olan yüksek güçlü tristörler yardımıyla, reaktörlerde akım kontrolü yapılırken, aynı zamanda büyük kondansatör grupları devreye alınır veya devreden çıkarılır. Tristör kontrollü reaktörlerle birlikte sabit kondansatörlerin ya da tristör anahtarlama kondansatörlerin kullanılmasıyla, sürekli olarak kapasitif ve endüktif bölgede çalışılabilir. Güç akışının kontrolü, efektif gerilimin ve sistem kararlılığının sağlanması için reaktif güç kontrolünün hızlı olması gereklidir (Gyugyi, 1988).

Cevap verme süresinin kısılması ve harmoniklerin elemine edilmesi için darbe genişlik modülasyonlu kompanzasyon sistemleri kullanılabilir. Reaktif güç, darbe genişlik modülasyonlu kompanzasyon sistemlerinde doluluk, boşluk oranının ayarlanmasıyla kontrol edilir (Jin vd., 1994).

1957’ de General Electric tarafından ilk tristör geliştirilmiştir. Yarı iletken elemanlarla yüksek anahtarlama hızları, düşük iletim ve anahtarlama kayıpları hedeflenmiştir. FACTS alanındaki yenilik, esasen bu gelişmeler ışığında yürütülmektedir. Tristör, tetikleme sinyaliyle ilettime sokulan ve akımın sıfır geçişine kadar iletimde kalan bir yarı iletken anahtardır. Tristörler en yüksek akım ve gerilim değerlerine sahip yarı iletkenlerdir. Bu da bir uygulama içinde daha az sayıda yarı iletken kullanmaya ihtiyaç olduğu anlamına gelir. Tristörlerin sadece ilettime girmeleri kontrol edilebilmektedir. Kontrol edilebilirliği artırmak için, kapı ucuna uygulanan akım pikiyle kesime girebilen GTO’ lar geliştirilmiştir (Song ve Jonhs, 1999).

Güç elektroniği elemanları tarafından oluşturulan harmonikleri sınırlamak için, uluslararası kuruluşlar tarafından harmonik standartlar oluşturulmuş, yeni teknikler gerçekleştirilmiştir. DA–DA dönüştürücü devreleri güç faktörünün düzeltilmesi için kullanılmaktadır. Güç faktörü düzeltme devrelerinde, yarı iletken elemanlar çift yönlü anahtar olarak kullanılmaktadır. Statik VAR kompanzasyon sistemleriyle iletim ve dağıtım hatlarının hem akımlarının hem de gerilimlerinin genliği kontrol edilir (Agrawal, 2000).

Statik VAR kompanzasyon sistemleri, yükün reaktif gücünü kompanze ederek, gerilim dalgalanmalarının minimize edilmesini ve kaynak güç faktörünün yükseltilmesini sağlarlar. Kontaktörlerin ve rölelerin kullanıldığı yavaş, güvensiz, yüksek anahtarlama streslerinin

olduğu ve sık bakım gerektiren metotların yerine, yüksek güçlü yarı iletken elemanların kullanıldığı metotlar kullanılmaktadır (Reddy, 2000).

Tristör anahtarlamalı kondansatörlerde kademeli denetim yapılırken, tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörlerde sürekli ve kesintisiz denetim yapılabilmektedir. Buna karşılık, tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörlerde harmonik oranları daha yüksektir. Ancak her kompanzasyon sistemi, farklı özellikte tasarlandığından, birbirlerinden daha iyi olduğuna dair genel bir karar verilememektedir.

Belirli bir uygulamada en uygun kompanzasyon sisteminin seçimi için gerekli olan kriterler aşağıda sıralanmıştır.

1. Denetim aralığının belirlenmesi,
2. Gücün ve yatırım bedelinin tespiti,
3. Geçici ve kararlı rejim davranışlarının saptanması,
4. Teknik açıdan olumlu ve olumsuz yanların sıralanması.

Kompanzasyon sisteminde, kondansatör değerinin reaktör değerinden büyük seçilmesi harmonik üretimini düşürecektir. Reaktif gücün gereksinim duyulan en yakın yerde üretilmesi, elektrik sisteminin en iyi koşullarda işletilmesi açısından büyük yarar sağlayacaktır (Mathur ve Varma, 2002).

Tristör kontrollü reaktörde, reaktörler tetikleme açısı α ' ya bağlı olarak, kontrol edilebilir süseptans gibi davranırlar. Tristör kontrollü reaktörde harmonik üretimi, tam iletim koşulu dışındaki iletim koşullarında gerçekleşmektedir. Bundan dolayı tristör kontrollü reaktörler de tam anlamıyla sorunsuz değildir. Reaktör endüktansındaki artış ile birlikte kaynaktan çekilen reaktif güç azalmaktadır (Acha vd., 2004).

IGBT' lere dayanan kendinden komütasyonlu topolojilerle statik VAR kompanzasyon sistemlerinin performansında etkileyici bir ilerleme sağlanmaktadır. IGBT' lerin yüksek gerilim seviyelerinde bile kendinden komütasyonlu topolojilerinin geliştirilmesiyle, statik VAR kompanzasyon sistemlerinin etkinliği artacaktır. Ayrıca daha hızlı ve daha güçlü yarı iletkenlerin geliştirilmesiyle statik VAR kompanzasyon sistemlerinin uygulanabilirliği daha da artacaktır. Statik VAR kompanzasyon sistemleri, tüketicilere ulaştırılan gücün kalitesinin ve güvenilirliğinin artırılmasına yardımcı olur (Dixon vd., 2005).

Uygulamalarda gerilim seviyesindeki düşüşlerle nominal çalışma koşullarında bozulmalar meydana gelir. Elektriksel sistemler, belirlenmiş olan nominal gerilim seviyelerinde verimli

olarak çalışmaktadır. Sistemlerin nominal gerilimlerinin altındaki gerilim seviyelerinde çalışması, elektrik sistemlerinin verimsiz çalışmasına ya da hiç çalışamamasına neden olacaktır. Bu yüzden gerilim regülasyonu elektriksel sistemler için oldukça önemlidir. Reaktif güç kompanzasyon da gerilim regülasyonu için en uygun yöntemlerden birisidir. Tristör anahtarlamalı kondansatörler sabit kondansatörlere göre daha iyi gerilim regülasyonu sağlamaktadır. Gerilim regülasyonu sayesinde yüke aktarılan güç artmakta ve yük gerilimi nominal değerine daha da yakınlaşmaktadır. Böylece güç sistemi için nominal şartlar sağlanmakta ve güç kalitesi arttırılmaktadır (Kara, Yalçınöz, ve Ayasun, 2005).

Yüksek gerilim uygulamalarında kullanılan FACTS teknolojisinde, yarı iletken elemanların özelliğinden dolayı hat ve yük tam olarak birbirinden izole edilemez. Bu da FACTS uygulamaları için bir problemdir. FACTS' ler iletim hatlarının kullanım kapasitesini arttıran güç elektroniği temelli yapılardır. FACTS kullanımı sistemlerin kontrol edilebilirliğini arttırmıştır. Paralel kompanzasyon sistemleri yük gerilimini kararlı hale getirmektedir. Böylece sistem için en az kayıpla daha verimli çalışma koşulları sağlanmaktadır. Kondansatörler, tristörler ile devreye alınırken, aşırı akımların meydana gelmemesi için kaynak geriliminin tepe değerine kadar şarj edilirler (Kara, Yalçınöz, 2005).

Tristör anahtarlamalı kondansatörleri bağlandıkları sisteme kolaylıkla adapte olabilmektedir. Tristör anahtarlamalı kondansatörlerle her faz ayrı ayrı denetlenebilmektedir (Kara, Yalçınöz, 2006).

Elektrik enerjisi genel olarak alternatif akım (AA) olarak üretilir ve dağıtılır. Elektrik makineleri, ark fırınları, balastlar gibi yükler çektikleri aktif gücün yanında, alternatif akımın doğal bir karakteristiği olan reaktif güç de çekerler. Çekilen aktif güç faydalı hale getirilirken, reaktif güç faydalı bir güce dönüşmese de vazgeçilemez. Çünkü endüksiyon prensibine göre çalışan cihazlar manyetik alan oluşturabilmek için mıknatıslanma akımı çekerler. Bu mıknatıslanma akımının sonucu olarak kaynaktan reaktif güç çekilir.

Ancak reaktif gücün kontrol altında tutulması gereklidir. Çünkü reaktif güç akışı AA güç sistemlerinde sorunlar oluşturmaktadır. Reaktif gücün AA güç sistemlerinde meydana getireceği sorunlar aşağıda sıralanmaktadır.

1. Gerilim kararsızlığının artması,
2. Frekansın sürekli olarak değişmesi,
3. İletilen güç değerinin azalması,
4. Güç faktörünün birden küçük bir değer alması,

5. Faz akımlarının ve gerilimlerinin dengesiz olması,
6. Kayıpların artması.

Son yıllarda elektrik enerjisinin üretimi için farklı yöntemler geliştirilirken, aynı zamanda sayılan bu sorunların ortadan kaldırılması ya da en aza indirilmesi ve üretilen enerjiden en verimli şekilde yararlanılması için yöntemler araştırılmaktadır.

Bölüm 2' de AA güç sistemi, reaktif güç ve reaktif güç kompanzasyonunun temel prensipleri, reaktif güç kompanzasyonuna gerek duyulan alanlar ve reaktif güç kompanzasyonun yararları sunulmuştur.

Bölüm 3' te statik VAR kompanzasyonu, esnek AA iletim sistemleri, statik VAR kompanzasyonunun temel prensipleri ve kullanılan elemanlar verilmiştir.

Bölüm 4' te kondansatörün tristörle devreye alınması, tristör anahtarlama kondansatörlerde tristörlerin iletme ve kesime sokulması, tristör anahtarlama kondansatörün yapısı ve işletim karakteristiği verilmiştir.

Bölüm 5' te tristör kontrollü reaktörün yapısı, tristör kontrollü reaktörde tetikleme açısı, akım ve gerilim ifadeleri ile işletim karakteristiği verilmiştir.

Bölüm 6' da tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörün yapısı, matematiksel modeli, işletim karakteristiği verilmiştir. Ayrıca, tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatörün yapısı ile işletim karakteristiği verilmiştir.

Bölüm 7' de tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait bir simülasyon gerçekleştirilerek ve bu simülasyona ait sonuçlar verilmiştir.

Son bölüm olan bölüm 8' de ise yaptığım çalışmalar ve simülasyon özetlenerek, bu konu hakkında çalışmak isteyenlere öneriler sunulmuştur.

2. REAKTİF GÜÇ KOMPANZASYONU

2.1 Alternatif Akım Güç Sistemi

Generatörler, iletim ve dağıtım hatları ile yükler AA güç sisteminin ana bileşenleridir. Generatörler dönen senkron makinelerdir. İletim ve dağıtım hatları, şebekelerin reaktif parametreleri olan seri endüktans ve paralel kondansatör değerleriyle tanımlanır. Yükler genellikle aktif ve reaktif gücün her ikisini de çekerler.

AA güç sisteminde görünür gücün tanımı aşağıdaki gibidir.

$$S = \frac{V_m \cdot I_m}{2} \cdot \cos(\varphi_v - \varphi_i) \cdot [1 + \cos(2\omega t)] - \frac{V_m \cdot I_m}{2} \cdot \sin(\varphi_v - \varphi_i) \cdot \sin(2\omega t) \quad (2.1)$$

Bu ifadenin “cos” çarpanıyla gelen kısmı aktif güç, “sin” çarpanıyla gelen kısmı reaktif güç olarak tanımlanır. Reaktif güç, işe dönüştürülebilme şansı olmayan bir güç türüdür. Kondansatör ve endüktans elemanları reaktif güç oluştururlar. Çünkü faz farkı bu iki elemanın olduğu devrelerde 0’ dan farklı değer almaktadır. Bu da $\sin(\varphi_v - \varphi_i)$ ’ nin 0’ dan farklı bir değer almasına neden olmaktadır. Kondansatörlerde plakalar arasında elektriksel alan olarak ve endüktanslarda ise sarımların etrafında manyetik alan olarak depolanan enerjiler, reaktif gücün çekilmesine neden olur.

Görünür, aktif ve reaktif güçler aşağıdaki ifadelerde gösterildiği gibi tanımlanır. Aktif güç P , reaktif güç Q , görünür güç ise S ile gösterilmektedir.

$$S = P + jQ \quad (2.2)$$

$$|S| = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.3)$$

$$P = |S| \cdot \cos(\varphi) \quad (2.4)$$

$$Q = |S| \cdot \sin(\varphi) \quad (2.5)$$

Güç ifadesi temel olarak, elemanın üzerinden geçen akım ile elemanın uçları arasındaki gerilimin çarpımı şeklinde ifade edilir. Eşitliklerde, (*) fazörün transpozisinin alındığını, ($_{eff}$) ifadesi de fazörün efektif değerlerinin alındığını göstermektedir.

$$\left. \begin{aligned} V_{eff} &= \frac{V_m}{\sqrt{2}} \\ I_{eff} &= \frac{I_m}{\sqrt{2}} \end{aligned} \right\} \quad (2.6)$$

$$S = V_{eff} \cdot I_{eff}^* = Z \cdot I_{eff} \cdot I_{eff}^* \quad (2.7)$$

$$S = Z \cdot I_{eff} \cdot I_{eff}^* \angle \phi_i - \phi_i = Z \cdot I_{eff}^2 = (R + jX) \cdot I_{eff}^2 = R \cdot I_{eff}^2 + jX \cdot I_{eff}^2 \quad (2.8)$$

(2.6), (2.7) ve (2.8) eşitliklerinden yararlanarak elde edilen reaktif güç, aşağıdaki eşitlikle ifade edilir.

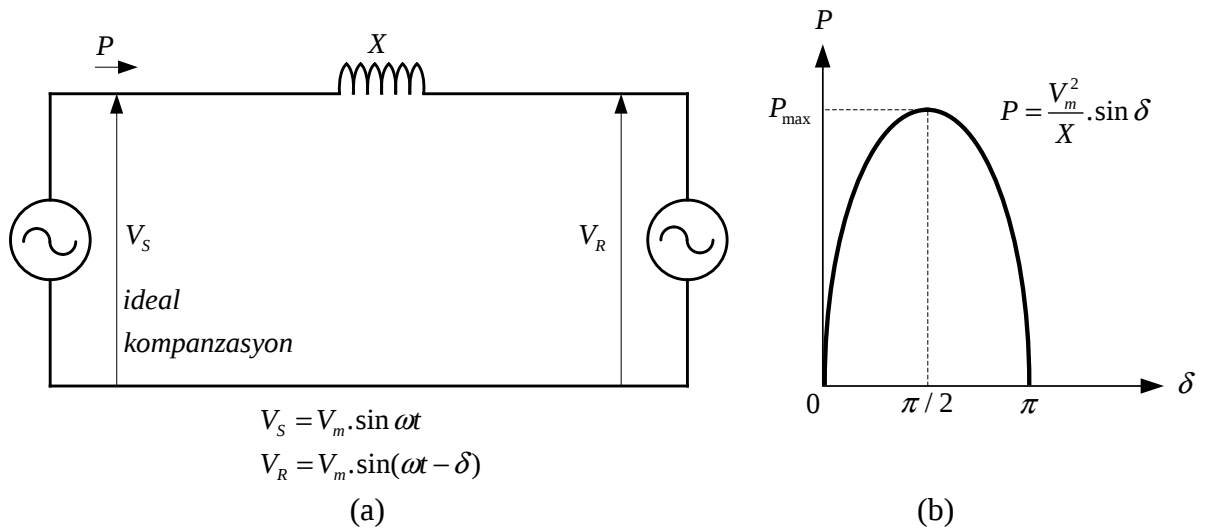
$$Q = X \cdot I_{eff}^2 = X \cdot \frac{I_m^2}{2} \quad (2.9)$$

Kararlılık, güç sisteminin istenen sabit durum modunda çalışmasını sürdürebilme ve kararlı durum çalışmasında değişikliğe zorlayan karışıklıklardan (kısa devreler, yük anahtarlamaları vb.) sonra toparlanabilme yeteneğidir (Gyugyi, 1988; Özaslan, 1997; Kara vd., 2005).

Düşük gerilim yüklerin performansında düşüşlere sebep olurken, aşırı gerilim malzeme bozulmalarına ve manyetik doyma yüzünden harmoniklerin oluşmasına neden olur (Song ve Jonhs, 1999).

Şekil 2.1(a)' da, reaktif hat ile bir baraya bağlı olan generatörün basit güç sistem modeli gösterilmektedir. Kaynak gerilimi V_s 'nin maksimum değeri V_m , toplam reaktans X , güç açısı δ ve iletilen güç P ile ifade edilmektedir. P ile δ arasındaki ilişki Şekil 2.1(b)' de gösterilmektedir. Şekil 2.1(a)' daki basit modelde iletilen güç P 'nin ifadesi (2.10) eşitliğinde gösterilmektedir (Gyugyi, 1988; Özaslan, 1997; Song ve Jonhs, 1999).

$$P = \frac{V_m^2}{X} \cdot \sin \delta \quad (2.10)$$



Şekil 2.1 Reaktif hat ile bir baraya bağlı olan bir generatöre ait (a) basit güç sistem modeli ve (b) güç iletim karakteristiği

İletim hattı boyunca ve hat sonundaki gerilimin değeri, reaktif empedanstan dolayı önemli şekilde değişebilir. Büyük bir yük değişikliği hat sonu geriliminin çökmesine sebep olabilir. Bu durum gerilim kararsızlığı olarak adlandırılır (Gyugyi, 1988; Mathur ve Varma, 2002).

Bu kararsızlıkların ortadan kaldırılabilmesi için enerji kalitesi ve reaktif güç kompanzasyonu ile ilgili çalışmalar yapılmaktadır.

2.2 Reaktif Güç ve Reaktif Güç Kompanzasyonuna Giriş

Endüksiyon prensibine göre çalışan tüm cihazların bulunduğu güç sistemlerinde, aktif güç akışının yanında reaktif güç akışı da oluşmaktadır (Özaslan, 1997).

Endüksiyon prensibine göre çalışan generatör, motor, transformatör ve bobin gibi bütün işletme araçları, çalışmaları için gerekli olan manyetik alanın oluşturulması için bir mıknatıslanma akımı çekerler. İşte bu mıknatıslama akımı reaktif akımdır. Bu tür cihazlar faydalı aktif gücün yanında mutlaka reaktif güç de çekerler.

Reaktif güç çekilen veya reaktif güce gerek duyulan yerlerde belirli teknikler kullanılarak, bu gücün mahallinde karşılanması ve AA güç sisteminden çekilmesinin önlenmesine “reaktif güç kompanzasyonu” denilmektedir (Gyugyi, 1988; Jin vd., 1994 ve Kocaman, 1997).

Bugün kullanılan motor, transformatör ve reaktör gibi elemanlar endüktif karakterde, kondansatör, belli durumlarda hava hatları ve yeraltı kabloları ise kapasitif karakterdedir. Genel olarak şebekelerden çekilen güç endüktif karakterdedir ve bunu kompanze etmek için kapasitif güç üreten cihazlardan yararlanılır (Özaslan, 1997).

Reaktif güç kompanzasyonu işlemi iki gruba ayrılır. Biri iletim sistemlerinde kullanılan gerilim kontrolü, diğeri ise alıcıların yakınında kurulan tesisler ile yapılan yük kompanzasyonudur. İkinci tip kompanzasyon yükün özelliği ile belirlenen akım ve gerilimin ölçümü ile yapılır. Enerji iletiminde kompanzasyon ise, iletim hatlarındaki gerilimin düzenlenmesi ve kararlılığın sağlanmasıyla gerçekleştirilir.

Genel olarak, reaktif güç kompanzasyonunun amacı reaktif gücün kontrolü ile güç sistemlerinde kalitenin artırılması olarak tanımlanabilir.

Reaktif güç kompanzasyonun üç temel amacı aşağıda sıralanmıştır (Gyugyi, 1988; Jin vd., 1994; Mohan, 1995; Özaslan, 1997; Dixon vd., 2005 ve Kara ve Yalçınöz, 2005).

- Güç faktörünü düzeltmek.
- Yük dengesini sağlamak.

- Gerilim dalgalanmasını azaltmak.

Enerji sarfiyatı yüksek olan işletmeler için reaktif güç kompanzasyonu mutlaka yapılmakta ve yüksek maliyetli donanımlar kullanılarak yüksek enerji bedellerinden kurtulmaya çalışılmaktadır. Bu amaçla son yıllarda yapılan çalışmalarla kayıplara sebep olan reaktif gücün ortadan kaldırılması için çeşitli teknikler geliştirilmektedir. İhtiyaç duyulan noktaya en yakın yerde reaktif güç üretilmesi, sistemin veriminin artırılmasında büyük faydalar sağlamaktadır (Bayındır, Demirbaş ve Sesveren, 2008).

Reaktif güç kompanzasyonu için çeşitli yöntemler kullanılmaktadır. Bu yöntemlerde yüklerin ihtiyacı olan reaktif güçler, statik olarak kapasitör ve reaktörlerle, dinamik olarak senkron generatörlerle karşılanmaktadır.

2.2.1 Reaktif Güç Çeken Alıcılar

Enerji sarfiyatı bakımından tüketiciler iki ana gruba ayrılırlar. Birinci grupta ısı enerjisi üreten tüketiciler, akkor flamanlı lambalar gibi tüketiciler vardır. Bunlar sadece aktif güç tüketirler.

İkinci grupta ise manyetik ve statik alan ile çalışan tüketiciler vardır. Bunlar elektrik makineleri, balastlı lambalar ve elektrik enerjisini istenilen enerji şekline dönüştüren cihazlardır. Bu cihazlar, yapıları gereği elektrik şebekesinden aktif güç ile beraber reaktif güç de çekerler.

Endüstride, reaktif güç kompanzasyonu gerektiren yüklerden bazıları aşağıda sıralanmıştır.

- Elektrik makineleri,
- Bobinler,
- Havai hatlar,
- Doğrultucular,
- Endüksiyon fırınları,
- Elektrik ark ocakları,
- Kaynak makineleri,
- Balastlar,

Bu yükler işletmede harmonik üretimine ve akım darbelerine neden olurlar. Bu tip yüklerde reaktif güçteki değişim çok hızlıdır ve çektikleri reaktif güç değerleri de büyük değerler

arasında değişmektedir. Dolayısıyla, kullanılacak reaktif güç kompanzasyon sistemleri çok kısa zamanda büyük değerlerde değişimleri karşılamalıdır (Özaslan, 1997).

2.2.2 Reaktif Güç Kompanzasyonundan Beklenen Özellikler

Bir reaktif güç kompanzasyon sisteminin tasarlanması sırasında göz önüne alınacak önemli noktalar aşağıda sıralanmıştır (Kara ve Yalçınöz, 2005).

- Maksimum reaktif güç gereksinimi,
- Tesisin aşırı yüklenme sınırı ve süresi,
- Aşılmaması gereken gerilim sınırları,
- Frekans ve değişimi,
- Gerilim regülasyonu,
- Reaktif güç kompanzasyon sisteminin cevap verme süresi,
- Maksimum harmonik bozulmaları,
- Dengesiz gerilim ve yükte çalışma verimi,
- Koruma donanımı ve koordinasyonu,
- İşletmenin ileriye dönük genişleme olanakları,
- Güvenilirlik,
- Bakım,
- Çevresel faktörler, gürültü seviyesi, sıcaklık, nem, soğutma sistemi, kirlenme

Kurulacak bir reaktif güç kompanzasyon sisteminden beklenen özellikler aşağıda sıralanmıştır (Kara ve Yalçınöz, 2005).

- Yük ile paralel bağlanabilmeli,
- Güç faktörünü l' e yaklaştırabilmeli,
- Gerilimi kontrol eden ve bağlı olduğu noktada sabit bir gerilim sağlayabilmeli,
- Yük akımlarını ya da faz gerilimlerini dengeleyebilmeli,
- Yükün durumuna göre gerek duyulan reaktif gücü gecikmesiz ve tam olarak kontrol edip, hızlı şekilde cevap verebilmeli,
- Üç fazı da birbirinden bağımsız şekilde kontrol edebilmelidir.

2.2.3 Reaktif Güç İhtiyacının Belirlenmesi

Bir tüketicinin çekeceği reaktif gücün tespiti için, şebekeden çekilen S_1 gücüyle buna ait $\cos \varphi_1$ ve yeni güç faktörü $\cos \varphi_2$ değerinin bilinmesi gereklidir. Reaktif güç kompanzasyon sistemi için gerekli olan reaktif güç iki yöntemle hesaplanır. Bu yöntemlerden biri P_1 gücü sabitken yapılan hesaplama, diğer yöntem de S_1 gücü sabitken yapılan hesaplama (Özaslan, 1997; Keskin, 1998).

a) P_1 gücünün sabit olması durumu,

P_1 gücünün sabit olması durumunda yapılan reaktif güç kompanzasyonunda Şekil 2.2' de gösterildiği gibi sistemden çekilen görünür güç azalmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonundan önceki reaktif güç,

$$Q_1 = P_1 \cdot \tan \varphi_1 \quad (2.11)$$

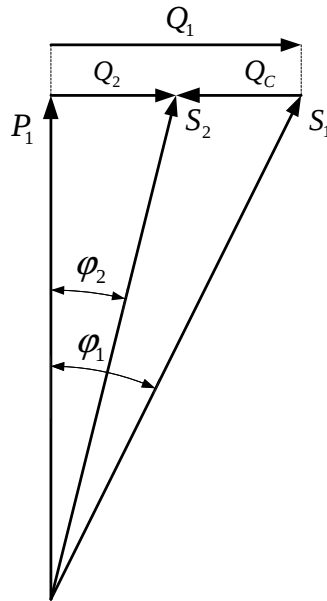
olarak ifade edilir. Ayrıca reaktif güç kompanzasyonundan sonraki reaktif güç de,

$$Q_2 = P_1 \cdot \tan \varphi_2 \quad (2.12)$$

olarak ifade edilir. Buna göre gerekli olan kondansatör gücü,

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = P_1 \cdot (\tan \varphi_1 - \tan \varphi_2) \quad (2.13)$$

olarak bulunur.



Şekil 2.2 İletilen görünür gücün azaltılması durumundaki fazör diyagramı

b) S_1 gücünün sabit olması durumu

S_1 gücünün sabit olması durumunda yapılan reaktif güç kompanzasyonunda Şekil 2.3' de gösterildiği gibi sistemden çekilen aktif güç artmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonundan önceki reaktif güç,

$$Q_1 = S_1 \cdot \sin \varphi_1 \quad (2.14)$$

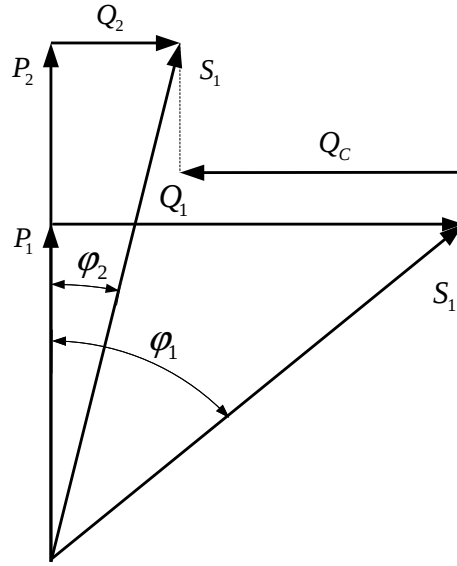
olarak ifade edilir. Ayrıca reaktif güç kompanzasyonundan sonraki reaktif güç de,

$$Q_2 = S_1 \cdot \sin \varphi_2 \quad (2.15)$$

olarak ifade edilir. Buna göre gerekli olan kondansatör gücü,

$$Q_C = Q_1 - Q_2 = S_1 \cdot (\sin \varphi_1 - \sin \varphi_2) \quad (2.16)$$

olarak bulunur.



Şekil 2.3 İletilen aktif gücün azaltılması durumundaki fazör diyagram

2.3 Reaktif Güç Kompanzasyonunun Temel Prensipleri

Lineer bir devrede reaktif güç, anlık gücün bileşeni olarak tanımlanır. AA güç kaynağı tarafından üretilen reaktif güç bir yarı periyot boyunca bir kondansatör veya bir reaktörde biriktirilir ve sonraki yarı periyotta güç kaynağına geri gönderilir. Diğer bir deyişle, reaktif güç, AA güç kaynağı ile kondansatör veya reaktör arasında ve aynı zamanda kondansatör ile reaktör arasında salınım yapar. Bu nedenle, endüktif veya kapasitif yük ve kaynak arasındaki sirkülasyondan kaçınmak, güç sisteminin gerilim kararlılığını geliştirmek için VAR

generatörleri kullanarak reaktif güç kompanzasyonu yapılır. Reaktif güç kompanzasyonu, paralel ve seri bağlı VAR generatörleri ile gerçekleştirilir.

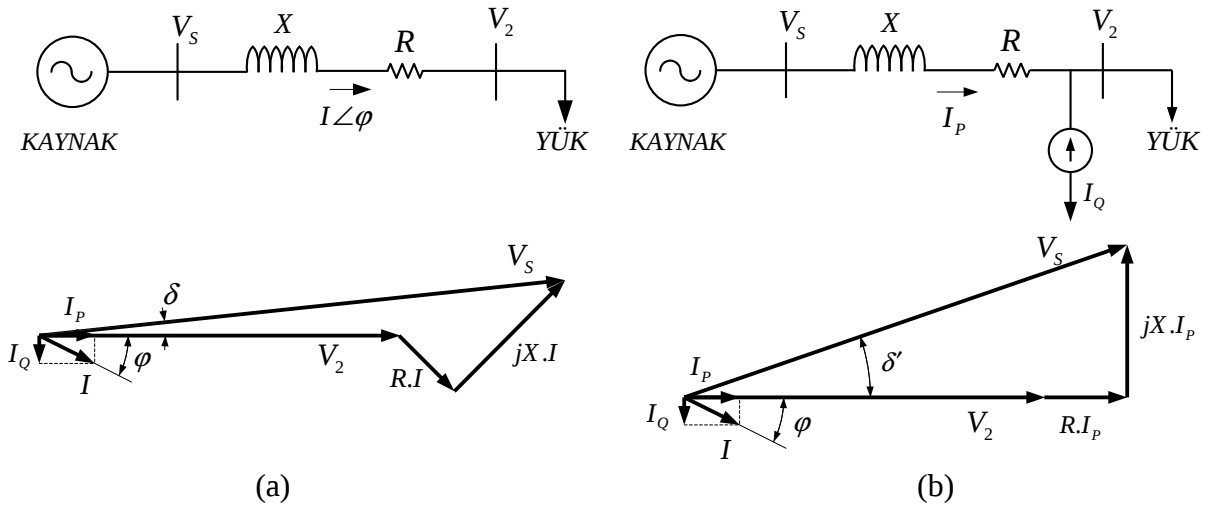
Paralel ve seri reaktif güç kompanzasyonun prensipleri sonraki iki bölümde anlatılmaktadır (Dixon vd., 2005).

2.3.1 Paralel Kompanzasyon

Şekil 2.4' te, bir gerilim kaynağı ile bir güç hattı ve tipik bir endüktif yükten oluşan temel bir AA güç sistemine uygulanan paralel reaktif güç kompanzasyonunun basit modeli ve fazör diyagramı gösterilmektedir. Şekil 2.4(a)' da reaktif güç kompanzasyonunun olmadığı sistem ve ona ait fazör diyagramı gösterilmektedir. Yükün endüktif karaktere sahip olması sonucunda, kaynaktan reaktif güç çekilecek, dolayısıyla kaynaktan çekilen ve hatlardan geçen akım artacaktır. Eğer reaktif güç yüke yakın bir noktadan çekilirse, güç kayıpları azaltılıp, yükteki gerilim dalgalanması azaltılacaktır. Böylece hat akımı minimize edilecektir. Bunun gerçekleştirilebilmesi

1. Bir kondansatör,
2. Bir gerilim kaynağı ve
3. Bir akım kaynağı

kullanılarak sağlanabilir.



Şekil 2.4 Temel bir AA güç sisteminde (a) kompanzasyonsuz ve (b) paralel kompanzasyonlu durumda basit güç sistemi modeli ile fazör diyagramı

Şekil 2.4(b)' de gösterildiği gibi, yük akımının reaktif bileşeni I_Q 'yu dengelemek için, bir akım kaynağı kullanılıyor. Sonuç olarak, sistemin gerilim dalgalanması azalır ve kaynaktan çekilen reaktif akım bileşeni azaltılır ya da yok edilir.

Eğer AA güç sisteminde kapasitif karakteristikte yük varsa bir endüktansa gereksinim duyulur. Bir akım kaynağı veya bir gerilim kaynağı, paralel kompanzasyon sistemi olarak kullanılabilir. Gerilim veya akım kaynağını, kondansatör veya endüktans yerine VAR generatörü olarak kullanmanın temel avantajı, üretilen reaktif gücün bağlantı noktasındaki gerilimden bağımsız olmasıdır (Dixon vd., 2005).

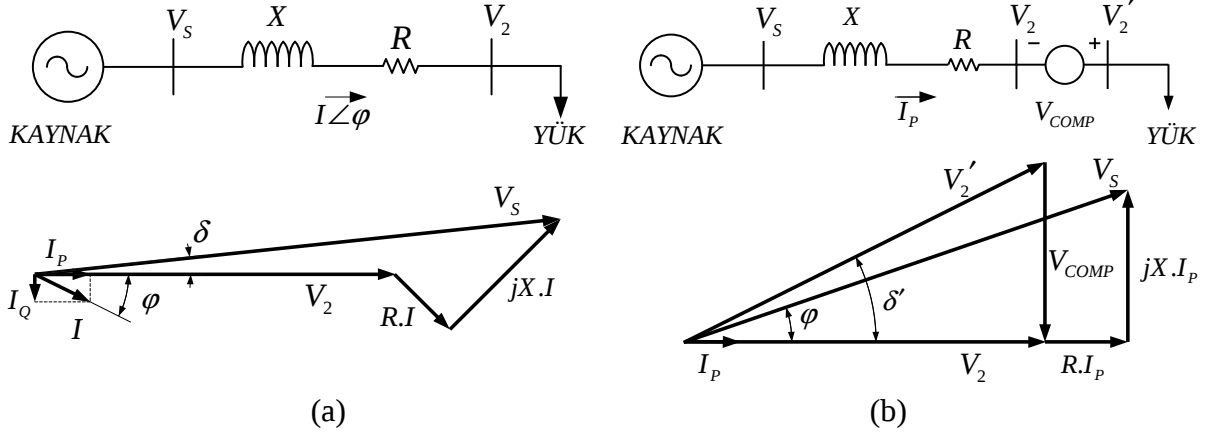
2.3.2 Seri Kompanzasyon

Seri kompanzasyon sistemlerinde, güç hattının eşdeğer reaktansını nominal frekanslarda azaltmak amacıyla kondansatörler kullanılmaktadır. Seri bağlı bir kondansatör hattın endüktif reaktansının çekeceği reaktif gücü sağlar. Seri kompanzasyonun sistemlerde kullanılmasının sağlayacağı yararlar aşağıda sıralanmıştır.

- Güç iletim sisteminin işlevselliği geliştirilir.
- Güç ve gerilim kararlılığı artırılır.
- Paralel devreler arasındaki güç paylaşımı optimize edilir.

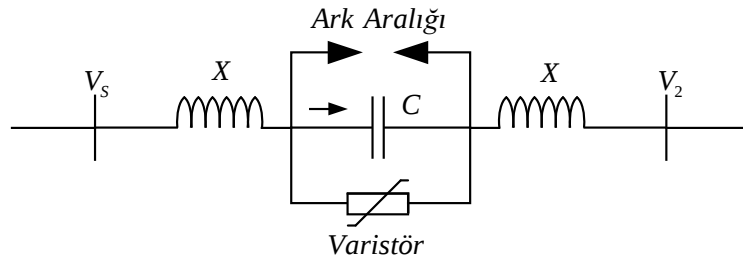
Seri kompanzasyon, Şekil 2.5(b)' de gösterildiği gibi, gerilim kaynağı kullanılarak gerçekleştirilir. Şekil 2.5(a), Şekil 2.4(a)' dakiyle aynı güç sistemini ve V_2 gerilimini göstermektedir. Şekil 2.5(b)' de V_2 gerilimindeki güç faktörüyle çalışmak için kullanılan ve gerilim kaynağıyla yapılmış seri kompanzasyona ait fazör diyagram gösterilmektedir.

Yük tarafındaki V_2' geriliminin açısını değiştirmek için V_{COMP} gerilim kaynağı, hat ve yük arasına ilave edilir. V_{COMP} ' un genliğinin uygun şekilde ayarlanmasıyla, istenilen güç faktörüne V_2 geriliminde erişilir. Şekil 2.5(b)' nin fazör diyagramından görülebileceği gibi, V_{COMP} hat endüktansında oluşan gerilim düşümüne zıt yönündedir.



Şekil 2.5 Temel bir AA güç sisteminde (a) kompanzasyonsuz ve (b) seri kompanzasyonlu durumda basit güç sistemi modeli ile fazör diyagramı

Kondansatörler, Şekil 2.6' da gösterildiği gibi, iletim hattıyla seri olarak kullanılırlar. Tüm donanımlar, sistem geriliminden tam olarak yalıtılmış bir platform üzerine kuruludur. Bu platformda ana kondansatör, aşırı gerilim koruma devreleri ile beraber kullanılır. Aşırı gerilim koruması önemli bir tasarım faktörüdür. Kondansatör grubunu oluşabilecek hata akımına karşı korur. Aşırı gerilim korumasında metal oksit varistör, bir ark boynuzu ve bir hızlı bypass anahtarı bulunur. Ayrıca koruma, yüksek gerilim devresindeki optik dönüştürücülerden gelen sinyallerle kontrol edilen ve toprağa bağlı koruma elemanları ile gerçekleştirilir (Dixon vd., 2005).



Şekil 2.6 Seri kondansatör ile gerçekleştirilen reaktif güç kompanzasyonu ve koruma sistemi

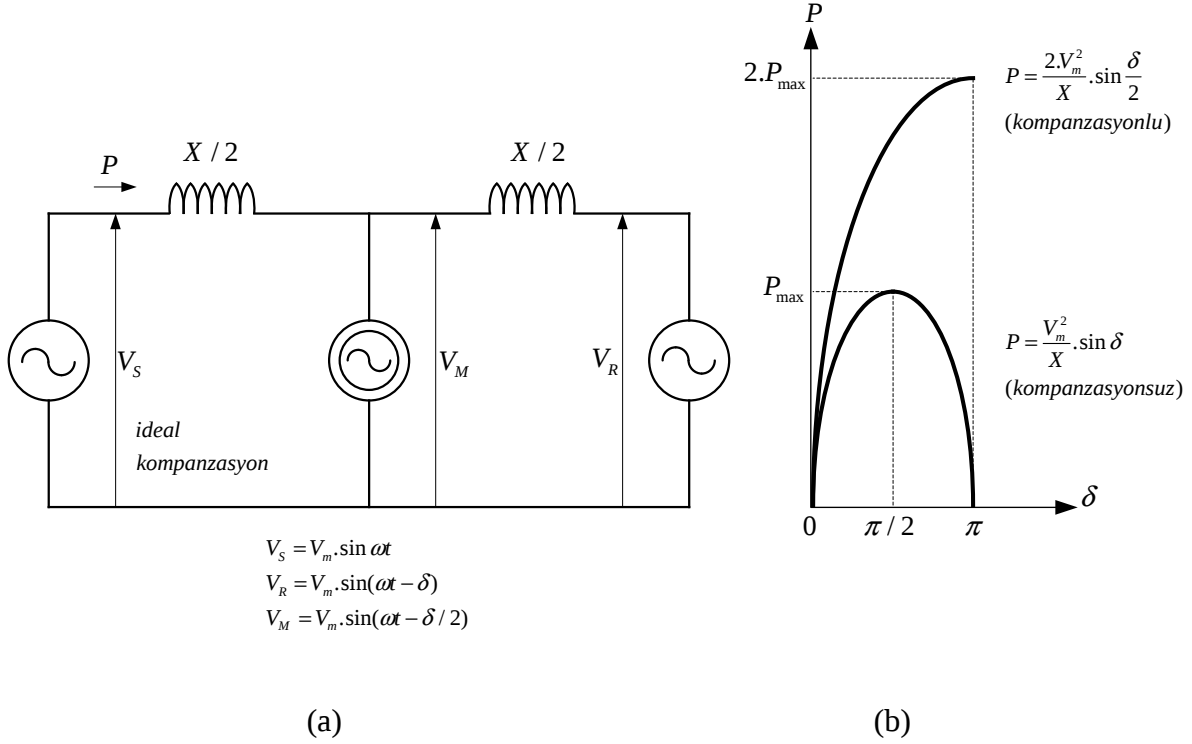
2.4 Reaktif Güç Kompanzasyonuna Gerek Duyulan Alanlar

Reaktif güç kompanzasyonuna gerek duyulmasının nedenleri aşağıda sıralanmıştır.

