

**UZUN DAĞITIM HATLARININ GERİLİM KALİTESİ
SORUNLARININ STATİK VAR KOMPANZATÖR İLE
GİDERİLMESİ**

**MITIGATION OF VOLTAGE QUALITY PROBLEMS IN
LONG DISTRIBUTION LINES BY USING STATIC VAR
COMPENSATOR**

MOHAMMAD BARGHI LATRAN

Hacettepe Üniversitesi

Lisansüstü Eğitim – Öğretim ve Sınav Yönetmeliğinin

ELEKTRİK ve ELEKTRONİK Mühendisliği Anabilim Dalı İçin Öngördüğü

YÜKSEK LİSANS TEZİ

olarak hazırlanmıştır.

2012

Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürlüğü'ne,

Bu çalışma jürimiz tarafından **ELEKTRİK – ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ**

ANABİLİM DALI 'nda YÜKSEK LİSANS TEZİ olarak kabul edilmiştir.

Başkan :.....
Prof.Dr. Birsen SAKA

Üye (Danışman) :.....
Prof.Dr. Işık ÇADIRCI

Üye :.....
Doç.Dr. İres İSKENDER

Üye :.....
Doç.Dr. Uğur BAYSAL

Üye :.....
Yrd. Doç.Dr. Umut SEZEN

ONAY

Bu tez Hacettepe Üniversitesi Lisansüstü Eğitim-Öğretim ve Sınav Yönetmeliği'nin ilgili maddeleri uyarınca yukarıdaki jüri üyeleri tarafından/...../..... tarihinde uygun görülmüş ve Enstitü Yönetim Kurulunca/...../..... tarihinde kabul edilmiştir.

Prof.Dr. Fatma SEVİN DÜZ
Fen Bilimleri Enstitüsü Müdürü

UZUN DAĞITIM HATLARININ GERİLİM KALİTESİ SORUNLARININ STATİK VAR KOMPANZATÖR İLE GİDERİLMESİ

Mohammad BARGHI LATRAN

ÖZ

Bu tezde uzun dağıtım hatlarında gerilimin düzenlenmesi ve dengesiz yüklerin dengelenmesi için önerilen tristör kontrollü reaktör (TKR) tabanlı şönt statik VAR kompanzatörün (SVK) performansı incelenmiştir. Bu amaçla, gerilim regülasyon tipi TKR tabanlı SVK'nın kontrol sisteminin modeli geliştirilmiş ve benzetim ortamında uygulanmıştır. Güç sistemi, PSCAD-EMTCD bilgisayar destekli tasarım yazılımı kullanılarak, kararlı durum ve geçici durumlar için tanımlanmış ve bilgisayarda benzetimleri yapılmıştır. Benzetim çalışmalarında uzun bir dağıtım hattı ve çeşitli yük koşulları için SVK performansı incelenmektedir. Çalışmalar SVK sisteminin çeşitli dağıtım hat uzunlukları ve çeşitli yük koşulları için standartlara ve güç kalitesi ile ilgili düzenlemelere uyum sağlayabileceğini doğrulamaktadır.

Anahtar Kelimeler: SVK, TKR, Gerilim Regülasyonu, Yük Dengeleme, Reaktif Güç Kompanzasyonu, Reaktif Güç.

Danışman: Prof. Dr. Işık ÇADIRCI, Hacettepe Üniversitesi, Elektrik ve Elektronik Mühendisliği Bölümü, Elektrik - Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı

MITIGATION OF VOLTAGE QUALITY PROBLEMS IN LONG DISTRIBUTION LINES BY USING STATIC VAR COMPENSATOR

Mohammad BARGHI LATRAN

ABSTRACT

In this thesis the performance of thyristor controlled reactor (TCR) based shunt static VAr compensator (SVC), set up for voltage support and unbalanced load compensation of long distribution lines, has been examined. For this purpose voltage regulation type TCR based SVC control system model has been developed and validated by computer simulations. A system has been defined and simulated in steady-state and transient conditions using the Power System Computer Aided Design (PSCAD-EMTCD) software. Simulation studies examine the performance of SVC for a long distribution line and for various load conditions. Studies confirmed that with the SVC system, standards and regulations about power quality can be complied for various distribution line lengths and various load conditions.

Key Words: SVC, TCR, Voltage Regulation, Load Balancing, Reactive Power, Compensation

Advisor: Prof. Dr. Işık ÇADIRCI, Hacettepe University, Department of Electrical and Electronics Engineering, Electrical and Electronics Engineering Section

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Eğitimime başladığımdan bu yana ve tez çalışmam süresince bana yön gösteren değerli danışman hocam Sayın Prof. Dr. Işık ÇADIRCI 'ya,

Çalışmalarım Boyunca ve Yüksek Lisansa başladığımdan beri anlayış ve hoşgörüsüyle yardımlarını benden esirgemeyen, hocam Sayın Dr. H. Bilge MUTLUER'e,

Yüksek Lisans yapmam için beni teşvik eden ve her zaman yön gösteren, hocam Sayın Dr. H. Faruk BİLGİN'e,

Yüksek Lisans eğitimi için beni teşvik eden ve bana güvenen Hacettepe Üniversitesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü'nün değerli Öğretim Elemanlarına,

Hacettepe Fen Bilimler Enstitüsü'ne, değerli Personeline ve diğer yardımcı olan tüm arkadaşlarıma,

sonsuz teşekkür ederim.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

Sayfa

ÖZ	iii
ABSTRACT	v
TEŞEKKÜR	vii
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	viii
ŞEKİLLER DİZİNİ	x
ŞİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	xii
ÇİZEGELER LAR DİZİNİ	xv
TÜRKÇE - İNGİLİZCE TEKNİK TERİMLER DİZİNİ	xvii
1. GİRİŞ	1
1.1. Güç Sistemlerinde Statik VAr Kompanzatörler ile Gerilim Kalitesinin İyileştirilmesi	2
1.2. Tezin İçeriği	6
2. ELEKTRİK DAĞITIM HATLARINDA GÜÇ KALİTESİ	7
2.1. Elektrik dağıtım sistemlerinin incelenmesi	7
2.1.1. Dağıtım sistemlerin gereksinimleri	8
2.1.2. Elektrik dağıtım sistemlerinin bağlantı şekilleri	8
Dallı şebeke	9
Halka şebeke	10
2.2. Elektrik dağıtım hatları'nın güç kalitesine genel bakış	10
2.2.1. Güç sistemi frekansı	12
2.2.2. Gerilim etkin değeri değişimleri	12
2.2.3. Harmonikler ve ara harmonikler	14
2.2.4. Gerilim kırpışması	19
2.3. Elektriksel güç ve gerilim kalitesinin iyileştirilmesi	19
2.3.1. Gerilim ve aktif gücün kontrolü	20
2.3.1.1. Kademe değiştirici transformatörler	20
2.3.1.2. Faz kaydırıcı transformatörler	21
2.3.2. Yük kompanzasyonu	22
2.3.2.1. Kompanzasyonun amacı	22
2.3.1.2. Kompanzasyon yöntemleri	23
2.3.1.3. Pasif elemanlar ile reaktif gücün kontrolü	24
Şönt elemanlar	24
Seri elemanlar	25
2.3.3. Esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS)	25
2.3.3.1. Statik VAr kompanzatör (SVK)	26
3. DAĞITIM HATLARININ MODELLENMESİ VE GERİLİM KONTROLÜ İÇİN SVK TASARIMI	28
3.1. Dağıtım hatların modellenmesi	28
3.1.1. Dağıtım hattın dağıtık parametreleri	28
3.1.2. Dağıtım hattın toplu parametreleri	31
3.1.3. Toplu parametreler ile dağıtım hatların modellenmesi	33
3.2. Örnek güç sistemi tanıtımı	37
3.2.1. Örnek güç sistemi-1	37
3.2.2. Örnek güç sistemi-2	43
3.3. Reaktif güç kompanzasyonu ile gerilim regülasyonu esasları	45
3.4. TKR tabanlı SVK sistemleri	48
3.4.1. Tristör kontrollü reaktör (TKR)	48

3.4.2. Pasif filtre ve tristör kontrollü reaktör (PF-TKR)	51
3.4.3. TKR tabanlı SVK'nın gerilim kontrol işlevi	52
3.4.4. SVK tasarımı	54
3.4.5. TKR tabanlı SVK'nın harmonik analizi	58
Kararlı durumda TKR akımının tek harmoniği	58
TKR çift akım harmoniği	59
3.4.6. TKR harmoniklerinin minimizasyonu	60
Pasif şönt filtreler ile harmoniklerin azaltılması	61
3.4.6. Uygulanan TKR için kararlı durum harmonik analizi	62
3.4.7. Uygulanan TKR için filtre tasarımı ve analizi	63
3.4.8. SVK dinamik karakteristiğinde eğimin avantajları	66
SVK anma gücünün azaltılması	69
Reaktif güç sınırlarında sık çalışmasının önlenmesi	70
3.4.9. SVK'nın dinamik karakteristiğinde eğimin dezavantajı	72
4. BENZETİM SONUÇLARI	75
4.1. Gerilim düzenlenmesinde kullanılan farklı yöntemlerin incelenmesi	75
4.2. SVK'nın bağlantı noktası	77
4.2.1. Örnek güç sistemi-1'de SVK'nın bağlantı noktasının seçilmesi	78
4.2.2. Örnek güç sistemi-2'de SVK'nın bağlantı noktasının seçilmesi	79
4.3. SVK ile gerilim regülasyonu	88
4.3.1. Örnek güç sistemi-1'de gerilim regülasyonunda SVK'nın performansının incelenmesi	89
4.3.2. Örnek güç sistemi-2'de gerilim regülasyonunda SVK'nın performansının incelenmesi	90
4.4. SVK ile gerilimin dengelenmesi	91
4.4.1. Reaktif güç kompanzasyon ile yük dengeleme esasları	91
4.4.2. Örnek güç sistemi-1'de gerilimin dengelenmesinde SVK'nın performansının incelenmesi	97
4.4.3. Örnek güç sistemi-2'de gerilimin dengelenmesinde SVK'nın performansının incelenmesi	99
4.5. SVK ile gerilim çukurunun etkisinin azaltılması	105
4.5.1. Örnek güç sistemi-1'de gerilim çukurunun etkisinin azaltılmasında SVK'nın performansının incelenmesi	106
4.5.2. Örnek güç sistemi-2'de gerilim çukurunun etkisinin azaltılmasında SVK'nın performansının incelenmesi	107
4.6. SVK ile gerilim tepesinin etkisinin azaltılması	109
4.6.1. Örnek güç sistemi-1'de gerilim tepesinin etkisinin azaltılmasında SVK'nın performansının incelenmesi	110
4.6.2. Örnek güç sistemi-2'de gerilim tepesinin etkisinin azaltılmasında SVK'nın performansının incelenmesi	111
4.7. Ani yük değişimlerinde SVK'nın performansının incelenmesi	113
4.8. Hafif yük koşullarında SVK'nın performansının incelenmesi	113
4.9. Aşırı yük koşullarında SVK'nın performansının incelenmesi	114
5. SONUÇLAR	116
KAYNAKLAR	120
EK 1. PSCAD-EMTDC BENZETİM YAZILIMINDA ÖRNEK GÜÇ SİSTEMİ-1'İN ŞEMASI	125

EK 2. PSCAD-EMTDC BENZETİM YAZILIMINDA ÖRNEK GÜÇ SİSTEMİ-2'İN ŞEMASI	126
EK 3. PSCAD-EMTDC BENZETİM YAZILIMINDA KULLANILAN SVK ŞEMASI	127
EK 5. PSCAD-EMTDC BENZETİM YAZILIMINDA TKR'NİN DEVRE ŞEMASI	128
EK 5. PSCAD-EMTDC BENZETİM YAZILIMINDA TKR'NİN KONTROL DEVRESİNİN ŞEMASI	129
ÖZGEÇMİŞ	130

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sayfa

Şekil 2.1. Tipik bir elektrik şebekesinin tek hat şeması ve gerilim seviyeleri.....	7
Şekil 2.2. Dallı şebekenin tek hat şeması	10
Şekil 2.3. Halka şebekenin tek hat şeması	10
Şekil 2.4. Gerilim çukuru.....	13
Şekil 2.5. Gerilim tepesi.....	14
Şekil 2.6. Harmoniklerin spektrumunda harmonik grup ve alt grupların gösterimi	18
Şekil 2.7. Kademe değiştirici transformatörün eşdeğer devresi	21
Şekil 2.8. Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğer devresi.....	21
Şekil 2.9.SVK'nın tek hat şeması ve eşdeğer devresi.....	27
Şekil 3.1. Dağıtılmış parametreler ile dağıtım hatların tek hat şeması.....	29
Şekil 3.2. Toplu parametreler ile dağıtım hattın π eşdeğer devresi.....	32
Şekil 3.3. Uzun iletim ve dağıtım hat modeli	34
Şekil 3.4. Orta Uzunlukta İletim ve Dağıtım Hat Modeli.....	35
Şekil 3.5. Kısa kayıplı iletim ve dağıtım hat modeli.....	36
Şekil 3.6. Kısa kayıpsız dağıtım hat modeli.....	36
Şekil 3.7. Örnek güç sistemi-1'in tek hat şeması.....	38
Şekil 3.8. Örnek güç sistemi-1'de modellenen direk verileri	38
Şekil 3.9. Örnek güç sistemi-1'de modellenen iletkenlerin verileri	39
Şekil 3.10. Örnek güç sistemi-1'de modellenen iletkenlerin koordinatlarının verileri.....	39
Şekil 3.11 Örnek güç sistemi-1'de yük barasındaki hat gerilimlerinin etkin değerleri.....	40
Şekil 3.12. Gerilim bileşenleri fazör diyagramı	41
Şekil 3.13. Önerilen güç sistemi-1'de iletkenlerin çaprazlama yapılmış durumunda hat gerilimlerinin etkin değerleri.....	42
Şekil 3.14. Örnek güç sistemi-2'nin tek hat şeması	43
Şekil 3.15. Yüke bağlı dağıtım hattının eşdeğer devresinin tek hat şeması	46
Şekil 3.16. Kompanze edilmemiş ve kompanze edilmiş sistem için fazör diyagram.....	46
Şekil 3.17. Bir endüktif elektriksel yük için tipik akım/gerilim karakteristiği	47
Şekil 3.18. Tipik bir kompanzatörün gerilim / reaktif güç karakteristiği.....	47
Şekil 3.19. TKR'nin tek hat şeması	48
Şekil 3.20. TKR'nin sanal geçiri kontrol karakteristikleri	50

Şekil 3.21. Güç sistemi ve SVK kontrol sistemi basitleştirilmiş blok diyagramı; Bir AA sistem için SVK endüktif akımının fazör diyagramı ve basitleştirilmiş bir güç sistemi ve SVK karakteristiği.....	53
Şekil 3.22. SVK'nın farklı bağlantı şekilleri	57
Şekil 3.23. Kullanılan üçgen bağlı, 6-darbeli TKR bileşenleri ve tristörlerin özellikleri.....	59
Şekil 3.24. Ayarlı şönt filtre ve özellikleri	61
Şekil 3.25. İkinci derece şönt filtre ve özellikleri	62
Şekil 3.26. Kararlı durum için TKR'nin harmonik spektrumu	62
Şekil 3.27. TKR'nin 3. ve 5. harmonikleri için tasarlanan filtrelerin tek hat şeması, bileşenleri ve özellikleri.....	65
Şekil 3.28. TKR'nin 3. ve 5. harmonikleri için tasarlanan filtrelerin karakteristiği.....	66
Şekil 3.29. SVK'nın V-I karakteristiği.....	67
Şekil 3.30. Uygulanan eğimin yüzdesine göre gerilim değişiklikleri.	68
Şekil 3.31. Uygulanan eğimin yüzdesine göre eğimin empedansı.....	68
Şekil 3.32. Eğim uygulanmadığı zaman TKR faz akımının etkin değeri.....	70
Şekil 3.33. Eğimsiz SVK'da yükün hat gerilimlerinin dalga şekilleri.....	71
Şekil 3.34. %1 Eğim uygulandığı zaman TKR faz akımlarının etkin değeri.....	71
Şekil 3.35. %2 Eğim uygulandığı zaman TKR faz akımlarının etkin değeri.....	72
Şekil 3.36. SVK dinamik karakteristiğinde %2 eğim uygulandığı zaman yükün hatlararası gerilimlerin dalga şekilleri.....	72
Şekil 3.37. Örnek güç sistemi-1'de uygulanan dengesiz yük	73
Şekil 4.1. SVK'nın hatta bağlantı noktasına göre tüm yüklerin hat gerilimlerinin ortalaması.....	82
Şekil 4.2. Örnek güç sistem-1'de SVK kullanıldığında yüklerin hatlararası gerilimleri.....	89
Şekil 4.3. Üç fazlı dengesiz yük	91
Şekil 4.4. Sanal geçirici ve reaktif gücün ortadan kaldırılması	92
Şekil 4.5. Güç faktörü bir ile dengesiz yük	93
Şekil 4.6. Güç faktörü bir ile tek faz dengesiz yük.....	94
Şekil 4.7. Tek fazlı sistemde güç faktör bir ile pozitif sıralı yük dengeleme	94
Şekil 4.8. Güç faktörü bir ile tek fazlı sistemin yıldız pozitif sıralı eşdeğer devresi.....	97
Şekil 4.9. Tek fazlı sistemde güç faktörü bir ile yükün pozitif sıralısı fazör diyagramı	96
Şekil 4.10. Örnek güç sistemi-1'de uygulanan dengesiz yük	88
Şekil 4.11. Dengesiz yüklerden kaynaklanan dengesiz hat gerilimleri	98
Şekil 4.12. Örnek güç sistemi-2'de uygulanan dengesiz yük.....	100
Şekil 4.13. Örnek güç sistemi-2'de SVK hattın 30. km'sine bağlandığında tek hat şeması.....	101

Şekil 4.14. Örnek güç sistemi-2’de SVK hattın 35. km’sine bağlandığında tek hat şeması.....	102
Şekil 4.15. Örnek güç sistemi-2’de SVK hattın 40. km’sine bağlandığında tek hat şeması.....	103
Şekil 4.16. Örnek güç sistemi-2’de SVK hattın 50. km’sine bağlandığında tek hat şeması.....	104
Şekil 4.17. SVK’sız örnek güç sistem-1’de gerilim çukuru etkisi.....	106
Şekil 4.18. Önerilen güç sistemi-1 için %12 gerilim çukurunda SVK’nın etkisi.....	107
Şekil 4.19. SVK’sız Örnek Güç Sistemi-2’de gerilim tepesinin etkisi	110
Şekil 4.20. Önerilen güç sistem-1 için %12 gerilim tepesinde, SVK etkisi	111
Şekil 4.21. Ani yük değişiminde gerilim düzenlenmesinde SVK’nın performansı.....	113
Şekil 4.22. Hafif yük koşullarında gerilim düzenlenmesinde SVK’nın performansı.....	114
Şekil 4.23. Aşırı yük Koşullarında gerilim düzenlenmesinde SVK’nın performansı.....	115

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

AA	Alternatif Akım
AGTHB	Alt Grup Toplam Harmonik Bozulma
B, B_C, B_L	Sanal Geçiri, Kapasitör Sanal Geçiri, Reaktör Sanal Geçiri
C	Kapasitans
D_x	Diferansiyel Segmentin Uzunluğu
DA	Doğru Akım
DFT	Kesikli Fourier Dönüşümü
FKT	Faz Kaydırıcı Transformatör
GTHB	Grup Toplam Harmonik Bozulma
KDT	Kademe Değiştirici Transformatör
kV	Kilo Volt
I, I_{TKR}	Akım, Tristör Kontrollü Reaktörün Akımı
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IEEE	Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
I_n	Nominal Akım
I_p	Etkin Akım
I_q	Tepkin Akım
L	Hat uzunluğu
l	Endüktans
M, Km	Metre, Kilo Metre
OG	Orta Gerilim

P	Aktif Güç
PI	Oransal Tümlensel
Q	Tepkin Güç
R	Direnç
S	Görünür Güç
SSSC	Statik Senkron Seri Kompanzatör
STATCOM	Statik Senkron Kompanzatör
SVK	Statik VAr Kompanzatörü
t	Zaman
TAK	Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör
THB	Toplam Harmonik Bozulma
TKR	Tristör Kontrollü Reaktör
V, V_S, V_{ref}	Gerilim, Besleme Gerilimi, Referans Gerilimi
W, MW	Watt, Mega Watt
VA, MVA	Volt Amper, Mega Volt Amper
$VAr, kVAr$	Volt Amper Reaktif, Kilo Volt Amper Reaktif
X_t, X_L, X_C	Transformatör Reaktansı, Hat Reaktansı, Kondansatör Reaktansı
Z, Z_C	Empedans, Hattın Karakteristik Empedansı
Z_{dx}	Diferansiyel Segmentin Empedansı ve Admitansı
y	Admitans
y_{dx}	Diferansiyel Segmentin Admitansı

α	Tetikleme Açısı
φ	Faz Açısı
δ	İletim Açısı
ω	Açısal Hız
γ	Yayımlanma Sabiti

ÇİZELGELER DİZİNİ

Sayfa

Çizelge 2.1. Dalga şekilleri (Frekansların) spektral bileşenleri.....	15
Çizelge 3.1. Toplu hat modellerinin ayrıntıları.....	37
Çizelge 3.2. Örnek güç sistemi-1’de hatların farklı durumu için gerilim bileşenleri.....	42
Çizelge 3.3. Örnek güç sistem-2’de yüklerin bağlantı noktalarındaki hat gerilimlerin etkin değerleri.....	43
Çizelge 3.4. Örnek güç sistemi-2’de hatların farklı durumları için yüklerin bağlantı noktalarında gerilim bileşenleri.....	44
Çizelge 3.5. Kararlı durum için TKR ve filtrelerden kaynaklanan akım harmonik değerleri.....	63
Çizelge 3.6. Seçilen eğimin(X_{SL}), SVK’da kullanılan reaktif güçte etkisi.....	69
Çizelge 3.7. Seçilen eğimin dengesizliğe etkisi.....	74
Çizelge 4.1. Örnek güç sistem-1 için farklı yöntemler ile yükün hatlararası gerilimleri.....	76
Çizelge 4.2. Örnek güç sistemi-1 için farklı yöntemler ile maksimum güç transferi.....	77
Çizelge 4.3. SVK’da kullanılan reaktif güç miktarı bağlantı noktasına göre.....	78
Çizelge 4.4. Bağlantı noktasına göre Maksimum güç transferi ve ilgili gerilimler.....	79
Çizelge 4.5. Yükler hattın sonunda olduğu zaman, şebekenin güç faktörü.....	79
Çizelge 4.6. SVK hattın 18.35 km’sine bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.....	83
Çizelge 4.7. SVK hattın 26 km’sine bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.....	84
Çizelge 4.8. SVK hattın 34.48 km’sine bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.....	85
Çizelge 4.9. SVK hattın 42.8 km’sine bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.....	86
Çizelge 4.10. Örnek güç sistemi-2 için SVK’nın bağlandığı noktaya göre gerilim ve SVK’nın reaktif gücü.....	87
Çizelge 4.11. Örnek güç sistemi-2’de SVK kullanıldığında bara gerilimleri.....	90
Çizelge 4.12. Örnek güç sistemi-1’de farklı durumlar için hat gerilimleri ve dengesizlik oranları.....	99
Çizelge 4.13. Örnek güç sistemi-1’de farklı durumlar için hat gerilim bileşenleri.....	99
Çizelge 4.14. Örnek güç sistemi-2’de SVK’sız sistemde yüklerin bağlantı noktasındaki gerilimler ve dengesizlik oranları.....	100
Çizelge 4.15. SVK hattın 30. km’sine bağlandığında, yüklerin bağlantı noktalarında hat gerilimleri, gerilimlerin bileşenleri ve dengesizlik oranları.....	101

Çizelge 4.16. SVK hattın 35. km'sine bağlandığında, yüklerin bağlantı noktalarında hat gerilimleri, gerilimlerin bileşenleri ve dengesizlik oranları.....	102
Çizelge 4.17. SVK hattın 40. km'sine bağlandığında, yüklerin bağlantı noktalarında hat gerilimleri, gerilimlerin bileşenleri ve dengesizlik oranları.....	103
Çizelge 4.18. SVK hattın 50. km'sine bağlandığında, yüklerin bağlantı noktalarında hat gerilimleri, gerilimlerin bileşenleri ve dengesizlik oranları.....	104
Çizelge 4.19. Kompanze edilmemiş hat için %12 gerilim çukurunda yüklerin hatlararası gerilimleri.....	107
Çizelge 4.20. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim çukurunda, SVK 30. km'e bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri.....	108
Çizelge 4.21. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim çukurunda, SVK 35. km'e bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri.....	108
Çizelge 4.22. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim çukurunda, SVK 40. km'e bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri.....	108
Çizelge 4.23. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim çukurunda, SVK 50. km'e bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri.....	109
Çizelge 4.24. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim tepesinde, SVK 30. km'e bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri	111
Çizelge 4.25. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim tepesinde, SVK 35. km'e bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri	112
Çizelge 4.26. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim tepesinde, SVK 40. km'e bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri	112
Çizelge 4.27. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim tepesinde, SVK 50. km'e bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri	112

TÜRKÇE - İNGİLİZCE TEKNİK TERİMLER DİZİNİ

Alçak Geçiren Süzgeç	: Low Pass Filter
Aktif Akım	: Active Current
Aktif Güç	: Active Power
Ara Harmonik	: Subharmonic
Aşırı Yük	: Overload
Bara	: Busbar
Bozukluk	: Disturbance
Çevrim	: Cycle
Dağıtım	: Distribution
Dağıtık Hat Modeli	: Distributed Line Model
Dallı Şebeke	: Radial Network
Deşarj Akım	: Discharge Current
Doygunluk	: Saturation
Enterkonnekte Şebeke	: Interconnected Network
Evre Kenetleme Döngüsü	: Phase Locked Loop, PLL
Geçici Rejim	: Transient
Geçirme Kuşağı	: Pass Band
Geri Besleme Döngüsü	: Feedback Loop
Gerilim Büyüklüğü	: Voltage Magnitude

Gerilim Çöküşü	: Voltage Collapse
Gerilim Çukuru	: Voltage Sag
Gerilim Dengesizliği	: Voltage Unbalance
Gerilim Düşümü	: Voltage Drop
Gerilim Kalitesi	: Voltage Quality
Gerilim Kesintisi	: Voltage Interruption
Gerilim İstikrarı	: Voltage Stability
Gerilim Profili	: Voltage Profile
Gerilim Regülasyonu	: voltage Regulation
Gerilim Sapması	: Voltage Deviation
Gerilim Tepesi	: Voltage Swell
Gevşek Bağlantı	: Loose Connection
Görünür Güç	: Apparent Power
Güç Akışı	: Power Flow
Güç Elektroniği	: Power Electronics
Güç Faktörü	: Power Factor
Güç Kalitesi	: Power Quality
Güç Transferi	: Power Transfer
Güvenilirlik	: Reliability
Faz Açısı	: Phase Angle
Faz kayması	: Phase Shifting

Hafif Yk	: Light Load
Halka Şebeke	: Ring Network
Hat İyileőtirme	: Line Conditioning
Hata pozisyon yöntemi	: Fault Position Method
Havai Sistem	: Overhead System
Kararlı Durum	: Steady State
Kesikli Fourier Dnőtm	: Discrete Fourier Transform
Kırpıőtma	: Flicker
Kondansatör	: Capacitor
İletiőt	: Communication
Kademe Değiştirici	: Tap Changer
Kayıp	: Loss
Kompanzasyon	: Compensation
Negatif Sıra	: Negative Sequence
Oransal İntegral	:Proportional Integral
Paralel Kompanzasyon	: Parallel Compensation
Pozitif Sıra	: Positif Sequence
Reaktif Akım	: Reactive Current
Reaktif Güç	: Reactive Power
Rezonans	: Resonance
Sanal Geçiri	: Susceptance

Senkron Makine	: Synchronous Machine
Seri Kompanzasyon	: Series Compensation
Sıfır Sıra	: Zero Sequence
Tetikleme Açısı	: Firing Angle
Toplu Hat Modeli	: Lumped Line Model
Üç Faz	: Three Phase
Üretim	: Generation
Yarıiletken	: Semiconductor

1. GİRİŞ

Elektrik dağıtım sistemlerinde dağıtım hatlar üzerinde iletilebilen güç kapasitesi, gerilim ve reaktif güç kontrolü özellikle uzun dağıtım hatlarında önemli bir problemdir. İdeal bir alternatif akım şebekesine sahip olabilmek için bu problemlerin çözülmesi gerekir. İdeal bir alternatif akım şebekesinin kalitesi;

- Faz gerilimi ve akımlarının dengeli olması,
- Güç faktörünün 1'e yakın olması,
- Gerilimin ve frekansın sabitliği,
- Sürekli elektrik enerjisi verilmesi,
- Harmonik miktarının belirli sınırlar arasında kalması,

ile tanımlanabilir (Akgün, 2006).

AA sistemlerde güç akışı, bara gerilimlerinin faz açısı, hat empedansı ve hat geriliminin bir fonksiyonudur. Bu değişkenlerin kontrolündeki herhangi bir aksama istenmeyen reaktif güç akışına, yüksek güç kayıplarına ve yüksek veya düşük gerilimlere yol açabilir. Paralel ve seri kompanzasyon yapılarak, hat empedansının kontrolü ile gerilim büyüklüğü, faz açısı ve hat akımının kontrolü yapılarak güç faktörünün iyileştirilmesi dolayısıyla güç transferinin artırılması mümkündür. Güç sistemlerinde gerilim kontrolü yük bakımından büyük öneme sahiptir. Sistemdeki gerilim düşmesi veya gerilim yükselmeleri beslenen yüklerde arızalara ve performans düşüklüklerine neden olur (Yalçınöz, Erbaş, Yücel, 2001).

Büyüyen ve karmaşıklaşan elektrik sistemlerinin üretim, iletim ve dağıtım kapasitelerinin artırılması, reaktif güç akışın neden olduğu kayıpların en alt düzeye indirilmesi ve kullanıma sunulan elektrik enerjisinin daha kaliteli hale getirilmesi amaçlarıyla reaktif güç kompanzasyonu gün geçtikçe daha yaygın bir biçimde uygulanmaktadır (Kara ve Yalçınöz, 2005).

Gelişen yarı iletken teknolojisi ile büyük güçte, güç elektroniği çevirgeçleri geliştirilmektedir. FACTS (Esnek AA İletim Sistemleri) adı verilen bu çevirgeçleri

kullanılarak enerji sistemlerinin kontrolü daha verimli, hızlı ve güvenilir bir teknoloji oluşumuna imkan sağlanabilir (Canizares, 2000).

FACTS terimi 1990'lı yıllarda literatüre geçmekle beraber daha önceki yıllarda küçük güçlü bazı uygulamalarda da kullanılmıştır. Bu teknoloji, günümüzde AA güç iletim ve dağıtım sistemlerinin sınırları aşmak amacı ile kullanılmaktadır. Mikro Elektronik, iletişim ve güç elektroniği ile ilerleyen bu teknolojilerin bileşik etkisi onları daha güvenli ve etkin bir hale getirmiştir. Birçok çalışmada teknik problemlerin çözümünün yanı sıra ekonomik ve politik unsurlar da göz önünde tutulmaktadır (Eminoğlu, 2003). Enerji kalitesi konusundaki çalışmalar genellikle gerilimdeki dalgalanmalar, çökmeler ya da kesintiler ve geçici olaylar üzerinde olmakla birlikte, hiç şüphesiz, en çok reaktif güç kompanzasyonu ve harmonikler konularında yapılmaktadır.

Elektrik enerji sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmanın, verimi artırmanın ve enerji tasarrufu sağlamanın en etkin ve en kolay yöntemlerinden birisi reaktif güç kompanzasyonudur. Bu tez çalışmasının amacı, orta gerilim elektrik dağıtım sistemlerinde özellikle uzun dağıtım hatlarında reaktif güce bağlı olarak ortaya çıkan gerilim kalitesi problemlerini ve bunların çözüm yöntemlerini incelemektir. Bu doğrultuda elektrik dağıtım şebekeleri ile birlikte reaktif güç kompanzasyonunun gerekliliği, matematiksel esasları, kompanzasyon sistemleri incelenmiştir. Bu amaç için FACTS elemanlarından birisi olan Tristör Kontrollü Reaktör (TKR) tabanlı Statik Var Kompanzatör (SVK) kullanılarak enerji dağıtım sistemlerinde gerilim düzenlenmesi için uzun dağıtım hatları ve farklı yük koşullarında benzetim ortamında sistemin performansının incelenmesi amaçlanmış ve tez içerisinde yer verilmiştir.

1.1. Güç Sistemlerinde Statik VAr Kompanzatörler ile Gerilim Kalitesinin İyileştirilmesi

Dağıtım sistemleri, elektrik şebekesinin önemli bir kısmıdır ve tüketicilere enerji dağıtılmasında büyük role sahiptir. Tüketicilerin talebinin artması ile dağıtım hatlarının daha fazla güç iletmesi gerektirmektedir. Eğer dağıtım hatların kayıpları yüksek ise, dağıtım hatlarından iletilen enerji, dağıtım kayıpları ve güç talebini karşılamak zorundadır. Bu kayıplar nasıl ve ne kadar azaltılması yönündeki

bilgiler, işletim maliyetinin azaltılmasında ve sistemin verimliliğinin en üst düzeye çıkarılmasında önemlidir (Chessmore, 2008).

Statik VAr Kompanzatör (SVK) gibi Esnek Alternatif Akım İletim Sistemi (FACTS) denetleyicileri, elektrik dağıtım sistemlerinde gerilim ve güç akışını kontrol etmek için ve gerilim regülasyonunun iyileştirilmesi için anahtarlama güç elektroniği cihazlarının en son teknolojisini kullanır (Sullivan, 2006).

Gerilim kontrolü için şönt bağlı SVK (statik VAr kompanzatör) ilk Nebraska'da gösterildi ve 1974 yılında GE tarafından ve 1975 yılında da Westinghouse tarafından Minnesota'da pazarlandı. SVK öyle bir VAr tüketici ve üreticisidir ki elektrik güç sistemin belirli parametrelerini korumak veya kontrol etmek için çıkış akımlarını kapasitif veya endüktif olarak ayarlar. SVK güç sistemlerinde osilasyonların sönümlenmesinde, geçici ve dinamik kararlılık ve gerilim kararlılığı artırmak için kullanılır (Rusli, 2005).

Gerilim regülasyonu çoğu SVK'da ilk operasyonel hedeftir. Ayrıca, SVK kontrol sistemlerinin geçici yanıtları, toplam güç sistemi performansını etkiler ve bu değişiklikler sırasında ayarların değiştirilmesi gerilim kararsızlığına yol açabilir. Ayrıca, SVK tek fazlı yükü, üç fazlı dengeli yük haline dönüştürmek için de kullanılır. Böylece güç dağıtım sistemlerinde negatif sıralı akımları ve gerilimleri azaltır (Dawson, 2005).

Güç sistemlerinde gerilim regülasyonu her zaman önemli bir ilgi konusu olmuştur. Güç sistemleri yük değişimlerine karşı duyarlıdır. Güç sistemlerinde hızlı gerilim regülasyonu, başta enerji üretimindeki senkron makinelerin otomatik gerilim regülasyonuna (AVR) dayanır. Ayrıca, senkron kondansatörler güç sistemlerinde gerilim regülasyonu için sadece geleneksel yöntem olarak tanımlanır. Statik VAr Kompanzatörlerdeki son gelişmeler nispeten ucuz, güvenilir ve hızlı gerilim regülasyon cihazlarının yapılabilir olduğunu kanıtlamış ve güç sistemlerin işleyişini, iletim kapasitelerini yeteneklerini ve geçici kararlılık sınırlarını genişletmek için uygulanabilir olduğunu göstermiştir (Hellal, 1991). Tristör kontrollü reaktör (TKR) ve tristör anahtarlama kapasitör (TAK) tabanlı SVK değişken reaktif güç aygıtları olarak, şimdi belirtilen toleranslar içinde gerilim sapmalarını düzeltmek için yeni ve etkili bir araç olarak çok sayıda birbirine bağlı güç sistemlerinde

uygulanmaktadır. Konvansiyonel SVK sistemleri, TKR ve TAK, değişken bileşenler olarak, reaktif güç kaynağı gibi çalışır ve kontrol edilir. SVK, tristörleri kondansatörler ve reaktörlerin zorunlu komütasyonu için kullanılarak, reaktif gerilim ve akım kaynağı gibi davranır (Edwards et al, 1988).

Konvansiyonel SVK sistemlerinde, gerilim regölasyonu için yerel gerilim ve akım ölçümlerine dayalı denetleyiciler kullanır. TKR, TAK bileşenleri ve tristör operasyonu için faz senkronizasyonu gerekir ki bu çoğunlukla evre kenetleme döngüsüne (PLL) dayanmaktadır. Genellikle, gerilim regölasyonu için oransal tümlevsel (PI) denetleyici veya Geri/Önde (Lead/Lag) denetleyicisi kullanılır. Bir PI denetleyicisi SVK eğim reaktansının üzerinden beslenen SVK akım sinyaline dayalı bir geri bildirim döngüsüne sahiptir (Hellal, 1991).

Son yıllarda SVK gerilim regölasyonu yönünde ve onun özelliklerini geliştirmek için birçok çalışmalar yapılmış (Kowalski et al., 2006; Nwohu et al., 2009; Porate et al., 2009; Rewatkar et al., 2009; Sabai et al., 2008; Taufik et al., 2009).

Kowalski et al. (2006)'ın, çalışmaları Southern California Edison şebekesindeki Devers trafo merkezi üzerinde kurulan 500 kV Statik VAr Sisteminin (SVS) planlanması, özellikleri ve tasarımı üzerinde yapılmıştır. Southern California'da Edison Statik VAr Kompanzasyon sistemi iletim sistemin kapasitesini artırmak ve gerilim kararlılığı sorunlarını gidermek amacı ile uygulanmıştır. Aynı zamanda aşırı yük sırasında Devers trafo merkezinde 500 kV barada kararlı durum için gerilim regölasyonun sağlanması gösterilmiştir. Ayrıca, incelemeye göre, SVK kontrol sisteminin gerilim kontrolü ve reaktif güç kontrolüne ek olarak, çeşitli SVK bileşenlerinin korumasında önemli bir rol oynamaktadır.

SVK ile sistem bozuklukları sırasında iletim sistemlerinin dinamik performansının kontrol edilmesi ve etkili bir gerilim regölasyonun sağlanması konusunda Sabai et al. (2008)'ın, çalışmaları yapılmıştır. Bu çalışmada SVK gerilim kontrol özellikleri ve gerilim regölasyonu modunda tasarlanan SVK'nın tasarım ilkeleri sunulmaktadır. Ayrıca, bu çalışmada SVK'nın gerilim kontrol performansında, şebeke rezonansı, transformatör doyumu, jeomanyetik etkilerin ve gerilim bozukluklarının etkili oldukları açıklanmaktadır.

Nwohu et al. (2009)'ın, çalışmaları güç sistemlerinde statik VAr kompanzatör kullanarak gerilim istikrarlılığının iyileştirilmesi üzerine yapılmıştır. Bu çalışmada gerilim regülasyonu için kullanılan SVK'nın temel yapısı ve modeli açıklanmıştır. Bu model, değişken empedanslı bir kontrole dayanmaktadır. Sistem gerilimini kontrol etmek için Tristör Kontrollü Reaktörün (TKR) tetikleme açısı değiştirilmektedir. Ayrıca bu çalışma, statik VAr kompanzatörün bağlı olduğu bara gerilimin azalması ve gerilim çökmesi sırasında gerekli hızda gerilim desteği sağlayabilir olduğunu göstermektedir.

Porate et al. (2009)'ın çalışmalarında 33/11 kV dağıtım trafo merkezi performansı SVK'sız ve yük sonuna bağlı SVK ile incelenmiştir. SVK olmadan kaydedilen veriler ve benzetim sonuçlarının karşılaştırılması ile parametrelerin sapmaları bulunmuştur. Uygun olmayan dağıtım hat uzunluğu, gevşek bağlantılar, eklemler sayısı ve uygun olmayan transformatörlerin parametreleri sapmalarının nedeni oldukları açıklanmıştır. Yük sonuna SVK eklenmesi ile gerilim profili, güç faktörü, güç kaybı ve güç akışı iyileşmesi açıklanmıştır. Bu çalışmanın sonunda sistemin performansını artırmak için kaliteli transformatörler, uygun dağıtım hat uzunluğu, minimum eklemler kullanımı önerilmektedir.

Dağıtım şebekelerde iki farklı kompanzasyon sistemi üzerinde Taufik et al. (2009)'ın, çalışmaları yapılmıştır. Reaktif güç kompanzatörleri büyük motorların ani yol alma akımı nedeniyle oluşan gerilim kırışması ile ilgili sorunlarını gidermek için kullanılabileceği anlatılmıştır. İncelemeler şönt kapasitör çözümünün tek bir motor ile konut yüklerinde gerilim kalitesinin artırılmasını açıklamaktadır. Ayrıca, SVK gerilim kırışması sırasında ve gerilim kalitesi düzenlemesinde daha etkili olduğu açıklanmaktadır.

Gerilim çukuru, tepesi ve kesintisi gibi önemli güç kalitesi problemlerinin güç elektroniği tabanlı FACTS cihazlardan biri olan SVK ile etkili bir şekilde kontrol edildikleri Rewatkar et al. (2009)'da gösterilmiştir. Bu çalışmada SVK ile gerilim sapmaları sırasında bara gerilimi korunabilir oldu söylenmektedir. Ayrıca, SVK gerilim profili ve güç aktarım yeteneğinin açısından güç sistemi performansını kontrol etme yeteneği incelenmiş ve incelemenin sonunda da SVK'nın güç sistemlerde güç kalitesi problemlerini kontrol edebileceği gösterilmiştir.

Alves et al.'ın, çalışmaları iletim hatlarının termal kapasitesi dâhilinde dinamik kompanzatör (SVK) ile gerilim kararlılığını koruyarak iletim hattı üzerinde, güç akışının artırılması üzerine yapılmıştır. İncelemede SVK ile güç akışında %48 artış olduğu ve kısa devre sırasında gerilimlerin %0.8-%1.2 p.u. aralığında tutabilir olduğu gösterilmiştir.

Genelde SVK sistemleri hem iletim, hem de dağıtım sistemlerinde, tasarlanıp ve kullanılmaktadır. Ancak, uzun dağıtım hatlarının SVK ile gerilim kalitesinin düzeltilmesi konusunda henüz ayrıntılı bir inceleme yapılmamıştır.

1.2. Tezin İçeriği

Bu tezde uzun dağıtım hatlarının aşırı yüklenme ve beklenmedik olaylar nedeniyle ortaya çıkan gerilim çökmelerinin önlenmesi için kullanılan TKR tabanlı SVK'nın performansı incelenmiştir. Bu amaçla, iki farklı dağıtım hattı için TKR tabanlı SVK sistemi geliştirilmiş ve incelemeler bu sistemlerin üzerinde yapılmıştır. Sonuçlar TKR tabanlı SVK'nın, hem kararlı ve hem geçici durumlarda, sistemin gerilim profilinin korunmasında başarılı ve yeterli olduğunu doğrulamaktadır.

1. Bölüm 'de elektrik dağıtım sistemlerinde SVK'nın gereksinimleri ve elektrik güç sistemlerinde SVK ile gerilim kalitesinin düzeltilmesi üzerinde yapılan çalışmalar anlatılmıştır.

2. Bölüm 'de elektrik dağıtım hatlarının genel yapıları, gereksinimleri ve bağlantı şekilleri açıklanmış, dağıtım sisteminde güç kalitesi ile ilgili problemler tanıtılmıştır.

3. Bölüm 'de iki örnek güç sistemi için hatların modellenmesi anlatılmış, sistemlerde bulunan uzun dağıtım hattı ve aşırı yüklenme nedeniyle gerilim düşümü problemi bilgisayar benzetimleri ile gösterilmiş ve bu tür güç sistemleri için TKR tabanlı SVK'nın tasarımı anlatılmıştır.

4. Bölüm 'de örnek güç sistemlerine ait PSCAD-EMTDC'de yapılan bilgisayar benzetim sonuçları verilmiştir.

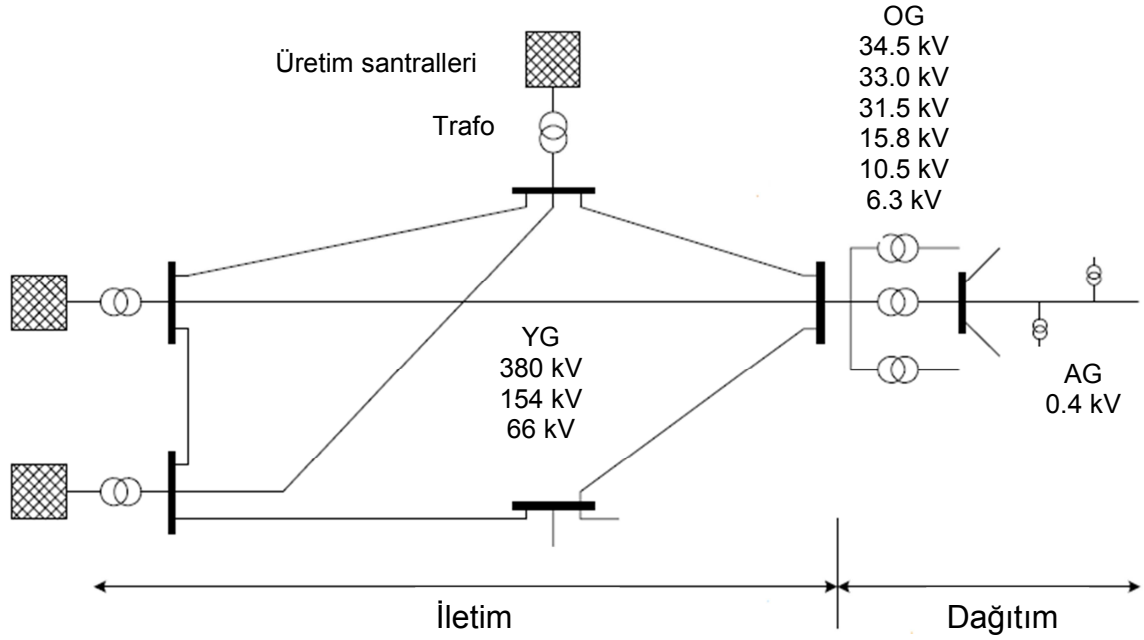
Sonuçlar 5. Bölüm 'de verilmektedir.

2. ELEKTRİK DAĞITIM HATLARINDA GÜÇ KALİTESİ

2.1. Elektrik Dağıtım Sistemlerinin İncelenmesi

Sosyal, ekonomik ve kültürel hayatın neredeyse tamamen elektrik enerjisine bağlı hale gelmesiyle tüketiciler, güvenli ve kaliteli enerjiyi uygun bir fiyatla kullanmayı her zamankinden daha fazla talep etmektedirler. Elektrik enerjisinin en büyük özelliği güvenilirliği olsa da, bu talebin sürekli olarak karşılanması hem teknik hem de ekonomik sebeplerden ötürü imkansızdır. Burada önemli olan nokta, elektrikteki kesinti, çökme ve istenmeyen oluşumlar gibi kaliteyi bozan etkenleri mümkün olduğu kadar azaltmaktır (Engin, 2008).

Şekil 2.1 bir tipik elektrik şebekesinin tek hat şeması ve Türkiye’de iletim ve dağıtım seviyelerinde kullanılan gerilimler açıklanmaktadır.



Şekil 2.1. Tipik elektrik şebekesinin tek hat şeması ve gerilim seviyeleri.

Uygun bir şekilde tasarlanan ve işletilen bir güç sistemi için, genel fonksiyonel gereksinimler şunlardır (Graaff, 2010):

1. Sistem ekipmanları aşırı yüklenmeden, sürekli değişen aktif ve reaktif güç talebini karşılayabilme yeteneğine sahip olmalıdır.
2. Sistem piyasa koşulları altında, minimum maliyet ve minimum ekolojik etkiye sahip enerji vermelidir.

3. Güç kaynağın kalitesi, frekans sabitliği ve gerilim sabitliği, güvenilirliği ve sürekliliğinin belirli asgari standartları karşılaması gerekir.

Şebeke için iki işletim seviyesi vardır: iletim sistemi ve dağıtım sistemi. Bu tez, dağıtım sistemleri ile ilgilidir.

