

**T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**STATİK VAR KOMPAZASYON SİSTEMLERİNİN HARMONİKLER
BAKIMINDAN İNCELENMESİ**

MUHAMMED ALİ KOYUNCU

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI**

**DANIŞMAN
YRD. DOÇ. DR. RECEP YUMURTACI**

İSTANBUL, 2012

T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**STATİK VAR KOMPANZASYON SİSTEMLERİNİN HARMONİKLER
BAKIMINDAN İNCELENMESİ**

Muhammed Ali KOYUNCU tarafından hazırlanan tez çalışması 19.03.2012 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Celal KOCATEPE
Yıldız Teknik Üniversitesi

Prof. Dr. Osman KILIÇ
Marmara Üniversitesi

ÖNSÖZ

Her geçen gün dünyamızda elektrik enerjisine olan ihtiyacın artması, enerji üretiminin biraz daha pahalılaşması, enerji verimliliği kavramının önemini artırmaktadır. Güç sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmak, verimliliği arttırmak ve enerji tutumluluğunu sağlamanın en etkin önlemlerinden biri Reaktif Güç Kompanzasyonu Sistemleridir.

Yarı iletken teknolojisinin gelişmesi, reaktif güç kompanzasyon sistemlerini yeni bir boyuta taşımıştır. Yarı iletkenlerin kullanılmasıyla gerçekleştirilen kompanzasyona Statik VAR Kompanzasyon denir. Statik VAR Kompanzasyon sistemlerinin birçok avantajının yanında, enerji kalitesini etkileyen harmoniklerin oluşmasına neden olması önemli bir sorundur. Bu tez çalışmasında Statik VAR kompanzasyon sistemleri, enerji kalitesini önemli derecede etkileyen harmonikler bakımından incelenerek, oluşabilecek problemler simülasyon ve deneysel ortamda test edilmiş, bu problemlere karşı çözümler üretilmiştir.

Çalışmalarımın her aşamasında bilgi ve deneyimleriyle bana destek veren, yönlendiren, zamanını ayıran değerli danışman hocam Yrd. Doç. Dr. Recep YUMURTACI'ya sonsuz teşekkürlerimi sunarım. Karşılaştığım bir takım problemleri aşmam konusunda yardımlarını esirgemeyen sayın hocam Doç. Dr. Mehmet UZUNOĞLU'na ve tezi zamanında bitirebilmem için beni sürekli teşvik ederek destek olan Arş. Gör. Ali Rıfat BOYNUEĞRİ'ye teşekkür ederim.

Son olarak, bütün eğitim hayatım boyunca yanımda olan ve desteklerini bir an olsun eksik etmeyen değerli aileme ayrıca teşekkürü bir borç bilirim.

Mart, 2012

Muhammed Ali KOYUNCU

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ.....	vi
KISALTMA LİSTESİ.....	vii
ŞEKİL LİSTESİ.....	viii
ÇİZELGE LİSTESİ	xii
ÖZET	xiv
ABSTRACT.....	xvi
BÖLÜM 1	
GİRİŞ.....	1
1.1 Literatür Özeti	1
1.2 Tezin Amacı	1
1.3 Hipotez	2
BÖLÜM 2	
STATİK KOMPANZASYON SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ	3
2.1 Kompanzasyon Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları.....	5
2.2 SVC Sistemleri	10
2.3 SVC Çeşitleri	13
2.3.1 Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör (TSC)	13
2.3.2 Tristör Kontrollü Reaktör (TCR).....	18
2.3.2.1 Tristör Kontrollü Reaktörün Akım ve Gerilim İfadeleri	20
2.3.2.2 Tristör Kontrollü Reaktörün Akım ve Gerilim Karakteristiği	21
2.3.3 Tristör Kontrollü Reaktör ve Sabit Kondansatör (FC TCR)	26
2.3.4 Tristör Kontrollü Reaktör ve Tristör Anahtarlamaalı Kondansatör (TSC TCR)	29
2.4 SVC'nin Matematiksel Olarak İncelenmesi	31
2.5 Örnek SVC Uygulamaları	33
BÖLÜM 3	
HARMONİKLER.....	38
3.1 Temel Harmonik Kaynakları	40
3.2 Başlıca Harmonik Kaynaklarından Bazıları	42

3.2.1	Transformatörler.....	42
3.2.2	Döner Makineler	49
3.2.3	Konverterler	50
3.2.4	Ark Fırınları.....	54
3.2.5	Statik VAr Generatörleri	55
3.2.6	Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları.....	56
3.2.7	Kesintisiz Güç Kaynakları.....	57
3.2.8	Elektronik Balastlar	58
3.2.9	Güç Elektroniği Elemanları.....	59
3.3	Harmoniklerin Zararları.....	61
3.3.1	Transformatörler Üzerine Etkileri	63
3.3.2	Döner Makineler Üzerine Etkileri	64
3.3.3	İletim Sistemleri Üzerine Etkileri.....	67
3.3.4	Kondansatör Grupları Üzerine Etkileri	67
3.3.5	Direnç Üzerindeki Etkisi	69
3.3.6	Güç Elektroniği Elemanları Üzerine Etkileri	70
3.3.7	Koruma Sistemleri Üzerine Etkileri	71
3.3.8	Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkileri	73
3.3.9	Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları.....	74
3.3.10	Harmoniklerin İletkenler Üzerindeki Etkisi	75
BÖLÜM 4		
HARMONİK STANDARLARI VE YÖNETMELİKLERİ.....		77
4.1	Türkiye’de ve Dünyada Kullanılan Harmonik Standartları.....	79
BÖLÜM 5		
SVC NİN HARMONİK ETKİSİNİN İNCELENMESİ		91
BÖLÜM 6		
SİMULASYON ÇALIŞMALARI.....		95
BÖLÜM 7		
DENEYSEL ÇALIŞMALAR		108
BÖLÜM 8		
SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI		120
BÖLÜM 9		
SONUÇ VE ÖNERİLER		132

SİMGE LİSTESİ

B_n	Gerilim harmoniği oranı
E_a	Aktif Enerji
E_r	Reaktif Enerji
I_n	Transformatörün sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımı
I_μ	Mıknatıslanma akımı
n	Harmonik derecesi
α°	Ölçülen tetikleme açısı
σ°	İletim Açısı

KISALTMA LİSTESİ

AA	Alternatif Akım
AHF	Aktif Harmonik Filtre
FACTS	Flexible Alternative Current Transmission System
FC	Fixed Capacitor
FSIG	Sabit Hızlı Endüksiyon Generatörü
HD	Tekil Harmonik Distorsiyon
HVDC	High Voltage Direct Current
PFC	Güç Faktör Düzenleyici Kondansatör
RMS	Root Mean Square
STATCOM	Static Compensator
SVC	Static VAR Compensator
TAK	Tristör Anahtarlama Kondansatör
TSC	Thyristor Switching Capacitor
TCR	Thyristor Controlling Reactor
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon
TTD	Toplam Talep Distorsiyonu