- Geçici durumları iyileştirmek.
- Güç dalgalanmalarını azaltmak.
- Gerilim kararsızlığını önlemek.

2.4.1 Geçici Kararsızlık Durumunun Geliştirilmesi

Şekil 2.1(a)'daki basit AA güç sistemi modelinin orta noktasına kontrol edilebilir ideal senkron gerilim kaynağı bağlanarak Şekil 2.7(a)'daki yeni model elde edilir (Gyugyi, 1988).



Şekil 2.7 Orta nokta reaktif güç kompanzasyon sistemine ait (a) iki makineli basit güç modeli ve (b) güç iletim karakteristiği

Eğer orta noktadaki gerilim değeri, hat başındaki ve hat sonundaki gerilim değerleriyle aynı değerde tutulabilirse, (2.10) eşitliği hattın her iki yarısı için de uygulanır. Sonuç olarak aşağıda gösterilen (2.17) eşitliği elde edilir.

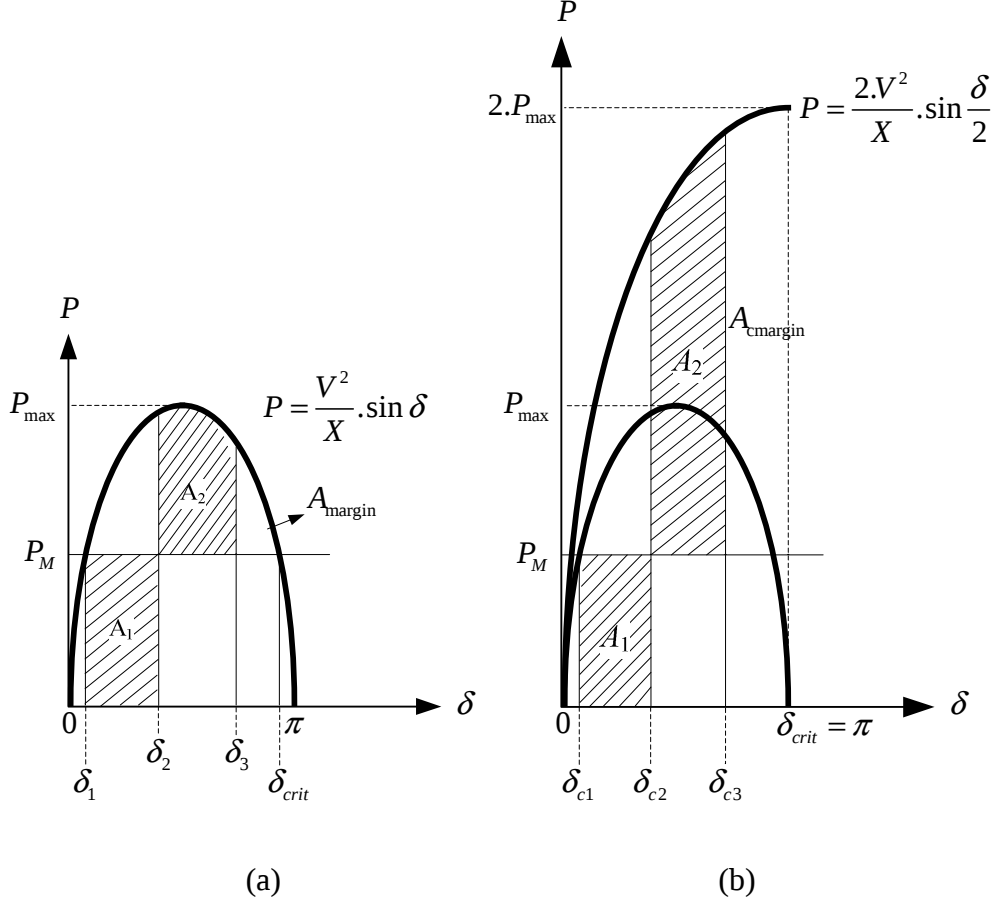
$$P = \frac{V_m^2}{X} \cdot \sin \frac{\delta}{2} \quad (2.17)$$

$\delta/2 = \pi/2$ değeri için elde edilen maksimum iletilebilir güç $2 \cdot V_m^2 / X$ ' dir. Mükemmel bir reaktif güç kompanzasyonu için iletim reaktansı "X" n tane eşit parçaya bölünebilir. Bu durumda güç iletimi teorik olarak aşağıda gösterilen (2.18) eşitliğiyle ifade edilecektir.

$$P = \frac{V_m^2}{X} \cdot \sin \frac{\delta}{n} \quad (2.18)$$

Paralel kompanzasyon sayesinde sistemlerin kararlı hal durumlarında önemli bir istikrar sağlanmaktadır. Bu durum, geçici hallerde oluşan kararsızlıkların giderilmesini sağlar. Şekil

2.1(a) ve 2.7(a)'daki basit AA güç sistem modellerinin her ikisine ait reaktif güç kompanzasyonunun olduğu ve reaktif güç kompanzasyonunun olmadığı durumlardaki iletilen güçleri Şekil 2.8(a) ve 2.8(b)'de gösterilmektedir.



Şekil 2.8 Önceden Şekil 2.1(a) ve 2.7(a)'da verilen basit güç sistem modellerine ait (a) kompanzasyonsuz ve (b) kompanzasyonlu durumdaki iletilen güç değişimi

Oluşabilecek bir geçici durum salınımlarından önce iki sistem P_M gücünü sırasıyla δ_1 ve δ_{c1} açılarında iletir (c “kompanzasyon” anlamına gelir). Geçici salınımlar süresince generatörlerin mekanik giriş gücü P_M sabit kalırken, elektriksel güçleri sıfır olur. Bu yüzden, generatörlerin kararlı hal açıları δ_1 ve δ_{c1} , salınımların giderildiği δ_2 ve δ_{c2} açılarına geçerler. İki sisteme ait enerjileri A_1 ve A_{c1} alanları tarafından gösterilmektedir. Salınımlar giderildikten sonra, generatörlerin elektriksel güçleri mekanik giriş güçlerini aşar ve yavaşlarlar. A_2 ve A_{c2} alanları tarafından tanımlanan enerjiler sırasıyla A_1 ve A_{c1} alanları tarafından tanımlanan enerjilere eşitlendiğinde, güç açıları δ_3 ve δ_{c3} ’e ulaşırlar (Gyugyi, 1988).

Eğer verilmiş bir güç düzeyi için salınımlar sonrası sistemin maksimum güç açısı (δ_3 veya δ_{c3}) kritik güç açısının (δ_{crit} veya δ_{ccrit}) altındaysa, sistemin geçici salınımları devam edecektir.

Şekil 2.8(a) ve 2.8(b)'nin mukayesesinden elde edilecek sonuçla, ideal paralel kompanzasyonun, geçici salınımlardaki önemli artışı karşılayabileceği görülmektedir. Buradaki “ideal” sıfatı, orta nokta geriliminin genliğinin sabit kaldığı anlamına gelir. Paralel kompanzasyon sayesinde iletilen güçte önemli şekilde artış sağlanmaktadır (Gyugyi, 1988).

2.4.2 Güç Dalgalanmalarının Azaltılması

Şekil 2.7.(a)'da gösterilen bir orta nokta kompanzasyon sistemli basit güç sistemi modeli için “Dönüş Denklemi” (2.19) ifadesinde gösterilmektedir (Gyugyi, 1988).

$$M \cdot \frac{d^2 \delta}{dt^2} = P_M - P_E \quad (2.19)$$

Burada, $P_M - P_E$ hızlandıran güçtür. Sabit mekanik güç P_M , orta nokta gerilimi V_M ve güç açısı δ kullanılarak, elektrik gücündeki değişiklik (2.20) eşitliğindeki gibi yazılır.

$$M \cdot \frac{d^2(\Delta \delta)}{dt^2} + \frac{\partial P_E}{\partial V_M} \cdot \Delta V_M + \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \cdot \Delta \delta = 0 \quad (2.20)$$

(2.20) eşitliğinde, eğer orta nokta gerilimi V_M sabitse, ΔV_M değeri sıfır olur. $\Delta \delta$ açısı aşağıda gösterilen (2.21) eşitliğindeki frekans ile sönümlenmeden dalgalanacaktır.

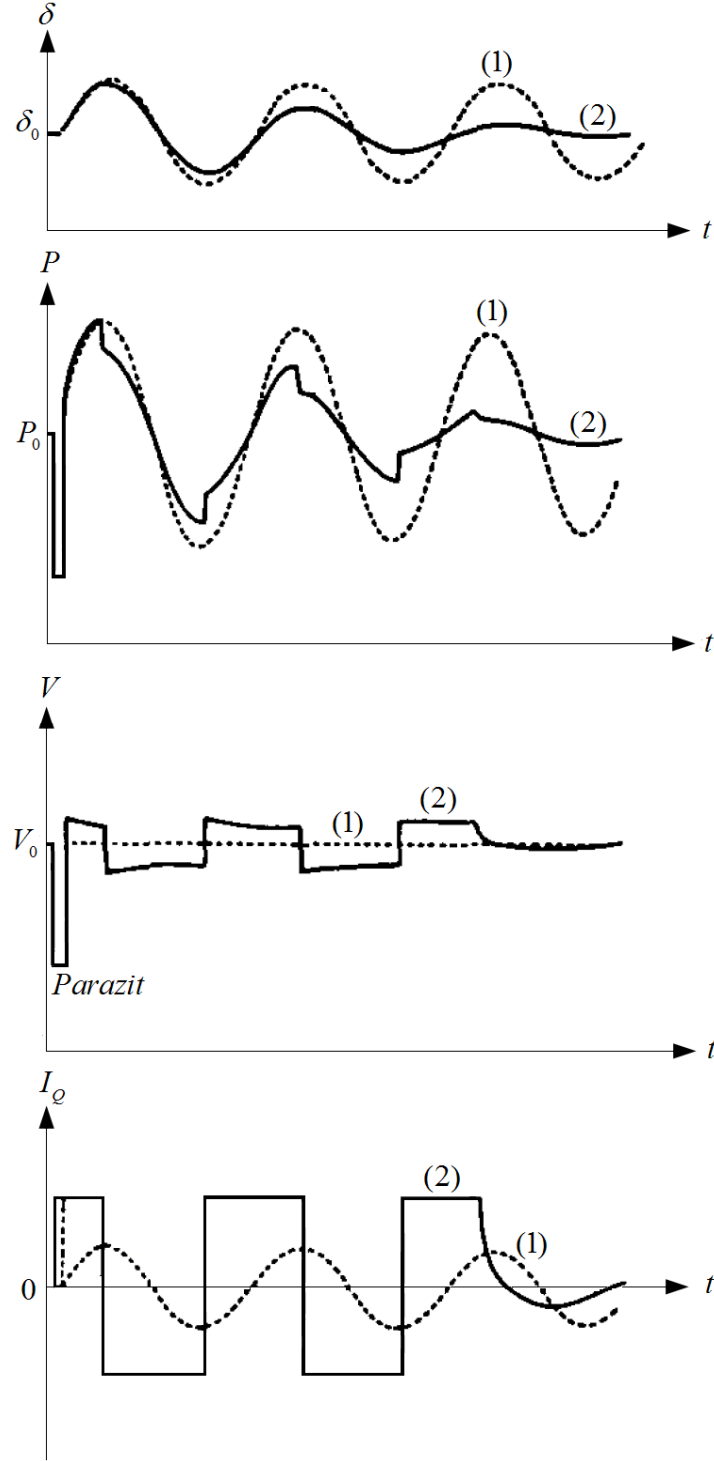
$$\omega_0 = \sqrt{\frac{1}{M} \cdot \frac{\partial P_E}{\partial \delta} \bigg|_0} \quad (2.21)$$

Sönümlemeyi sağlamak için, orta nokta gerilimi $d(\Delta \delta)/dt$ 'nin bir fonksiyonu olarak değişmelidir. Bu da aşağıdaki (2.22) eşitliğiyle ifade edilmektedir.

$$\Delta V_M = K \cdot \frac{d(\Delta \delta)}{dt} \quad (2.22)$$

Orta nokta gerilimi, $d(\Delta \delta)/dt$ pozitif olduğu zaman artar, $d(\Delta \delta)/dt$ negatif olduğu zaman azalır.

Orta nokta kompanzasyon sisteminin çıkışındaki maksimum reaktif güç değerinin $d(\Delta \delta)/dt$ 'nin polaritesine göre kapasitif ve endüktif limitler arasında değişmesi, güçteki dalgalanmaların bastırılmasını sağlar.



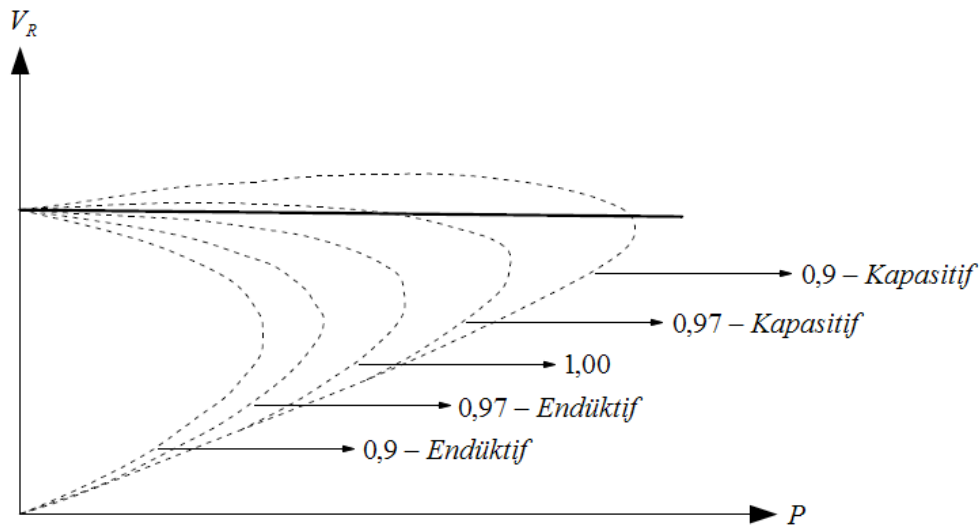
Şekil 2.9 Statik VAR kompanzasyon sisteminde güç dalgalanmalarının bastırılmasında (1) sadece gerilim ayarının yapıldığı ve (2) gerilimin $d(\Delta\delta)/dt$ 'nin bir fonksiyonu gibi kontrol edildiği durumlarının dalga şekilleri

2.4.3 Gerilim Kararsızlığının Önlenmesi

İletim hattının sonundaki gerilim, yüke, güç faktörüne ve hat empedansına bağlıdır. Şekil 2.10' da, kayıpların olmadığı bir hatta bağlı yükün geriliminin, güç faktörü ve güce bağlı değişimi gösterilmektedir.

İletim hatlarının, transformatörlerin, büyük kondansatör veya reaktör gruplarının devreye alınıp, çıkarılmaları ve yük değişimleri gibi durumlar sonucu tüketici gerilimlerinde dalgalanmalar oluşur. Bu durumda iletilebilecek maksimum güç değeriyle yükün gereksinimi olan güç karşılanamaz (Gyugyi, 1988; Jin vd., 1994).

Son tüketiciye, uygun güçte ve hızlı cevap verme yeteneği olan VAR generatörü bağlanarak, çekilen reaktif güç karşılanır. Böylece iletim hattı üzerinden iletilebilecek güç artırılır. Ayrıca, son tüketicide oluşan gerilim çökmesi engellenir ve tüketici gerilimi sabit bir değerde tutulur. Sabit gerilim Şekil 2.10' da sürekli çizgiyle gösterilmektedir.



Şekil 2.10 Tüketici geriliminin güç faktörü ve güce bağlı olarak değişimi

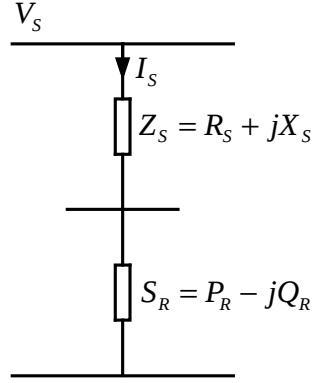
Kararlılığın geliştirilmesi, güç dalgalanmalarının bastırılması ve gerilim desteği için kullanılan statik VAR kompanzasyon (SVK) sistemlerinde aranan şartlar aşağıda özetlenmiştir (Gyugyi, 1988).

1. Tüm koşullar altında şebeke gerilimiyle senkronize olarak çalışmaya devam edebilmelidir.
2. AA güç sistemi için reaktif güç üreterek ya da çekerek, güç dalgalanmalarını bastırıp, şebeke gerilimini hızlıca kontrol edebilmelidir.

2.5 Reaktif Güç Kompanzasyonunun Yararları

2.5.1 Gerilim Düşümünün Azalması

Tek fazlı güç sistemin ve buna bağlı bir yükün eşdeğer devresi Şekil 2.11' de gösterilmektedir (Miller, 1982).

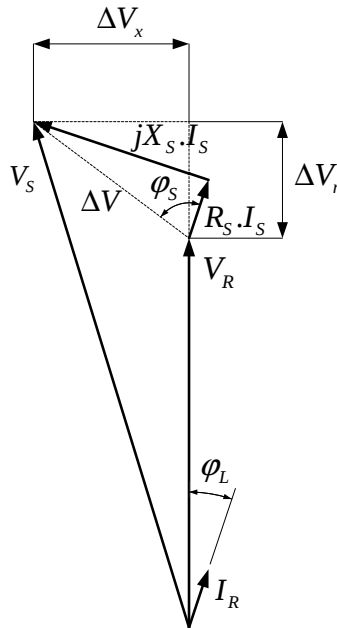


Şekil 2.11 Tek fazlı sistemin Thevenin eşdeğeri

Bu devredeki gerilim regülasyonu aşağıdaki (2.23) eşitliğiyle ifade edilir.

$$u = \frac{|V_S| - |V_R|}{|V_S|} \quad (2.23)$$

Şekil 2.11' deki tek fazlı devreye ait fazör diyagramı Şekil 2.12' de gösterilmektedir.



Şekil 2.12 Kompanze edilmemiş tek fazlı sisteme ait fazör diyagramı

Reaktif güç kompanzasyon sisteminin olmadığı durumdaki yük akımı,

$$I_R = \frac{P_R - jQ_R}{V_R} \quad (2.24)$$

olarak yazılabilir. Fazör diyagramlardan yararlanarak aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

$$\Delta V = V_S - V_R = Z_S \cdot I_R \quad (2.25)$$

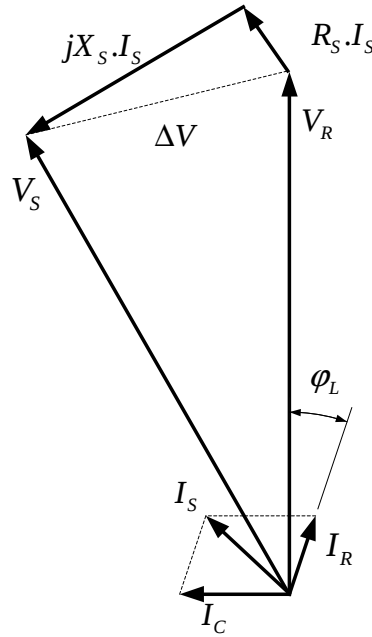
$$\Delta V = (R_S + jX_S) \cdot \left[\frac{P_R - jQ_R}{V_R} \right] \quad (2.26)$$

$$\Delta V = \left(\frac{R_S \cdot P_R + X_S \cdot Q_R}{V_R} \right) + j \left(\frac{X_S \cdot P_R - R_S \cdot Q_R}{V_R} \right) \quad (2.27)$$

$$\Delta V = \Delta V_r + j\Delta V_x \quad (2.28)$$

Yük gerilimi V_R 'nin, kaynak gerilimi V_S 'ye göre genliği ve faz açısı, yük akımının genliği ve faz açısına bağlıdır. Başka bir deyişle, gerilimdeki değişim yükün aktif ve reaktif gücüne bağlıdır (Miller, 1982).

Yüke paralel bir kondansatör bağlayarak $|V_S| = |V_R|$ koşulu gerçekleştirilebilir. Bunun anlamı, gerilim regülasyonu u 'un sıfır olmasıdır. Bu duruma ait fazör diyagram Şekil 2.13' de gösterilmektedir.



Şekil 2.13 Kondansatörlü durumda tek fazlı sisteme ait fazör diyagramı

Kondansatörün akımı I_C ile ifade edilir ve sistemin akımı,

$$\vec{I}_S = \vec{I}_R + \vec{I}_C \quad (2.29)$$

olur. Reaktif güç, yükün ve kondansatörün reaktif güçlerinin toplamına eşit olacaktır. Bu durumda,

$$Q_S = Q_R + Q_C \quad (2.30)$$

eşitliği yazılabilir. (2.25) ve (2.27) eşitlikleri kullanılarak,

$$|V_S|^2 = \left[V_R + \frac{R_S \cdot P_R + X_S \cdot Q_R}{V_R} \right]^2 + \left[\frac{X_S \cdot P_R - R_S \cdot Q_R}{V_R} \right]^2 \quad (2.31)$$

eşitliği elde edilir.

Q_C değeri, (2.31) eşitliğinde $|V_S| = |V_R|$ ifadesinden yararlanarak göre Q_S 'nin çözülmesiyle bulunabilir. Bunun için ilk olarak (2.29) eşitliği (2.32) eşitliğinde gösterildiği gibi yazılır.

$$Q_C = Q_S - Q_R \quad (2.32)$$

(2.31) eşitliği uygun şekilde düzenlenerek $a.Q_S^2 + b.Q_S + c = 0$ biçimine getirilir. Buradaki a,b,c katsayıları aşağıda gösterilmektedir.

$$\left. \begin{aligned} a &= R_S^2 + X_S^2 \\ b &= 2.X_S.V_R^2 \\ c &= P_R^2.X_S^2 - V_S^2.V_R^2 + (V_R^2 + R_S.P_R)^2 \end{aligned} \right\} \quad (2.33)$$

Buradan,

$$Q_S = \frac{-b \pm \sqrt{b^2 - 4.a.c}}{2.a} \quad (2.34)$$

(2.32) ve (2.33) eşitlikleriyle birlikte (2.34) eşitliğinden yararlanarak Q_C hesaplanır. Saf bir reaktif güç kompanzasyon sistemi, yükün aktif ve reaktif gücünün değişmesi ile ortaya çıkan gerilim değişimlerini karşılayabilir. Bunun dışında eğer reaktif güç kompanzasyon sistemi sadece güç faktörünü düzeltecek şekilde tasarlanırsa, $Q_S = 0$ olacaktır. (2.27) eşitliğinde Q_R ifadesinin yerine Q_S ifadesi gelir ve $Q_S = 0$ için aşağıdaki (2.35) eşitliği elde edilir.

$$\Delta V = \frac{R_S.P_R + X_S.P_R}{V_R} \quad (2.35)$$

(2.35) eşitliği Q_R ' den bağımsızdır. Ancak reaktif güç kompanzasyon sistemi, gerilimin sabit tutulmasını ve güç faktörünün 1 yapılmasını aynı anda sağlayamamaktadır.

Güç sistemlerinde gerilim kontrolü, generatörler ve transformatörlerin gerilim kademeleri ile yapılır. Bunlar yeterli değil ise reaktif güç kompanzasyonuna gidilmelidir.

2.5.2 Sistem Kayıplarının Azalması

AA güç sistemlerindeki $I^2.R$ şeklindeki kayıpların tüm sistemin gücüne oranı %2,5 ile %7,5 arasında bir değerdedir. Kayıplar akımın karesine, akım da güç faktörüne bağlı olduğundan, kayıplar güç faktörünün karesiyle ters orantılıdır (Gyugyi, 1988).

Reaktif güç kompanzasyonundan önceki ve sonraki durumlar sırasıyla 1 ve 2 indisi ile gösterilirse, kayıp güçler,

$$P_{Z1} = I^2.R = R \cdot \frac{P^2}{V_m^2 \cdot \cos^2 \phi_1^2} \quad (2.36)$$

$$P_{Z2} = I^2.R = R \cdot \frac{P^2}{V_m^2 \cdot \cos^2 \phi_2^2} \quad (2.37)$$

olarak ifade edilir. Bu iki kayıp gücün farkı,

$$\Delta P_Z = \frac{R.P^2}{V_m^2} \cdot \left[\frac{1}{\cos^2 \phi_1^2} - \frac{1}{\cos^2 \phi_2^2} \right] \quad (2.38)$$

olarak yazılabilir. (2.38) eşitliği reaktif güç kompanzasyonundan önceki kayıp güce oranlanırsa,

$$\frac{\Delta P_Z}{\Delta P_{Z1}} = 1 - \frac{\cos^2 \phi_1^2}{\cos^2 \phi_2^2} \quad (2.39)$$

eşitliği elde edilir. Bu formülde de kayıpların, güç faktörünün karesi oranında azaldığı görülmektedir.

Eğer güç faktörü düzeltilerek sistem kapasitesinde bir artış sağlanacaksa, aktif gücün de değeri artacaktır. Bu artışla orantılı olarak kayıplar azalacaktır.

2.5.3 Tesisin Yükleme Kapasitesinin Artması

Reaktif güç kompanzasyonu, reaktif akım kurulan reaktif güç kompanzasyon sistemi aracılığı ile karşılanacağı için, şebekeden daha düşük değerde akım çekilecektir. Bunun sonucu olarak da transformatörler ve hatlar daha az yüklenecektir. Ayrıca aşırı yüklenmeler önlenmiş olacaktır. Aşırı yüklenme durumu yoksa tesisin yüklenme kapasitesi artmış olacaktır (Gyugyi, 1988).

AA güç sisteminin çekmiş olduğu aktif güç sabit ise, reaktif güç kompanzasyonundan önceki görünür gücü,

$$S_1 = \frac{P}{\cos \varphi_1} \quad (2.40)$$

ve reaktif güç kompanzasyonundan sonraki görünür güç,

$$S_2 = \frac{P}{\cos \varphi_2} \quad (2.41)$$

olarak ifade edilir. Bu iki güç arasındaki fark da,

$$\Delta S = S_1 - S_2 \quad (2.42)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Bu farkın S_1 gücüne oranı ise,

$$\frac{\Delta S}{S_1} = 1 - \frac{\cos \varphi_1}{\cos \varphi_2} \quad (2.43)$$

şeklindedir. (2.43) ifadesinden sistemin kapasitesindeki artışın güç faktörü ile orantılı olduğu görülmektedir.

2.6 Reaktif Güç Kompanzasyonunun Bugünü

Reaktif güç kompanzasyonu, şebekeden çekilen reaktif gücü azaltarak, hem sistem hem de güç kalitesiyle ilgili tüketici problemlerinin çözülmesinde önemli bir rol oynamaktadır. Genellikle, reaktif güç kompanzasyonuna iki açıdan bakılabilir, birincisi yük kompanzasyonu, diğeri de gerilim desteğidir (Dixon vd., 2005).

Yük kompanzasyonundaki hedefler aşağıda sıralanmaktadır (Dixon vd., 2005).

- Güç faktörünün değerini artırmak.
- AA güç kaynağından çekilen gerçek gücü dengelemek.
- Gerilim dalgalanmasını dengelemek.

- Büyük, değişken ve lineer olmayan yükler tarafından üretilen akım harmoniklerini minimize etmek.

Gerilim desteği, bir iletim hattının belirli bir terminalinde gerilimin düzensiz değişimini azaltmak için gereklidir. İletim sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonu iletilebilecek maksimum aktif gücü artırarak, AA güç sisteminin kararlılığını geliştirir. Aynı zamanda, iletim verimliliğini artırır (Gyugyi, 1988; Dixon vd., 2005).

Seri ve paralel reaktif güç kompanzasyonu, AA güç sistemlerinin olağan elektriksel karakteristiklerinde çalışmalarını sağlamak için kullanılır. Paralel kompanzasyon yükün eşdeğer empedansını değiştirirken, seri kompanzasyon iletim veya dağıtım sistem parametrelerini düzenler. Her iki durumda da, sistem tarafından çekilen reaktif güç karşılanarak, AA güç sisteminin performansı geliştirilir.

Reaktif güç kompanzasyonu için geleneksel olarak, senkron generatör, sabit veya mekanik anahtarlama kondansatör ve endüktanslar kullanılır. Ayrıca gerekli reaktif gücü sağlamak veya reaktif güç çekmek için tristör anahtarlama kondansatörler (TAK) ve tristör kontrollü reaktörler (TKR) geliştirilmiştir.

Statik VAR kompanzasyon sistemleri, güvenilir ve yüksek hızlı güç elektroniğinin kullanımıyla, ileri seviyede kontrol teknolojilerine dayalı olarak geliştirilmektedir (Dixon vd., 2005).

3. STATİK VAR KOMPANZASYONU

3.1 Esnek AA İletim Sistemleri

Son yıllarda tristör kontrollü reaktif güç kompanzasyon sistemleri, gerek endüstriyel sistemlerin güç katsayılarının bire yakın bir değerde tutulmasında, gerekse sistem geriliminin kararlılığının artırılmasında yaygın olarak kullanılmaya başlanmıştır.

Uygulamalarda karşılaşılan kompanzasyon problemlerinden biri, büyük ve dengesiz yükler tarafından çekilen reaktif güçteki hızlı değişimleri karşılama zorluğudur. Yük kompanzasyonu amacıyla alışlagelmiş yöntemler yerine, “Esnek AA İletim Sistemleri - FACTS (Flexible AC Transmissions Systems)” olarak ifade edilen modern kompanzasyon yöntemlerinin kullanımı uygun bir çözümdür. FACTS’ ler sahip oldukları, hızlı cevap verebilme, her fazı ayrı ayrı kontrol edebilme ve dolayısıyla dengesiz yükleri kompanze edebilme yetenekleriyle, yukarıda bahsedilen problemin çözümü olurlar (Sezgin, 2003; Kara ve Yalçınöz, 2005).

En genel tanımıyla FACTS’ ler, şebeke gerilimiyle güç elektroniği elemanlarını ve metotlarını birleştiren elektronik yapılardır. FACTS teknolojisinin enerji sistemindeki uygulamalarında gerekli standartların oluşması, FACTS cihazlarının tasarım ve işletmesinde dikkat edilmesi gereken hususların belirlenmesi için 1980’ den bu yana Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute), CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques) ve birçok kuruluş çalışmalar yapmaktadır (Gelen ve Yalçınöz, 2007).

3.2 Esnek AA İletim Sistemlerinin Avantaj ve Dezavantajları

Esnek AA iletim sistemlerinin avantajları aşağıda sıralanmıştır (Kara vd., 2005).

- Güvenli sistemler sunar.
- Sistemin bakımı ve onarımı kolaydır.
- Verimli enerji iletimi sağlar.
- Mevcut sistemlere uygulanmaları kolaydır.
- Şu an kullanılan iletim hatları üzerinde de kullanılabilir.
- Çok hızlı kontrol sağlar.

Esnek AA iletim sistemlerinin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır (Kara vd., 2005).

- Kullanılan elemanlar ülkemiz için pahalı ve ithalata dayalıdır.

- Sistemlerin tasarımını, kuruluşunu, bakımını ve onarımını yapacak yetişmiş eleman sayısı sınırlıdır.
- Yarı iletken elemanlarda oluşan kayıplar sonucu ısınmalar meydana gelir. Bunun için ek donanım gerekir.
- FACTS sistemlerin temelini oluşturan yarı iletken elemanların kontrolü için tetikleme sinyallerine ihtiyaç vardır. Bu tetikleme sinyalleri ilave elektronik devreler ile sağlanmalıdır.
- FACTS teknolojisi yüksek gerilimlerde kullanıldığından elemanların izolasyonu problem olmaktadır.

3.3 Esnek AA İletim Sistem Cihazları

Enerji iletim sistemleri için başlıca FACTS cihazları, SVK (Statik VAR Kompanzasyonu Sistemi), STATKOM (Statik Senkron Kompanzasyonu Sistemi), TSKS (Tristör Kontrollü Seri Kondansatör), SSSK (Statik Senkron Seri Kompanzasyon Sistemi), TKFAR (Tristör Kontrollü Faz Açık Regülatörü) ve BGAK (Birleştirilmiş Güç Akış Kontrolörü) şeklinde sıralanabilir (Gyugyi, 1988; Jin vd., 1994; Kara vd., 2005; Muñoz vd., 2007).

Sonraki bölümlerde, SVK' lara ait bilgiler verilmektedir.

3.4 Statik VAR Kompanzasyonu

Devreye alma ve devreden çıkarma işlemleri, faz – faz, faz – toprak kısa devreleri gibi hata akımları ve diğer karışıklıklar sonucu reaktif güç ve gerilimde hızlı değişimler oluşur. Bu durum güç sistemlerinde aktif güç talebinde ani değişimlere neden olur. Aktif güç talebindeki ani değişimler, güç üreticilerinin hızlarında değişimlere, geçici frekans ve güç salınımlarına, gerilim yükselmelerine, toplam kayıpların artmasına ve hatta güç sistemlerinde deformasyonlara sebep olur.

Güç faktöründeki ve yükteki değişimler, iletim hatları ile son kullanıcı gerilimlerinin genliklerinde değişikliklere neden olurlar. Yüklerin çoğu, gerilim değişimlerine karşı toleranslı değildir. Gerilim seviyesindeki azalma, indüksiyon motorları, aydınlatma armatürleri gibi yüklerin performanslarında düşüşlere neden olurken, gerilim seviyesindeki artış, manyetik doyum ve harmonik oluşumuna neden olurlar. Ayrıca gerilim seviyesindeki artış yalıtım sorunlarına neden olabilir. Bu yüzden malzemelerde delinmeler ve izolasyon sorunları ortaya çıkar. Bir diğer önemli sorun da, reaktif güç ile birlikte iletim kayıplarının artmasıdır.

Sabit ya da anahtarlama paralel kondansatörler ve reaktörler kullanarak, iletim ve dağıtım hatları boyunca gerilim genliği sabit tutulur, bununla birlikte talep edilen güçteki değişimlere rağmen gerilim dalgalanmaları minimize edilir.

Son yıllarda, enerji, çevre ve fiyat problemlerindeki öncelikler üretim tesislerinin ve yeni iletim hatlarının kurulmalarında sorunlara neden olmaya başlamıştır. Bu da, geleneksel güç sistemi fikir ve alışkanlıklarında bir değişiklik meydana getirerek, güç sistemlerinden daha iyi yararlanmayı zorunlu hale getirmiştir. Güç sistemlerinin birbirleriyle bağlanması ve reaktif güç kompanzasyonu ile iletilen güç artırılır. Böylece güç üretim kapasitesinden daha iyi yararlanılır.

Teknolojideki gelişmelerle gelişen pazar ihtiyaçlarına cevap vermeye çalışılmış, ilerleyen yarı iletken ve kontrol teknolojileriyle, statik VAR kompanzasyonunda önemli gelişmeler sağlanmıştır. 70' lerden önce, ark fırını kompanzasyonu için çalışmalar yapılmış ve kısa bir süre sonra bu çalışmalar iletim sistemlerinin kompanzasyonu için kullanılmıştır.

İlk statik VAR kompanzasyonu, 1978' de Minnesota Güç ve Aydınlatma sisteminin Shannon İstasyonunda (Shannon Substation of the Minnesota Power and Light (MP&L)) 40 MVar değerinde kurulmuştur. 1978' den beri, güç sistemi uygulamalarında statik VAR kompanzasyonunun kullanılmasında artış olmuştur. 2000' li yılların başına kadar, kurulu halde 41 tane iletim hattı kompanzasyonu ve bu sayının da üzerinde henüz tasarımı devam eden projeler vardı (Gyugyi, 1988).

3.4.1 Statik VAR Kompanzasyonunun Temel Özellikleri

Statik VAR kompanzasyon sistemleri temel olarak, kondansatör ve ayarlanabilen bir reaktörden oluşmaktadır. Sürekli olarak reaktif güç üretebilen veya çekebilen, cevap verme süresi yüksek olan, sınırsız bir aralıkta çalışabilen, güvenli ve işletme esnekliğine sahip cihaz olarak tanımlanabilir.

3.4.2 Statik VAR Kompanzasyonu Kullanımının Faydaları

AA güç sistemlerine statik VAR kompanzasyon sistemlerinin kullanılmasının getireceği yararlar aşağıda sıralanmıştır (Gyugyi, 1988; Jin vd., 1994; Dixon vd., 2005).

- İletim hatlarının kararlı durumdaki aktif güç iletim kapasiteleri artar.
- Değişken yük durumu ve hattın devreye alınması gibi çalışma şartlarında gerilim dalgalanması minimize edilir.

- Her faz ayrı ayrı kompanze edilebilir (dengesiz yükler için avantajlı).
- Yüksek emniyet sağlayarak, güvenlik artar.
- Yüksek verim sağlayarak, kayıplar azaltılır.
- Düşük hacim sayesinde yüksek güç yoğunluğu sağlanır.
- Cevap verme süresinin kısalmasıyla hızlı kontrol sağlanır.
- Kondansatörler, gerilimlerinin sıfır geçiş noktalarında tristörlerle devreye alınırlar, böylece kontaktörlü sistemlerde oluşan piklerin meydana gelmesi engellenir.

3.4.3 Statik VAR Kompanzasyonunda Güç Akışı Analizi

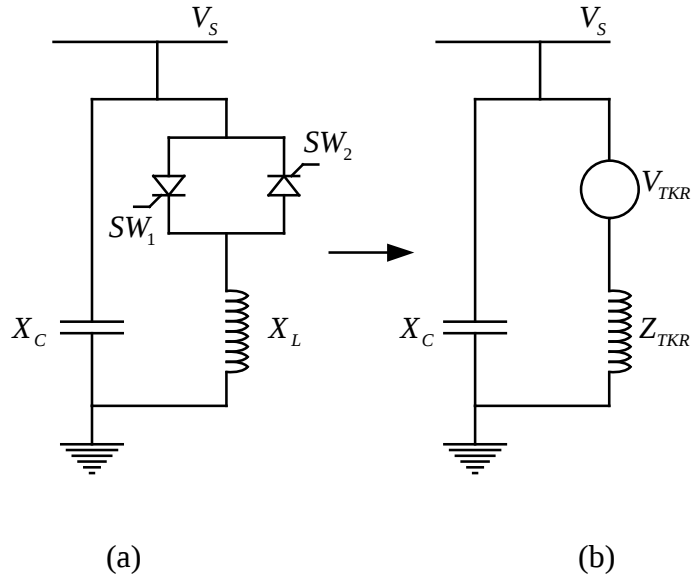
SVK' yla AA güç sisteminin paralel reaktansı ayarlanarak, gerilim ve reaktif güç kontrolü gerçekleştirilir. SVK' nın iki popüler konfigürasyonu, tristör kontrollü reaktör (TKR) ile sabit kondansatör (SK) kombinasyonu ve tristör kontrollü reaktör (TKR) ile tristör anahtarlama kondansatör (TAK) kombinasyonudur. Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör (TKR SK) modeli Şekil 3.1(a)' da gösterilmektedir.