Elektrik Dağıtım sistemi, kullanıcılara elektrik teslimatında en son aşamadır. Bir dağıtım sistemi şebekesi, iletim sisteminden elektriği alır ve tüketicilere sunar. Tipik olarak, dağıtım şebekesi, orta gerilim (Türkiye’de 1 kV’tan 34.5 kV’a kadar) enerji hatları, transformatörler, alçak gerilim (1000 V’tan az) dağıtım kabloları ve bazen elektrik sayaçları içermektedir.

2.1.1. Dağıtım sisteminin gereksinimleri

Tüketicilerin birçok türlü gereksinimlerini sağlamak için, elektriksel güç kaynağı için önemli zorunluluklar getirmektedir. İyi bir dağıtım sistemin gerekli şartları şunlardır:

1. Güç Talebinin Durumu: Enerji büyük miktarda tüketicilere sağlanabilmelidir.
2. Güvenilirlik: Günümüzde sanayi ve onun işletilmesi tamamen elektrik enerjisine bağımlıdır. Bu nedenle, arz güvenilirliğine her zaman ihtiyaç vardır.
3. Sabit gerilim: Bir dağıtım sistemin en önemli şartı, tüketici terminallerinde gerilim değişimlerinin mümkün oldukça az olmasıdır. Gerilim değişikliklerinin ana nedeni, sistem üzerindeki yük çeşitleridir. Bu nedenle, bir dağıtım sisteminde, eğer tüketici terminallerinde gerilim değişimleri izin verilen sınırlar içinde kalırsa iyi bir sistem olduğu söylenir.
4. Yükleme: Hatlar hiç bir zaman aşırı yüklü olmamalıdır.
5. Verimlilik: Hatların verimliliğinin maksimum olduğunu söylemek için yaklaşık %90 oranında olmalıdır.

2.1.2. Elektrik dağıtım sistemlerinin bağlantı şekilleri

Elektrik dağıtım sistemleri, elektriği iletim tesislerinden alarak gerilim dönüşümü ile tüketicilerin ihtiyaç duyduğu gerilim seviyesinde dağıtırlar. Dağıtım sistemleri;

gerilim seviyesine, yükün tipine, talebin büyüklüğüne ve önemine, bölgenin gelişimine ve arazının yapısına bağlı olarak çeşitli şekillerde oluşturulabilir. Buna göre hem alçak hem de orta gerilim dağıtım sistemlerinde yaygın olarak kullanılan şebeke tipleri dallı (radyal) şebeke ve halka (ring) şebekedir.

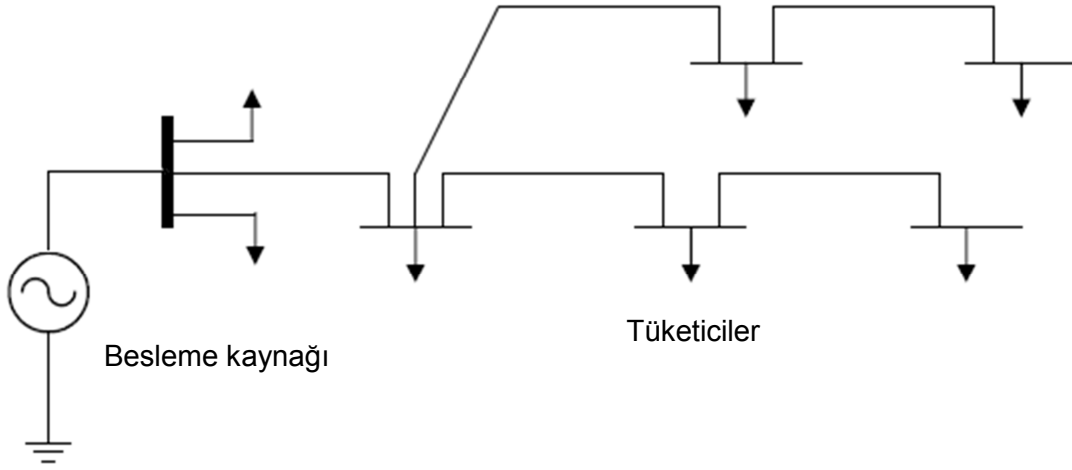
Elektrik dağıtım şirketleri için sistem planlama esasları, Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği'nde belirlenmiştir. Buna göre dağıtım şirketi; ilgili mevzuat kapsamında bölgesel talep tahminlerini hazırlar ve TEİAŞ'a sunar. TEİAŞ'ın sonuçlandığı talep tahminleri kurul onayına sunulur. Dağıtım şirketi, kurulun onayladığı talep tahminleri doğrultusunda yatırım planını hazırlar (EPDK, Dağıtım Yönetmeliği, 2003).

Dağıtım sistemi planı şu koşullar dikkate alınarak hazırlanır:

- Talep tahminleri esas alınarak talebin karşılanması,
- Teknolojik gelişmelere ve talepteki değişimlere karşı esneklik,
- Hizmetin kalitesi,
- Düşük maliyetle yüksek hizmet kalitesinin sağlanması,
- Teknik kayıp, kaçak ve bedelsiz tüketim oranları,
- İletim sistemi yatırım planı ile eşgüdümün sağlanması (EPDK Dağıtım Yönetmeliği, 2003).

Dallı şebeke

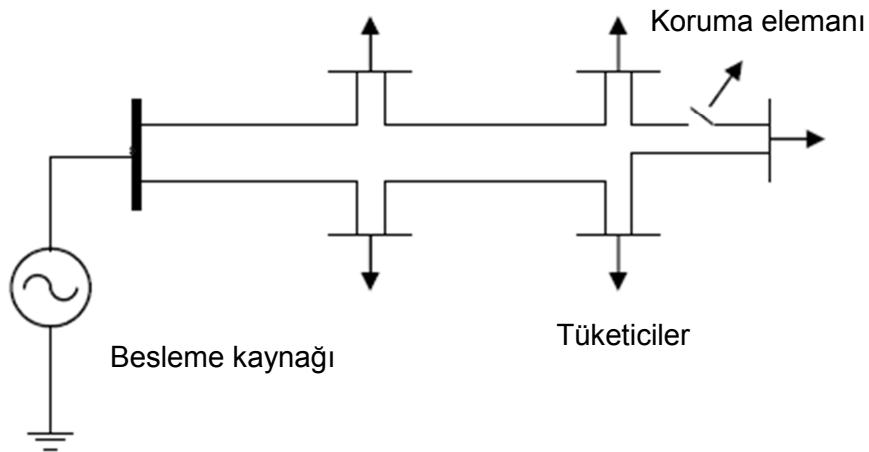
Dallı şebekelerin tesisi ve işletmesi kolay olup genellikle gelişime açık olan bölgelerde ve işletmelerde kurulurlar. Ancak bu şebekenin dezavantajı, arıza oluştuğunda o noktadan ilerideki bütün tüketicilerin de bu arızadan etkilenmesidir. Bu nedenle dallı şebekenin elektrik enerjisini sağlama konusunda yeterince güvenilir olmadığı açıktır. Bu tür şebekeden beslenen tüketicilerde enerji kalitesini sağlamak için kesintisiz güç kaynakları veya küçük jeneratörler kullanılmalıdır. Dallı şebekenin şeması şekil 2.1'de görülmektedir (Engin, 2008).



Şekil 2.2. Dallı şebekesinin tek hat şeması.

Halka şebeke

Bu şebeke tipinde tüketiciler dallı şebekedeki gibi tek kaynaktan ancak iki farklı dağıtım hattından beslenir. Burada enerji, daha güvenilir bir şekilde sağlanır. Arıza oluşması halinde en yakın baradaki koruma elemanları çalışarak ilgili hattı devre dışı bırakırlar. Bu durumda normalde kapalı olan bir anahtar açılır ve sistem, aynı kaynaktan beslenen iki bağımsız dallı şebeke gibi çalışır. Şekil 2.2’de halka şebekenin şeması görülmektedir (Engin, 2008).



Şekil 2.3. Halka (ring) şebekesinin tek hat şeması.

2.2. Elektrik Dağıtım Hatlarının Güç Kalitesine Genel Bakış

Endüstriyel ve ticari faaliyetlerin gerçekleştirilebilmesi için gerekli önemli girdilerin başında elektrik enerjisi gelmektedir. Elektrik enerjisi insanoğlu tarafından sürekli

olarak kullanılan, istenildiği gibi stoklanamayan, kullanım öncesinde kalitesi güvence altına alınamayan bir uygarlık aracıdır. Elektrik kaynağının güvenilirliğinin bilinmesi ve enerji kalitesinde meydana gelebilecek değişikliklerin uygulanmakta olan süreç veya süreçler üzerindeki etkilerinin tam olarak anlaşılması son derece önemlidir. Bu bakımdan, elektrik kalitesinin kullanım noktasında güvence altına alınması ve standart dışı elektriğin besleme sisteminden uzaklaştırılması veya tüketiciye kaliteli bir elektriğin sağlanması gerekir (David, 2001).

Bu açıklamalar ışığında “Güç kalitesi ile ne ifade edilmek istenmektedir?” sorusuna verilecek yanıt, “mükemmel bir elektrik enerjisi kaynağı her zaman kullanıma hazır, gerilim ve frekans değerleri toleranslar dahilinde, harmonikler içermeyen ve sinüs eğrisi şeklinde dalga formuna sahip elektrik üreten enerji kaynağıdır” şeklinde olacaktır. Mükemmellikten sapmanın hangi ölçüde tolere edilebileceği ise kullanıcı uygulamalarına, tesis edilen cihazların tipine ve kullanıcının kendi ihtiyaçlarına olan akış açısına bağlı olarak değişebilir.

Güç kalitesi kavramına olan ilginin artmasına dört temel neden gösterilebilir (IEC 61000-4-7, 2000).

1. Yükler eskiye oranla güç kalitesine daha duyarlıdır. Birçok yeni yük birimi mikroişlemci kontrollü güç elektroniği elemanları içermektedir. Dolayısıyla bu elemanlar besleme enerjisinde olabilecek güç kalitesi parametrelerinin bozulmasından etkilenebilirler. Aynı zamanda bu tür güç elektroniği çevirgeçlerinin bazıları da güç kalitesini bozabilmektedir.
2. Güç sistemlerinin daha verimli kullanılmasına verilen önem değişken hızlı motor sürücüler gibi uygulamaların artmasını hızlandırmıştır. Bu da güç sistemlerinde bir bozulma türü olan harmonik seviyesinin artmasına neden olmuştur.
3. Kullanıcıların güç kalitesi hakkında bilgi düzeylerinin artması üreticilerden daha kaliteli güç istemelerine neden olmuştur.
4. Elektrik şebekesine bağlı olan kullanıcıların sayısı ve çeşidi zamanla artmaktadır. Bundan dolayı bir bileşendeki bozulma diğer bileşenlere olan etkisinden ötürü önemlidir. Bu sebeplerin arkasında yatan temel neden

olarak kullanıcıların daha hızlı ve daha verimli üretim yapmayı istemeleri ve üreticilerde buna destek vermelerinin kendi yararlarına olduğunu bilmeleri olarak gösterilebilir.

Bir gerilim sinyalinin kaliteli olarak nitelendirebilmek için sinyalin güç kalitesi parametrelerinin ulusal veya uluslararası standartlara olan uygunluğuna bakılır. Bu standartlarda belirlenen isterlere uyuyorsa o gerilim sinyali için kaliteli denir. Bu standartlarda gerilim bozulmaları, gerilimin etkin değerinin değişimi, kırpışma, ani değişimler, harmonik bozulmalar ve gerilim dengesizliği olmak üzere beş ana gruba ayrılır (Yörür, 2008).

2.2.1. Güç sistemi frekansı

Gerilimin frekans değeri değişimleri, sistemin temel frekansının nominal frekansından (50 Hz) sapması olarak tanımlanır. Güç sisteminin frekansı besleme sistemindeki senkron jeneratörlerin dönme hızları ile orantılıdır. Yük ve üretim arasındaki dinamik dengeden dolayı frekansta değişimler olur.

Frekans değişimlerinin miktarı ve süresi yük karakterine ve jeneratör kontrol sistemlerinin yük değişimine verdiği cevaba göre değişir. İzin verilen sınırların dışına taşan frekans değişimlerine, şebeke grubundaki hatalar, büyük, güçlü yük bloklarının devre dışı kalmaları veya önemli miktarda güç üreten jeneratörlerin devre dışı kalmalarına neden olabilir. İdeal durumda bir şebeke hattının güç frekansının 50 Hz olması beklenir, ama yukarıda bahsedilen sebeplerden dolayı aktif olarak kullanılan şebeke geriliminin frekansı değişebilmektedir. Fakat bu değişimlerin belirlenen standartlara uygun olması gerekir, aksi takdirde o şebeke gerilimi için güç kalitesinin iyi olduğu söylenemez (Yörür, 2008).

IEC 61000-4-30 standardında belirtilen değerlere göre şebeke geriliminin frekansı maksimum her 10 saniyede bir ölçülmesi gerekir ve şebeke frekansında olabilecek maksimum sapma miktarı $\Delta f = \pm 50 \text{ mHz}$ ile sınırlandırılmıştır (IEC 61000-4-30, 2001).

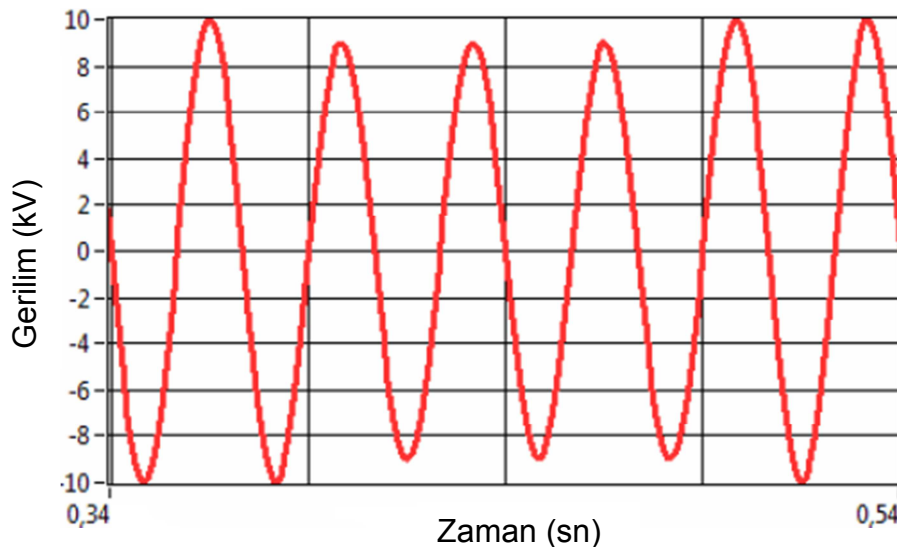
2.2.2. Gerilim etkin değeri değişimleri

Gerilimin genlik değerinin değişimleri iki kısma ayrılarak incelenebilir. Bunlar kısa süreli gerilim değişimleri ve uzun süreli gerilim değişimleridir. Kısa süreli gerilim

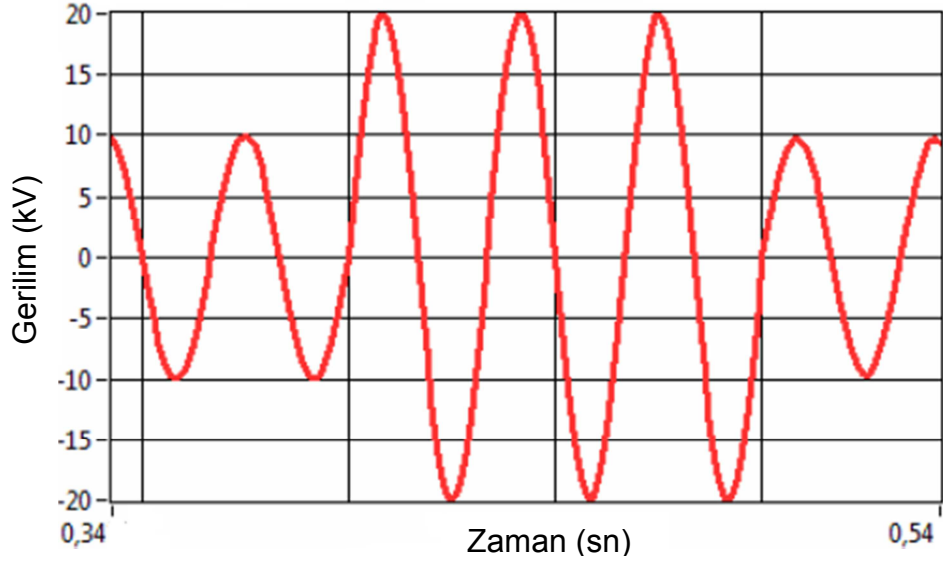
değişimleri güç sistemlerindeki hatalar, yol verme akımları yüksek olan yüklerin devreye alınması ve dağıtım sistemindeki bağlantı kopuklukları gibi sebeplerden dolayı olabilir. Sistemin durumuna ve hatanın yerine göre bu tür durumlar sadece gerilim düşmesine değil gerilim yükselmesine ve gerilim kesilmesine de neden olabilirler. Gerilim çukuru, bir elektrik güç sisteminde meydana gelen anlık düşüş olup, IEC 61000-4-30 standardına göre birkaç çevrim ile birkaç saniye arasında kısa bir süre sonra gerilimin düzelmesiyle sonuçlanır. Gerilim çukuru her yarım çevrimde bir çevrim üzerinden etkin değeri hesaplanarak karakterize edilir ve her bir periyot bir öncekini yarım periyodu aşar (Yörür, 2008).

Gerilim Tepesi, gerilimin birkaç çevrim içerisindeki bir sürede gerilimin referans etkin değerinden %10'dan daha büyük bir artış olması durumudur. Gerilim tepesi gerilim çukuru olduğu gibi sistem hatası ile ilişkilidir. Gerilim tepesi tek faz - toprak kısa devresi sırasında hatasız olan fazda rastlanır. Gerilim tepesi büyük yüklerin anahtarlamasında veya büyük kapasitörlerin devreye alınmasında oluşabilir. Gerilim çukur ve tepelerin örnek grafikleri "Yörür (2008)'e göre" Şekil 2.4 ve Şekil 2.5'deki gibi verilmiştir.

Uzun süreli gerilim değişimleri 1 dakikadan uzun süren etkin değer değişimlerini ifade eder. Uzun süreli gerilim değişikliklerinde aşırı gerilim, düşük gerilim ve kalıcı gerilim kesintisi olabilir. Aşırı gerilim ve düşük gerilime sistem hataları değil sistemdeki yük değişiklikleri ile anahtarlamalar neden olur. Bu tür değişiklikler genelde etkin değer-zaman grafiklerinde gösterilir (TS EN 61000-4-15, 2004).



Şekil 2.4. Gerilim çukuru



Şekil 2.5. Gerilim Tepesi

2.2.3. Harmonikler ve ara harmonikler

Harmonikler genel olarak doğrusal olmayan elemanlar ile sinüs biçimli olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin de sistemde bulunmasından meydana gelirler. Harmonikli akım ve gerilimin güç sistemlerinde bulunması, sinüs biçimli dalganın bozulması anlamına gelir. Bozulan dalgalar saf sinüs içermeyen dalgalar olarak adlandırılır. Bu dalgalar, Fourier analizi yardımıyla temel frekans ve diğer frekanslardaki bileşenler cinsinden ifade edilebilir. Bu analiz ile harmonik içeren dalgalar, frekansları farklı sinüs biçimli dalgaların toplamı şeklinde matematiksel olarak yazılabilir. Bu sayede harmoniklerin analizi kolaylıkla yapılabilir.

Harmonikler, şebeke frekansının tam sayı katları olan frekansa sahip gerilimler ve akımlardır. Ara harmonikler, şebeke frekansının integral olmayan katlarında frekansa sahip gerilimler ve akımlardır. Çizelge 2.1'de harmonik ve ara harmonik bileşenleri ayırt etmek için kullanılan notasyonlar gösterilmektedir (David, 2001).

Normalde ise elektrik enerjisinin üretilmesi ve dağıtımı sırasında, akım ve gerilimin 50 Hz frekansta salınan ve sinüs eğrisine çok benzer bir biçimde olması istenmektedir. Yukarıda anlatılan nedenlerle oluşan harmonik frekanslı akımların sistemde dolaşması, harmonik frekanslı gerilimlerin meydana gelmesine sebep olur. Böylece gerilimin dalga biçimi de saf sinüs biçimli olmaktan çıkar.

Çizelge 2.1. Dalga Şekilleri (Frekansların) Spektral Bileşenleri.

Harmonik	$f = nf_1$, n sıfırdan büyük bir tamsayıdır
DA bileşeni	$f = nf_1$, n=0 için
Ara harmonik	$f \neq nf_1$, n sıfırdan büyük bir tam sayıdır
Harmonik-altı	$f > 0$ Hz ve $f < f_1$
f_1 temel gerilim frekansı	

Günümüzde endüstriyel alanda kullanılan doğrultucular ve diğer çevirgeçler, frekans dönüştürücüler ve bunların kullanıldığı motor sürücüler başlıca harmonik üreten kaynaklardır. Ayrıca sanayide kullanılan yumuşak yol vericiler, ark ocakları, enerji tasarrufu sağlamak amacıyla kullanılan aygıt ve yöntemler, akü şarj devreleri de akım ve gerilim harmonikleri üreten diğer kaynaklardır. Harmoniklerin sistemlere birçok zararları vardır. Harmonikler elektromekanik cihazlarda ve kablolarda aşırı ısınmaya yol açabilirler. Etrafta kuvvetli elektromanyetik alan oluşturarak makinalarda mekanik titreşimlere, tetikleme devrelerinin anormal çalışmasına, elektronik kart arızalarına yol açabilirler. Ayrıca koruma sistemlerinde hatalı çalışmalar, kesici ve şalterlerde atmalar, röle sinyallerinin bozulması ve enerji kayıpları gibi zararlara da yol açabilirler. Bu bakımdan bir şebekede gerilim ve akım sinyallerinin harmoniklerinin iyi izlenmesi gerekmektedir. Sürekli takip altına alınan elektrik sinyalinin harmoniklerinde oluşabilecek herhangi bir sapmada sistem önceden kapatılarak yukarıda bahsedilen zararlar önlenabilir. Harmonik frekanslar, şebeke frekansının tam sayı katları şeklindedir (Yörür, 2008).

Ara harmonikler ise şebeke frekansının tam katları şeklinde olmayan frekans bileşenleri içeren sinyalleridir. Ara harmonik sıralaması (derecesi), harmonik sıralamasına benzer şekilde, ara harmonik frekansın şebeke frekansına oranı olarak belirlenmektedir.

IEC 61000-4-7 genel olarak 50 Hz ve 60 Hz'deki güç besleme sistemlerinin temel bileşenlerinin üzerine bindirilen, 9 kHz'e kadar olan frekans aralığındaki spektral

bileşenlerin ölçülmesi ve test edilmesi için tasarlanmış bir standarttır (IEC 61000-4-30, 2001).

Standarda göre herhangi bir sinyalin spektral bileşenlerinin analizini yapmak için yaygın olarak kullanılan harmonik terimleri vardır. Ayrıca periyodik bir dalganın ideal bir sinüs dalgasından sapmasının ölçümü birkaç bozulma faktörleriyle tarif edilir. Bu terimler aşağıda detaylı bir şekilde anlatılmıştır.

Gerilim veya akım sinyallerinin Fourier analizi sonucu her bir spektral bileşenin etkin değeri eşitlik (2.1)'i kullanarak hesaplanabilir.

$$G_n = \frac{C_n}{\sqrt{2}} \quad (2.1)$$

Yukarıdaki eşitlikte C_n n. harmonik bileşenin genliğini, G_n ise her bileşenin etkin değerini ifade etmektedir.

Harmonik grup ise, her bir harmonik bileşen ve her iki yanında bulunan beş tane harmonik bileşeni içeren bir gruptur. Harmonik grubun görünümü Şekil 2.4'te gösterilmiştir. Bir harmonik grubun etkin değeri ise eşitlik (2.2)'de belirtilen eşitlik ile hesaplanabilir.

$$G_{g,n}^2 = \frac{C_{k-5}^2}{2} + \sum_{i=-4}^4 C_{k+1}^2 + \frac{C_{k+5}^2}{2} \quad (2.2)$$

Yukarıdaki eşitlikte C_k , k. harmonik bileşenin etkin değerini, $G_{g,n}$ ise n. Harmonik grubun etkin değerini göstermektedir.

Harmonik alt grup ise Şekil 2.4'te gösterildiği gibi her bir harmonik bileşeni ve yanlarında bulunan iki tane daha spektral bileşeni içerir. Harmonik alt grubun etkin değeri de eşitlik (2.3.)'te verildiği şekilde hesaplanabilir.

$$G_{ag,n}^2 = \sum_{i=-1}^1 C_{k+i}^2 \quad (2.3)$$

Yukarıdaki eşitlikte C_k , k. harmonik bileşenin etkin değerini, $G_{ag,n}$ ise n. harmonik alt grubun etkin değerini göstermektedir.

Toplam Harmonik Bozulma (THB), belirlenen bir dereceye kadar olan tüm harmonik bileşenlerin, G_n , toplamının etkin değerinin, temel bileşenin etkin değerine (G_1) oranı olarak tanımlanır. Matematiksel olarak eşitlik (2.4.)’de ifade edilmiştir.

$$THB = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_n}{G_1}\right)^2} \quad (2.4)$$

Yukarıdaki eşitlikte G_n harmonik bileşenlerin etkin değerini, G_1 ise temel bileşenin etkin değerini göstermektedir.

Grup Toplam Harmonik Bozulma (GTHB), harmonik grupların etkin değerlerinin, temel bileşenle ilgili grubun etkin değerine oranıdır. Harmonik grup ise standartta, bir harmoniğin ve bu harmoniğin yanındaki spektral bileşenlerin etkin değerlerinin karelerinin toplamının karekökü olarak tanımlanmıştır. Grup Toplam Harmonik Bozulma eşitlik (2.5)’te verildiği şekilde hesaplanır.

$$GTHB = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_{gn}}{G_{g1}}\right)^2} \quad (2.5)$$

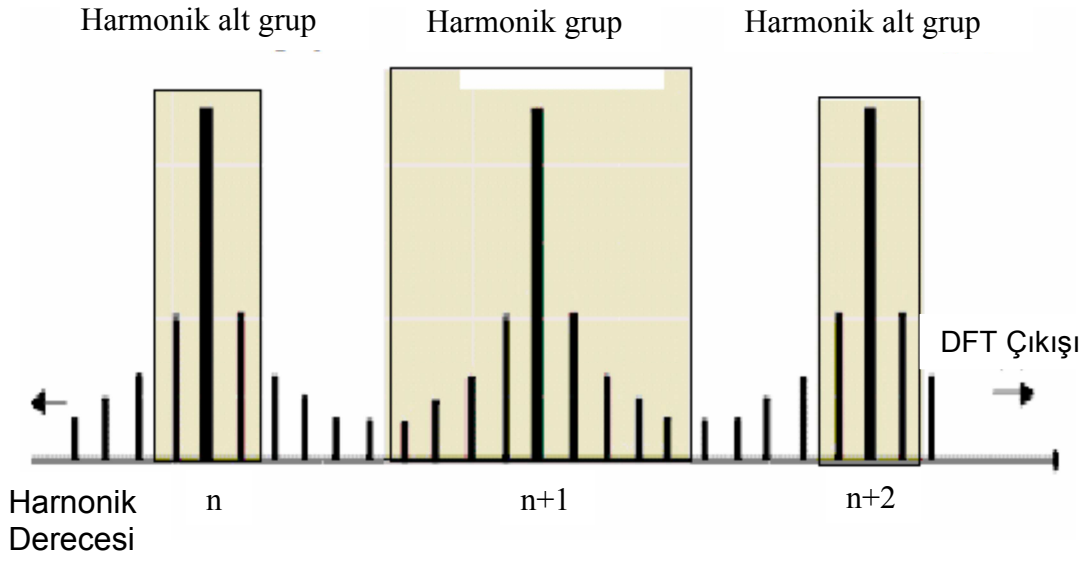
Yukarıdaki eşitlikte G_{g1} temel bileşen grubun etkin değeri, G_{gn} n. harmonik grubun etkin değeri, H ise en büyük harmonik derecesini göstermektedir.

Alt Grup Harmonik Bozulma (AGTHB) , harmonik alt grupların etkin değerinin, temel bileşenle ilgili alt grubun etkin değerine oranıdır. Harmonik alt grup ise standartta, bir harmoniğin ve en yakınındaki iki spektral bileşenin etkin değerlerinin kareleri toplamının karekökü olarak tanımlanmıştır. Alt Grup Toplam Harmonik Bozulma eşitlik (2.6.)’da belirtilen eşitlik ile hesaplanır.

$$AGTHB = \sqrt{\sum_{n=2}^H \left(\frac{G_{agn}}{G_{ag1}}\right)^2} \quad (2.6)$$

Yukarıdaki eşitlikte G_{ag1} temel harmonik alt grubun etkin değerini, G_{agn} ise n. Harmonik alt grubun etkin değerini göstermektedir.

Şekil 2.6'da yukarıdaki eşitliklerde tanımlanan harmonik gruplar ve harmonik alt grupların spektrumları 5 Hz aralıklarla gösterilmiştir (Yörür, 2008).



Şekil 2.6. Harmoniklerin spektrumunda harmonik grup ve alt grupların gösterimi.

Zamanla değişen sinyaller enerjilerini belirli frekanslarda taşırlar. Fourier analizi, ele alınan sinyalin frekans davranışını irdeler. Frekans analizinde temel bağıntı $\text{Zaman} \times \text{Bant Geniřlięi} = \text{Sabit}$ şeklindedir (Yörür, 2008).

Kesiksiz Fourier dönüşümünün matematiksel eşitliği, eşitlik (2.7.)'de gösterilmiştir.

$$C(\omega) = \frac{1}{\sqrt{2\pi}} \int_{-\infty}^{\infty} s(t) e^{-j\omega t} dt \quad (2.7)$$

Yukarıdaki eşitlikte, $s(t)$ haberi taşıyan sinyali, $\omega = 2\pi f$ açısal frekansı, $C(\omega)$ ise sinyalin Fourier dönüşümünü gösterir. Sinyal kesikli bir sinyal ise Fourier dönüşümü Kesikli Fourier Dönüşümü (DFT) olarak tanımlanır. Kesikli Fourier Dönüşümü'nün matematiksel olarak tanımı ise eşitlik (2.8)'de gösterilmiştir.

$$C[k] = \sum_{n=0}^{N-1} s[n] e^{-j\pi kn/N} \quad (2.8)$$

Eşitlik (2.8)'de, N kesikli sinyalin boyutunu, $s[n]$ kesikli sinyali, $C[k]$ ise sinyalin kesikli Fourier dönüşümünü göstermektedir.

Matematiksel olarak tanımlanan ve frekans analizinde kullanılan Fourier dönüşümler incelendiğinde sinüs biçimli olmayan periyodik dalgaların; genlik ve frekansları farklı birçok sinüzoidal dalgaların toplamından oluştuğunu, başka bir deyişle; sinüs biçimli olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları değişik (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüs biçimli dalgalara ayrılabilceğini göstermiştir (EPDK, 2004).

2.2.4. Gerilim kırpışması

Bir güç kalitesi sorunu olan kırpışma, diğer güç kalitesi sorunlarından frekans, genlik gibi özellikleri ile ayrılabilir. Ancak kırpışmayı ilginç kılan insan ile ilişkisidir. Bir enerji sisteminde kırpışmanın var olması durumunda o enerji sistemine bağlı aydınlatma aygıtlarının kullanıldığı ortamlarda bulunan insanlar etkilenir. Bu etkilenme kırpışmanın dozuna göre yalnız hissetme düzeyinde olabileceği gibi rahatsız olma düzeyine de çıkabilir (Tanrıöver ve İnce, 2005).

Kırpışmanın insan üzerindeki etkisi birçok parametreye bağlıdır. Kırpışmanın insan üzerindeki etkisi kırpışmadan etkilenen insanlara, bu insanların bulundukları ortama veya yaptıkları işlere göre değişir. Örneğin sürekli gözle kontrole dayana bir işi yapan insanın kırpışmadan etkilenme miktarı beden gücüne dayanan bir işi yapan insanın etkilenme miktarından fazladır.

Elektriğin dağıtılmasında, iletiminde ve üretiminde ve şebeke ile yük etkileşmesinde gerilimin zarfında sistematik dalgalanmalar meydana gelebilmektedir. Bu dalgalanmalara kırpışma denir. Büyük motor sürücülerde aşırı yükleme durumunda şebekeden dalgalı bir akım çekilir. Bu da gerilimde düşük frekanslı genlik değişimlerine sebep olur (Tanrıöver ve İnce, 2005). Özellikle darbeli yük çeken ark ocakları, pota ocakları gibi yüklerin kırpışmaya neden olduğu bilinmektedir (IEC 61000-4-7, 2001).

2.3. Elektriksel Güç ve Gerilim Kalitesinin İyileştirilmesi

Bir elektrik enerji dağıtım sistemi, bara gerilimleri belirli sınırlar içerisinde kalacak şekilde enerjinin güvenli ve kaliteli bir şekilde dağıtımını sağlamalıdır. Sanayileşmeyle birlikte giderek artan elektrik enerjisi ihtiyacı, elektrik enerjisi

dağıtım sistemlerinde kabul edilebilir gerilim profili oluşturmayı zorlaştırmaktadır (Bağrıyanık, 1997).

Gerilim kararsızlığının birincil nedeni, normal olmayan sistem çalışmaları veya kontrolör davranışları altında, yük taleplerini karşılamaya çalışan belirli sistem baralarına yeterli reaktif gücün verilememişidir.

Tezin bu bölümünde gerilimin kontrolü ve gerilim kararsızlığına neden olan reaktif güç kontrolü üzerinde durularak gerilim kararlılığının iyileştirilmesi yönünde kullanılan metodlar ve yöntemler tanıtılacaktır. Öncelikle gerilim düzenleyici transformatörler tüketici baralarındaki gerilimin ayarlanması ile aktif ve reaktif güç akışı kontrolünün gerçekleştirilmesinin teorisi verilmiştir. Bu bölümün son kısmında ise son yıllarda güç elektroniği endüstrisinde meydana gelen değişimler neticesinde dağıtım hatlarının kompanzasyonun da oldukça yaygın olarak kullanılan FACTS cihazlarının tanıtımı yapılacaktır.

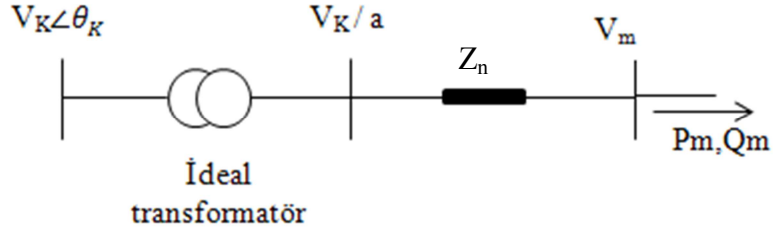
2.3.1. Gerilim ve Aktif Gücün Kontrolü

Güç sistemlerinde reaktif güç ve gerilimin kontrolü gerilim kararlılığı çalışmalarında çok önemli bir konudur. Gerilim kontrolünün hedefi iletim ve dağıtım hatlarında meydana gelen çeşitli yük değişimlerini kompanze etmek için tüketici barasındaki gerilimin belirli sınırlar içerisinde muhafaza edilmesidir.

Güç sistemlerinde gerilim düzenleyici transformatörleri kullanılarak aktif ve reaktif güç akışı kontrolü sağlanmaktadır. Gerilim düzenleyici transformatörler içerisinde kademe değiştirici transformatörler kademe ayarını değiştirerek bara gerilimini istenilen değerde tutabilir. Ayrıca, reaktif güç akışını düzenlemek için hat sonundaki gerilimin faz açısını ayarlamak suretiyle aktif güç akışını düzenleyen faz kaydırıcı transformatörlerde geniş bir uygulama alanına sahiptirler (Abacı, 2007).

2.3.1.1. Kademe değiştirici transformatörler (KDT)

KDT'ler önemli gerilim düzenleyici araçlardır ve otomatik olarak dönüştürme oranları vasıtasıyla yük barasındaki gerilimi istenilen değerlerde tutmaya yararlar. KDT'ler orta süreli gerilim kararsızlığı probleminde önemli bir etkiye sahiptir. Şekil 2.7'de kademe değiştiricinin tek hat eşdeğer devresi çizilmiştir (Abacı, 2007).



Şekil 2.7. Bir kademe dönüştürücünün eşdeğer devresi

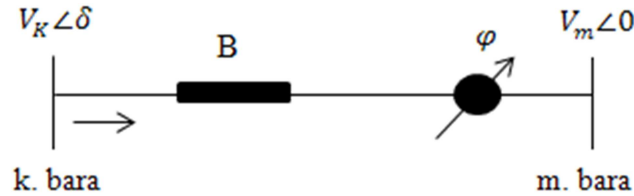
KDT ile bara 1 ve bara 2 arasındaki aktif ve reaktif güç akışı, eşitlik (2.9) ve (2.10)'dan elde edilir. Bu eşitliklerde Z_n , KDT'nin empedansı, α ise açısı ve n sargıların birim başına oranıdır (Prada et al., 2003).

$$P_{mK} = \frac{V_m^2}{Z_n} \cos \alpha t - \frac{V_m V_K}{n Z_n} \cos(\theta_m - \theta_K + \alpha n) \quad (2.9)$$

$$Q_{mK} = \frac{V_m^2}{Z_n} \sin \alpha t - \frac{V_m V_K}{n Z_n} \sin(\theta_m - \theta_K + \alpha n) \quad (2.10)$$

2.3.1.2. Faz kaydırıcı transformatörler (FKT)

Bu cihazın temel fonksiyonu, faz açısını değiştirerek bir iletim ya da dağıtım hattı üzerindeki güç akışını kontrol etmektir. Bu faz kaydırma işlemi, hattın faz gerilimine bir değiştirilebilir gerilim bileşeni ilave edilerek veya çıkarılarak yapılır. Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğeri Şekil 2.8'de gösterilmiştir. Burada φ faz kaydırıcı transformatörün açısı, B ise seri transformatörün sanal geçiricisidir (Abacı, 2007).



Şekil 2.8. Faz kaydırıcı transformatörün elektriksel eşdeğer devresi

İletim ve dağıtım hattı üzerinden taşınan aktif ve reaktif güç, eşitlikler (2.11) ve (2.12) ile hesaplanır.

$$P = \frac{|V_K||V_m|}{X_L} \sin \delta \quad (2.11)$$

$$Q = \frac{|V_K||V_m|}{X_L} \left(\cos \delta - \frac{|V_m|}{|V_K|} \right) \quad (2.12)$$

Bu eşitliklerde X_L hat empedansını, V_K ve V_m k. ve m. Baranın gerilim fazörlerinin ifade etmektedirler. FKT ilave edilerek aktif güç akışı eşitlik (2.13) ile hesaplanır. Bu eşitlikte X_{FKT} , FKT'nin empedansdır.

$$P = \frac{|V_K||V_m|}{X_L + X_{FKT}} \sin(\delta + \varphi) \quad (2.13)$$

2.3.2. Yük Kompanzasyonu

2.3.2.1. Kompanzasyonun amacı

Elektrik dağıtım sistemlerinde aktif güçle birlikte sistemin ihtiyacının karşılanması için reaktif güç akışı da olmaktadır. Aktif gücün santrallerde üretilip tüketicilere kadar iletilmesi zorunlu olsa da reaktif güç için böyle bir zorunluluk yoktur. Reaktif güç, ihtiyaç duyulan noktalarda çeşitli yardımcı sistemlerle üretilir. Böylece elektrik dağıtım sisteminin çalışması için ideal koşullar (gerilim ve akımın faz açısı sıfır) yaratılmış olur (Güler, 1995).

Tüketicilerin normal olarak şebekeden çektikleri endüktif reaktif gücün kapasitif güç vermek suretiyle özel bir reaktif güç üreticisi tarafından dengelenmesine reaktif güç kompanzasyonu denir. Reaktif güç kompanzasyonu ile tüketicinin güç faktörü düzeltilir. Ayrıca tüketicilerin reaktif güç için ceza ödemesi de önlenmiş olur.

Şebekeden çekilen reaktif akımın, tüketici tarafına kurulacak olan reaktif yük dengeleyicileri vasıtası ile şebekeden çekilmesi engellenmekte, bu sayede hem şebeke açısından hem de tüketici açısından oldukça fayda elde edilmektedir.

Dağıtım şebekesine bağlı kompanze edilmemiş bir yükte meydana gelen ani reaktif güç değişimleri şebekedeki gerilimin değişmesine yol açar. Gerilimdeki bu dalgalanma aynı noktaya bağlı olan diğer tüketiciler kadar arızaya sebep olan asıl

tüketiciyi de olumsuz etkiler. Kompanzasyonun bir amacı da bu gerilim değişimlerini en aza indirmektir (Engin, 2008).

İdeal bir AA güç sisteminin her noktasında gerilim ve frekans sabit, gerilim harmoniklerden arınmış, güç faktörü ise birdir. Özellikle bu parametreler, tüketicinin yükünün karakteristiğinden ve büyüklüğünden bağımsız olmalıdır (Miller, 1982).

2.3.2.2. Kompanzasyon yöntemleri

Alternatif akımlı enerji sistemlerinde reaktif güç kompanzasyonunun önemi bilinmektedir. Bu yüzden güç faktörünü ($\cos \phi$) düzeltmek için çeşitli yöntemler geliştirilmiştir.

Kompanzasyon sistemlerinde yükün özellikleri oldukça önemlidir. Güç ve güç katsayısı yaklaşık olarak sabit olan bir yükün varlığı halinde uygun olarak seçilmiş bir kondansatör grubu sorunu çözebilir. Fakat yük her an sistemden farklı aktif ve reaktif güç çekebiliyor ise yukarıda önerilen yaklaşım burada geçerli olmaz.

Böyle bir problemin beş farklı çözüm yolu vardır:

1. Besleme sisteminin kısa devre gücünü artırıp sabit kondansatörler kullanmak
2. Mekanik olarak anahtarlanan şönt kondansatör grupları kullanmak.
3. Senkron makinaları kapasitif bölgede çalıştırmak yada ayrıca senkron kondenser kullanmak
4. Tristörlü statik kompanzasyon sistemleri kullanmak.
5. Statik senkron kapasitörler kullanmak

Gerek ark fırınlarında, gerekse fazlarından farklı aktif ve reaktif güç çeken dengesiz yüklerde ve gerekse güç faktörünün anlık değişim gösterdiği tüketiciler, besleme sistemine etki ederek gerilim dalgalanmasına yol açarlar. İstenmeyen bu gerilim dalgalanmasını en aza indirmenin yolu; besleme sistemine değişken reaktif güç sağlayarak güç katsayısını sabit tutmaktan geçer.

Söz konusu olan ve endüstride birçok uygulamada ortaya çıkan sorun, üç fazlı şebekenin dinamik olarak reaktif yüklenmesidir. Fazların dengesiz olması ise her faz için ayrı ayrı kompanzasyon yapılmasına neden olacaktır.

Tristör veya GTO gibi güç elektroniği elemanlarının hızlı çalışması ve hızlı gelişimi neticesinde günümüzde dinamik reaktif güç kompanzasyonu pek kullanılmamaktadır. Ayrıca güç faktörünün 1'e yaklaşması ve hızlı değişen yüklerde bu değerde sabit tutulması dinamik sistemlerde yeterince hızlı gerçekleştirilememektedir. Statik reaktif güç kompanzasyonu bu yönü ile de bir adım daha öne geçmektedir (Aydoğan ve Olgun, 2007).

2.3.2.3. Pasif elemanlar ile reaktif gücün kontrolü

Bilindiği üzere, elektrik enerjisi dağıtım sistemlerinde enerji dağıtımının etkin bir şekilde gerçekleştirilmesi için seri ve şönt kompanzasyon uygulanır. Dağıtım şebekelerinde şönt ve seri pasif elemanlar olarak seri kapasitör veya şönt kompanzatörler bazı amaçlar için kullanılırlar. Genellikle gerilimi nominal değere yakın tutmak, hat akımını azaltarak şebeke kayıplarını azaltmak ve böylece kararlılığa katkıda bulunmak bu amaçlardan bazılarıdır. Çoğu kompanzasyon, kapasitörler tarafından sağlanır ve endüktif yükü dengeler. Bir nevi reaktif gücü absorbe eder.

Bunun yanında seri kapasitörler, dağıtım sistemi davranışının kontrolüne olanak verir. Seri kapasitörler, dağıtım uygulamalarının esas sorunu olan, dağıtım hattının toplam reaktansının değerini düşürürler. Bu da sistem kararlılığını geliştirir ve dağıtım hattı boyunca gerilim düşümünün kontrolüne yardım eder (Abacı, 2007).

Şönt elemanlar

Genellikle uzak mesafelere reaktif güç taşınmadığı için tüketim bölgelerine yakın yerlerde kompanzasyon yapılmalıdır. Bunu başarmanın en basit ve en ucuz yolu bir şönt kompanzasyon sayesinde sağlanabilir. Burada bir kapasitör ve/veya bir indüktör ya direkt olarak baraya ya da bir transformatörün tersiyer sargısına bağlanabilir (Machowski, 1997). Şönt kapasitör bankları hatlara bağlanmaktan ziyade sürekli olarak baralarda bulunurlar. Dağıtım sistemlerinde şönt

kompanzasyon yapımının birinci amacı yakın yük bölgelerinde gerilimin kontrolü ve yük geriliminin kararlılığının sağlanması içindir (Taylor, 1994).

Şönt elemanlar dağıtım hattı boyunca gerilim düşümünü ve kayıpları minimize etmek içinde kullanılır. (Abacı, 2007).

Seri elemanlar

Seri kompanzasyon tam olarak, uzak mesafelere taşınan gücün iletilmesini sağlayan dağıtım hattının empedansını azaltmak için yapılır. Gerilimin azalmasını sınırlamak, aktif ve reaktif güç kayıplarını azaltmak amacıyla gerilim kararlılığını geliştirmek yönünde etkisi vardır. Seri kapasitörler kullanılarak yapılan kompanzasyonla uzun dağıtım hatlarının birleştirilmesi ve geçici hal kararlılığının iyileştirilmesi sağlanmaktadır. Ancak, günümüzde kısa hatlarda da kullanılmakta ayrıca gerilim kararlılığını iyileştirmektedir. Mekanik anahtarlama şönt ve seri elemanlar güç sistemlerinde meydana gelen değişimlere hızlı ve etkili bir biçimde cevap verememektedirler. Yük barasına yeterli reaktif gücün verilemeyeşi, gerilim çökmesinin birincil nedeni olduğundan hızlı ve tam olarak yapılacak bir reaktif güç kompanzasyonu sistemi gerilim çökmesi olayından uzaklaştıracaktır. Son yıllarda dağıtım hatların kompanzasyonu güç elektroniği endüstrisinde meydana gelen değişimler neticesinde oldukça ileri boyutlara varmıştır. Bunun neticesinde FACTS adı verilen cihazlar geliştirilmiş ve halen de bu konuda yoğun bir çalışmalar mevcuttur (Abacı, 2007).

2.3.3. Esnek alternatif akım iletim sistemleri (FACTS)

FACTS teknolojisi yeni bir kavram olmasına rağmen EPRI (Elektriksel Güç Araştırma Enstitüsü)' nin 1980'lerde gerçekleştirdiği çalışmalarla tamamlanmış bir felsefe haline gelmiştir. FACTS teknolojisi yüksek gerilim ve yüksek akım güç elektroniği alanında büyük bir buluş gibi görülmektedir. Bu teknolojinin amacı, iletimde ve durgun zamanlar arasında şebekenin yüksek gerilim kısmında güç akışı kontrolünü artırmaktadır. Şebekenin elektroniğe dayalı olarak kontrol edilmesine başlanmasıyla beraber güç üretimini sağlayan kısımların tasarımı, yapımı iletim ve dağıtımdaki elemanlarda değişimler görülmektedir. Bu değişimlerin etkisiyle beraber, enerjinin iletilmesinde enerji akışının yüksek hızlarda kontrol edilebilmesi mümkün hale gelmiştir. Birçok ekonomik ve teknik

faydadan dolayı FACTS teknolojisi dünya genelindeki araştırma kurumlarınca ve enerjide kullanılan eleman üreticileri tarafından umut verici olarak kabul edilmektedir.