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1	Reaktif güç değeri sürekli olarak değişen tüketici gösterimi [2]	7
Şekil 2. 2	Kontrol edilmeyen bir kapasitör bankasının anahtarlanması kaynaklanan sorun	10
Şekil 2. 3	Tristör kontrollü reaktörden oluşan SVC yapısı	10
Şekil 2. 4	SVC devre şeması	13
Şekil 2. 5	Tristör anahtarlama kondansatörüne ait (a) basit devre modeli ile (b) akım ve gerilim dalga şekilleri [3]	14
Şekil 2. 6	Tristör anahtarlama kondansatörünün akım ve gerilim karakteristiği [3]	16
Şekil 2. 7	Temel TSC devresi ve gerilim dalga şekilleri	17
Şekil 2. 8	Tristör kontrollü reaktörüne ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) tetikleme açısı α 'ya göre akım değişimleri	18
Şekil 2. 9	Tristör kontrollü reaktör modeline ait (a) $\alpha=90^\circ$ ve $\sigma=180^\circ$, (b) $\alpha=100^\circ$ ve $\sigma=160^\circ$,(c) $\alpha=130^\circ$ ve $\sigma=100^\circ$,(d) $\alpha=150^\circ$ ve $\sigma=60^\circ$ durumlarındaki akım dalga şekilleri .	19
Şekil 2. 10	Tristör kontrollü reaktör modeline ait (a) $\alpha=105^\circ$ ve (b) $\alpha=150^\circ$ için akım ve gerilim dalga şekilleri [3]	20
Şekil 2. 11	Tristör kontrollü reaktöre ait akım ve gerilim karakteristiği [3]	22
Şekil 2. 12	Bir fazlı TCR yapısı	23
Şekil 2. 13	TCR'ye ait akım ve gerilim dalga şekilleri	24
Şekil 2. 14	Üçgen bağlı TCR ve filtreler	25
Şekil 2. 15	TCR'ye ilişkin V-I karakteristik eğrisi [4]	26
Şekil 2. 16	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait (a) basit devre modeli ve (b) akım dalga şekilleri	27
Şekil 2. 17	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde gerilim ile reaktif güç değişimi	27
Şekil 2. 18	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde düşürücü transformatörün olduğu durumdaki (a) basit devre modeli ve (b) akım gerilim karakteristiği	28
Şekil 2. 19	Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatöre ait basit devre modeli	29
Şekil 2. 20	Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatörüne ait akım ve gerilim karakteristiği	30
Şekil 2. 21	Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatöre ait akım karakteristiği [3]	30

Şekil 2. 22	Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) güç akış analizi için eşdeğer gösterimi.....	31
Şekil 2. 23	AA iletim hattına ait (a) paralel statik VAR kompanzasyonu uygulanmış basit güç sistemi modeli ve(b) güç iletim karakteristiği	33
Şekil 2. 24	Tek hat diyagramı, direkt bağlı SVC	35
Şekil 2. 25	Sabit hızlı endüksiyon generatörlü rüzgar türbini.....	36
Şekil 3. 1	Temel dalga, (a) 3. ve (b) 5. harmoniklerle (c) bileşke dalga	39
Şekil 3. 2	Harmonik spektrum gösterimi: 2 -boyutlu (a) ve 3-boyutlu (b) gösterim .	40
Şekil 3. 3	Harmonik histogram gösterimi	40
Şekil 3. 4	Y/Y ve Y/ Δ bağlı transformatörlerde üç ve üçün katı harmonik akım yönleri	45
Şekil 3. 5	Demir çekirdeğin mıknatıs eğrisi.....	46
Şekil 3. 6	Transformatör mıknatıslanma akımı.....	47
Şekil 3. 7	Üç fazlı 6 darbeleri konverter	51
Şekil 3. 8	Üç fazlı 12 darbeleri konverter (yarı kontrollü doğrultucu)	52
Şekil 3. 9	Yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi için (a) dalga şekli, (b) oluşan harmonikler.....	53
Şekil 3. 10	Kesintisiz güç kaynağının prensip şeması	58
Şekil 3. 11	Diyot ve tristöre ait çalışma karakteristikleri [16] a) diyot b) tristör [7] ...	60
Şekil 3. 12	Bir doğru akım enerji iletim hattının prensip bağlantı şeması,(1: Generatör, 2: Yükseltici transformatör, 3: Doğrultucu, 4: iletim hattı, 5: Evirici, 6: İndirici transformatör)	60
Şekil 3. 13	Omik direncin frekansla artması (a) sinüsoidal akımlı durum (b) nonsinüsoidal durum	70
Şekil 3. 14	Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi	75
Şekil 4. 1	Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi ($i=sbt$)	79
Şekil 4. 2	Sistemin kayıp gücünün toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi ($I.R=sbt$)	79
Şekil 5. 1	Tristör kontrollü reaktörde akım harmonikleri	91
Şekil 5. 2	Tristör kontrollü reaktörde I_{L1} ve I_h akımları	92
Şekil 5. 3	Gwangyang Çelik Fabrikasının güç sisteminin basitleştirilmiş tek hat diyagramı	93
Şekil 5. 4	2. Harmonik filtrenin hasarlı kapasitör birimleri[10].	94
Şekil 6. 1	Simülasyon modeli	95
Şekil 6. 2	Harmonikli şebeke modeli	96
Şekil 6. 3	Trafo verileri	97
Şekil 6. 4	FC-TCR SVC modeli	98
Şekil 6. 5	Yük modeli.....	99
Şekil 6. 6	Yüksüz ve SVC'siz durumda gerilim harmonikleri spektrumu.....	99
Şekil 6. 7	Yüksüz, SVC kondansatörü ile akım ve gerilim spektrumu	100
Şekil 6. 8	Yüksüz durumda SVC aktif ise gerilim harmonikleri	101
Şekil 6. 9	Yüksüz durumda SVC aktif ise akım harmonikleri.....	102
Şekil 6. 10	Sadece 220 Ω ve 0,4 H'lik yük ile akım ve gerilim harmonikleri	103
Şekil 6. 11	220 Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanze edildiğinde gerilim harmonikleri	104
Şekil 6. 12	220 Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanze edildiğinde akım harmonikleri.	105
Şekil 6. 13	Sadece 3 adet 220 Ω ve 0,4 H'lik yük ile akım ve gerilim harmonikleri....	106

Şekil 6. 14	Üç adet paralel bağlanmış 220Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanze edildiğinde gerilim ve akım harmonikleri	107
Şekil 7. 1	Deney düzeneği.....	108
Şekil 7. 2	İzolasyon trafosu	109
Şekil 7. 3	Ölçümlerin yapıldığı güç kalitesi ve enerji analizörü.....	110
Şekil 7. 4	Trafo boşta çalışırken çıkışından ölçülen şebeke harmonikleri	110
Şekil 7. 5	Deneysel çalışmalarda kullanılan FC-TCR SVC sistemi	111
Şekil 7. 6	Trafo çıkışına 30 μ F kondansatör bağlandığında akım ve gerilim harmonikleri.....	112
Şekil 7. 7	Sadece SVC sisteme bağlı durumda gerilim harmonikleri	113
Şekil 7. 8	Sadece SVC sisteme bağlı durumda akım harmonikleri.....	113
Şekil 7. 9	Yük bankaları	114
Şekil 7. 10	Sadece 220Ω ve 0,4H değerinde yük sisteme bağlı durumda iken gerilim ve akım harmonikleri.....	115
Şekil 7. 11	Nonlineer yük SVC ile kompanze edildiğinde gerilim harmonikleri.....	116
Şekil 7. 12	Nonlineer yük SVC ile kompanze edildiğinde akım harmonikleri.....	116
Şekil 7. 13	Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4H değerinde yük sisteme bağlı durumda iken gerilim ve akım harmonikleri	118
Şekil 7. 14	Üç adet 220Ω ve 0,4H değerinde yük svc ile kompanze edildiğinde gerilim ve akım harmonikleri	119
Şekil 8. 1	Trafo boşta çalışırken çıkışından ölçülen şebeke harmonikleri için simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması	120
Şekil 8. 2	Trafo çıkışına 30 μ F kondansatör bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması.....	121
Şekil 8. 3	Trafo çıkışına 30 μ F kondansatör bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması	122
Şekil 8. 4	Sadece SVC sisteme bağlı olduğu durumda deneysel ve simülasyon çalışmalarında gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması	123
Şekil 8. 5	Sadece SVC sisteme bağlı olduğu durumda deneysel ve simülasyon çalışmalarında akım harmoniklerinin karşılaştırılması.....	124
Şekil 8. 6	Sadece 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması	125
Şekil 8. 7	Sadece 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması.....	126
Şekil 8. 8	220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması	127
Şekil 8. 9	220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması.....	128
Şekil 8. 10	Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması	128
Şekil 8. 11	Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması	129
Şekil 8. 12	3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması	130