Güç akış analizinde, SVK' nın toplam süseptansı, gerilim ve reaktif güç kontrol denklemi için temel alınacaktır. Şekil 3.1(a)' daki SVK modeli, güç akış analizi için Şekil 3.1(b)' de gösterilen eşdeğer devreye dönüştürülür (Zhang, Rehtanz ve Pal, 2006).

Şekil 3.1(b)' deki Z_{TKR} ifadesi

$$Z_{TKR} = j(X_{TKRmin} + X_{TKRmax}) / 2 \quad (3.1)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Burada, X_{TKRmin} ile X_{TKRmax} Şekil 3.1' de TKR kolunun değişken reaktansının alt ve üst sınırlarıdır. Şekil 3.1(a)' daki TKR kolunun değişken reaktansı Z_{TKR} empedansı ile değişken gerilim kaynağı V_{TKR} birbiriyle seridir.



Şekil 3.1 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) güç akış analizi için eşdeğer gösterimi

Değişken gerilim kaynağı V_{TKR} ' ın alt ve üst sınırları aşağıdaki (3.2) eşitliğinde verilmiştir.

$$V_{TKR\min} \leq V_{TKR} \leq V_{TKR\max} \quad (3.2)$$

TKR kolunun değişken reaktansı X_{TKR} ' nin alt ve üst sınırları aşağıdaki (3.3) eşitliğinde verilmiştir.

$$X_{TKR\min} \leq X_{TKR} \leq X_{TKR\max} \quad (3.3)$$

X_{TKR} ifadesi,

$$X_{TKR} = |V_{TKR} \cdot Z_{TKR} / (V_i - V_{TKR})| \quad (3.4)$$

eşitliğiyle ifade edilir.

3.4.4 Statik VAR Kompanzasyonunda Tüketiciye Verilen Gerilim

L dağıtım sisteminde uzun teller yüzünden kaynak endüktans, I_R kullanıcı tarafından çekilen ve genelde reel ve imajiner bileşenleri bulunan bir akım, V_S kaynak gerilimidir. Tüketiciye verilen gerilim (3.5) eşitliğinde ifade edilmektedir.

$$V_R = V_S - j \cdot \omega \cdot L \cdot I_R \quad (3.5)$$

(3.5) eşitliğindeki kullanıcı tarafından çekilen I_R akımı (3.6 eşitliğinde gösterilmektedir.

$$I_R = I_P - j \cdot I_Q \quad (3.6)$$

(3.6) eşitliğinden yararlanarak

$$V_R = V_S + \omega.L.I_Q - j.\omega.L.I_P \quad (3.7)$$

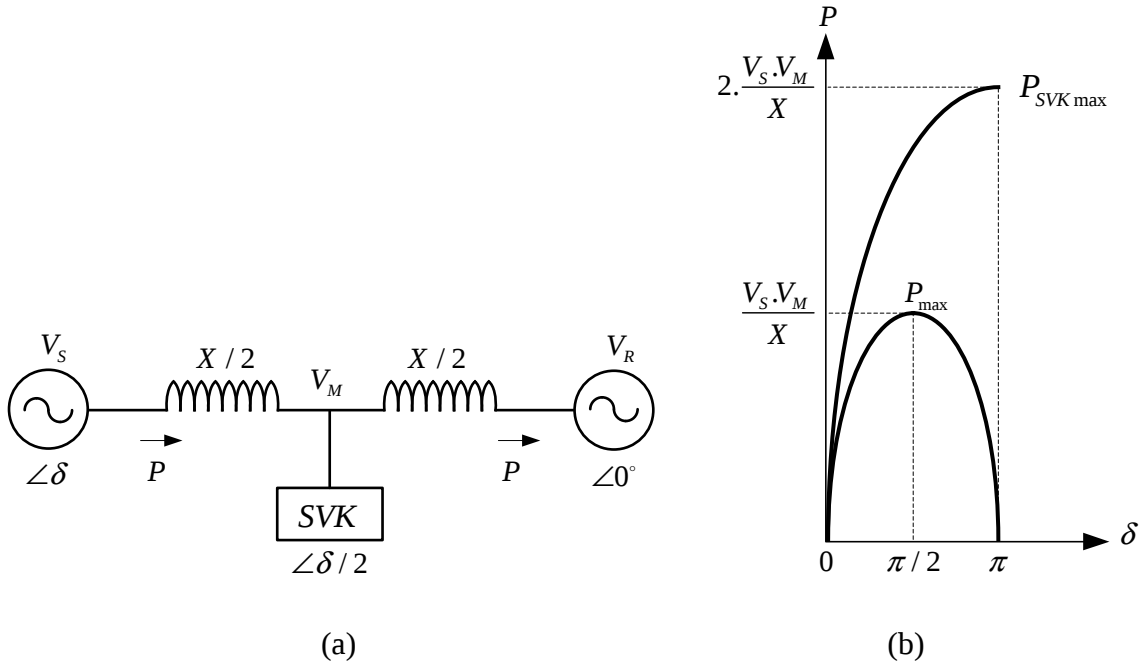
eşitliğini elde edebiliriz.

Yük akımının reaktif bileşeni I_Q , V_R geriliminin reel bileşenini doğrudan etkilemektedir. Diğer yandan yük akımının aktif bileşeni I_P , gerilimin genliğine çok büyük bir etkide bulunmaz. Dolayısıyla hat geriliminin genliği şebekeden çekilen reaktif güce bağlıdır. I_Q akımının kontrolüyle hat geriliminin kontrol edilmesi, statik VAR kompanzasyonunun bir görevidir. AA güç sistemleri tasarlanırken, gerilim genliğindeki değişim ve fazların dengeli yüklenmeleri dikkate alınır. Genellikle gerilim genliğindeki değişimin +5% ile -10% aralığında kalması istenir (Agrawal, 2000).

3.4.5 Paralel Statik VAR Kompanzasyonunun Prensibi ve Geçmişi

Paralel SVK' nın prensibi Şekil 3.2' de gösterilmektedir. Statik VAR kompanzasyon sistemi AA iletim hattının ortasında, reaktif güç üretir veya çeker.

Eğer eşit şekilde ikiye bölünmüş AA iletim hattı için V_M gerilimi, tüm güç seviyelerinde kontrol edilebilir ve sabit tutulabilirse, Şekil 3.2(b)' de gösterilen SVK' lı ve SVK' sıız durumlardaki güç ile güç açısı arasındaki ilişki elde edilir.



Şekil 3.2 AA iletim hattına ait (a) paralel statik VAR kompanzasyonu uygulanmış basit güç sistemi modeli ve (b) güç iletim karakteristiği

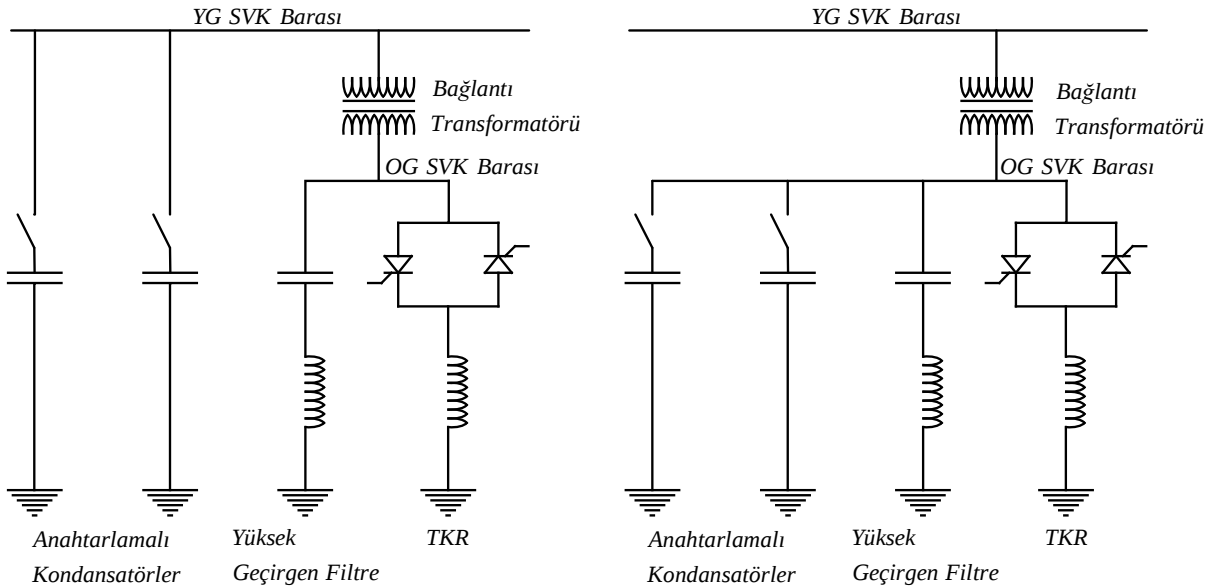
Şekil 3.2(a)' dan yararlanarak aşağıda gösterilen (3.8) eşitliği elde edilir.

$$P = \frac{V_S \cdot V_M}{\frac{X}{2}} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{V_M \cdot V_R}{\frac{X}{2}} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (3.8)$$

Şekil 3.2(b)' de SVK kullanılması sonucu, maksimum güç limiti $P_{\max}$ ' ın iki katı olan, teorik maksimum güç limiti $P_{SVK \max}$ ' a ulaşılmıştır. Hattın güç açısı bu güç seviyesinde yüksektir.

Statik VAR kompanzasyon sistemlerinin yaygın olarak kullanılmasından önce, gerilim kontrolü generatör terminallerinde yapılmaktaydı. Mekanik anahtarlama paralel reaktörler (MAR) ve kondansatörler (MAK), aşırı gerilimleri veya düşük gerilimleri sınırlayabilmekteydiler. Buna rağmen SVK' lar gibi, güç iletim karakteristiğini direkt etkileyebilecek yeterlilikte değiller.

Şekil 3.3' te mekanik anahtarlama kondansatör ve tristör kontrollü reaktör (MAK TKR) devre konfigürasyonları gösterilmektedir. Mekanik olarak anahtarlama kondansatörler yüksek gerilim barasına yerleştirilebilir, bununla beraber sabit harmonik filtreler transformatörün harmonik yüklemesini azaltmak için sekonder tarafta TKR ile paralel olarak kurulurlar (Song ve Jonhs, 1999).



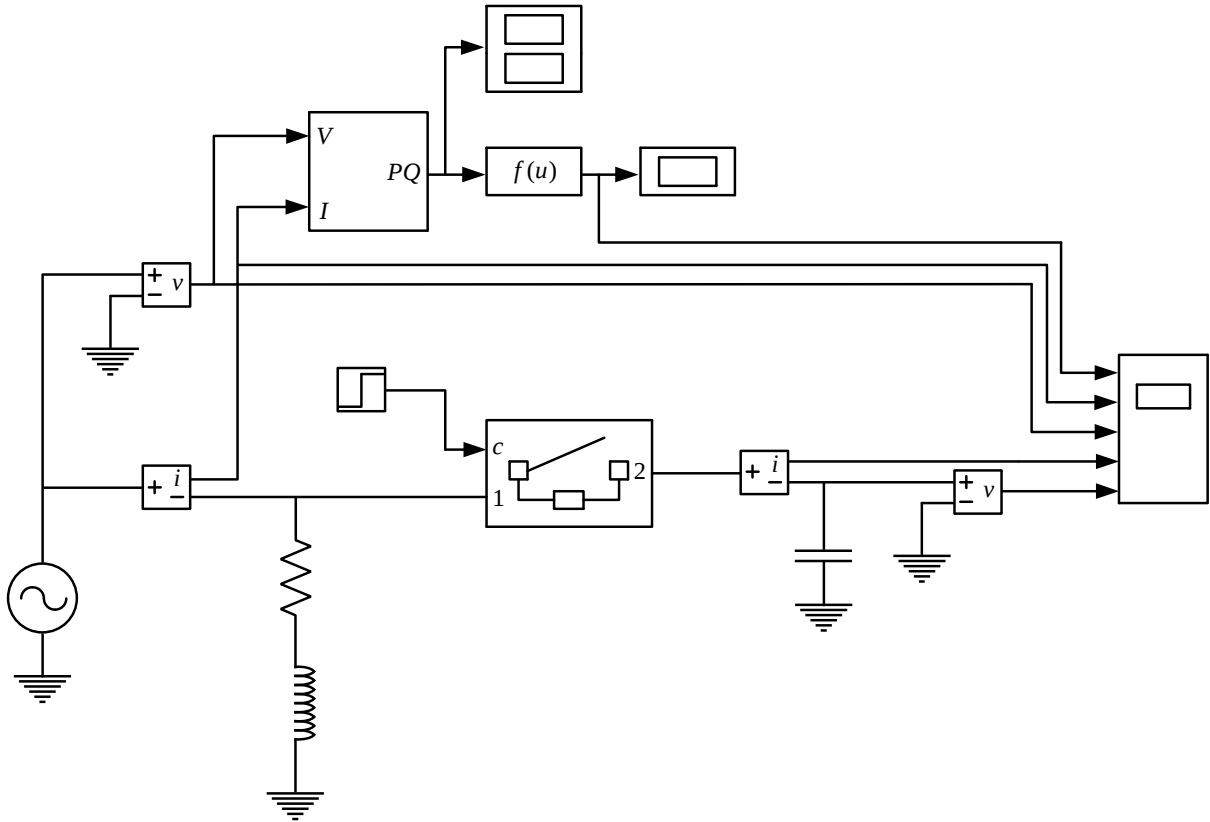
Şekil 3.3 Mekanik anahtarlama kondansatör ve tristör kontrollü reaktörün devre konfigürasyonları

MAK TKR' nin önemli bir dezavantajı, kondansatörün şarjlı kalmasıdır. Kondansatörler üzerindeki enerji, kondansatör üzerine yerleştirilmiş dirençler vasıtasıyla, yaklaşık 5 dakika içinde harcanır. Eğer kondansatör deşarj sırada tekrar devreye alınırsa, kondansatör içinde

kalan enerji anahtarlama sırasındaki geçici olaylarda artışa yol açar. MAK' lar, sadece kondansatörler enerjisiz oldukları zaman devreye alınırlar (Zhang vd., 2006).

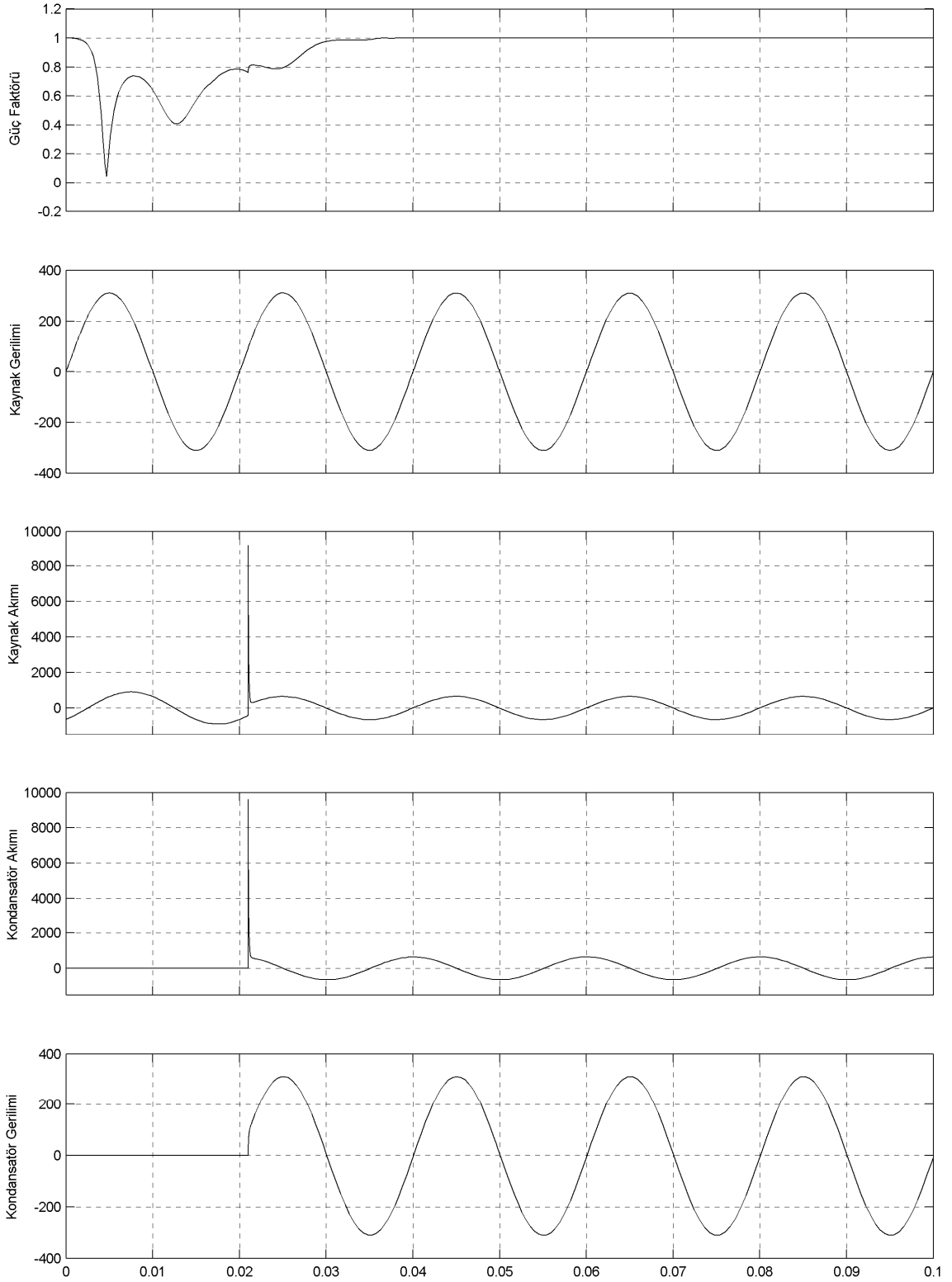
Mekanik anahtarlar 2000 ile 5000 arasında açma kapama yaparlarken, tristörler teorik olarak sonsuz anahtarlama yaparlar. Mekanik anahtarlar genellikle bir günde ikiyle dört arasında açma kapama yapar, ağır yük şartları altında ilettime girerler ve hafif yük şartları altında kesime girerler. Bir MAK TKR gerilim kontrol uygulamaları için çok uygun olmayabilir. Çünkü kondansatörler aşırı gerilimlere ve aşırı akımlara karşı hassastır (Dixon vd., 2005; Zhang vd., 2006).

Şekil 3.4' de mekanik anahtarlama yapısının Simulink programıyla yapılan incelemesi gösterilmektedir. Devrede basit yapılı standart bir kontaktör kullanılmıştır. Sistem iki koşulda incelenmiştir. İlki şebeke geriliminin sıfır geçiş noktasının yakınında oluşacak bir anahtarlama, diğeri de şebeke geriliminin maksimum olduğu nokta yakınında oluşacak bir anahtarlama.



Şekil 3.4 Mekanik anahtarlama kondansatörün simülasyonu için kullanılan Simulink devresi

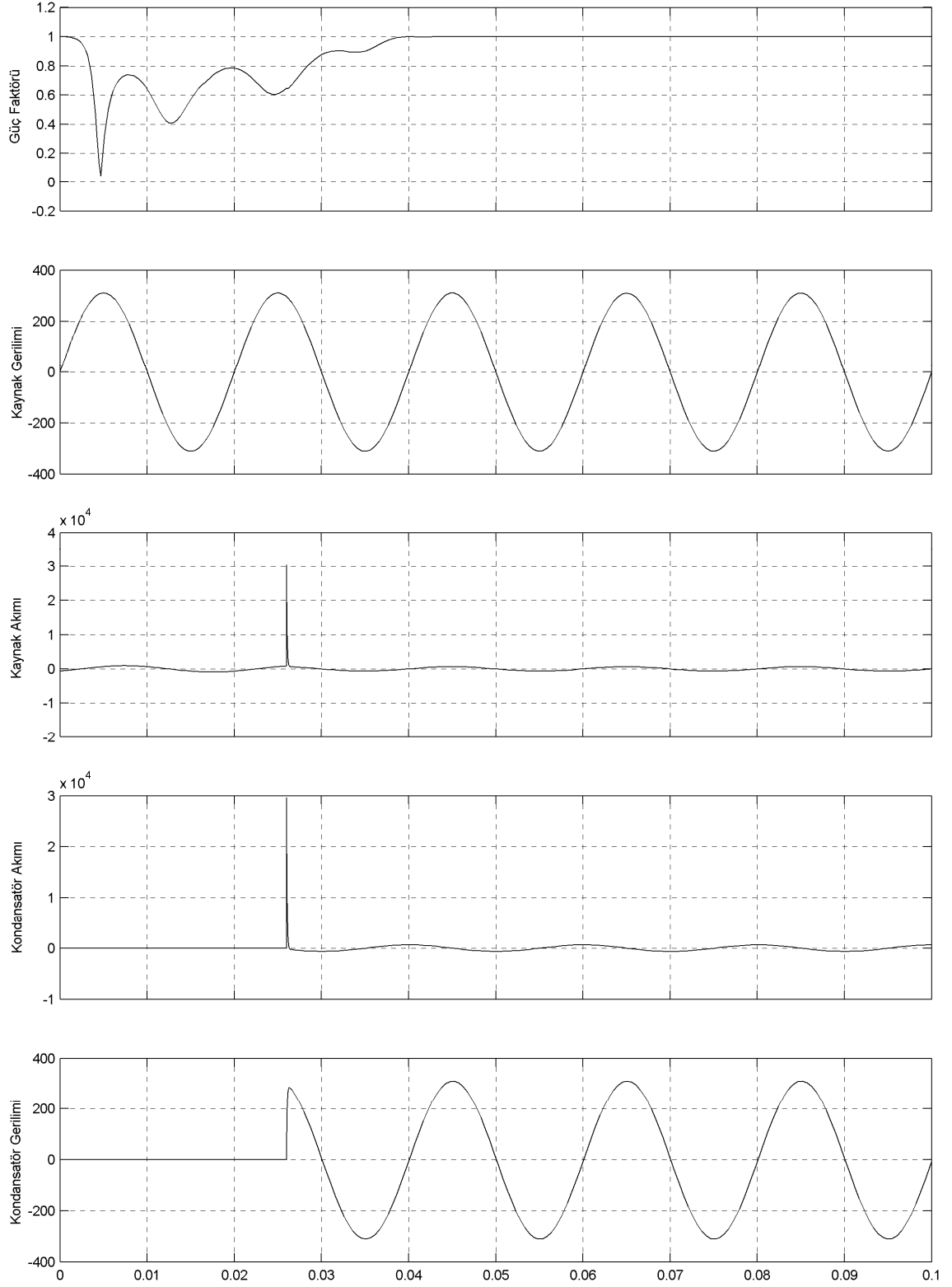
Şebeke geriliminin sıfırdan geçiş noktasına yakın bir zamanda ($t=21$ ms) kondansatör devreye alındığında oluşacak akım gerilim değişimleri şekil 3.5' te gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Mekanik anahtarlamalı kondansatör devresine ait akım ve gerilim dalga şekilleri ($t=21$ ms)

Şekil 3.5' ten görüldüğü gibi mekanik anahtar devreye girdiği anda akımda çok ani ve değeri oldukça yüksek bir pik oluşmaktadır.

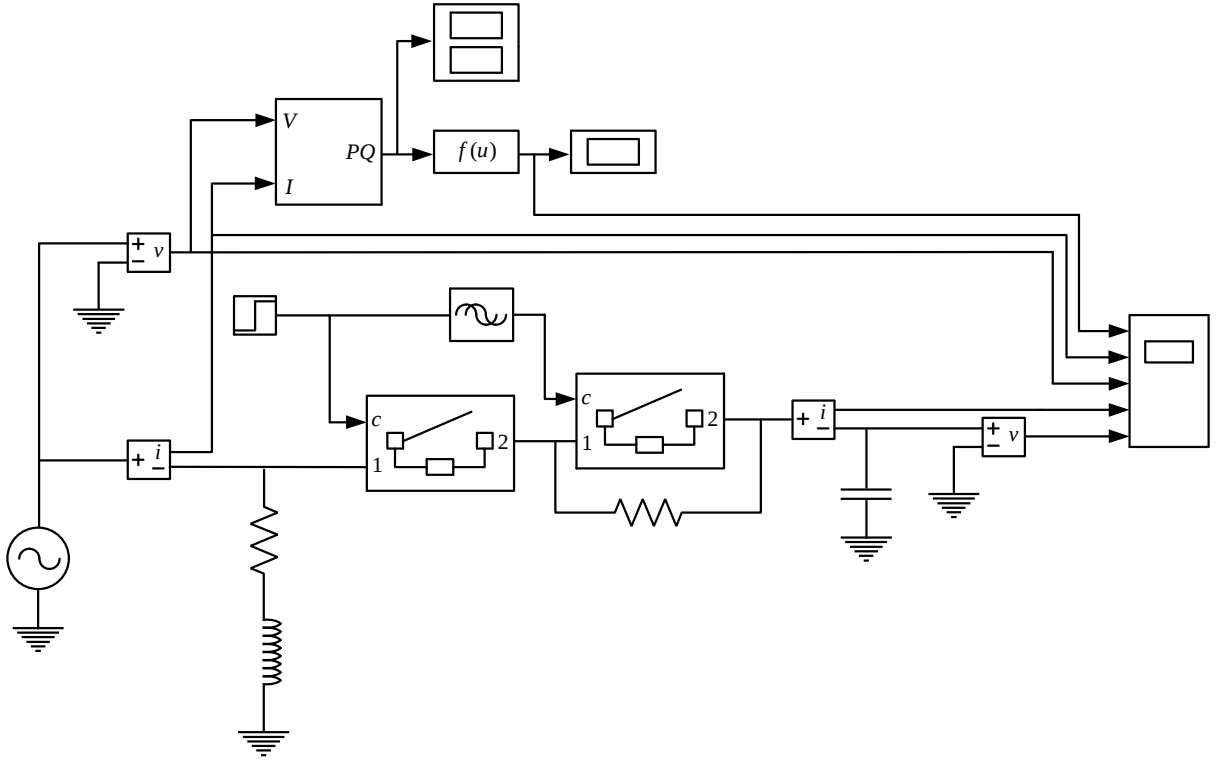
Şebeke geriliminin maksimum noktasına yakın bir zamanda ($t=26$ ms) kondansatör devreye alındığında oluşacak akım gerilim değişimleri şekil 3.6' te gösterilmektedir.



Şekil 3.6 Mekanik anahtarlama kondansatör devresine ait akım ve gerilim dalga şekilleri ($t=26$ ms)

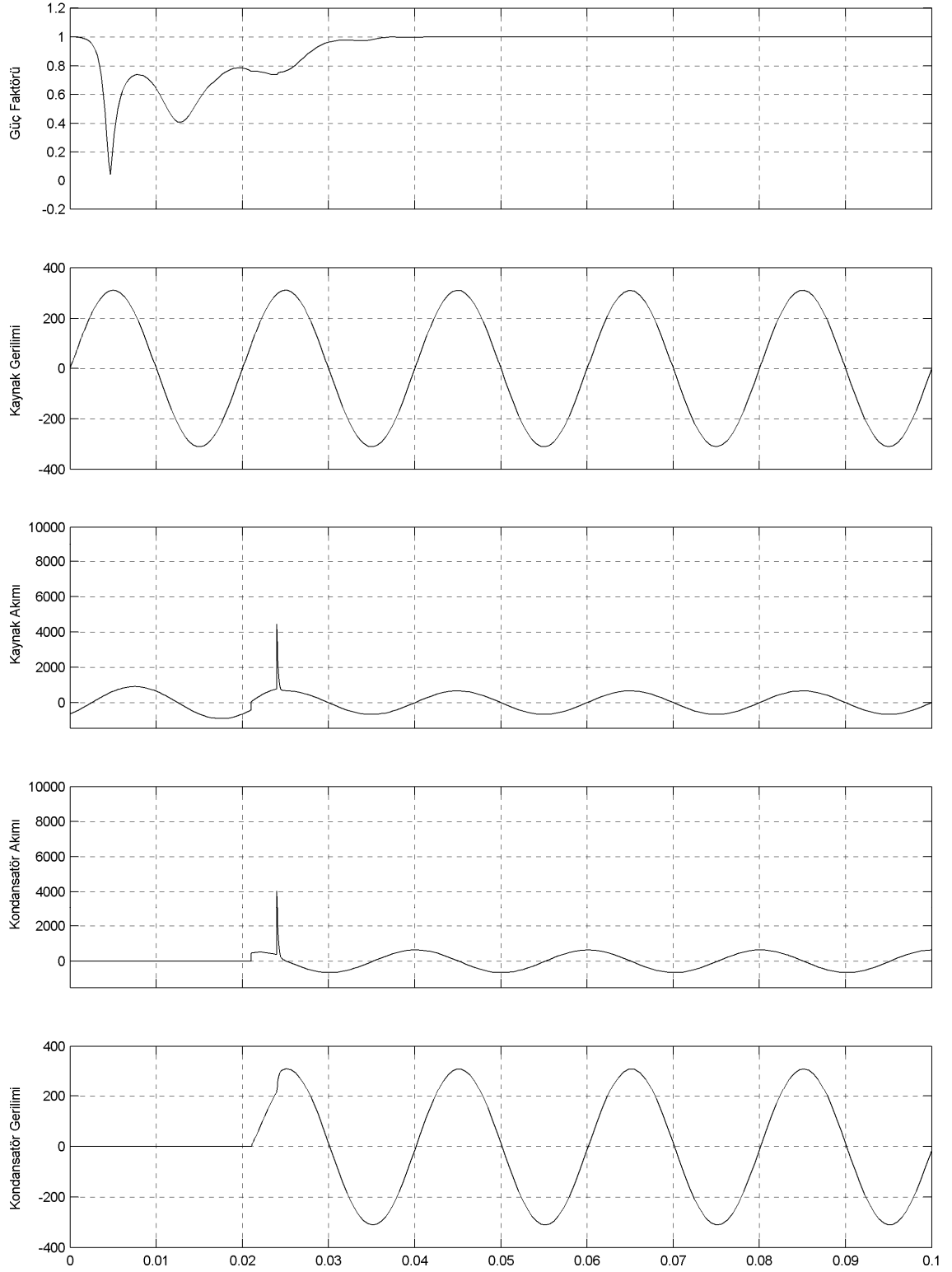
Şekil 3.6' da görüldüğü gibi, mekanik anahtar devreye girdiği anda akımda oluşan pik değeri, şekil 3.5' deki ilk duruma göre çok daha yüksektir. Bunun nedeni de anahtarlama işleminin gerilimin maksimum değerine çok yakın bir anda gerçekleşmiş olmasıdır.

Bu akımdaki artışı azaltmak için standart kompanzasyon kontaktörü kullanılmalıdır. Bu değişikliğin yapılmasıyla oluşacak yeni Simulink devresi şekil 3.7' de gösterilmektedir.



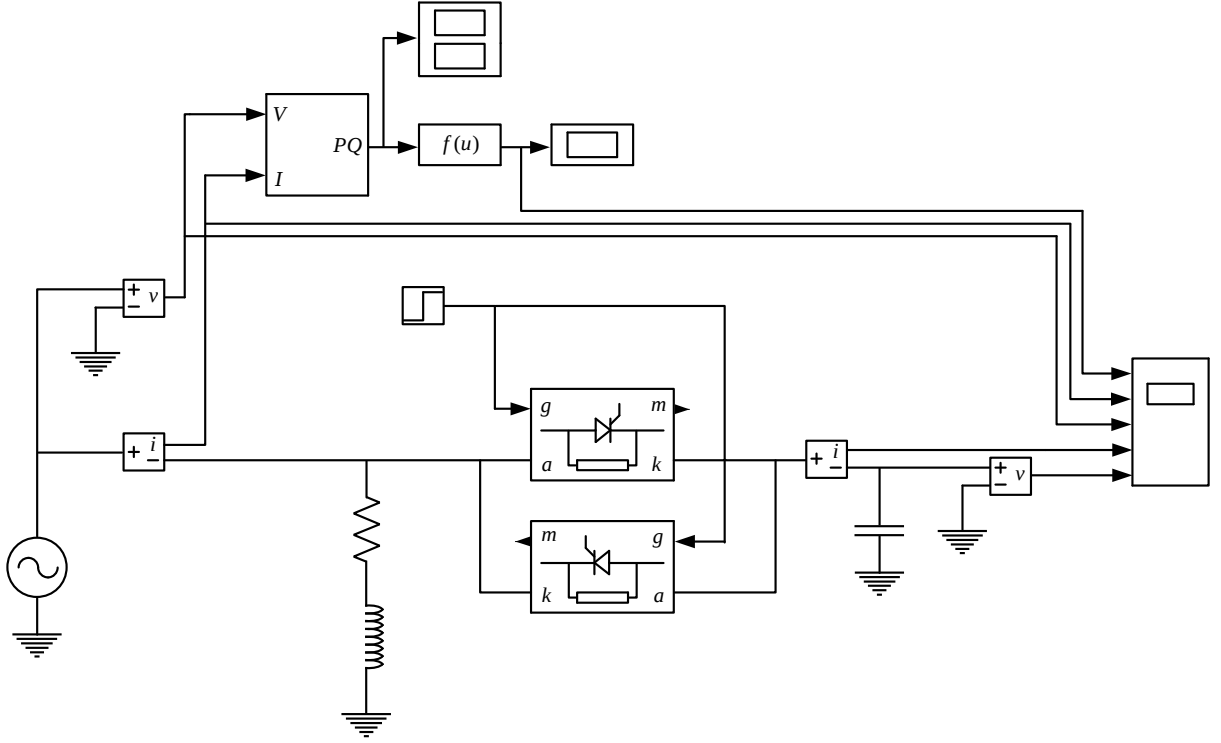
Şekil 3.7 Standart kompanzasyon kontaktörü kullanılan mekanik anahtarlama kondansatörün simülasyonu için kullanılan Simulink devresi

Bu devrenin diğer devreye göre farkı iki tane anahtar ve bir adet ön direnç kullanılmış olmasıdır. Bu ön direnç ilk anahtarın devreye girmesiyle devreye eklenirken, ikinci anahtar ile kısa devre edilir. Sonuç olarak önceki devrede oluşan aşırı akım yükselmeleri düşürülmüş olur. Yeni devreye ait akım gerilim değişimleri şekil 3.8' de gösterilmektedir.



Şekil 3.8 Kompanzasyon kontaktörünün kullanıldığı mekanik anahtarlama kondansatör devresine ait akım ve gerilim dalga şekilleri ($t=26$ ms)

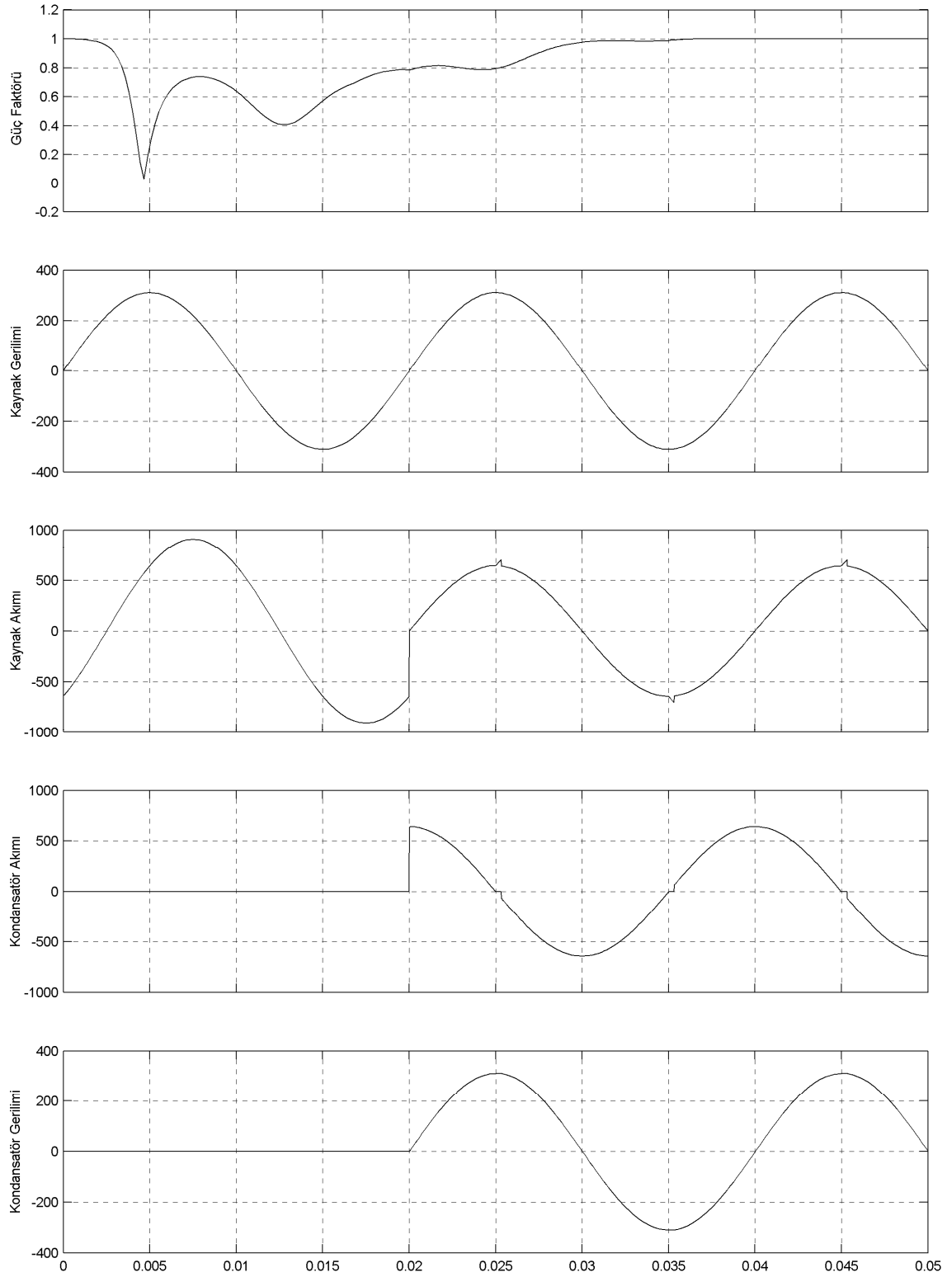
Şu ana kadar anlatılan tüm devrelerde aşırı akımlar meydana gelmiştir, ancak tristör anahtarlamalı kondansatör devresinde, anahtarlamalar gerilimin sıfır geçiş noktalarında gerçekleştiği için aşırı akımlar oluşmayacaktır. Bu anlatılan duruma örnek olarak gerçekleştirilen Simulink devresi şekil 3.9’ da gösterilmektedir.



Şekil 3.9 Tristör anahtarlamalı kondansatörün Simulink devresi

Tristörlerin iletme girme zamanlarının tetikleme açılarıyla kontrol edilebilmesi sayesinde gerilim sıfır geçişlerinde iletme sokulurlar. Dolayısıyla aşırı akımlar ile karşılaşmazlar.