FACTS teknolojisi, kontrol elemanlarının sistem üzerindeki temel etkilerini belirlemek üzere yapılan geliştirme çalışmalarıyla beraber çok çabuk kabul görmüştür. Bununla birlikte sistemlerin işletilmesi, planlanması için birçok sistem araçlarının yenilenmesi gerekli hale gelmiştir. Bu araçlardan bazıları araştırmalar sonucunda daha iyi veya daha küçük boyutlara indirgenerek modellemede yüksek başarılarla ulaşılması sağlanmıştır (Tozar, 2001). Elektrik güç sistemlerde gerilim kontrolü için tasarlanan ve uygulanan FACTS cihazların genel fonksiyonları ve işlemleri aşağıda açıklanmıştır.

2.3.3.1. Statik VAr Kompanzatörü (SVK)

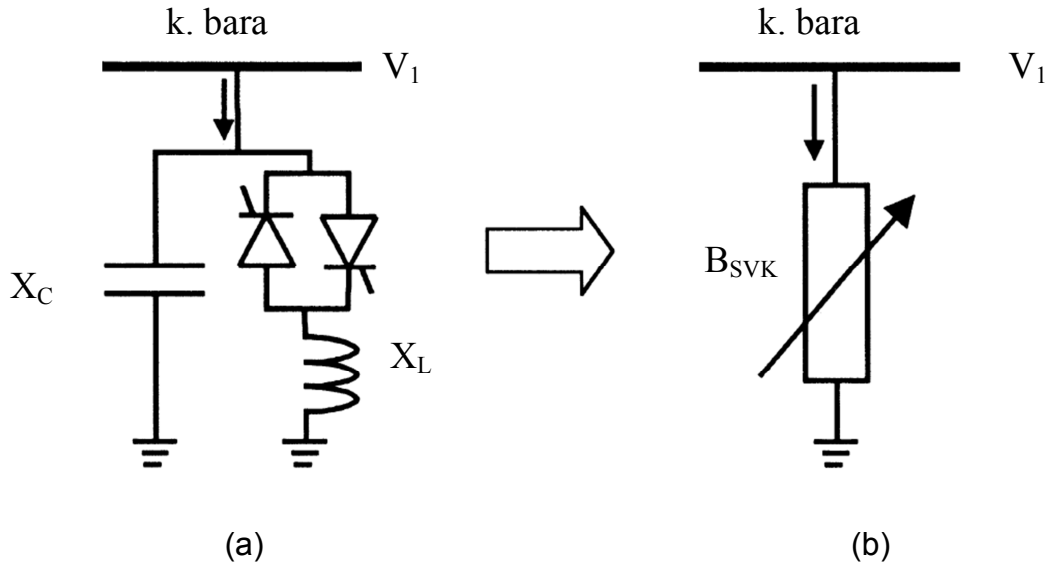
Statik VAr kompanzatör, elektriksel güç sisteminin (hat gerilimi gibi) parametrelerini kontrol edecek şekilde ayarlanabilir kapasitif veya endüktif akım çıkışlı, paralel bağlı statik VAr jeneratörü veya tüketicisidir. SVK, gerilim kontrol çevrimlerinde, güç sistemi dalgalanmalarını etkili bir şekilde söndürebilir ve güç sistemlerinin kararlılığını geliştirebilir. İdeal bir SVK aktif ve reaktif güç kaybı olmayan, gerilimi referans gerilime eşit değişmeyen ve çok hızlı cevap verebilen bir kontrolör olarak tanımlanmaktadır (Akgün, 2006). Son yıllarda, birçok araştırmacı, güç sistemlerindeki elektromekanik dalgalanmaların söndürülmesi için, SVK ile kararlılığın geliştirilmesi tekniğini önermektedir. SVK yapısı, TKR ve sabit kondansatör ve/veya ilave TAK'ların birleşiminden oluşmaktadır.

Özellikle hızlı değişen yüklerin bulunduğu ark ocağı, haddehaneler gibi tesislerde SVK sistemleri günümüzde oldukça yaygın bir biçimde kullanılmaktadır (Mutluer, 2008). SVK kullanımı, (kısa devre, yükün devre dışı kalması, hattın devreye alınması ve benzeri geçici durumlarda) iletim ve dağıtım hattının geçici durum kararlılığını iyileştirir (Kıyan, 2011).

Öte yandan SVK sistemleri rüzgar santrallerinde de kullanılır. Rüzgar santralinde kullanılan SVK sistemleri gerilim kararlılığını iyileştirmekle beraber, iletim ve dağıtım hatlarından kaynaklanan gerilim düşmelerinde de rüzgar santralının devre dışı kalmasını önler (Rodríguez et al., 2004).

SVK sistemleri, değişken yüklenme, düşük yüklenme, hattın devreye alınması gibi çalışma şartlarında gerilim düzenlemesini sağlar. SVK sistemlerinin özellikle ark ocağı gibi kırpışma üreten yerlerde kırpışma oluşumunu etkin bir biçimde önlediği tespit edilmiştir (Donsion and Oliveira, 2007).

SVK sistemleri dengesiz yüklerin kompanzasyonunda da etkin bir sonuç verir. Bu sistemler, statik anahtarlama yöntemi dolayısı ile yüksek bir emniyete sahiptir. Ayrıca, yeni nesil evirgeç tabanlı sistemlere göre daha yavaş kalsa da, SVK yarım periyotta tepki verebilir (Kıyan, 2011). SVK paralel kompanzatörüne ait eşdeğer devresi Şekil 2.9'da gösterilmektedir (Acha et al, 2002).



Şekil 2.9. (a) SVK'nın tek hat devresi; (b) SVK çalışma prensibi

İdeal bir değişken şönt kompanzatör hiçbir rezistif bileşeni içermemektedir; $G_{SVK}=0$. Buna göre, şebekeden herhangi bir aktif güç çekmemektedir. Öte yandan, kompanzatörün reaktif gücü, bağlantı noktasındaki gerilim büyüklüğünün ve SVK'nın sanal geçiricisi, B_{SVK} 'nın bir fonksiyonudur.

$$P_K = 0 \quad (2.14)$$

$$Q_K = -|V_K|^2 B_{SVK} \quad (2.15)$$

3. DAĞITIM HATLARININ MODELLENMESİ VE GERİLİM KONTROLÜ İÇİN SVK TASARIMI

3.1. Dağıtım Hatların Modellenmesi

Dağıtım hattı, hattın bir ucundan bir başka ucuna elektriksel gücü iletir. Dağıtım hatlarının davranışını analiz etmek için en yaygın yöntem, dağıtım hatlarının parametrelendirilmesi ve pasif bileşenleri ile modellenmesidir. Bu modellemede kullanılan pasif bileşenler dirençler, kapasitörler ve indüktörlerdir. Bu parametrelerin miktarı esas olarak hatlarda kullanılan iletkenlere ve hatların fiziksel ya da geometrik yapılandırılmasına bağlıdır. İletkenlerin kendilerine has, direnç ve reaktans gibi karakteristikleri var ki bunlar hattın gönderen ucundan alıcı ucuna kadar seri olarak ve elektriksel zemin ile şönt olarak biçimlendirilir. Buna ek olarak, hatların karşılıklı endüktansı çok fazlı bir sistem içinde birbirine yakın yerleştirilen iletkenler arasında ortaya çıkmaktadır. Bu dağıtım hatlarının uygun analiz ve parametrelendirilmesi ile dikkate alınabilir.

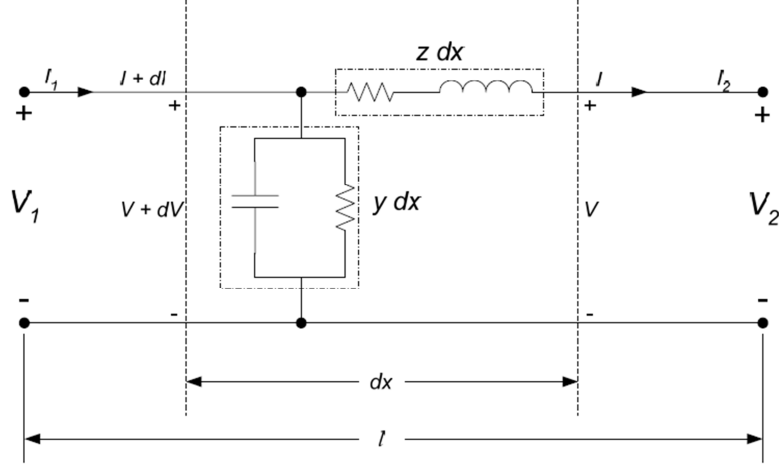
Bir güç sisteminde jeneratörler ve yüklerin dinamik durumu büyüklük ve süre açısından çok önemlidir ve sistemi, iletim ve dağıtım hattı dinamiklerinden daha fazla etkileyebilir. İletim ve dağıtım hattı dinamiklerini, güç akış analizi için ihmal etmek bir makul varsayımdır. Ayrıca, jeneratör/yük dinamikleri bir güç sistemi analizinde iletim ve dağıtım hattının dinamik davranışını incelemeden önce tanıtılmalıdır.

Dağıtım hatlarının kararlı durum için konvansiyonel yöntemle modellenmesi dağıtılan veya toplu parametrelendirme ile yapılmaktadır. Bölüm (3.1.1) ve (3.1.2)'de dağıtılmış hat modeli ve toplu parametre metodolojisi ve gerekli eşdeğer devre modelleri tanıtılacaktır. Bu bilgilerin çoğu (Bergen, 2000), (Grainger, 1994) ve (Leger, 2005) kaynaklardan toplanmıştır.

3.1.1. Dağıtım hattının dağıtık parametreleri

Hattın üzerindeki hat parametrelerinin eşit dağıtılması, dağıtık hat modeli adını alır. Parametreler birim uzunluğunda hesaplanır ve uzunluk artarsak bu değerler de doğal olarak o oranda artacaktır. Bu yöntem hat terminallerinde yani hat boyunca dalga yayılım analizi için de etkilidir.

Özellikle bir güç dağıtım hattı için hat boyunca gerilim ve akım dağılımı çok önemlidir. Kayıpların yanı sıra, hat üzerindeki iletilen güç gözlemlenir ve miktarları ilgili eşitlikler ile tespit edilebilir. Dağıtık hat modeli Şekil 3.1’de görülmektedir. Bu hattın modeli bir seri empedans ve bir şönt admitans’tan oluşmaktadır.



Şekil 3.1. Dağıtılmış parametreler ile dağıtım hatların tek hat şeması.

Hattın seri empedansı, bir direnç ve bir endüktans ile seri olarak temsil edilmektedir. Bu empedans birim uzunlukta bir hat için aşağıdaki gibi verilebilir:

$$z = r + j\omega l \quad (3.1)$$

Seri direnç r ve seri endüktans l birim uzunluk başına ohm ve Henry olarak hesaplanırlar. ω terimi saniyede radyan cinsinden AA güç sisteminin operasyonel açısal frekansını temsil eder. Bu nedenle indüktörün empedansı, sistemin operasyonel frekansına bağlıdır. Hattın modellenmesinde şönt elemanlar, birbiri ile paralel bağlı bir kapasitans ve bir dirençten oluşur. Bu şönt elemanların admitansı aşağıdaki eşitlik ile hesaplanabilir:

$$y = g + \omega c \quad (3.2)$$

Ayrıca kapasitansın admitansı da operasyonel frekansa bağlıdır.

Şekil 3.1’de görüldüğü gibi hattın tüm uzunluğu l ile ifade edilir ve diferansiyel segmentin uzunluğu da dx ile belirlenmiştir. Diferansiyel segmentin empedansı ve

admitansı sırasıyla zdx , ydx adlandırılmıştır. V_1 ve I_1 sırasıyla hattın başucundaki gerilim ve akımı ifade etmektedir ki bu durumda $X=0$, V_2 ve I_2 de sırasıyla hattın son ucundaki gerilim ve akımın ifade etmektedir. Bu durumda $X=1'$ dir. Bir gerilim düşümü dV hattın seri elemanlar üzerinde görülür, ayrıca bir dI büyüklükte akım şönt elemanlar üzerinden akmaktadır. Aşağıdaki iki, birinci derece diferansiyel eşitlikler (3.3) ve (3.4) ile hattın gerilim düşümü ve akım kaybı hesaplanabilir.

$$\frac{dV}{dx} = zI \quad (3.3)$$

$$\frac{dI}{dx} = yV \quad (3.4)$$

Bu davranışı aynı zamanda hem akım ve hem gerilim için ikinci mertebeden doğrusal eşitlik ile ifade edilebilir:

$$\frac{d^2V}{dx^2} = yzV = \gamma^2V \quad (3.5)$$

$$\frac{d^2I}{dx^2} = yzI = \gamma^2I \quad (3.6)$$

γ terimi yukarıdaki eşitliklerde yayımlanma sabiti olarak tanımlanır. Eğer diferansiyel eşitlikler çözülürse aşağıdaki eşitlikler gerilim ve akım için elde edilebilir:

$$V = V_2 \cosh(\gamma x) + Z_c I_2 \sinh(\gamma x) \quad (3.7)$$

$$I = I_2 \cosh(\gamma x) + \frac{V_2}{Z_c} \sinh(\gamma x) \quad (3.8)$$

Bu eşitlikler gerilim ve akımı, hattın her noktasında X' e bağlı olarak hesaplanmasını sağlamaktadırlar. Burada Z_c terimi hattın karakteristik empedansı olarak adlandırılır ve şu şekilde hesaplanır:

$$Z_c = \sqrt{z/y} \quad (3.9)$$

Genelde terminal gerilim ve akımları önemlidir ve $X=1$ yaparak hesaplanabilir.

$$V_1 = V_2 \cosh(\gamma l) + Z_c I_2 \sinh(\gamma l) \quad (3.10)$$

$$I_1 = I_2 \cosh(\gamma l) + \frac{V_2}{Z_c} \sinh(\gamma l) \quad (3.11)$$

Toplu parametre modeli, dağıtık modelden daha sadedir ve sadece hattın gönderim ve son ucundaki terminaller arasındaki ilişkileri açıklamaktadır. Bu, eşitlik (3.10) ve (3.11)'den elde edilir, ancak hat boyunca gerilim ve akım ile ilgili hiçbir bilgi sunmamaktadır. Gerilim ve akım bilgileri hat boyunca herhangi bir noktada yararlı olabilir. Ancak, gerekli olmadığı durumlarda basitleştirilmiş toplu modelleri yeterlidir.

3.1.2. Dağıtım hattın toplu parametreleri

Hatların üzerindeki dalga yayılımı ihmal edilirse, basitleştirilmiş bir toplu parametre modeli güç akışı için uygulanabilir. Toplu modeli geliştirmek için eşitlik (3.10) ve (3.11) aşağıdaki biçime konulabilir:

$$V_1 = AV_2 + BI_2 \quad (3.12)$$

$$I_1 = CV_2 + DI_2 \quad (3.13)$$

ve

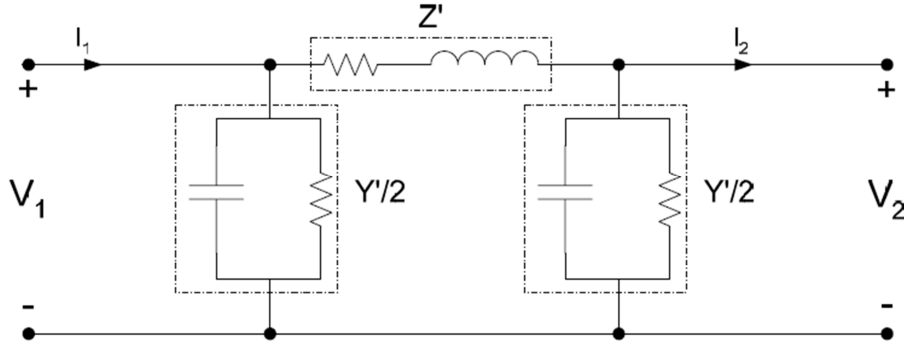
$$A = \cosh(\gamma l) \quad (3.14)$$

$$B = Z_c \sinh(\gamma l) \quad (3.15)$$

$$C = \frac{1}{Z_c} \sinh(\gamma l) \quad (3.16)$$

$$D = \cosh(\gamma l) \quad (3.17)$$

Toplu hat modeli, toplu devre elemanları ile terminal davranışını eşitlik (3.12) ve (3.13)'e dayanır. Bu amaç için bir π eşdeğer devre Şekil 3.2'de görülmektedir.



Şekil 3.2. Toplu parametreler ile dağıtım hattın π eşdeğer devresi.

Hat boyunca dağıtılmış empedans etkileri ohm olarak toplu halde hesaplanır. Bu da hattın uzunluğu ile ilgilidir. Eğer Z' ve $\frac{Y'}{2}$ 'ye uygun değerler seçilirse o zaman dağıtılmış hat ile aynı terminal davranışı elde etmek mümkün olur. Kirchoff'un gerilim (KVL) ve akım (KCL) kurallarını Şekil 3.2'deki devreye uygulayarak aşağıdaki eşitlikler elde edilebilir:

$$V_1 = V_2 + Z' \left(I_2 + \frac{Y'}{2} V_2 \right) = \left(1 + \frac{Z'Y'}{2} \right) V_2 + Z' I_2 \quad (3.18)$$

$$I_1 = \frac{Y'}{2} V_1 + \frac{Y'}{2} V_2 + I_2 = Y' \left(1 + \frac{Z'Y'}{4} \right) V_2 + \left(1 + \frac{Z'Y'}{2} \right) I_2 \quad (3.19)$$

Eşitlik (3.12) ve (3.13), eşitlik (3.18) ve (3.19) ile karşılaştırıldığında toplu eşdeğer devre için A, B, C, ve D parametreleri hesaplanabilir.

$$A = 1 + \frac{Z'Y'}{2} \quad (3.20)$$

$$B = Z' \quad (3.21)$$

$$C = Y' \left(1 + \frac{Z'Y'}{4} \right) \quad (3.22)$$

$$D = 1 + \frac{Z'Y'}{2} \quad (3.23)$$

ve eğer Şekil 3.2'deki Z' ve Y' göre çözülrse:

$$Z' = Z_c \sinh(\gamma l) \quad (3.24)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{Z_2} \tanh\left(\frac{\gamma l}{2}\right) \quad (3.25)$$

Formülasyon toplu π -eşdeğer devrenin, hat parametrelerinin uzunluğa göre, empedans karakteristiğinin ve hattın yayılma sabitinin belirlenmesini sağlar.

Toplu model için dirençler, kapasitörler ve indüktörler (3.24) ve (3.25) eşitlikler ile hesaplanabilir. Benzer bir şekilde bir T eşdeğer devre, iki seri empedans elemanı ve bir şönt empedans elemanı ile inşa edilebilir. Kısa uzunlukta iletim ve dağıtım hatları için bu türetme basitleştirilmiş olabilir.

Çok uzun olmayan ($|\gamma l| \ll 1$) hatlar için, hesaplamayı basitleştirmek amacıyla küçük açı yaklaşımları ile önemli doğruluk kaybı olmadan (3.24) ve (3.25) eşitlikler elde edilebilir. Bir sonraki bölüm, toplu modeli daha da basitleştirmek için bazı pasif unsurların ihmal ile ilgilidir.

3.1.3. Toplu parametreler ile dağıtım hatlarının modellenmesi

Önceki bölümlerde dağıtık ve toplu iletim ve dağıtım hat modellerinin parametreleri tanıtıldı. Toplu parametreler, seri direnç ve endüktif elemanları ile birlikte şönt rezistif ve kapasitif unsurları içeren bir π eşdeğer devre ile modellendi. Bazı varsayımlar ile iletim ve dağıtım hat uzunluğuna göre bu toplu eşdeğer devresi basitleştirilebilir. Burada dört farklı hat modeli, hattın uzunluğuna göre sunulmuştur. Kısa olan hatlarda belirli parametreler hat terminal gerilimleri ve akımları üzerinde minimal bir etkiye sahiptir ve ihmal edilebilir.

Uzun hatlar ($l > 240$ km) için hiçbir yaklaşım yapılmamalıdır. π eşdeğer devre için devre elemanları, (3.24), (3.25) eşitlikler ile hesaplanabilirler. Bu π eşdeğer devre için karakteristik empedans ve yayılma sabiti şu şekilde hesaplanır:

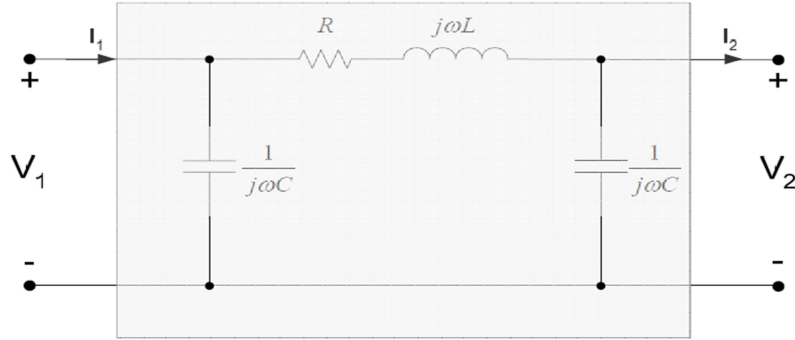
$$\gamma = \sqrt{yz} = \sqrt{(g + j\omega c)(r + j\omega l)}$$

$$= \sqrt{gr - \omega^2 cl + j(\omega cr + \omega gl)} \quad (3.26)$$

$$Z_c = \sqrt{\frac{z}{y}} = \sqrt{\frac{r + j\omega l}{g + j\omega c}} \quad (3.27)$$

γ ve Z_c ile Z' ve $Y'/2$ karmaşık değerleri hesaplanır.

RLC devre elemanlarının eşdeğer devre Şekil 3.3'te boyutlandırılmıştır. Bu temsil, uzun iletim hattın modeli olarak verilmektedir.

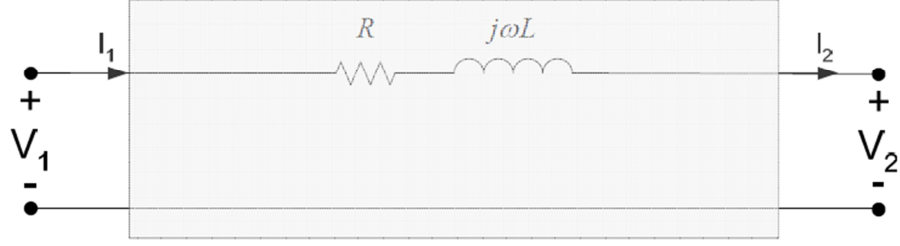


Şekil 3.3. Uzun iletim ve dağıtım hat modeli.

$$Z' = R + j\omega L \quad (3.28)$$

$$\frac{Y'}{2} = \frac{1}{r} + j\omega C \quad (3.29)$$

“r” eşitlik (3.29)’da bir toplu parametre olarak belirlenmektedir. Bu parametreyi rezistif elemandan ayırmak için burada küçük harflerle yazılmaktadır. Bu şönt direnç eğer hat uzunluğu 240 km’den az ise ihmal edilebilir. Şekil 3.2’deki şönt direnç üzerinden akan akım genellikle çok küçük ve terminal gerilim genliği ile orantılıdır. Bu elemanın katkısı sadece uzun yüksek gerilimli hatlarda önemlidir. Orta uzunlukta hatlar için bu bileşen ihmal edilir çünkü hesaplanan sonuçlarda küçük bir fark yaratır. Şönt direnç ihmal edilirse, toplu eşdeğer devre Şekil 3.4’teki gibi olacaktır.



Şekil 3.4. Orta Uzunlukta İletim ve Dağıtım Hat Modeli.

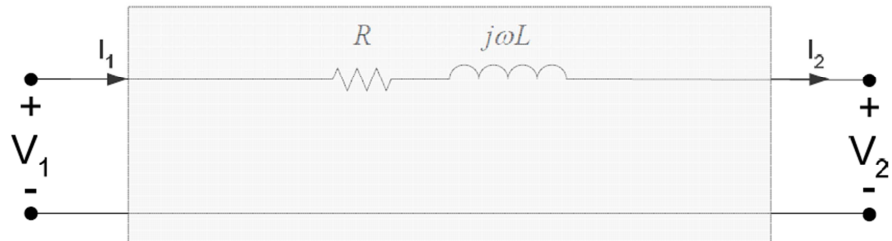
Bu devre için aşağıdaki yaklaşımlar yapılır:

$$Z' \approx Z = zl = R + j\omega L \quad (3.30)$$

$$\frac{Y'}{2} \approx \frac{Y}{2} = yl = -j\omega C \quad (3.31)$$

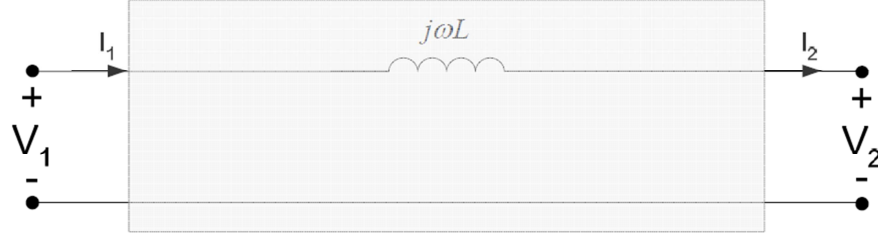
Bu uzun bir hat modeli hesaplamasından daha basittir. Bu modelde unsurlar hat uzunluğu ve parametrelere birim uzunluk başına belirlenebilir. Hiperbolik fonksiyonlar gerekli değildir. Daha fazla yaklaşımlar kısa iletim ve dağıtım hattı için yapılır. Bir kısa iletim ve dağıtım hattı, uzunluğu 80 km'den daha az bir hat olarak tanımlanır.

Kısa hatlar için tüm şönt elemanlar ihmal edilebilir. İki kısa iletim hat modeli burada temsil edilmektedir. Birisi kısa bir *kayıplı iletim ve dağıtım hattı* ve diğeri kısa kayıpsız iletim ve dağıtım hattı olarak adlandırılır. Kayıplı model, Şekil 3.5'de gösterilen seri direnç ve indüktör bileşenleri içermektedir. Modeldeki kayıp I^2R ile hesaplanır. Yeniden küçük yaklaşımlar kullanılır ve bu modeldeki bileşenleri eşitlik (3.30) ile hesaplanır.



Şekil 3.5. Kısa kayıplı iletim ve dağıtım hat modeli.

Burada dördüncü ve sonuncu toplu kısa kayıpsız hat modeli verilmektedir. Bu bir elektrik güç hattının en basit temsidir ki, dağıtım sistemi hattın modellemesinde ve çok kısa hatlar için sık kullanılan modeldir. Bu hesaplamaları basitleştirmek ve hızlandırmak için güç akışı çözümleyicileri de oldukça sık kullanılır. Bu model sadece seri endüktans içerir (Şekil 3.6). Seri direncin olmaması ve gerçek güç kaybının aradan kaldırılması bu modelin kayıpsız adlandırılmasının nedenidir.



Şekil 3.6. Kısa kayıpsız dağıtım hat modeli.

Bu modelde endüktans eşitlik (3.32) ile hesaplanmaktadır:

$$Z = j\omega L \quad (3.32)$$

Dört toplu hattın, özellikle uzun, orta, kısa kayıplı ve kısa kayıpsız modelleri sunulmuştur. Sonuçlarda büyük hataları önlemek için hesaplamalarda hangi modelin ne zaman kullanılacağına dikkat edilmelidir. Elektrik hat modelleri, hat uzunluğu açısından Çizelge 3.1'de özetlenmiş ve her hat için açıklamalar eklenmiştir.

Çizelge 3.1: Toplu Hat Modellerinin Ayrıntıları.

Hat Modeli	Hat Uzunluğu	Uygun toplu Modeli	Yapı Varsayımları
A	$l \ll 80$ km	Kısa Kayıpsız	§ Tüm şönt elemanlar ihmal edilmiş § Seri direnç ihmal edilmiş $Z' \approx Z$
B	$l < 80$ km	Kısa Kayıplı	§ Tüm şönt unsurlar ihmal edilmiş $Z' \approx Z$
C	$80 \leq l < 240$ km	Orta Uzunluklu Hat	§ Şönt direnç ihmal edilmiş $Z' \approx Z$ $\frac{Y'}{2} \approx \frac{Y}{2}$
D	$l \geq 240$ km	Uzun Hat	-----

3.2. Örnek Güç Sistemi Tanıtımı

3.2.1. Örnek güç sistemi-1

Benzetim programında uzun dağıtım hattı üzerinde gerilim kalitesinin problemlerini incelemek için kullanılan güç sisteminin tek hat şeması Şekil 3.7’de görülmektedir. Güç sisteminin kısa devre gücü 100 MVA ve sistem için HOWK tipi 3-iletkenlen oluşan 50 km dağıtım hattı ve direklerin yükseklikleri 9 m seçilmiş ve PSCAD-EMTDC benzetim yazılımında modellenmiştir. Bu dağıtım hattı 34.5 kV gerilim ile beslenmekte ve sistemi ağır yük koşullarında çalıştırmak için hattın sonuna 10 MW, 0.95 güç faktöründe bir yük bağlanmıştır. Ayrıca Şekil 3.7’de X_S kaynak

empedansın (kısa devre empedansın) ifade etmektedir. Burada hatların modellenmesi için Çizelge 3.1’de belirtilen B modeli kullanılmıştır.



Şekil 3.7. Örnek güç sistemi-1’in tak hat şeması.

Örnek güç sistemi-1’de modellenen hat parametreleri, Şekil 3.8, Şekil 3.9 ve Şekil 3.10’da verilmiştir.

Şekil 3.8. Örnek güç sistemi-1’de modellenen direk verileri.

[Line_Tower_Universal] Line Constants Manual Entry of XY Po...

Conductor Data

Data Entry Method for Conductors

☐ From Library

☒ Custom

Conductor Name: howk

Pathname of Cond. Lib.: C:\home\user\pscad\lineconstants\database\

Conductor Radius: 0.0108 [m]

Conductor DC Resistance: 0.117 [ohm/km]

SAG for all Conductors: 1 [m]

Number of Sub-Conductors in a Bundle: 1

Bundle Configuration

☒ Symmetrical

☐ Non-Symmetrical

Show Bundle Graphics?

☐ No

☒ Yes

Bundle Spacing: .4572 [m]

OK Cancel Help...

Şekil 3.9. Örnek güç sistemi-1’de modellenen iletkenlerin verileri.

[Line_Tower_Universal] Line Constants Manual Entry of XY Po...

Conductor Coordinates

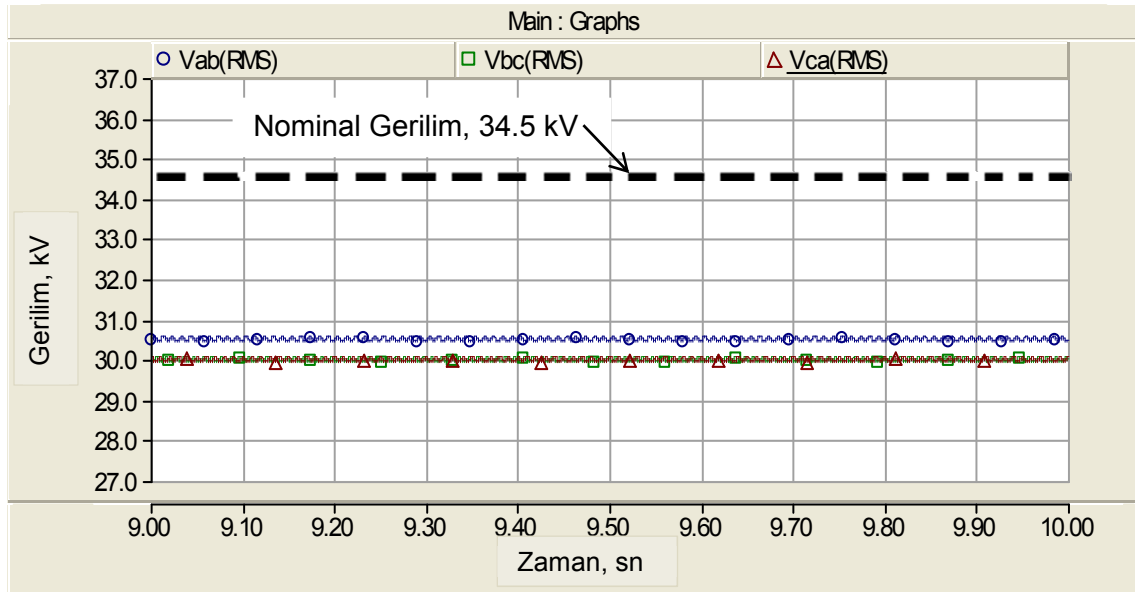
Conductor C1 (X,Y)	-1 [m]	9 [m]
Conductor C2 (X,Y)	0 [m]	9 [m]
Conductor C3 (X,Y)	1 [m]	9 [m]
Conductor C4 (X,Y)	10 [m]	30 [m]
Conductor C5 (X,Y)	15 [m]	30 [m]
Conductor C6 (X,Y)	20 [m]	30 [m]
Conductor C7 (X,Y)	25 [m]	30 [m]
Conductor C8 (X,Y)	30 [m]	30 [m]
Conductor C9 (X,Y)	35 [m]	30 [m]
Conductor C10 (X,Y)	40 [m]	30 [m]
Conductor C11 (X,Y)	45 [m]	30 [m]
Conductor C12 (X,Y)	50 [m]	30 [m]

OK Cancel Help...

Şekil 3.10. Örnek güç sistemi-1’de modellenen iletkenlerin koordinatlarının verileri.

İletim ve dağıtım hatlarında meydana gelen kayıplar, teknik kayıp olarak tanımlanır. Teknik kayıplar, uzun hatlar ve hatların yüklenmesi nedeniyle oluşur. Güç sistemlerinde hattın direnç, endüktans ve kapasitansından kaynaklanan kayıplara, toplam güç kaybı denir. Güç kaybına katkıda bulunan bir başka kayıp ısı kaybıdır. Direnç üzerinden akan herhangi bir akım var ise, ısı kaybı meydana gelecektir. AA dağıtım hatları, eğer uzun bir mesafe üzerinden güç iletirlerse, direnç ve kapasitans değerleri oldukça artacaktır. Şekil 3.3 bir elektrik hattının π eşdeğer devresini göstermektedir. Bu eşdeğer devrede kondansatör üzerinden akan akım, kapasitans değeri artarak azalacak, bu yüzden direnç üzerinden akan akım artacak, bu artış, ısı kaybının artmasına neden olacaktır. Kondansatör ve indüktör üzerinden akan akım, reaktif güç tüketimine neden olacaktır. Reaktif akımın bu elemanların üzerinden akması hat kayıplarına bir başka kaybı ilave edecektir. Artan ısı kaybı ve pasif elemanlar tarafından tüketilen reaktif güç, güç kaybının artmasına neden olacaktır. Talep arttıkça, iletilen güç de artacaktır. İletilen güçteki artışın, iletim kayıplarını telafi etmek için ve talebi karşılamak için yeterli büyüklükte olması gerekir (Binti Hasan, 2011).

Örnek güç sistemi-1’de yük barasında verilen gerilim PSCAD benzetim ortamında incelendiğinde, Şekil 3.11’de gösterildiği gibi, uzun hat ve ağır yüklenme nedeniyle hat gerilimlerinin etkin değeri belirlenen sınırlar dışında kalmaktadır.

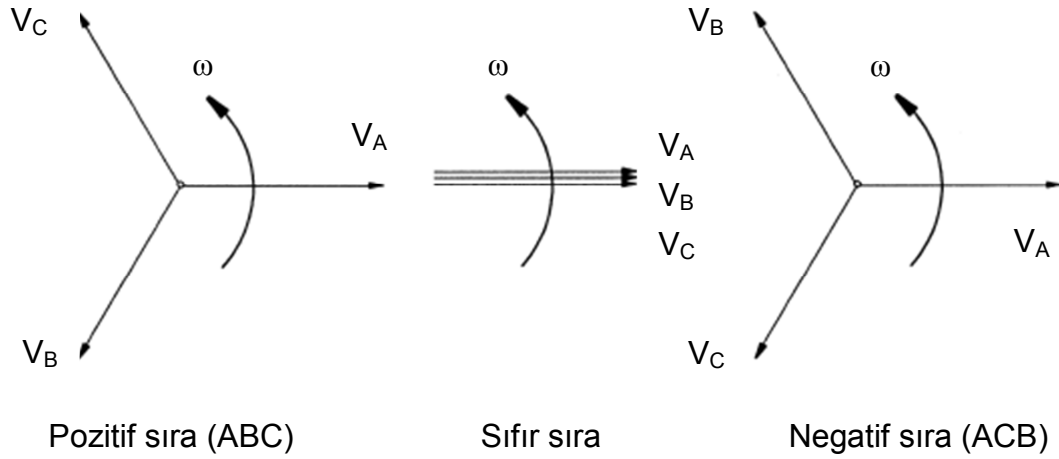


Şekil 3.11. Örnek güç sistemi-1’de yük barasındaki hat gerilimlerinin etkin değerleri

Şekil 3.11’de de görüldüğü gibi, hat gerilimlerin arasında bir fark ve dengesizlik vardır. Bu dengesizliğin nedeni, hatların farklı empedansa sahip olmalarıdır. Hatların farklı empedansa sahip olmalarının ana nedeni, Şekil 3.10’da gösterildiği gibi, hat üzerinde iletkenlerin farklı aralığa sahip olmalarıdır. Farklı aralık iletkenlerin arasında, iletkenlerin farklı karşılık endüktansına neden olacak ve bu farklı empedans hat gerilimlerine yansıyacaktır.

İdeal bir gerilim, negatif ve sıfır sıralı gerilimleri içermemektedir. Gerilim dengesizliği, gerilim profilinde negatif ve sıfır bileşenlerin ortaya çıkmasına neden olur.

Temel olarak hat gerilimleri pozitif, negatif ve sıfır bileşenlerden oluşmaktadır. Pozitif bileşende faz sırası abc, negatif bileşende ise ACB’dir. Sıfır bileşende ise fazlar arası açı farkı yoktur.



Şekil 3.12. Gerilim bileşenleri fazör diyagramı.

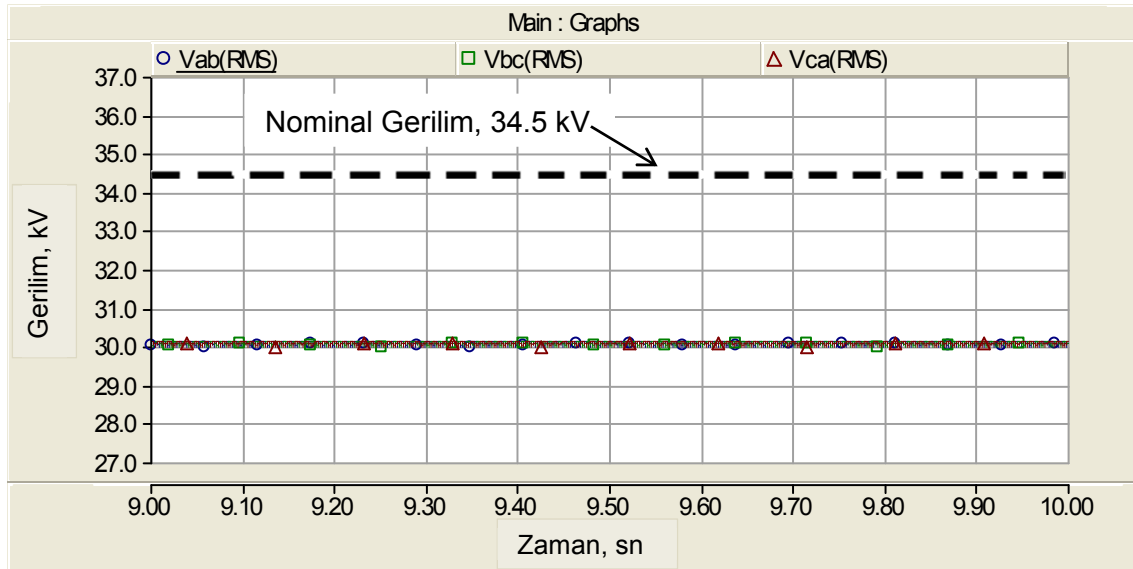
Gerilimin pozitif, negatif ve sıfır bileşeni (sırasıyla V^+ , V^- , V^0) eşitlik (3.33) elde edilmektedir.

$$\begin{bmatrix} V^+ \\ V^0 \\ V^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h & h^2 \\ 1 & h^2 & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_a \\ V_b \\ V_c \end{bmatrix} \quad \text{ve} \quad h = e^{j2\pi/3} \quad (3.33)$$

Aynı hesaplar hat gerilimleri (V_{ab} , V_{bc} , V_{ca}) içinde yapılabilir. Eğer hat gerilimleri için yapılırsa:

$$\begin{bmatrix} V^+ \\ V^0 \\ V^- \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h & h^2 \\ 1 & h^2 & h \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{ab} \\ V_{bc} \\ V_{ca} \end{bmatrix} \quad \text{ve } h = e^{j2\pi/3} \quad (3.34)$$

Hatların farklı empedansı ve gerilimlerin dengesizliğini hat üzerinde giderilmesinin en basit yöntemi, hatlara uygun çaprazlama yapılmasıdır. Eğer önerilen güç sistemi-1’de hat iletkenleri arasında çaprazlama yapılırsa, Şekil 3.13’te gösterildiği gibi, bu dengesizlik aradan kaldırılır. Ayrıca, Çizelge 3.2’de hat gerilimlerin bileşenleri çaprazlama yapılmamış ve çaprazlama yapılmış hatlar için verilmiş. Çizelge 3.2’de verilen değerlere göre ideal durumda hatların farklı empedansından kaynaklanan gerilim dengesizliği çaprazlama yapılmış durumda yok edilebilmektedir.



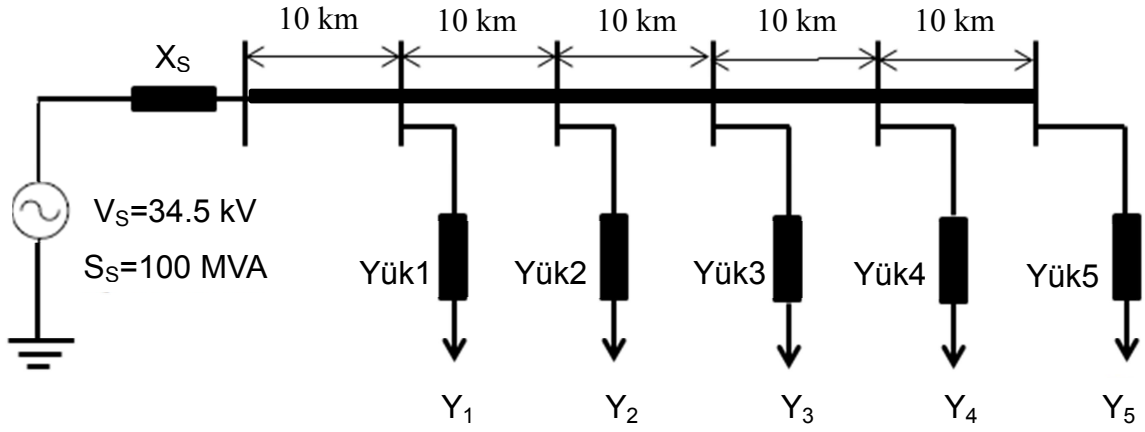
Şekil 3.13. Önerilen güç sistemi-1’de iletkenlerin çaprazlama yapılmış durumunda hat gerilimlerinin etkin değerleri

Çizelge 3.2. Örnek güç sistemi-1’de hatların farklı durumu için gerilim bileşenleri.

Hatların Durumu	V^+ , kV	V^0 , kV	V^- , kV
Çaprazlama Yapılmamış	30.22	0.00	0.34
Çaprazlama Yapılmış	30.22	0.00	0.00

3.2.2. Örnek güç sistemi-2

Örnek güç sistemi-2’de hat üzerinde gerilim değişikliklerini görmek için sistem-1’deki hat sonunun yükü hat üzerinde eşit aralıklarla ve eşit boyutta dağıtılmıştır. Örnek güç sistemi-2’nin tek hat şeması Şekil 3.14’te görülmektedir. Örnek güç sistemi-2’nin şebeke özellikleri tamamen örnek güç sistemi-1 ile aynıdır.



$$Y_1=Y_2=Y_3=Y_4=Y_5:2\text{MW},0.64 \text{ MVar Endüktif}$$

Şekil 3.14. Örnek güç sistemi-2’nin tek hat şeması.

Örnek güç sistemi-2’de kararlı durumda baraların gerilim profili incelendiğinde, Çizelge 3.3’te görüldüğü gibi, önceki bölümde söylenen nedenlerden dolayı, tekrar bara gerilimlerinde önemli ölçüde gerilim düşmesi görülmektedir.

Çizelge 3.3. Örnek güç sistem-2’de yüklerin bağlantı noktalarındaki hat gerilimlerin etkin değerleri.

	Hattın Başında Gerilimin Etkin Değeri, kV	10. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	20. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	30. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	40. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	50. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV
Hat Gerilimlerin Etkin Değerlerinin Ortalaması	33.25	32.65	32.18	31.83	31.60	31.50

Örnek güç sistemi-2 için hatların çaprazlama yapılıp yapılmamasının etkisi Çizelge 3.4'te bara gerilimlerinin pozitif, sıfır ve negatif bileşeni şeklinde açıklanmaktadır. Sıfır sıralı gerilimin, bara gerilimlerinde bulunmamasının nedeni, tanıtılan güç sistemi-1 ve 2'de nötr iletkenin kullanılmamasıdır.

Çizelge 3.4. Örnek güç sistemi-2'de hatların farklı durumları için yüklerin bağlantı noktalarında gerilim bileşenleri.

		Hattın Başında Gerilimin Etkin Değeri, kV	10. Km'de Gerilimin Etkin Değeri, kV	20. Km'de Gerilimin Etkin Değeri, kV	30. Km'de Gerilimin Etkin Değeri, kV	40. Km'de Gerilimin Etkin Değeri, kV	50. Km'de Gerilimin Etkin Değeri, kV
Hatlarda İletkenler Arası Çaprazlama Yapılmamış	V^+	33.24	32.64	32.18	31.83	31.6	31.48
	V^0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	V^-	0.02	0.08	0.13	0.18	0.21	0.22
Hatlarda İletkenler Arası Çaprazlama Yapılmış	V^+	33.24	32.65	32.18	31.19	31.61	31.49
	V^0	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
	V^-	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00

Örnek güç sistemi-1 ve 2'de yukarıda açıklandığı gibi kararlı durum için büyük ölçüde gerilim düşmesi vardır. Bu gerilim düşmesi istenmeyen bir durumdur. Çünkü tüketicilerde kullanılan cihazlar belirli standartlara göre tasarlanıp kullanılmaktadırlar. Eğer bu cihazların beslendikleri şebekenin parametreleri bu sınırların dışında kalırsa, cihaz ya zarar görecektir ve performansı düşecek veya tamamen kapanıp devre dışı kalacaktır. Sistem açısından da bu gerilim düşmesi, şebekenin verimliliğinin düşmesine neden olacaktır. Bu sebeplerden dolayı her zaman şebeke özelliklerinin, istenilen sınırlarda kalması için çaba gösterilir. Şebeke özelliklerinden önemli bir tanesi şebeke gerilimidir. Çünkü şebekede hem durum tahmini ve analizi, hem de güç akışının kontrolü bara gerilimi ve bunun açısı üzerinden yapılmaktadır.

3.3. Reaktif Güç Kompanzasyonu ile Gerilim Regülasyonu Esasları

AA Dağıtım hatları, esas olarak birim başına seri endüktans ve şönt kondansatörler ile karakterize edilebilir. Yük ve yükün güç faktöründe herhangi bir değişiklik dağıtım hattı boyunca gerilim değişikliklerine neden olur ve hattın gönderme ve alma uçlarındaki gerilim genliklerinde büyük farklara yol açabilir. Elektriksel yükler, genellikle gerilim değişikliklerine dayanıklı değildir. Düşük gerilim, cihazların performansının düşmesine ve aşırı gerilim manyetik doyum ve yalıtımların zarar görmesine neden olabilirler. Büyük yük değişimleri alıcı uçtaki gerilim çökmelerine neden olabilir ki, bu da gerilim kararsızlığı olarak tanımlanır. Miller (1982)'de gerilim regülasyonunu, kaynağın gerilim genliğinin, yük akımının belirli bir değişimi ile ilişkili olduğu ve onunla orantılı değişmesi olarak tanımlar. Eşitlik (3.35)'te, kalın ve büyük harfler fazörleri ifade etmektedir (Mutluer, 2008).

$$\Delta V = V_S - V_L = Z_S I_L \quad (3.35)$$

Şekil 3.15'te tipik bir elektrik dağıtım sisteminin basitleştirilmiş tek hat şeması gösterilmektedir. V_S besleme gerilimi ve V_T ki kaynak akımı ve terminal empedansı X_T 'den etkilenir terminal gerilimin ifade etmektedir. Terminal empedansı kaynak ve hat empedanslarını içerir ve basitleştirmek için, direnç bileşenleri ihmal edilmiştir. Hat parametreleri, toplu parametreler olarak kabul edilmiş. Yük empedansı Z_L ve yük akımı I_L ile ifade edilmiş olup, ideal kompanzatör yük terminaline bağlı bir şönt reaktans X_K ile temsil edilmiştir.