Şekil 8. 13 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması 130

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 2. 1	TCR'nin tetikleme ve iletim açılarına bağlı olarak değişimi 25
Çizelge 3. 1	Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu 43
Çizelge 3. 2	Ark fırınının ortalama harmonik değerleri 55
Çizelge 3. 3	Magnetik balastlı bir floresan lamba akımının harmonik spektrumu... 57
Çizelge 3. 4	Temel değerin % olarak harmonik içerikleri 59
Çizelge 3. 5	Darbeleri bir konverterin döner makine üzerindeki harmonik etkinliği 66
Çizelge 4. 1	Çeşitli ülkelerin harmonik standartları..... 81
Çizelge 4. 2	380 KV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri ... 82
Çizelge 4. 3	20- 154 KV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri 82
Çizelge 4. 4	Kabul edilebilir akım harmonik limitleri [6] 83
Çizelge 4. 5	Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC-61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri..... 84
Çizelge 4. 6	Endüstriyel santraller için IEC-61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf elemanlar)..... 84
Çizelge 4. 7	Endüstriyel santraller için IEC-61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3. sınıf elemanlar)..... 84
Çizelge 4. 8	Konutlarla ilgili orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri 85
Çizelge 4. 9	D sınıfı donanım için IEC 61000-3-2' e göre izin verilen maksimum harmonik akımları 86
Çizelge 4. 10	IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları..... 86
Çizelge 4. 11	IEEE'nin dağıtım sistemlerine ait akım harmonik distorsiyon sınırları... 86
Çizelge 4. 12	İsveç SEF kuruluşunca izin verilen THD 88
Çizelge 4. 13	IEEE'nin ABD için belirlediği THD sınırları..... 88
Çizelge 4. 14	AS 2279 standardına göre Avustralya harmonik sınırları 88
Çizelge 4. 15	Yeni Zelanda için harmonik sınırları 89
Çizelge 4. 16	Finlandiya yönetmeliğine göre harmonik sınırları 89
Çizelge 4. 17	İngiltere yönetmeliğine göre harmonik sınırları 89
Çizelge 4. 18	NORSOK E-001/2 harmonik distorsiyon limitleri 90
Çizelge 4. 19	Müsaade edilen çevirici yükler 90
Çizelge 6. 1	Yüksüz durumda ölçülen parametreler..... 100
Çizelge 6. 2	Yüksüz durumda SVC aktif iken ölçülen parametreler..... 102

Çizelge 6. 3	Sadece 220Ω ve 0,4 H'lik yük ile ölçülen parametreler	103
Çizelge 6. 4	220Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanze edildiğinde ölçülen parametreler	105
Çizelge 6. 5	Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4 H'lik yük ile ölçülen parametreler	106
Çizelge 6. 6	Üç adet paralel bağlanmış 220Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanze edildiğinde ölçülen parametreler	107
Çizelge 7. 1	Sadece kondansatör bağlı iken şebekeden çekilen parametreler	112
Çizelge 7. 2	Sadece SVC bağlı iken şebekeden çekilen parametreler	114
Çizelge 7. 3	Nonlineer yükün parametreleri	115
Çizelge 7. 4	Nonlineer yük SVC ile kompanze edildiğinde ölçülen parametreler	117
Çizelge 7. 5	Sadece 3 Adet 220Ω ve 0,4H değerinde yük sisteme bağlı durumda iken ölçülen parametreler	118
Çizelge 7. 6	3 adet 220Ω ve 0,4H değerinde yük svc ile kompanze edildiğinde sisteme bağlı durumda iken ölçülen parametreler	119
Çizelge 8. 1	Trafo çıkışına 30 μF kondansatör bağlandığında şebekeden çekilen parametrelerin karşılaştırılması	122
Çizelge 8. 2	Sadece SVC sisteme bağlı olduğu durumda şebekeden çekilen parametrelerin karşılaştırılması	124
Çizelge 8. 3	Sadece 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında ölçülen parametrelerin karşılaştırılması	126
Çizelge 8. 4	220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde ölçülen parametrelerin karşılaştırılması	128
Çizelge 8. 5	Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında ölçülen parametrelerin karşılaştırılması	129
Çizelge 8. 6	3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yük SVC ile kompanze edildiğinde ölçülen parametrelerin karşılaştırılması	131

STATİK VAR KOMPAZASYON SİSTEMLERİNİN HARMONİKLER BAKIMINDAN İNCELENMESİ

Muhammed Ali Koyuncu

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Yrd. Doç. Dr. Recep Yumurtacı

Son yıllarda dünyamızın karşı karşıya kaldığı en önemli sorunlardan biri olan enerji krizi nedeniyle yeni enerji kaynakları arayışı artarken, mevcut olan enerjinin optimum şekilde kullanılması ve kurulmuş olan sistemlerin en verimli şekilde kullanılması yönünde çalışmalar yoğunlaşmıştır.

Güç sistemlerinde enerjinin verimli şekilde kullanılmasının en etkin önlemlerinden birisi reaktif güç kompanzasyonudur. Reaktif güç ihtiyacı sabit olmayan tüketiciler için belirli teknikler kullanılarak anahtarlanan otomatik reaktif kompanzasyon sistemleri kurulmuştur. Bu tekniklerden en önemlilerinden biri statik var kompanzasyon sistemidir. Yarı iletken güç elemanları kullanılarak reaktif gücün kontrol edilmesine Statik VAR Kompanzasyonu ve bunu gerçekleştiren sisteme de Statik VAR Kompanzasyon sistemi denir.

Statik VAR kompanzasyon sistemlerinin bazı önemli özellikleri, geçici olayların en aza inmesi, kayıpların az olması, yedekleme olanağı, kontrol esnekliği ve güvenilirliğin yüksek olması şeklinde sıralanabilir.

Bu çalışmada son yıllarda büyük önem kazanan statik VAR kompanzasyon sistemleri ve bu sistemlerin enerji kalitesine etkileyen en önemli bileşen olan akım ve gerilim harmoniklerinin etkisi incelenmiş, son olarak da SVC'nin farklı yüklenme durumunda harmoniklerinin etkisini göstermek için laboratuvar ortamında kurulan prototip bir set

yardımla deneysel çalışma yapılmış ve aynı zamanda simulasyon ortamında da deneysel değerleri çalışılmış ve gözlenmiştir.