Şekil 3.9’ daki devreye ait akım gerilim değişimleri şekil 3.10’ da gösterilmektedir. Akım gerilim değişimlerinden görüldüğü gibi aşırı akım yükselmeleri oluşmamaktadır.



Şekil 3.10 Tristör anahtarlama kondansatör devresine ait akım ve gerilim dalga şekilleri

3.5 Statik VAR Kompanzasyon Sistemlerinde Kullanılan Temel Elemanlar

3.5.1 Bobin

Temel bir ifadeyle, bobin bir iletkenin spiral şeklinde sarılmasıdır. Manyetik akı bir bobinin içinden geçen akımla doğru orantılı olarak değişir. Bu değişimi gösteren sabit değere de bobinin öz endüktans katsayısı denir. “ L ” ile gösterilir ve birimi Henry’ dir.

Bobinin içinden geçen akımın oluşturduğu manyetik akı,

$$\Phi = L.I \quad (3.9)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Bobinin içinden geçen akım da,

$$i_L(t) = I_m \cdot \sin \omega t \quad (3.10)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Bobin uçlarındaki gerilim ise,

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di_L(t)}{dt} \quad (3.11)$$

eşitliğiyle ifade edilir. (3.10) ve (3.11) eşitliklerinden yararlanarak,

$$v_L(t) = L \cdot \omega \cdot I_m \cdot \cos \omega t = L \cdot \omega \cdot I_m \cdot \sin(\omega t + 90^\circ) \quad (3.12)$$

eşitliği elde edilir.

(3.12) eşitliğine göre ve ayrıca Şekil 3.11’ de görüldüğü gibi, bobinin içinden geçen akım, gerilime göre 90° geridedir. Bu bilgiyle birlikte,

$$v_L(t) = j \cdot L \cdot \omega \cdot I_m \cdot \sin \omega t \quad (3.13)$$

eşitliği elde edilir.

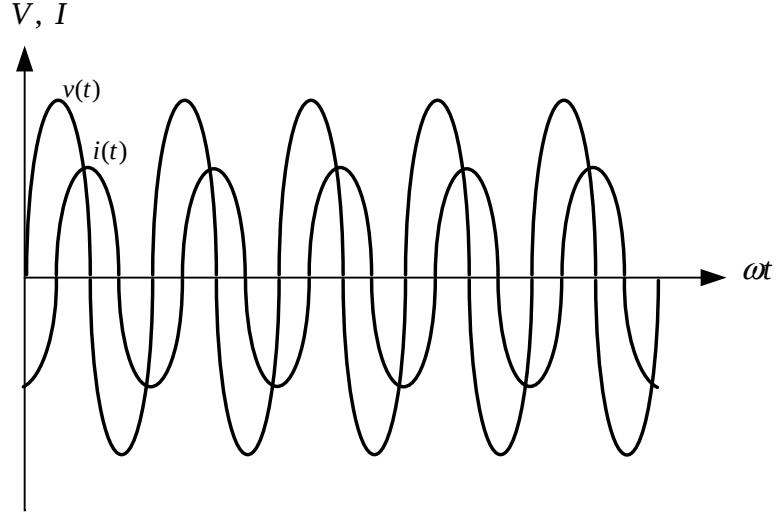
Ohm kanunundan yararlanarak,

$$X_L = \frac{v_L(t)}{i_L(t)} = \frac{j \cdot L \cdot \omega \cdot I_m \cdot \sin \omega t}{I_m \cdot \sin \omega t} \quad (3.14)$$

eşitliği elde edilir ve sadeleştirme yapıldığında,

$$X_L = j \cdot \omega \cdot L \Rightarrow (\omega = 2 \cdot \pi \cdot f) \quad (3.15)$$

eşitliği elde edilir. Bulunan bu değer bobinin alternatif akıma karşı gösterdiği direnç olan endüktif reaktanstır.



Şekil 3.11 Bobine ait akım ve gerilim değişimleri

3.5.2 Kondansatör

Kondansatör, temel olarak iki iletken levha arasına konulan yalıtkan bir malzemeden oluşur. İletken levhalar yük depolamaya yarar. Kondansatör yapısına göre belli bir kapasiteye sahiptir. “C” ile gösterilir ve birimi Farad’ dır.

A levhanın yüzeyi, ϵ_0 boşluğun dielektrik sabiti, ϵ_r malzemenin dielektrik sabiti, ϵ dielektrik katsayısı ve d levhalar arası uzaklıktır. A, ϵ ile doğru orantılı d ile ters orantılıdır. Kondansatörün kapasitesi aşağıdaki (3.16) eşitliğinde gösterilmektedir.

$$C = \frac{\epsilon_0 \cdot \epsilon_r \cdot A}{d} = 0,0885 \cdot \frac{\epsilon \cdot A \cdot 10^{-12}}{d} \quad (3.16)$$

Kondansatörler, elektrik yükü depolayabilmeleri, doğru akıma sonsuz direnç gösterip, alternatif akımı geçirmeleri, alternatif akımda reaktif güç üretmeleri gibi özellikleriyle çeşitli uygulamalarda kullanılmaktadırlar.

Kondansatörün depoladığı yük, kapasitesi ve uçlarına uygulanan gerilimle doğru orantılıdır.

$$\frac{d\theta}{dt} = \frac{d(C \cdot v_C(t))}{dt} \quad (3.17)$$

$$i_C(t) = \frac{d\theta}{dt} = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt} \quad (3.18)$$

$$v_C(t) = V_m \cdot \sin \omega t \quad (3.19)$$

(3.19) eşitliği, (3.18) eşitliğinde yerine yazılırsa,

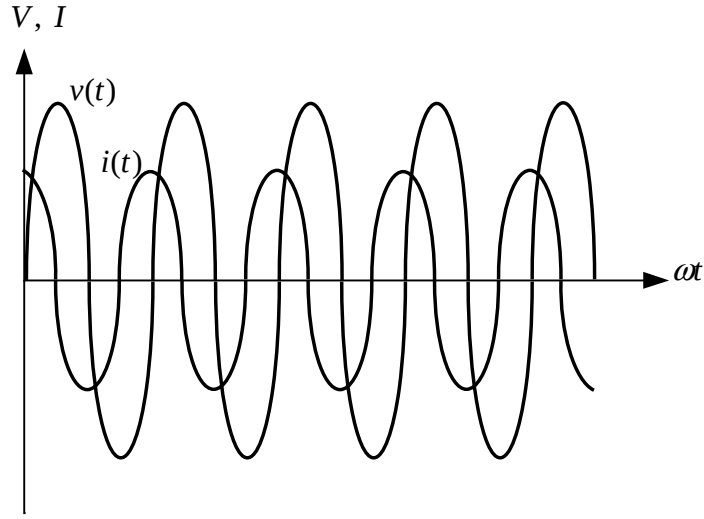
$$i_C(t) = j \cdot C \cdot \omega \cdot V_m \cdot \sin \omega t \quad (3.20)$$

sonucu elde edilir. (3.20) eşitliğine göre ve Şekil 3.12' de görüldüğü gibi kondansatörden geçen akım, gerilime göre 90° ileridedir.

Ohm kanunundan,

$$X_C = \frac{v_C(t)}{i_C(t)} = \frac{V_m \cdot \sin \omega t}{j.C.\omega.V_m \cdot \sin \omega t} = \frac{1}{j.C.\omega} \quad (3.21)$$

bulunur. Bu da kondansatörün alternatif akıma karşı gösterdiği direnç olan kapasitif reaktanstır.



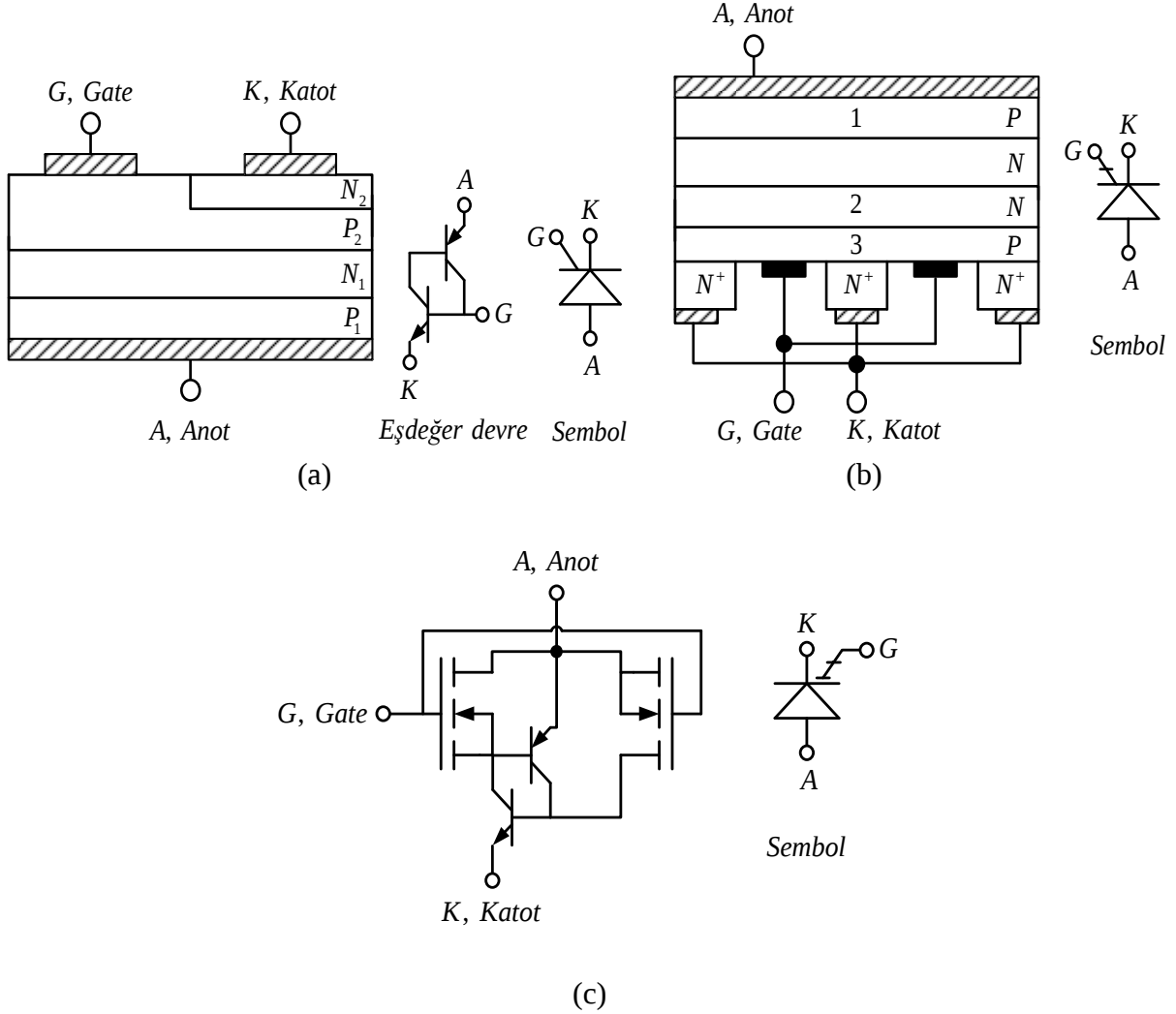
Şekil 3.12 Kondansatöre ait akım ve gerilim değişimleri

Kondansatör ile bobin karşılaştırıldığında aralarında bazı benzerlikler olduğu görülür. Her ikisinde de ortak olarak reaktanslarının frekansla değiştiğidir. (3.15) eşitliğine göre bobinlerde frekansın artmasıyla direnç büyürken, (3.21) eşitliğine göre ise kondansatörlerde frekansın artmasıyla direnç küçülmektedir. Kondansatörlerin reaktansları kapasitenin artmasıyla küçülürken, bobinlerde ise reaktans öz endüktans katsayısının artmasıyla artmaktadır.

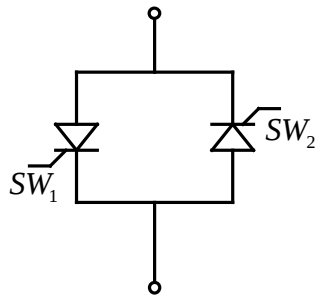
3.5.3 Yarı iletken Anahtarlar

Yüksek güç uygulamalarında, yarı iletken elemanlar öncelikle anahtar olarak kullanılırlar. Bir AA güç sisteminde iki yönlü iletim için iki tane tek yönlü iletim elemanı, Şekil 3.14' te gösterildiği gibi, ters paralel bağlanır. Bu tür anahtarlar, elemanları devreye almak veya devreden çıkarmak için ya da elemanları kısa devre etmek için kullanılırlar (Mathur ve Varma, 2002).

Tristörlerde tetikleme açısı α 'nın kontrolüyle, kontrollü bir reaktör elde edilirken, bir kondansatörü de devreye alarak ya da devreden çıkararak anahtarlamalı kondansatör uygulaması elde edilir.



Şekil 3.13 Yarı iletken anahtar örnekleri (a) Tristör (Silicon Controlled Rectifier, SCR) (b) Kapı Sönümlü Tristör (Gate Turn Off, GTO) (c) MOS Kontrollü Tristör (MOS Controlled Thyristor, MCT)

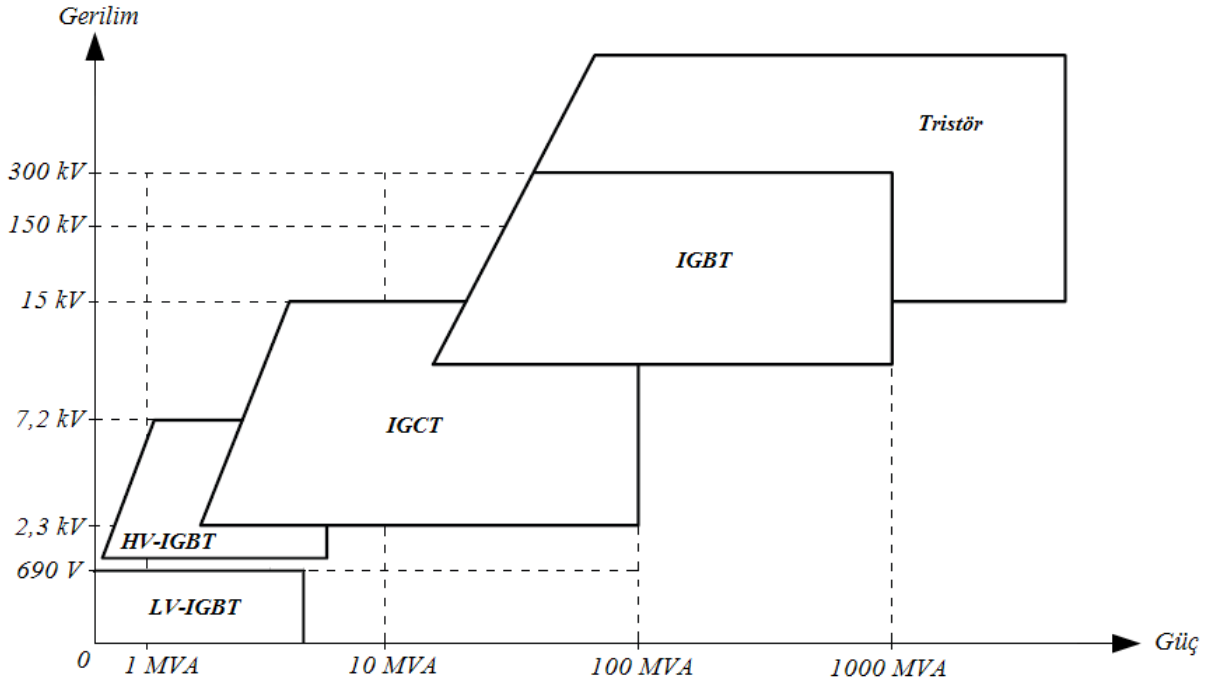


Şekil 3.14 Ters paralel bağlı iki tristör

1957’ de General Electric tarafından geliştirilen ilk tristörle, yarı iletkenler için yüksek anahtarlama hızları, düşük iletim ve anahtarlama kayıpları hedeflenmiştir. FACTS alanındaki yenilik, esasen bu gelişmeler ışığında yürütülmektedir. Şekil 3.15’ te yarı iletken elemanlar için güç ve gerilim aralıkları gösterilmektedir.

Tristör, tetikleme sinyaliyle ilettime sokulabilen ve akım sıfır geçişine kadar iletimde kalabilen bir yarı iletken anahtardır. Kontrol edilebilir ve her bir yarı periyotta sadece bir anahtarlama yapılabilir. Tristörler en yüksek akım ve gerilimi değerlerine sahip yarı iletkenlerdir. Bu da bir uygulama içinde daha az sayıda yarı iletken kullanmaya ihtiyaç olduğu anlamına gelir.

Tristörlerin sadece iletime girmeleri kontrol edilebilir. Kontrol edilebilirliği arttırmak için, gate ucuna uygulanan gerilim pikiyle kesime girebilen GTO’ lar geliştirilmiştir.



Şekil 3.15 Yarı iletken güç elemanlarının gerilim ve güç aralıkları

3.6 Statik VAR Kompanzasyonunun Sınıflandırılması

Statik VAR kompanzasyon sistemlerini tasarlarken, belirlenmesi gereken tasarım kriterleri aşağıda sıralanmıştır (Gyugyi, 1988; Kara vd., 2005).

- İhtiyaç duyulan reaktif güç,
- Kayıp karakteristiği,
- Maliyet,
- Harmonik seviyesi,

- Güç kapasitesi,
- Kontrol yöntemi,
- Cevap verme süresi,
- Aşırı ve düşük gerilim sınırları,
- Denetim aralığı,
- Geçici ve kararlı rejimlerdeki davranış.

Reaktif gücün gereksinim duyulan en yakın yerde üretilmesi, elektrik sisteminin en iyi koşullarda işletilmesi açısından büyük yarar sağlamaktadır. Ancak küçük yüklerin ve yıllık işletme süreleri düşük olan yüklerin reaktif güç kompanzasyonlarının yakınlarında yapılması ekonomik değildir. Bu gibi yüklerin reaktif güç kompanzasyonları bağlı oldukları baralara sabit veya değişken tipte kompanzasyon sistemleri bağlanarak yapılmaktadır. Statik VAR kompanzasyon sistemleri de, bu türde yüklerin reaktif güç kompanzasyonu için kullanılan kompanzasyon sistemlerinin yaygın bir türüdür.

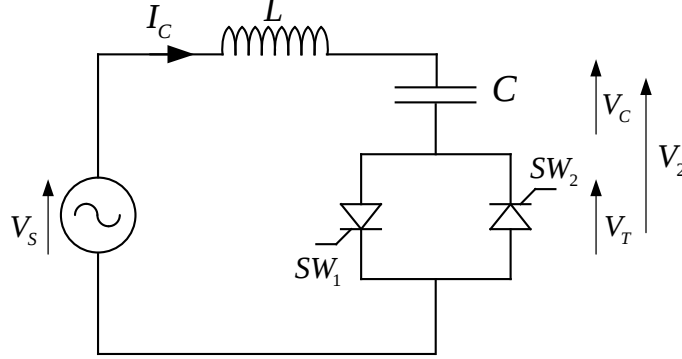
Kondansatör, bobin ve yarı iletken elemanların farklı bağlantılarıyla gerçekleştirilmiş çeşitli türde statik VAR kompanzasyon sistemi geliştirilmiştir. Aşağıda statik VAR kontrolü için kullanılan statik VAR kompanzasyon sistemleri sıralanmaktadır.

- Tristör anahtarlamalı kondansatör (TAK),
- Tristör kontrollü reaktör (TKR),
- Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör (TKR SK),
- Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlamalı kondansatör (TKR TAK)

Şekil 4.1 Tristör anahtarlamalı kondansatöre ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) akım ile gerilim dalga şekilleri

4.2 Seri Bağlı Reaktör ve Kondansatörün Tristörle Devreye Alınması

Yukarıda anlatılan problemlerin üstesinden gelmek için, Şekil 4.2’ de gösterildiği gibi, küçük bir bastırma reaktörü kondansatöre seri olarak eklenir.



Şekil 4.2 Seri reaktörlü tristör anahtarlama kondansatör sistemi

Kaynak geriliminin ifadesi aşağıdaki eşitlikte verilmiştir.

$$v_s(t) = V_m \cdot \sin \omega_0 \cdot t \quad (4.1)$$

$t = 0$ ' da tristör ilettime sokulduktan sonra, devreden geçecek akımın ifadesi,

$$i_C(t) = I_m \cdot \cos(\omega_0 \cdot t + \alpha) - n \cdot B_C \cdot (V_{C0} - \frac{n^2}{n^2 - 1} \cdot V_m \cdot \sin \alpha) \cdot \sin \omega_n \cdot t - I_m \cdot \cos \alpha \cdot \cos \omega_n \cdot t \quad (4.2)$$

olur. Burada ω_0 nominal frekansına karşılık gelirken ω_n rezonans frekansına karşılık gelir.

$$\omega_n = n \cdot \omega_0 = \frac{1}{\sqrt{L \cdot C}} \quad (4.3)$$

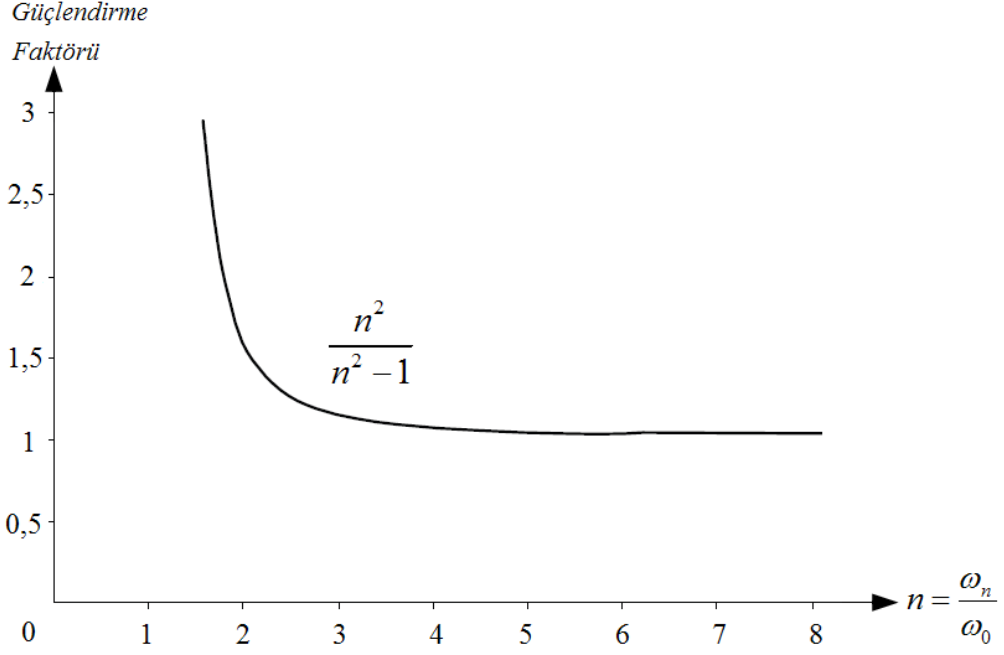
ifadesine eşittir. Reaktör ve kondansatöre ait reaktanslar kullanılarak (4.3) eşitliği,

$$\omega_n = \sqrt{\frac{|X_C|}{|X_L|}} \quad (4.4)$$

ifadesine dönüştürülür.

$$I_m = V_m \cdot \frac{B_C \cdot B_L}{B_C + B_L} \quad (4.5)$$

Burada, V_{C0} , $t = 0$ da kondansatör başlangıç gerilimidir.



Şekil 4.3 Tristör anahtarlamalı kondansatör sisteminde temel frekans için güçlendirme faktörü

LC devreleri, kaynak frekansının üç katı ve daha yüksek frekanslarda rezonansa girecek şekilde ayarlanır. $3\omega_0$ altındaki değerlerde, yük faktörü yaklaşık olarak 1,0' dır. Bu yüzden, pratik uygulamalar için bu değer altında rezonans devresi kurulmaz. Geçici salınımlardan kurtulmak için, (4.6) ile (4.7) eşitliklerinin aynı anda sağlanması gerekir (Mathur ve Varma, 2002).

$$\cos \alpha = 0 \Rightarrow \sin \alpha = \pm 1 \quad (4.6)$$

$$V_{C0} = I_m \cdot X_C = \pm V_m \cdot \frac{n^2}{n^2 - 1} \quad (4.7)$$

(4.6) eşitliği tristörlerin, kaynak geriliminin ya pozitif ya da negatif tepelerinde ilettime sokulması gerektiğini ifade eder. (4.7) eşitliği, kondansatörün önceden belirlenmiş bir değere şarj olması gerektiğini ifade eder.

Uygulamalarda geçici salınımları engellemek için oluşturulan tetikleme stratejileri sonucu meydana gelen sorunlar aşağıda sıralanmıştır (Mathur ve Varma, 2002).

1. SVK' ların kurulduğu yerlerde, anahtarlar ilettime sokulduklarında, gerilimler ideal durumlardaki gibi saf sinüzoidal ve sabit değildir. Çok hassas tetikleme stratejileriyle bile, geçici salınımlar oluşabilir.
2. Kondansatör şarjının $V_m \cdot n^2 / (n^2 - 1)$ değerinde muhafaza edilebilmesi için şarj donanımı gereklidir. Şarjlı bir kondansatörü V_m geriliminde muhafaza etmek kolaydır,

fakat sistemin çalışması sırasında, kaynak gerilimi V_s , hat endüktansı X' de değişiklik olabilir. Bu durumda geçici salınımlar oluşabilir.

4.2.1 Tristörlerin İletime Sokulması

Tristör tetikleme stratejilerinin amacı aşağıda sıralanmaktadır (Mathur ve Varma, 2002).

1. Geçici salınımları kabul edilebilir limitlerde sınırlamak.
2. Tristörlerin ilettime sokulması için en iyi zamanı belirlemek.

Tristör tetikleme stratejileri için temel iki durum aşağıda sunulmaktadır.

a) Tetikleme, kondansatör gerilimi kaynak gerilimine eşitken ve tristör gerilimi sıfırdan geçtiğinde gerçekleştirilir.

$$V_m \cdot \sin \alpha = V_{C0} \quad (4.8)$$

(4.8) eşitliğinden tetikleme açısı,

$$\alpha = \sin^{-1} \frac{V_{C0}}{V_m} \quad (4.9)$$

olarak elde edilir. (4.2) eşitliğiyle, (4.8) ve (4.9) eşitliklerinden, I_{osc} akımının büyüklüğü aşağıdaki gibi bulunur.

$$\frac{I_{osc}}{I_m} = \sqrt{1 - \left(\frac{V_{C0}}{V_m} \right)^2 \cdot \left(1 - \frac{1}{n^2} \right)} \quad (4.10)$$

Şekil 4.4(a)' da, TAK bloğundaki kondansatörün farklı ön şarj koşulları için I_{osc}/I_m ile n arasındaki ilişki gösterilmektedir. Şekil 4.4(a)' dan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır (Mathur ve Varma, 2002).

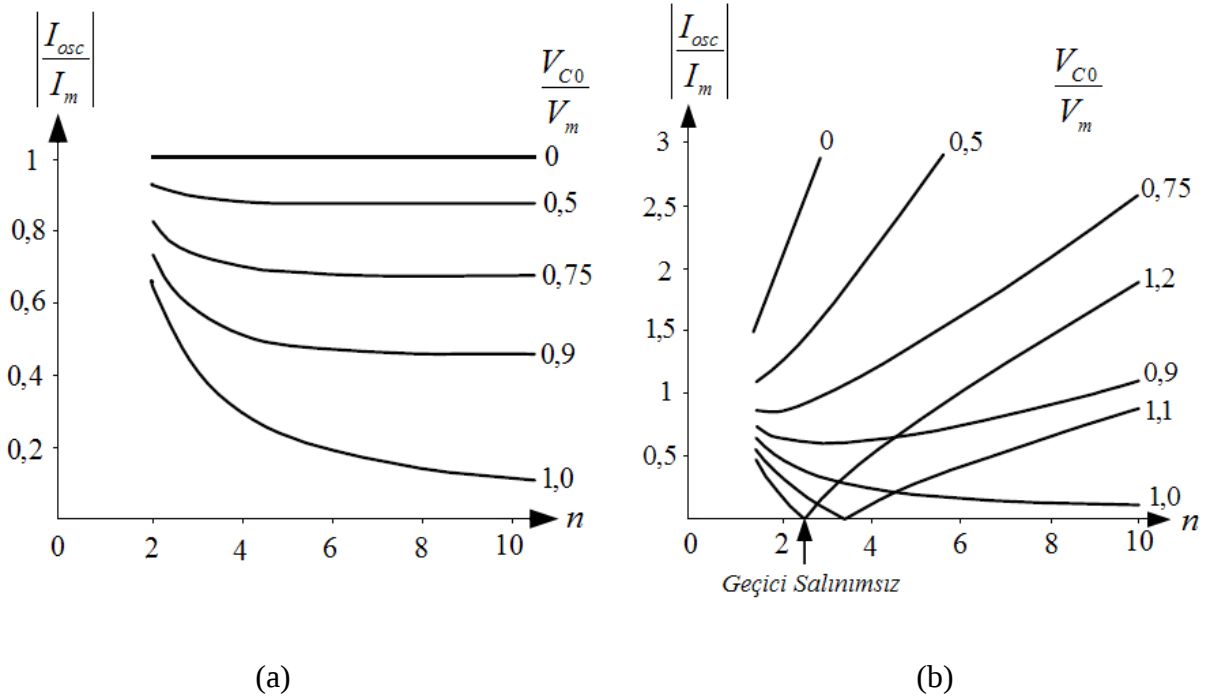
1. Osilasyonlu akımın büyüklüğünün, kararlı hal akımının büyüklüğünü asla geçmediği görülmektedir.
2. Yüksek ön şarjlı kondansatörle, geçici salınımlar daha küçük olmaktadır.
3. LC blokları, yüksek rezonans frekanslarına ayarlanarak salınımların değerleri daha da küçültülür.
4. Kondansatör tamamen deşarj olursa, çok yüksek geçici salınımlar meydana gelir.
5. Kondansatör $V_{C0} > V_m$ değerini sağlayacak gerilime şarj edilirse, bu tetikleme stratejisi gerçekleşmez.

b) Tetikleme, kaynak geriliminin tepesinde, yani $\cos \alpha = 0$ anında gerçekleştirilir.

$$\frac{I_{osc}}{I_m} = n \left(\frac{n^2 - 1}{n^2} \cdot \frac{V_{C0}}{V_m} - 1 \right) \quad (4.11)$$

Şekil 4.4(b)' dan elde edilen sonuçlar aşağıda sıralanmıştır (Mathur ve Varma, 2002).

1. Kondansatör aşırı şarjlı bile olsa, bu durum geçerliliğini kaybetmemektedir.
2. Bununla beraber, kondansatör başlangıç gerilimi besleme geriliminin tepe değerinin altına düştükçe (örneğin $V_{C0}/V_m = 0,75$), geçici salınımlar artmaktadır.
3. Geçici salınımlar genellikle $n = 2$ ile 5 aralığında en düşük değere sahiptirler.
4. Şekil 4.4(a) ve 4.4(b)' de, $V_{C0}/V_m = 1,0$ durumlardaki karakteristikler karşılaştırıldığında, iki durumunda benzer olduğu görülmektedir.



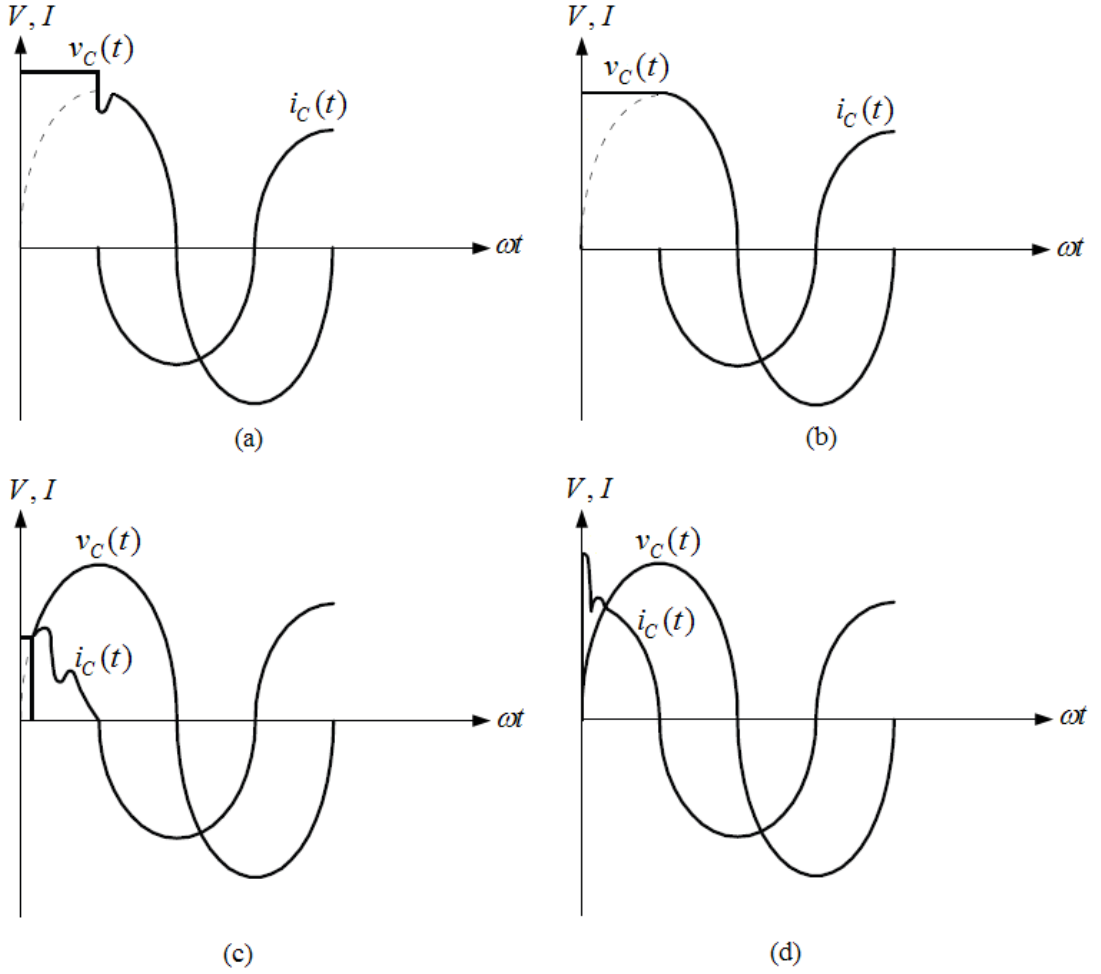
Şekil 4.4 Tetiklemenin (a) $v(t) = V_{C0}$ veya $V_T = 0$ iken ve (b) $v(t)$ ' nin tepe değerinde yapılması durumlarında, V_{C0}/V_m parametre olmak üzere, I_{osc}/I_m ve n arasındaki değişim

Yukarıda anlatılan durumlara göre, uygulamalarda kullanılmak üzere tetikleme stratejileri geliştirilmiştir (Mathur ve Varma, 2002).

a) Strateji A

1. Kondansatörler sisteme bağlı değilken, deşarj olurlar. Bu yüzden kondansatörlerde, herhangi bir başlangıç gerilimi uygundur.
2. $V_{C0} < V_m$ ise, tristör, ilk temel duruma göre, yani tristör gerilimi sıfırdan geçerken ve kondansatör gerilimi kaynak gerilimine eşitken ilettime sokulur.
3. $V_{C0} > V_m$ ise, tristör, ikinci temel duruma göre, yani kaynak geriliminin tepe değerinde ve tristör üzerindeki gerilimin en az olduğu zamanda ilettime sokulur. Bu durum zorlamalı komütasyon olarak da adlandırılır.

Bu tetikleme stratejisinde, daha önce belirtilen iki temel durum da kullanılarak, akımdaki geçici salınımlar en aza indirilir. Özel kondansatör şarj etme devresi gerektirmez ve standart AA güç kondansatörleri ile çalışılabilir.



Şekil 4.5 Seri reaktörlü tristör anahtarlama kondansatör modelinde, tristör tetikleme stratejilerinin (a) $V_C > V_m$, (b) $V_C = V_m$, (c) $V_C < V_m$ ve (d) $V_C = 0$ olması durumlarındaki akım ve gerilim dalga şekilleri

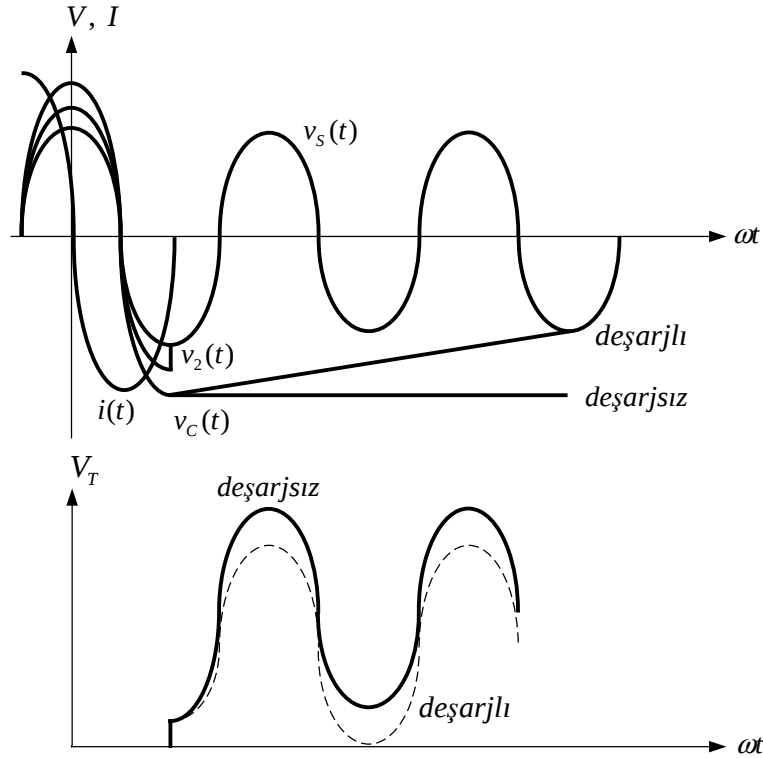
b) Strateji B

1. İki tristörden biri ilettime sokularak, kondansatör kaynak geriliminin tepe değerine şarj edilir. İdeal gerilim $V_m \cdot n^2 / (n^2 - 1)$ değerine şarj edilmezler.
2. Tetikleme, anahtar geriliminin minimum olduğu, kaynak geriliminin tepesinde yapılır.

Bu tetikleme stratejisinde, ikinci temel durum kullanılır. Ancak bu tetikleme stratejisinin kullanımıyla ilgili bazı problemler vardır. Kondansatör üzerinde sürekli DC stres oluşur. Bu problemin üstesinden gelmek için kondansatörler periyodik olarak zıt polaritede şarj edilir, fakat polarite tersine çevrildiği zaman yüksek akımlara neden olur.

4.2.2 Tristörlerin Kesime Sokulması

Şekil 4.6' da gösterildiği gibi, akım sıfırdan geçtiği anda tristörler kesime girer. Kondansatör akımının sıfırdan geçişiyle geriliminin tepeye ulaşması aynı anda meydana gelir. Eğer akım tristörler tarafından kesilirse, kondansatör şarjlı kalacaktır. Kaynak gerilimi ile kondansatör gerilimi arasındaki gerilim farkı tristör üzerine düşecek olup, tristör bu gerilime dayanabilmelidir.