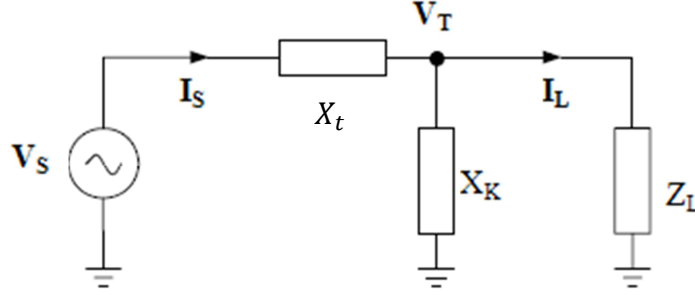
Gerilim regülasyonu için, kompanzatör yük terminallerinde gerilimi değiştirmek için gereken koşulu ($|E| = |V|$) karşılamalıdır. Kompanzatör eklenmesinden sonra, reaktif güç $Q_S = Q_K + Q_L$, sırasıyla kompanzatör ve yükün reaktif gücünden oluşur. Yükün aktif gücü sabit kabul edilir ve P ile gösterilir. Kompanzatörün tamamen reaktif olduğunu varsayarsak:

$$\Delta V = (R_S + jX_S) \left[\frac{P_L - jQ_L}{V_T} \right] \quad (3.36)$$

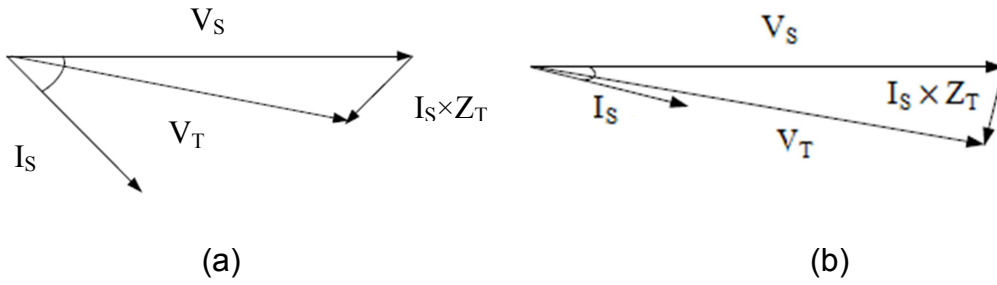
$$\Delta V = \frac{(R_S P_L + jX_S Q_L)}{V_T} + \frac{(X_S P_L + jR_S Q_L)}{V_T} \quad (3.37)$$

Fazör eşitliği yeniden yazılır ise:

$$|V_S|^2 = \left[V_T + \frac{(R_S P_L + jX_S Q_L)}{V_T} \right]^2 + \left[\frac{(X_S P_L + jR_S Q_L)}{V_T} \right]^2 \quad (3.38)$$



Şekil 3.15. Yüke bağlı dağıtım hattının eşdeğer devresinin tek hat şeması.

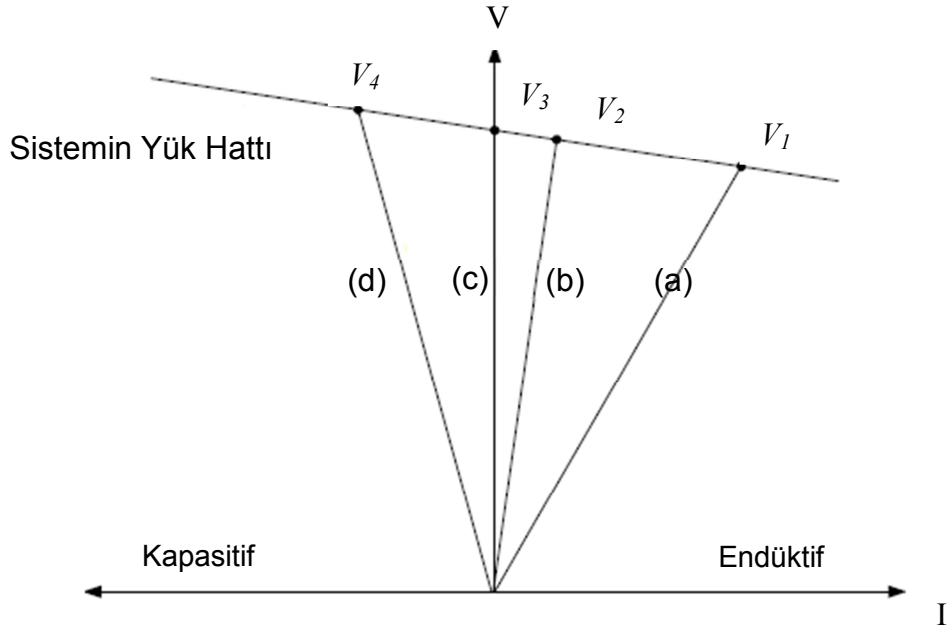


Şekil 3.16. (a) Kompanze edilmemiş ve (b) Kompanze edilmiş sistem için fazör diyagram.

Q_S 'i bulmak için yukarıdaki eşitliği çözmek gerekir ve eğer yükteki gerilim değişiminde aktif gücü sabit varsayarsak:

$$Q_S = \frac{-2V_L^2 X_S \pm \sqrt{4V_T^4 X_S^2 - 4(R_S^2 + X_S^2)[(V_T^2 + R_S P_L)^2 + X_S^2 P_L^2 - V_S^2 V_T^2]}}{R_S^2 + X_S^2} \quad (3.39)$$

Bu tam bir gerilim regülasyonu için bir çözüm var olduğunu kanıtlıyor.



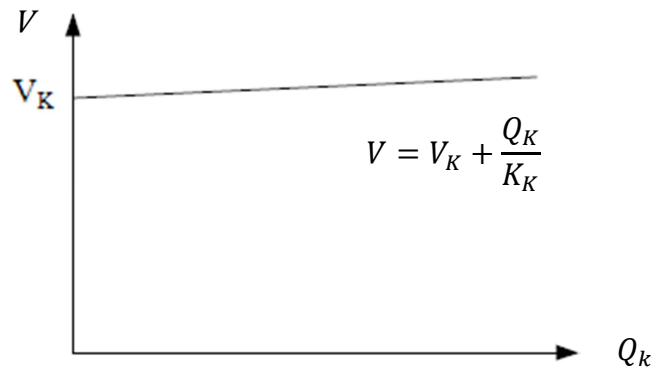
Şekil 3.17. Bir endüktif elektriksel yük için tipik akım/gerilim karakteristiği durumu: (a) Kompanze edilmemiş, (b) Kompanze edilmiş, (c) Güç faktör bir için kompanze edilmiş, (d) Fazla kompanzasyon yapılmış (Mutluer, 2008).

Gerilim / reaktif güç karakteristikleri aşağıdaki terimler ile tanımlanır:

1. Gerilimin diz noktası V_k
2. Faz k için maksimum veya nominal reaktif güç Q_k
3. Kazanç K_k

Dolayısıyla gerilim karakteristikleri eşitlik (4.38)'den bulunabilir:

$$V = V_K + \frac{Q_K}{K_K} \quad (3.40)$$



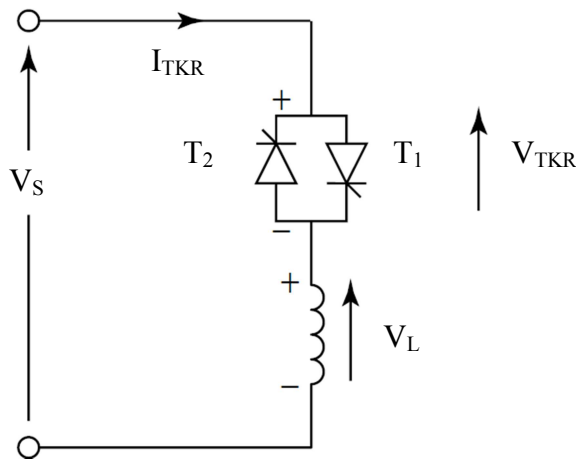
Şekil 3.18. Tipik bir kompanzatörün gerilim / reaktif güç karakteristiği.

3.4. TKR Tabanlı SVK Sistemleri

3.4.1. Tristör kontrollü reaktör (TKR)

TKR, tristör-tabanlı SVK'nın en önemli yapılarından biridir. Tek başına kullanılabilir. Ancak, reaktif gücün kapasitif-endüktif aralığında sürekli ve daha hızlı kontrolü için sabit ya da tristör anahtarlama kapasitörler ile birlikte kullanılır.

Tek fazlı TKR, Şekil 3.19'da gösterildiği gibi, bir çifti ters-paralel bağlı tristör anahtarlardan, T_1 ve T_2 , ve bir doğrusal hava çekirdekli reaktör ile seri bağlıdır.



Şekil 3.19. TKR'nin tek hat şeması.

Ters-paralel bağlı tristör çifti, iki yönlü bir anahtar gibi davranır. T_1 tristörü besleme geriliminin pozitif yarı çevriminde ve T_2 tristörü negatif yarı çevriminde akımı iletilir.

TKR'nin tetikleme açısı, 90° - 180° aralığında kontrol edilebilir. Eğer tetikleme açısı 90° ise, tristör tamamen kapanır ve TKR'den sürekli bir sinüzoidal akım geçer. Tetikleme açısı 90° - 180° aralığında değiştiğinde akım süreksiz darbeler şeklinde simetrik bir halde pozitif ve negatif yarı çevrimlerde bulunur. Tetikleme açısı 90° 'dan 180° gittiği zaman akım azalır ve tetikleme açısı 180° 'da akım sıfıra indirilir. Tristörün tetikleme açısı 90° altına düşürse akımda bir DA bileşen ortaya çıkar ve bu da iki ters-paralel bağlı tristör kollarında simetrik olmayan çalışmalara neden olacaktır. Kaynak gerilimi eğer aşağıda ki gibi ifade edilirse:

$$V_S(t) = V \sin \omega t \quad (3.41)$$

V uygulanan gerilimin tepe değeri ve ω besleme geriliminin açısal frekansıdır. TKR akımı aşağıdaki diferansiyel eşitlik ile verilir.

$$L \frac{di}{dt} - V_s(t) = 0 \quad (3.42)$$

L , TKR endüktansdır. Eşitlik (3.42.)'den entegral alınırsa:

$$i(t) = \frac{1}{L} \int V_s(t) dt + k \quad (3.43)$$

Burada k sabittir. Alternatif olarak,

$$i(t) = \frac{V}{\omega L} \cos \omega t + k \quad (3.44)$$

Sınır koşulu için, $i(\omega t = \alpha) = 0$;

$$i(t) = -\frac{V}{\omega L} (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (3.45)$$

α , uygulanan gerilim ile ölçülen tetikleme açısıdır ki pozitif bir değerden sıfıra kadar değişebilir. Fourier analizi, TKR akımının temel bileşenini, $I_1(\alpha)$, türetmek için kullanılır.

$$I_1(\alpha) = a_1 \cos \omega t + b_1 \sin \omega t \quad (3.46)$$

Tek-dalga simetri olduğu zaman $b_1 = 0$, $f(x) = f(-x)$. Ayrıca, yarı-dalga simetri olduğu için çift harmonikler olmayacaktır. Yani, $f(x + T/2) = -f(x)$.

a_1 katsayısı aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$a_1 = \frac{4}{T} \int_0^{T/2} f(x) \cos \frac{2\pi x}{T} dx \quad (3.47)$$

Eğer çözümlürse

$$I_1(\alpha) = \frac{V}{\omega L} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (3.48)$$

Eşitlik (3.48.) aşağıdaki formda da yazılabilir.

$$I_{1(\alpha)} = V \cdot B_{TKR(\alpha)} \quad (3.49)$$

ve

$$B_{TKR(\alpha)} = B_{max} \left(1 - \frac{2\alpha}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin 2\alpha \right) \quad (3.50)$$

$$B_{max} = \frac{1}{\omega L} \quad (3.51)$$

Tetikleme açısı α , iletim açısı σ ile ilgilidir ve aşağıdaki gibidir.

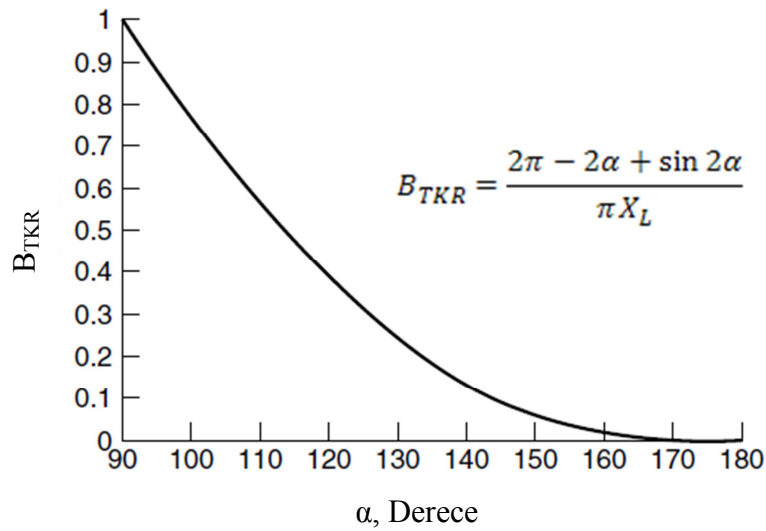
$$\alpha + \frac{\sigma}{2} = \pi \quad (3.52)$$

(3.52.) eşitlik, (3.48.) eşitliğinde konduğunda, TKR akımının temel bileşeni için alternatif bir ifade verirler:

$$I_{1(\sigma)} = V B_{max} \left(\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right) \quad (3.53)$$

$$I_{1(\sigma)} = V B_{TKR(\sigma)} \quad (3.54)$$

$$B_{TKR(\sigma)} = B_{max} \left(\frac{\sigma - \sin \sigma}{\pi} \right) \quad (3.55)$$



Şekil 3.20. TKR'nin sanal geçiri kontrol karakteristikleri, B_{TKR} (Mathur, 2002).

Tetikleme açısı α ile B_{TKR} 'nin birim başına değişimleri Şekil 3.20'de gösterilmektedir. Birim başına B_{TKR} değeri b_{max} maksimum değeri baz miktardan elde edilir. Böylece TKR bir değişken sanal geçiri gibi davranır. Tetikleme açısının değişimi, sanal geçiri değişiklikleri ve dolayısıyla temel akım bileşeninin reaktörü tarafından absorbe edilmesi, reaktif gücün değişikliklerine izin verir çünkü uygulanan AA gerilim sabittir. Ancak, tetikleme açısı 90° 'den 180° 'ye arttıkça akım sinüzoidal biçiminden çıkar ve harmonikler üretilir. Eğer tristörler pozitif ve negatif yarı-çevrimlerde simetrik olarak tetiklenirler ise, o zaman sadece tek harmonikler üretilir. Harmoniğin yüksek frekansta bileşenleri Fourier analizi yoluyla çıkarılabilir. n . mertebeden harmonik etkin değeri aşağıdaki eşitlik ile α 'nın bir fonksiyonu olarak ifade edilebilir (Mathur, 2002):

$$I_{n(\alpha)} = \frac{V}{\omega L \pi} \left(-2 \frac{\cos \alpha}{\pi} \sin n\alpha + \frac{\sin(n-1)\alpha}{n-1} + \frac{\sin(n+1)\alpha}{n+1} \right)$$

$$= \frac{V}{\omega L \pi} \left(\frac{\sin \alpha \cdot \cos(n\alpha) - n \cdot \cos \alpha \cdot \sin(n\alpha)}{n(n^2 - 1)} \right) \quad (3.56)$$

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

3.4.2. Pasif filtre ve tristör kontrollü reaktör (PF-TKR)

TKR akımı, kademesiz ve sürekli bir biçimde, sıfır ile tam iletimdeki maksimum değer arasında değişken olarak ayarlanabilir. Bununla birlikte akım geridedir, yani reaktif güç sadece tüketilebilir (endüktiftir). Bununla birlikte TKR sistemi sabit kondansatörler ile birlikte kullanıldığında, önde olan güç faktörü elde edilebilir ve böylelikle dış sisteme (kapasitif) reaktif güç üretilebilir. TKR'nin MVA seviyesi, kapasitif MVA'yı telafi etmek için sabit kondansatör MVA'sından daha büyük seçilir. Sabit kapasitör bankaları genelde yıldız şeklinde ve birden fazla 3-fazlı grupta bölünür. Her bir kondansatör bir indüktör ile seri olarak belirli bir frekansta harmonikleri yok etmek için tasarlanır (Kıyan, 2011).

TKR ile dengelenen şönt kondansatörlü kompanzasyon için sanal geçiri değeri aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$B(\alpha) = B_C - B_L(\sigma) \quad (3.57)$$

Burada B_C değeri devrede olan sönt kondansatör gruplarının sanal geçiri ve B_L TKR'nin sanal geçiri değerlerini göstermektedir. Bu durumda reaktif güç aşağıdaki gibi hesaplanabilir:

$$Q(\sigma) = -[B_C - B_L(\sigma)].V^2 \quad (3.58)$$

3.4.3. TKR tabanlı SVK'nın gerilim kontrol işlevi

SVK gerilim kontrol işlevi, Şekil 3.21'de gösterildiği gibi, basit bir güç sistemi ve SVK temsil yoluyla açıklanabilir. SVK terminalinden bakıldığında, güç sistemi gerilim kaynağı V_S , olarak ve arkasında bir sistem empedansı X_S , olarak modellenmiştir. Sistem empedansı X_S , SVK barasındaki kısa devre gücü MVA'ya karşılık olarak elde edilebilir:

$$X_S = \frac{V_b^2}{S_c} MVA_b \quad (3.59)$$

S_c = SVK barasının 3-faz kısa devre MVA gücü

V_b = hat gerilimi

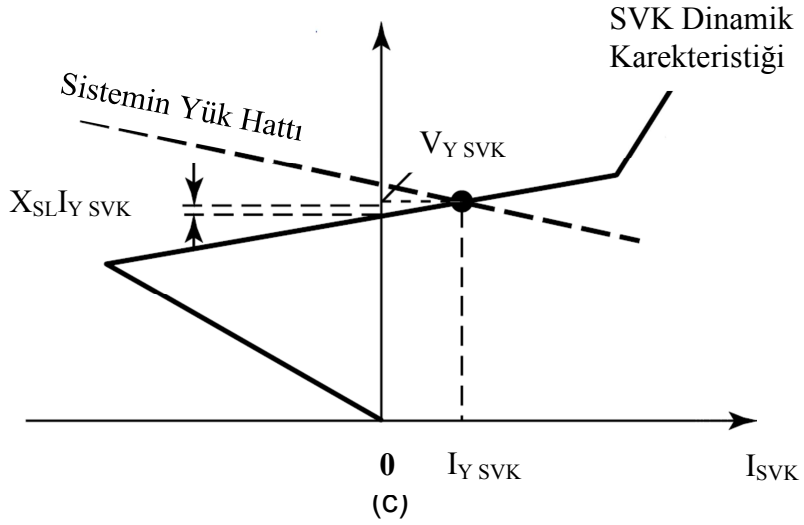
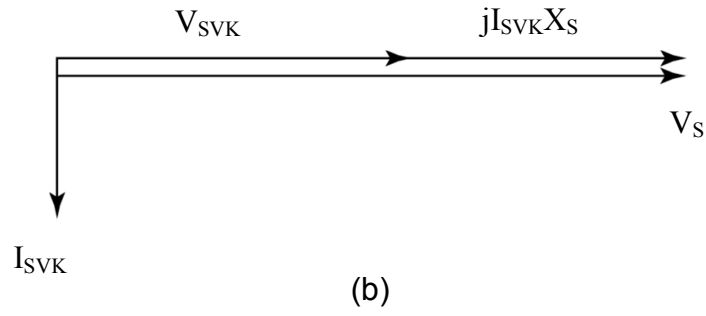
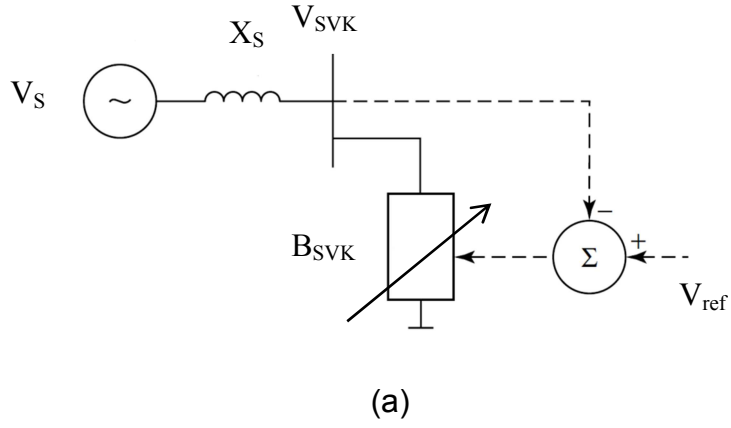
MVA_b = sistemin MVA gücü

Eğer SVK, I_{SVK} reaktif akımı çekiyorsa, o zaman SVK gerilim regülatörü yokluğunda, SVK bara gerilimi aşağıda ki gibi hesaplanır:

$$V_S = V_{SVK} + jI_{SVK} \cdot X_S \quad (3.60a)$$

$$V_S = V_{SVK} \angle 0^\circ + I_{SVK} \angle 90^\circ \cdot X_S \angle 90^\circ \quad (3.60b)$$

$$V_S = (V_{SVK} + I_{SVK} \cdot X_S) \angle 0^\circ \quad (3.60c)$$



Şekil 3.21 (a) Güç sistemi ve SVK kontrol sistemi basitleştirilmiş blok diyagramı; (b) Bir AA sistem için SVK endüktif akımının fazör diyagramı ve (c) basitleştirilmiş bir güç sistemi ve SVK karakteristiği (Mathur, 2002).

SVK akımı sistem gerilimi V_S ile faz gerilim düşümü $I_{SVK}X_S$ ile hesaplanabilir. SVK bara gerilimi, SVK kapasitif akımı ile artar ve SVK endüktif akımı ile azalır. Eşitlik (3.60a.), güç sisteminin karakteristiğini veya sistem hat yükünü temsil eder. Bu eşitlik SVK gerilim kontrolünün, zayıf AA sistemlerde (yüksek X_S) daha etkili ve

güçlü AA sistemlerde (düşük X_s) daha az etkili olmasını açıklamaktadır. SVK'nın dinamik karakteristiği gerilim değişikliklerine karşı gerilimi sabit tutmak için bir reaktif güç üretilmesini açıklamaktadır. Şekil 3.21c'de gösterildiği gibi SVK dinamik karakteristiği ve sistem yük hattının kesiştiği nokta, SVK'nın pasif çalışma noktası olarak tanımlanır. Gerilim kontrol işlevi analitik olarak aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$V_{SVK} = V_{ref} + I_{SVK} \cdot X_{SL} \quad (3.61)$$

Bu eşitlikte I_{SVK} eğer endüktif ise pozitif ve eğer kapasitif ise negatiftir (Mathur, 2002).

3.4.4. SVK tasarımı

SVK sistem özelliklerini belirli sınırlar içinde tutmak için tasarlanmaktadır. Bunun için tasarımdan önce bu sınırların belirlenmesi gerekmektedir. Örnek güç sistemi-1'de, SVK gerilimi %17.4 gerilim düşmesi (veya çukürü) ve %21.8 gerilim yükselmesi (veya tepesi) sınır içinde tutmağı istenilmektedir. Bu değerler üzerinden SVK'nın kapasitif reaktif ve endüktif reaktif gücü belirlenir. Eşitlik 4.61a'da gerilimleri hesaplamak için hat ve kaynağın kısa devre empedansının bulunması gerekir (Saadat, 1999).

$$Z_{hat} = \begin{bmatrix} 0.3176 + 0.3i & 0.0486 & 0.0486 + 0.01i \\ 0.0486 & 0.3176 + 0.3i & 0.0486 \\ 0.0486 + 0.01i & 0.0486 & 0.3176 + 0.3i \end{bmatrix} \Omega.km^{-1} \quad (3.62)$$

$$Z_{hat_{Toplam}} = L \times Z_{hat} \quad (3.63)$$

Eğer gerilim sınırı $\pm\%10$ belirlenirse, 31.06-37.95 kV arasında gerilim değişimine izin verilebilir.

$$V_{hat} = \begin{bmatrix} 30.0 \\ 30.5 \\ 30.0 \end{bmatrix} kV \quad (3.64)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V1 \\ \Delta V2 \\ \Delta V3 \end{bmatrix}' = V_{Nominal} - V_{hat} = \begin{bmatrix} 4.5 \\ 4.0 \\ 4.5 \end{bmatrix} kV \quad (3.65)$$

%17.4 gerilimi çökürü sırasında SVK sistemin gerilimin $\pm\%10$ sınırı içinde tutması gerekir. Buna göre:

$$\begin{bmatrix} \Delta V1 \\ \Delta V2 \\ \Delta V3 \end{bmatrix}'' = V_{hat}(\%10 \text{ gerilim düşümünde}) - V_{hat}(\%17 \text{ gerilim düşümünde}) \quad (3.66)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V1 \\ \Delta V2 \\ \Delta V3 \end{bmatrix}'' = \begin{bmatrix} 31.06 \\ 31.06 \\ 31.06 \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} 28 \\ 28 \\ 28 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 3.06 \\ 3.06 \\ 3.06 \end{bmatrix} \text{ kV} \quad (3.67)$$

$$\begin{bmatrix} \Delta V1 \\ \Delta V2 \\ \Delta V3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta V1 \\ \Delta V2 \\ \Delta V3 \end{bmatrix}' + \begin{bmatrix} \Delta V1 \\ \Delta V2 \\ \Delta V3 \end{bmatrix}'' = \begin{bmatrix} 7.56 \\ 7.06 \\ 7.56 \end{bmatrix} \text{ kV} \quad (3.68)$$

Eşitlik 3.60a'ya göre:

$$\begin{bmatrix} 7.06 \\ 6.56 \\ 7.06 \end{bmatrix} = I_{SVK} \cdot Z_{hat_{Toplam}} \quad (3.69)$$

$$I_{SVK} = j \begin{bmatrix} 175 \\ 156 \\ 175 \end{bmatrix} \text{ A (kapasitif)} \quad (3.70)$$

Eğer gerilim düşme sınırına (31.06 kV) göre SVK'nın kapasitif reaktif gücün hesaplırsak:

$$Q_C = j\sqrt{3}V_{LL}I_{SVK} = 9.45 \text{ MVar} \quad (3.71)$$

Gerilim sınırında belirlenen kapasitif reaktif gücünden SVK'nın kapasitif empedansı eşitlik (3.72) ile hesaplanabilir:

$$X_C = \frac{V_{LL}^2}{Q_C} \approx 100 \Omega \quad (3.72)$$

SVK'nın anma kapasitif reaktif gücü eşitlik (3.72) ile nominal gerilimde hesaplanabilir:

$$Q_C = \frac{V_{LL}^2}{X_C} \approx 12 \text{ MVar} \quad (3.73)$$

Aynı şekilde SVK'nın gerilim sınırına göre endüktif reaktif gücü hesaplanabilir. %22 gerilimi çökürü sırasında SVK sistemin gerilimin $\pm\%10$ sınırı içinde tutması gerekir. Buna göre:

$$V_{LL1} = \%10 \text{ gerilim yükselmesinin sınırı} = 37.95 \text{ kV}$$

$$V_{LL2} = \%22 \text{ gerilim yükselmesi} = 42 \text{ kV}$$

$$\Delta V_{LL} = V_{LL2} - V_{LL1} \approx 4 \text{ kV} \quad (3.74)$$

Eşitlik 3.60a'ya göre:

$$I_{SVK} = \frac{\Delta V_{LL}}{Z_{hat\ Toplam}} = 132 \text{ A} \quad (3.75)$$

Eğer gerilim yükselme sınırına (37.95 kV) göre SVK'nın endüktif reaktif gücün hesaplırsak:

$$Q_L = j\sqrt{3}V_{LL}I_{SVK} \approx 8.5 \text{ MVar} \quad (3.76)$$

Gerilim sınırında belirlenen endüktif reaktif gücünden SVK'nın endüktif empedansı eşitlik (3.75) ile hesaplanabilir:

$$X_L = \frac{V_{LL}^2}{Q_L} \approx 170 \Omega \quad (3.77)$$

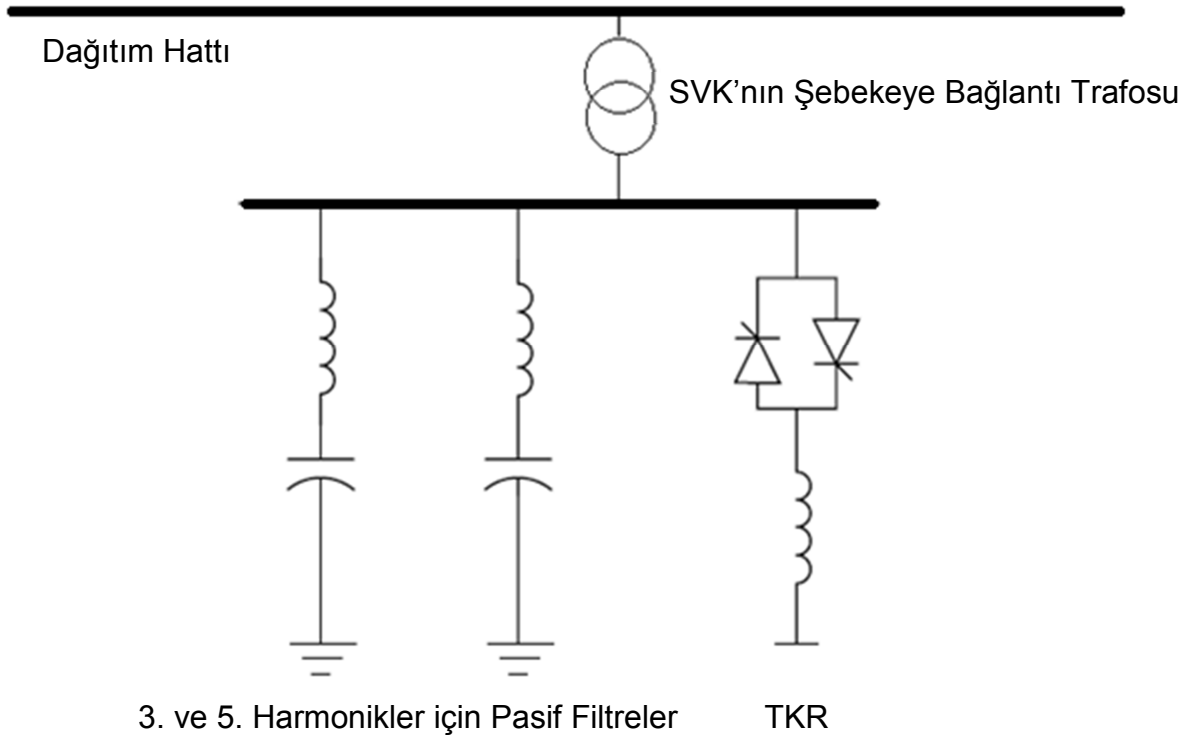
SVK'nın anma endüktif reaktif gücü eşitlik (3.77) ile nominal gerilimde (34.5 kV) hesaplanabilir:

$$Q_L = \frac{V_{LL}^2}{X_L} \approx 7 \text{ MVar} \quad (3.78)$$

SVK'nın endüktif reaktif gücü hem SVK'nın kapasitif reaktif gücünü ve hem de gerilim tepesini telafi etmek için tasarlanması gerekmektedir. Burada 12 MVar SVK'nın kapasitif reaktif gücü için ve 7 MVar'da %22 gerilim tepesi için toplam 19 MVar seçilmiştir.

$$Q_{L_{Toplam}} = Q_L(SVK'nın kapasitif reaktif gücünü telefî etmek için) + Q_L(\%22 gerilim yükselmesi için) = 12 + 7 = 19 MVar \quad (3.79)$$

SVK'nın kapasitif ve endüktif reaktif güçleri belirlendikten sonra, SVK'nın şebekeye bağlantı şekli seçilmelidir. Mutluer (2008)'de SVK'nın şebekeye bağlantı şekilleri verilmektedir. Burada gerilim kontrolü için SVK'nın şebekeye Şekil 3.22'de belirlenen bağlantı şekli seçilmiştir.



Şekil 3.22. SVK'nın şebekeye bağlantı şekli.

Burada SVK'nın şebekeye bağlanması için 13.8/34.5 kV ve 19 MVA gücünde bir trafo seçilmiştir. SVK'nın 12 MVar kapasitif reaktif gücü için bağlantı trafonun 13.8 kV tarafına her birinin gücü 6 MVar iki filtre bağlanmıştır ve endüktif reaktif gücü

için de 13.8 kV tarafına 19 MVar gücünde bir 6-darbeli ve üçgen şeklinde bağlanmış TKR seçilmiştir.

Sonraki bölümlerde TKR ve filtrelerin özellikleri ve elemanları açıklanmaktadır.

3.4.5. TKR tabanlı SVK'nın harmonik analizi

Kararlı durumda TKR akımının tek harmoniği

Üç fazlı üçgen bağlı, 6-darbeli kullanılan TKR sistemi, Şekil 3.23'te gösterilmiştir. Eğer üç-fazlı besleme gerilimi dengeli ise, eğer üç reaktörün ünitesi aynıysa ve eğer tristörler simetrik tetiklenirler ise, simetrik akım darbeleri hem pozitif hem negatif yarım çevrimlerde olur ve sadece tek harmonikler üretilir. TKR akımının n. harmoniğinin etkin değeri (I_n) eşitlik (3.56)'dan elde edilebilir (Mathur, 2002).

TKR reaktörlerinin değeri, SVK'nın endüktif reaktif gücü belirlendikten sonra hesaplanabilir. Burada SVK'nın endüktif reaktif gücü 19 MVar seçilmiştir.

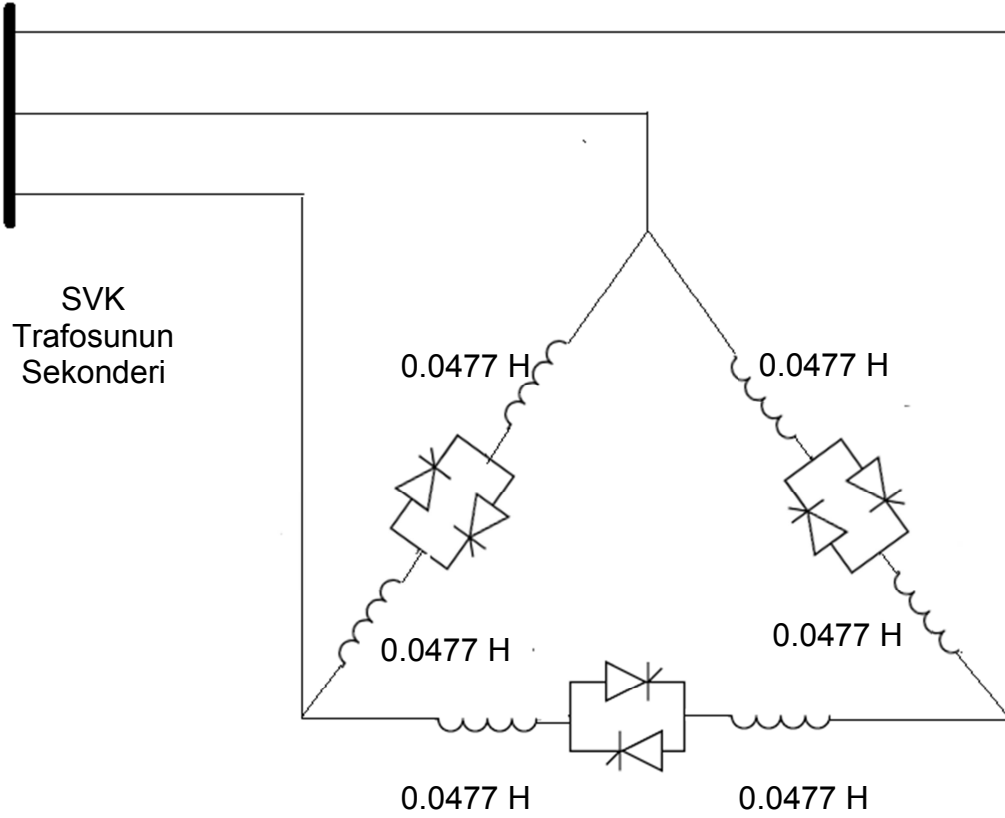
$$X_L = \frac{V_{LL}^2}{Q_L} = \frac{13.8kV^2}{19MVar} = 10\Omega \quad (3.80)$$

Eğer Y-Δ dönüşümü yapılırsa üçgen bağlı TKR reaktörlerin her fazdaki empedansları bulunur:

$$X_{L1} = X_{L2} = X_{L3} = \frac{3(X_L^2)}{X_L} = 30\Omega \quad (3.81)$$

$$L_{L1} = L_{L2} = L_{L3} = \frac{X_{L1}}{2\pi f} = 0.0955 H \quad (3.82)$$

Eşitlik (3.82)'de f (f=50 HZ) şebeke frekansın ifade etmektedir. Şekil 3.23'te gösterildiği gibi, tristör anahtarlarda ortaya çıkan tam AA gerilimi ve reaktörün üç terminalleri arasında bir kısa devre hatası oluşursa tristörlerin zarar görmesini önlemek için her fazda ters-paralel bağlı tristör çiftinin her iki tarafındaki, indüktör ikiye (0.0477H) bölünmüştür.



Şekil 3.23. Kullanılan üçgen bağlı, 6-darbeli TKR bileşenleri ve tristörlerin özellikleri

TKR'nin çift akım harmoniği

Akım dalga şeklindeki çift harmonikler, doğrusal olmayan yükün özelliklerinden kaynaklanır. Çift harmoniklerin pratik kaynaklarından ağırlıklı olarak, doğrultucular, hızla değişen yüklere bağlı dönüştürücüler, ark ocakları vb. yükler söylenebilir. Zor koşullarda daha önce bahsedilen dengeli çalışmaların sonuçları sağlanmayabilir. Örneğin, reaktörlerin her üç fazda aynı olmaması ya da besleme geriliminin dengeli olmaması gibi. Bu dengesizlik, üç ve katı harmoniklerin dahil edilmesinin yanı sıra, karakteristik olmayan harmoniklerin de yayılmasına neden olabilir. Bu karakteristik olmayan harmoniklerin büyüklüğü normal şartlar altında önemsiz, ancak şiddetli olaylar sırasında pozitif ve negatif çevrimlerde, tristörlerin farklı tetiklenmesine neden olabilir. Bir periyotta, iki yarım çevrimdeki dalga şekilleri simetrik değilse, çift harmonikler üretilir.

$$I = G_1 V \quad V > 0 \quad (3.83)$$

$$I=G_2V \quad V<0 \quad (3.84)$$

Olduğunu varsayalım:

$$G_1>G_2$$

Akım dalgasını harmonik bileşenlerine ayrılabilir:

$$I = V\sqrt{2} \left[\frac{G_1 + G_2}{2} \sin \omega t + \frac{G_1 - G_2}{\pi} \left(\sum_{h=2,4,6..} \frac{\sin(h\omega t)}{h^2 - 1} \right) \right] \quad (3.85)$$

Kondüktansın hızlı değişimleri sayesinde çift harmoniklerin arttığı açıktır. TKR kontrol sistemi, reaktif güç talebi değişikliklerini takip için tasarlanmıştır. Bu nedenle, TKR akımının ayar noktası her yarım çevrimde değişebilir. Bunun sonucunda TKR'de çift harmonikler üretilir.

Eşitlik (3.75.)'ten bellidir ki en kötü çift akım harmonikleri G_1 maksimum ve G_2 minimum, ya da tam tersi olduğu zaman oluşur. Bu durum tetikleme açısı ilk çevrimde 90° olduğunda ve ikinci çevrimde bu tetikleme açısı 180° olduğunda ortaya çıkabilir. Bu durumda G_2 sıfır ve G_1 reaktansı, sanal geçirisi G ile eşittir. Bu durumda çift akım harmonikleri ve DA bileşeni aşağıdaki eşitliklerden elde edilebilir:

$$I_h = \frac{V2\sqrt{2}G \sin(h\omega t)}{\pi h^2 - 1} \quad (3.86)$$

$$I_{dc} = \frac{V\sqrt{2}G}{\pi} \quad (3.87)$$

3.4.6. TKR harmoniklerin minimizasyonu:

Önceki bölümlerde belirtildiği gibi, TKR'den üretilen harmonikler belirlenen sınırları aşabilir. Bu nedenle, dikkatle ele alınmalı ve değerlendirilmeleri gerekir. Genelde harmonikleri ortadan kaldırmak için, iki farklı yöntem vardır:

- 1) Pasif veya aktif şönt filtre ile harmonikleri filtreleme

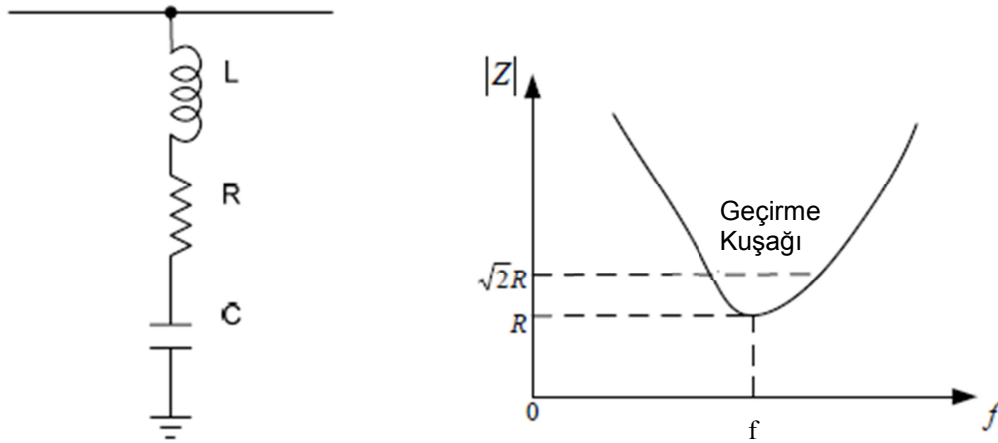
2) Faz kaydırmalı transformatörleri kullanarak harmoniklerin iptali

6-darbeli TKR'de transformatörlerin Δ -Y / Δ - Δ bağlantı imkanı olmadığı için 6-darbeli TKR'de harmonikleri yok etmek için filtreler kullanılır.

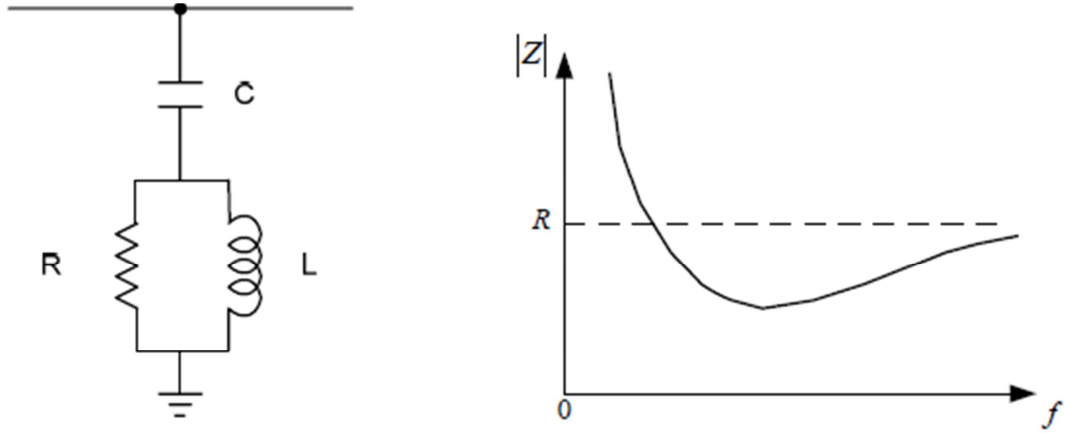
Pasif şönt filtreler ile harmoniklerin azaltılması

Şönt filtreler belirli frekanslarda harmonikler için düşük empedanslı yol oluşturur. İdeal bir şönt filtre, ayarlanan frekansta kısa devre ve diğer frekanslarda yüksek empedansa sahip olmalıdır. Bu nedenle, kaynak veya yüklerin akımının yerine bu yoldan harmonik akımlar akar. Gerilim harmonikleri, akım harmoniklerinin devrede akmasına sebep olabilir. Genelde gerilim harmonikleri gidermek için, seri filtreler gereklidir (Mutluer, 2008).

Konvansiyonel filtre tasarımı, birçok kritere bağlıdır. IEEE 519-1992 harmoniklerin değerlendirilmesi ve iptal edilmesi için yöntemler önerir. Arrilaga (1982)'e göre, filtre boyutu, temel frekansta verilen reaktif güç tarafından tanımlanır. Tasarımın amacı, kabul edilebilir bir seviyede, belirtilen harmoniklerin filtrelenmesidir. Farklı pasif filtrelerin tipik karakteristikleri Şekil 3.24 ve Şekil 3.25'de verilmiştir.



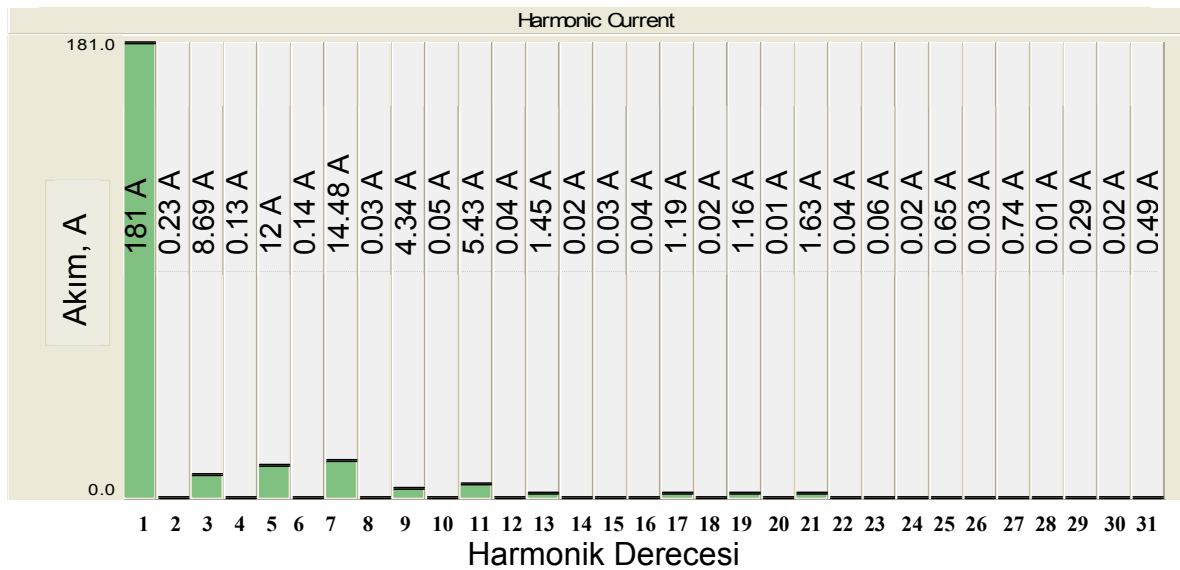
Şekil 3.24. Ayarlı şönt filtre ve frekans cevabı.



Şekil 3.25. İkinci derece şönt filtre ve frekans cevabı.

3.4.7. Uygulanan TKR için kararlı durum harmonik analizi

Güç sistemlerinde kompanzasyon amacı ile kurulan ve kullanılan TKR'nin harmonik durumunun belirlenmesi ve onların yok edilmesi çok önemlidir. Çünkü TKR harmonikleri, sistem geriliminin dalga şeklinin bozulmasına, TKR transformatörünün doyuma girmesine ve sistemde kullanılan kontrol cihazlarının yanlış çalışmasına sebep olabilir. Bu nedenle burada gerilim regülasyonu amacı ile kurulan TKR harmoniklerinin incelenmesi gerekmektedir. Kararlı durum için TKR harmoniği, PSCAD-EMTDC benzetim ortamında incelenmiş ve akım harmonik spektrumu Şekil 3.26'da ve bu harmoniklerin % genlikleri Çizelge 3.5'te verilmiştir. Şekil 3.26 ve Çizelge 3.5'ten de görüldüğü gibi kararlı durum için TKR'nin akım harmonikleri tek harmoniklerdir.