Yapılan alışmada SVC sistemlerinin tek başına kullanıldıklarında oldukça harmonik ürettiği bu yüzden de filtreler ile kullanılması gerektiği grlmştr. Ayrıca bu çalışma ile SVC sistemlerinin yüklenme durumlarına göre harmonik etkileri incelenmiştir. Tez çalışmasının çıktılarından biri de simülasyon modeli gerçekleştirilerek simülasyon sonuçlarının deneysel sonuçlar ile doğrulanmasıdır. Bu sayede gelecekte daha karmaşık ve ölçüm alınması zor olan sistemler için bilgisayar ortamında çalışmalar yapılabilecektir.

Anahtar Kelimeler: Kompanzasyon, harmonikler, Statik VAr Kompanzatör, SVC simülasyon modeli

**INVESTIGATION OF HARMONICS IN STATIC VAR COMPANSATION
SYSTEMS**

Muhammed Ali Koyuncu

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Advisor: Assoc. Prof. Dr. Recep Yumurtacı

Due to the energy crisis being one of the most important issues our world is facing, the number of researches on novel energy generation techniques and resources has increased and these researches are mainly focused on optimum consumption of energy and making systems become more efficient.

Reactive power compensation is one of the most efficient ways to use energy generated in power systems. There are some automatic compensation systems produced by using some specific techniques for switching. "Static VAR Compensation System" is one of the most significant techniques. Controlling reactive power rate by using semiconductors is called "Static VAR Compensation" and system produced by using this technique is called "Static VAR Compensation System".

Static VAR compensation systems have some advantages such as reduction in number of transient states, reduced rate of losing energy, backup features, flexible control and high reliability.

In this study, the static VAR compensation systems which are highly important nowadays and the effects of the harmonics of current and voltage which are the most important components having effects on the energy quality of VAR compensation systems are examined, finally experiments by using a prototype set which is formed in a laboratory environment are carried out in order to express the effect of harmonics in

various loadings of SVC and in the meantime experimental values are studied and observed using computer simulations.

In this study, it is shown that when SVC systems used without filters they cause high values of harmonic distortion. And also with this study harmonic effect of SVC systems due to the loading conditions are also analyzed. Another conclusion of this study is a simulation model is build and results of simulations are verified with applications. Thus in future studies such systems more complicated and hard to have measurement can be analyzed in computer simulations.

Key words: Compensation, Harmonics, Static VAr Compensator, SVC simulation model

1.1 Literatür Özeti

20. yüzyılda teknolojinin gelişmesiyle birlikte dünyanın enerji ihtiyacı artmıştır. Buna bağlı olarak özellikle II. Dünya Savaşı'ndan sonra fosil yakıtların üretiminde de hızlı bir artış gözlenmiştir. Bundan dolayı oluşması binlerce yıl alan doğal gaz, petrol ve kömür gibi fosil yakıtlarının rezervlerinin çok kısa zamanda tükeneyeceği tahmin edilmektedir. Bazı araştırmaların sunduğu verilere göre ham petrolün yaklaşık 41 yıl, doğal gazın 61 yıl ve kömürün ise 204 yıl sonra biteceği öne sürülmektedir. Ayrıca bu fosil yakıtların enerji üretiminde kullanılmaları çevreye önemli derecede zarar vermektedir [4]. Dünyanın artan enerji ihtiyacı karşısında enerji verimliliği kavramı ve bunun yanında enerjide kalite kavramı gün geçtikçe önemini daha çok göstermektedir. Dünyamızda elektrik enerjisine olan ihtiyacın her geçen gün biraz daha artması, enerji üretiminin biraz daha pahalılaşması, taşınan enerjinin de kaliteli, ucuz ve hakiki iş gören aktif enerji olmasını daha zorunlu kılmaktadır. Güç sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmanın, verimliliği arttırmanın ve enerji tutumluluğunu sağlamanın en etkin önlemlerinden birini Reaktif Güç Kompanzasyonu oluşturmaktadır [2]. Bu konudaki çalışmalar da her geçen gün artmaktadır. Konular hakkında ayrıntılı bir literatür özeti ilerleyen bölümlerde sunulacaktır.

1.2 Tezin Amacı

Enerjinin verimli şekilde kullanılmasında en etkin yöntemlerden birisi olan reaktif güç kompanzasyonunda son yıllarda gelişen teknolojiyle birlikte önem kazanan SVC

sistemlerinin, enerji kalitesinde önemli bir yeri olan harmonikler bakımından inceleyerek, SVC sistemlerinin optimum kullanılmasını sağlamak amacıyla bu tez çalışması yapılmıştır. Ayrıca SVC sistemlerinin değişik yüklenme durumlarında harmonikler açısından ne gibi sorunlarla karşılaşılacağı yapılan simülasyon ve deneysel çalışmalarla gözlenmiş ve incelenmiştir.

1.3 Hipotez

Sistemlerin ayrıntılı analizlerinden önce bilgisayar ortamında hızlı ve güvenilir sonuçlar elde edilebileceği basit yapılı bir model geliştirilerek gelecekte bu konular üzerine yapılabilecek çalışmalara temel atılmıştır.

Bu tez çalışmasının 1.kısımında enerji verimliliğini sağlamanın en etkin yöntemlerinden biri olan Statik VAR Kompanzasyon Sistemlerinden bahsedilmiş; 2.kısımda ise enerji kalitesini ciddi şekilde etkileyen harmonikler üzerinde durulmuştur. 3.bölümde ise Türkiye’de ve dünyada kullanılan harmonik standartlarından kısaca bahsedilmiştir. 4. bölümde SVC sistemlerini harmonikler bakımından inceleyerek, 5. bölümde simülasyon ortamında FC-TCR SVC sisteminin benzetim çalışmaları yapılmıştır. 6. Bölümde ise laboratuvar ortamında deneysel sonuçlar incelenmiş ve 7. Bölümde ise simülasyon ve deneysel sonuçlar karşılaştırılmıştır. Tezin son bölümünde ise bu tezin çıktıları incelenmiş ve bilime katması muhtemel çıktıları sunulmuştur.

STATİK KOMPANZASYON SİSTEMLERİNİN İNCELENMESİ

Elektrik enerjisine olan talep, teknolojideki gelişmelere ve nüfus artışına bağlı olarak her geçen gün artmış ve kişi başına tüketilen enerji miktarı ülkelerin gelişmişlik düzeyinin bir göstergesi olmuştur[1]. Elektrik enerjisine olan talepteki artış, daha güvenilir ve daha kaliteli bir enerji kavramını ortaya çıkarmıştır [2].

Kaliteli bir elektrik enerjisi sağlayabilmek için;

- Enerjinin sürekliliği (kararlı hâl),
- Gerilim ve frekans sabitliği,
- Güç faktörünün bire yakınlığı,
- Faz gerilimlerinin dengeli olması,
- Akım ve gerilimdeki harmonik miktarlarının belirli değerlerde kalması,

gibi bir takım kriterlerin göz önüne alınması gereklidir [4].

Daha güvenli ve daha kaliteli bir elektrik enerjisi için gerekli olan bu kriterler, elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtımında, mutlaka göz önünde bulundurulmalıdır [2].

Büyüyen ve karmaşılaşan elektrik sistemlerinin üretim, iletim ve dağıtım kapasitelerinin arttırılması, reaktif güç akışının 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 [1].