Şekil 4.6 Tristör anahtarlama kondansatörde tristörün söndürülmesine ait akım ve gerilim dalga şekilleri

Kondansatörün deşarj olmadığı ideal durum ve kondansatörün deşarj olduğu gerçek durum için, kaynak gerilimi V_s , kondansatör gerilimi V_C ve tristör üzerindeki gerilim V_T Şekil 4.6' da gösterilmektedir. Devredeki endüktans, tristörü söndürmek için gerekli olan ters gerilimle tristörün kesime girmesine sağlar. Tristörlerin kesimdeyken ters yönde dayanabilecekleri gerilim, genellikle $V_T > 2.V_m$ olacak şekilde seçilir.

4.3 Tristör Anahtarlama Kondansatörün Yapısı

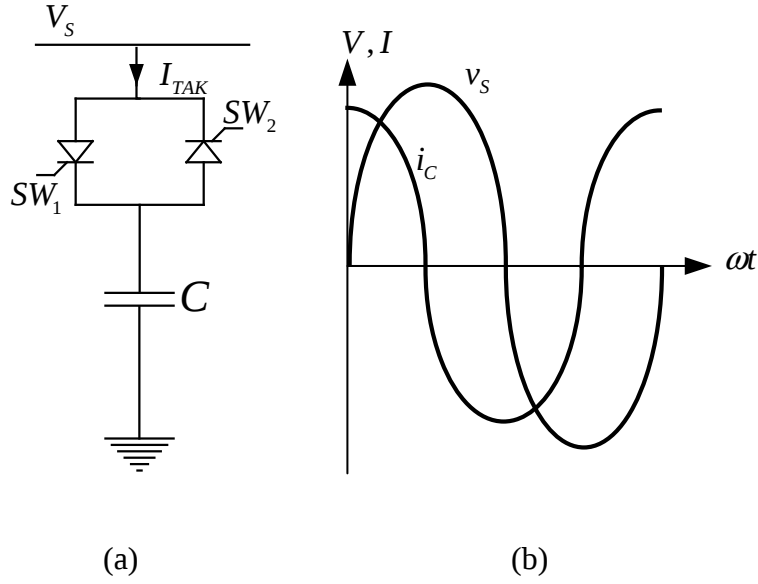
Tristör anahtarlama kondansatör ilk olarak 1971' de ASEA tarafından geliştirildi. Paralel kondansatör grubu uygun kademelerde ayrılarak, birbirinden bağımsız iletme ya da kesime giren ters paralel bağlı tristörler kullanıldı. Ayarlı kondansatör etkisi yaratan SVK tipidir. Toplam VAR isteğine bağlı olarak, kondansatörlerin birkaçı sisteme ayrı ayrı bağlanabilir ya da sistemden ayrılabilir. Kontrol, devamlı olarak yükün VAR değeri değerlendirilerek yapılır. Reaktif güç gereksinimine göre kondansatör devreye alınır veya tersi gerçekleşir. Devre kesici ve rölelerin kullanıldığı metotlarda yaşanan geçici rejim ve anahtarlama stresleri bu yapıda yoktur (Dixon vd., 2005).

Tristör anahtarlama kondansatör bloğu iki ana parçadan meydana gelir. Bunlar ters paralel bağlı iki tristör ve kondansatördür. Tristör üzerindeki gerilim minimum olduğunda, salınımları minimize etmek için, tristör iletme sokulur. İletime girme anında oluşabilecek küçük değerli salınımlar dışında, TAK akımı sinüzoidal ve harmoniklerden bağımsızdır, böylece herhangi bir filtreye gerek yoktur (Reddy, 2000).

Kondansatör gerilimiyle kaynak gerilimi eşit değilken tristörler tetiklenirse, tristör üzerinden geçen akım ile kondansatör kısa bir sürede kaynak gerilimine kadar şarj olur. Akımın yükselme hızı tristörün dayanabileceği değerden yüksek olursa, tristör tahrip olur. Bu durumu ortadan kaldırmak için seri küçük değerli bir L endüktansı kullanılır. Böylece hem tristör akımlarının yükselme hızı sınırlanır hem de TAK bloğunun şebekeyle rezonansa girmesi engellenir. X_L değeri genel olarak X_C ' nin %6' sı olacak şekilde ayarlanır (Dixon vd., 2005).

TAK tipi statik VAR kompanzasyon sistemleri aşağıdaki özelliklere sahiptir (Reddy, 2000),

1. Cevap verme süresi ortalama olarak yarım periyottur.
2. Harmonik üretimi olmadığı için akım geçici bileşeni etkin bir şekilde azaltılır.



Şekil 4.7 Tristör anahtarlamaalı kondansatöre ait (a) basit devre modeli ile (b) akım ve gerilim dalga şekilleri

Kondansatörler devreye alınırken, aşırı gerilimlerin meydana gelmemesi için kaynak geriliminin tepe değerine eşit bir gerilime şarj edilir. Tristörler aracılığı ile kondansatörler, gerilimin tepe değerinde devreye alınırlar. Böylece kondansatör, akımın sıfırdan geçtiği andan itibaren akım geçirmeye başlar. Aynı şekilde tristör aracılığı ile kondansatör yine, akımın sıfırdan geçtiği anda devreden çıkarılır. Bu sayede geçici olaylar ve aşırı gerilimler önlenmiş olur (Reddy, 2000).

Tristör anahtarlamaalı kondansatörün gerilimi ve akımı Şekil 4.7(b)' de görülmektedir. Burada V_s şebeke gerilimini, V_c kondansatör uçlarındaki gerilimini, I_{TAK} devreden geçen kapasitif akımı göstermektedir.

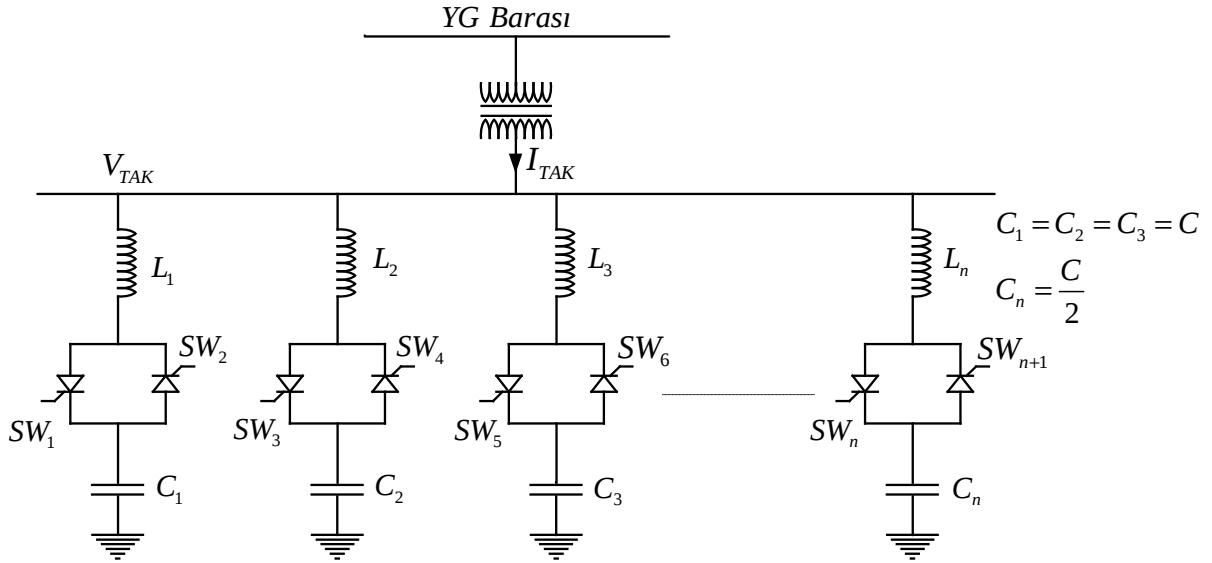
Kondansatör devresine $v_s(t) = V_m \cdot \sin \omega t$ şeklinde bir sinusoidal gerilim uygulandığında kondansatör uçlarındaki gerilim,

$$v_c(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_c(t) \cdot dt \quad (4.12)$$

devreden geçen akım ise,

$$i_{TAK}(t) = i_c(t) = \omega \cdot C \cdot V_m \cdot \cos \omega t \quad (4.13)$$

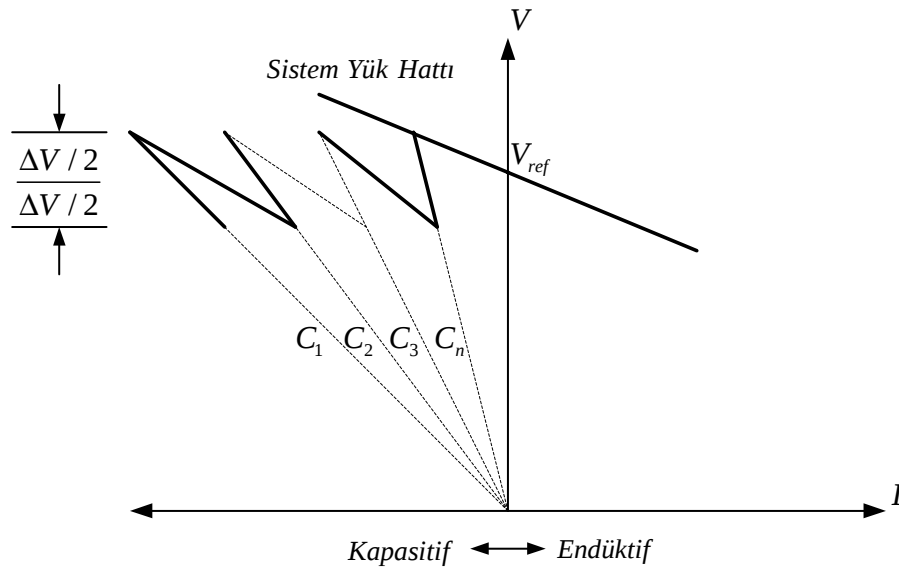
eşitliğiyle ifade edilir. TAK' ı oluşturan her bir bloğun reaktif güçlerin ikinin kuvvetleriyle orantılı olacak şekilde seçilebilir. Ayrıca, n tane kondansatörün $n-1$ tanesinin süsptansının değeri B , kalan tek kondansatörün süsptansının değeri de $B/2$ olarak ayarlanır.



Şekil 4.8 Tristör anahtarlamalı kondansatörün Simulink devresi

4.4 İşletim Karakteristiği

Şekil 4.9’ da TAK’ ın gerilim akım karakteristiği gösterilmektedir. Bu karakteristiğin şekli TAK bloklarını devreye girip devreden çıkmalarıyla değişir.

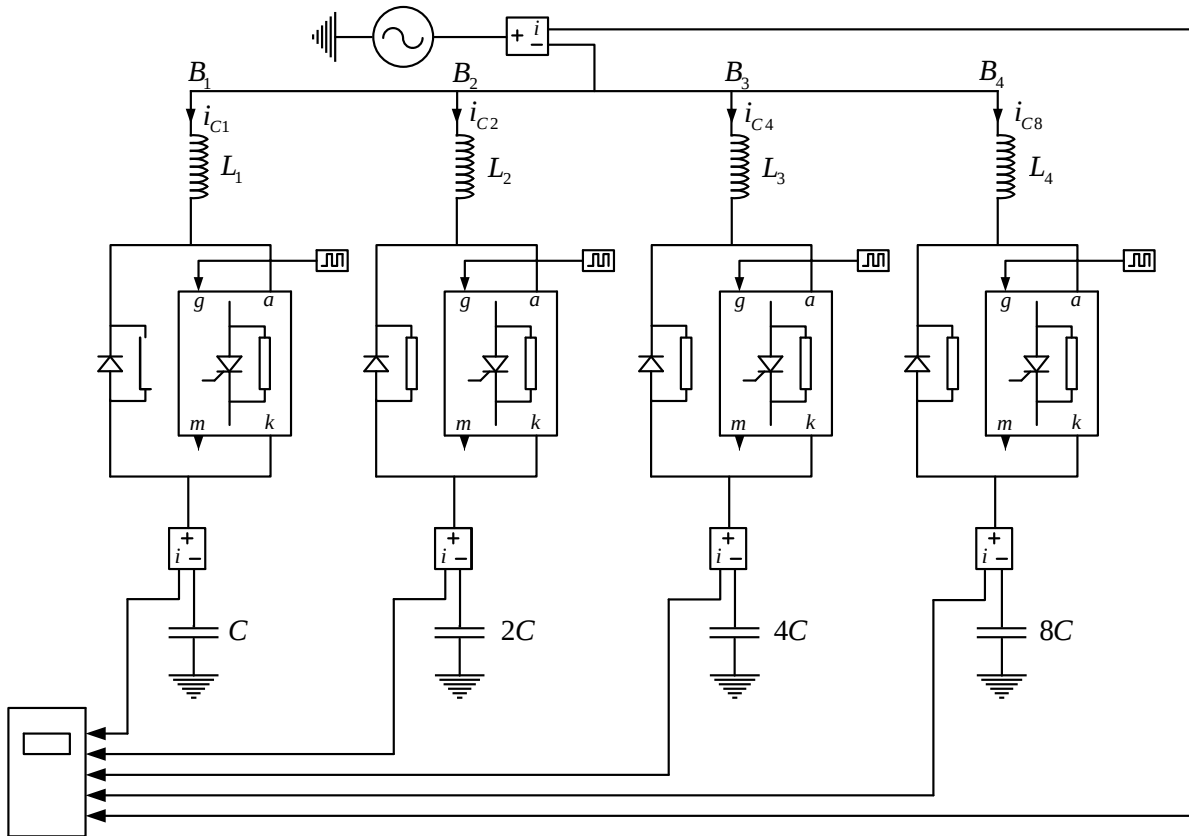


Şekil 4.9 Tristör anahtarlamalı kondansatörün akım ve gerilim karakteristiği

Tristör anahtarlamalı kondansatörün modelinin basit yapısına rağmen, pratikteki bazı dezavantajları, popülerliğini engellemektedir. Bu dezavantajları aşağıda sıralanmaktadır (Mathur ve Varma, 2002).

1. Reaktif güç kompanzasyonu sürekli değildir.
2. Her kondansatör grubu ayrı bir tristör anahtar gerektirir ve bu yüzden yapı ekonomik değildir.
3. Kesimdeki tristörlerin gerilim dayanım değerleri kaynak geriliminin tepe değerinin en az iki katına dayanabilmelidir.
4. Kaçak akımlara ve hattın geçici gerilim dalgalanmalarına karşı tristörlerin korunması gereklidir.

Tristörlerden birini diyotla değiştirmek, TAK' lar için etkili bir çözümdür. Tristörler doğru anda tetiklenirse ani akım yükselmeleri önlenir. Eğer her kondansatör grubunun gücü ikinin kuvvetleri şeklinde seçilirse, sürekli bir reaktif güç kontrolü gerçekleştirilebilir. Bu konfigürasyon Şekil 4.10' da gösterilmektedir. Endüktanslar, zaman dışı bir tetikleme sinyali sonunda oluşabilecek bir ani akımı önlemek için kullanılmaktadır (Dixon vd., 2005).



Şekil 4.10 Diyotlu ve tristör anahtarlama kondansatörün Simulink devresi

Kaynak gerilimi negatif yönde maksimum değerine ulaştığı zaman, tristöre bir tetikleme sinyali uygulanarak, TAK bloğu devreye alınır. Akım sıfırdan başlayacak ve sinüzoidal dalga biçimini izleyerek bozulmadan artacaktır. Bir periyot tamamlandıktan sonra, kondansatör

gerilimi $-V_m$ gerilimine sahip olacaktır ve tristör otomatik olarak kesime girecektir. Bu şekildeki işlemle, TAK bloğunun hem devreye alınması hem de devreden çıkarılması yumuşak olacaktır. Eğer tetikleme sinyallerinin zamanı uygun bir şekilde ayarlanılır ve kondansatör $-V_m$ gerilimiyle şarj olursa, ne harmonikler ne de ani akımlar oluşur, çünkü iki önemli koşul başarılmış olur (Dixon vd., 2005). Bu iki koşul ile ilgili olarak aşağıda bilgi verilmiştir.

1. $V_C = -V_m$ ' de dv/dt sıfırdır,
2. Tristör anot katot gerilimi sıfıra eşittir. Kaynak gerilimi $v_s(t) = V_m \cdot \sin \omega t$, kondansatör ilk gerilimi V_{CO} ve tristör anot katot gerilimi $v_T(t)$ ' dir. TAK bloğu devreye alındıktan sonra gerçekleşen duruma göre aşağıdaki (4.14) eşitliği edilir.

$$v_T(t) = v_s(t) - V_{CO} = V_m \cdot \sin \omega t - V_{CO} \quad (4.14)$$

TAK bloğu devreye alındıktan sonra kondansatör gerilimi $-V_m$ olur. Dolayısıyla $V_{CO} = V_m$ olacaktır. Buradan da aşağıdaki (4.15) eşitliği elde edilecektir.

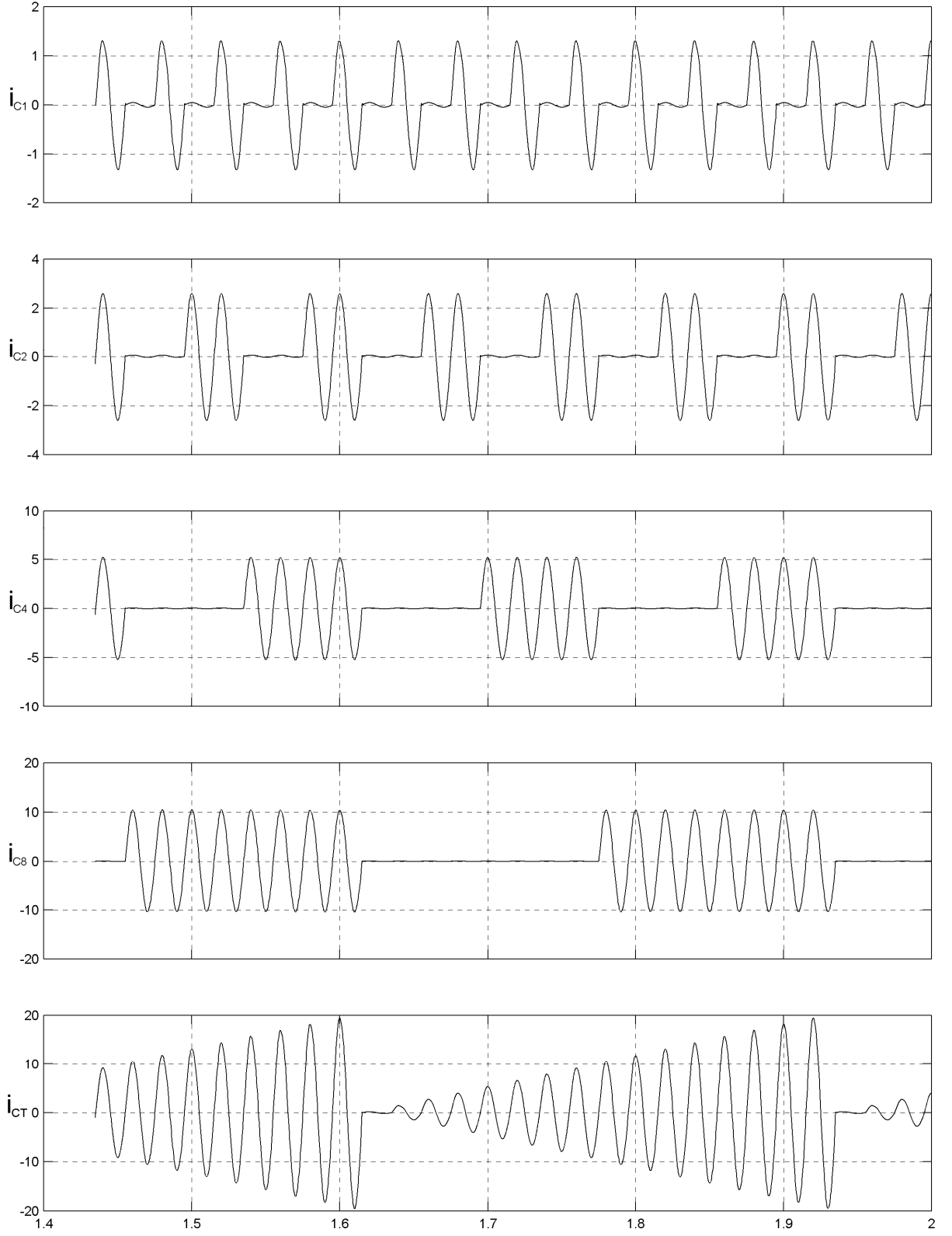
$$v_T(t) = V_m \cdot \sin \omega t + V_m = V_m (1 + \sin \omega t) \quad (4.15)$$

$\omega t = 270^\circ$ ' da tristör iletme sokulur. $\omega t = 270^\circ$ için $\sin \omega t = -1$ olur. Yani $v_T = 0$ olur. TAK bloğunun akımı,

$$i_{TAK}(t) = i_C(t) = C \cdot \frac{dv_C(t)}{dt} = C \cdot V_m \cdot \frac{d}{dt}(-\cos \omega t) = C \cdot V_m \cdot \sin \omega t \quad (4.16)$$

olacaktır. (4.19) eşitliğinde akımın sinüzoidal dalga biçiminde olduğu görülmektedir. Eğer yukarıdaki tetikleme şartları sağlanırsa, endüktans değerleri minimize edilebilir.

Şekil 4.11' de TAK bloklarının akımları gösterilmektedir. Bu modelin avantajı reaktif güç kompanzasyonunun sürekli olmasıdır. Ayrıca model basit ve ekonomiktir.



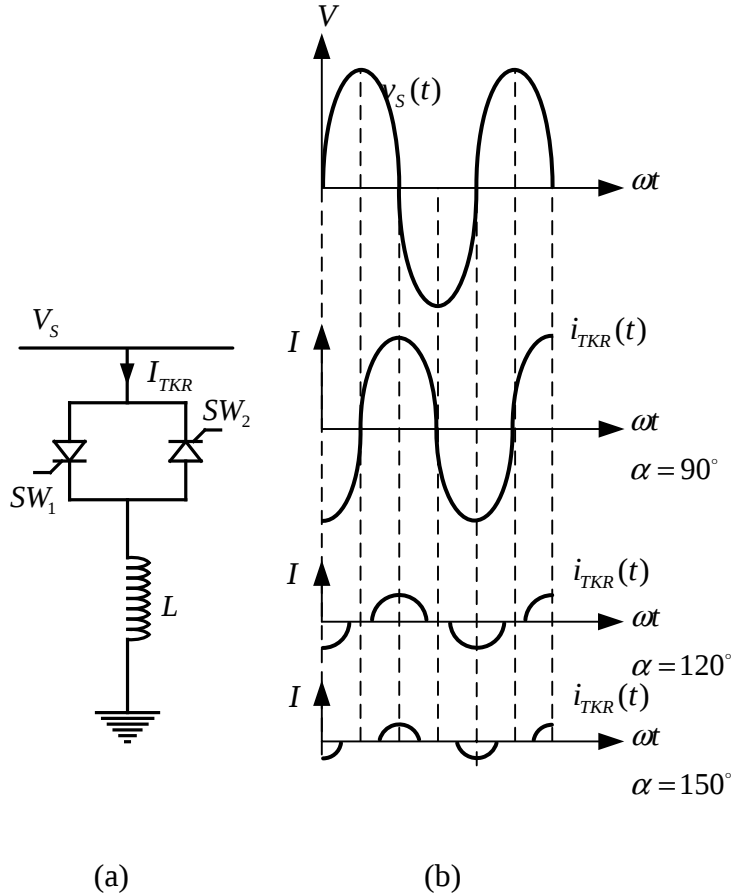
Şekil 4.11 Diyotlu ve tristör anahtarlama kondansatörün akım dalga şekilleri (a) B_1 , (b) B_2 , (c) B_3 , (d) B_4 kolunun ve (e) tüm sistemin akımı

5. TRİSTÖR KONTROLLÜ REAKTÖR

5.1 Tristör Kontrollü Reaktörün Yapısı

Şekil 5.1(a)' da tristör kontrollü reaktörün basit modeli gösterilmektedir. TKR, ters paralel tristörlerden ve bu tristörlere seri bağlı hava çekirdekli reaktörden oluşur. Ters paralel bağlı tristör çifti iki yönlü anahtar gibi çalışmaktadır, SW_1 tristörü kaynak geriliminin pozitif yarı periyodunda iletimdeyken, SW_2 tristörü kaynak geriliminin negatif yarı periyodunda iletimdedir. Tristörlerin tetikleme açıları sıfır gerilim geçişleri referans alınarak belirlenir.

Tetikleme açısı değiştirilerek, akım sıfırla maksimum değerleri arasında sürekli olarak ayarlanır. Tetikleme açısının değeri artırılarak, akımın temel bileşeninin değeri azaltılır. Farklı bir ifadeyle, reaktör endüktansında artışa ve reaktör akımına bağlı olarak da reaktif güç değerinde azalmaya neden olur. TKR kontrol edilebilir süseptans gibi davranır ve bu özelliğinden dolayı da statik VAR kompanzasyon sistemi olarak kullanılabilir (Reddy, 2000).



Şekil 5.1 Tristör kontrollü reaktörüne ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) tetikleme açısı α ' ya göre akım değişimleri

$\alpha = 180^\circ$ ' de akım minimum değerdeyken, $\alpha = 90^\circ$ ' de akım maksimum değerdedir. Böylece α ' nın 90° ' den 180° ' ye kadar olan çeşitli değerleriyle, endüktif reaktans minimum değerden maksimum değere kadar ayarlanabilmektedir.

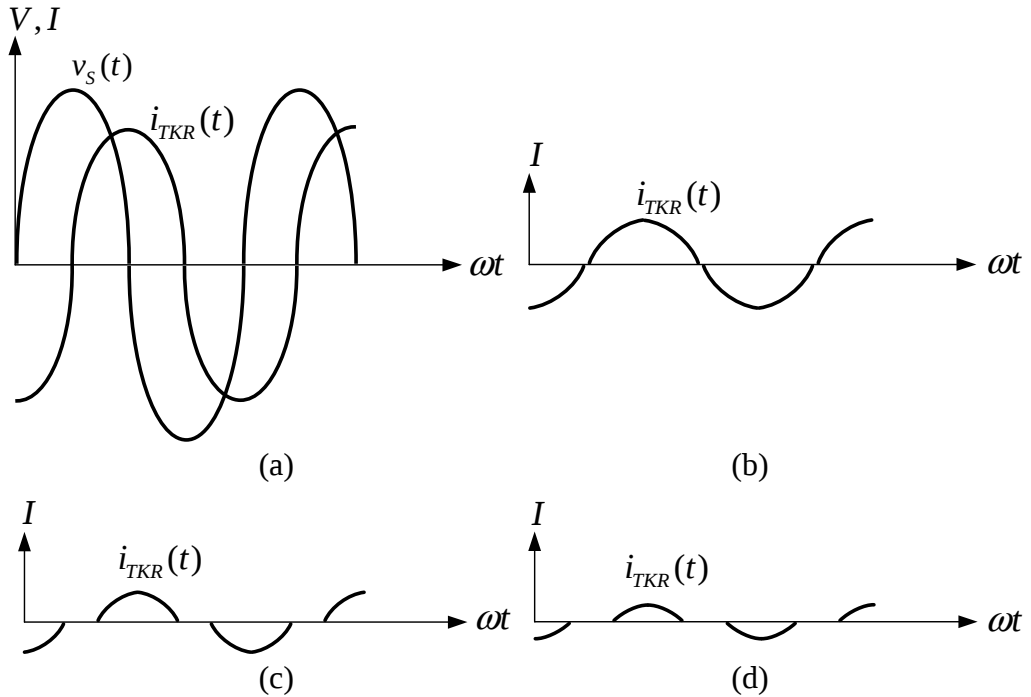
5.2 Tristör Kontrollü Reaktörde Tetikleme Açısı

Reaktör değeri tristörlerle kontrol edilir. Böylece tetikleme açısı α ' ya bağlı ve kontrol edilebilir süseptans fonksiyonu elde edilir.

Reaktörlerin küçükte olsa bir iç direnci vardır, dolayısıyla pratikte akımla gerilim arasındaki faz farkı tam olarak 90° değildir. Fakat iç dirençten kaynaklanan bu durum ihmal edilir ve akımın gerilimden 90° geride olduğu kabul edilir (Acha vd., 2004). Gerilim ile akımın temel frekanstaki dalga şekilleri ve tetikleme açısı α ' yla değişen akımların dalga şekilleri Şekil 5.2(a)' da gösterilmektedir. Tetikleme açısı α ve iletimde kalma açısı σ arasındaki ilişki

$$\sigma = 2.(\pi - \alpha) \quad (5.1)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir.



Şekil 5.2 Tristör kontrollü reaktöre ait (a) $\alpha = 90^\circ$ ve $\sigma = 180^\circ$ (b) $\alpha = 100^\circ$ ve $\sigma = 160^\circ$, (c) $\alpha = 130^\circ$ ve $\sigma = 100^\circ$, (d) $\alpha = 150^\circ$ ve $\sigma = 60^\circ$ durumlarındaki akım dalga şekilleri

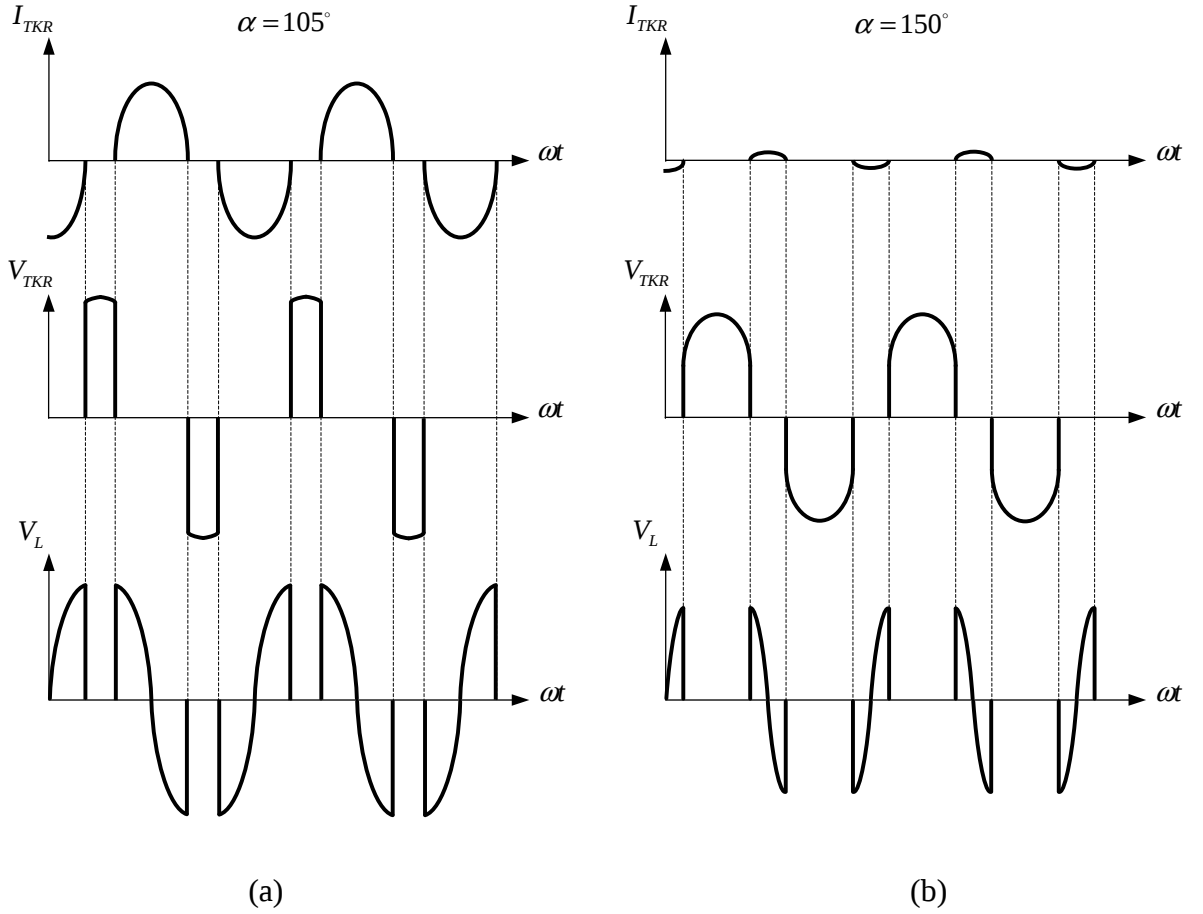
$90^\circ < \alpha < 180^\circ$ ifadesine göre gerçekleşecek bir tetikleme açısıyla, kısmi iletim olur. Tetikleme açısına bağlı olan TKR akımı, Şekil 5.2(b), 5.2(c) ve 5.2(d)' de gösterilmektedir.

Tetikleme açısının değeri 90° 'nin üstüne çıktıkça, akımın temel bileşeninin genliği zayıflar ve TKR' nin akımı sinüs dalga şeklinden uzaklaşır. Ayrıca reaktörün endüktans değerinin artmasına, dolayısıyla kaynaktan çekilen reaktif gücün azalmasına neden olur (Acha vd., 2004).

5.3 Tristör Kontrollü Reaktörün Akım ve Gerilim İfadeleri

TKR' de tetikleme açısı α 'nın aralığı 90° 'den 180° 'ye kadardır. 90° 'lik bir tetikleme açısı, TKR içinden tam ve sürekli sinüzoidal akım geçmesini sağlar. Şekil 5.3' de gösterildiği gibi, tetikleme açısı α , 90° 'den yaklaşık 180° 'ye kadar değişirken, pozitif ve negatif yarı periyotlarda sürekli olmayan darbeler biçiminde simetrik akımlar gerçekleşmektedir.

Bir tristörün iletme sokulmasından sonra tetikleme açısındaki herhangi bir değişim sadece sonraki yarı periyotta gerçekleştirilebilir. Bu durum tristör ölü zamanı olarak adlandırılmaktadır (Mathur ve Varma, 2002).



Şekil 5.3 Tristör kontrollü reaktör modeline ait (a) $\alpha = 105^\circ$ ve (b) $\alpha = 150^\circ$ için akım ve gerilim dalga şekilleri

Kaynak gerilimi,

$$v_s(t) = V_m \cdot \sin \omega t \quad (5.2)$$

olarak ifade edilmektedir. Aynı zamanda reaktör gerilimi de,

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di_{TKR}(t)}{dt} = v_s(t) \quad (5.3)$$

diferansiyel denklemlerle gösterilir. Burada L , TKR' nin endüktansdır. (5.3) eşitliğinin integrali alınarak,

$$i_{TKR}(t) = \frac{1}{L} \int v_s(t) \cdot dt + C \quad (5.4)$$

eşitliği elde edilir. Burada C sabit değerdir. (5.4) eşitliğinin çözümü yapıldığında (5.5) eşitliği elde edilir.

$$i_{TKR}(t) = -\frac{V_s}{\omega L} \cdot \cos \omega t + C \quad (5.5)$$

(5.5) eşitliğinde $\alpha < \omega t < (\alpha + \sigma)$ sınır şartları kullanıldığında,

$$i_{TKR}(t) = -\frac{V_s}{\omega L} \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (5.6)$$

eşitliği elde edilir. Burada α , uygulanan gerilimin pozitiften sıfır geçişine göre ölçülen tetikleme açısıdır. TKR akımının temel bileşeni I_{TKR1} ' yı elde etmek için Fourier analizi kullanılarak,

$$i_{TKR1}(\alpha) = a_1 \cdot \cos \omega t + b_1 \cdot \sin \omega t \quad (5.7)$$

elde edilir. Burada, tek dalga simetrisinden dolayı $f(x) = f(-x)$, yani $b_1 = 0$ ' dir. Aynı zamanda, yarım dalga simetrisinden dolayı $f(x + T/2) = -f(x)$ ' dir. a_1 katsayısı,

$$a_1 = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} f(x) \cdot \cos \frac{2\pi x}{T} \cdot dx \quad (5.8)$$

eşitliğiyle verilir. a_1 katsayısından yararlanarak,

$$i_{TKR1}(\alpha) = \frac{V_s}{\omega L} \cdot \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin 2\alpha \right) \quad (5.9)$$

eşitliği elde edilir.

Ayrıca (5.9) eşitliği,

$$i_{TKR1}(\alpha) = V_S \cdot B_{TKR} \quad (5.10)$$

olarak da yazılabilir. (5.9) ve (5.10) eşitliklerinden yararlanarak, aşağıda gösterilen (5.11) eşitliği elde edilir.

$$B_{TKR} = B_{\max} \cdot \left(2 - \frac{2 \cdot \alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin 2\alpha\right) \quad (5.11)$$

(5.11) eşitliğindeki $B_{\max}$ ifadesinin karşılığı (5.12) eşitliğinde verilmektedir.

$$B_{\max} = B_L = \frac{1}{\omega L} \quad (5.12)$$

Tetikleme açısı α ile iletim açısı σ arasında,

$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \quad (5.13)$$

şeklinde bir ilişki vardır. (5.13) eşitliğini (5.9) eşitliğinde yerine koyarak, TKR akımının temel bileşeninin bir diğer ifadesi,

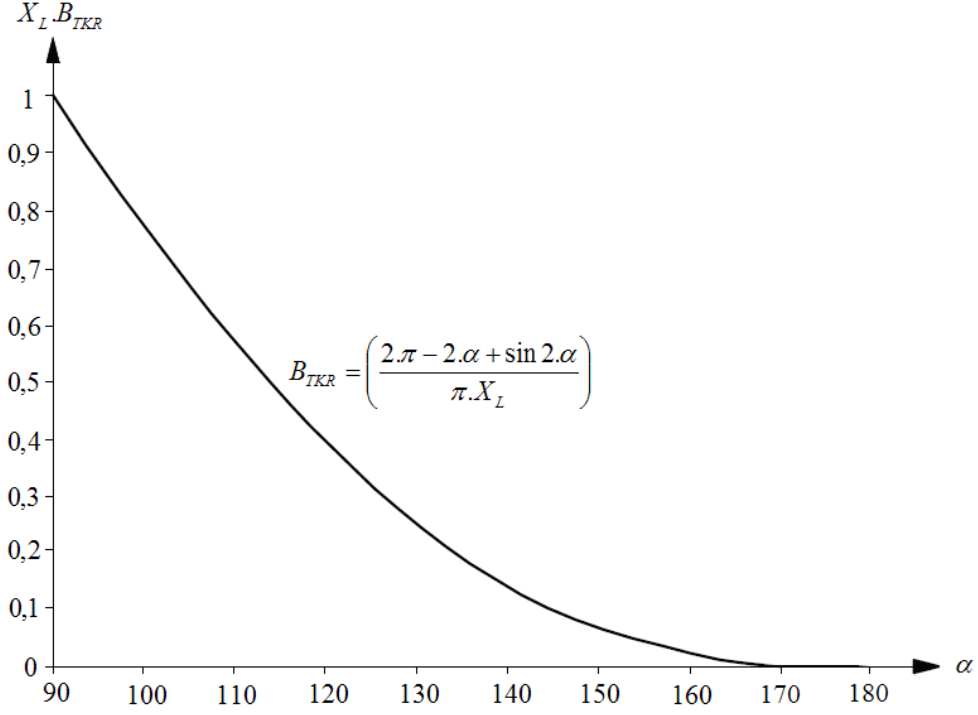
$$i_{TKR1}(\sigma) = V_S \cdot B_{\max} \cdot \left(\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi}\right) \quad (5.14)$$

eşitliğiyle veya

$$i_{TKR1}(\sigma) = V_S \cdot B_{TKR} \quad (5.15)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Sonuç olarak (5.14) ve (5.15) eşitliklerinden yararlanarak, (5.16) eşitliği elde edilir.

$$B_{TKR} = B_{\max} \cdot \left(\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi}\right) \quad (5.16)$$



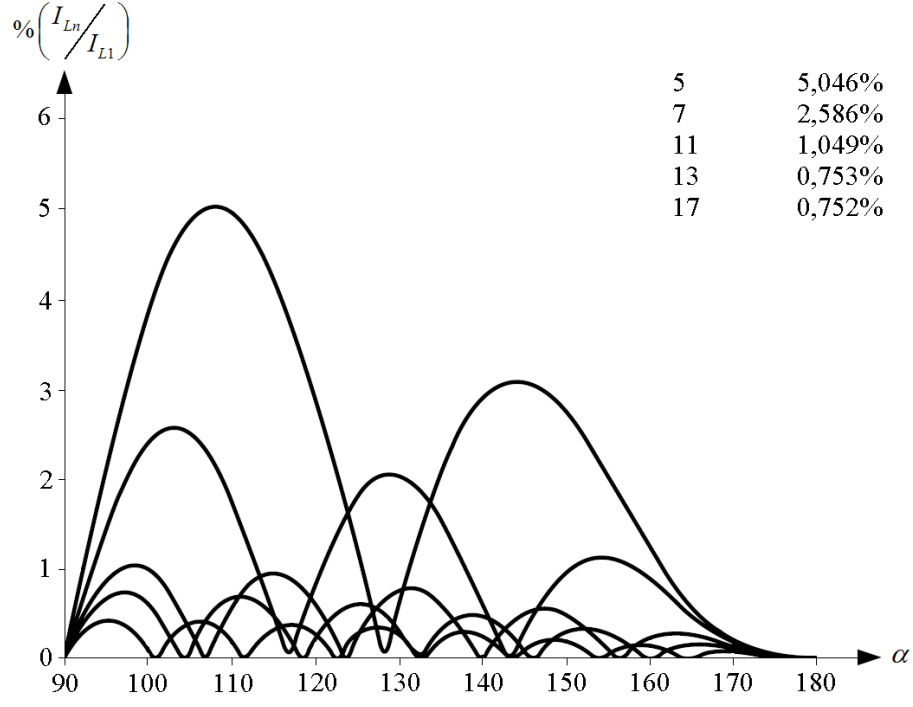
Şekil 5.4 Tristör kontrollü reaktör süseptansı B_{TKR} ' nin tetikleme açısı α ' ya göre değişimi

Tristör kontrollü reaktör süseptansı B_{TKR} ' nin tetikleme açısı α ' yla değişimi Şekil 5.4' de gösterilmektedir. B_{TKR} ' nin birim değeri, tristör kontrollü reaktör süseptansının maksimum değeri $B_{\max}$ ' a göre elde edilir.

n . mertebe harmoniğin rms değeri (5.17)' deki denklemde α ' nın bir fonksiyonu olarak gösterilmektedir.