Şekil 3.26. Kararlı durum için TKR'nin harmonik spektrumu.

Çizelge 3.5. Kararlı durum için TKR ve filtrelerden kaynaklanan akım harmonik değerleri.

Harmonik Numarası	TKR Harmoniği, %	SVK Trafosunun Sekonder Tarafında, 3. ve 5. Harmonik Filtre Tesisinden Sonra Harmonikler, %	SVK'nın Sisteme Bağlantı Noktasında 3. ve 5. Harmonik Filtre Tesisinden Sonra Harmonikler, %
1	100	100	100
2	0.130	0.120	0.020
3	4.800	0.630	0.090
4	0.070	0.020	0.004
5	6.600	0.190	0.008
6	0.080	0.005	0.020
7	8.000	0.800	0.850
8	0.016	0.010	0.010
9	2.400	0.400	0.300
10	0.030	0.010	0.010
11	3.000	0.600	0.050
12	0.022	0.010	0.010
13	0.800	0.200	0.170
14	0.010	0.006	0.008
15	0.016	0.006	0.008
16	0.022	0.003	0.008
17	0.660	0.100	0.170
18	0.010	0.020	0.008
19	0.640	0.500	0.170
20	0.005	0.006	0.007
21	0.900	0.200	0.200
22	0.022	0.003	0.008
23	0.036	0.100	0.008
24	0.010	0.003	0.008
25	0.360	0.100	0.008
26	0.016	0.006	0.008
27	0.410	0.100	0.008
28	0.005	0.006	0.008
29	0.160	0.050	0.040
30	0.010	0.003	0.001
31	0.270	0.010	0.008

3.4.8. Uygulanan TKR için filtre tasarımı ve analizi

Şönt kurulan kapasitif gücün MVAR seviyesi belirlendikten sonra, filtrelerin tasarımı hem yük ve hem TKR de var olan belirli harmonikler için karar verilmelidir. SVK topolojisi, filtre tasarlanması için önemlidir. Çeşitli topolojiler ve bağlantı türleri Mutluer (2008)'de açıklanmıştır. Kurulum amacına göre, harmonik filtre tipinde

farklılık olabilir. Bu nedenle, frekans cevabı analizi başlamadan önce SVK topolojisi seçilmelidir. TKR harmonik akımların yok etmek için, burada 3. ve 5.harmonikler için filtreler tasarlanmış ve TKR ile şönt, TKR transformatörünün sekonder tarafına bağlanmıştır.

Filtreleri tasarlamak için, SVK'ya seçilen kapasitif reaktif güç (12 MVar), iki filtre arasında eşit bölünmüş ve her iki filtre 6 MVar kapasitif reaktif gücü ile tasarlanmıştır.

$$X_{Filtre} = \frac{kV^2}{MVar} = X_{3h} = X_{5h} = \frac{13.8^2}{6} = 31.74 \Omega \quad (3.88)$$

Burada X_{3h} ve X_{5h} sırasıyla 3. ve 5. harmonik empedansların ifade etmektedirler. Ayrıca eşitlik (3.88)'de SVK trafosunun sekonder gerilimi (13.8 kV) uygulanmıştır. Kapasitör ve indüktörün empedansları eşitlik (3.89) ve (3.90) ile hesaplanmaktadır.

$$X_{Filtre} = X_C - X_L \quad (3.89)$$

$$X_C = X_L h^2 = \frac{X_{Filtre} h^2}{h^2 - 1} \quad (3.90)$$

3.harmonik için $h=2.97$

5. harmonik için $h=4.73$

X_C ve X_L hesaplandıktan sonra kapasitör ve indüktörlerin boyutları, sırasıyla eşitlik (3.91) ve (3.92) ile hesaplanabilir.

$$C = \frac{1}{2\pi f X_C} \quad (3.91)$$

$$L = 2\pi f X_L \quad (3.92)$$

Değerler 3. Harmonik firtresi için

$$C = 89 \times 10^{-6} F \quad (3.93)$$

$$L = 0.013 \text{ H} \quad (3.94)$$

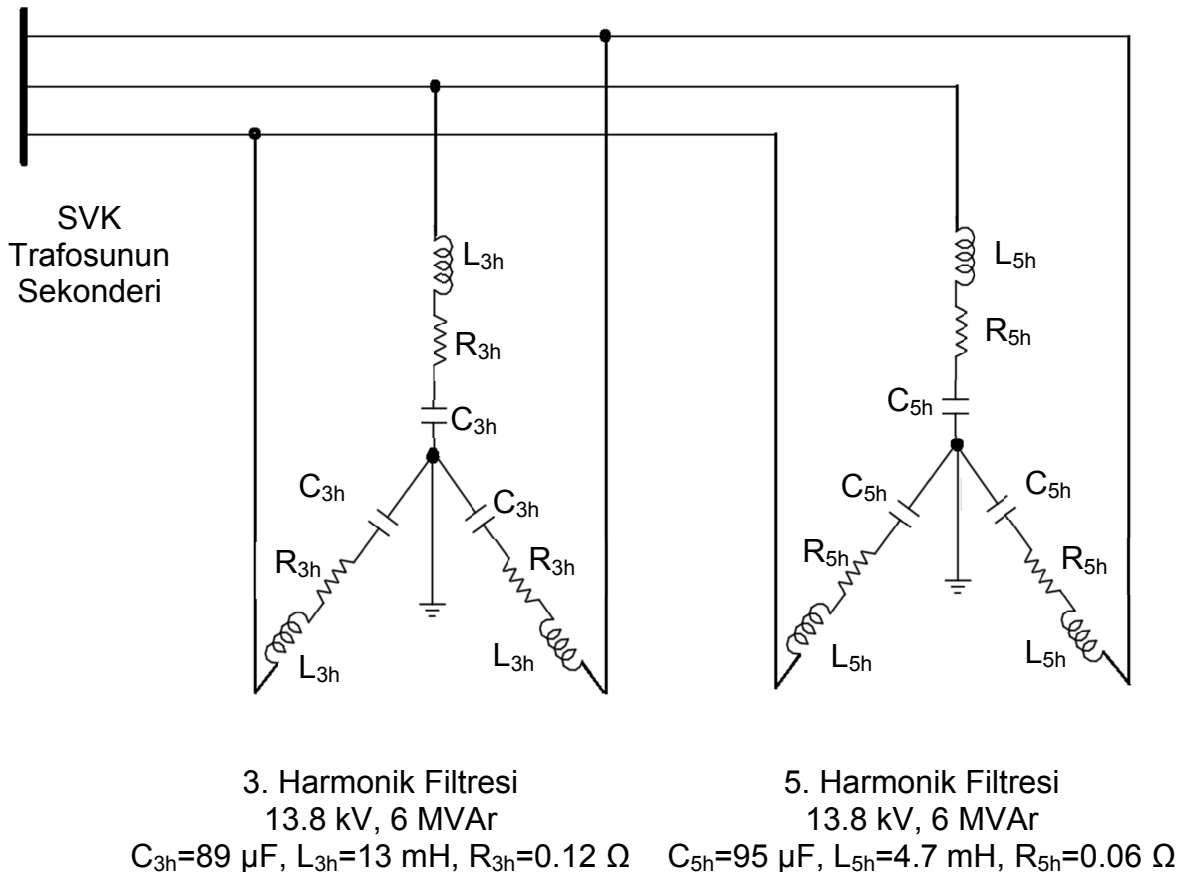
ve 5. Harmonik filtresi içinde:

$$C = 95 \times 10^{-6} \text{ F} \quad (3.95)$$

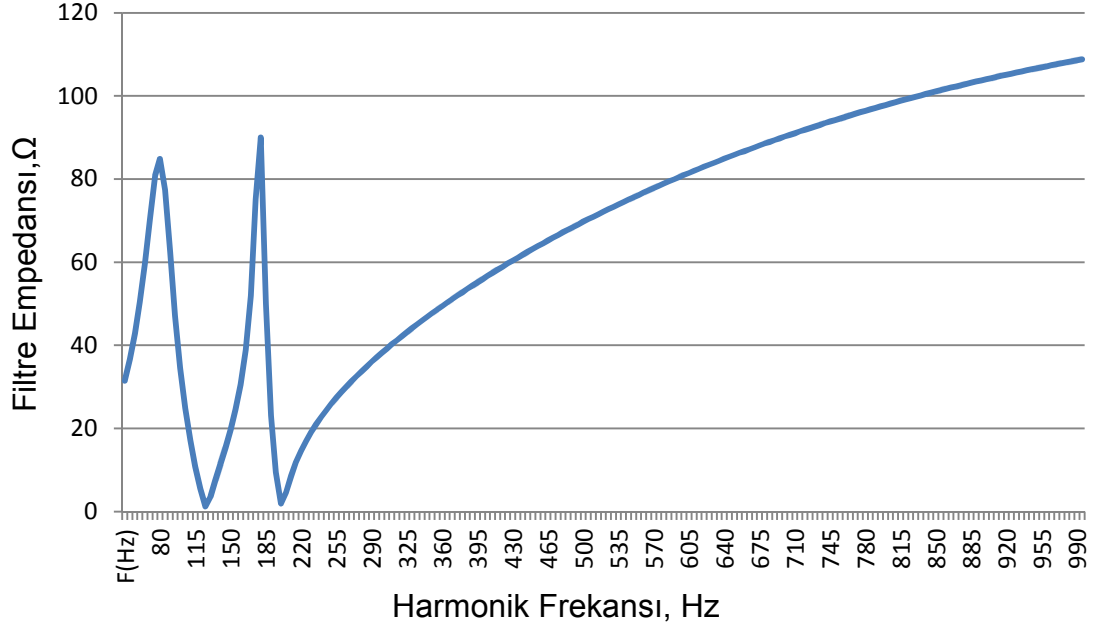
$$L = 0.0047 \text{ H} \quad (3.96)$$

olarak hesaplanmıştır. Ayrıca Şekil 3.24'te gösterildiği gibi, filtrelerin geçirme kuşağını genişletmek için 3. harmonik filtresine 0.12Ω ve 5. harmonik filtre sinde 0.06Ω büyüklüğünde bir direnç eklenmiştir.

Bu filtrelerin tek hat şeması, bileşenleri ve özellikleri Şekil 3.27'de ve frekans karakteristiği Şekil 3.28'de görülmektedir. Şekil 3.28'de görüldüğü gibi, hemen hemen tüm hakim TKR harmonikleri SVK filtre devreleri ile süzölmektedir.



Şekil 3.27. TKR'nin 3. ve 5. harmonikleri için tasarlanan filtrelerin tek hat şeması, bileşenleri ve özellikleri.



Şekil 3.28. TKR'nin 3. ve 5. harmonikleri için tasarlanan filtrelerin karakteristiği.

Filtre-TKR ve SVK'nın sisteme bağlantı noktasındaki akım harmonik değerleri, akımın ana bileşeni oranında Çizelge 3.5'de açıklanmaktadır.

3.4.9. SVK dinamik karakteristiğinde eğimin avantajları

Eğim SVK'nın V-I karakteristiğinde, kompanzatörün doğrusal kontrol aralığında, akım ve gerilimin büyüklüğündeki değişiklikler oranında tanımlanır. Dolayısıyla eğim X_{SL} , eşitlik (4.63.) ile hesaplanabilir.

$$X_{SL} = \frac{\Delta V}{\Delta I} \quad (3.97)$$

Burada

ΔV = Gerilim büyüklüğü değişimi (V)

ΔI = Akım büyüklüğü değişimi (A)

olarak tanımlanırlar. Şekil 3.29'da SVK'nın bağlantı noktasının gerilimi SVK'nın akımına karşı belirli bir eğim ile çizilmiştir. Genelde SVK tam bir gerilim regülatörü gibi kullanılmamaktadır. SVK akımı ile SVK'nın terminal geriliminin değişikliklerine izin verilebilir. Bu regülasyon eğimi aşağıdaki gibi hesaplanabilir.

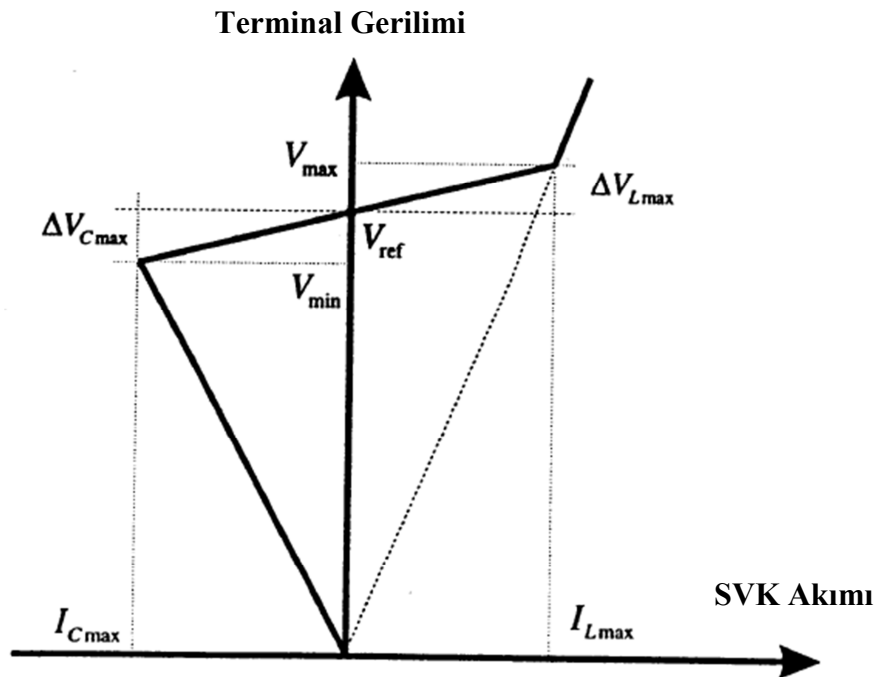
$$Eğim = \frac{\Delta V_{Lmax}}{I_{Lmax}} = \frac{\Delta V_{Cmax}}{I_{Cmax}} \quad (3.98)$$

Bölüm 3.4.4.'te SVK tasarımı kısmında $I_{Lmax}=132$ A ve $I_{Cmax}=175$ A seçilmiştir. Eğer gerilim değişikliklerine nominal gerilimin $\pm\%10$ kadar izin verilirse:

$$Eğim = \frac{\Delta V_{Lmax}}{I_{Lmax}} = \%2.6 \quad (3.99)$$

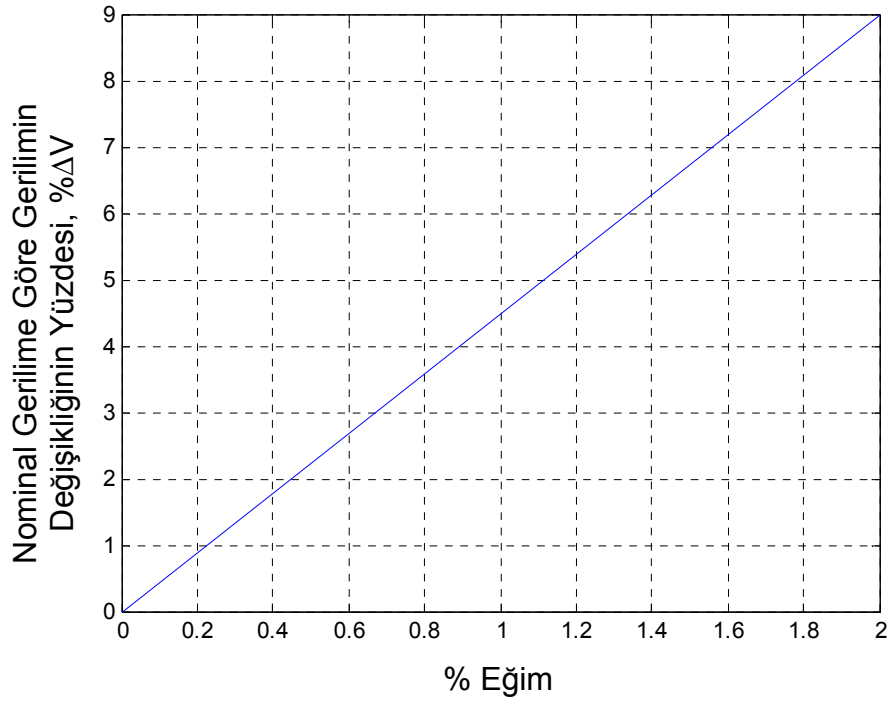
$$Eğim = \frac{\Delta V_{Cmax}}{I_{Cmax}} = \%2 \quad (3.100)$$

Burada kapasitif ve endüktif akımlar eşit olmadığı için farklı eğimler elde edilmektedir. Bu durumda gerilim sınırına göre küçük eğim seçilmelidir. Hesaplamalara göre tasarlanan SVK'da eğimin miktarının en fazla %2 seçilmesi gösterilmektedir.



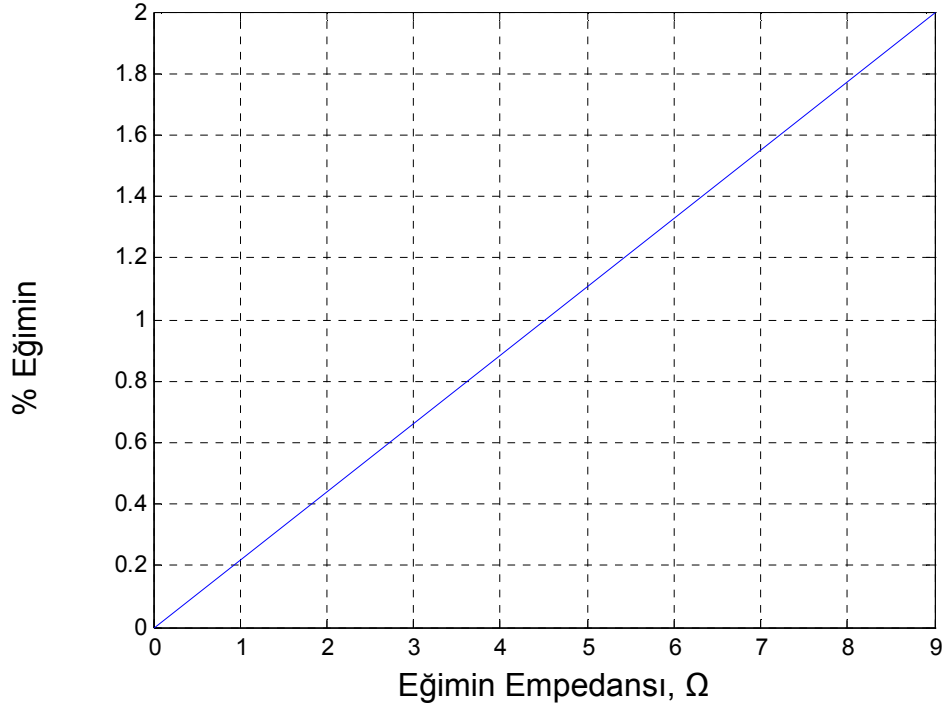
Şekil 3.29. SVK'nın V-I karakteristiği.

Tasarlanan SVK'da gerilim değişikliklerine göre eğim şekil 3.30'daki gibi seçilebilir.



Şekil 3.30. Uygulanan eğime göre gerilim değişiklikleri.

Tasarlanan SVK'da eğim yüzde miktarına göre eğimin empedansı (X_{SL}) Şekil 3.31'deki gibi seçilebilir.



Şekil 3.31. Uygulanan eğimin yüzdesine göre eğimin empedansı.

SVK, gerilim regülasyonu için bir denetleyici olmasına rağmen, bir barada sabit gerilimi sağlamak için, SVK dinamik karakteristiğinde eğim uygulanması bara geriliminde hafif bir deregülasyona rağmen şu avantajları sağlamaktadır. SVK eğimi:

1. Hemen hemen aynı kontrol hedeflerine ulaşmak için, SVK'nın reaktif gücünü önemli ölçüde azaltır;
2. SVK'nın, reaktif güç sınırlarına çok sık ulaşmasını engeller;
3. Paralel olarak faaliyet gösteren birden fazla kompanzatörler arasında reaktif güç paylaşımını kolaylaştırır.

SVK anma gücünün azaltılması

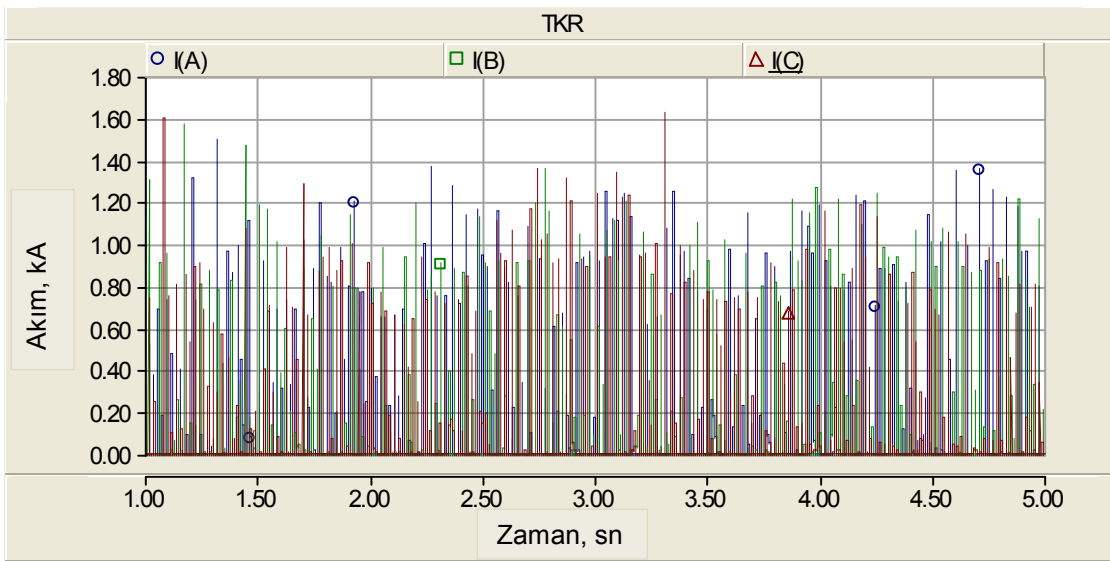
Bu tez kapsamında gerilim regülasyonu için kullanılan SVK , %1 eğim ile tasarlanmıştır. Eğimin kullanılan reaktif güç miktarına etkisini görmek için, PSCAD benzetim ortamında gerilim sınırları içinde SVK'nın kontrol devresi farklı eğimler ile tasarlanmış ve farklı yük koşullarında, farklı eğimler ile kullanılan reaktif güç miktarı ölçülmüş ve Çizelge 3.6'da açıklanmıştır. Çizelge 3.6'da görüldüğü gibi, aynı yükler için eğim arttığında gerilim regülasyonu için kullanılan reaktif güç miktarı azalır.

Çizelge 3.6. Seçilen Eğimin(X_{SL}), SVK'da Kullanılan Reaktif Güçte Etkisi.

Yük	%0.5 Eğim İle Reaktif Gücü, MVar	%1 Eğim İle Reaktif Gücü, MVar	%1.5 Eğim İle Reaktif Gücü, MVar	%2 Eğim İle Reaktif Gücü, MVar
Nominal yük (10 MW, 3.2 MVar)	6.70	6.70	6.70	6.70
3 MW, 1.18 MVar	2.83	2.53	2.28	2.08
14 MW, 4.6 MVar	9.91	9.48	9.10	8.77

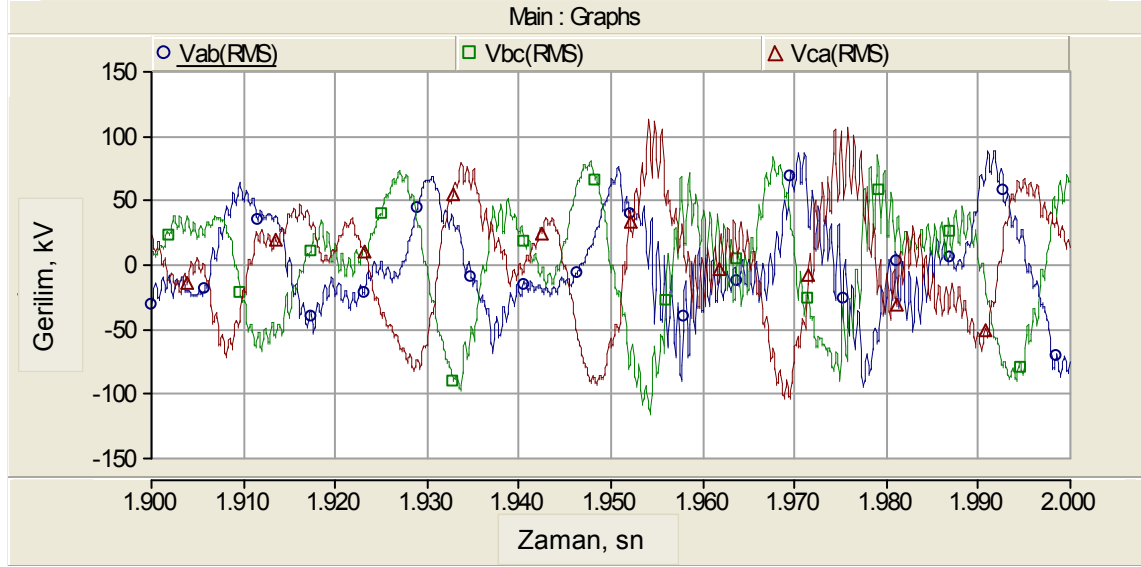
Reaktif güç sınırlarında sık çalışmasının önlenmesi

Eğimin SVK dinamik karakteristiğine uygulanmasının ana nedeni, SVK'nın kararlı çalışmasını korumaktır. Bunun için verilen örnek sistemlerde gerilim regülasyonu amacı ile kurulan ve kullanılan SVK'da eğimin sistem kararlığında etkisini göstermek için benzetim ortamında yüklerin hepsi devreden çıkarılmış ve sistem yüksüz (No-Load) koşulda çalıştırılmıştır. Bu incelemeler TKR'nin faz akımlarının etkin değerleri örnek alınarak yapılmıştır. Eğer SVK dinamik karakteristiğinde eğim uygulanmamış ise, Şekil 3.32'de görüldüğü gibi, TKR'nin tamamen kararsız bir durumda çalışmakta olduğu görülebilir.



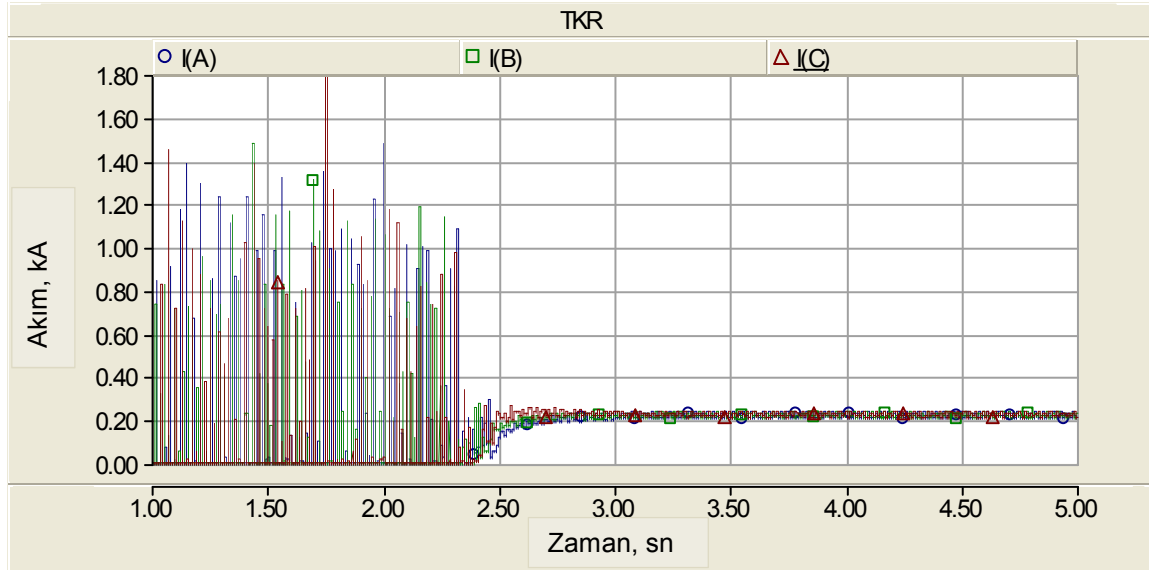
Şekil 3.32. Eğim uygulanmadığı zaman TKR'nin faz akımının etkin değeri.

TKR'nin kararsız çalışması, güç sisteminin kararsızlığına neden olabilir ve bu kararsızlık, Şekil 3.33'te görüldüğü gibi, gerilimin sürekli değişmesine ve gerilim dalga şeklinin bozulmasına sebep olur. Ayrıca, TKR'nin kararsız çalışması sırasında gerilim dalga şekli büyük ölçüde harmonik bileşenleri içermektedir. Bu nedenlerden dolayı TKR'nin kararsız çalışmasının önlenmesi gerekir.



Şekil 3.33. Eğimsiz SVK'da yükün hat gerilimlerinin dalga şekilleri.

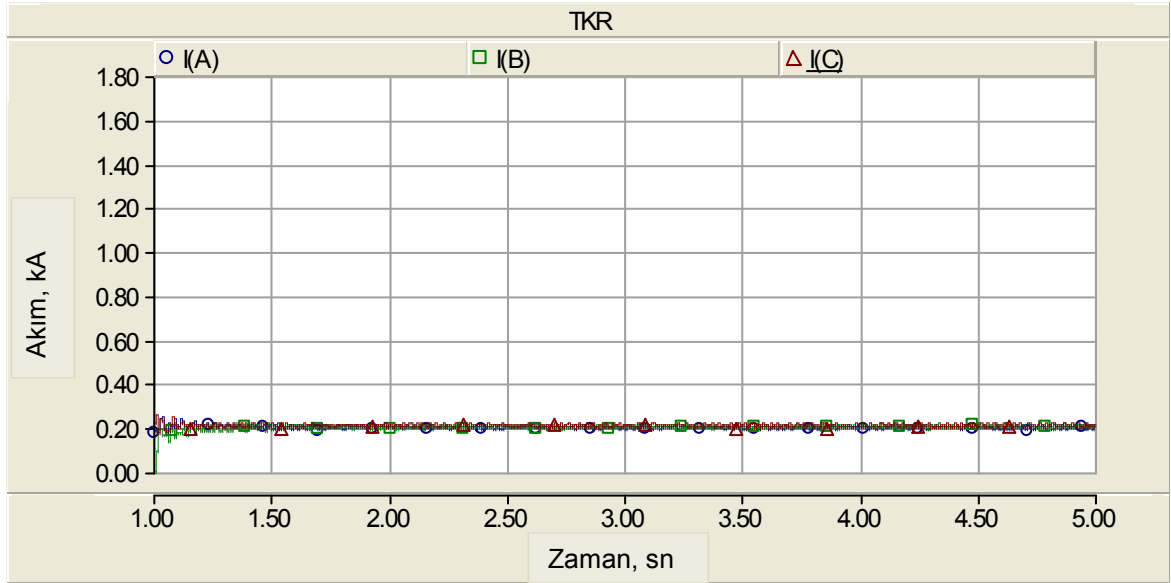
Eğer aynı koşullarda SVK dinamik karakteristiğinde %1 eğim uygulanırsa, Şekil 3.34'te görüldüğü gibi, TKR bir süre kararsız çalışmasının ardından kararlı duruma çalışmaya başlıyor.



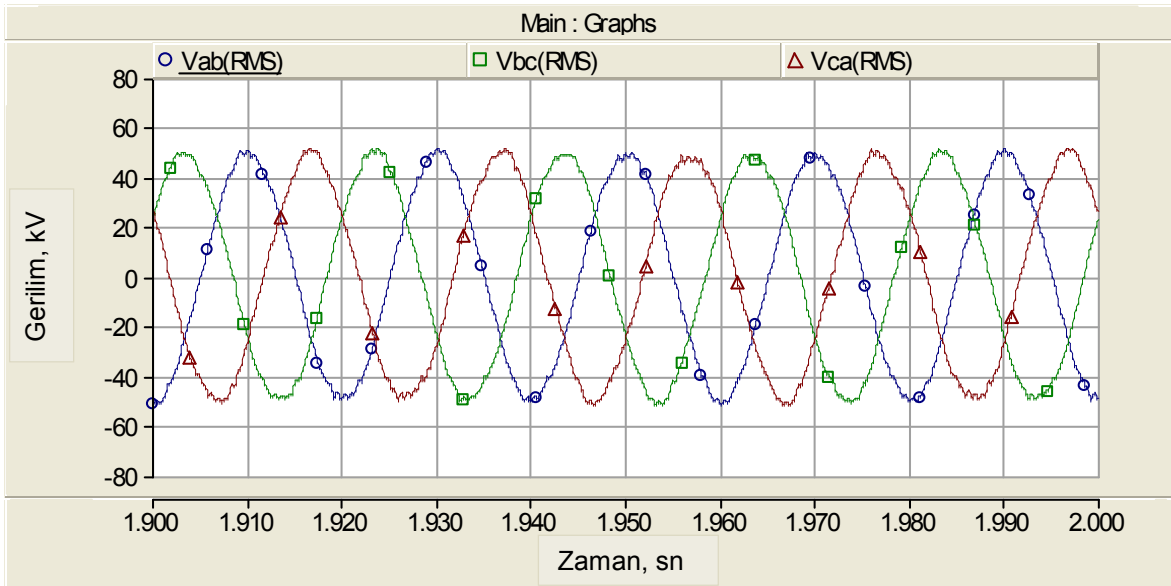
Şekil 3.34. %1Eğim uygulandığı zaman TKR'nin faz akımlarının etkin değeri.

Aynı koşullarda eğer SVK dinamik karakteristiğinde %2 eğim uygulanırsa, Şekil 3.35'te görüldüğü gibi, TKR kararlı çalışmaya başlıyor. SVK dinamik karakteristiğinde eğimin uygulanmasının avantajlarından birisi de, bir den fazla kullanılan SVK'ler arası yük paylaşımının sağlanması ve SVK'ların daha verimli

hale getirilmesidir. Ancak bu tezde tek bir SVK gerilim regülasyonu için kullanıldığından bu özelliğin incelenmesi yapılmamıştır.



Şekil 3.35 %2 Eğim uygulandığı zaman TKR'nin faz akımlarının etkin değeri.

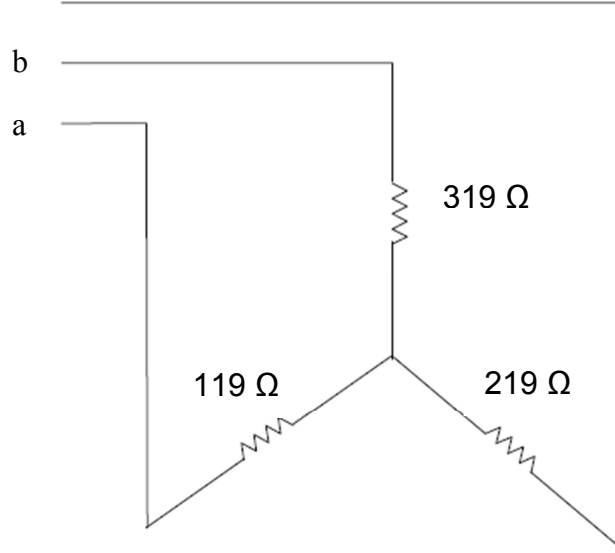


Şekil 3.36. SVK dinamik karakteristiğinde %2 eğim uygulandığı zaman yükün hatlar arası gerilimlerinin dalga şekilleri.

3.4.10. SVK'nın dinamik karakteristiğinde eğimin dezavantajı:

SVK dinamik karakteristiğinde eğimin avantajları olsa da, dengesiz yük koşullarında, SVK'nın gerilim dengesizliğini gidermedeki performansının

düşmesine sebep olur. Yük ve gerilim dengesizliği ile ilgili konular ve SVK'nın çalışma prensibi Bölüm (4.8)'de açıklanmıştır. Eğimin dengesizlik durumlarda etkisini görmek için örnek sistemi-1'deki yükler arasında, Şekil 3.37'de gösterildiği gibi dengesizlik yaratılmış ve benzetim bu sistem üzerinde yapılmıştır.



Şekil 3.37. Örnek güç sistemi-1'de uygulanan dengesiz yük.

İncelemeler bu dengesiz yük ve sistemin farklı durumları için farklı eğimler ile yapılmış ve sonuçlar Çizelge 3.7'de açıklanmıştır. Çizelge 3.7'de de görüldüğü üzere, kontrol sistemi tarafından ayarlanan eğim değıştikçe, gerilim dengesizliği de değışmektedir. İncelemeler, dağıtım ve iletim seviyesindeki dengesizliği SVK ile azaltmak için eğim değerin küçük seçilmesi gerektiğini açıklamaktadır. Bu değerin çok küçük seçilmesi durumunda ise, önceki bölümde açıklandığı gibi, SVK sistemi kararlılığını yitirebilir.

Çizelge 3.7. Seçilen eğimin dengesizliğe etkisi.

Sistem Durumu	SVK'lı Sistem %0.5 Eğim İle	SVK'lı Sistem %1 Eğim İle	SVK'lı Sistem %1.5 Eğim İle	SVK'lı Sistem %2 Eğim İle	SVK'sız Sistem
Çaprazlama Yapılmamış Hattın Dengesizliği	%0.56	%0.9	%1.45	%2.0	%3.2
Çaprazlama Yapılmış Hattın Dengesizliği	%0.52	%0.87	%1.35	%1.8	%3.0

4. BENZETİM SONUÇLARI

4.1. Gerilim Düzenlenmesinde Kullanılan Farklı Yöntemlerin İncelenmesi

Önerilen güç sistemi-1 ve 2’de Bölüm 3.2’de anlatıldığı gibi, elektriksel yüklerin yoğun talebi nedeniyle, dağıtım şebekeleri zorlanır ve bu yükün gerilim düşümü ile sonuçlanır. Bu da hem dağıtım şebekesinin hem de bu şebekeden beslenen yüklerin performansının düşmesine sebep olur. Tüketicilere kaliteli bir elektriksel güç sunmak için dağıtım şebekesinin performansının iyileşmesi gerekmektedir. Hat üzerindeki gerilimi kontrol etmek için iki ana yöntem vardır. Bu yollardan ilki artan güç talebinin karşılanması için yeni elektrik enerji üretim santralleri veya yeni hatların tesis edilmesidir. Diğerisi ise kompanzasyon sistemlerin devreye alınmasıdır. İlk çözüm yolu hem pahalı, hem de zaman alıcı bir yöntem olduğu için ikinci alternatif daha makul bir seçim olarak gözükmektedir.

Şebekede kompanzasyon iki yöntemle yapılmaktadır. İlk yöntem pasif elemanlar ile kompanze etmek ve ikinci yöntem güç elektroniği tabanlı FACTS cihazları ile kompanze etmektir. Genelde şebekede yükler zamana göre değişmektedir. İlk kompanzasyon yöntemi bu değişikliklere tepki göstermemektedir. Ancak, FACTS cihazları bu değişikliklere duyarlı olarak farklı koşullar için farklı tepkiler göstermektedir. FACTS cihazları pasif elemanlar ile kıyaslandığında, en büyük dezavantajları şebekeye harmonik enjekte etmeleridir. Burada bu iki yöntemin etkisini görmek için her ikisi de örnek güç sistemi-1’de uygulanmış ve performansları incelenmiştir. Bunların yanı sıra hat kayıplarının azaltılmasının bir başka yöntemi, hatların demet (bundel) yapılmasıdır. Bu yöntem dağıtım hatlarında pek kullanılmamaktadır. Ancak, bu yöntemin etkisini gerilim düşmesinin üzerinde görmek için burada performansı sistem üzerinde incelenmiştir.

Gerilim regülasyonu ve hat kayıplarının azaltılmasında kullanılan farklı yöntemler, sistemin farklı durumlarında incelenmiş ve sonuçlara Çizelge 4.1’de yer verilmiştir. Burada kompanzasyon sistemi, SVK olarak seçilmiştir. Çizelge 4.1’deki sonuçlar hatların farklı empedansından kaynaklanan dengesizliğin, çaprazlama ile yok edilmesi koşulu için tekrarlanmıştır. Ayrıca, sistemin bu durumu için, hatların demet (bundel) ve paralel yapılmasının, maliyetlerinin yüksek olmalarına rağmen uygun çözüm olmadıklarını göstermektedir. Bunların yanı sıra SVK’nın, hem

çaprazlama yapılmış, hem de çaprazlama yapılmamış hat koşullarında gerilimi tamamen 34.5 kV'ta regüle etmekte başarılı olduğu görülmektedir. Bu yöntemler ile gerilim sınırlarına göre maksimum güç transferi Çizelge 4.2'de açıklanmıştır. Çizelge 4.2'de maksimum güç transferi açısından, SVK başka yöntemler ile kıyaslandığında, daha etkili bir çözüm olduğu anlaşılmaktadır. Reaktif güç kompanzasyonu sistemleri, gerilim regülasyonunun yanı sıra yük dengelemede, güç faktörünün 1'e yakın olmasında, sistemin sönmümlenme gücünün artırılmasında, güç transferinin artırılmasında ve tüketicilere kaliteli elektrik güç sağlanmasında etkili oldukları için ve daha az yatırıma neden olmaları, başka yöntemler ile kıyaslandığında uygun ve alternatif çözüm olarak seçilip kullanılmaktadır.

Çizelge 4.1. Örnek güç sistem-1 için farklı yöntemler ile hatlar arası yükün gerilimleri.

Sistem Durumu	V_{ab} , kV	V_{bc} , kV	V_{ca} , kV
Kompanze Edilmemiş ve Çaprazlama Yapılmamış	30.50	30.00	30.00
Kompanze Edilmemiş ve Çaprazlama Yapılmış	30.00	30.00	30.00
Demet Yapılmış (4 iletken ile)	32.60	32.00	32.00
Paralel Hat Kullanılmış	32.00	31.70	31.70
SVK Kullanılmış ve Çaprazlama Yapılmamış	34.50	34.50	34.50
SVK Kullanılmış ve Çaprazlama Yapılmış	34.50	34.50	34.50

Çizelge 4.2. Örnek güç sistemi-1 için farklı yöntemler ile gerilim sınırına göre maksimum güç transferi.

Sistemin Durumu	Maksimum Güç Transferi, MW	Şebekenin Güç Faktörü
Kompanze Edilmemiş	6.78	0.920
Demet Yapılmış (4 iletken ile)	11.57	0.946
Paralel Hat Kullanılmış	10.23	0.948
SVK Kullanılmış	18.84	0.980

4.2. SVK'nın Bağlantı Noktası

Dağıtım hatlarında gerilim regülasyonu ve kontrolü için özellikle zayıf baralarda kompanzasyon sistemleri kullanılır. Bu kompanzasyon sistemlerinin, sistemin ve hattın hangi noktasına bağlandığı büyük öneme sahiptir. Çünkü bu bağlantı noktası, hat üzerinde iletilebilir maksimum güç miktarının arttırılmasında büyük role sahiptir. Bunun yanı sıra bu bağlantı noktası, kompanzasyon için kullanılan reaktif güç miktarında ve gerilim profilinin düzenlenmesinde etkilidir. Reaktif güç miktarının arttırılması, uygulanan cihazın maliyetinin arttırılması anlamına gelir. Bu nedenle kompanzasyon sistemlerin uygulanmasında reaktif güç seviyesini uygun performans ile en aza düşürmek her zaman ilgi çekmektedir ve bu da kompanzasyon cihazlarının bağlantı noktasının uygun seçilmesi ile elde edilebilir. Bu bağlantı noktası her sistem için fark edebilir ve tamamen sistem özelliğine bağlıdır (hatların boyları, yüklerin bağlantı noktası, baraların birbirine bağlantıları vb.).

4.2.1. Örnek güç sistemi-1'de SVK'nın bağlantı noktasının seçilmesi

Örnek güç sistemi-1'de daha öncede açıklandığı gibi, aşırı yüklenme nedeniyle kompanzasyon ihtiyacı duyulmuştur, burada kompanzasyon sisteminin (SVK) hattın hangi noktasında bağlanacağı incelenecektir. Bu amaçla üç farklı nokta seçilmiş ve kompanzasyon sisteminin performansı bu noktalarda incelenmiştir. Yük merkezinde, yani hattın sonundaki gerilimi nominal değere (34.5 kV) regüle etmek için gerekli reaktif güç ve hattın farklı noktalarında gerilim genliği Çizelge 4.3'te verilmiştir. Çizelge 4.3'te görüldüğü gibi yükün bağlandığı noktada gerilimi kontrol etmek için, SVK hattın sonuna bağlandığı zaman, en az reaktif güç ihtiyacı duyulmaktadır ve başka bağlantı noktaları ile kıyaslandığında gerilim daha iyi profile sahip olmaktadır.

Çizelge 4.3. Bağlantı noktasına göre SVK'da kullanılan reaktif güç miktarı.

SVK'nın bağlantı noktası	Kullanılan Reaktif Güç Miktarı, MVar	Hattın Başında Gerilimin Etkin Değeri, kV	Hattın Orta Noktasında Gerilimin Etkin Değeri, kV	Hattın Sonunda Gerilimin Etkin Değeri, kV
SVK'sız sistem	----	33.16	31.67	30.22
SVK hattın başında	15.08	37.86	36.16	34.50
SVK hattın orta noktasında	9.36	35.91	36.16	34.50
SVK hattın sonunda	6.75	35.05	34.70	34.50

Bu durum için gerilim sınırlarına göre transfer edilebilecek maksimum güç, farklı noktalarda incelenmiş ve sonuçlar hattın farklı noktalarında gerilimlerin etkin değerleri ve gerilim sınırlarına göre iletebilecek maksimum güç miktarı şeklinde Çizelge 4.4'de verilmiştir. Çizelge 4.4'ten de görüldüğü üzere, maksimum güç transferi, SVK hattın sonuna bağlandığı zaman elde edilebilir.

Çizelge 4.4. Bağlantı noktasına göre maksimum güç transferi ve ilgili gerilimler.

SVK'nın bağlantı noktası	Maksimum Güç Transferi, P, MW	Hattın Başında Gerilimin Etkin Değeri, kV	Hattın Orta Noktasında Gerilimin Etkin Değeri, kV	Hattın Sonunda Gerilimin Etkin Değeri, kV
SVK'sız sistem	6.78	33.48	32.28	31.09
SVK hattın başında	15.60	36.06	33.63	31.04
SVK hattın orta noktasında	17.50	34.74	34.00	31.05
SVK hattın sonunda	18.84	33.58	32.02	31.06

Aynı durumda bağlantı noktalarına göre şebekenin güç faktörü incelendiğinde, SVK hattın sonuna bağlandığında, Çizelge 4.5'te görüldüğü gibi, şebeke daha iyi güç faktörüne sahip olur.

Çizelge 4.5. Yükler hattın sonunda olduğu zaman, şebekenin güç faktörü.

	SVK'sız sistem	SVK hattın orta noktasında	SVK hattın sonunda
Güç Faktörü	0.92	0.91	0.98

4.2.2. Örnek güç sistemi-2'de SVK'nın bağlantı noktasının seçilmesi

Örnek güç sistemi-2'de SVK'nın bağlantı noktasının seçilmesi için ilk önce devre analizinin yapılması gerekmektedir. Bunun için SVK'yı hat boyunca değişik noktalara bağlayarak hattın farklı noktalarındaki gerilimlerin belirlenmesi ile SVK'nın en uygun bağlantı noktası seçilebilir. Aşağıdaki eşitlikler SVK'nın farklı bağlantı noktalarına göre hattın gerilimlerini ifade etmektedir. Burada L_{SVK} SVK'nın hatta bağlantı noktasını, l hattın üzerinde istenilen km'yi ve $v(l)$ hattın l . noktasındaki hatlar arası gerilimlerin ortalamasını ifade etmektedir. Ayrıca V_n

nominal gerilimi, V_1 , V_2 , V_3 ve V_4 sırasıyla 10., 20., 30., ve 40. km'lerdeki yüklerin hatlar arası gerilimlerinin ortalamasını ifade etmektedir. i_1 , i_2 , i_3 , i_4 ve i_5 sırasıyla 10., 20., 30., 40., ve 50. km'lerdeki yüklerin hat akımlarını, Z_{hat} hattın km başına empedansını ve Z_{SC} sistemin kısa devre empedansını ifade etmektedir.