Reaktif güç kompanzasyonu, tesislerde elektro dinamik prensibine göre çalışan yüklerin çekeceği reaktif gücün, tüketim merkezlerinde özel bir reaktif güç üreticisi tesis edilerek karşılanmasıdır [2].

Generatörleri bütün yük merkezlerinin yakınına yerleştirmek mümkün olmadığından, şebeke geriliminin kontrolü ve güç iletim kapasitesinin artırılması için reaktif kompanzasyon metotları tasarlanmıştır. Bu metotlar şebeke gerilimi ve reaktif güç akışının, reaktif güçteki değişikliklere karşı duyarlı olması nedeniyle etkili bulunmaktadır. Yüksek gerilim hatlarının tesisiyle, seri kapasiteler ve şönt reaktörler önemli kompanzasyon cihazları arasında yer almıştır [1].

Tüketicilerin çektiği reaktif güç, iletim hatlarını fiziksel anlamda işe yaramayan bir güç ile yüklenmesi ve hat kesitinin bir kısmını bu faydasız güce tahsil edilmesi anlamına gelmektedir. Tüketicilerin hızla artması karşısında iletim hatlarının kesitlerinin artırılması söz konusu olmuştur. Ancak tüm iletim hatlarının kesitlerinin artırılması maddi açıdan büyük bir yük getirmektedir. Bunun yerine yasalar çıkartılarak, tüketicilerin şebekeden çektikleri reaktif gücün bir kısmını kompanzasyon sistemleri ile karşılamaları istenmiştir. Sözleşme gücü 9 kW – 29,9 kW arası işletmelerde endüktif reaktif güç aktif gücün %33'ünü, kapasitif reaktif güç aktif gücün %20'sini aştığı zaman ücretlendirilir. Sözleşme gücü 30kW üzeri işletmelerde endüktif reaktif güç aktif gücün %20'sini, kapasitif reaktif güç aktif gücün %15'ini aştığı zaman ücretlendirilir.

Buna göre, müsaade edilen reaktif güç katsayısı endüktif olarak 0.98, kapasitif olarak da 0.99'dir. Abone belirtilen sınırları aşmadığı takdirde reaktif enerji bedeli alınmaz. Bu sınır aşıldığı takdirde çekilen endüktif reaktif enerjinin tamamına endüktif reaktif enerji tarifi uygulanır.. Reaktif güç üretimini zorunlu kılan bir diğer olay ise, müşteri baralarının gerilim genlik değerlerini (değişik yük durumlarında dahi) sabit tutma ihtiyacıdır[2].

Tüketicilerin bağlı olduğu baranın gerilim genlik değeri nominal değerde sabit tutulamaz ise tüketici cihazlarına gelen gerilim bu cihazların verimli bir şekilde çalışmasını mümkün kılmaz, hatta zarar bile verebilir. Bu tehlikeyi ortadan kaldırmak için enterkonnekte sistemin uygun yerlerine kompanzasyon cihazları bağlanarak sisteme reaktif güç pompalanır ve gerilim genlik değeri sabit tutulmaya çalışılır [2].

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

1. Gerilim kararsızlığının artması,
2. Frekansın sürekli olarak değişmesi,
3. Reaktif güç sebebi ile hattın gereksiz yüklenmesinden dolayı iletilen güç değerinin azalması,
4. Güç faktörünün birden küçük bir değer alması,
5. Faz akımlarının ve gerilimlerinin dengesiz olması,
6. Kayıpların artması. [3]

2.1 Kompanzasyon Sistemlerinin Avantajları ve Dezavantajları

Reaktif güç kompanzasyonun şebeke açısından faydaları[4];

- Şebekenin güç kalitesi artar,
- Şebekenin ısı kayıpları azalır,
- Gerilim düşümü azalır,
- İletim hatlarının geçici durum kararlılığı iyileşir,
- Faz gerilim dengesizlikleri azaltılmış olur,
- Gerilim dalgalanmaları (flicker olayları) azalır,

Reaktif güç kompanzasyonun tüketici açısından faydaları ise [4];

- İşletme maliyetleri azalır,
- Güç katsayısı düzeltildiği için müşteri şebekeden daha az reaktif güç çeker ve
- Daha az para öder,
- Elektrik enerjisinin kalitesizliğinden doğabilecek arıza riski en aza indirilmiş olur.
- Enerji kalitesi ile üretim kalitesi direkt bağlantılı olacağı için işletmenin ürün kalitesi de artar.

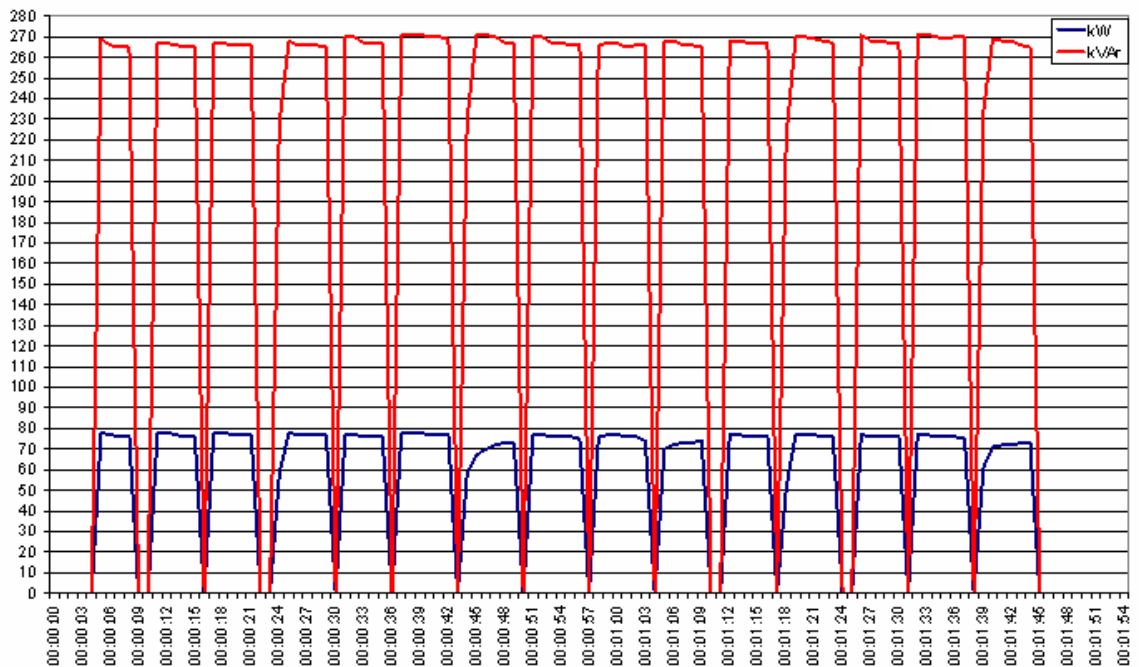
Bir reaktif güç kompanzasyon sisteminin tasarlanması sırasında göz önüne alınacak önemli noktalar aşağıda sıralanmıştır.

- Maksimum reaktif güç gereksinimi,
- Tesisin aşırı yüklenme sınırı ve süresi,
- Aşılması gereken gerilim sınırları,
- Frekans ve değişimi,
- Gerilim regülasyonu,
- Reaktif güç kompanzasyon sisteminin cevap verme süresi,
- Maksimum harmonik bozulmaları,
- Dengesiz gerilimde ve yükte çalışma verimi,
- Koruma donanımı ve koordinasyonu,
- İşletmenin ileriye dönük genişleme olanakları,
- Güvenilirlik,
- Bakım,
- Çevresel faktörler, gürültü seviyesi, sıcaklık, nem, soğutma sistemi, kirlenme [3].