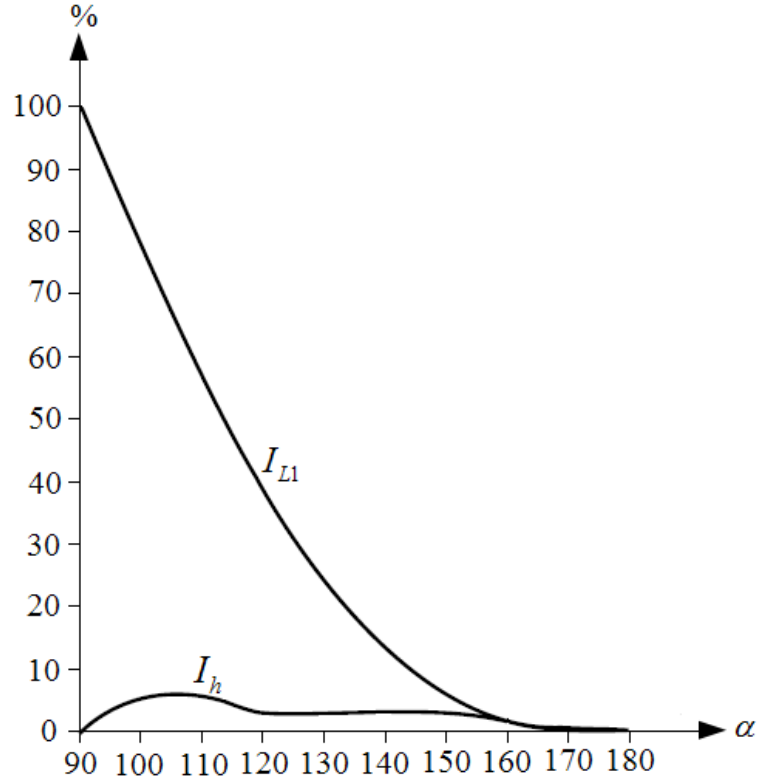
$$\begin{aligned}
 i_{TKRn}(\sigma) &= \frac{V_s}{\omega L} \cdot \frac{2}{\pi} \cdot \left[-2 \cdot \frac{\cos \alpha}{n} \cdot \sin n\alpha + \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \right] \\
 &= \frac{V_s}{\omega L} \cdot \frac{4}{\pi} \cdot \left[\frac{\sin \alpha \cdot \cos n\alpha - n \cdot \cos \alpha \cdot \sin n\alpha}{n \cdot (n^2 - 1)} \right]
 \end{aligned} \tag{5.17}$$

Burada $n = 2k + 1$ ve $k = 1, 2, 3, \dots$ ' dir.



Şekil 5.5 Tristör kontrollü reaktörde akım harmonikleri

Farklı harmoniklerin genliğinin değişimi Şekil 5.5’ de, toplam harmonik akım değişimi Şekil 5.6’ da gösterilmektedir. Tüm harmoniklerin aynı tetikleme açısında tepe değere ulaşmadığı görülmektedir.



Şekil 5.6 Tristör kontrollü reaktörde I_{L1} ve I_h akımları

Örnek

120 V , 60 Hz , tek fazlı AA güç sisteminde 10 kW güçte $\pm 5\%$ regülasyonla, $-4,5$ kVAr $\pm 25\%$ değerindeki yük için uygun bir statik VAR kompanzasyon sistemi tasarlanacaktır. Hat endüktansı 1 mH alınacak.

Kapasitif karakteristikli yükler tristör kontrollü reaktörle kompanze edilir. Yük noktasındaki gerilimin kaynak gerilimine eşit olduğu varsayılarak, akımın aktif ve reaktif bileşenleri hesaplanır. Akımın aktif bileşeni (5.18) eşitliğinde, reaktif bileşeni (5.19) eşitliğide gösterilmektedir.

$$I_{P1} = \frac{P}{V_s} = \frac{10000}{120} = 83,3A \quad (5.18)$$

$$I_{Q1} = \frac{Q}{V_s} = \frac{4500}{120} = 37,5A \quad (5.19)$$

“1” alt indisi temel bileşenini ifade etmektedir. TKR için Şekil 5.7’ de verilen basit model ve akım gerilim dalga şekilleri kullanılır. Tetikleme açısı α Şekil 5.8’ den yararlanarak bulunur.

$I_Q / (V_s / \omega L)$ değerine karşılık gelen tetikleme açısı α ’nın değeri $1,8 \text{ rad}$ ’ dır.

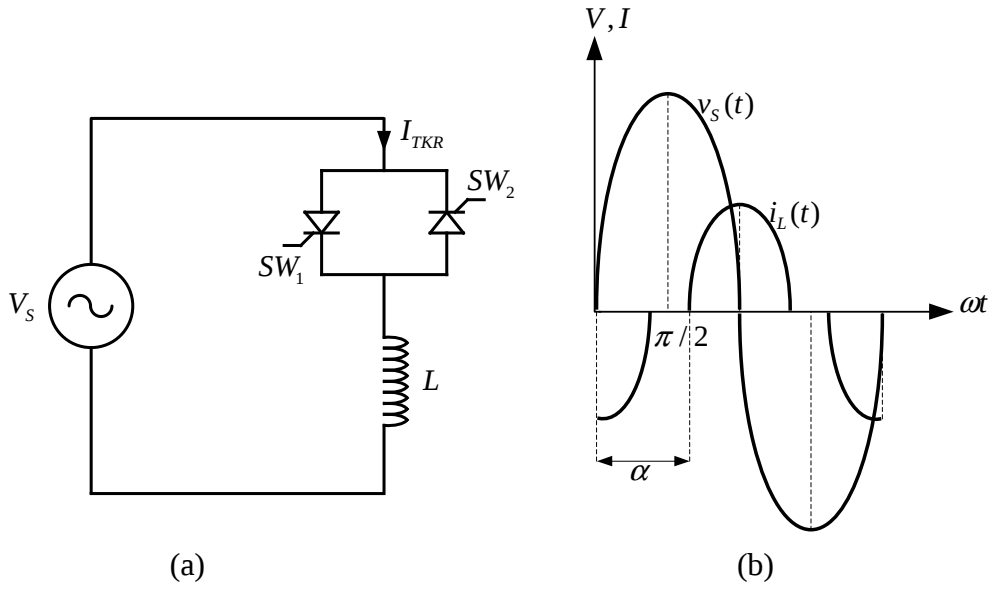
$$I_{Q1} = 37,5A = \frac{V_s}{\pi \omega L} \cdot (2\pi - 2.1,8 + \sin 2.1,8) \quad (5.20)$$

$$L = 6,1 \text{ mH}$$

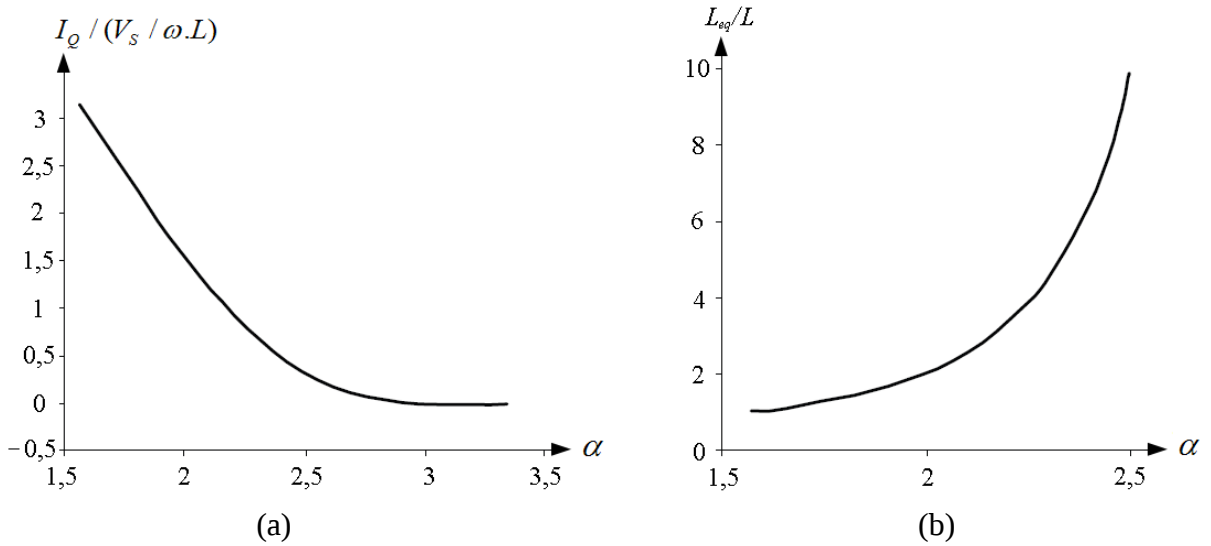
Yük noktasındaki geriliminde oluşacak maksimum 5% dalgalanma için akımın reaktif bileşenindeki değişimin miktarı,

$$I_{Q1d} = \frac{0,05 \cdot 120}{\omega L_s} = \frac{6}{2\pi \cdot 60 \cdot 8,488 \cdot 10^{-3}} = 1,875A \quad (5.21)$$

olur.



Şekil 5.7 Tristör kontrollü reaktöre ait (a) basit devre modeli ve (b) akım ve gerilim dalga şekilleri



Şekil 5.8 (a) $I_Q / (V_s / \omega L)$ (b) L_{eq} / L değerlerinin, tetikleme açısı α ' ya göre değişimleri

4500 + 25% ve 4500 – 25% için akımın reaktif bileşenine ait değerler,

$$I_{Q1}^+ = \frac{1,25.4500}{120} = 46,875A \quad (5.22)$$

$$I_{Q1}^- = \frac{0,75.4500}{120} = 28,125A \quad (5.23)$$

olarak hesaplanır. Buradan TKR' ye ait üst ve alt sınırları sırasıyla (5.24) ve (5.45) eşitliklerinde gösterilmektedir.

$$I_{Q_{1alt}} = 28,125 - 1,875 = 26,25A \quad (5.24)$$

$$I_{Q_{1üst}} = 46,875 - 1,875 = 45A \quad (5.25)$$

Aşağıda $I_{Q_{1alt}}$ ve $I_{Q_{1üst}}$ için gecikme açıları hesaplanması için gerekli olan formüller verilmiştir.

$$\begin{aligned} 45 &= \frac{V_s}{\pi \cdot \omega \cdot L} \cdot (2\pi - 2\alpha_{üst} + \sin 2\alpha_{üst}) = \\ &= \frac{120}{\pi \cdot 2\pi \cdot 60 \cdot 6,1 \cdot 10^{-3}} \cdot (2\pi - 2\alpha_{üst} + \sin 2\alpha_{üst}) \end{aligned} \quad (5.26)$$

$$\begin{aligned} 26,25 &= \frac{V_s}{\pi \cdot \omega \cdot L} \cdot (2\pi - 2\alpha_{alt} + \sin 2\alpha_{alt}) = \\ &= \frac{120}{\pi \cdot 2\pi \cdot 60 \cdot 6,1 \cdot 10^{-3}} \cdot (2\pi - 2\alpha_{alt} + \sin 2\alpha_{alt}) \end{aligned} \quad (5.27)$$

MATLAB ile $\alpha_{üst} - \alpha_{alt}$ açıları aşağıda hesaplanmıştır.

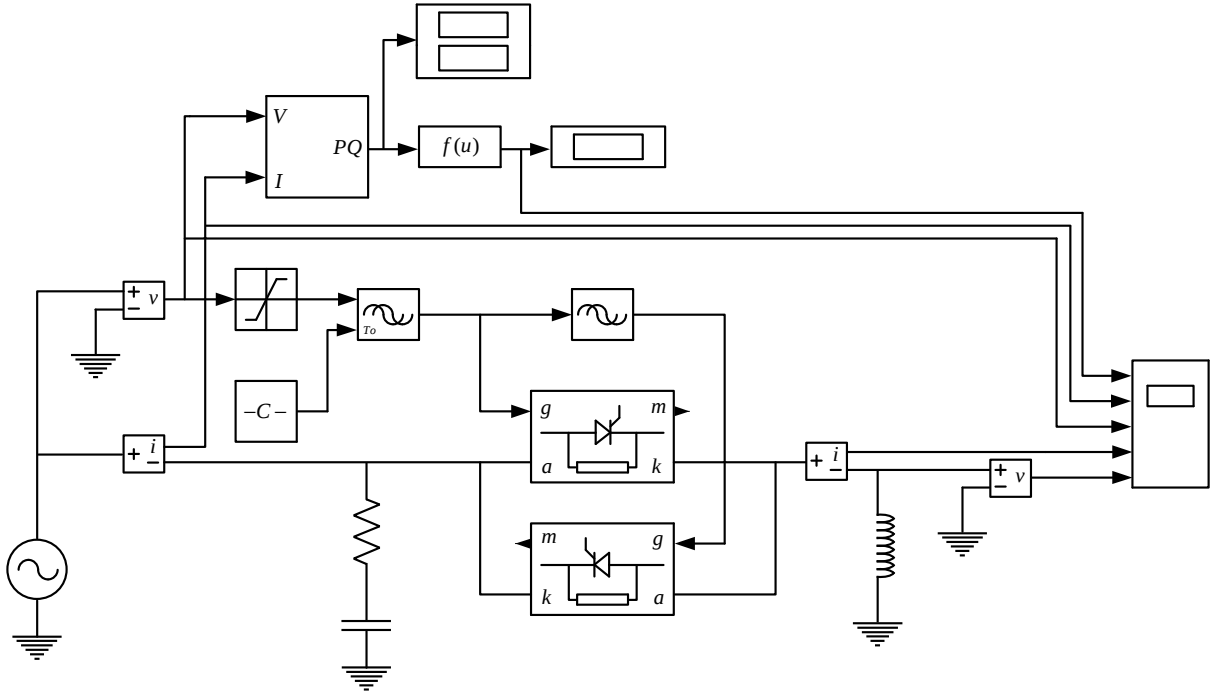
```
L=0.0061;
omega=2*pi*60;
Vsrms=120;
IQ_ust=46.875;
IQ_alt=28.125;
alpha11=pi/2;
alpha12=pi-pi/10;
alpha21=pi/2;
alpha22=pi-pi/10;
f1=1;fm=-1;
while(abs(f1-fm)>=0.001)
    alphas1=(alpha11+alpha12)/2;
    f1=-IQ_ust+( Vsrms /(pi*omega*L))*(2*pi-2*alpha11+sin(2*alpha11));
    fm=-IQ_ust+( Vsrms /(pi*omega*L))*(2*pi-2*alphas1+sin(2*alphas1));
    if(f1*fm>0)
        alpha11=alphas1;
    else
        alpha12=alphas1;
    end
    alphas2=(alpha21+alpha22)/2;
```

```

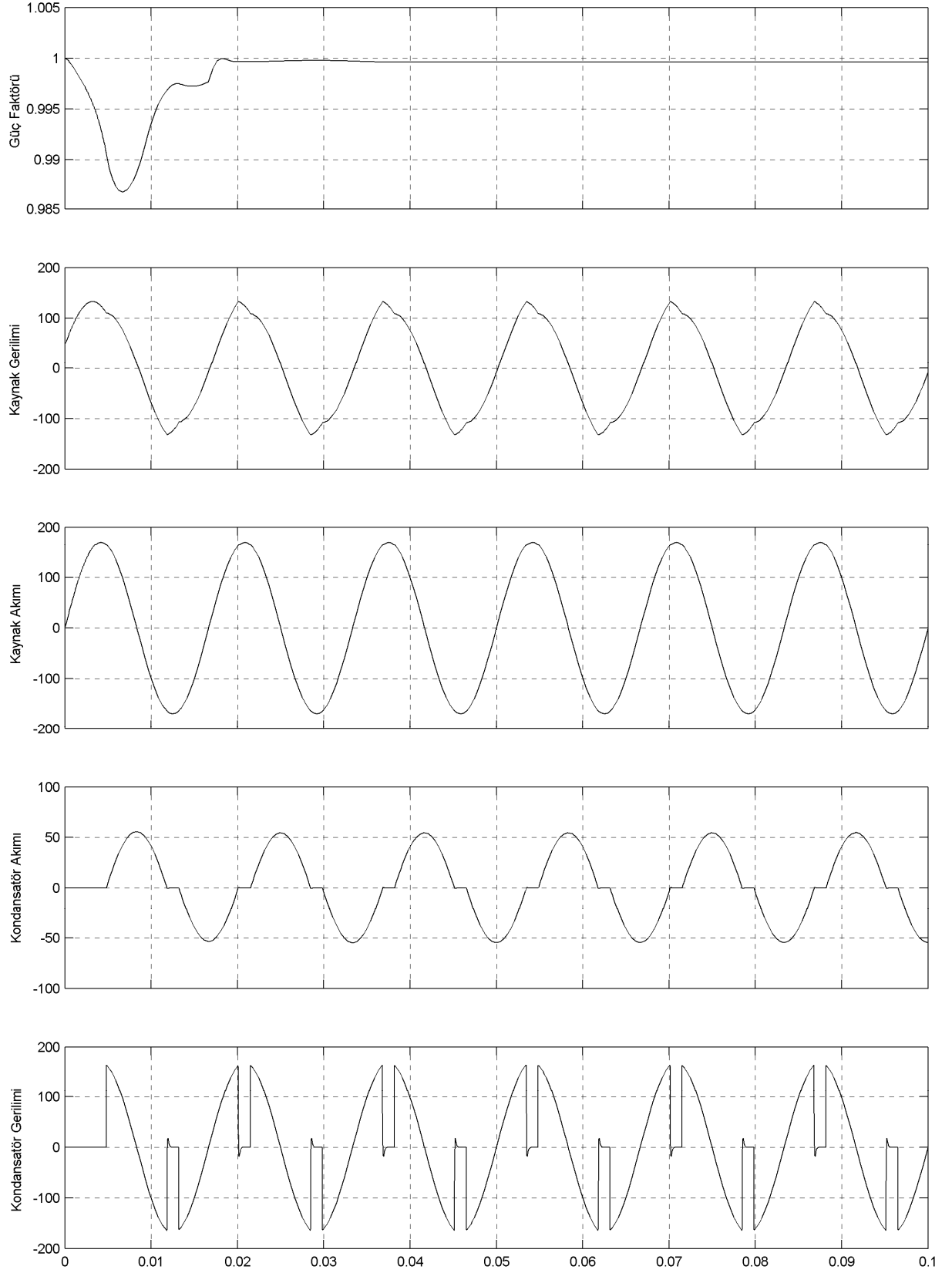
f1=-IQ_ult+( Vsrms /(pi*omega*L))*(2*pi-2*alpha21+sin(2*alpha21));
fm=-IQ_ult+( Vsrms /(pi*omega*L))*(2*pi-2*alphan2+sin(2*alphan2));
if(f1*fm>0)
alpha21=alphan2;
else
alpha22=alphan2;
end
end
alpha_alt=alphan1
alpha_ust=alphan2
alpha=(alpha_alt+alpha_ust)/2

```

Yukarıdaki programla $\alpha_{alt} = 1,6508 \text{ rad}$, $\alpha_{üst} = 1,9506 \text{ rad}$ ve $\alpha = 1,8007 \text{ rad}$ değerleri elde edilir.



Şekil 5.9 Tristör kontrollü reaktöre ait Simulink devresi

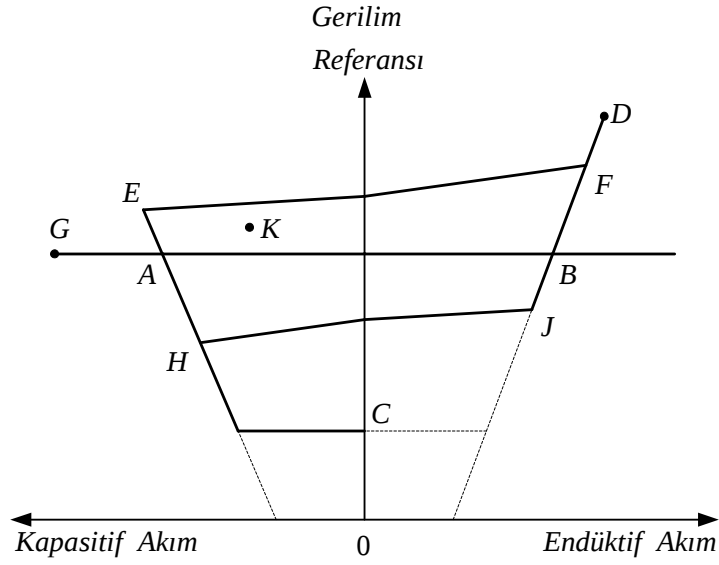


Şekil 5.10 Tristör kontrollü reaktöre ait akım ve gerilim değişimleri

5.4 Tristör Kontrollü Reaktörlerin İşletim Karakteristikleri

5.4.1 Tristör Kontrollü Reaktörün Akım ve Gerilim Karakteristiği

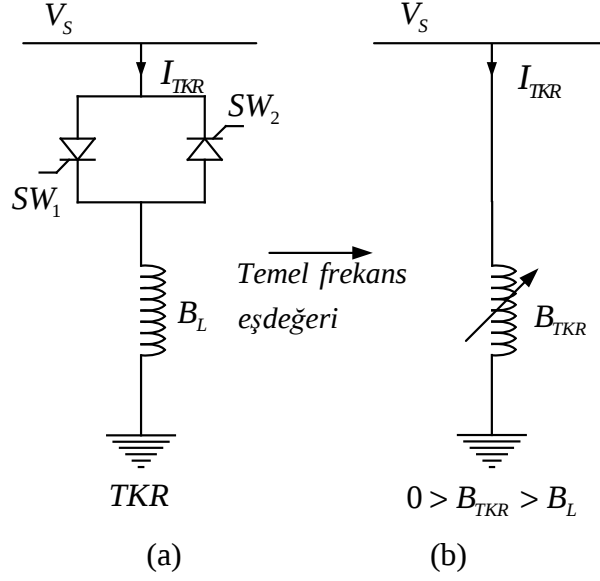
TKR' nin akım ve gerilim karakteristikleri, Şekil 5.11' de gösterilen, AEFBJH sınırlarını aşmayacak şekilde tasarlanır. TKR' de tetikleme açısı $\alpha = 90^\circ$ için, kompanzasyon sistemine ait akım ve gerilim değerleri reaktör empedansının değerine bağlı olarak, FD eğrisi üzerindeki bir noktadadır. Şekil üzerindeki noktalar, sistem ihtiyaçlarına uygun olarak belirlenmektedir (Song ve Jonhs, 1999).



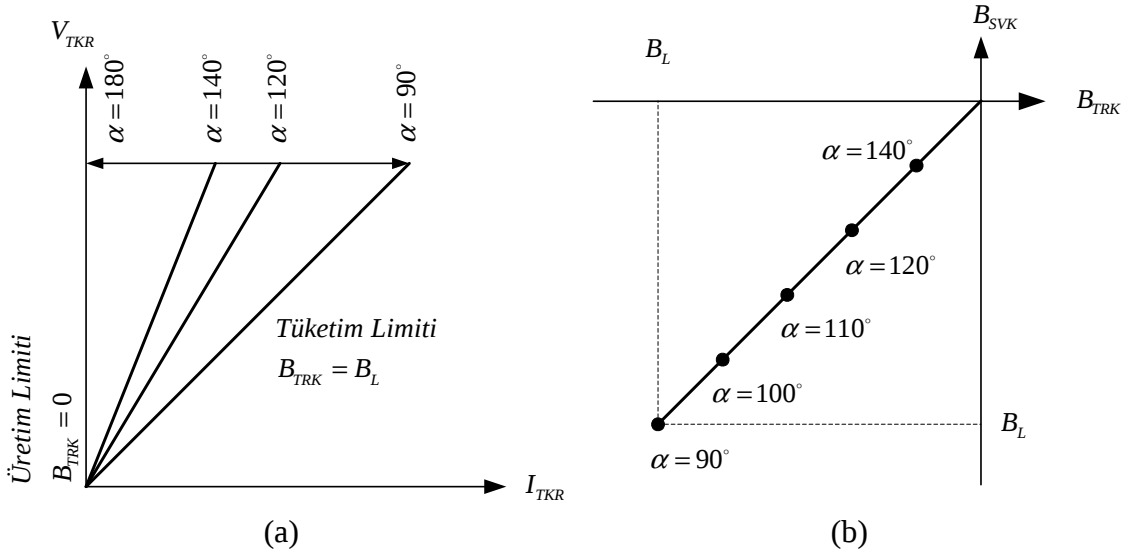
Şekil 5.11 Tristör kontrollü reaktöre ait akım ve gerilim karakteristiği

5.4.2 Gerilim Kontrolü Olmaksızın İşletim Karakteristikleri

Şekil 5.12' de, TKR' ye ait basit model ve eşdeğer devresi gösterilmektedir. Kompanzasyon sisteminin performansının analizinde, temel frekanstaki davranışı temel alınır. Şekil 5.12' de gösterilen yaklaşım, performans analizi için kullanılır. TKR' nin eşdeğer devresindeki B_{TKR} değişken süseptanstır ve (5.16) eşitliğiyle ifade edilir.



Şekil 5.12 Tristör kontrollü reaktöre ait (a) basit devre modeli ve (b) eşdeğer devre



Şekil 5.13 Tristör kontrollü reaktöre ait (a) akım ve gerilim karakteristiği ve (b) süseptans karakteristiği

TKR akımı I_{TKR} aşağıdaki eşitlikle ile tanımlanır.

$$I_{TKR} = V_S \cdot B_{SVK} \quad (5.28)$$

SVK' nın süseptansı B_{SVK} 'nın TKR' deki karşılığı (5.29) eşitliğinde ifade edilmiştir.

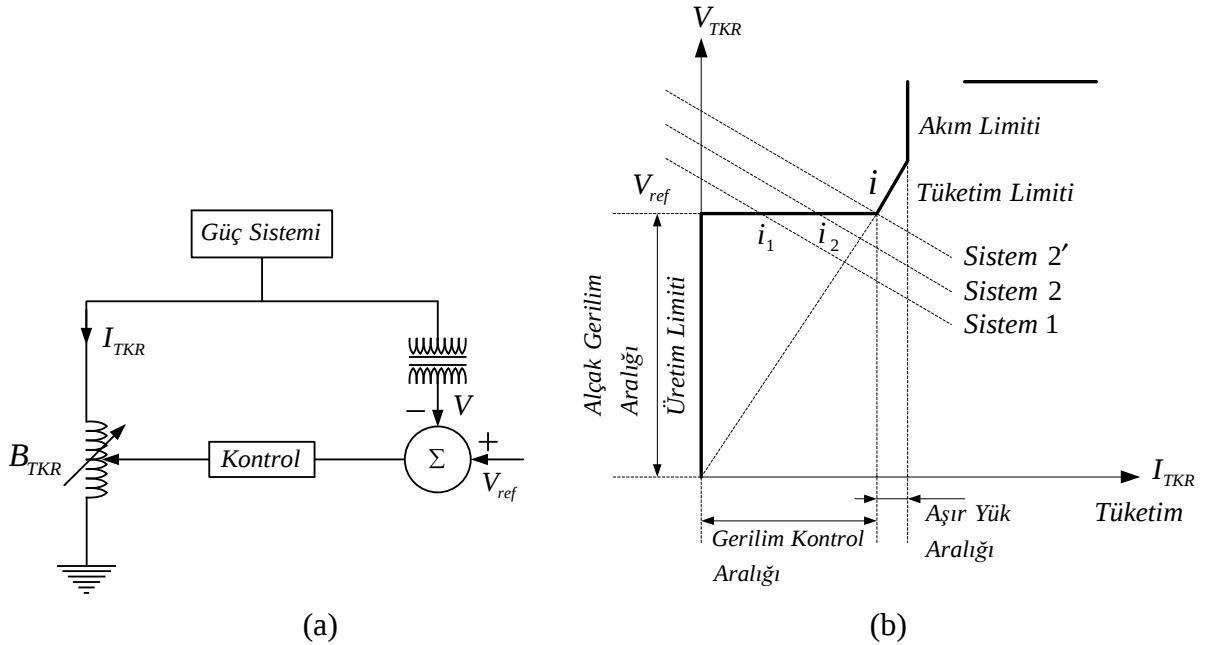
$$B_{SVK} = B_{TKR}(\alpha) \quad (5.29)$$

Bir TKR' yi analiz ederken, incelenen üç temel karakteristik aşağıda verilmiştir (Mathur ve Varma, 2002).

1. Gerilim Akım Karakteristiği, Şekil 5.13(a)' da farklı tetikleme açıları için TKR' nin akım ve gerilim değişimi gösterilmektedir. İki limit arasındaki herhangi bir işletim noktası TKR' nin gerilimine ve tetikleme açısı α ' nın değerine bağlıdır. Bu karakteristik, TKR' nin işletim aralığının sınırlarını ve kararlı hal performansını göstermektedir.
2. TKR' nin Süseptans Karakteristiği, Şekil 5.13(a), TKR süseptansındaki değişimi göstermektedir. B_{TKR} süseptans karakteristiği basit yapıdadır. Ayrıca SVK reaktif güç tükettiği için süseptansı negatiftir.
3. Akım Karakteristikleri, TKR' lerin olduğu sistemlerde, diğer sistemlerin TKR akımındaki etkilerini belirlemek kolay değildir. Bu yüzden, bu karakteristikler TKR akımının fonksiyonu olarak, diğer sistemlerin akımlarını da içerir.

5.4.3 Gerilim Kontrolü ile İşletim Karakteristiği

Gerilim kontrol sistemi, TKR' nin gerilimini ölçer ve geri besleme sistemiyle V_{ref} ' i sağlayarak, B_{TKR} ' nin değerini ayarlar. Gerilim kontrolünün yapıldığı bu aralık, Şekil 5.14(b).’ de gösterilen işletim karakteristiğinde, “gerilim kontrol aralığı” olarak tanımlanmaktadır (Mathur ve Varma, 2002).



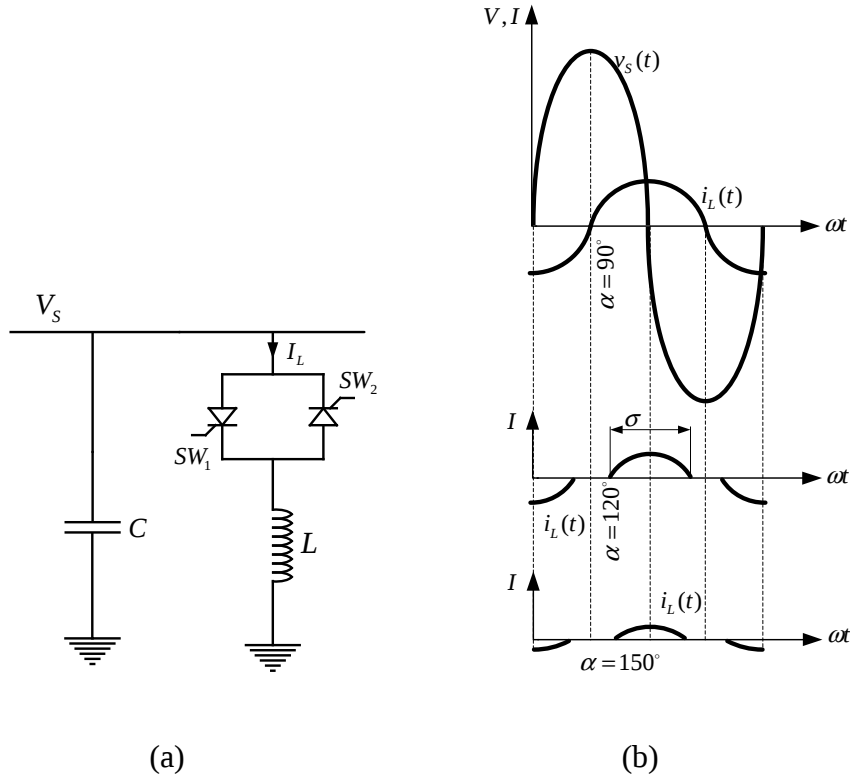
Şekil 5.14 Tristör kontrollü reaktöre ait (a) gerilim kontrolü modeli ve (b) işletim karakteristiği

Şekil 5.14(b)' deki “sistem 1” ve “sistem 2” karakteristikleri, sistem tarafından reaktif güç çekildiğinde, sistem gerilimindeki düşüşü temsil etmektedirler. İki koşul için işletim noktaları i_1 ve i_2 ' dir. “Sistem 2” koşulunda sistem gerilimi yükselirse, yeni bir karakteristik olan “sistem 2'” koşulu ortaya çıkar. Daha sonra işletim noktası i_2 , işletim noktası i_1 ' ye taşınır ve kompanzasyon sisteminin tüketim limitine ulaşılır. Bu noktadan sonraki, sistem geriliminde oluşacak herhangi bir yükselme, kontrol sistemi tarafından telafi edilemez. Çünkü TKR reaktörü tamamen iletimdedir. Bu yüzden, işletim noktası i_2 belirlenirken, tetikleme açısı α 'nın değeri dikkate alınır.

6. REAKTÖR VE KONDANSATÖRLÜ KARMA SİSTEMLER

6.1 Tristör Kontrollü Reaktör ve Sabit Kondansatör

Şekil 6.1(a)' da tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait basit model gösterilmektedir. Bu modelde, iki ters paralel tristör ile seri endüktans ve bunlara paralel kondansatör bulunur. Bu tristörlerin tetikleme açılarıyla endüktans akımının temel bileşeni ve böylece reaktif güç ayarlanabilir. Farklı tetikleme açıları altında sistemin gerilimi ve reaktör akımının dalga şekilleri Şekil 6.1(b)' de gösterilmektedir.



Şekil 6.1 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait (a) basit devre modeli ve (b) akım dalga şekilleri

Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör birlikte kullanılarak, hem kapasitif hem de endüktif yüklerin kompanzasyonu sağlanır. Uygulamalarda, kondansatörün gücü, yükün endüktif reaktif gücünü tümüyle kompanse edecek şekilde seçilir. Yükün endüktif reaktif gücünde bir azalma olması durumunda kondansatör yükü kompanse etmekle beraber, sisteme fazladan kapasitif reaktif güç verecektir. Bu durumda tristör kontrollü reaktör devreye girecek ve kompanzasyonu sağlayacaktır (Jin vd., 1994; Acha vd., 2004; Dixon vd., 2005).

6.1.1 Tristör Kontrollü Reaktör ve Sabit Kondansatörün Matematiksel Modeli

Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörün basit modeli, tetikleme açısı α ile iletim açısı σ , akım ve gerilim değişimleri Şekil 6.1(b)' de gösterilmiştir.

Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörün süseptans değeri (6.1) eşitliğinde verilmektedir.

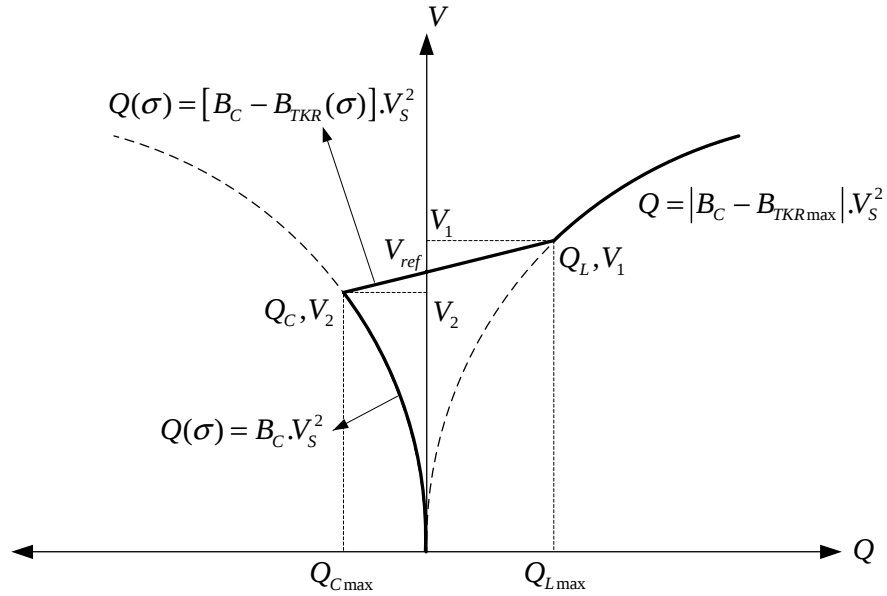
$$B_{TKR\ SK}(\sigma) = B_{SK} - B_{TKR}(\sigma) \quad (6.1)$$

TKR süseptans değeri $B_{TKR}(\sigma)$ (4.11) eşitliğinde verilmiştir. B_{SK} , kondansatör süseptansı B_C 'yi ifade etmektedir. (6.1) eşitliğinde $B_{TKR}(\sigma)$ ifadesi yerine (4.16)' daki ifadesi yazılarak, aşağıdaki (6.2) eşitliği elde edilir.

$$B_{TKR\ SK}(\sigma) = B_C - B_{\max} \cdot \left(\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right) \quad (6.2)$$

İletim açısı σ ' ya bağlı olarak değişecek tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörün reaktif güç ifadesi (6.3) eşitliğinde gösterilmektedir.

$$Q(\sigma) = [B_C - B_{TKR}(\sigma)] \cdot V_S^2 \quad (6.3)$$



Şekil 6.2 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde gerilim ile reaktif güç değişimi

Şekil 6.2' den görüldüğü gibi kompanzasyon sisteminin kontrolü V_1 ve V_2 gerilimleri arasındaki bölgede yapılır. Bu aralıkta, tristörlerin tetikleme açısı α ' ya bağlı olarak, gerilim ile reaktif güç arasında lineer değişim vardır. $\alpha = 90^\circ$ ' den $\alpha = 180^\circ$ ' ye kadar değişirken

(Q_C, V_2) noktasından (Q_L, V_1) noktasına doğru lineer bir değişim gerçekleşir. Maksimum kapasitif reaktif güç çıkışı $\alpha = 180^\circ$ de gerçekleşirken maksimum endüktif reaktif güç çıkışı $\alpha = 90^\circ$ de meydana gelir (Dixon vd., 2005).