Eğer SVK hattın başı ve 10. km'ler arasına ($0 \text{ km} \leq L_{SVK} < 10 \text{ km}$) bağlanırsa:

$$v(l) = \begin{cases} V_n & 0 \leq l \leq L_{SVK} \\ V_n - ((i_1 + i_2 + i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - L_{SVK})) & L_{SVK} < l \leq 10 \\ V_1 - ((i_2 + i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 10)) & 10 < l \leq 20 \\ V_2 - ((i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) & 20 < l \leq 30 \\ V_3 - ((i_4 + i_5) \times Z_{hat} \times (l - 30)) & 30 < l \leq 40 \\ V_4 - (i_5 \times Z_{hat} \times (l - 40)) & 40 < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.1)$$

Eğer SVK hattın 10. km'sine ($L_{SVK} = 10 \text{ km}$) bağlanırsa:

$$v(l) = \begin{cases} V_n & 0 \leq l \leq 10 \\ V_n - ((i_2 + i_3 + i_4 + i_5) \times Z_{hat} \times (l - 10)) & 10 < l \leq 20 \\ V_2 - ((i_3 + i_4 + i_5) \times Z_{hat} \times (l - 20)) & 20 < l \leq 30 \\ V_3 - ((i_4 + i_5) \times Z_{hat} \times (l - 30)) & 30 < l \leq 40 \\ V_4 - (i_5 \times Z_{hat} \times (l - 40)) & 40 < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.2)$$

Eğer SVK hattın 10. ve 20. km'ler arasında ($10 \text{ km} \leq L_{SVK} < 20 \text{ km}$) bağlanırsa:

$v(l) =$

$$\begin{cases} (V_n - 1.3Z_{SC}) - (1.3Z_{hat} \cdot l) & 0 \leq l \leq 10 \\ V_n - ((i_1 - 1.3) \cdot Z_{hat} \cdot (L_{SVK} - l)) & 10 < l \leq L_{SVK} \\ V_n - ((i_2 + i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - L_{SVK})) & L_{SVK} < l \leq 20 \\ V_n - ((i_2 + i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (20 - L_{SVK})) & \\ -((i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) & 20 < l \leq 30 \\ V_n - ((i_2 + i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (20 - L_{SVK})) & \\ -((i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) - ((i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 30)) & 30 < l \leq 40 \\ V_n - ((i_2 + i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (20 - L_{SVK})) - ((i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) & \\ -((i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 30)) - (i_5 \times Z_{hat} \times (l - 40)) & 40 < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.3)$$

Eğer SVK hattın 20. km'sine ($L_{SVK} = 20$ km) bağlanırsa:

$$v(l) = \begin{cases} (V_n - 1.3Z_{SC}) - (1.3Z_{hat} \cdot l) & 0 \leq l \leq 10 \\ V_1 + ((i_1 - 1.3) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 10)) & 10 < l \leq 20 \\ V_n - ((i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) & 20 < l \leq 30 \\ V_3 - ((i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 30)) & 30 < l \leq 40 \\ V_4 - (i_5 \cdot Z_{hat} \cdot (l - 40)) & 40 < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.4)$$

Eğer SVK hattın 20. ve 30. km'ler arasında ($20 \text{ km} \leq L_{SVK} < 30 \text{ km}$) bağlanırsa:

$$v(l) = \begin{cases} (V_n - 19.47Z_{SC}) - (19.47Z_{hat} \cdot l) & 0 \leq l \leq 10 \\ V_1 + ((i_1 - 19.47) \times Z_{hat} \cdot (L_{SVK} - l)) & 10 < l \leq 20 \\ V_n - ((i_1 + i_2 - 19.47) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) & 20 < l \leq L_{SVK} \\ V_n - ((i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - L_{SVK})) & L_{SVK} < l \leq 30 \\ V_n - ((i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (30 - L_{SVK})) & \\ -((i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 30)) & 30 < l \leq 40 \\ V_4 - ((i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (30 - L_{SVK})) - (i_5 \cdot Z_{hat} \cdot (l - 40)) & 40 < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.5)$$

Eğer SVK hattın 30. km'sine ($L_{SVK} = 30$ km) bağlanırsa:

$$v(l) = \begin{cases} (V_n - 19.47Z_{SC}) - (19.47 \times Z_{hat} \times l) & 0 \leq l \leq 10 \\ V_1 + ((i_1 - 19.47) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 10)) & 10 < l \leq 20 \\ V_2 + ((i_1 + i_2 - 19.47) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) & 20 < l \leq 30 \\ V_n - ((i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 30)) & 30 < l \leq 40 \\ V_4 - (i_5 \cdot Z_{hat} \cdot (l - 40)) & 40 < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.6)$$

Eğer SVK hattın 30. ve 40. km'ler arasında ($30 \text{ km} \leq L_{SVK} < 40 \text{ km}$) bağlanırsa:

$$v(l) = \begin{cases} (V_n - 32.8Z_{SC}) - (32.8 \times Z_{hat} \times l) & 0 \leq l \leq 10 \\ V_1 - ((i_1 - 32.8) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 10)) & 10 < l \leq 20 \\ V_2 + ((i_1 + i_2 - 32.8) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) & 20 < l \leq 30 \\ V_n - ((i_1 + i_2 + i_3 - 32.8) \cdot Z_{hat} \cdot (L_{SVK} - l)) & 30 < l \leq L_{SVK} \\ V_n - ((i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - L_{SVK})) & L_{SVK} < l \leq 40 \\ V_n - ((i_4 + i_5) \cdot Z_{hat} \cdot (l - L_{SVK})) - (i_5 \cdot Z_{hat} \cdot (l - 40)) & 40 < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.7)$$

Eğer SVK hattın 40. km'sine ($L_{SVK} = 20$ km) bağlanırsa:

$$v(l) = \begin{cases} (V_n - 32.8Z_{SC}) - (32.85 \cdot Z_{hat} \cdot l) & 0 \leq l \leq 10 \\ V_1 + ((i_1 - 32.8) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 10)) & 10 < l \leq 20 \\ V_2 + ((i_1 + i_2 - 32.8) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) & 20 < l \leq 30 \\ V_3 + ((i_1 + i_2 + i_3 - 32.8) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 30)) & 30 < l \leq 40 \\ V_n - (i_5 \cdot Z_{hat} \cdot (l - 40)) & 40 < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.8)$$

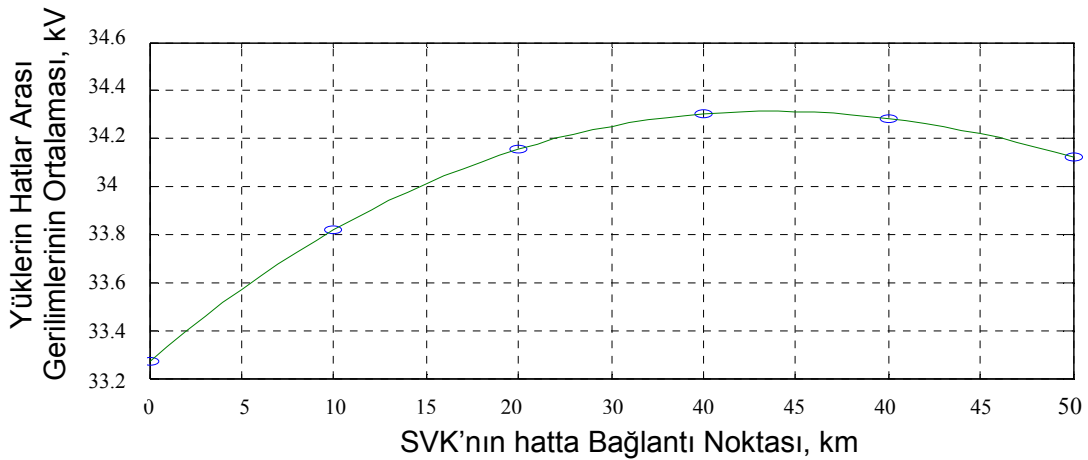
Eğer SVK hattın 40. ve 50. km'ler arasında ($40 \text{ km} \leq L_{SVK} < 50 \text{ km}$) bağlanırsa:

$$v(l) = \begin{cases} (V_n - 47.1Z_{SC}) - (47.1Z_{hat} \cdot l) & 0 \leq l \leq 10 \\ V_1 - ((47.1 - i_1) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 10)) & 10 < l \leq 20 \\ V_2 + ((i_1 + i_2 - 47.1) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 20)) & 20 < l \leq 30 \\ V_3 + ((i_1 + i_2 + i_3 - 47.1) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 30)) & 30 < l \leq 40 \\ V_n - ((i_1 + i_2 + i_3 + i_4 - 47.1) \cdot Z_{hat} \cdot (L_{SVK} - l)) & 40 < l \leq L_{SVK} \\ V_n - (i_5 \cdot Z_{hat} \cdot (l - L_{SVK})) & L_{SVK} < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.9)$$

Eğer SVK hattın 50. km'sine ($L_{SVK} = 20$ km) bağlanırsa:

$$v(l) = \begin{cases} (V_n - 47.1Z_{SC}) - (47.1Z_{hat} \cdot l) & 0 \leq l \leq 10 \\ V_1 - ((47.1 - i_1) \cdot Z_{hat} \cdot (l - 10)) & 10 < l \leq 20 \\ V_2 + ((i_1 + i_2 - 47.1) \times Z_{hat} \times (l - 20)) & 20 < l \leq 30 \\ V_3 + ((i_1 + i_2 + i_3 - 47.1) \times Z_{hat} \times (l - 30)) & 30 < l \leq 40 \\ V_4 + ((i_1 + i_2 + i_3 + i_4 - 47.1) \times Z_{hat} \times (l - 40)) & 40 < l \leq 50 \end{cases} \quad (4.10)$$

Bu eşitliklere göre hat boyunca SVK farklı noktalara bağlandığında tüm yüklerin gerilimlerinin ortalaması Şekil 4.1'deki gibi değişmektedir.



Şekil 4.1. SVK'nın hatta bağlantı noktasına göre tüm yüklerin hatlar arası gerilimlerinin ortalaması.

Şekil 4.1’de de görüldüğü gibi SVK hattın 30., 40., ve 50. km’lerine bağlandığında yükler iyi bir gerilim profiline sahip olurlar.

Yukarıdaki eşitliklerde analiz, SVK’nın farklı bağlantı noktasına göre hat gerilimi nominal gerilime eşit kalacak şekilde yapılmıştır. Eğer yüklerin gerilimi nominal gerilime eşit kalacaksa bu durumda SVK’nın bağlantı noktası iki yük arasında ve bu yüklerin gerilimlerini nominal gerilime eşit tutacak şekilde seçilebilir.

Eğer 10. ve 20. km’lerdeki yüklerin gerilimleri nominal gerilime eşit kalacaksa, SVK’nın bağlantı noktası aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Burada Z_{x1} 10. km’deki yük ve SVK’nın hatta bağlantı noktasının arasındaki hat empedansını ohm cinsinden ve Z_{y1} SVK’nın hatta bağlantı noktası ile 20. km’deki yükün arasındaki hattın empedansını ohm cinsinden ifade etmektedir. Ayrıca l_{x1} 10. km’deki yük ve SVK’nın hatta bağlantı noktasının aralığını km cinsinden ve l_{y1} SVK’nın hatta bağlantı noktası ile 20. km’deki yükün aralığını km cinsinden ifade etmektedir. Devre analizine göre 10. km’deki yük 33.8 A, 20., 30., 40., ve 50. km’lerdeki yüklerde toplam 139 A akım çekmektedir. Buna göre:

$$V_n + i_1 \cdot Z_{x1} = V_n + (i_2 + i_3 + i_4 + i_5) \cdot Z_{y1} \quad (4.11)$$

$$Z_{y1} = 0.67 \, \Omega \quad , \quad l_{y1} = 2 \, km \quad (4.12)$$

$$Z_{x1} = 2.7 \, \Omega \quad , \quad l_{x1} = 8 \, km \quad (4.13)$$

Hesaplamalara göre 10. ve 20. km’lerdeki yüklerin gerilimlerinin 34.5 kV’a eşit tutulması için SVK’nın 18. km’ye bağlanması gerekmektedir. Bu durumda SVK’nın hatta bağlantı noktasında hatlar arası gerilimlerinin ortalaması 34.60 kV ve yüklerin de gerilimleri Çizelge 4.6’daki gibi olacaktır.

Çizelge 4.6. SVK hattın 18 km’sine bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

Yük	10. km’deki yük	20. km’deki yük	30. km’deki yük	40. km’deki yük	50. km’deki yük
Yükün Hatlar Arası Gerilimlerinin ortalaması, V	34500	34500	34153	33923	33808

Eğer 20. ve 30. km'lerdeki yüklerin gerilimleri nominal gerilime eşit kalacaksa, SVK'nın bağlantı noktası aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Burada Z_{x2} 20. km'deki yük ve SVK'nın hatta bağlantı noktasının arasındaki hat empedansını ohm cinsinden ve Z_{y2} SVK'nın hatta bağlantı noktası ile 30. km'deki yükün arasındaki hattın empedansını ohm cinsinden ifade etmektedir. Ayrıca l_{x2} 20. km'deki yük ve SVK'nın hatta bağlantı noktasının aralığını km cinsinden ve l_{y2} de SVK'nın hatta bağlantı noktası ile 30. km'deki yükün aralığını km cinsinden ifade etmektedir. Devre analizine göre 10. ve 20. km'lerdeki yükler toplam 68.8 A, 30., 40., ve 50. km'lerdeki yüklerde toplam 104 A akım çekmektedir. Buna göre:

$$V_n + (i_1 + i_2 - 1.3).Z_{2x} = V_n + (i_3 + i_4 + i_5).Z_{y2} \quad (4.14)$$

$$Z_{y2} = 1.34\Omega \quad , \quad l_{y2} = 4 \text{ km} \quad (4.15)$$

$$Z_{x2} = 2 \Omega \quad , \quad l_{x2} = 6 \text{ km} \quad (4.16)$$

Hesaplamalara göre 20. ve 30. km'lerdeki yüklerin gerilimlerinin 34.5 kV'a eşit tutulması için SVK'nın 26 km'ye bağlanması gerekmektedir. Bu durumda SVK'nın hatta bağlantı noktası hatlar arası gerilimlerin ortalaması 34.64 kV ve yüklerin gerilimleri ise Çizelge 4.7'deki gibi olacaktır.

Çizelge 4.7. SVK hattın 26. km'sine bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

Yük	10. km'deki yük	20. km'deki yük	30. km'deki yük	40. km'deki yük	50. km'deki yük
Yükün Hatlar Arası Gerilimlerinin ortalaması, V	34386	34500	34500	34266	34150

Eğer 30. ve 40. km'lerdeki yüklerin gerilimleri nominal gerilime eşit kalacaksa, SVK'nın bağlantı noktası aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Burada Z_x 30. km'deki yük ve SVK'nın hatta bağlantı noktasının arasındaki hat empedansını ohm cinsinden ve Z_y SVK'nın hatta bağlantı noktası ile 40. km'deki yükün arasındaki hattın empedansını ohm cinsinden ifade etmektedir. Ayrıca l_{x3} 30. km'deki yük ve

SVK'nın hatta bağlantı noktasının aralığını km cinsinden ve l_{y3} SVK'nın hatta bağlantı noktası ile 40. km'deki yükün aralığını km cinsinden ifade etmektedir. Devre analizine göre 10., 20. ve 30. km'lerdeki yükler toplam 68.8 A, 40. ve 50. km'lerdeki yüklerde toplam 104 A akım çekmektedir. Buna göre:

$$V_n + (i_1 + i_2 + i_3 - 19.4).Z_{x3} = V_n + (i_4 + i_5).Z_{y3} \quad (4.17)$$

$$Z_{y3} = 1.84 \, \Omega \quad , \quad l_y = 5.48 \quad (4.18)$$

$$Z_{x3} = 1.52 \, \Omega \quad , \quad l_{x3} = 4.52 \, km \quad (4.19)$$

Hesaplamalara göre 30. ve 40. Km'lerdeki yüklerin gerilimlerini 34.5 kV'a eşit tutulması için SVK 34.52 km'ye bağlanması gerekiyor. Bu durumda SVK'nın hatta bağlantı noktası hatlar arası gerilimlerin ortalaması 34.63 kV ve yüklerinde gerilimleri Çizelge 4.8'deki gibidir.

Çizelge 4.8. SVK hattın 34.52 km'sine bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

Yük	10. km'deki yük	20. km'deki yük	30. km'deki yük	40. km'deki yük	50. km'deki yük
Yükün Hatlar Arası Gerilimlerinin ortalaması, V	34279	34330	34500	34500	34382

Eğer 40. ve 50. km'lerdeki yüklerin gerilimleri nominal gerilime eşit kalacaksa, SVK'nın bağlantı noktası aşağıdaki gibi hesaplanabilir. Burada Z_{x4} 40. km'deki yük ve SVK'nın hatta bağlantı noktası arasındaki hat empedansını ohm cinsinden ve Z_{y4} SVK'nın hatta bağlantı noktası ile 50. km'deki yükün arasındaki hattın empedansını ohm cinsinden ifade etmektedir. Ayrıca l_{x4} 40. km'deki yük ve SVK'nın hatta bağlantı noktasının aralığını km cinsinden ve l_{y4} SVK'nın hatta bağlantı noktası ile 50. km'deki yükün arasını km cinsinden ifade etmektedir. Devre analizine göre 10., 20., 30. ve 40. km'lerdeki yükler toplam 90 A ve 50. km'deki yük 35 A akım çekmektedir. Buna göre:

$$V_n + (i_1 + i_2 + i_3 + i_4 - 47).Z_{x4} = V_n + i_5.Z_{y4} \quad (4.20)$$

$$Z_{y4} = 2.47 \, \Omega \quad , \quad l_y = 7.2 \, km \quad (4.21)$$

$$Z_{x4} = 0.9 \, \Omega \quad , \quad l_{x4} = 2.8 \, km \quad (4.22)$$

Hesaplamalara göre 40. ve 50. Km'lerdeki yüklerin gerilimlerinin 34.5 kV'a eşit tutulması için SVK'nın 42.8 km'ye bağlanması gerekmektedir. Bu durumda SVK'nın hatta bağlantı noktası hatlar arası gerilimlerin ortalaması 34.58 kV ve yüklerin gerilimleri Çizelge 4.9'daki gibidir.

Çizelge 4.9. SVK hattın 42.8 km'sine bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

Yük	10. km'deki yük	20. km'deki yük	30. km'deki yük	40. km'deki yük	50. km'deki yük
Yükün Hatlar Arası Gerilimlerinin ortalaması, V	34133	34138	34260	34500	34500

SVK'nın bu dört orta bağlantı noktası incelendiğinde, SVK hattın 35. Km'sine bağlandığında yüklerin gerilimi en iyi profile sahip olur. Bu nedenle incelemelerde 35. km'de kullanılmıştır.

Örnek güç sistemi-2'de, SVK'yı hattın farklı noktalarına bağlayarak, her durumda hattın farklı noktalarındaki gerilim profilleri incelenmiş ve elde edilen sonuçlar Çizelge 4.6'da açıklanmıştır.

Çizelge 4.10 ve Şekil 4.1'de de görüldüğü gibi, SVK'nın bağlantı noktası hattın sonuna gittiği zaman, bara gerilimleri daha iyi profile sahip olur. Sonuçlar kararlı durum (Steady-State) için SVK hattın son dört noktasına (30, 35, 40, ve 50. km'lerde) bağlandığında gerilim profilinin iyi olduğunu göstermektedir. Ancak, yüklerin en iyi gerilim profili, SVK hattın 35. km'sine bağlandığında elde edilebilir. Buna karşın, SVK hattın sonuna bağlandığında gerilim regülasyonu için en az reaktif güç kullanılır. Bağlantı noktasının seçiminde başka kriterler de etkilidir.

Özellikle yükteki dengesizlik seviyesi ve sistemde oluşan gerilim çukur ve tepeleri ve ani yük değişimleri, tamamen bozulmuş karakteristiklerine, güç sistemine ve bu sisteme bağlanan yük özelliklerine bağlıdır. Bu kriterlerin bağlantı noktasının seçilmesindeki etkileri Bölüm (4.8.), (4.9) ve (4.10.)’da incelenecektir.

Çizelge 4.10. Örnek güç sistemi-2 için SVK’nın bağlandığı noktaya göre gerilim ve SVK’nın reaktif gücü.

	10. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	20. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	30. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	40. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	50. Km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	Kullanılan reaktif güç miktarı, MVar
SVK’sız sistem	32.65	32.18	31.83	31.60	31.50	-----
SVK Hattın Başında	33.94	33.49	33.16	32.945	32.835	5.78
SVK Hattın 10. Km’sinde	34.50	34.04	33.70	33.48	33.37	4.61
SVK Hattın 20. Km’sinde	34.38	34.50	34.15	33.92	33.81	4.93
SVK Hattın 30. Km’sinde	34.28	34.33	34.50	34.26	34.15	4.86
SVK Hattın 35. Km’sinde	34.28	34.33	34.50	34.50	34.38	4.98
SVK Hattın 40. Km’sinde	34.13	34.14	34.26	34.50	34.38	4.70
SVK Hattın 50. Km’sinde	33.98	33.93	34.00	34.19	34.50	4.35

Sonuç olarak, kompanzasyon sistemleri yüke yakın bağlandıkları zaman en iyi etkiye sahip olurlar. Bu, yükler hat sonuna bağlandığında (Radyal sistemlerde) hattın sonu olur ve kompanzasyon sistemleri en iyi performanslarını hem maksimum güç transferi, hem gerilim kontrol ve regülasyonunu ve hem de kullanılan reaktif güç miktarı açısından bu durumda sergilemektedirler. Ancak, yükler hat boyunca dağıtıldığı zaman yük merkezi ve kompanzasyon sisteminin bağlantı noktası tamamen sistem özelliklerine bağlıdır. Bu özellikler kısaca hat uzunlukları, hangi noktada ne kadar yükün olduğu, sistemde oluşan beklenmedik olaylar ve yükün özellikleri ve değişimleri olarak söylenebilir.

4.3. SVK ile Gerilim Regülasyonu

Güç talebinde gözlenen artışlar enerji piyasasında radikal değişmelere yol açmaktadır. Dolayısı ile enerji sanayii için yeni ve zorlu şartlar ortaya çıkmıştır. Güç talebinin bu kadar artması iletim ve dağıtım sistemlerinde aşırı yüklenmeye, gerilim kararlılığının kaybolmasına ve yüksek güç kayıplarına yol açmaktadır. Bu durum sistemdeki yüklerin performanslarının düşmesine, zarar görmelerine veya tamamen sistem dışı kalmalarına sebep olabilir.

Gerilimde gittikçe artan ve kontrol edilemeyen bir düşmeye neden olan yük talebindeki artma veya sistem durumundaki değişme gibi bir bozucu etki olduğu zaman, sistem gerilimi kararsız duruma girer. Kararsızlığa neden olan ana etken, reaktif güç talebini karşılamakta güç sisteminin yetersiz kalmasıdır. Gerilim kararsızlığı normal olarak ağır biçimde yüklenen sistemlerde meydana gelir.

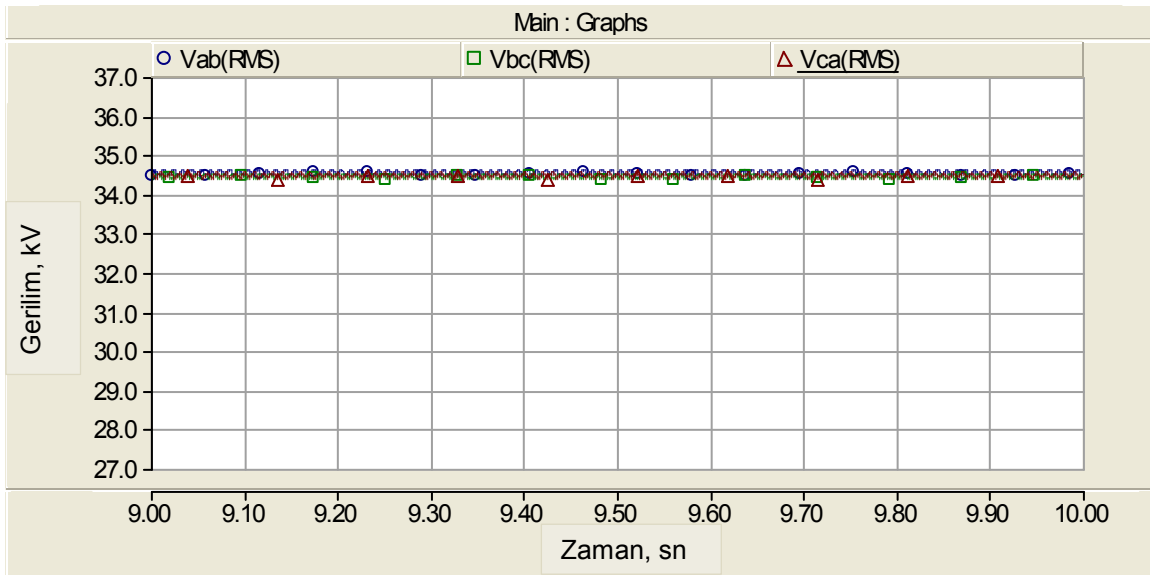
Gerilim düşmesinin ana karakteristiği genliği olarak gözükmektedir. Buna mukabil gerilim düşme süresi de cihazların etkilenmesinde önemli rol oynamaktadır.

Statik VAr kompanzatör (SVK) genelde dinamik yüklerin gerilim regülasyonunu sağlamak için kullanılır. Gerilim regülasyonu modunda tasarlanan SVK'nın kontrol amacı istenilen baranın gerilim profilini korumaktır. Kararlı durumda, SVK bara geriliminin istenilen kararlı durumdaki değerini korumak için tasarlanır. Bara gerilimi, ayarlanan aralığın altına düşmeye başladığında, SVK sisteme reaktif güç (kontrol sınırları içinde) enjekte edecektir. Böylece bara gerilimini artırarak gerilimi istenen seviyede sabit tutacaktır. Eğer bara gerilimi çok artarsa, SVK daha az reaktif güç (kontrol sınırları içinde) enjekte edecek veya TKR daha fazla reaktif güç

absorbe edecek ve bunların sonucu istenilen bara geriliminin elde edilmesi olacaktır. $+Q_{Kap}$ sabit bir değerdir, bu nedenle reaktif gücü en büyük miktarda sisteme enjekte eder, $Q_{Şeb}$, TKR tarafından $-Q_{End}$ büyüklükte reaktif güç absorbe ederek kontrol edilir. SVK'nın tepki hızı, gerilim regülatörünün integral kazancına K_i (Oransal kazanç K_p sıfıra ayarlanır) ve dinamik karakteristiğindeki eğime (reaktans X_{SL}) bağlıdır. SVK gerilim kontrol performansı çeşitli faktörlere bağlıdır. Şebeke rezonanslarının etkisi, transformatör doyumu, jeomanyetik etkiler ve gerilim bozulmalarda dahil olmak üzere bu faktörlerden sayılabilir (Sabai, 2008).

4.3.1. Örnek güç sistemi-1'de gerilim regülasyonunda SVK'nın performansının incelenmesi

Örnek güç sistemi-1'de kararlı durum için uzun dağıtım hat empedansı ve ağır yüklenme nedeniyle ciddi gerilim düşmesi vardır. SVK baraya bağlandığında, çıkış reaktif gücünü ayarlayarak, Şekil 4.2'de görüldüğü gibi, bara gerilimini istenilen değerde sabit tutmayı başarmaktadır. Nominal yükteki herhangi bir değişikliğe karşı, SVK çıkış reaktif gücünü istenilen değere, TKR tristörlerinin tetikleme açısının değişimi ile kontrol devresine bağlı olarak ayarlayacak ve böylece bara gerilimini her zaman istenilen aralıkta koruyacak. SVK'nın gerilim regülasyonu konusunda pasif elemanlara göre en önemli avantajı bu özelliğidir.



Şekil 4.2. Örnek güç sistemi-1'de SVK kullanıldığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

4.3.2. Örnek güç sistemi-2’de gerilim regülasyonunda SVK’nın performansının incelenmesi

Örnek güç sistemi-2 için önceki bölümde SVK’nın en uygun bağlantı noktası olarak dört nokta seçilmiştir. Bu dört farklı nokta arasında SVK’nın gerilim regülasyonu için en uygun yer hattın 35. km’sidir. Ancak, diğer üç noktada da SVK bara gerilimlerin regülasyonunda iyi performansa sahiptir. Bu dört bağlantı noktası için baraların gerilimi Çizelge 4.11’de verilmiştir. Çizelge 4.11’de verilen bilgilere göre, SVK hat üzerindeki yüklerin gerilim regülasyonu konusunda başarılı olduğunu kanıtlamaktadır. Ayrıca, bu bilgilere göre, SVK yalnız bağlandığı baraya değil, diğer baralarda da gerilimlerin düzenlenmesinde etkilidir.

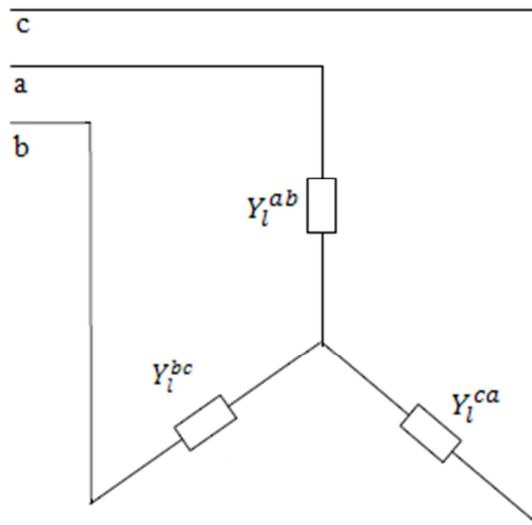
Çizelge 4.11. Örnek güç sistemi-2’de SVK kullanıldığında bara gerilimleri.

	Hattın Başında Gerilimin Etkin Değeri, kV	10. km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	20. km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	30. km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	40. km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	50. km’de Gerilimin Etkin Değeri, kV	Kullanılan Reaktif Güç Miktarı, MVar
SVK’sız sistem	33.25	32.65	32.18	31.83	31.60	31.50	-----
SVK Hattın 30. km’sinde	34.75	34.52	34.44	34.50	34.25	34.12	4.86
SVK Hattın 35. km’sinde	34.75	34.52	34.44	34.50	34.51	34.38	4.98
SVK Hattın 40. km’sinde	34.66	34.42	34.30	34.33	34.50	34.37	4.70
SVK Hattın 50. km’sinde	34.54	34.26	34.12	34.12	34.25	34.50	4.35

4.4. SVK ile Gerilimin Dengelenmesi

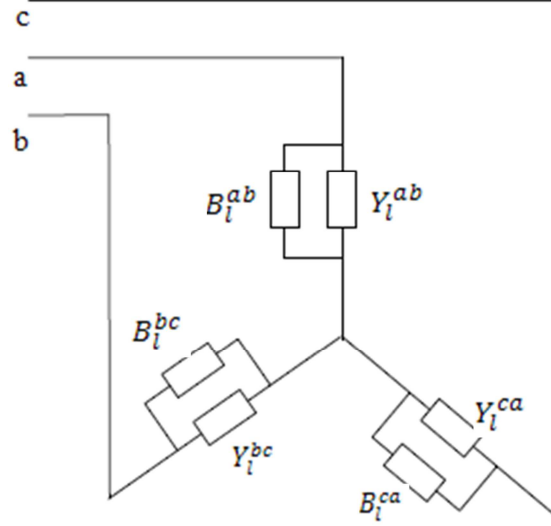
Dağıtım sisteminde yükler her zaman değişir ve normalde dengesizdir. Dengesizlik dağıtım sistemlerinde, hatlarda fazlar arası çaprazlama yapılmaması nedeniyle dengesiz hat empedansı, fazların farklı yükleri beslemesi ve tek veya iki fazlı hatlarla elektrik enerjisinin dağıtılması nedenleriyle ortaya çıkabilir. Sistemin dengesizliğinde, kayıplar artar ve sanayi makinaları ve jeneratörler üzerinde olumsuz etkilere neden olur. Ayrıca dengesizlik indüksiyon motoru gibi birçok tüketicilerde çalışma bozukluklarına ve ısı artışı ile verimliliklerinin düşmesine sebep olur. Dağıtım ve iletim hatlarında kayıpları minimum düzeye getirmek, dengeli üç faz akımları ile elde edilebilir. Bu nedenle sistem akımlarının her zaman dengeli bir durumda olmaları için çaba gösterilir. Ayrıca, dengesiz bir durumda, geri dönüş nötr akımı, boş iletken fiderinde rezistif kaybı şiddetlendirir ve dağıtım transformatörlerinin bakır ve demir kayıplarını artırır. Yük dengeleme, akımlarının negatif ve sıfır bileşenlerinin kaldırılmasına dayanır. Eski zamanda, yük dengeleme, şönt reaktif elemanların manuel veya otomatik anahtarlama ile yapılıyordu. Ancak, bu yöntem dinamik ve etkin bir şekilde sistem yükünü dengelemekte yetersiz kalıyordu. Temel olarak, dengesiz bir yükün akımları, sıfır, negatif ve pozitif sıralı bileşenleri içermektedir. Akımın sıfır sıralı bileşeni bir delta-wye topraklı transformatör tarafından bloke edilebilir (Chen, 1999).

4.4.1. Reaktif güç kompanzasyon ile yük dengeleme esasları



Şekil 4.3. Üç fazlı dengesiz yük.

Şekil 4.3'te admitansları Y bağlı bir şebeke verilmiştir. Eğer Y_l^{ab} , Y_l^{bc} , Y_l^{ca} değerleri eşit değilse, şebekede bir dengesizlik ortaya çıkacaktır. Yükü dengelemek için, reaktif bileşenlerin dengelenmesi veya ortadan kaldırılması gereklidir. Şekil 4.34'te görüldüğü gibi her faz için bir kompanzatör (B_l^{ab} , B_l^{bc} , B_l^{ca}) paralel bağlayarak, admitansın sanal bileşeni ortadan kaldırılabilir.



Şekil 4.4. Sanal geçirici ve reaktif gücün ortadan kaldırılması.

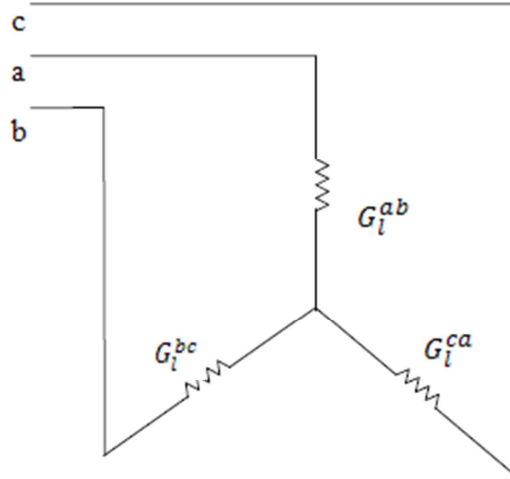
Admitansı tamamen aktif hale getirmek için, faz admitanslara negatif fazlı sanal geçirici B_l^{ab} paralel bağlanır.

$$Y_l^{ab} = G_l^{ab} - jB_l^{ab} \quad (4.23)$$

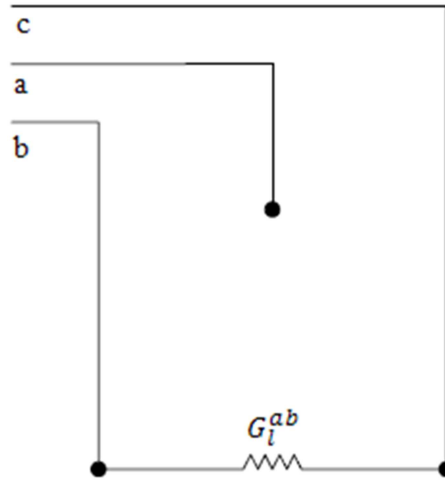
Bu nedenle, kompanzatörün sanal geçiricisi B_Y^{ab} aşağıdaki gibi ifade edilebilir.

$$B_Y^{ab} = -B_l^{ab} \quad (4.24)$$

Şekil 4.5'de verilen yükte aynı kompanzatörü kullanarak dengeli olur. Her faz ayrı ayrı dengeli olduğu için burada incelemeler tek fazlı bir sistem üzerinde yapılacaktır.



Şekil 4.5. Güç faktörü bir ile dengesiz yük.



Şekil 4.6. Güç faktörü bir ile tek faz dengesiz Yük.

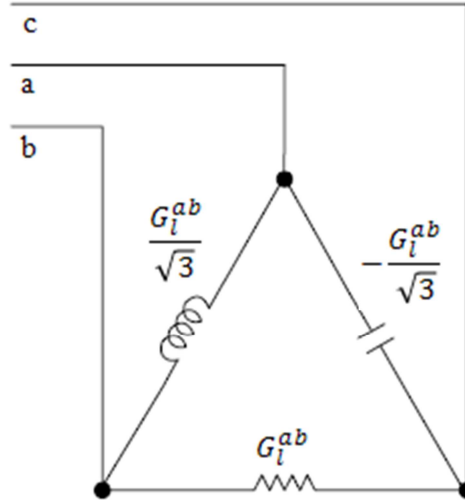
Şekil 4.36'da verilen sistemde aktif yükü dengelemek için, b ve c fazları arasında bir kapasitif sanal geçirici eklenmesi gerekir:

$$B_Y^{ab} = \frac{G_l^{ab}}{\sqrt{3}} \quad (4.25)$$

Buna ek olarak, a ve c fazları arasında aşağıdaki endüktif sanal geçiricinin eklenmesi gerekecektir:

$$B_Y^{ab} = -\frac{G_l^{ab}}{\sqrt{3}} \quad (4.26)$$

Bu sanal geçiriciler eklendikten sonra devre Şekil 4.37'de görüldüğü gibi olur.



Şekil 4.7. Tek fazlı sistemde güç faktör bir ile pozitif sıralı yük dengeleme.

Devrede Üçgen-Yıldız dönüşümü yaparak aşağıda verilen eşitlikten elde edilir.

$$\frac{1}{Y_a} = \frac{\frac{1}{Y_{ab}} \times \frac{1}{Y_{ca}}}{\frac{1}{Y_{ab}} + \frac{1}{Y_{ca}} + \frac{1}{Y_{ba}}} \quad (4.27)$$

$$\frac{1}{Y_a} = \frac{\frac{1}{G_l^{ab}} \times \frac{1}{j \frac{G_l^{ab}}{\sqrt{3}}}}{\frac{1}{G_l^{ab}} + \frac{1}{j \frac{G_l^{ab}}{\sqrt{3}}} + \frac{1}{-j \frac{G_l^{ab}}{\sqrt{3}}}} \quad (4.28)$$

$$\frac{1}{Y_a} = \frac{\sqrt{3}}{-j G_l^{ab}} \quad (4.29)$$

$$Y_a = \frac{-j G_l^{ab}}{\sqrt{3}} \quad (4.30)$$

$$Y_b = \frac{j G_l^{ab}}{\sqrt{3}} \quad (4.31)$$

$$Y_c = \frac{j G_l^{ab}}{\sqrt{3}} \quad (4.32)$$

Simetrik bileşenler dönüşümü için, dönüşüm matrisi aşağıdaki gibi olur:

$$C = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h & h^2 \\ 1 & h^2 & h \end{bmatrix} \quad (4.33)$$

$$C^* = \frac{1}{\sqrt{3}} \begin{bmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & h^2 & h \\ 1 & h & h^2 \end{bmatrix} \quad \text{ve } h = e^{j2\pi/3} \quad (4.34)$$

$$V = ZI \quad (4.35)$$

$$V' = C^* Z C I' \quad (4.36)$$

Z_a , Z_b ve Z_c 'nin üç fazın karmaşık empedansları olduğunu varsayarsak, simetrik bileşenlerin empedans matrisi aşağıdaki gibi olacaktır:

$$Z = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_a + Z_b + Z_c & Z_a + hZ_b + h^2Z_c & Z_a + h^2Z_b + hZ_c \\ Z_a + hZ_b + h^2Z_c & Z_a + Z_b + Z_c & Z_a + hZ_b + h^2Z_c \\ Z_a + h^2Z_b + hZ_c & Z_a + h^2Z_b + hZ_c & Z_a + Z_b + Z_c \end{bmatrix} \quad (4.37)$$

Eğer kaynak geriliminin negatif ve sıfır sıralı bileşenleri sıfır ise, eşitlik (4.38)'de verildiği gibi gerilimin pozitif bileşeni V^+ , akım bileşenleri I^+ , I^- ve I^0 (sırasıyla pozitif, negatif ve sıfır sıra) ile yazılabilir.

$$\begin{bmatrix} V^+ \\ V^- \\ V^0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} Z_a + Z_b + Z_c & Z_a + hZ_b + h^2Z_c & Z_a + h^2Z_b + hZ_c \\ Z_a + hZ_b + h^2Z_c & Z_a + Z_b + Z_c & Z_a + hZ_b + h^2Z_c \\ Z_a + h^2Z_b + hZ_c & Z_a + h^2Z_b + hZ_c & Z_a + Z_b + Z_c \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I^+ \\ I^- \\ I^0 \end{bmatrix} \quad (4.38)$$

Bu yüzden gerilimin pozitif sıralı bileşeni eşitlik (4.80)'deki gibi yazılabilir.

$$[V^+] = [Z_a + Z_b + Z_c \quad Z_a + hZ_b + h^2Z_c \quad Z_a + h^2Z_b + hZ_c] \begin{bmatrix} I^+ \\ I^- \\ I^0 \end{bmatrix} \quad (4.39)$$

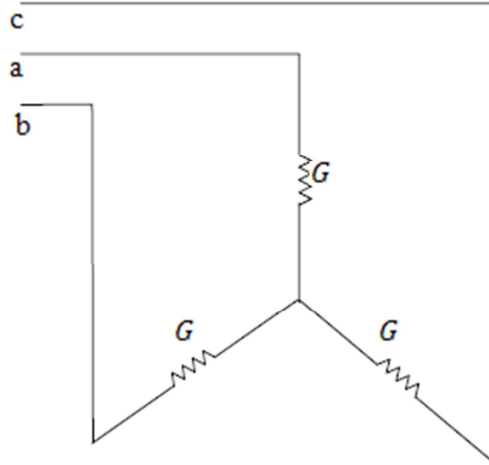
Eşitlik (4.30), (4.31) ve (4.32), eşitlik (4.39) yerine konulduğunda gerilimin pozitif bileşeni eşitlik (4.18) gibi olur.

$$V^+ = \frac{1}{3} \left[\frac{3}{G_l^{ab}} + \frac{\sqrt{3}}{G_l^{ab}} - \frac{\sqrt{3}}{G_l^{ab}} \right] I^+ \quad (4.40)$$

Elde edilen devre Şekil 4.8'deki gibi yıldız devre şeklinde olur. Gerilim ve akımın pozitif bileşenleri sonunda eşitlik (4.41)'da verilmiştir.

$$G_l^{ab} V^+ = I^+ \quad (4.41)$$

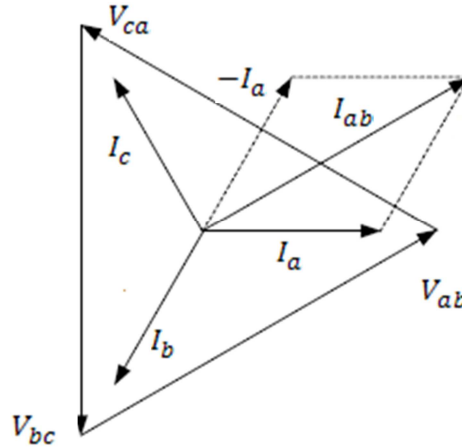
Bu işlem her üç dengesiz faz için uygulandığında, Şekil 4.8'de görüldüğü gibi üç fazlı dengeli bir sistem elde edilir.



$$G = G_l^{ab} + G_l^{bc} + G_l^{ca}$$

Şekil 4.8. Güç faktörü bir ile tek fazlı sistemin yıldız pozitif sıralı eşdeğer devresi.

Yüklerin dengelenmesi gerilim ve akımın pozitif bileşenlerinin dengeli olmasına sebep olacak ve bu surette kaynak geriliminde hiçbir negatif ve sıfır sıralı bileşen olmadığı zaman, sadece pozitif sıralı akımları devreden akacaktır (Şekil 4.9).



Şekil 4.9. Tek fazlı sistemde güç faktör bir ile yükü pozitif sıralısı fazör diyagramı.

4.4.2. Örnek güç sistem-1'de gerilimin dengelenmesinde SVK'nın performansının incelenmesi

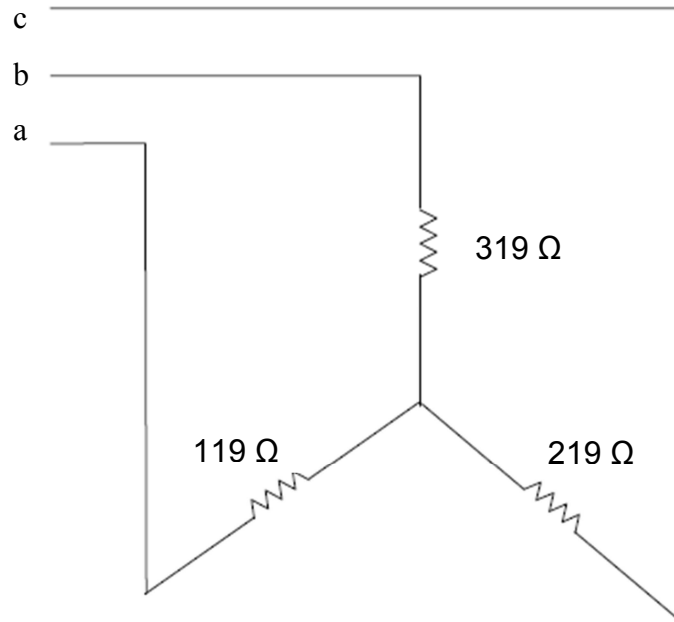
Gerilim dengesizliğinin oranının ($\%V_d$), ortalamaya göre maksimum gerilim sapması (ΔV_d) ve ortalama gerilim (V_{ort}) cinsinden hesabı eşitlik (4.42)'deki gibi belirlenmektedir. Bu dengesizlik oranının standartlarda istenilen sınırlar içinde tutulması gerekir.

$$\%V_d = 100 \times \frac{\Delta V_d}{V_{ort}} \quad (4.42)$$

Dengesizliği yok etmek için kullanılan geleneksel şönt reaktif elemanlar aksine, statik VAr kompanzatör (SVK) tristörlerinin tetikleme açılarını kontrol ederek, hızlı ve düzgün bir reaktif güç üretip veya absorbe edebilir. SVK'da kullanılan üç fazlı TKR, üç fazlı güç sisteminde fazları birbirinden bağımsız olarak kontrol edilebilir. Böylece herhangi bir asimetric üç fazlı yükü dengeler. Kompanzatör yük dengesizliğini yok etmek için faz akımlarının sıfır ve negatif akım bileşenleri ile 180° derece faz farkı olan negatif ve sıfır bileşen akımları aynı miktarda sisteme enjekte eder (Talebi, 2005). Dengesiz koşullarda, TKR daha fazla harmonik üretebilir. SVK sistemi dengeleme yeteneği ile birlikte, aynı anda güç faktörün düzenlenmesi içinde kullanılır. Bu nedenle sistem kaybı azalacak ve sistem güvenilirliği artırılabilecektir (Chen, 1999).

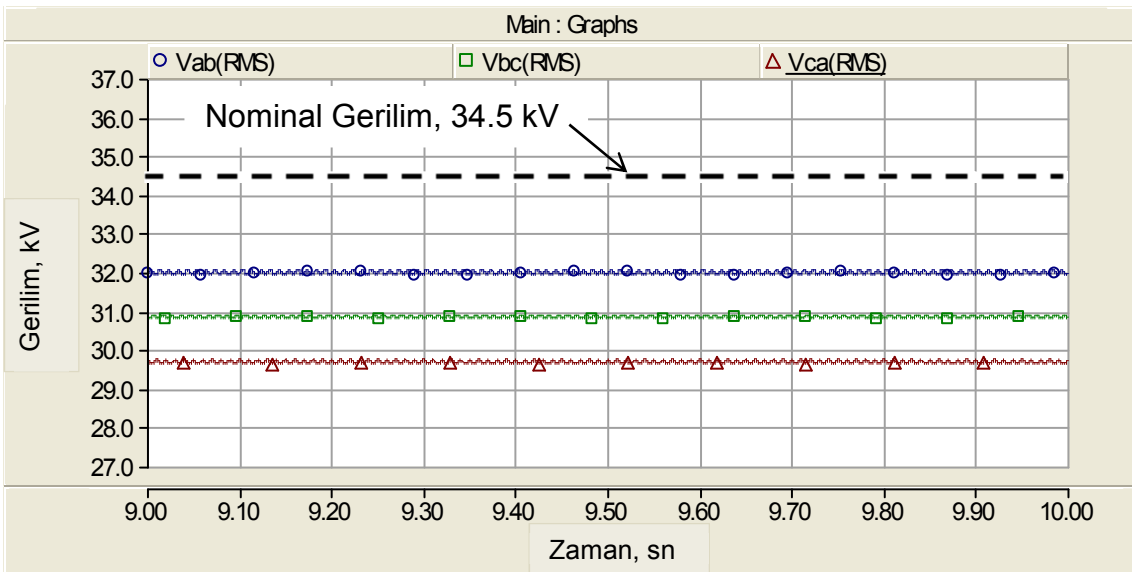
SVK, güç sisteminde dengesizliği yok etmek için tasarlanabilir hem de gerilim regülasyonu için tasarlanan SVK da dengesizliği yok edebilir.