Reaktif güç kompanzasyonu ile, reaktif akım, kurulan reaktif güç kompanzasyon sistemi aracılığı ile karşılanacağı için, şebekeden daha düşük değerlerde akım çekilecektir. Bunun sonucu olarak da transformatörler ve hatlar daha az yüklenecektir. Ayrıca aşırı yüklenmeler önlenmiş olacaktır. Aşırı yüklenme durumu yoksa tesisin yüklenme kapasitesi artmış olacaktır [3].

Statik faz kaydırıcıları olarak kullanılan kondansatörler, tüketim merkezlerinde yük bağlarında sabit olarak kullanılabilir. Ancak Şekil 2.1.'de görüldüğü gibi şebekeden çekilen reaktif güç değeri sürekli olarak değişen tüketicilere pratikte daha sık rastlanır. Bu tür tüketicilerin reaktif güç kompanzasyonu için sabit kapasiteli kompanzasyon çözüm olamaz [2].

Ancak yarı iletken teknolojisinin gelişmesi, yüklerin kontrolünü yeni bir boyuta taşımıştır. Tristör, IGBT ve GTO gibi yarıiletken malzemeler akım ve gerilimi kontrol ederek yüklerin hızını çok daha fazla arttırmıştır. Yarıiletken malzemelerin kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte, daha hızlı değişen reaktif gücü karşılamak için yarı iletken malzeme kontrollü kompanzasyon sistemleri geliştirilmiştir[2].



Şekil 2. 1 Reaktif güç değeri sürekli olarak değişen tüketici gösterimi [2]

Uygulamalarda gerilim seviyesindeki düşüşlerle nominal çalışma koşullarında bozulmalar meydana gelir. Elektriksel sistemler, belirlenmiş olan nominal gerilim seviyelerinde verimli olarak çalışmaktadır. Sistemlerin nominal gerilimlerinin altındaki gerilim seviyelerinde çalışması, elektrik sistemlerinin verimsiz çalışmasına ya da hiç çalışmamasına neden olacaktır. Bu yüzden gerilim regülasyonu elektriksel sistemler için oldukça önemlidir. Reaktif güç kompanzasyonu da gerilim regülasyonu için en uygun yöntemlerden birisidir. Tristör anahtarlamalı kondansatörler sabit kondansatörlere

göre daha iyi gerilim regölasyonu sağlamaktadır. Gerilim regölasyonu sayesinde yüke aktarılan güç artmakta ve yük gerilimi nominal değerine daha da yakınlaşmaktadır. Böylece güç sistemi için nominal şartlar sağlanmakta ve güç kalitesi arttırılmaktadır [3].

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

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

Günümüzde yarı iletken teknolojisinin gelişmesi, yüklerin devreye giriş ve çıkış sürelerini birkaç saniye gibi çok kısa zaman aralığına indirmiştir. Dolayısıyla, kontaktör anahtarlama kompanzasyon sistemleri, reaktif gücü hızlı değişen yüklerin kompanzasyonunu karşılayamaz hale gelmiştir. Bu nedenle, kondansatörlerin devreye girmesinde değişik bir anahtarlama sisteminin kullanılması zorunlu hale gelmiştir. [2]

Sabit ya da anahtarlama paralel kondansatörler ve reaktörler kullanarak, iletim ve dağıtım hatları boyunca gerilim genliği sabit tutulur, bununla birlikte talep edilen güçteki değişimlere rağmen gerilim dalgalanmaları minimize edilir [3].

AA güç sistemlerine statik VAR kompanzasyon sistemlerinin kullanılmasının getireceği yararlar aşağıda sıralanmıştır.

- İletim hatlarının kararlı durumdaki aktif güç iletim kapasiteleri artar.

- Değişken yük durumu ve hattın devreye alınması gibi çalışma şartlarında gerilim dalgalanması minimize edilir.
- Her faz ayrı ayrı kompanze edilebilir (dengesiz yükler için avantajlı).
- Yüksek emniyet sağlayarak, güvenliği artırır.
- Yüksek verim sağlayarak, kayıplar azaltılır.
- Düşük hacim sayesinde yüksek güç yoğunluğu sağlanır.
- Cevap verme süresinin kısalmasıyla hızlı kontrol sağlanır.
- Kondansatörler, gerilimlerinin sıfır geçiş noktalarında tristörlerle devreye alınırlar, böylece kontaktörlü sistemlerde oluşan piklerin meydana gelmesi engellenir [3].

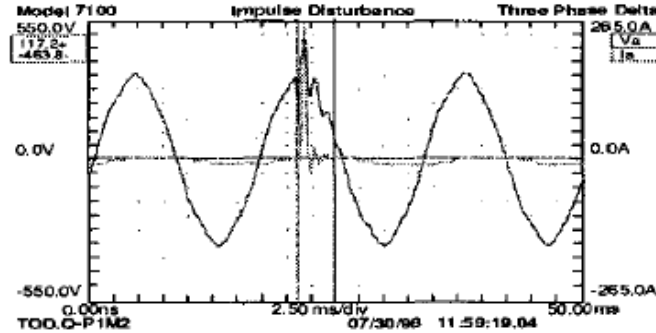
Daha önceleri bir çeşit kompanzasyon yöntemi olarak geliştirilen SVC'ler artık gerilim kalitesini artırmak amaçlı da kullanılmaktadır. Bu cihazların güç sistemlerinde gerilim kararlılığını sağladığı bilinmektedir [4].

Güç sistemlerinde kullanılan SVC'lerin gerilim regülasyonu üzerine olumlu etkiler göstermesi çeşitli uygulamalarda kullanılmasını sağlamıştır. Bu yönüyle gerilim regülasyonunun çok büyük bir problem olduğu rüzgar enerji santrallerinde de SVC'ler kullanılmaya başlanmıştır. SVC'lerin en iyi cevabı bağlandıkları noktada vermeleri sebebiyle rüzgar santrallerinin şebekeye bağlandığı noktada devreye alınırlar ve güç sistemi için birçok avantaj sunarlar [4].

SVC'nin hızlı cevap vermesi, kararlı hal ve dinamik gerilim kontrolünü gerçekleştirme işlemlerinin yapılabilmesi için son derece uygundur. Ayrıca SVC'nin bağlantı noktasında indirici bir transformatöre ihtiyaç duymaması da çok büyük avantajlar sağlayabilmektedir [4].

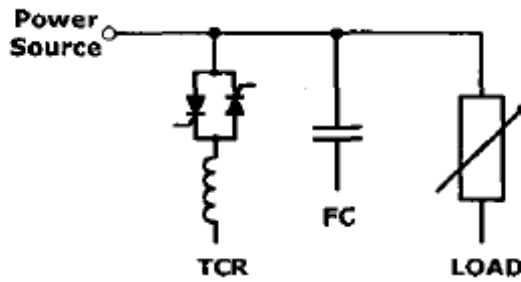
Sabit kapasitör bankalarıyla veya münferit kompanzasyon şeklinde mekanik anahtarlamalar ile sağlanan kompanzasyon, transientlere ve akım, gerilim rezonanslarına neden olabilir. Kapasitörlerin anahtarlanmasından doğan bu iki sorun kötü çalışma şartlarına, hassas cihazların bozulmasına ve güç kalitesiyle ilgili problemlerin oluşmasına neden olabilir. Ayrıca transientlerin genliklerinden dolayı

mekanik kontaklarda sorunlar oluşabilir, kapasitörlerde ve diğer cihazların ömürlerinin azalmasına neden olabilir. Şekil 2.2’de kontrol edilmeyen bir kapasitör bankasının anahtarlanmasından kaynaklanan sorun gösterilmektedir.