6.1.2 İşletim Karakteristiği

6.1.2.1 Düşürücü Transformatörünün Olmadığı Durum

Bir TKR SK' ya ait akım gerilim karakteristiği Şekil 6.4' de gösterilmektedir. Kaynak gerilimi V_s ile TKR SK' nın süseptansı $B_{TKR SK}$ kullanılarak, TKR SK' nın akımı $I_{TKR SK}$, (6.4) eşitliğinde gösterildiği gibi ifade edilir.

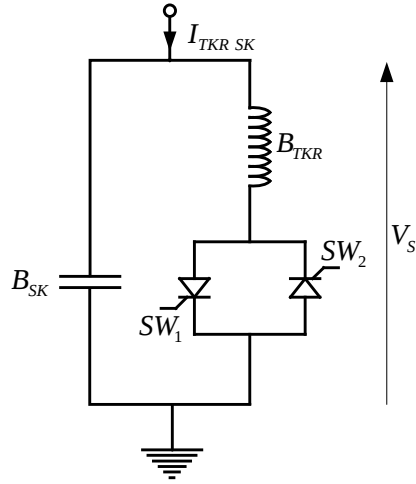
$$I_{TKR SK} = V_s \cdot B_{TKR SK} \quad (6.4)$$

(6.3) eşitliğinde $B_{TKR SK}$ ifadesinin iletim açısı σ ' ye bağlı ifadesi verilmişti. $B_{TKR SK}$ ifadesinin tetikleme açısı α ile ifadesi (6.8) ve (6.9) eşitliklerinde gösterilmektedir.

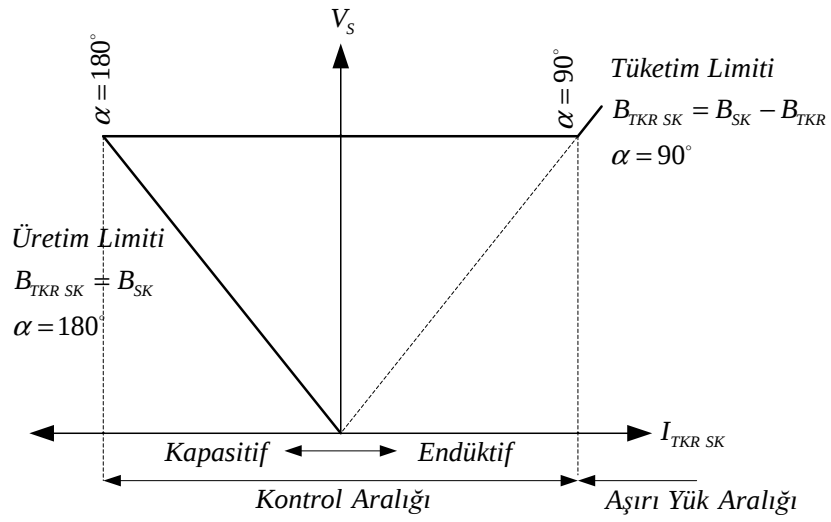
$$B_{TKR SK}(\alpha) = B_{SK} - B_{TKR}(\alpha) \quad (6.5)$$

$$B_{TKR SK}(\alpha) = B_C - B_{max} \cdot \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin 2\alpha\right) \quad (6.6)$$

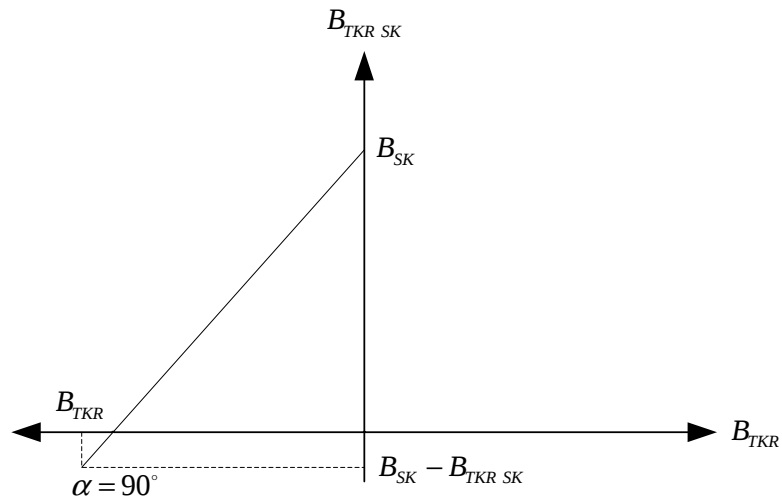
Şekil 6.3(b) ve 6.3(c)' de bu tip kompanzasyon sisteminin, işletim karakteristiği ve süseptansı gösterilmektedir. Tetikleme açısı α ' ya bağlı olarak, hem kapasitif hem de endüktif bölge de çalışmak mümkündür (Mathur ve Varma, 2002).



(a)



(b)



(c)

Şekil 6.3 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde düşürücü transformatörün olmadığı durumdaki (a) basit devre modeli, (b) akım ve gerilim karakteristiği ve (c) süseptans karakteristiği

6.1.2.2 Düşürücü Transformatörün Olduğu Durum

Şekil 6.4' de gösterildiği gibi, TKR SK' lar, yüksek gerilimli AA güç sistemine transformatörle bağlanırlar.

Transformatör süseptansı ve TKR SK' nın süseptansı $B_{TKR SK+T}$ ' nın değeri (6.8) eşitliğinde ifade edilmektedir.

$$B_{TKR SK+T} = \frac{B_{\sigma} \cdot (B_{SK} - B_{TKR})}{B_{\sigma} + B_{TKR} - B_{SK}} = \frac{1}{1 + \frac{B_{TKR} - B_{SK}}{B_{\sigma}}} \cdot (B_{SK} - B_{TKR}) \quad (6.7)$$

(6.8) eşitliğinden süseptans limitleri hesaplanılabilir. Üretim limitinde, $\alpha = 180^{\circ}$ için $B_{TKR} = 0$ ' dır. Bu durumda düşürücü transformatörlü TKR SK' nın süseptansı maksimum değerde olup,

$$B_{TKR SK+T \max} = \frac{B_{\sigma} \cdot B_C}{B_{\sigma} - B_C} \quad (6.8)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Tüketim limitinde, $\alpha = 90^{\circ}$ için $B_{TKR} = B_L$ ' dir. Bu durumda düşürücü transformatörlü TKR SK' nın süseptansı minimum değerde olup,

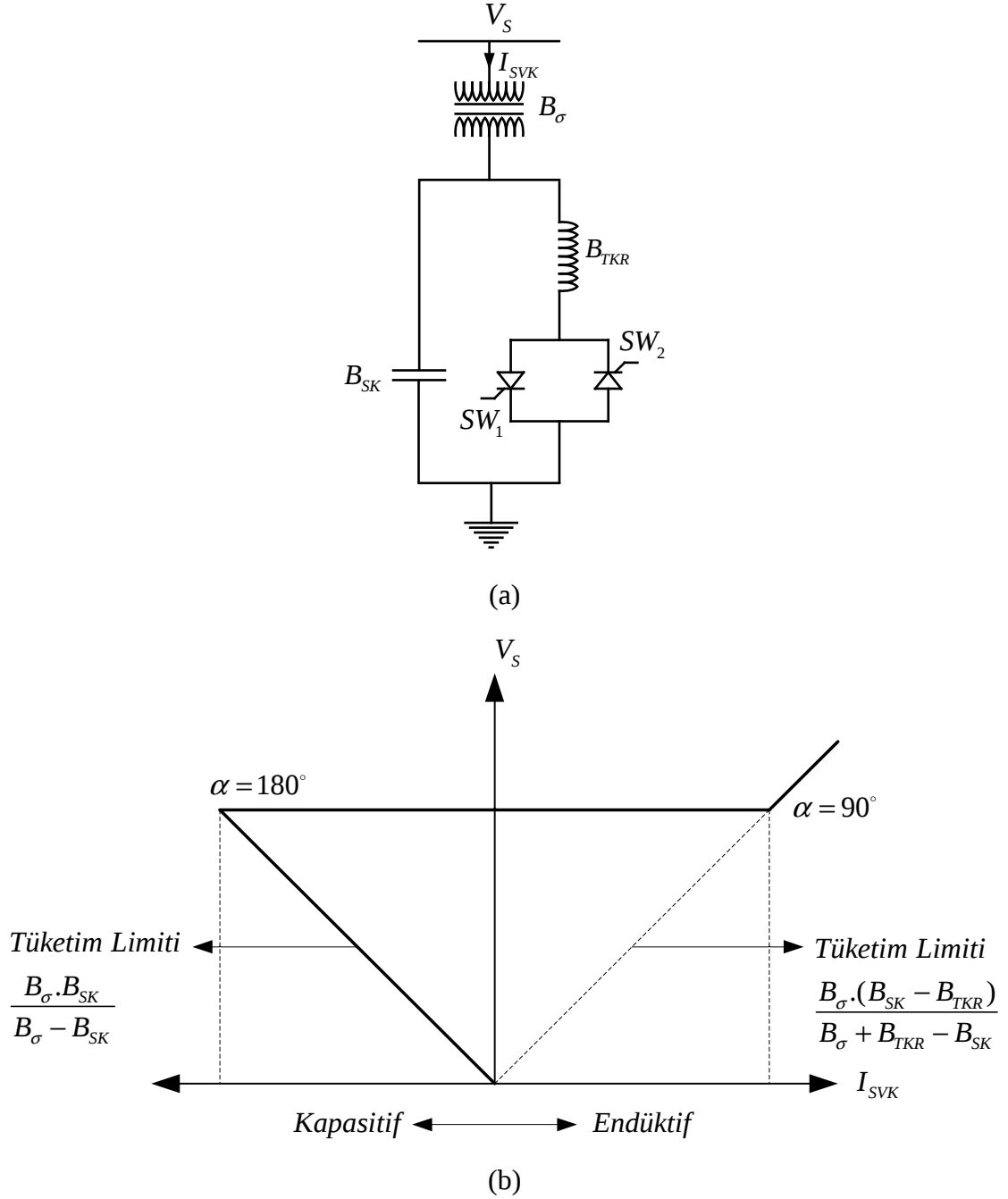
$$B_{TKR SK+T \min} = \frac{B_{\sigma} \cdot (B_C - B_L)}{B_{\sigma} + B_L - B_C} \quad (6.9)$$

eşitliğiyle ifade edilir. TKR SK' nın süseptansı $B_{TKR SK}$ ve transformatör süseptansı B_{σ} ' dan yararlanarak transformatör primer gerilimi,

$$V_S = I_{SVK} \cdot \frac{1}{B_{SVK}} \quad (6.10)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Kompanzasyon sisteminin işletim limitlerinde, aşağıdaki sekonder gerilimleri bulunur. (6.11) eşitliğindeki B_{SVK} süseptansı için (6.8) eşitliğindeki ifade kullanılır. Bu duruma göre (6.11) eşitliği düzenlendiğinde aşağıdaki (6.12) eşitliği elde edilir.

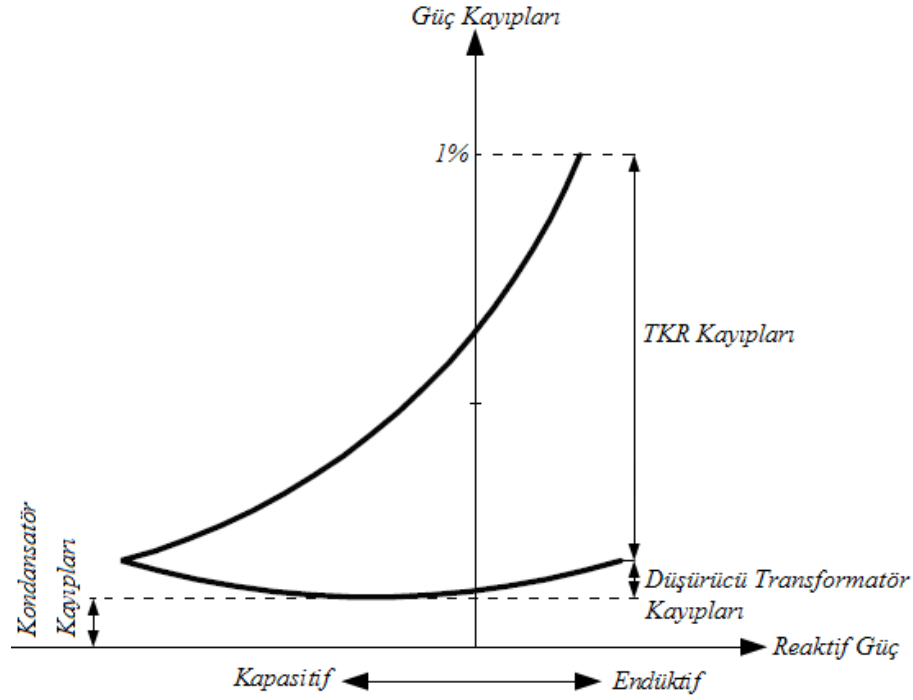
$$V_S = I_{SVK} \cdot \frac{1}{\frac{B_{\sigma} \cdot (B_{SK} - B_{TKR})}{B_{\sigma} + B_{TKR} - B_{SK}}} = I_{SVK} \cdot \frac{B_{\sigma} + B_{TKR} - B_{SK}}{B_{\sigma} \cdot (B_{SK} - B_{TKR})} \quad (6.11)$$



Şekil 6.4 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde düşürücü transformatörün olduğu durumdaki (a) basit devre modeli ve (b) akım gerilim karakteristiği

6.1.3 Tristör Kontrollü Reaktör ve Tristör Anahtarlama Kondansatör Tercihi

Şekil 6.5' de, TKR SK' de düşürücü transformatörün olduğu durumdaki kayıplar gösterilmektedir. TKR SK yapısının bir dezavantajı, büyük endüktans akımı yüzünden endüktif bölgede büyük güç kayıplarının oluşmasıdır. Aynı zamanda sabit kondansatörler olası sistem düzensizliklerinde, AA güç sistemi üzerinde ters etkiye sebep olurlar (Gyugyi, 1988; Jin vd., 1994).



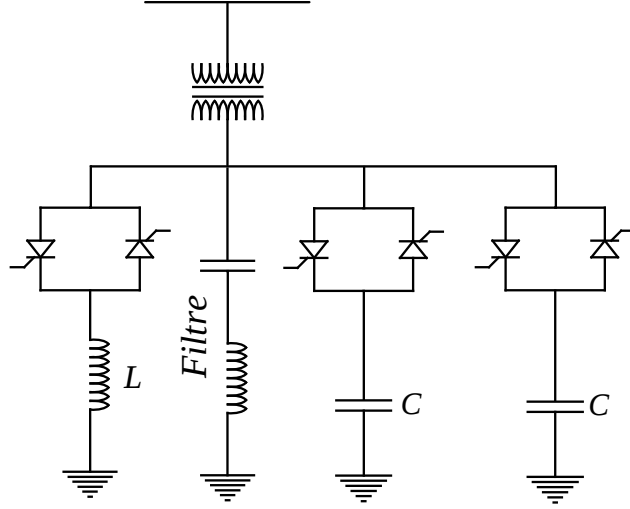
Şekil 6.5 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde düşürücü transformatörün olduğu durumdaki kayıplar

Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatörlerinde tek bir TAK yerine bir birine paralel TAK' lar kullanılır. Sabit kondansatörlü yapıdan farklı olarak, kondansatörler sürekli olarak devrede olmayıp, yalnızca endüktif bölgede devreye alınırlar. Bu durumda reaktörlerin kullanımını azaltmış olur (Gyugyi, 1988; Jin vd., 1994).

6.2 Tristör Kontrollü Reaktör ve Tristör Anahtarlama Kondansatör

Şekil 6.6' da gösterildiği gibi, tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatör n tane paralel bağlı tristör anahtarlama kondansatörle ve tristör kontrollü reaktörden oluşur. TKR' nin değeri, kompanzasyon sisteminin toplam reaktif gücünün $1/n$ değerinde olacak şekilde tasarlanır. Kondansatörler ayrı ayrı anahtarlamlar ve her adımda reaktif gücünün sürekli kontrolü TKR tarafından sağlanır (Mathur ve Varma, 2002).

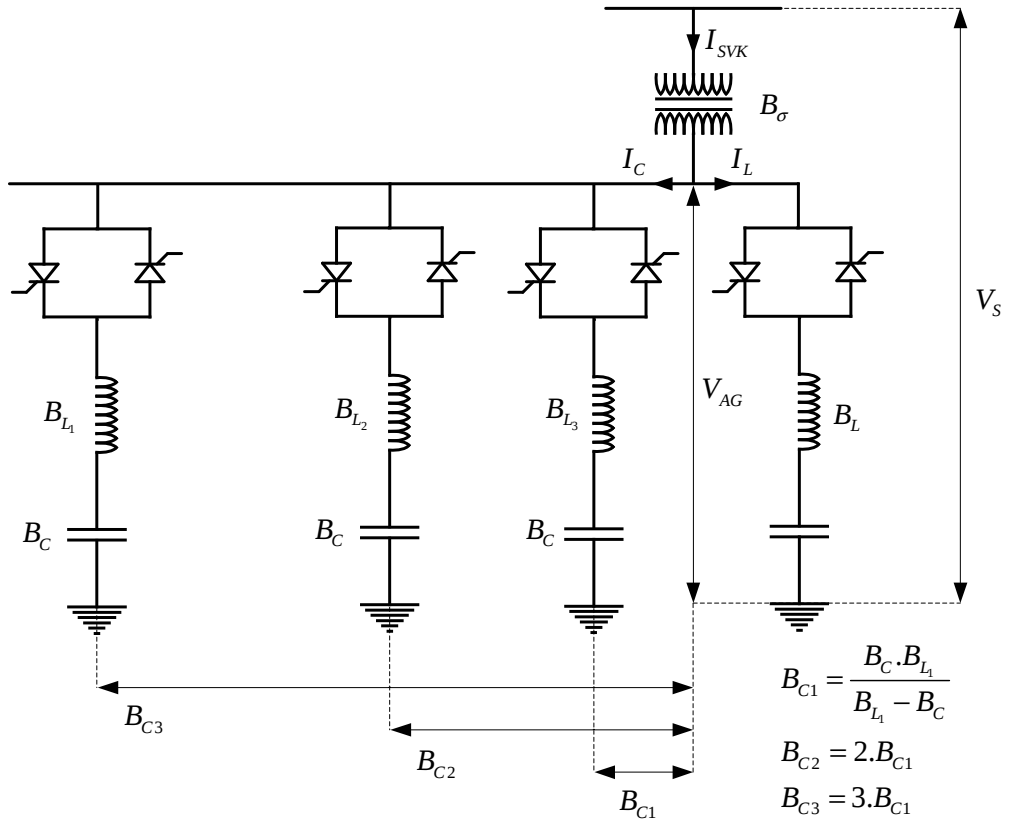
TKR' nin boyutu küçük olduğundan, harmonik üretimi de aynı zamanda küçüktür. TKR TAK' ların kullanılmasındaki en büyük neden kararlı hal kayıplarının iyi olmasıdır. TKR SK' lardaki sabit kondansatör, AA güç sistemi empedansı ile rezonansa girerek, paralel LC devresi gibi davranabilirler. Bu durumda kondansatörler devreden çıkarılamazlar. TKR TAK' larda ise, olası bir rezonans durumunda tüm kondansatörlerin kompanzasyon sisteminden bağlantısı kesilir (Mathur ve Varma, 2002).



Şekil 6.6 Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatöre ait basit devre modeli

6.2.1 İşletim Karakteristiği

TKR TAK modeli, birkaç farklı değere sahip olabilecek sabit kondansatör ile tristör kontrollü reaktörden meydana gelmektedir.



Şekil 6.7 Bir adet tristör kontrollü reaktör ve üç adet tristör anahtarlama kondansatörünün kullanıldığı kompanzasyon örneği

Şekil 6.7' de bir TKR TAK' a ait örnek verilmektedir. Kompanzasyon sistemi, üç adet TAK ve bir adet TKR' den oluşmaktadır. Tüm TAK bloklarının özdeşdir.

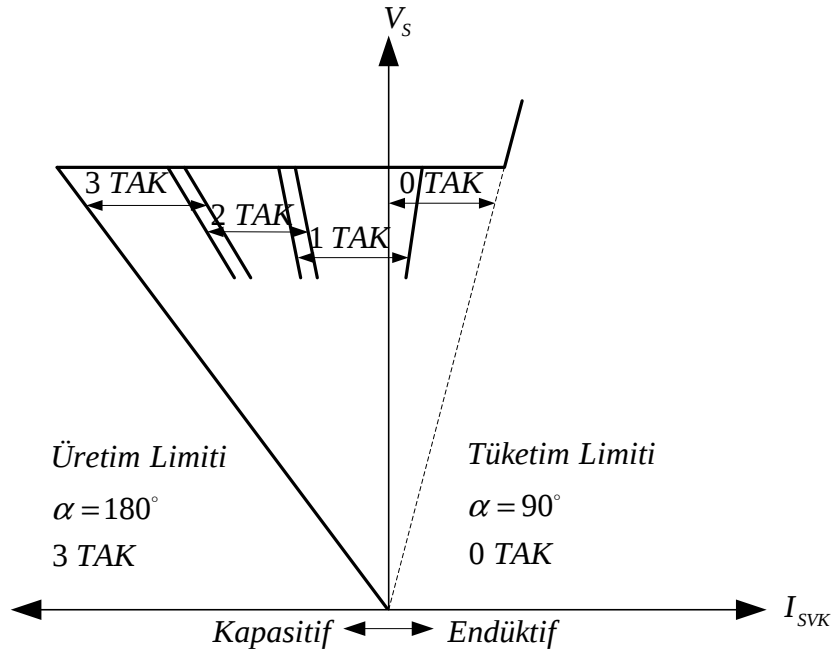
Çalışma aralığı limitlerinin belirlenmesinde (6.8) ve (6.9) eşitliklerinden yararlanılır. Bu eşitliklerdeki B_c ifadesinin yerine B_{C3} ifadeleri kullanılarak aşağıdaki eşitlikler elde edilir.

B_{C3} üç adet paralel TAK bloğuna ait süseptanstır. B_{C3} süseptansı hesaplanırken bastırma endüktanslarının değerleri de hesaba katılır.

$$B_{TKR \text{ TAK}+T \max} = \frac{B_\sigma \cdot B_{C3}}{B_\sigma - B_{C3}} \quad (6.12)$$

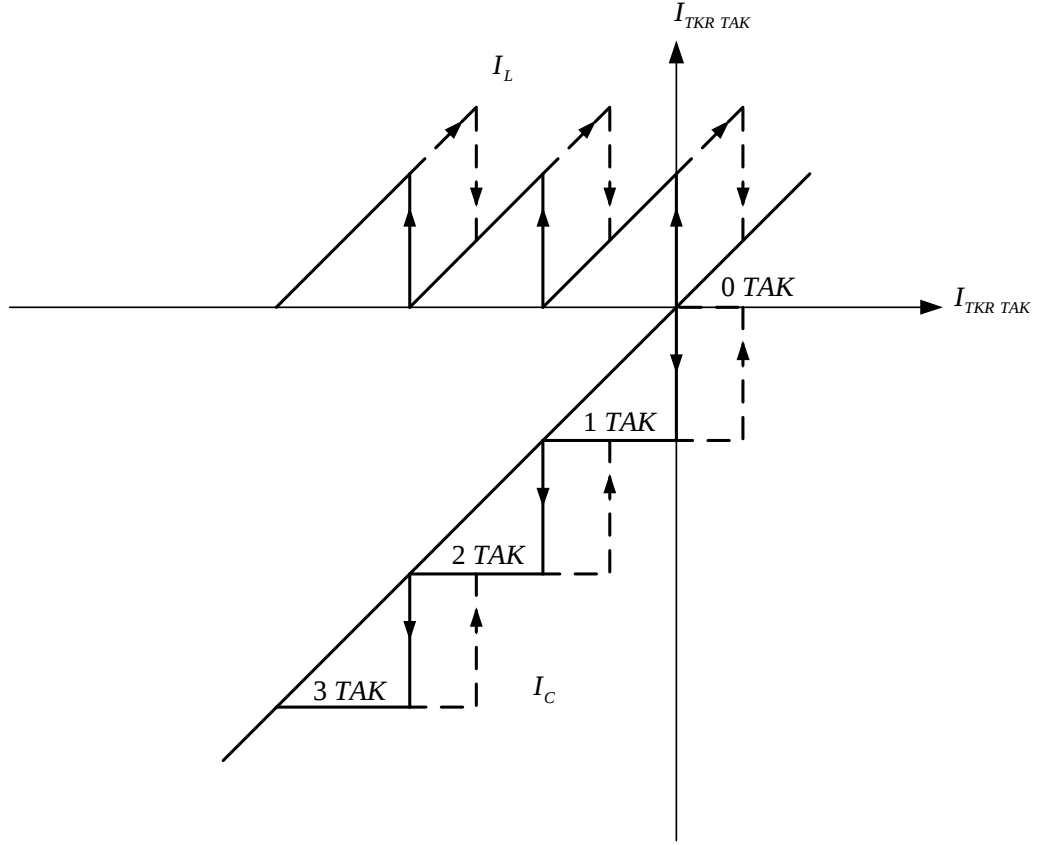
$$B_{TKR \text{ SK}+T \min} = \frac{B_\sigma \cdot (B_{C3} - B_{TKR})}{B_\sigma + B_{TKR} - B_{C3}} \quad (6.13)$$

Şekil 6.8' de TKR TAK' ın işletim karakteristiği gösterilmektedir. Bu karakteristikte TKR TAK' a ait üretim ve tüketim limitleri görülmektedir.



Şekil 6.8 Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlamalı kondansatöre ait akım ve gerilim karakteristiği

Şekil 6.9' da TKR TAK' ın akım karakteristiği gösterilmektedir. Bu karakteristikte sadece TKR' nin devrede olduğu duruma ait ve sadece TAK' ların devrede olduğu duruma ait akımlar gösterilmektedir.



Şekil 6.9 Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatöre ait akım karakteristiği

7. SİMÜLASYON UYGULAMASI VE SONUÇLARI

Bu tezde tek fazlı TKR SK, Matlab 7.4®/Simulink ortamında ele alınmıştır. Çalışılan devreye ait model Şekil 7.1' de gösterilmektedir. Sistem 220 V' luk 50 Hz' lik gerilim kaynağından beslenmektedir. Bir reaktör bir kondansatör ile seri bağlanarak, kondansatör – reaktör kombinasyonu ile harmonik frekanslar için filtre ve temel frekans için bir kapasitif yük görevi gerçekleştirilmiştir. Bu sayede sabit kondansatör kısmı gerçekleştirilmiştir.

Rezonans frekansı için $f_{rn} = 210$ Hz ve filtrenin kapasitif reaktif gücü için $Q_{filtre} = -1950$ VAR seçilmiştir. Bu verilen değerlere göre yapılan filtre tasarımı aşağıdadır.

Filtre reaktör faktörü p , (7.1) eşitliğinde hesaplanmıştır.

$$p = \frac{X_L}{X_C} = \frac{f^2}{f_{rn}^2} = \frac{50^2}{210^2} = 0,0567 \quad (7.1)$$

Filtre reaktansı X_{filtre} ' nin değeri, (7.2) eşitliğinden yararlanılarak hesaplanır.

$$Q_{filtre} = \frac{V_s^2}{X_{filtre}} \quad (7.2)$$

$$X_{filtre} = \frac{220^2}{1950} = 24,8205 \, \Omega \quad (7.3)$$

(7.3) eşitliğinden elde edilen değerden yararlanarak kondansatör reaktansı X_C ve enüktans reaktansı X_L ' nin değerleri hesaplanır.

$$X_{filtre} = (X_C - X_L) = X_C - p.X_C = (1 - p).X_C \quad (7.4)$$

$$X_C = \frac{24,8205}{(1 - 0,0567)} = 26,3124 \, \Omega \quad (7.5)$$

$$C = \frac{1}{2.\pi.f.X_C} = \frac{1}{2.\pi.50.26,3124} = 0,1210 \, mF \quad (7.6)$$

$$X_L = p.X_C = 0,0567.26,3124 = 1,4919 \, \Omega \quad (7.7)$$

$$L = \frac{X_L}{2.\pi.f} = \frac{1,4919}{2.\pi.50} = 4,7489 \, mH \quad (7.8)$$

(5.9) ve (7.9) eşitliklerinden yararlanarak elde edilen, tristör kontrollü reaktörün tetikleme açısı α ' ya bağlı reaktif güç ifadesi aşağıda verilmiştir.

$$Q_{TKR}(\alpha) = V_S \cdot I_{TKR}(\alpha) = \frac{V_S^2}{\omega L} \cdot \left(2 - \frac{2\alpha}{\pi} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin 2\alpha\right) = V_S^2 \cdot \frac{(2(\pi - \alpha) + \sin 2\alpha)}{X_L \cdot \pi} \quad (7.9)$$

(7.9) eşitliğinde tetikleme açısı α , değişikçe tristör kontrollü reaktörün reaktif gücü Q_{TKR} 'nin değeri de değişecektir. Bu nedenle lineer olmayan (7.9) eşitliğinden tetikleme açısı α 'nın hesaplanması için "Embedded MATLAB function" bloğundan yararlanılmıştır. Yüken reaktif gücüyle sabit kondansatörün reaktif güçleri ölçülüp, birbiriyle karşılaştırılmaktadır. Sonuçta gereksinim duyulan reaktif güç ortaya çıkmakta ve bu değere göre tetikleme açısı α 'nın değeri hesaplanmaktadır. Bu hesabı yapmak için secant metodundan yararlanılmıştır. Embedded MATLAB function bloğunun içerisine yazılan program aşağıda verilmiştir.

```
function alfa=fcn1(guc)

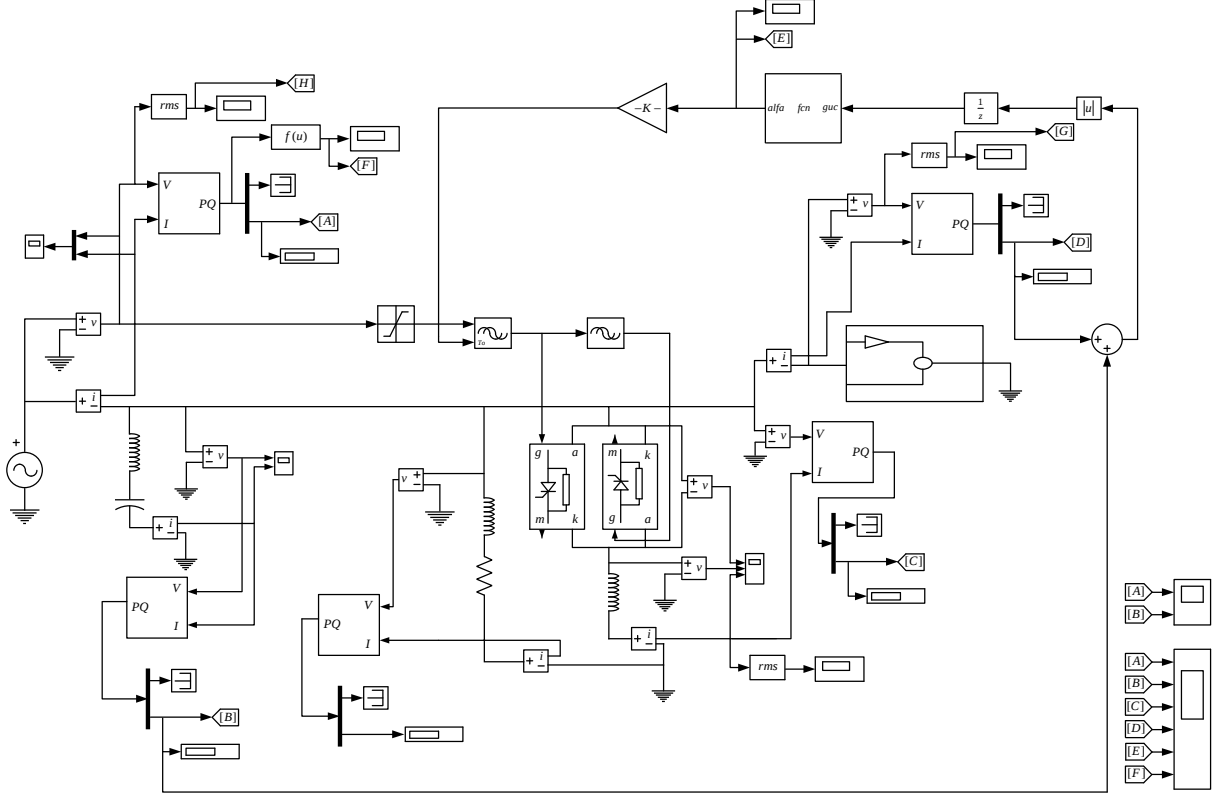
guc=abs(guc);Vetkin=220;B=guc/Vetkin^2;x_1=5.5*pi/6;alfa=5*pi/6;delta=0.000001;
epsilon=0.00001; max1=20; x1=5*pi/6; y=0;XL=(Vetkin^2)/1950;
for k=1:max1

    a=(B*pi*XL-(2*(pi-alfa)+sin(2*alfa)));
    x1=alfa-((B*pi*XL-(2*(pi-alfa)+sin(2*alfa)))*(x_1-alfa))/((B*pi*XL-(2*(pi-
    x_1)+sin(2* x_1)))-(B*pi*XL-(2*(pi-alfa)+sin(2*alfa))));
    hata=abs(x1-alfa);
    hatatek=2*hata/(abs(x1)+delta);
    x_1=alfa; alfa=x1;
    y=B*pi*XL-(2*(pi-alfa)+sin(2*alfa));
    if (hata<delta)|| (hatatek<delta)|| (abs(y)<epsilon)
        break
    end
end

alfa=alfa*180/pi;if alfa<pi/2;alfa=pi/2;
else
end
```

Tristör kontrollü reaktörün endüktif reaktif gücü $Q_L = 1950$ VAr olarak seçilmiştir. Simülasyonda kullanılan yük değerleri aşağıda sıralanmıştır.

- 1. yük $P = 1950 \text{ W}$, $Q_L = 650 \text{ VAr}$ ve $Q_C = 200 \text{ VAr}$,
- 2. yük $P = 1600 \text{ W}$, $Q_L = 700 \text{ VAr}$ ve $Q_C = 350 \text{ VAr}$,
- 3. yük $P = 1750 \text{ W}$, $Q_L = 700 \text{ VAr}$ ve $Q_C = 200 \text{ VAr}$.



Şekil 7.1 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör Simulink devresi

Aralık 1 [$0 < t < 1$]

Bu aralıkta 1. yük devrededir. Devre üzerinden alınan ölçümler aşağıda sıralanmıştır.

- Sabit kondansatörün reaktif gücü $Q_C = -1950 \text{ VAr}$,
- Yükün reaktif gücü $Q_R = 434,8 \text{ VAr}$,
- Tristör kontrollü reaktörün reaktif gücü $Q_{TKR} = 1417 \text{ VAr}$,
- Hattan çekilen reaktif güç $Q_H = 51,23 \text{ VAr}$,
- Güç faktörü $\cos \varphi = 0,9999$,
- Tetikleme açısı $\alpha = 100,1^\circ$,
- Tristör kontrollü reaktörün akım değeri $I_{TKR} = 6,508 \text{ A}$ 'dır.

Aralık 1' in analizi için tüm aktif ve reaktif güçler toplanır ve $\cos \varphi = 0,9999$ için tristör kontrollü reaktör tarafından temin edilmesi gereken güç ortaya çıkar. Bu aralıktaki toplam aktif ve reaktif güçlerin toplamaları aşağıda gösterilmiştir.

$$P_T = 1850 + 1950 = 3800 \text{ W} \quad (7.10)$$

$$Q_C = -1950 - 200 = -2150 \text{ VAr} \quad (7.11)$$

$$Q_L = 150 + 650 = 800 \text{ VAr} \quad (7.12)$$

(7.11) ve (7.12) eşitliklerine göre sistemin toplam reaktif gücü aşağıdaki eşitlikte hesaplanmıştır.

$$Q_S = Q_L + Q_C = 800 + (-2150) = -1350 \text{ VAr} \quad (7.13)$$

Bu duruma göre istenilen $\cos \varphi = 0,9999$ değeri için tristör kontrollü reaktörün reaktif gücü aşağıda hesaplanmıştır. $\cos \varphi = 0,9999$ için $\varphi = 0,014142 \text{ rad}$ ' dır.

$$\tan \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{Q_H}{P_T} \Rightarrow \tan 0,014142 = 0,014143 \quad (7.14)$$

$$Q_H = 3800 \cdot 0,014143 = 53,74 \text{ VAr} \quad (7.15)$$

$\cos \varphi = 0,9999$ olması durumunda sistemin reaktif gücü (7.15) eşitliğinde hesaplanmıştır. Bu değeri elde edebilmek için gerekli olan reaktif güç tristör kontrollü reaktör tarafından temin edilecektir. Tristör kontrollü reaktörün gücü (7.16) eşitliğinde hesaplanmıştır.

$$Q_{TKR} = Q_S + Q_H = 1350 + 53,74 = 1403,74 \text{ VAr} \quad (7.16)$$

(7.17) eşitliğinden yararlanarak tristör kontrollü reaktörün akımı hesaplanabilir.

$$I_{TKR} = \frac{Q_{TKR}}{V_S} = \frac{1403,74}{220} = 6,381 \text{ A} \quad (7.17)$$

(7.17) eşitliğiyle hesaplanan akım değerinden yararlanarak aşağıdaki program ile tetikleme açısı α ' nın değeri hesaplanabilir.

L=0.079006; omega=2*pi*50; Vsrms=220; Itkr=6.381; alpha11=pi/2; alpha12=pi-pi/10;

f1=1;fm=-1;

while(abs(f1-fm)>=0.001)

alphan1=(alpha11+alpha12)/2;

```

f1=-Itkr+(Vsrms/(pi*omega*L))*(2*pi-2*alpha11+sin(2*alpha11));
fm=-Itkr+(Vsrms/(pi*omega*L))*(2*pi-2*alphan1+sin(2*alphan1));
if(f1*fm>0)
    alpha11=alphan1;
else
    alpha12=alphan1;
end
end
alpha_alt=alphan1*180/pi

```

Yukarıdaki programın sonucunda tetikleme açısı $\alpha = 102,8035^\circ$ olarak bulunur.