Örnek Güç Sistemi-1 için, tanıtilan sistemde, Şekil 4.10'da görüldüğü gibi, eğer dengeli reaktif yükün (3.2 MVAR) yanı sıra sistemin her fazına farklı yükler bağlanırsa, hat gerilimleri dengesiz olacaktır ve bu da güç sistemi ve tüketiciler açısından istenmeyen bir durumdur. Uygulanan farklı yükler kompanze edilmemiş sistemde, Şekil 4.11'de görüldüğü gibi, hat gerilimleri arasında 1-2 kV fark yaratır. SVK'nın dengesizliği yok etme yönünde, incelemeler sistemin farklı durumları için yapılmış ve sonuçlar Çizelge 4.8'de hat gerilimlerinin etkin değeri ve dengesizlik oranı şeklinde ve Çizelge 4.9'de hat gerilimlerinin pozitif, negatif ve sıfır sıralı bileşenleri şeklinde açıklanmıştır.



Şekil 4.10. Örnek güç sistemi-1’de uygulanan dengesiz yük.

Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13’te verilen bilgilere göre, SVK dengesizlik seviyesini azaltmakta başarılıdır. Dengesizliğin tamamen yok edilmemesinin sebebi, SVK’nın kurulan reaktif gücü ve SVK’nın kontrol devresi ile ilgilidir. Eğer SVK’nın reaktif gücü tasarlanan güçten fazla olsaydı veya SVK kontrol devresi dengesizliği yok etmek için tasarlansaydı bu dengesizlik tamamen yok edilebilirdi. Ayrıca, hatların çaprazlama yapılması dengesizlik seviyesini azaltmaktadır (Çizelge 4.12 ve Çizelge 4.13).



Şekil 4.11. Dengesiz yüklerden kaynaklanan dengesiz hat gerilimleri

Çizelge 4.12. Örnek güç sistemi-1’de farklı durumlar için hat gerilimler ve dengesizlik oranları.

Sistemin Durumu	V_{ab} , kV	V_{bc} , kV	V_{ca} , kV	Dengesizlik Oranı, %
Çaprazlama yapılmamış ve SVK kullanılmamış	32.00	30.90	29.70	3.78
Çaprazlama yapılmamış ve SVK kullanılmış	34.90	34.7	34.54	0.50
Çaprazlama yapılmış ve SVK kullanılmamış	31.77	31.03	29.88	3.27
Çaprazlama yapılmış ve SVK kullanılmış	34.91	34.75	34.60	0.44

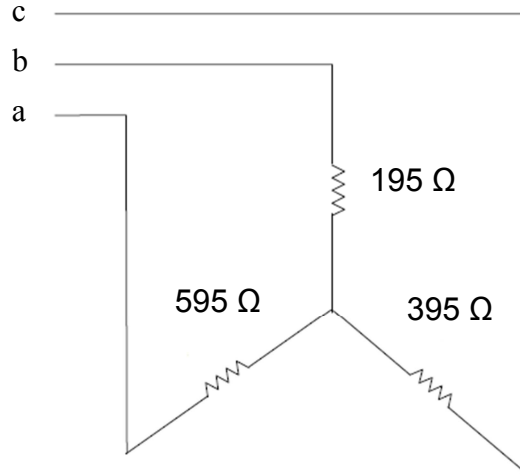
Çizelge 4.13. Örnek güç sistemi-1’de farklı durumlar için hat gerilim bileşenleri.

Sistemin Durumu	V^+ , kV	V^0 , kV	V^- , kV
Çaprazlama yapılmamış ve SVK kullanılmamış	30.88	0.00	1.33
Çaprazlama yapılmamış ve SVK kullanılmış	34.70	0.00	0.35
Çaprazlama yapılmış ve SVK kullanılmamış	30.94	0.00	1.11
Çaprazlama yapılmış ve SVK kullanılmış	34.68	0.00	0.30

4.4.3. Örnek güç sistemi-2’de gerilimin dengelenmesinde SVK’nın performansının incelenmesi

Örnek Güç Sistemi-2 için, SVK’nın dengesizliği yok etmekteki performansını incelemek için, dengeli reaktif yükün (3.2 MVAR) yanı sıra her faz için Şekil 4.12’deki farklı yükler bağlanmıştır. Yüklerin boyutları bağlantı noktalarda aynıdır.

Örnek Güç Sistemi-2 için bölüm (4.1.2)’de gerilim regülasyonu için dört farklı nokta seçilmiştir. Kararlı durumda SVK 35. km’ye bağlandığında, gerilim profili açısından en iyi performansa sahip olmuştur. Ancak, SVK’nın bağlantı noktasının seçilmesinde başka kriterler de etkilidir. Bu kriterlerden birisi sistemdeki dengesiz yük seviyesidir. Çizelge 4.14’te kompanze edilmemiş sistemin hat gerilimlerinin etkin değerleri ve dengesizlik oranları, ilgili km’lerde verilmiştir. Bu durumda dengesizlik oranı fazla olduğu için, bu dengesizlikleri azaltma veya yok edilme ihtiyacı duyulmaktadır.

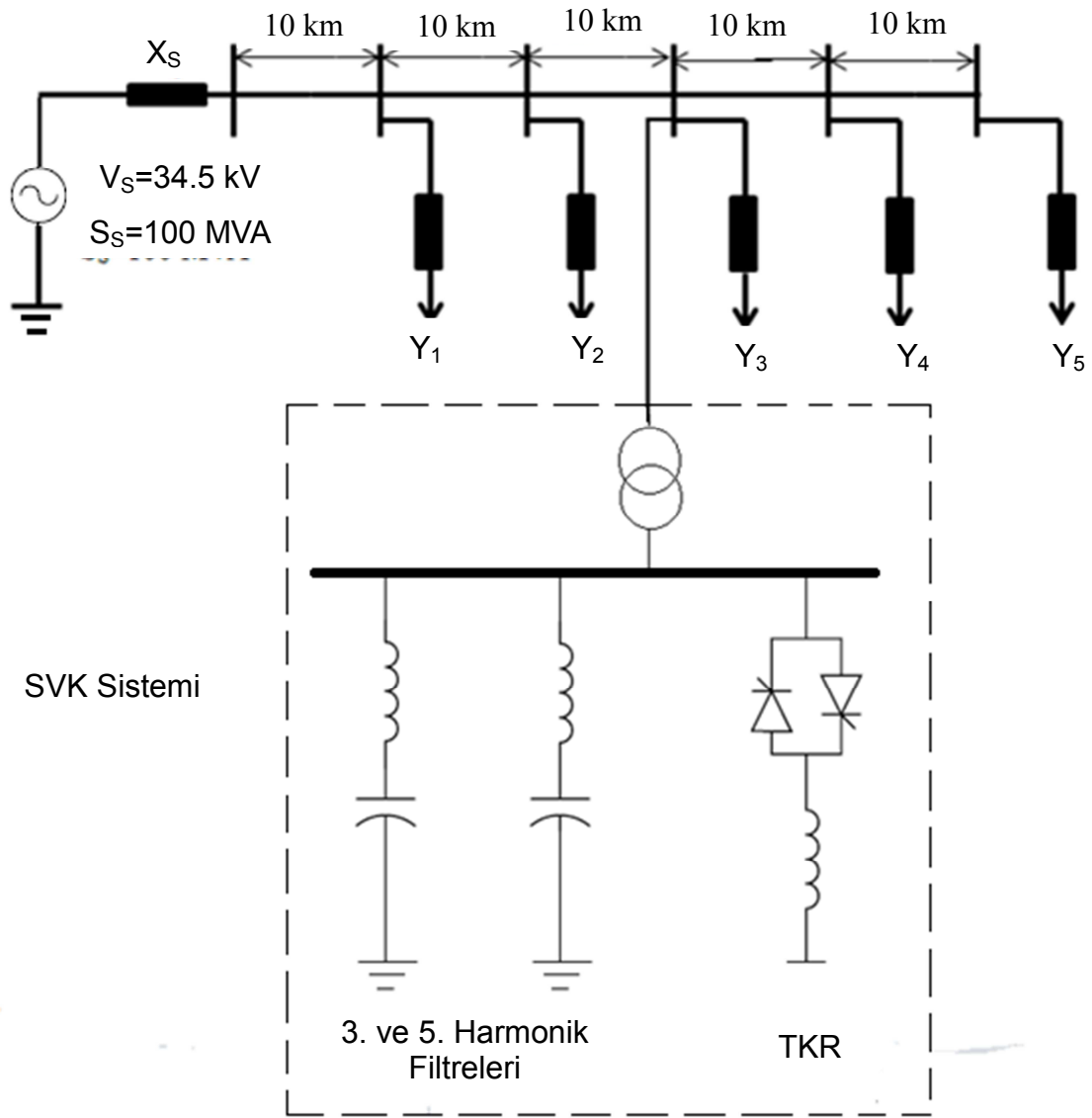


Şekil 4.12. Örnek güç sistemi-2’de uygulanan dengesiz yük.

Çizelge 4.14. Örnek güç sistemi-2’de SVK’sız sistemde yüklerin bağlantı noktasındaki gerilimler ve dengesizlik oranları.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ab} , kV	32.58	31.92	31.40	31.10	30.78	30.60
V_{bc} , kV	31.16	29.82	28.80	28.08	27.54	27.30
V_{ca} , kV	33.50	32.78	32.20	31.87	31.64	31.50
V^+ , kV	32.38	31.47	30.80	30.26	29.93	29.75
V^0 , kV	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V^- , kV	1.41	1.74	2.06	2.31	2.46	2.53
% V_d	3.86	5.33	6.50	7.50	8.16	8.53

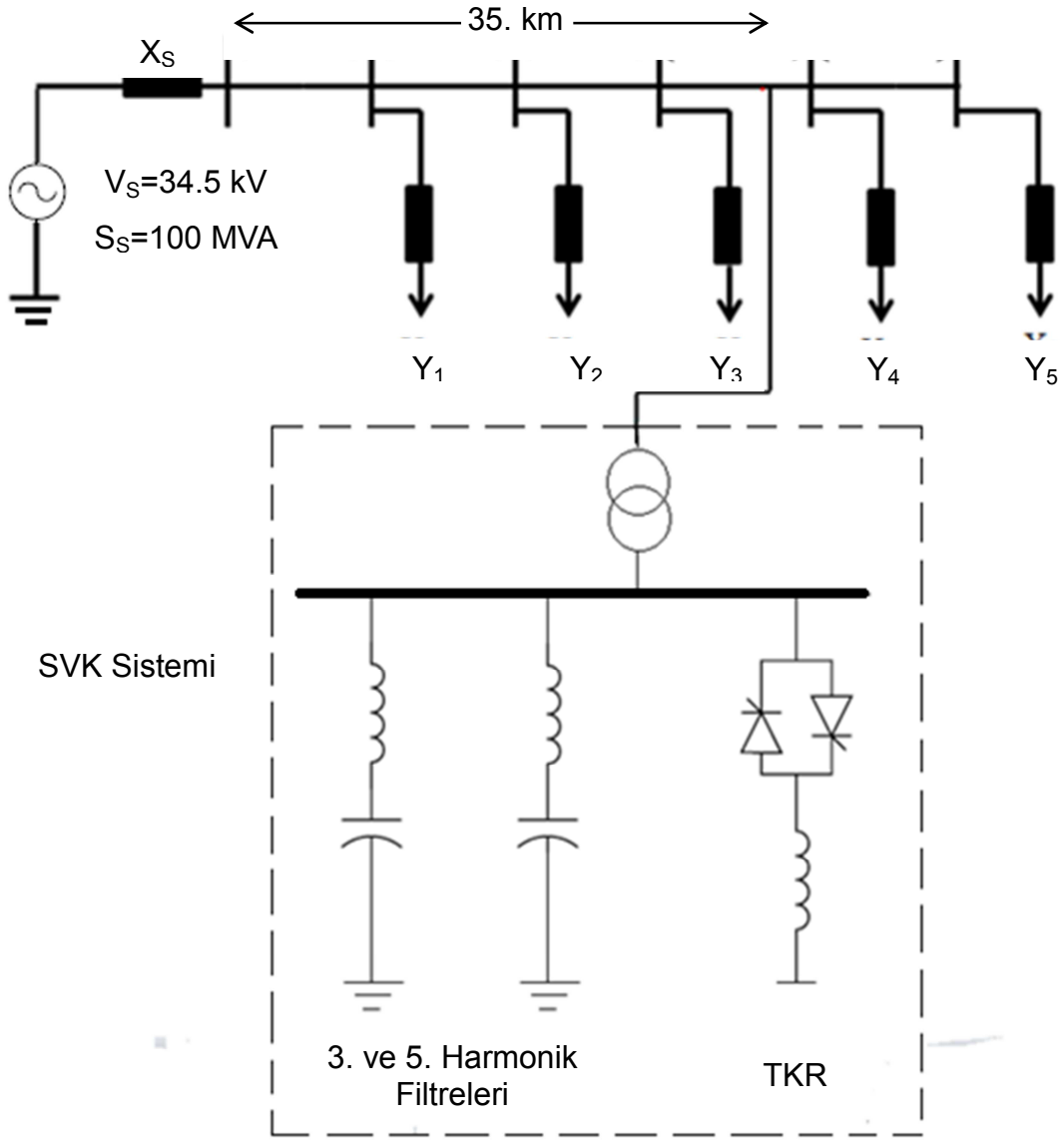
Bahsedilen dört noktada SVK’nın bağlantı noktasının seçilmesi ve SVK’nın dengesizliği yok etmekteki performansını görmek için incelemeler yapılmış ve sonuçlar çizelge halinde verilmiştir. Çizelge 4.15’te SVK hattın 30. km’sine , Çizelge 4.16’da SVK hattın 35. km’sine, Çizelge 4.17’de SVK hattın 40. km’sine ve Çizelge 4.18’de SVK hattın 50. km’sine bağlandığında ilgili hat gerilimleri ve dengesizlik oranları açıklanmaktadır. Şekil 4.13, Şekil 4.14, Şekil 4.15 ve Şekil 4.16 örnek güç sistemi-2’nin SVK’nın bağlantı noktasına göre tek hat şemaları verilmiştir. Çizelgelerde, SVK’nın dengesizliğin seviyesini azaltmakta başarılı ve yeterli olduğunu gösterilmektedir. Ayrıca, hatların dengesiz yüklenmiş durumlarında, hattın sonu dengesizlik açısından en zayıf nokta olduğu için, SVK hattın sonuna bağlandığında, dengesizlik seviyesini azaltmakta en iyi performansa sahip olur.



Şekil 4.13. Örnek güç sistemi-2’de SVK hattın 30. km’sine bağlandığında tek hat şeması.

Çizelge 4.15. SVK hattın 30. km’sine bağlandığında, yüklerin bağlantı noktalarında hat gerilimleri, gerilimlerin bileşenleri ve dengesizlik oranları.

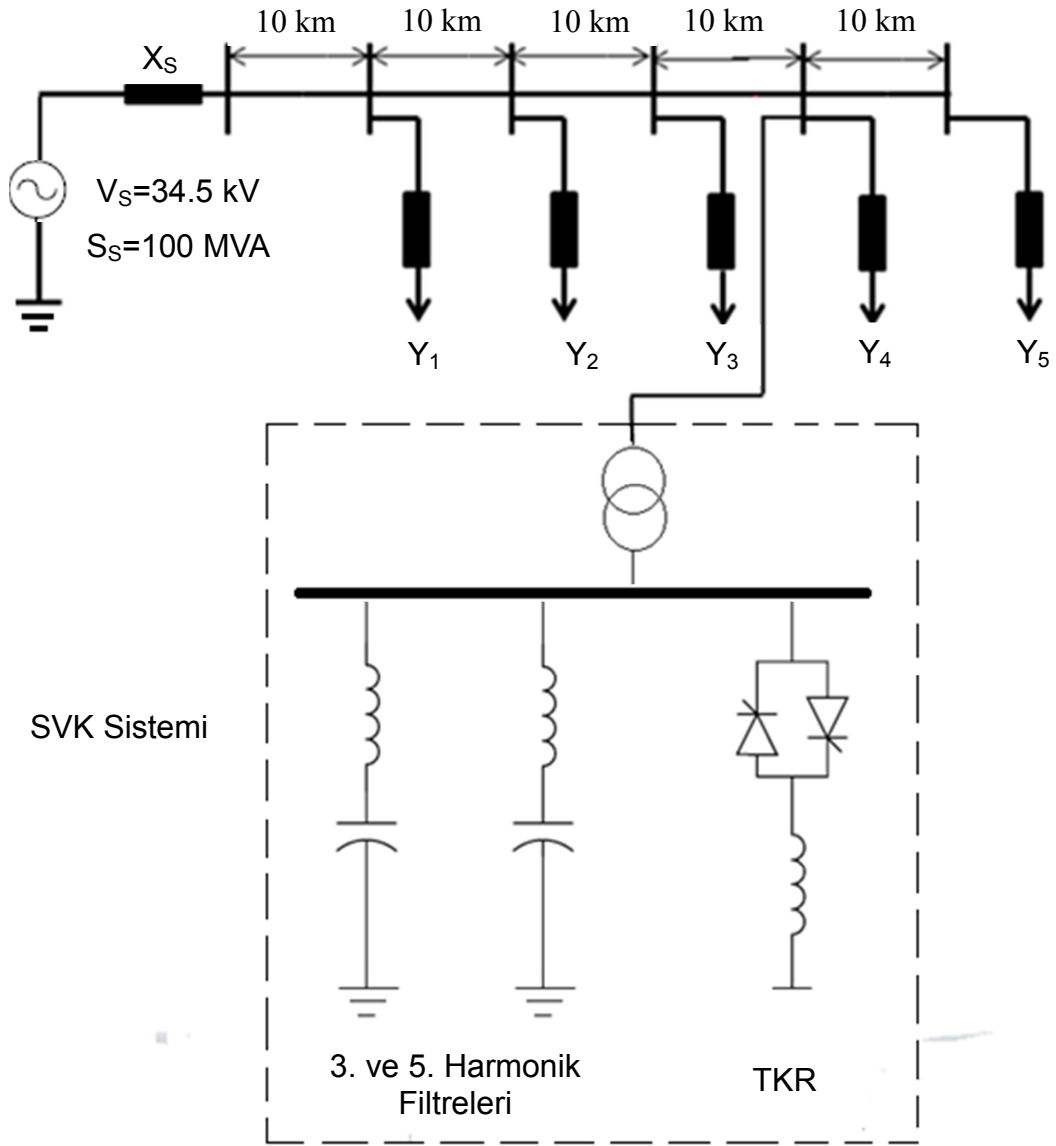
	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ab} , kV	34.24	33.91	33.8	33.76	33.54	33.39
V_{bc} , kV	33.79	33.07	32.71	32.68	32.15	31.87
V_{ca} , kV	34.92	34.65	34.50	34.60	34.37	34.25
V^+ , kV	34.30	33.86	33.66	33.68	33.31	33.14
V^0 , kV	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V^- , kV	0.67	0.91	1.06	1.12	1.30	1.39
$\%V_d$	1.50	2.30	2.80	3.00	3.60	4.00



Şekil 4.14. Örnek güç sistemi-2’de SVK hattın 35. km’sine bağlandığında tek hat şeması.

Çizelge 4.16. SVK hattın 35. km’sine bağlandığında, yüklerin bağlantı noktalarında hat gerilimleri, gerilimlerin bileşenleri ve dengesizlik oranları.

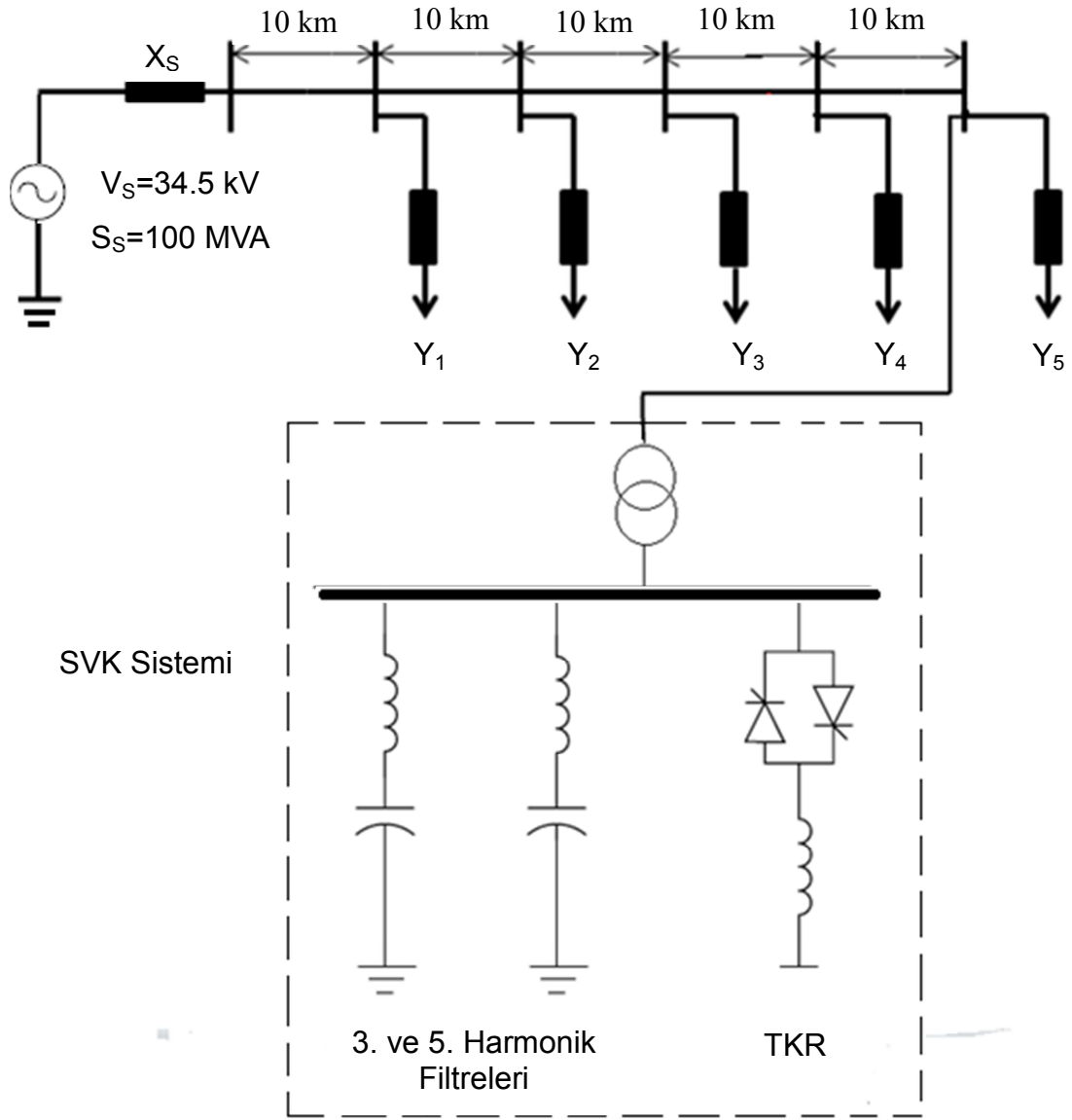
	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ab} , kV	34.23	33.90	33.75	33.78	33.79	33.64
V_{bc} , kV	33.81	33.10	32.75	32.71	32.65	31.38
V_{ca} , kV	34.93	34.65	34.55	34.62	34.64	34.51
V^+ , kV	34.32	33.87	33.67	33.78	33.68	33.50
V^0 , kV	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V^- , kV	0.65	0.90	1.05	1.10	1.16	1.25
$\%V_d$	1.76	2.30	2.77	3.00	3.10	3.37



Şekil 4.15. Örnek güç sistemi-2’de SVK hattın 40. km’sine bağlandığında tek hat şeması.

Çizelge 4.17. SVK hattın 40. km’sine bağlandığında, yüklerin bağlantı noktalarında hat gerilimleri, gerilimlerin bileşenleri ve dengesizlik oranları.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ab} , kV	34.12	33.76	33.60	33.60	33.75	33.60
V_{bc} , kV	33.80	33.08	32.72	32.68	32.95	33.65
V_{ca} , kV	34.84	34.53	34.41	34.43	34.60	34.50
V^+ , kV	34.24	33.80	33.56	33.56	33.77	33.56
V^0 , kV	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
V^- , kV	0.62	0.84	0.98	1.02	0.96	1.05
% V_d	1.70	2.20	2.53	2.65	2.40	2.70



Şekil 4.16. Örnek güç sistemi-2’de SVK hattın 50. km’sine bağlandığında tek hat şeması.

Çizelge 4.18. SVK hattın 50. km’sine bağlandığında, yüklerin bağlantı noktalarında hat gerilimleri, gerilimlerin bileşenleri ve dengesizlik oranları.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
$V_{ab}, \text{ kV}$	33.98	33.60	33.40	33.34	33.44	33.75
$V_{bc}, \text{ kV}$	33.82	33.12	32.80	32.73	32.98	33.52
$V_{ca}, \text{ kV}$	34.72	34.40	34.22	34.21	34.32	34.55
$V^+, \text{ kV}$	34.20	33.70	33.45	33.42	33.58	33.92
$V^0, \text{ kV}$	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00	0.00
$V^-, \text{ kV}$	0.56	0.75	0.85	0.87	0.80	0.63
$\%V_d$	1.60	2.00	2.20	2.30	2.20	1.80

4.5. SVK ile Gerilim Çukurunun Etkisinin Azaltılması

Gerilim çukuru kısa süreli gerilimin etkin değerinin düşmesidir. Gerilim çukuru, kısa devreler, trafoların enerjilendirilmesi ve büyük motorların yol almasında ortaya çıkabilir. Gerilim çukuru çeşitli ekipmanlarda, özellikle ayarlanabilir hızlı sürücülerde, proses kontrol cihazlarda ve bilgisayarlarda çeşitli sorunlara neden oldukları için büyük ilgi çekmektedir. Bazı ekipman veya parçalar bir ya da iki çevrimden daha uzun bir sürede gerilimin etkin değeri % 90'ın altına düştüğünde zarar görebilir veya ekipman tamamen kapanır ve devre dışı kalabilir. Tabii ki bir gerilim çukuru (uzun veya kısa) bir kesinti kadar sanayiye zarar vermiyor. Kısa kesintiler ve birçok uzun kesintiler, nispeten pahalı olmasına rağmen oldukça basit yol ile önlenebilirler. Gerilim çukurunun bir başka önemli yönü sorunun çözülmesinin zor olmasıdır.

Bir gerilim çukurunun ana karakteristiği gerilim çukurunun büyüklüğü ve süresidir (Bollen, 2000). Gerilim çukurunun etkisi, teknik veya mali açıdan tahmin edilebilir. Her iki değerlendirmede gerilim çukurun profiline ihtiyaç vardır. Gerilim çukurunun profili, büyüklüğü, frekansı ve süresidir.

Hata pozisyon yöntemi, gerilim çukurunda gerekli verileri elde etmek için en etkili araçlardan biridir. Güç elektroniği tabanlı kompanzasyon cihazları, gerilim çukurun yarattığı problemler için iyi çözümler sağlar. Bu cihazların kurulumu sadece tüketicilerin değil şebeke performansını da iyileştirir (Zhang, 2007).

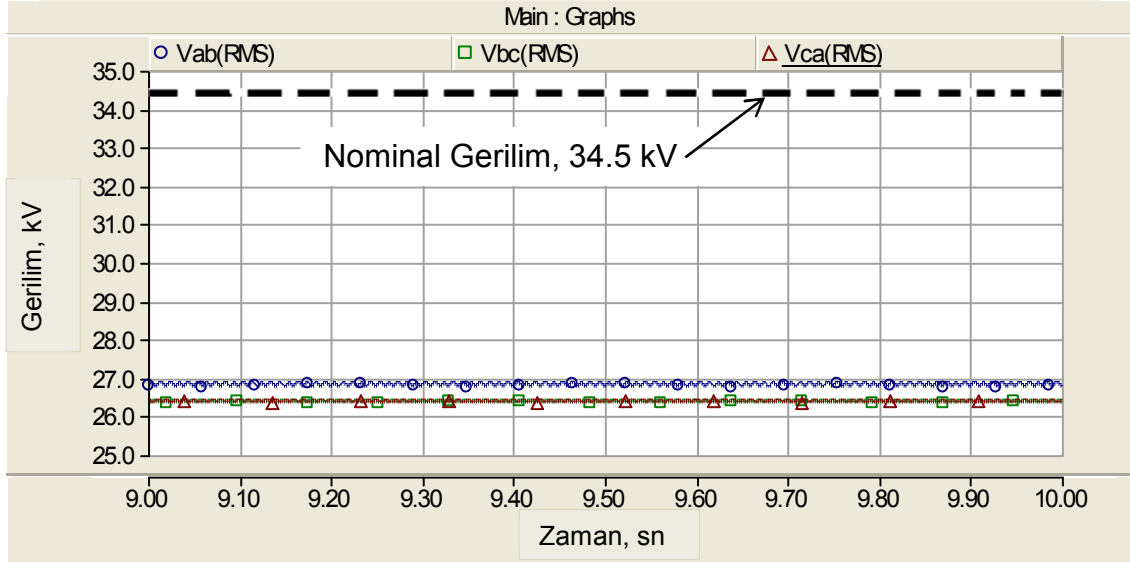
SVK gerilim çukuru gibi güç sistemi bozuklukları sırasında bir dinamik gerilim regülatörü gibi davranır (Zhang, 2010).

FACTS cihazların gerilim çukurunun etkilerini azaltmak için optimum yerleştirilmeleri için birçok yöntem vardır. Zhang et al. (2010), GA'nın (genetic algorithms) bu sorunu çözmek için etkin bir araç olduğunu göstermektedir.

Ayrıca Wang et al. (1998)'da verilen teorik analizlere göre, gerilim çukuru sırasında, SVK tarafından sunulan gerilim çukurunun iyileşmesi ile hassas ekipmanlarda arıza sayısının önemli ölçüde azalabileceği görülmektedir.

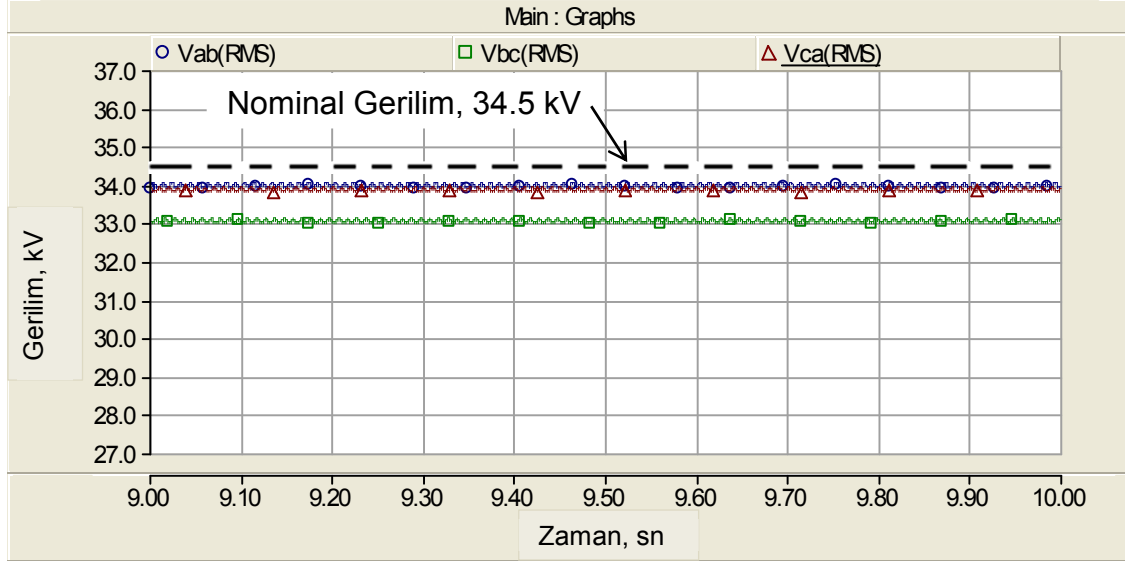
4.5.1. Örnek güç sistemi-1’de gerilim çukurunun etkisinin azaltılmasında SVK’nın performansının incelenmesi

Örnek güç sistemi-1’de, ağır yüklenmenin yanı sıra eğer beklenmedik olaylardan dolayı sistem %12’lik gerilim çukuruna maruz kalırsa, Şekil 4.17’de gösterildiği gibi, gerilim profili daha da kötüleşmekte ve gerilim tamamen çökmektedir.



Şekil 4.17. SVK’sız örnek güç sistemi-1’de gerilim çukurunun etkisi

Bu durumda eğer SVK devrede olursa, Şekil 4.18’de görüldüğü gibi, bara gerilimini belirlenen sınırlar içinde tutacaktır. Gerilim çukuru gibi geçici olaylar sırasında, SVK’nın tepki süresi ve hızı çok önemlidir. SVK tepki hızını artırmak için gerilim regülatörünün tümlevsel kazancı ve SVK dinamik karakteristiğinde kullanılan eğim uygun değerlerde seçilmelidir. Ayrıca, SVK tepki hızının artırılması SVK’nın kararsız çalışmasına neden olabilir. SVK’nın kararsız çalışması sistemin kararsızlığına neden olacaktır. Bu sebeplerden dolayı özellikle gerilim regülatörünün tümlevsel kazancı uygun değerde seçilmelidir. Gerilim regülatörün tümlevsel kazanç ve SVK kontrol terimlerinin hesapları Mathur (2002)’de verilmiştir. Ayrıca, Wang (1998) incelemeleri kaynak empedansı yüksek olan bir sistemde, SVK’nın gerilim çukuru sırasında daha iyi bir düzeltme etkisi olduğunu göstermektedir.



Şekil 4.18. Önerilen güç sistemi-1 için %12 gerilim çukurunda SVK'nın etkisi.

4.5.2. Örnek güç sistemi-2'de gerilim çukurunun etkisinin azaltılmasında SVK'nın performansının incelenmesi

Örnek güç sistemi-2 için, bölüm (4.2.2)'de açıklandığı gibi, gerilimi kararlı durumlarda (Steady-State) kontrol ve regüle etmek için dört bağlantı noktası seçilmiştir; bu bağlantı noktalarının seçim kriterlerinden birisi, SVK'nın gerilim çukurlarında, hangi bağlantı noktasında en iyi performansa sahip olduğudur. Eğer sistemde bir saniyelik bir sürede gerilim %12 düşerse, Çizelge 4.19'da görüldüğü gibi, baraların gerilim profili çökmüş bir hale gelmektedir. SVK'nın gerilim çukurları sırasında performansını incelemek için ve bunun yanı sıra hangi bağlantı noktasında en iyi performansa sahip olduğunu görmek için, SVK bahsedilen farklı dört noktada bağlanmış ve sonuçlar gerilim ve gerilim regülasyonu şeklinde, Çizelge 4.20'de SVK 30. km'de, Çizelge 4.21'de SVK 35. km'de, Çizelge 4.22'de SVK 40. km'de ve Çizelge 4.23'te SVK 50. km'de bağlandığı durumlar için verilmektedir.

Çizelge 4.19. Kompanze edilmemiş hat için %12 gerilim çukurunda yüklerin hatlar arası gerilimleri.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ort} , kV	29.26	28.73	28.32	28.00	27.80	27.70

Çizelge 4.20. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim çukurunda, SVK 30. km'ye bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ort} , kV	32.5	32.7	32.2	33.7	33.53	33.4
Gerilim Regülasyonu, %	6.4	5	6.5	2.1	2.1	2.1

Çizelge 4.21. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim çukurunda, SVK 35. km'ye bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ort} , kV	32.3	32.6	33.0	33.5	33.8	33.7
Gerilim Regülasyonu, %	6.8	4.2	4.1	2.7	1.9	1.9

Çizelge 4.22. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim çukurunda, SVK 40. km'ye bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ort} , kV	32.2	32.4	32.7	33.2	33.8	33.7
Gerilim Regülasyonu, %	7	5.8	4.5	3.1	1.8	1.8

Çizelge 4.23. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim çukurunda, SVK 50. km'ye bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ort} , kV	31.92	32.0	32.3	32.7	33.2	33.9
Gerilim Regülasyonu, %	7.5	6.4	5.3	4.1	3	1.6

Çizelgeler incelendiğinde, gerilim çukuru sırasında, bara gerilimlerinin, sınırlar içinde tutabilmekte SVK'nın başarılı olduğu görülmektedir. Ayrıca, çizelgeleri detaylı incelendiğinde, SVK'nın bağlantı noktası gerilim regülasyon koşulu gibi 35. km'ye bağlandığında en iyi performansa sahip olmaktadır. Her durumda SVK bağlı olan noktada gerilim çukuru azaltılmaktadır.

Gerilim çukuru sırasında SVK'nın başarılı olup olmadığı, gerilim çukurunun şiddeti ve SVK'nın kapasitif reaktif kurulu gücüne bağlıdır. Ayrıca, hat üzerinde dağıtılmış yükler için gerilim çukurunun etkisini azaltmak için SVK'nın en iyi bağlantı noktası, gerilim regülasyonu için seçilen nokta ile aynıdır. SVK belirli bir baraya bağlandığında, diğer elektriksel olarak yakın baralarda gerilimleri önemli ölçüde iyileştirebilir.

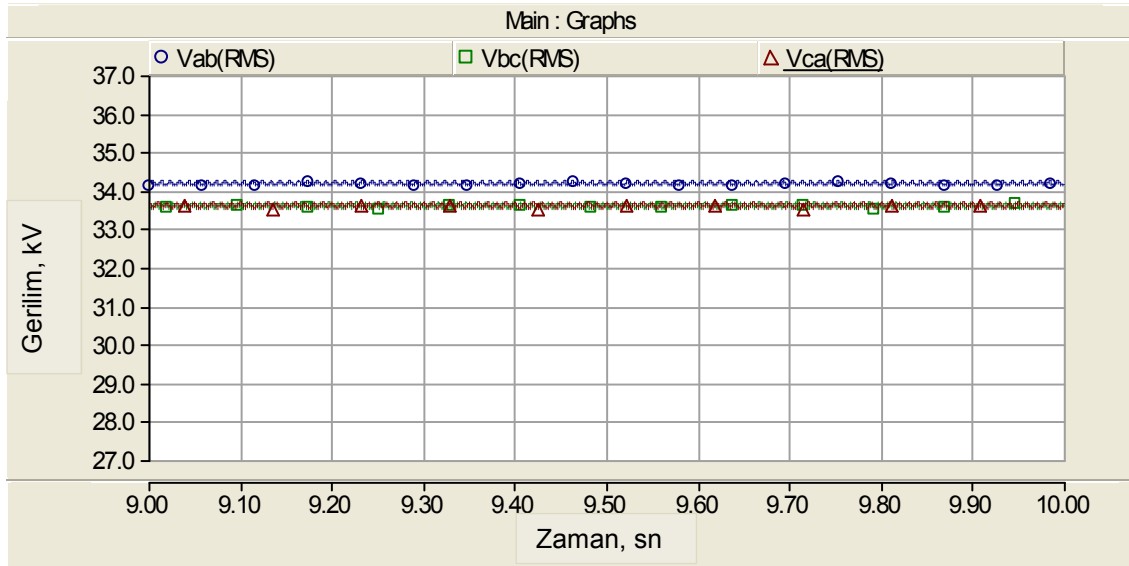
4.6. SVK ile Gerilim Tepesinin Etkisinin Azaltılması

Gerilim tepesi kısa süreli olarak gerilimin etkin değerinin yükselmesidir. Gerilim yükselmesi, kısa devre esnasında hatasız olan hatlarda, transformatörlerin devreden çıkması, büyük yüklerin devreden çıkması veya kapasitörlerin anahtarlama nedeniyle ortaya çıkabilir. Gerilim tepesi şebekedeki cihazların yalıtımına zarar verebilir ve kontrol devreleri ile düşük akım haberleşme cihazlarının yanlış çalışmasına veya kapanmasına neden olabilir. Şebeke tarafında dinamik gerilim düzenleyici, arıza akım sınırlayıcısı ve yüksek enerjili parafudr ve tüketiciler tarafında da gerilim regülatörü, kesintisiz güç kaynağı, hat iyileştirici ile gerilim tepe etkileri azalabilir (Schlabach, 2000). Güç elektroniği tabanlı kompanzasyon cihazları, gerilim tepe problemleri için hızlı ve etkili bir

şekilde iyi çözüm sağlayabilir. SVK'da güç elektronik cihazlarından birisi olarak gerilim tepe etkilerini azaltabilir. SVK bu işlevi tristörlerin tetikleme açısını değiştirerek gerçekleştirebilir.

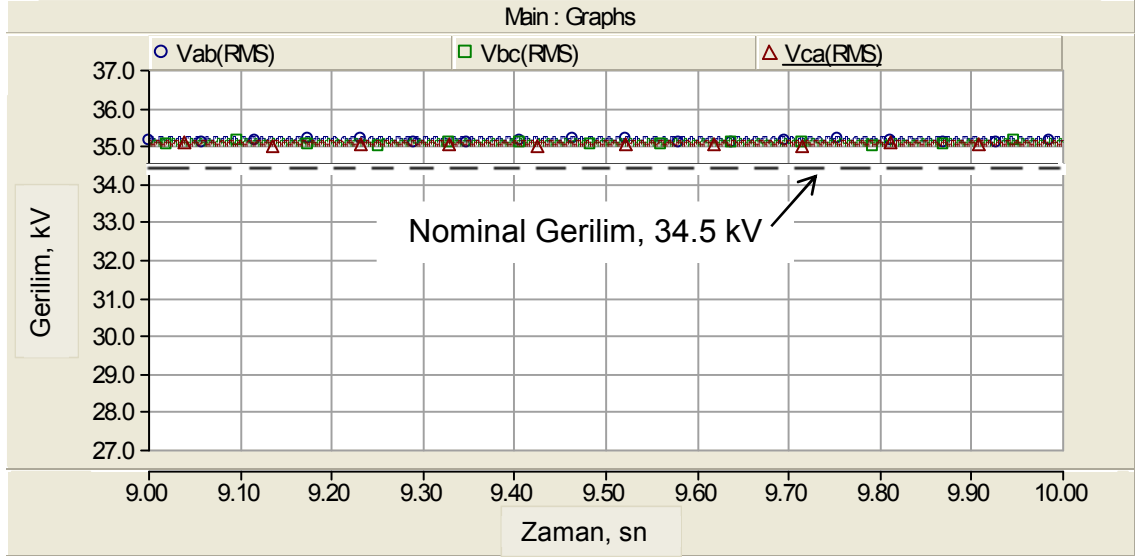
4.6.1. Örnek güç sistemi-1'de gerilim tepesinin etkisinin azaltılmasında SVK'nın performansının incelenmesi

Örnek güç sistemi-1'de aşırı yüklenmeden dolayı sistemde önemli bir gerilim düşmesi varsa, bu sebeple eğer sistem kompanze edilmemiş ise, Şekil 4.19'da görüldüğü gibi, sistemde %12'lik gerilim tepesi oluştuğunda, yük gerilimi hala nominal değerinden düşük olur. Ancak, bu gerilim tepesi, SVK bağlandığında, yüke yansiyabilir.



Şekil 4.19. SVK'sız Örnek Güç Sistemi-2'de Gerilim Tepesinin Etkisi.

Örnek güç sistemi-1 için, eğer tanıtilan sistemde şebeke gerilimi bir saniyelik bir sürede %12 yükselirse, SVK, Şekil 4.20'de gösterildiği gibi, yük merkezindeki gerilimleri sınırlar içinde tutabilmektedir. Gerilimi, gerilim tepesi sırasında, nominal değer in yakınında ya tam nominal değerde tutulabilmesi, gerilim tepesinin şiddeti ve SVK'nın kurulan endüktif reaktif gücüne bağlıdır.



Şekil 4.20. Önerilen güç sistemi-1 için %12 gerilim tepesinde, SVK'nın etkisi.

4.6.2. Örnek güç sistem-2'de gerilim tepesinin etkisinin azaltılmasında SVK'nın performansının incelenmesi

Örnek güç sistemi-2 için, bölüm (4.2.2)'de açıklandığı gibi, gerilimi kararlı durumda (Steady-State) kontrol ve regüle etmek için dört bağlantı noktası tanımlanmıştır. Bu bağlantı noktalarının seçim kriterlerinden birisi, SVK'nın gerilim tepelerinde, hangi bağlantı noktasında en iyi performansa sahip olmasıdır. Burada da eğer sistemde bir saniyelik bir sürede gerilim %12 yükselirse, SVK'nın gerilim tepesi esnasında performansını incelemek için ve bunun yanı sıra hangi bağlantı noktasında en iyi performansa sahip olduğunu görmek için, SVK bahsedilen farklı dört noktada bağlanmış ve sonuçlar gerilimin genliği ve gerilim regülasyonu halinde, Çizelge 4.24'te SVK 30. km'de, Çizelge 4.25'te SVK 35. km'de, Çizelge 4.26'da SVK 40. km'de ve Çizelge 4.27'de SVK 50. km'de bağlandığında açıklanmıştır.

Çizelge 4.24. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim tepesinde, SVK 30. km'ye bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri.

	Hattın baş	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ort} , kV	37.03	36.30	35.71	35.26	35.01	34.88
Gerilim Regülasyonu, %	6.50	5.40	3.70	2.20	2.20	2.20

Çizelge 4.25. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim tepesinde, SVK 35. km'ye bağlandığında yüklerin hatlararası gerilimleri.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ort} , kV	37.16	36.46	35.90	35.50	35.22	35.10
Gerilim Regülasyonu, %	6.90	5.60	4.20	2.90	2.00	2.00

Çizelge 4.26. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim tepesinde, SVK 40. km'ye bağlandığında yüklerin hatlararası Gerilimleri.

	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ort} , kV	37.15	36.45	35.88	35.47	35.18	35.05
Gerilim Regülasyonu, %	7.10	5.90	4.60	3.30	1.97	1.97

Çizelge 4.27. Şebeke tarafında (hat başında) %12 gerilim tepesinde, SVK 50. km'ye bağlandığında yüklerin hatlar arası gerilimleri.

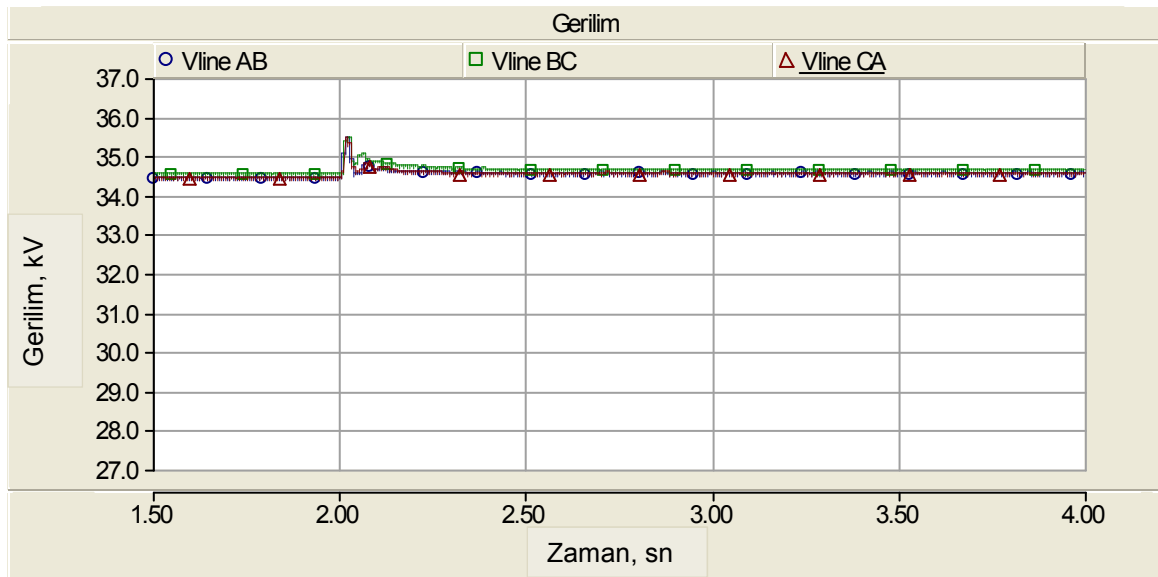
	Hattın başı	10. km	20. km	30. km	40. km	50. km
V_{ort} , kV	37.19	36.5	35.96	35.55	35.28	35.12
Gerilim Regülasyonu, %	7.60	6.50	5.40	4.20	3.00	1.80

Çizelgeler incelendiğinde, şebekede gerilim tepesi olduğu zaman, yük gerilimlerini sınırlar içinde tutabilmek için SVK'nın başarılı olduğu görülmektedir.