Şekil 2. 2 Kontrol edilmeyen bir kapasitör bankasının anahtarlanmasından kaynaklanan sorun

Şekil 2.3’de gösterilen SVC yapısı sabit kapasitörlü tristör kontrollü reaktörden oluşmaktadır.



Şekil 2. 3 Tristör kontrollü reaktörden oluşan SVC yapısı

2.2 SVC Sistemleri

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

En genel tanımıyla FACTS’ler, şebeke gerilimiyle güç elektroniği elemanlarını ve metotlarını birleştiren elektronik yapılardır. FACTS teknolojisinin enerji sistemindeki

uygulamalarında gerekli standartların oluşması, FACTS cihazlarının tasarım ve işletmesinde dikkat edilmesi gereken hususların belirlenmesi için 1980' den bu yana Elektrik Güç Araştırma Enstitüsü (Electric Power Research Institute), CIGRE (Conférence Internationale des Grands Réseaux Electriques) ve birçok kuruluş çalışmalar yapmaktadır [3].

Teknolojideki gelişmelerle gelişen pazar ihtiyaçlarına cevap vermeye çalışılmış, ilerleyen yarıiletken ve kontrol teknolojileriyle, statik VAR kompanzasyonunda önemli gelişmeler sağlanmıştır. 1970'lerden önce, ark fırını kompanzasyonu için çalışmalar yapılmış ve kısa bir süre sonra bu çalışmalar iletim sistemlerinin kompanzasyonu için kullanılmıştır. İlk Statik VAR kompanzasyonu, 1978' de Minnesota Güç ve Aydınlatma sisteminin Shannon İstasyonunda (Shannon Substation of the Minnesota Power and Light (MP&L)) 40 MVar değerinde kurulmuştur. 1978' den beri, güç sistemi uygulamalarında statik VAR kompanzasyonunun kullanılmasında artış olmuştur. 2000' li yılların başına kadar, kurulu halde 41 tane iletim hattı kompanzasyonu ve bu sayının da üzerinde henüz tasarımı devam eden projeler vardı [3].

Esnek AA iletim sistemlerinin avantajları aşağıda sıralanmıştır.

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

Esnek AA iletim sistemlerinin dezavantajları aşağıda sıralanmıştır.

- Kullanılan elemanlar ülkemiz için pahalıdır ve ithalata dayalıdır.
- Sistemlerin tasarımını, kuruluşunu, bakımını ve onarımını yapacak yetişmiş eleman sayısı sınırlıdır.
- Yarı iletken elemanlarda oluşan kayıplar sonucu ısınmalar meydana gelir. Bunun için ek donanım gerekir.

- FACTS sistemlerin temelini oluşturan yarı iletken elemanların kontrolü için tetikleme sinyallerine ihtiyaç vardır. Bu tetikleme sinyalleri ilave elektronik devreler ile sağlanmalıdır.
- FACTS teknolojisi yüksek gerilimlerde kullanıldığından elemanların izolasyonu problem olmaktadır [3].

IEEE Statik Var Kompanzatörü, güç sistemlerinde reaktif güç akışını kontrol eden şönt bağlı statik generatör olarak tanımlanmaktadır [6].

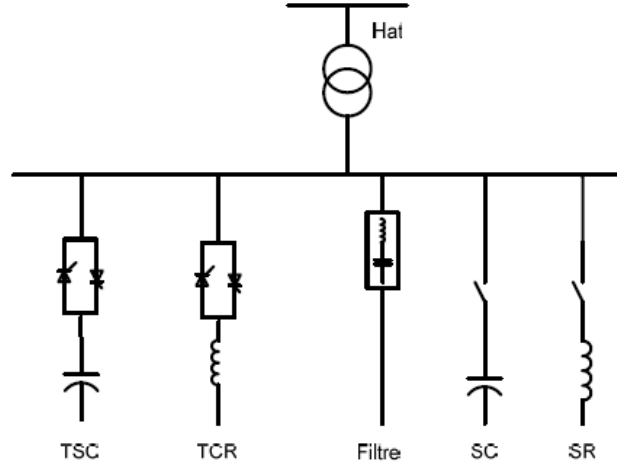
Prensip olarak, yarı iletken güç elemanları kullanılarak reaktif gücün kontrol edilmesine Statik VAR Kompanzasyonu, (Static VAR Compensation, SVC) ve bunu gerçekleştiren sistem veya devreye de Statik VAR Kompanzasyon Sistemi denilir.

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

1. Tüm koşullar altında şebeke gerilimiyle senkronize olarak çalışmaya devam edebilmelidir.
2. AA güç sistemi için reaktif güç üreterek ya da çekerek, güç dalgalanmalarını bastırıp, şebeke gerilimini hızlıca kontrol edebilmelidir [3].

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

Statik VAR kompanzatörler temel olarak tristör kontrollü elemanları kullanır. Bir statik VAR sisteminin tamamını veya bir kısmını meydana getiren reaktif güç kontrol elemanlarının temel tipleri: tristör kontrollü reaktör (TCR), tristör anahtarlama reaktör (TSR) ve tristör anahtarlama kondansatör (TSC) olarak ele alınabilir [16]. SVC, maksimum kapasitif ve endüktif güç sınırlarına ve bu sınırlar arasında her değeri sağlama özelliğine sahiptir. Genel itibarıyla SVC devre şeması Şekil 2.4'de gösterilmiştir.



Şekil 2. 4 SVC devre şeması

Sekil 2.4’de SVC’nin temel tiplerine yer verilmiştir (TSC, TCR). Ayrıca bunlarla birlikte kullanılan sabit kondansatör (SC), sabit reaktör (SR) ve harmonikleri elemine etmek için kullanılan filtre yapıları da gösterilmiştir [4].

2.3 SVC Çeşitleri

Kondansatör, bobin ve yarı iletken elemanların farklı bağlantılarıyla gerçekleştirilmiş çeşitli türde statik VAR kompanzasyon sistemi geliştirilmiştir. Aşağıda statik VAR kontrolü için kullanılan statik VAR kompanzasyon sistemleri sıralanmaktadır [3].