Aralık 2 [$1 < t < 2$]

Bu aralıkta 1. yük ve 2. yük devrededir. Devre üzerinden alınan ölçümler aşağıda sıralanmıştır.

- Sabit kondansatörün reaktif gücü $Q_C = -1950 \text{ VAr}$,
- Yükün reaktif gücü $Q_R = 790,2 \text{ VAr}$,
- Tristör kontrollü reaktörün reaktif gücü $Q_{TKR} = 1121 \text{ VAr}$,
- Hattan çekilen reaktif güç $Q_H = 110,8 \text{ VAr}$,
- Güç faktörü $\cos \varphi = 0,9998$,
- Tetikleme açısı $\alpha = 108,9^\circ$,
- Tristör kontrollü reaktörün akım değeri $I_{TKR} = 5,235 \text{ A}$ 'dır.

Aralık 2' nin analizi için tüm aktif ve reaktif güçler toplanır ve $\cos \varphi = 0,9998$ için tristör kontrollü reaktör tarafından temin edilmesi gereken güç ortaya çıkar. Bu aralıktaki toplam aktif ve reaktif güçlerin toplamaları aşağıda gösterilmiştir.

$$P_T = 1850 + 1950 + 1600 = 5400 \text{ W} \quad (7.18)$$

$$Q_C = -1950 - 200 - 350 = -2500 \text{ VAr} \quad (7.19)$$

$$Q_L = 150 + 650 + 700 = 1500 \text{ VAr} \quad (7.20)$$

(7.18) ve (7.19) eşitliklerine göre sistemin toplam reaktif gücü aşağıdaki eşitlikte hesaplanmıştır.

$$Q_S = Q_L + Q_C = 1500 + (-2500) = -1000 \text{ VAr} \quad (7.21)$$

Bu duruma göre istenilen $\cos \varphi = 0,9998$ değeri için tristör kontrollü reaktörün reaktif gücü aşağıda hesaplanmıştır. $\cos \varphi = 0,9998$ için $\varphi = 0,0200003$ rad ' dır.

$$\tan \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{Q_H}{P_T} \Rightarrow \tan 0,0200003 = 0,020003 \quad (7.22)$$

$$Q_H = 5400 \cdot 0,020003 = 108,02 \text{ VAr} \quad (7.23)$$

$\cos \varphi = 0,9998$ olması durumunda sistemin reaktif gücü (7.23) eşitliğinde hesaplanmıştır. Bu değeri elde edebilmek için gerekli olan reaktif güç tristör kontrollü reaktör tarafından temin edilecektir. Tristör kontrollü reaktörün gücü (7.24) eşitliğinde hesaplanmıştır.

$$Q_{TKR} = Q_S + Q_H = 1000 + 108,02 = 1108,02 \text{ VAr} \quad (7.24)$$

(7.25) eşitliğinden yararlanarak tristör kontrollü reaktörün akımı hesaplanabilir.

$$I_{TKR} = \frac{Q_{TKR}}{V_S} = \frac{1108,02}{220} = 5,036 \text{ A} \quad (7.25)$$

(7.25) eşitliğiyle hesaplanan akım değerinden yararlanarak aşağıdaki program ile tetikleme açısı α ' nın değeri hesaplanabilir.

L=0.079006; omega=2*pi*50; Vsrms=220; Itkr=5.036; alpha11=pi/2; alpha12=pi-pi/10;

f1=1;fm=-1;

while(abs(f1-fm)>=0.001)

 alphan1=(alpha11+alpha12)/2;

 f1=-Itkr+(Vsrms/(pi*omega*L))*(2*pi-2*alpha11+sin(2*alpha11));

 fm=-Itkr+(Vsrms/(pi*omega*L))*(2*pi-2*alphan1+sin(2*alphan1));

 if(f1*fm>0)

 alpha11=alphan1;

 else

 alpha12=alphan1;

end

end

$\alpha_{alt} = \alpha_{ham1} * 180 / \pi$

Yukarıdaki programın sonucunda tetikleme açısı $\alpha = 110,2544^\circ$ olarak bulunur.

Aralık 3 [$2 < t < 3$]

Bu aralıkta 1. yük, 2. yük ve 3. yük devrededir. Devre üzerinden alınan ölçümler aşağıda sıralanmıştır.

- Sabit kondansatörün reaktif gücü $Q_C = -1950 \text{ VAr}$,
- Yükün reaktif gücü $Q_R = 1295 \text{ VAr}$,
- Tristör kontrollü reaktörün reaktif gücü $Q_{TKR} = 708,7 \text{ VAr}$,
- Hattan çekilen reaktif güç $Q_H = 53,03 \text{ VAr}$,
- Güç faktörü $\cos \varphi = 1,0$,
- Tetikleme açısı $\alpha = 123,4^\circ$,
- Tristör kontrollü reaktörün akım değeri $I_{TKR} = 2,826 \text{ A}$ 'dır.

Aralık 3' ün analizi için tüm aktif ve reaktif güçler toplanır ve $\cos \varphi = 1,0$ için tristör kontrollü reaktör tarafından temin edilmesi gereken güç ortaya çıkar. Bu aralıktaki toplam aktif ve reaktif güçlerin toplamaları aşağıda gösterilmiştir.

$$P_T = 1850 + 1950 + 1600 + 1750 = 7150 \text{ W} \quad (7.26)$$

$$Q_C = -1950 - 200 - 350 - 200 = -2700 \text{ VAr} \quad (7.27)$$

$$Q_L = 150 + 650 + 700 + 700 = 2200 \text{ VAr} \quad (7.28)$$

(7.27) ve (7.28) eşitliklerine göre sistemin toplam reaktif gücü aşağıdaki eşitlikte hesaplanmıştır.

$$Q_S = Q_L + Q_C = 2200 + (-2700) = -500 \text{ VAr} \quad (7.29)$$

Bu duruma göre istenilen $\cos \varphi = 1,0$ değeri için tristör kontrollü reaktörün reaktif gücü aşağıda hesaplanmıştır. $\cos \varphi = 1,0$ için $\varphi = 0 \text{ rad}$ 'dır.

$$\tan \varphi = \frac{\sin \varphi}{\cos \varphi} = \frac{Q_H}{P_T} \Rightarrow \tan 0 = 0 \quad (7.30)$$

$$Q_H = 7150.0 = 0 \text{ VAr} \quad (7.31)$$

$\cos \varphi = 1,0$ olması durumunda sistemin reaktif gücü (7.31) eşitliğinde hesaplanmıştır. Bu değeri elde edebilmek için gerekli olan reaktif güç tristör kontrollü reaktör tarafından temin edilecektir. Tristör kontrollü reaktörün gücü (7.32) eşitliğinde hesaplanmıştır.

$$Q_{TKR} = Q_S + Q_H = 500 + 0 = 500 \text{ VAr} \quad (7.32)$$

(7.33) eşitliğinden yararlanarak tristör kontrollü reaktörün akımı hesaplanabilir.

$$I_{TKR} = \frac{Q_{TKR}}{V_S} = \frac{500}{220} = 2,273 \text{ A} \quad (7.33)$$

(7.33) eşitliğiyle hesaplanan akım değerinden yararlanarak aşağıdaki program ile tetikleme açısı α 'nın değeri hesaplanabilir.

$L=0.079006$; $\omega=2*\pi*50$; $V_{rms}=220$; $I_{tkr}=2.273$; $\alpha_{11}=\pi/2$; $\alpha_{12}=\pi-\pi/10$;

$f_1=1$; $f_m=-1$;

while(abs(f1-fm)>=0.001)

$\alpha_{pham1}=(\alpha_{11}+\alpha_{12})/2$;

$f_1=-I_{tkr}+(V_{rms}/(\pi*\omega*L))*(2*\pi-2*\alpha_{11}+\sin(2*\alpha_{11}))$;

$f_m=-I_{tkr}+(V_{rms}/(\pi*\omega*L))*(2*\pi-2*\alpha_{pham1}+\sin(2*\alpha_{pham1}))$;

if(f1*f_m>0)

$\alpha_{11}=\alpha_{pham1}$;

else

$\alpha_{12}=\alpha_{pham1}$;

end

end

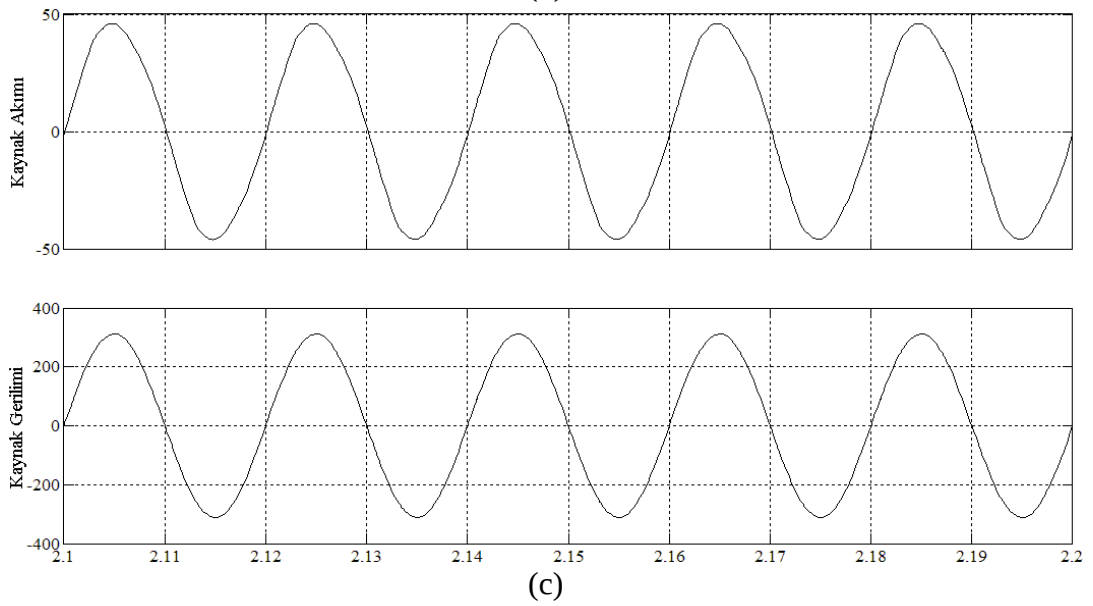
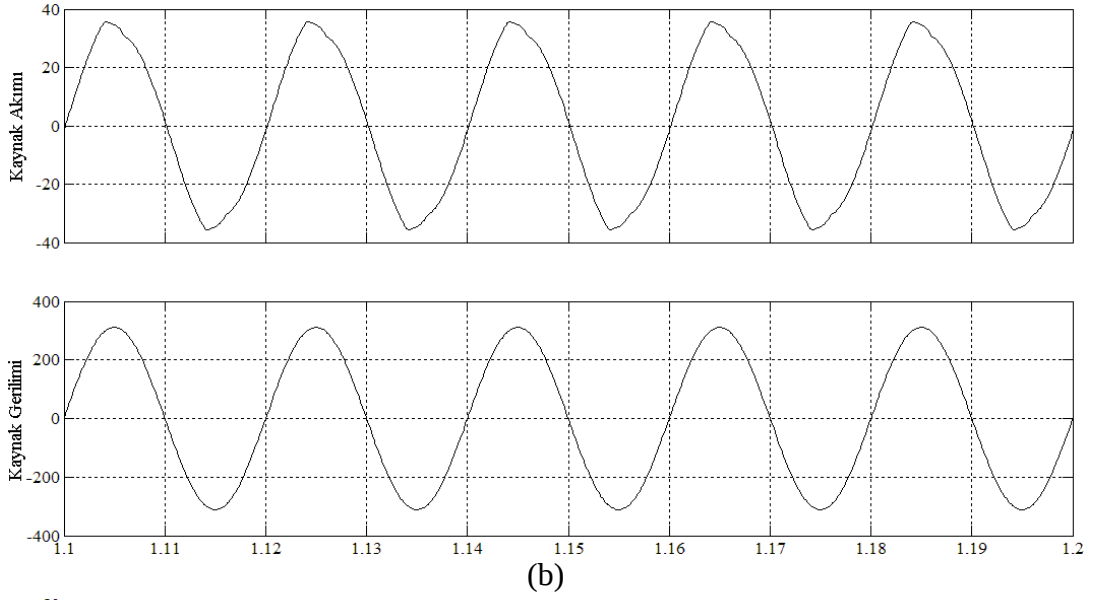
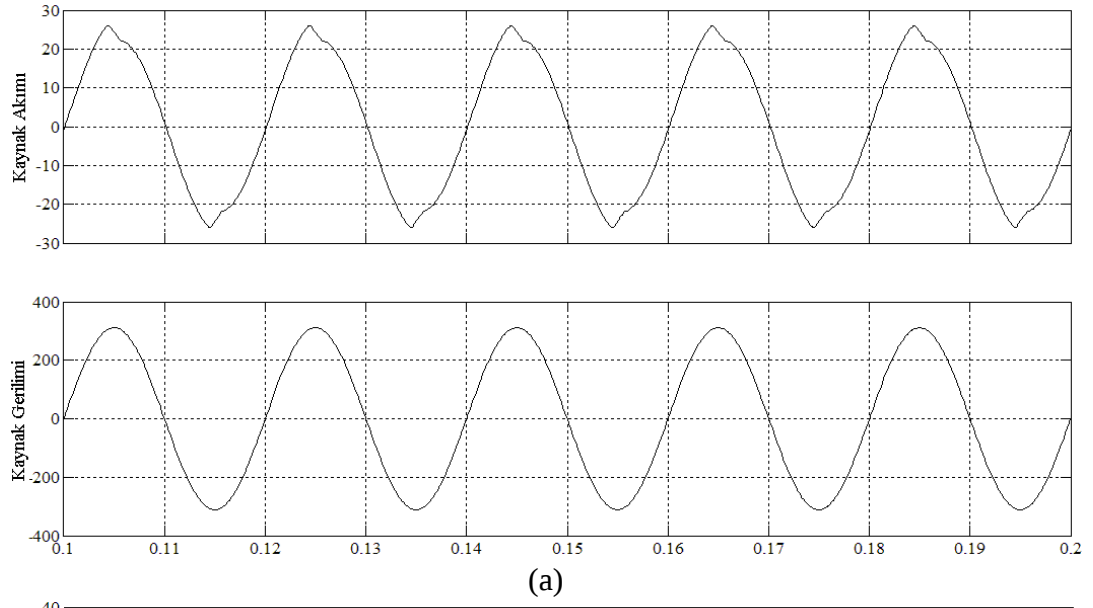
$\alpha_{alt}=\alpha_{pham1}*180/\pi$

Yukarıdaki programın sonucunda tetikleme açısı $\alpha = 128,9136^\circ$ olarak bulunur.

Çizelge 7.1 Simülasyon sonuçlarının ve hesaplamaların karşılaştırılması

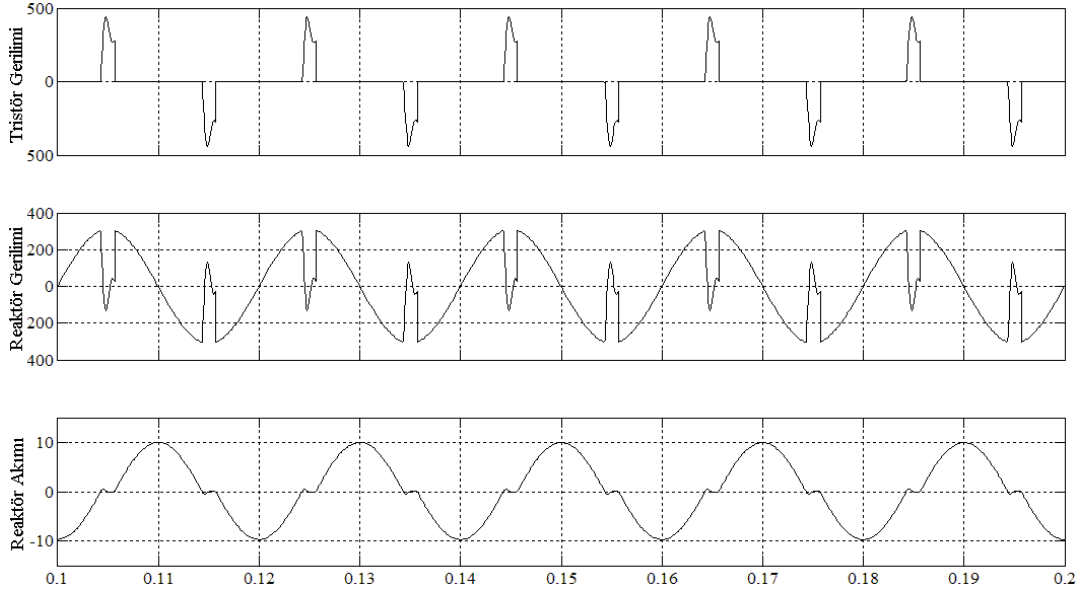
	Aralık 1		Aralık 2		Aralık 3	
	Ölçülen değerler	Teorik değerler	Ölçülen değerler	Teorik değerler	Ölçülen değerler	Teorik değerler
Q_{TKR} (VAr)	1417	1403,74	1121	1108,02	708,7	500
Q_H (VAr)	51,23	53,74	110,8	108,02	53,03	0
$\cos \varphi$	0,9999	0,9999	0,9998	0,9998	1,0	1,0
$\alpha (^{\circ})$	100,1	102,8035	108,9	110,2544	123,4	128,9136
I_{TKR} (A)	6,506	6,381	5,235	5,036	2,826	2,273

Şekil 7.2' de, yüklerin devreye alınmasıyla, kaynak gerilimin ve kaynaktan çekilen akımın dalga şekilleri gösterilmektedir. Gerilimin ve akımın sıfır geçiş noktalarının kesiştiği ve faz farkının olmadığı görülmektedir. Akım ve gerilimde bozulmanın olmadığı, yani harmoniklerin belirgin bir şekilde düşük olduğu anlaşılmaktadır.

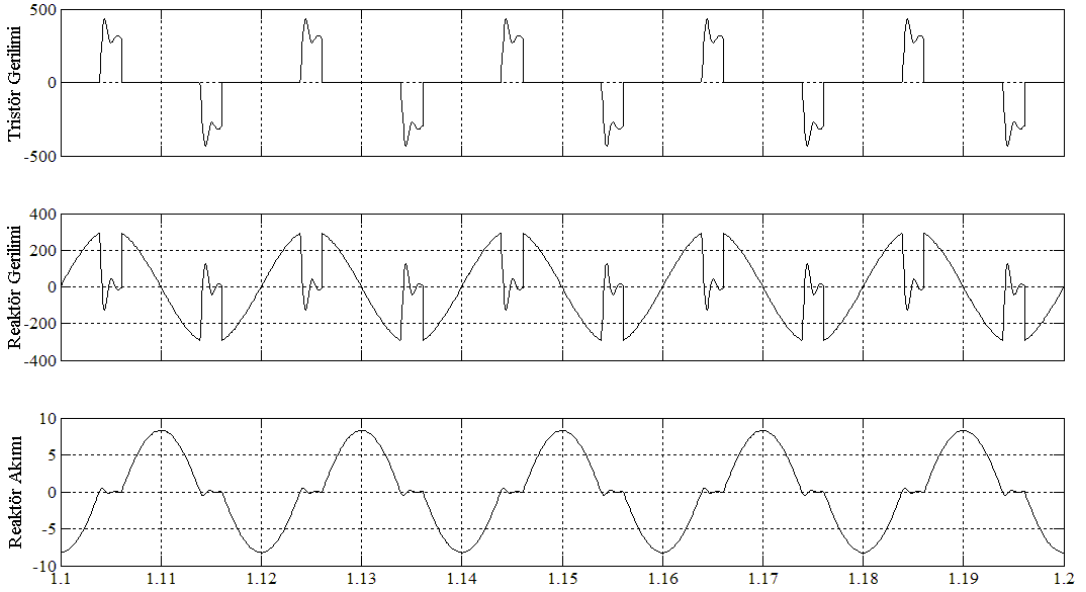


Şekil 7.2 Simulink devresinde (a) 1. yük, (b) 1. ve 2. yük ve (c) 1., 2. ve 3. yük devredeyken kaynak gerilimi ve akımına ait dalga şekilleri,

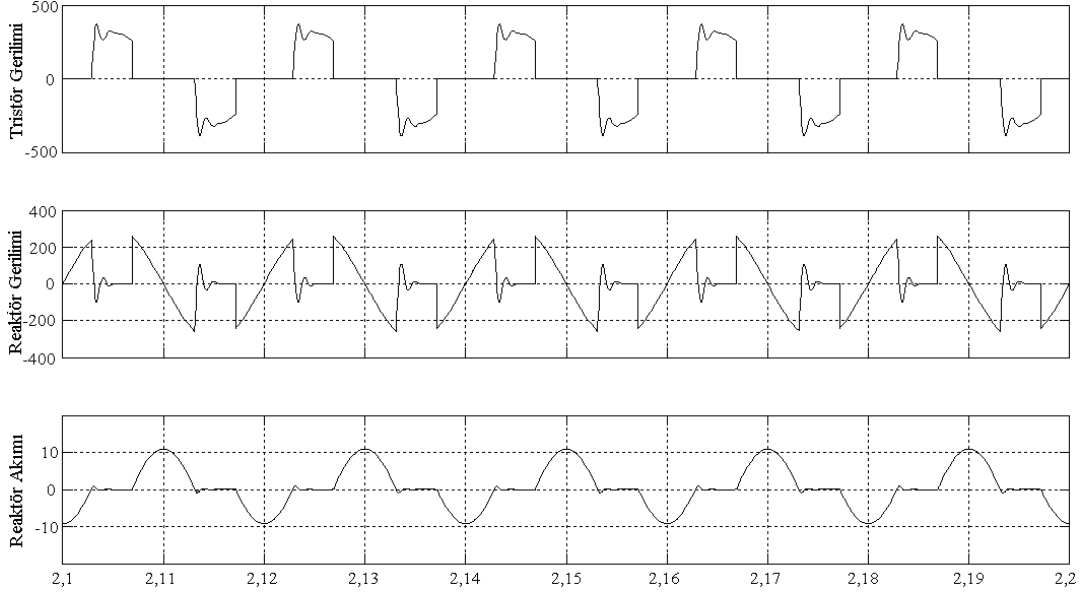
Şekil 7.3' te tristör kontrollü reaktörde, tetikleme açısı α ile tristörler üzerindeki gerilim dalga şekillerinin, reaktöre ait gerilim ve akım dalga şekillerinin değişimleri gösterilmektedir.



(a)



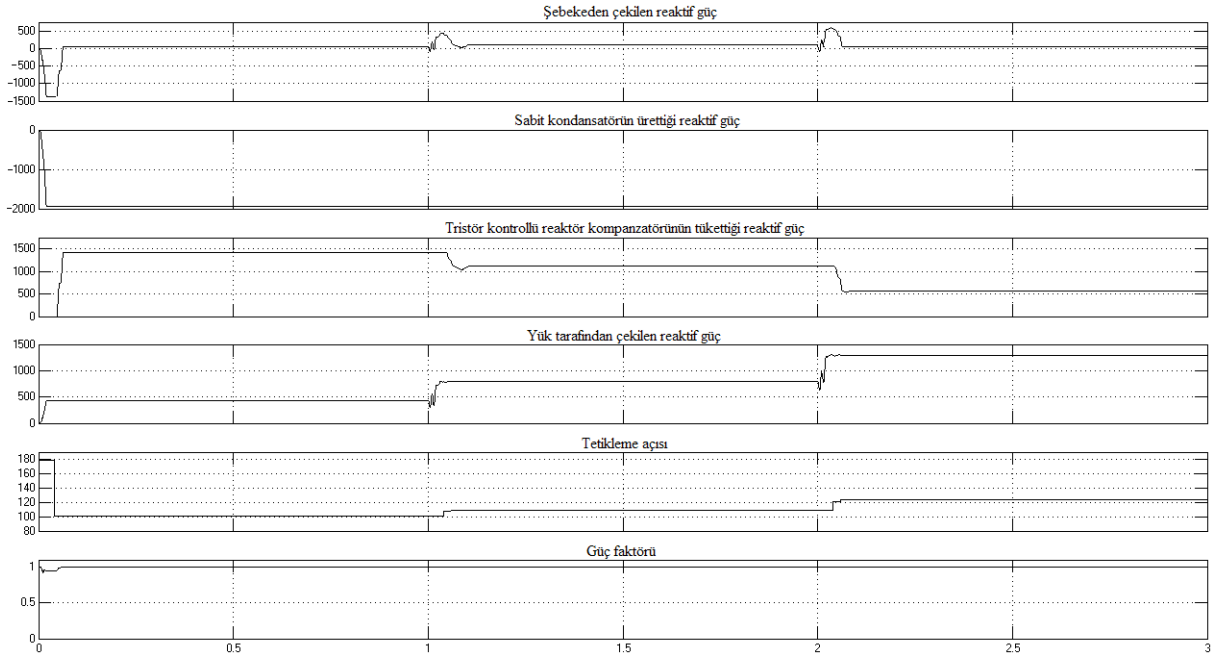
(b)



(c)

Şekil 7.3 Tristör kontrollü reaktörde tristör gerilimi, reaktör gerilimi ve akımı dalga şekilleri

Tetikleme açısı α ile tristörlerin ilettime girmeler kontrol edilerek, reaktörün akımı, dolayısıyla reaktif güç kontrolü yapılmış olduğu görülmektedir. Tetikleme açısı α 'nın değeri arttıkça reaktör akımının da azaldığı görülmektedir.

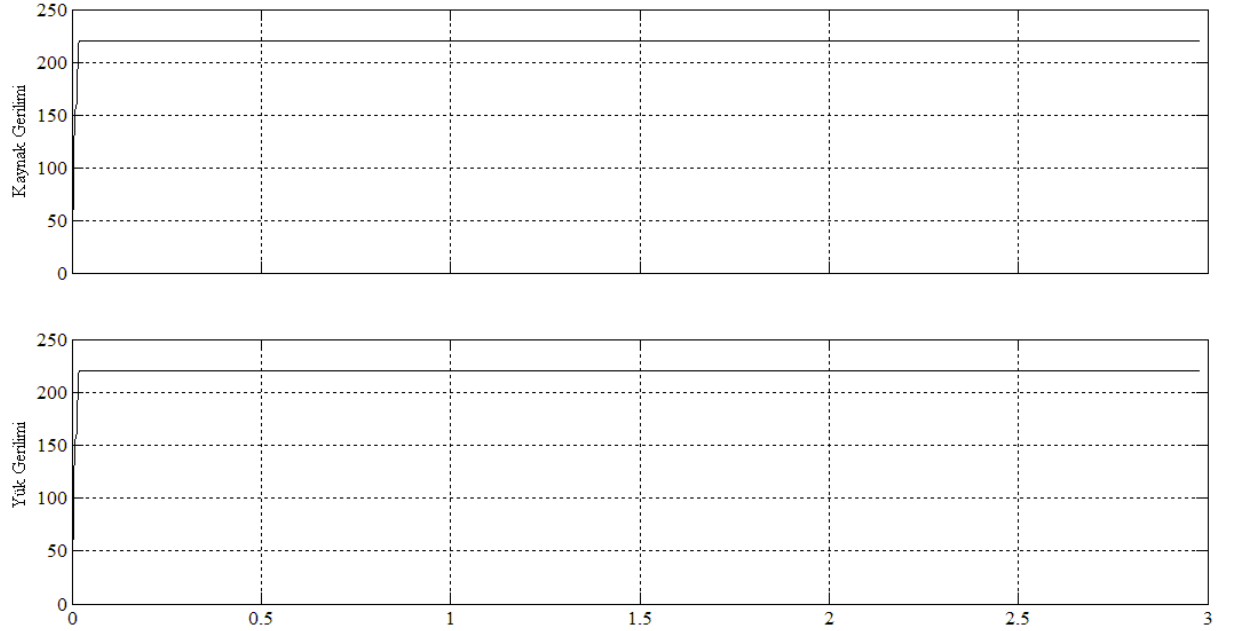


Şekil 7.4 Simulink devresindeki reaktif güçlerin, tetikleme açısı α 'nın ve güç faktörü $\cos \varphi$ 'nin değişimleri

Kaynaktan çekilen reaktif gücün değişiminde, yüklerin devreye girmeleri esnasında dalgalanmaların olduğu görülmektedir. Bunun nedeni ani yük değişimleridir. Bu süre yaklaşık olarak 100 ms' dir. Tristör kontrollü reaktörün, yükteki değişimi ve dalgalanmayı karşılayıp, kararlı hale gelmesi ise yaklaşık olarak 50 ms sürmektedir. İkinci değişimde, sabit

kondansatörün reaktif gücü gösterilmektedir. Reaktif güç değeri sabit olduğu için değişim olmamıştır. Üçüncü değişimde, tristör kontrollü reaktörün tükettiği reaktif güçteki değişim gösterilmektedir. Tetikleme açısı α 'nın değerinin değişmesiyle reaktör endüktansının değeri değişmektedir. Reaktörün değerine bağlı olarak çekilen akımın dolayısıyla reaktif gücün değeri değişmektedir. Dördüncü değişimde, yüke ait reaktif güç değişimi, beşinci değişimde tetikleme açısı α 'nın değişimi ve altıncı değişimde güç faktörü $\cos \varphi$ 'nin değişimi gösterilmektedir. Güç faktörü $\cos \varphi$ 'nin 0,9998 ile 1,0 değerleri arasında değişim gösterdiği görülmektedir.

Şekil 7.5' te kaynak ve yük noktasındaki gerilim değerleri gösterilmektedir. Bu şekilden de görüldüğü gibi, gerilim dalgalanmalarının olmadığı ve gerilim kararlılığının sağlandığı görülmektedir.



Şekil 7.5 Kaynak ve yük noktasındaki gerilim değeri

Reaktif gücün ihtiyaç duyulan değere en yakın değerde üretilmesiyle elektrik sisteminin en iyi koşullarda işletilmesi sağlanmıştır. AC güç sistemlerinin kararlı durumdaki aktif güç iletim kapasiteleri artırılmıştır. Değişken ya da az yük durumunda, hattın devreye alınması gibi çalışma şartlarında gerilim düzenlemesi sağlanmıştır. Yüksek emniyetli, yüksek hızda cevap verme süresi ve sürekli aktif bir kontrol ile kontrol aralığı endüktif ve kapasitif bölgede olmuştur. Harmonik üretimi filtreyle giderilmiştir.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Statik VAR kompanzasyonu, reaktif güç çekilen veya reaktif güce gerek duyulan yerlerde modern güç elektroniği ve kontrol sistemlerinin kullanılmasıyla reaktif gücün AA güç sistemlerinden çekilmesinin önlenmesidir.

Statik VAR kompanzasyon sistemlerinin kullanılmasıyla AA güç sistemlerinde, kalite ve güvenilirlik artırılır, performans artışı sağlanır, endüktif ve kapasitif bölgede kısa sürede etkili bir kompanzasyon işlemi sağlanır, bakım ve onarım maliyetleri azalır.

Simülasyon devresinden alınan sonuçlar ile teorik olarak bulunan değerlerin uyumlu olduğu görülmüştür. Şebekeden çekilen reaktif gücün oldukça düşük olduğu, güç faktörü $\cos \varphi$ 'nin 1,0 ile 0,9998 değerleri arasında değiştiği, yani şebeke gerilimi ve şebekeden çekilen akım arasında çok küçük bir faz farkının oluştuğu gözlenmiştir.

Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde yükün reaktif gücünün kompanze edilmesiyle birlikte, kaynak güç faktörü yükselmektedir.

Paralel kompanzasyon işlemiyle yük gerilimi kararlı hale getirilerek, daha verimli çalışma koşulları sağlanmaktadır.

Tristör kontrollü reaktörde, reaktörler tetikleme açısı α ' ya bağlı olarak, kontrol edilebilen süseptans gibi davranmakta ve akım kontrolü yapılabilmektedir. Tristör kontrollü reaktör ile birlikte sabit kondansatör kullanarak, kapasitif ve endüktif bölgede sürekli bir çalışma gerçekleşmektedir.

Yükün reaktif gücünün kompanzasyonu sağlandığında, yük geriliminin nominal değerlerde olduğu, gerilim regülasyonunun optimum bir şekilde sağlandığı ve yük geriliminin kararlı halde olduğu ve böylece güç kalitesinin yükseldiği görülmüştür.

Sonuç olarak tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör kullanımıyla, gerilim kararsızlığının azaldığı, iletilen güç değerinin arttığı ve enerjiden en verimli bir şekilde yararlanıldığı görülmüştür.

Bu yüksek lisans çalışmasının daha sonra yapılacak benzer çalışmalar için iyi bir referans olacağı düşünülmektedir. Statik VAR kompanzasyonu sistemlerinin karakteristikleri yarı iletken elemanların yeteneklerine çok bağlıdır. Dolayısıyla gelecekte yapılacak çalışmaların, kullanılacak yarı iletken elemanlara bağlı olarak gelişmesi beklenmektedir. Statik VAR kompanzasyonu ile ilgili olarak yapılan çalışmalar, aşağıda sıralanan konularda yoğunlaşmaktadır.

1. Statik VAR kompanzasyonu sistemlerinde Darbe Genişlik Modülasyonu'nun (PWM) kullanılması ve doluluk ve boşluk oranının ayarlanması ile reaktif gücün kontrol edilmesi sağlanmaktadır.
2. Sadece ilettime girmeleri kontrol edilebilen tristörler yerine kapı ucuna uygulanan akım pikiyle kesime de girebilen GTO' ların kullanılmasıyla, statik VAR kompanzasyonu sistemlerinin kontrol edilebilirliği geliştirilmektedir.
3. Yüksek frekanslı DA–DA dönüştürücü devrelerinin kullanılmasıyla, lineer olmayan yükler tarafından oluşturulan harmonikler sınırlandırılmakta ve güç faktörünün düzeltilmesi sağlanmaktadır.
4. IGBT'lerin kullanılması sayesinde, yüksek gerilim seviyelerinde bile kendinden komütasyonlu topolojiler geliştirilmekte ve statik VAR kompanzasyonu sistemlerinin etkinliği artırılmaktadır.
5. Mevcut olanlara göre daha hızlı ve daha güçlü yarı iletkenlerin geliştirilmesiyle, statik VAR kompanzasyon sistemlerinin uygulanabilirliği artırılmaktadır.

Tüm bu gelişmeler ışığında, statik VAR kompanzasyon sistemlerinin rüzgar türbinleri, elektrikli ulaşım sistemleri, ark ocakları vb. yerlerdeki kullanımlarının daha da yaygınlaşması beklenmektedir.

KAYNAKLAR

- Acha E., Fuerte-Esquivel C.R., Ambriz-Pérez H. ve Angeles-Camacho C.(2004), FACTS Modelling and Simulation in Power Networks, John Wiley & Sons, Londra.
- Agrawal J.P.(2000), Power Electronic Systems: Theory and Design, R.R. Donnelley & Sons, New York.
- Arrillaga J. ve Watson N.R.(2001), Computer Modelling of Electrical Power Systems, John Wiley & Sons, Londra.
- Bayındır R., Demirbaş Ş. ve Sesveren Ö. (2008), “Reaktif Güç Kompanzasyonu İçin Zeki Bir Simülatör Tasarımı ve Gerçekleştirilmesi”, Gazi Üniversitesi Mühendislik ve Mimarlık Fakültesi Dergesi, Vol 23, No 3, Ankara.
- Dixon J., Morán L., Rodríguez J., ve Domke R. (2005), “Reactive Power Compensation Technologies: State of the Art Review”, IEEE, Vol. 93, No. 12, Aralık.
- Gelen, A. ve Yalçınöz T. (2007), “Analysis of TSR Based SVC for a Three-Phase System with Static and Dynamic Loads”, International Conference on Electrical Engineering, (ICEE 2007), IEEE, 11-12 Nisan 2007, Lahore.
- Gyugyi L. (1988), “Power Electronics in Electric Utilities: Static VAr Compensators”, IEEE, Vol. 76, No. 4, Nisan.
- Gyugyi L., Otto R.A., ve Putman T.H. (1978), “Principles and Applications of Static, Thyristor Controlled Shunt Compensators”, IEEE, Vol. PAS- 97, No. 5, Eylül-Ekim 1978.
- Gyugyi L., Taylor E.R., “Characteristics of Static, Thyristor Controlled Shunt Compensators for Power Transmission System Applications”, IEEE, Vol. PAS- 99, No. 5, Eylül-Ekim 1980.
- Jin H., Gobs G., ve Lopes L. (1994), “An Efficient Switched Reactor Based Static VAr Compensator”, IEEE, Vol. 30, No. 4, Ağustos.
- Kara, A. ve Yalçınöz T. (2005), “Esnek AC İletim Sistemlerinde Kullanılan Cihazlar ve TCR, SVC, TSR Yapılı Paralel Kompanzatorların Yük Gerilimine Etkisinin Matlab Ortamında İncelenmesi” II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, 17-19 Kasım 2005, İstanbul.
- Kara, A. ve Yalçınöz T. (2006), “Tristör Anahtarlama Kapasitörlü Kompanzasyon Sisteminin Modellenmesi ve Gerçekleştirilmesi”, Elektrik Elektronik Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumu (ELECO’2006), 6-10 Aralık 2006, Bursa.
- Kara, A., Yalçınöz T. ve Ayasun S. (2005), “Reaktif Güç Kompanzasyonunun Gerilim Regülasyonuna Etkisinin Deneysel Olarak ve Matlab Ortamında Gerçekleştirilmesi”, II. Mühendislik Bilimleri Genç Araştırmacılar Kongresi, 17-19 Kasım 2005, İstanbul.
- Keskin C. (1998), “Orta Gerilim Dağıtım Şebekelerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu Uygulaması”, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul.

- Kocaman B. (1997), “Statik Kompanzasyon ve Uygulamaları”, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.
- Mathur, R.M. ve Varma R.K. (2002), Thyristor Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems, John Wiley & Sons, New York.
- Miller T.J. (1982) Power Control in Electric Systems, John Wiley & Sons, New York.
- Mohan N. (1995), Power Electronics Converters, Applications and Design, John Wiley & Sons, New York.
- Muñoz J., Mendoza P., Catos J. ve Palma R., “Lab Scale Three Phase TCR Based SVC System for Educational Purpose in Dynamic and Steady State Analysis”, 39. North American Power Sempozyumu, 30 Eylül-2 Ekim 2007, Las Cruces, New Mexico.
- Özaslan, Ş. (1997), “Statik VAr Sistemleri ile Reaktif Güç Kompanzasyonu”, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli.
- Pekparlak Ü. (2004), “Statik Reaktif Güç Kompanzasyonu”, Sakarya Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya.
- Reddy S.R. (2000), Fundamentals of Power Electronics, Alpha Science International, Hindistan.
- Sezgin, M. (2003), “Kompanzasyonun Gerekliliği” 3e Electrotech Dergisi, 2003.
- Song Y.H. ve Jonhs A.T.(1999), Flexible AC Transmission Systems (FACTS), The Institution of Electrical Engineers, Londra.
- Zhang X.P., Rehtanz C. ve Pal B. (2006), Flexible AC Transmission Systems: Modelling and Control, Springer-Verlag, Berlin.

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi 18.01.1982

Doğum yeri Erzurum

Lise 1996-2000 Ümraniye Lisesi (Y.D.A.)

Lisans 2000-2004 Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fak.
Elektrik Mühendisliği Bölümü

Yüksek Lisans 2007- Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü
Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum

2006-2007 Tekno Elektrik/KoçSistem Koç Çamlıca İş Merkezi
2008- Soyak Enerji Yatırım A.Ş.