Ayrıca, çizelgeler detaylı incelendiğinde, SVK'nın bağlantı noktası ne kadar hattın orta noktalarına yakınlarsa, SVK'nın gerilim tepesine o kadar iyi tepki gösterdiğini açıklamaktadır. İncelenen dört bağlantı noktasında, gerilim tepesi için SVK'nın en iyi bağlantı noktasının 30. km'de olduğu söylenebilir.

4.7. Ani Yük Değişimlerinde SVK'nın Performansının İncelenmesi

FACTS cihazlarının tasarlama nedenlerinden biri değişikliklere kararlı bir halde hızlı tepki göstermesidir. SVK hızlı bir kompanzasyon sistemi olarak, değişikliklere hızlı tepki gösterme yeteneğine sahiptir. Uygulanan SVK'nın ani yük değişimi esnasında performansını incelemek için, PSCAD benzetim programında örnek güç sistemi-1'de, 2. saniyede toplam 10 MW yükten, 2 MW büyüklükte bir yük devreden çıkarıldı. SVK, kontrol devresine bağlı olarak birkaç çevrim içinde, şebeke gerilimlerinde osilasyon yapmadan ve sistemi kararsız duruma sokmadan, bara geriliminin regülasyonunu ve düzenlenmesini, başarmaktadır (Şekil 4.21).



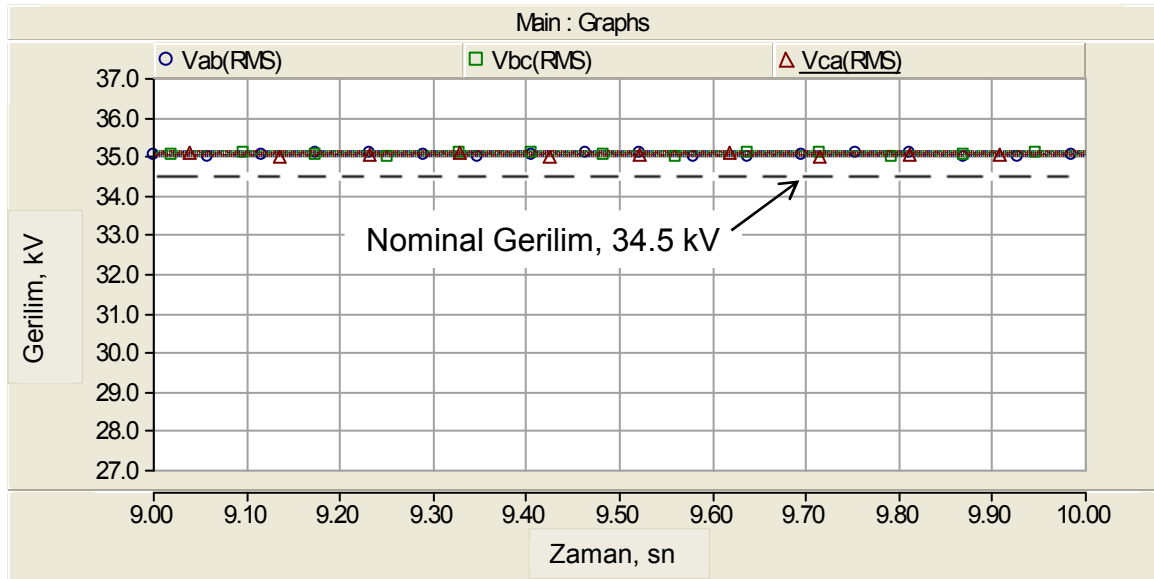
Şekil 4.21. Ani yük değişiminde gerilim düzenlenmesinde SVK'nın performansı.

4.8. Hafif Yük Koşularında SVK'nın Performansının İncelenmesi

Dağıtım şebekesinde yükler zamana göre sürekli değişmektedir. Önceki bölümlerde de söylendiği gibi yükteki değişimler, bara gerilimi değişimine sebep olur. Gerilim profilini korumak için bara geriliminin her zaman istenilen değerlerde sabit kalması arzu edilmektedir. SVK bir gerilim regülasyon cihazı olarak hafif yük

koşullarında, çıkış reaktif gücünü kontrol ederek, bara gerilimini tasarlanan aralıkta sabit tutabilir. SVK reaktif gücü TKR tristörlerinin tetikleme açısını değiştirerek kontrol edebilir. Hafif yük koşullarında tristörlerin tetikleme açısı azalarak, TKR daha çok reaktif güç absorbe edecek ve böylece bara gerilimini sabit tutacaktır.

Örnek güç sistemi-1'de eğer şebeke nominal yükün yüzde otuzunda (hafif yük) çalışırsa, Şekil 4.22'de gösterildiği gibi, SVK bara gerilimin istenilen aralıkta kontrol edebilir. Bara gerilimini 34.5 kV'a regüle edememesi, SVK dinamik karakteristiğinde uygulanan eğimden kaynaklanmaktadır.

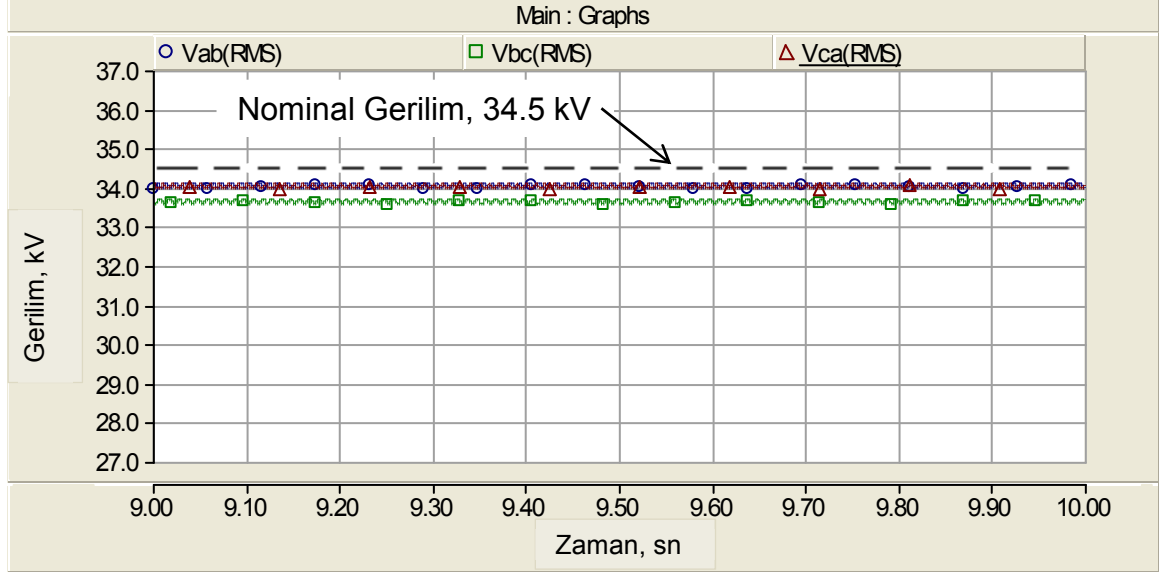


Şekil 4.22. Hafif yük koşullarında gerilim düzenlenmesinde SVK'nın performansı.

4.9. Aşırı Yük Koşullarında SVK'nın Performansının İncelenmesi

Yukarıda söylendiği gibi yük değişimleri, bara gerilimi değişimlerine sebep olur. Şebekenin aşırı yüklenmesi, gerilim profilinin düşme ve çökmesine neden olur. Aşırı yüklenme sırasında SVK daha fazla reaktif güç şebekeye enjekte ederek, bara gerilimini sabit tutabilir. SVK burada da reaktif gücü kontrol etmek için TKR tristörlerinin tetikleme açısını kullanır. Aşırı yük koşullarında, nominal yüke göre TKR tristörlerinin tetikleme açısı artırılır. Böylece şebekeye daha fazla kapasitif reaktif gücün enjekte edilmesini sağlar. Tristörlerin tetikleme açısının artırılması, tristör iletim açısının azalması anlamına gelir ve bu da TKR'de harmoniklerin daha fazla üretilmesine sebep olur.

Örnek güç sistemi-1’de eğer şebeke yükü, nominal yükün 1.5 katı kadar artırılırsa, Şekil 4.23’te görüldüğü gibi, SVK bara gerilimi istenilen aralıkta kontrol edebilir. Bara geriliminin 34.5 kV’a regüle edilmemesinin nedeni, SVK’nın reaktif kapasitif gücünün yetersiz kalmasıdır. Genelde SVK şebekede tepe yüke ve bu tepe yük sırasında gerilimlerin kontrol aralığına göre tasarlanır.



Şekil 4.23. Aşırı yük koşullarında gerilim düzenlenmesinde SVK’nın performansı.

5. SONUÇLAR

Günümüzde yeni endüstrilerin tesis edilmesi ve yeni tüketicilerin devreye alınması dağıtım şebekelerini daha karmaşık ve verimsiz hale getirmektedir. Yeni santrallerin ve yeni hatların tesis edilmesinin hem zaman alıcı olması hem de fazla yatırımlara neden olmaları ve ayrıca, ekolojik etkilerinden dolayı, dağıtım sistemleri yeni tüketicileri beslemek için daha fazla enterkonnekte ve aşırı yüklenmiş hale gelmektedir.

Dağıtım şebekesinde bulunan uzun hatlar ve bu hatların aşırı yüklenmesi, şebekede kayıpların ve yük taleplerinin karşılanmasını zorlaştırmış olup, güç akışı problemlerine yol açmaktadır. Ayrıca, şebekenin yetersiz kalması, şebeke kararlık ve güvenilirliğinin kaybolmasına, güç kalitesi problemlerine ve gerilim profilinin tamamen çökmesine neden olabilir.

Uzun dağıtım hatları içeren zayıf baralarda, sıfır ve ters bileşen akımların yoğun olduğu dengesiz yüklerde güç kalitesi problemleri artmakta ve konvansiyonel sistemler ile çözülemez hale gelmektedir. Bu amaçla, Esnek Alternatif Akım İletim Sistemleri (FACTS) çözümlerinden biri olan tristör kontrollü reaktör (TKR) tabanlı Statik VAr Kompanzatör (SVK) sisteminin uzun ve ağır yük koşullarında çalışan dağıtım fiderlerinde çalışması EMTDC/PSCAD benzetim programı kullanılarak incelenmiştir. Ortak bağlantı noktasına şönt bağlı SVK sisteminin ürettiği reaktif güç ya da SVK empedansı ayarlanarak reaktif güç akışı değiştirilmek sureti ile gerilim regülasyonu sağlanmaktadır. Benzetim çalışmaları ile değişik uzunlukta ve çeşitli yük koşullarında SVK sisteminin başarımı incelenmiştir. Buna göre:

1- SVK sistemleri (kompanzasyon sistemleri) güç transferinin artırılması, dağıtım hattı kayıplarının azaltılması ve gerilim profilini korumak için kullanılan geleneksel yöntemler ile karşılaştığında maksimum güç transferi ve gerilim regülasyonu açısından daha iyi performansa sahiptir. Ayrıca, SVK sistemleri, şebekede güç faktörünün iyileşmesinde, dengesizliğin yok edilmesinde, bozucu etkilere karşı koymakta ve sistemin sönümlenme gücünün artırılmasında etkili oldukları için daha çok tercih edilmektedirler.

2- SVK sistemlerinin şebekeye bağlantı noktası, bu sistemlerin hem boyutlandırılmaları hem de performansları etkilemektedir. İncelenen iki farklı

dağıtım şebekesi bu sistemlerin yük merkezlerine ve şebekenin zayıf noktalarına bağlandıklarında daha etkili ve daha küçük boyutlarda olduğunu kanıtlamıştır. Bu bağlantı noktası radyal şebekeler için hattın sonu olarak söylenebilir. Ancak, enterkonnekte şebekelerde, gerilim profilini korumak için, şebeke ve yük özelliklerine bağlı olarak hattın ara noktası ve dengesizliği yok etmek için hattın sonu en iyi bağlantı noktası olarak söylenebilir.

İncelenen güç sistemi-1'de (yüklerin hepsi hattın sonuna bağlandığında), SVK hattın sonuna bağlandığında sistem en iyi performansa sahip olur. Bu durumda SVK örnek güç sistemi-1'e bağlı iken, 10 MW, 0.95 güç faktörü yükte hatlar arası gerilimleri regüle etmek için 6.75 MVar kapasitif reaktif gücü kullanmaktadır.

Örnek güç sistemi-2'de (yükler hat üzerinde dağıtıldığında), SVK gerilim regülasyonu için hattın son dört noktasına (30. Km, 35. Km, 40. Km ve 50. km) bağlandığında en iyi performansa sahip olur. Bu dört noktada SVK hattın 35. km'sine bağlandığında en iyi etkiye sahip olur. Bunun karşısında, SVK hattın 50. km'sine bağlandığında, gerilim regülasyonu için en az reaktif güç kullanır.

3- SVK sistemleri uzun hat ve hatların aşırı yüklenme nedeni ile ortaya çıkan gerilim düşmelerini istenilen ve tasarlanan aralıkta regüle etmeyi başarmaktadır. Ayrıca, SVK belirli bir baraya bağlandığında, diğer elektriksel olarak yakın baralarda da gerilimleri önemli ölçüde iyileştirmektedir.

İncelenen örnek güç sistemi-1'de sistemin ağır yüklenmeden dolayı, yüklerin hatlar arası gerilimleri 30 kV'dır. SVK bu sistemde hattın sonuna (50. km'sine) bağlandığında, yüklerin hatlar arası gerilimlerini 34.5 kV'a regüle etmeyi başarmaktadır. Örnek güç sistemi-2'de ise, SVK hattın 35. km'sine bağlandığında 30. ve 40. km'deki yüklerin hatlar arası gerilimlerini 34.5 kV'ta sabit tutmayı başarmaktadır. Ayrıca SVK bu güç sisteminde 10., 20. ve 50. km'deki yüklerin hatlar arası gerilimlerini de sınırlar içerisinde tutmayı başarmaktadır.

Hafif ve aşırı yük koşullarında, SVK sistemi sırasıyla edikti reaktif ve kapasite reaktif gücüne bağlı olarak sistem gerilimini düzenlemekte ve sınırlar içerisinde tutmayı başarmaktadır. Bu nedenle sistemin aşırı yük ve hafif yük, özellikle tepe yük koşullarında gözlenmesi gerekir ve SVK'nın bu şartları karşılamak için boyutlandırılması gerekmektedir.

Örnek güç sistemi-1'de, sistem nominal yükün yüzde otuzunda çalıştığında, SVK yüklerin hatlar arası gerilimlerini 35 kV'ta tutmaktadır. Ayrıca örnek güç sistemi-1'deki yük, nominal yükün 1.5 katına çıktığında, SVK yüklerin hatlar arası gerilimlerini 34 kV'ta tutmaktadır. Bu durumlarda SVK şebekenin gerilimin 34.5 kV'ta sabit tutamamasının sebebi, SVK dinamik karakteristiğinde %1 eğimin uygulanmasıdır.

4- Gerilim regülasyonu amacı ile tasarlanan SVK, dengesiz yük koşullarında gerilimleri dengeli hale getirerek sınırlar içerisinde tutmayı başarmaktadır. Uzun hatlarda uygun çaprazlama yapılmadığı koşullarda dahi gerilimdeki ters bileşen SVK tarafından giderilebilmektedir. SVK akım ve gerilimdeki ters bileşenleri yok etmekte yeterlidir. Gerilim ve akımdaki sıfır bileşenlerin yok edilmesi için ek önlemler alınması gerekebilir.

Gerilim regülasyonu amacı ile kurulan SVK dengesiz zor şartlarda yetersiz kalabilir. Bu nedenle sistem ve yükün dengesizlik seviyesinin tespit edilmesi gerekir. Eğer gerilim regülasyonu amacı ile kurulan SVK dengesizlik seviyesini istenilen sınırlar içinde tutamıyorsa ek önlemler alınması gerekir. Ayrıca, SVK kontrol devresi dengesizliği yok etmek içinde tasarlanıp ve bunun yanı sıra gerilim regülasyonu yapabilir. SVK tasarımı sırasında kontrol devresindeki eğim (X_{SL}) değerinin seçilmesinde, dengesizlik sınırları dikkate alınmalıdır.

5- SVK gerilim çukur ve tepesi sırasında bu olayların şiddeti ve SVK kurulu gücüne bağlı olarak, gerilim profilini istenilen sınırlar içinde tutabilmeyi başarmaktadır. Geçici olaylar, gerilim çukur ve tepesi gibi geçici olaylar sırasında SVK hızlı bir şekilde tepki göstermektedir. SVK'nın bu olaylar sırasında hızlı davranışı SVK ve sistem kararlılığının kaybolmasına neden olabilir, bu nedenle SVK kontrol devresinin tasarımında regülatör kazancı uygun seçilmelidir. Ayrıca, SVK kontrol devresinde uygulanan eğim (X_S), SVK kararlılığının korunmasında etkili faktör olduğu söylenebilir. Ancak, eğimin uygulanması SVK tepki hızının düşmesine neden olur.

6- Ani yük değişimlerinde de SVK hızlı ve uygun bir şekilde çıkış reaktif gücü ayarlayarak değişimlere tepki gösterir ve bara gerilimini tasarlanan aralıkta koruyabilir.

7- Gerilim regölasyonu modunda tasarlanan SVK, sistemde oluşan şiddetli salınımlara tepki göstermekte yetersiz kalabilir. Bu nedenle sistemi korumak için ek önlemler alınmalıdır.

8- TKR tabanlı SVK, kararlı durumda en çok 5. ve 7. harmonikleri üretmektedir. Ayrıca SVK kararsız bir durumda çalıştığında veya TKR'de tristörlerin tetikleme açısı 180° 'ye yakınlaştığında, büyük açıda 3. harmonik üretmektedir. 6-darbeli TKR'de harmonikleri yok etmek için 5. ve 7. LC filtreler tasarlanması gerekmektedir. Ayrıca 3. harmoniklerin yüksek olduğu durumlarda ve şebeke rezonans koşuları gerektirdiğinde 3. harmonik filtresi tasarlanması gerekmektedir. 11. ve 13. harmoniklerin yüksek olduğu durumlarda yüksek geçiren filtrenin tasarlanması uygun görölmektedir.

9- Gerilim regölasyonu modunda tasarlanan SVK'da uygulanan eğim (X_{SL}) sistem değişikliklerine karşı SVK'nın kararlı durumda çalışmasında önemli bir faktördür. Ayrıca, gerilim regölasyonu için kullanılan reaktif güç büyük ölçüde azalabilir ve bu da SVK sisteminin daha verimli ve esnek çalışmasına neden olur. Ancak, dengesiz yük koşularında SVK performansı kötü yönde etkilenmektedir. Bu nedenle dengesiz yük koşularında dengesizlik sınırları dikkate alarak eğim (X_{SL}) değeri seçilmelidir.

KAYNAKLAR

- Abacı, K., 2007, " Gerilim Kararlılığı İyileştiricilerinin Çatalaşma ve Kaotik Analizleri", Doktora tezi, Fen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya Üniversitesi.
- Acha, E., Agelidis V.G., Anaya O., Miller T.J.E., 2002, "Power Electronic Kontrol in Electrical Sistem", Newnes Power Engineering Series, 443p.
- Akgün, Ö., 2006, "Statik VAR Kompanzator ve Tristör Kontrollü Reaktör Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- Alves, R., Montilla M., Mora E., " Increase of Voltage Stability and Power Limits Using A Static VAR Compensator".
- Arrilaga J., Watson N.R., 1982, "Power System Harmonics", Wiley.
- Bağrıyanık, M., 1997, "Enerji İletiminde Gerilim Kararlılığı en Uygun Reaktif Güç Desteklemelerinin İncelenmesi", Doktora Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Bergen, A. R., Vittal V., 2000, "Power System Analysis", 2nd ed: Prentice-Hall.
- Binti Hasan, N. S., 2011, "Technical Losses Reduction in Long Transmission Lines", Bachelor Report, Malaysia Technical University.
- Bollen, M.H.J., Styvaktakis E., 2000, " Tutorial on Voltage Sag Analysis", IEEE.
- Canizares C. A., 2000, "Power Flow and Transient Stability Models of FACTS Controllers for Voltage Stability and Angela Stability Studies", IEEE/PES WM Panel, Singapore, January.
- Chen, J.H., Lee W.J., Chen M.J., 1999, " Using a Static VAr Compensator to Balance a Distribution System", IEEE Transactions On Industry Applications, VOL. 35, NO. 2, MARCH/APRIL 1999.
- Chessmore, D. T., 2008, " Voltage Profile Estimation and Reactive Power Control of Distribution Feeders", PHD Thesis, The University of Texas at Arlington.
- David, B., 2001, "Voltage dips, predictive maintenance – the key to power quality", Leonardo Power Quality Initiative Conference, www.lpqi.org
- Dawson, K. M., 2005, " Modelling Load Balancing Type Static Var Compensator Control System Response", The Report of Bachelor Degree, University of Southern Queensland, Faculty of Engineering and Surveying.
- Donsión, M.P., Oliveira F., 2007, AC Arc Furnaces Flicker Measurement without and with a SVC System Connected, International Conference on Renewable Energy and Power Quality (ICREPQ'07), Sevilla (Spain).

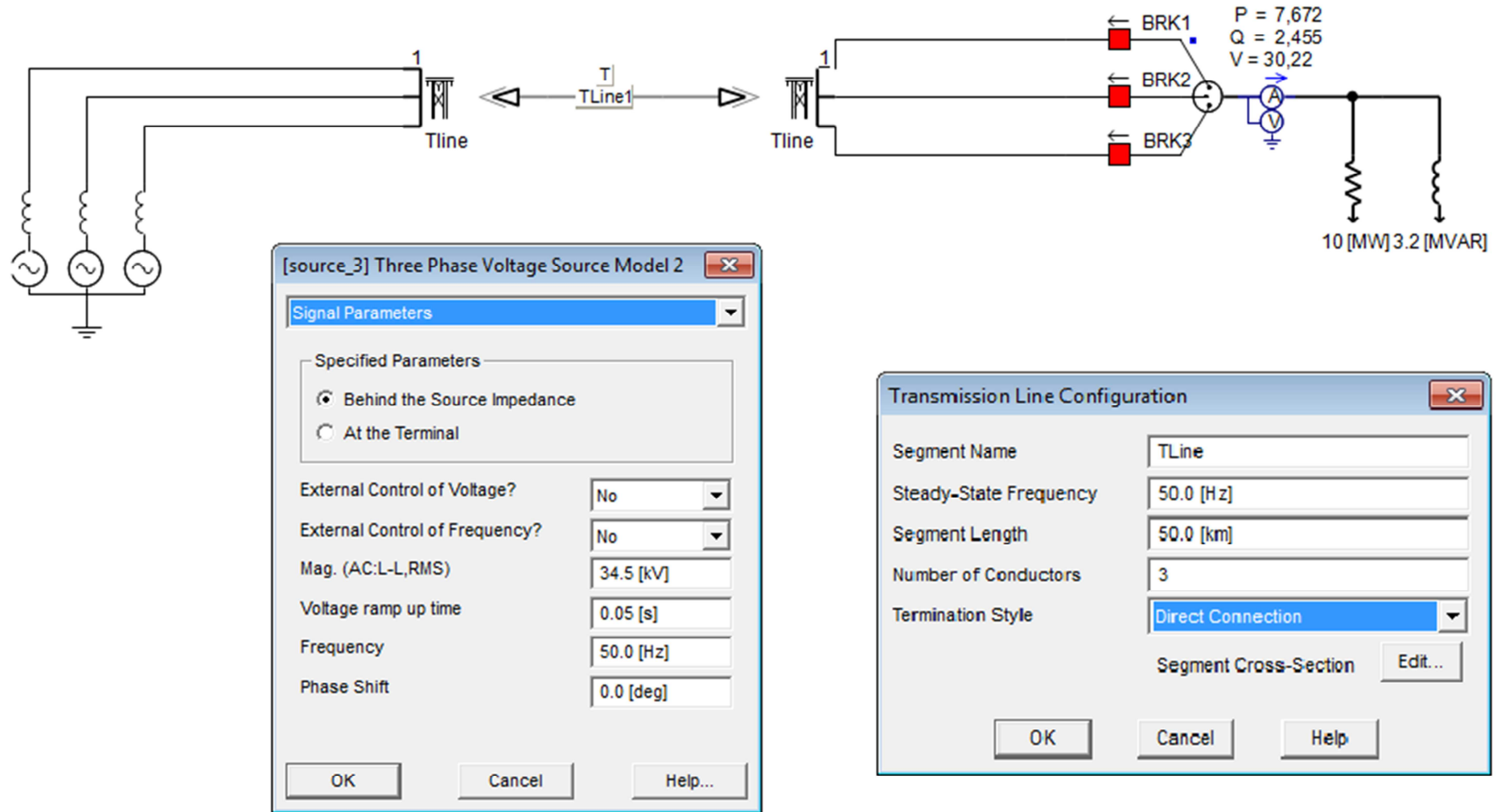
- Edwards, C.W., Mattern K.E., Staeey E.J., Nannery P.R., IGuberniC'k, 1988, "Ad'aneed Statie Var Generator Employing GTO Thyristors", IEEE Trans. Power Del. pp. 1622-1627.
- Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği, 2003, EPDK, Ankara.
- Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği, 2003, EPDK, Ankara.
- Eminoglu, U., 2003, "FACTS Elemanlari Kullanilan Güç Akış Sistemlerinin İncelenmesi", Y. Lisans Tezi, N.Ü F.B.E.
- Engin, B., 2008, "Elektrik Dağıtım Sistemlerinde Kompanzasyon ve Enerji Kalitesi Sorunları", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi, Enerji Enstitüsü.
- Graaff, R. A. A., 2010, "Flexible distribution systems through the application of multi back-to-back converters: Concept, implementation and experimental verification", PHD Thesis, Eindhoven Technical University.
- Grainger, J. J., William J., Stevenson D., 1994, "Power System Analysis", McGraw-Hill.
- Güler, Ö., 1995, "Reaktif güç kompanzasyonu ve sakıncaları", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- Hellal, A., 1991, "Control Coorsination of SVCs for Voltage Regulation in Power Syatems", PHD Thesis, McGill University, Montreal, Canada.
- Kalyani, S.T., Das G.T., 2008, Simulation of Real and Reactive Power Flow Control with UPFC Connected to a Transmission Line, Journal of Theoretical and Applied Information Technology.
- Kara, A., Yalçınöz T., 2005, "Aç – Kapa Kontrollü FACTS Cihazlari ile Yük Kompanzasyonu", III. Otomasyon Sempozyumu, pp 68 – 72, Denizli.
- Kawalski, J., Vancers I., Reynolds M., Tyll H., Siemens Power Transmission & Distribution, Inc., 2006, "Application of Static VAR Compensation on the Southern California Edison System to Improve Transmission System Capacity and Address Voltage Stability Issues -Part 1. Planning, Design and Performance Criteria Considerations".
- Kıyan, M., 2011, "Tristör Denetimli Reaktörlü Alçak Gerilim Tepkin Güç Kompanzasyonunun Gerçekleştirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü.
- IEC Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4-7, 2000, "Testing and measurement techniques – general guide on harmonics and interharmonics measurement and instrumentation for power supply systems and equipment connected thereto", IEC 61000-4-7.

- IEC Electromagnetic Compatibility (EMC) Part 4-30, 2001, "Testing and measurement techniques – power quality measurement methods". IEC 61000-4-30.
- IEEE 519, 1992, "IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control",
- Leger A., 2005, " Transmission Line Modeling for the Purpose of Analog Power Flow Computation of Large Scale Power Systems", Master Thesis, Drexel University.
- Machowski J., Bialek J. W. , Bumby J.R., 1997, "Power System Dynamics and Stability". John Wiley & Sons, England.
- Mathur R. M., Varma R. K., 2002, "Thyristor-Based FACTS Controllers for Electrical Transmission Systems", Willey & Sons, 492p.
- Miller, T. J. E., 1982, Reactive Power Control in Electrical Systems John Wiley & Sons, New York, 381p
- Mutluer H. B., 2008, " Design, Implementation And Engineering Aspects of TCR for Industrial SVC Systems", PHD Thesis, Middle East Technical University.
- Nwohu M. N., 2009, " Voltage Stability Improvement using Static Var Compensator in Power Systems", Leonardo Journal of Sciences, Issue 14, January-June 2009, p. 167-172.
- Porate K., THAKRE K.L., BODHE G.L., 2009, " Voltage Stability Enhancement of Low Voltage Radial Distribution Network Using Static VAR Compensator: A Case Study", WSEAS TRANSACTIONS on POWER SYSTEMS, ISSN: 1790-5060, Issue 1, Volume 4, January 2009.
- Prada, R. B., Seelig B. H. T., Santos J. O. R., Pilotto L. A. S., Bianco A., 2003, " Modelling On-Load Tap Changer Voltage Control and Limits for Network Loading and Voltage Control Effectiveness Assessment", 2003 IEEE Bologana Power Tech Conference, June 23th-26th, Bologana, Italy
- Rewatkar, S. B., Kewte S. G., 2009, " Role of Power Electronics based FACTS Controller SVC for mitigation of Power Quality Problems", Second International Conference on Emerging Trends in Engineering and Technology, ICETET.
- Rodríguez, A. J.L., Alves, R., Arnaltes, S., Ríos, A., 2004, Improving voltage Stability in a Wind Farm by using SVC, Proc. of the European Wind Energy Conference – EWEA 2004 (<http://www.ewea.org/>), Wembley Conference & Exhibition Centre, 22-25 London, UK. Vol. 1, pp 001-007.
- Rusli, R. B., 2005, "Analysys of Static VAR Compensator (SVC) for Power Transmission System", M.B, Kebangsaan Technical University, Malaysia.

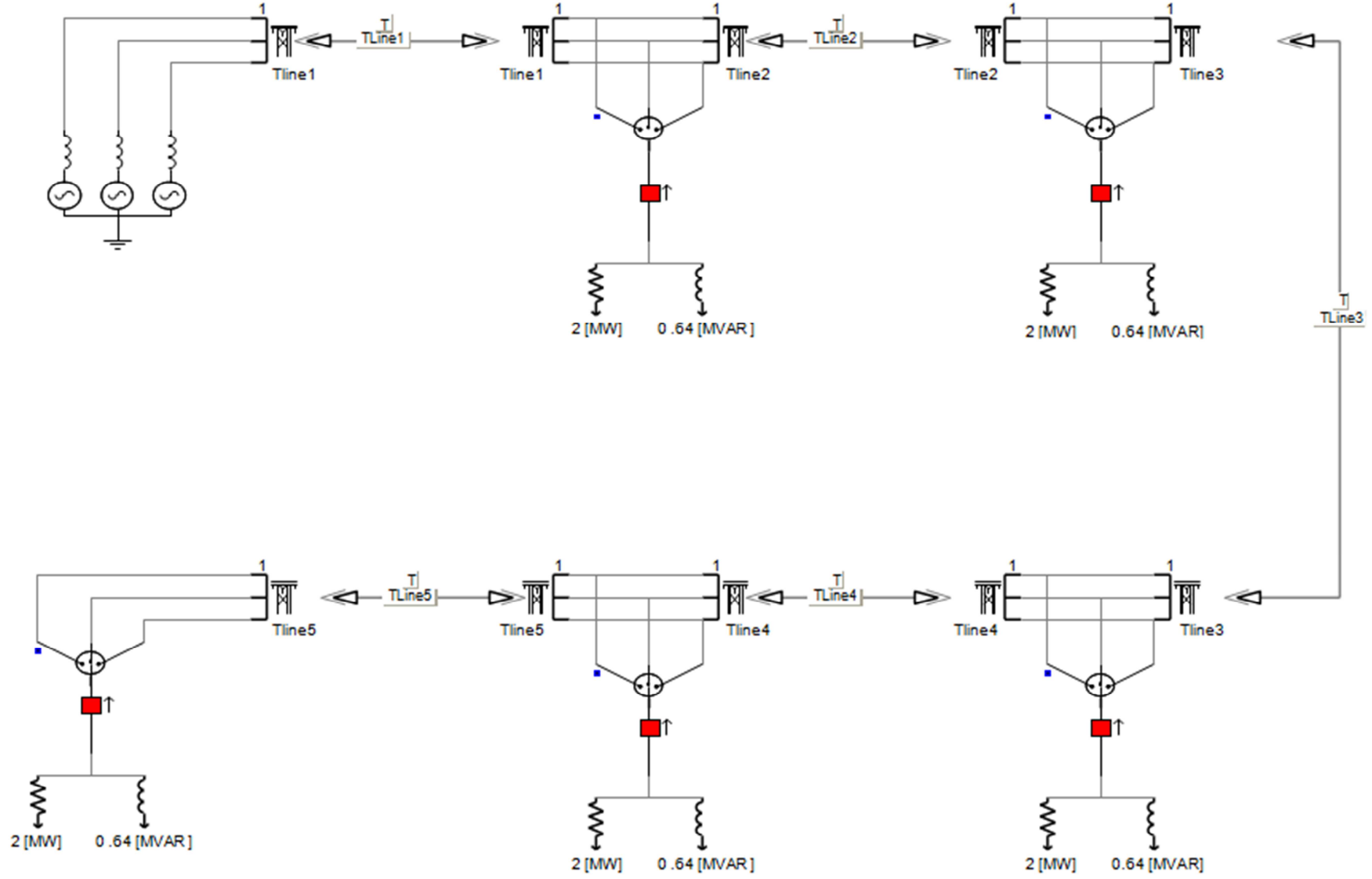
- Sabai, N., Maung H. N., Win T., 2008, " Voltage Control and Dynamic Performance of Power Transmission System Using Static Var Compensator", World Academy of Science, Engineering and Technology.
- Saadat, H., 1999, " Power System Analysis ", WCB/McGraw-Hill, 669p.
- Schlabbach, J., Blume D., Stephanblome T., 2000, " Voltage Quality in Electrical Power Systems", IET Power and energy series 36, 236p.
- Sullivan, D. J., 2006, " Improvements in Voltage Control and Dynamic Performance of Power Transmission System Using Static VAR Compensators (SVC)", Master Thesis, University of Pittsburgh.
- Talebi M.A., Kazemi A., Gholami A., Rajabi M., 2005, " Optimal Placement of Static VAR Compensators in Distrubation Feeders for Load Balancing by Genetic Algorithm", 18th İnternational Conference on Electricity Distrubation.
- Tanrıoven, M. ve İnce R., 2005, "Elektrik güç sisteminin kalitesini bozan faktörlerin incelenmesi", Elektrik Tesisat Muhendisleri Derneği Yayınları Teknik Yazılar, Mart 2005, www.etmd.org.tr
- Taufik, M., Schaefer E., Anwari M., 2009, " Performance Analysis of Shunt Reactive Power Compensators", Third Asia International Conference on Modelling & Simulation.
- Taylor C. W., 1994, "Power System Voltage Stability", EPRI Power System Engineering Series. McGraw Hill.
- Tozar, T., 2001, "Elektrik Enerji Sistemlerinde FACTS Kontrolörlerinin Kullanımıyla Kayıp Azaltılması", Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü, F.B.E.
- TS EN 61000-4-15 (IEC 61000-4-15), "Elektromanyetik uyumluluk –kırpışma ölçer fonksiyon vetasarım özellikleri Turk Standartı", Mart 2004.
- Wang, P., Jenkins N., Bollen M. H. J., 1998, " Experimental Investigation of Voltage Sag Mitigation by an Advanced Static VAr Compensator", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 13, No. 4, October 1998
- Yalçınöz, T., Erbas H., Yücel İ., 2001, "Esnek Alternatif Akım İletim Sistemlerinde Kullanılan Elemanlar", Kaynak Elektrik.
- Yörür, K., 2008, " Elektrik İletim Hatlarının Güç Kalitesi Parametrelerinin Yazılımla Hesaplanması ve Değerlendirilmesi", Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi.
- Zhang, Y., Milanovic J.V., 2007, "Techno-economic Improvement of Voltage Sag Performance with FACTS Devices", 9th International Conference, Elictrical Power Quality and Utilisation, Barcelona.

Zhang, Y., Milanovic' J.V., 2010, " Global Voltage Sag Mitigation With FACTS-Based Devices", IEEE Transactions On Industry Applications, VOL. 25, NO. 4, October 2010.

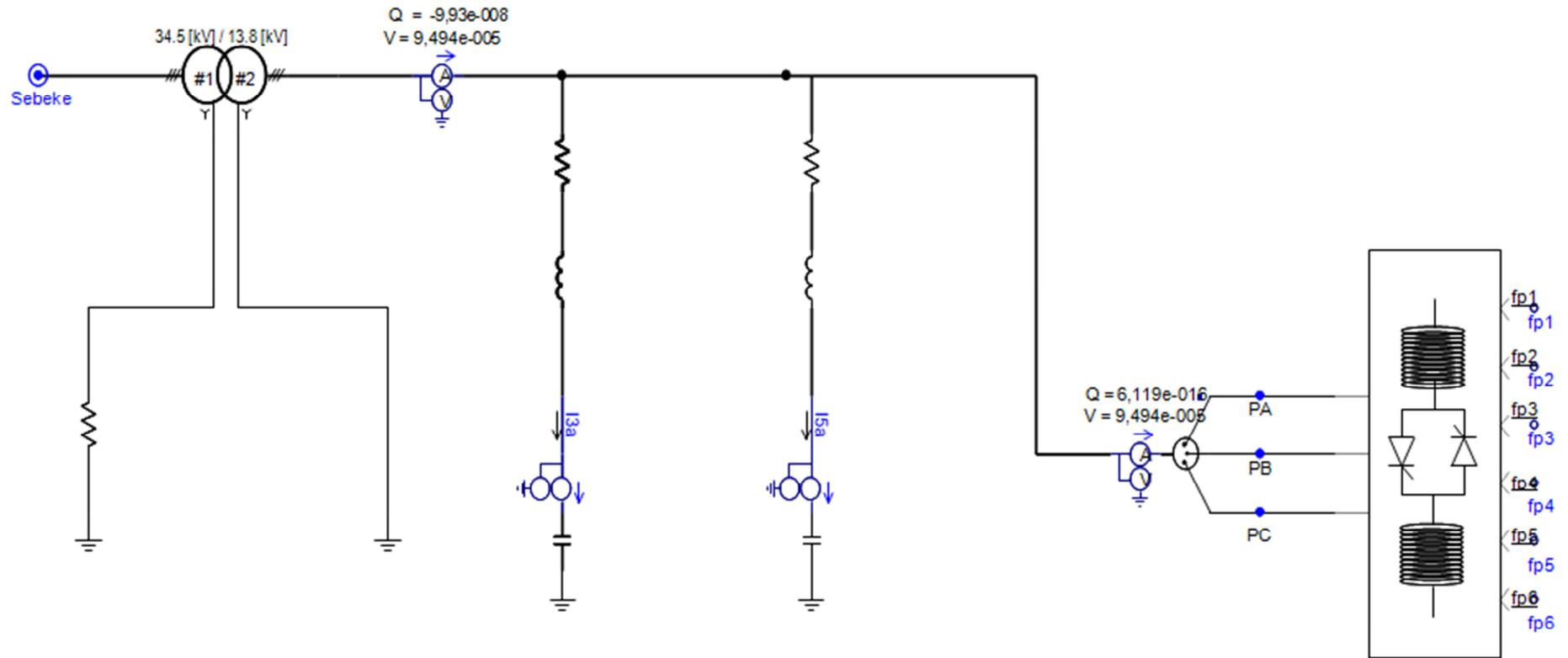
EK 1. PSCAD-EMTDC BENZETİM YAZILIMINDA ÖRNEK GÜÇ SİSTEMİ-1'İN ŞEMASI



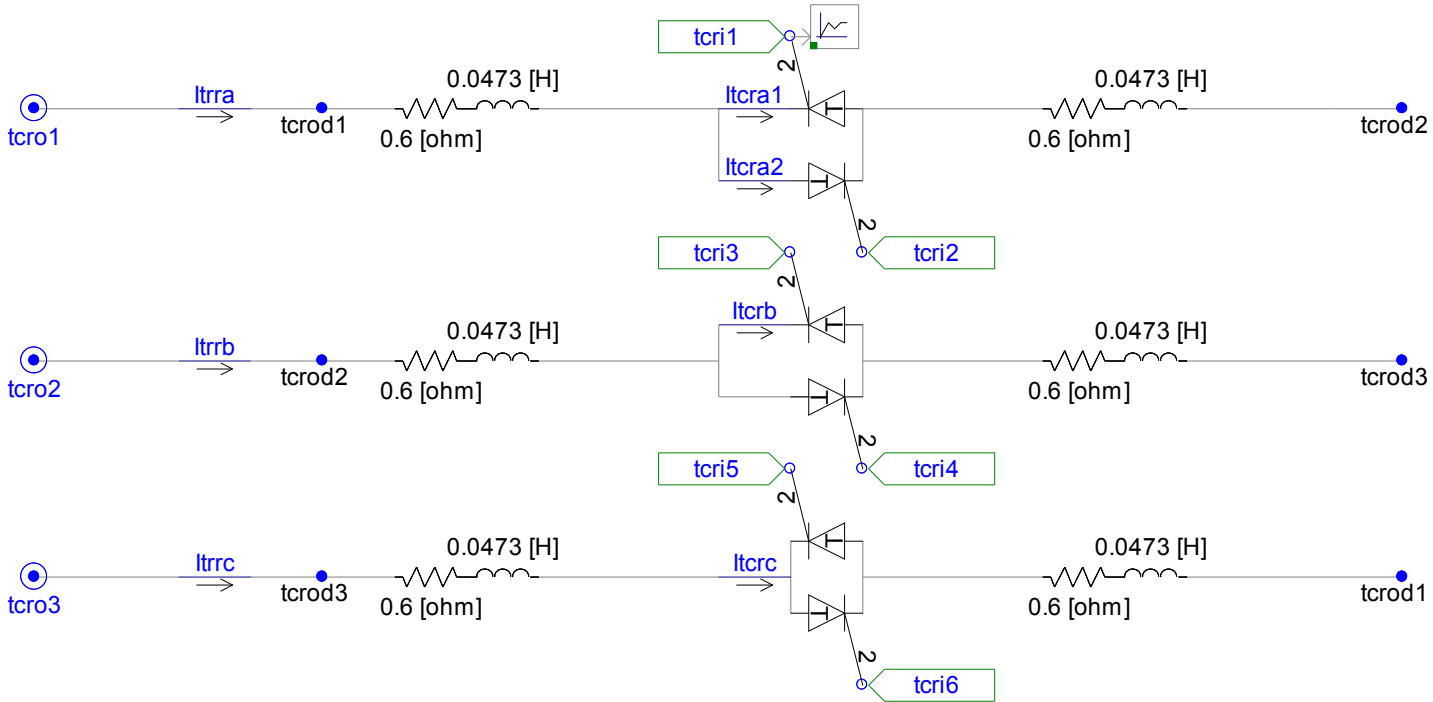
EK 2. PSCAD-EMTDC BENZETİM YAZILIMINDA ÖRNEK GÜÇ SİSTEMİ-2'İN ŞEMASI



EK 3. PSCAD BENZETİM PROGRAMINDA KULANILAN SVK ŞEMASI

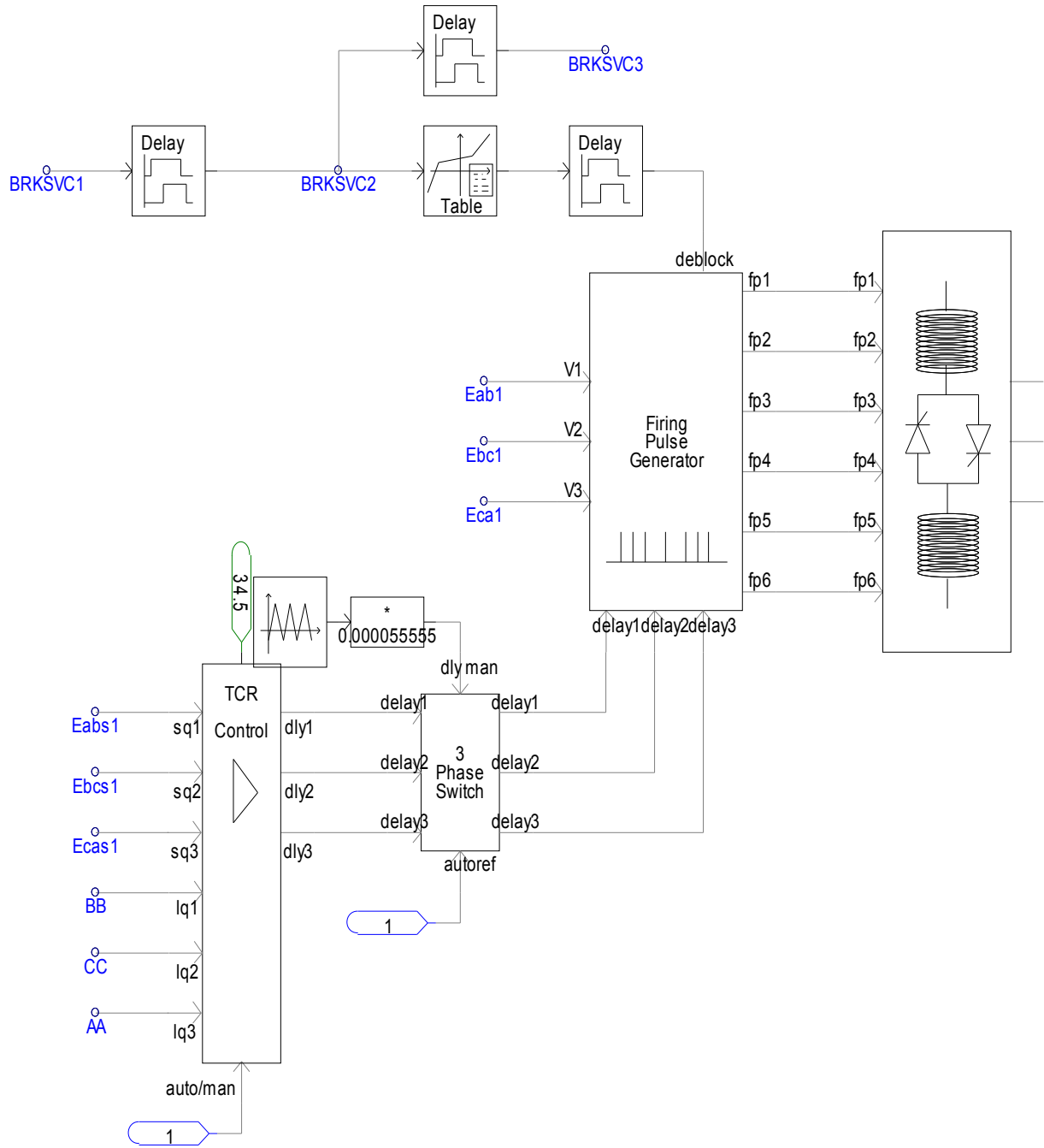


EK 4. PSCAD-EMTDC BENZETİM YAZILIMINDA TKR'NİN DEVRE ŞEMASI



Thyristor Data:
 $V_t = 1.4 \text{ V}$, $R_t = 1.7 \text{ m}\Omega$, $t_q = 450 \text{ }\mu\text{s}$, $V_r = 3200 \text{ V}$

EK 5. PSCAD BENZETİM PROGRAMINDA TCR'NİN KONTROL DEVRESİNİN ŞEMASI



ÖZGEÇMİŞ

Adı Soyadı : Mohammad BARGHI LATRAN

Doğum Yeri : Ardebil / İran

Doğum Yılı : 1984

Medeni Hali : Bekar

Eğitim ve Akademik Durumu:

Lise 1998-2002 Sharyati Lisesi, Ardebil

Lisans 2003-2007 İslamic Azad University-Ardebil Brench.

Yabancı Dil: İngilizce, Azerice, Farsça