- Tristör anahtarlama kondansatör (TSC),
- Tristör kontrollü reaktör (TCR),
- Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör (FC TCR),
- Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatör (TCR TSC)

2.3.1 Tristör Anahtarlama Kondansatör (TSC)

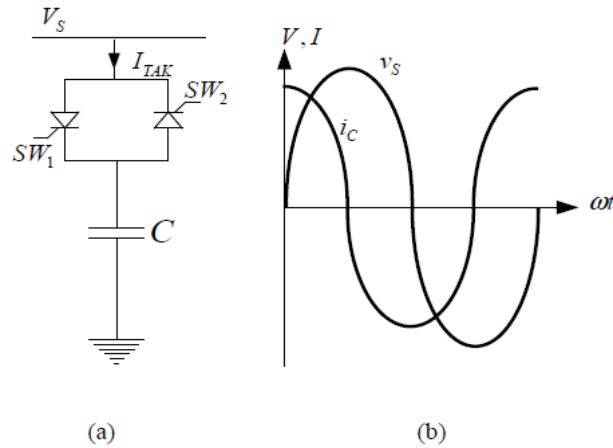
Tristör anahtarlama kondansatör ilk olarak 1971’ de ASEA tarafından geliştirildi. Paralel kondansatör grubu uygun kademelerde ayrılarak, birbirinden bağımsız iletime ya da kesime giren ters paralel bağlı tristörler kullanıldı. Ayarlı kondansatör etkisi yaratan SVC tipidir. Toplam VAR isteğine bağlı olarak, kondansatörlerin birkaçı sisteme ayrı ayrı bağlanabilir ya da sistemden ayrılabilir. Kontrol, devamlı olarak yükün VAR değeri değerlendirilerek yapılır. Reaktif güç gereksinimine göre kondansatör devreye

alınır veya tersi gerçekleşir. Devre kesici ve rölelerin kullanıldığı metotlarda yaşanan geçici rejim ve anahtarlama transientleri bu yapıda yoktur [3].

Tristör anahtarlama kondansatör bloğu iki ana parçadan meydana gelir. Bunlar ters paralel bağlı iki tristör ve kondansatördür. Tristör üzerindeki gerilim minimum olduğunda, salınımları minimize etmek için, tristör iletime sokulur. İletime girme anında oluşabilecek küçük değerli salınımlar dışında, TSC akımı sinüzoidal ve harmoniklerden bağımsızdır, böylece herhangi bir filtreye gerek yoktur [3].

Kondansatör gerilimiyle kaynak gerilimi eşit değilken tristörler tetiklenirse, tristör üzerinden geçen akım ile kondansatör kısa bir sürede kaynak gerilimine kadar şarj olur. Akımın yükselme hızı tristörün dayanabileceği değerden yüksek olursa, tristör tahrip olur. Bu durumu ortadan kaldırmak için seri bağlı küçük değerli bir L endüktansı kullanılır. Böylece hem tristör akımlarının yükselme hızı sınırlanır hem de TSC bloğunun şebekeyle rezonansa girmesi engellenir. X_L değeri genel olarak X_C 'nin %6'sı olacak şekilde ayarlanır [3]. TSC tipi statik VAR kompanzasyon sistemleri aşağıdaki özelliklere sahiptir.

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



Şekil 2. 5 Tristör anahtarlama kondansatörlere ait (a) basit devre modeli ile (b) akım ve gerilim dalga şekilleri [3]

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

Tristör anahtarlama kondansatörünün gerilimi ve akımı Sekil 2.5 (b)' de görülmektedir. Burada V şebeke gerilimini, v_c kondansatörün uçlarındaki gerilimi, i_{TSC} devreden geçen kapasitif akımı göstermektedir. Kondansatör devresine

$$V(t) = V_{\max} \cdot \sin(\omega t + \alpha) \quad (2.1)$$

şeklinde bir sinüzoidal gerilim uygulandığında kondansatör uçlarındaki gerilim,

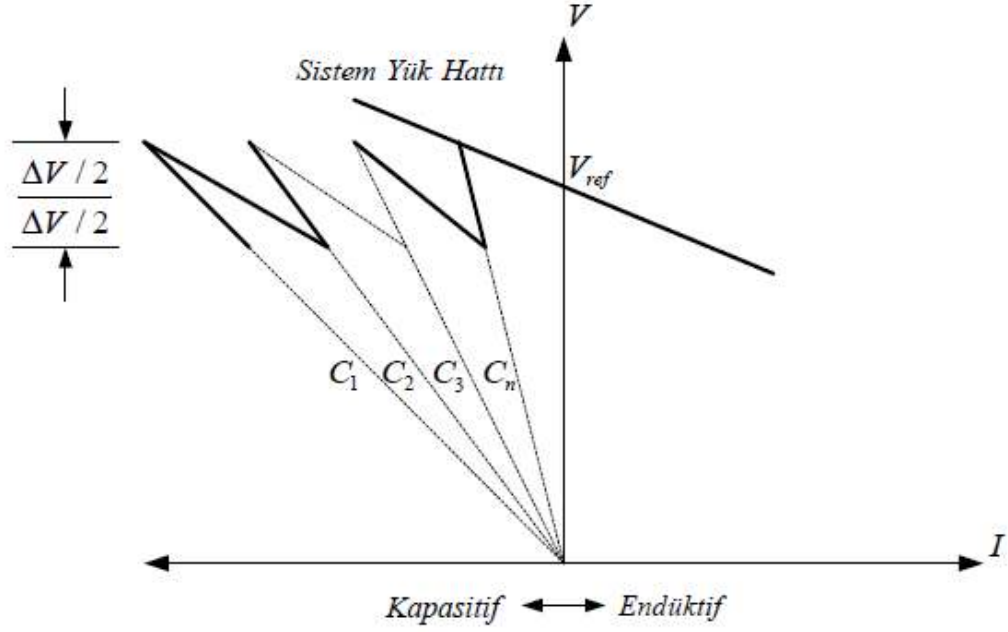
$$v_c(t) = \frac{1}{C} \cdot \int i_c(t) \cdot dt \quad (2.2)$$

devreden geçen akım ise,

$$i_{TSC}(t) = i_c(t) = \omega \cdot C \cdot V_m \cdot \cos \omega t \quad (2.3)$$

eşitliğiyle ifade edilir. TSC' yi oluşturan her bir bloğun reaktif güçleri ikinin kuvvetleriyle orantılı olacak şekilde seçilebilir. Ayrıca, n tane kondansatörün $n-1$ tanesinin süseptansının değeri B , kalan tek kondansatörün süseptansının değeri de $B/2$ olarak ayarlanır [3].

Sekil 2.6' da TSC' nin gerilim akım karakteristiği gösterilmektedir. Bu karakteristiğin şekli TSC bloklarının devreye girip devreden çıkmalarıyla değişir.

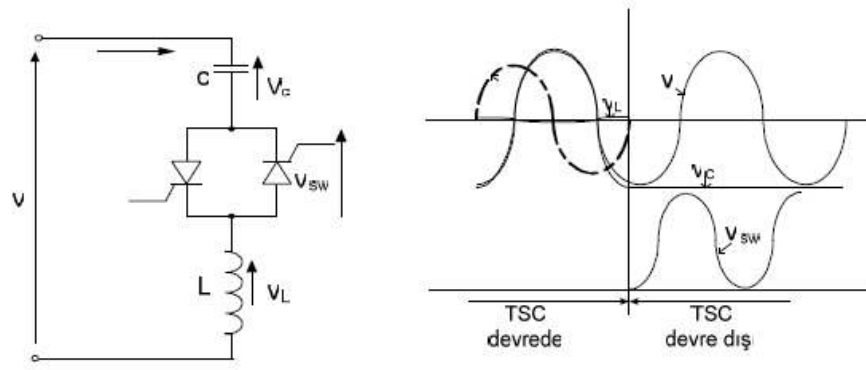


Şekil 2. 6 Tristör anahtarlama kondansatörünün akım ve gerilim karakteristiği [3]

Tristör anahtarlama kondansatörünün modelinin basit yapısına rağmen, pratikteki bazı dezavantajları, popülerliğini engellemektedir. Bu dezavantajlar aşağıda sıralanmaktadır.

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

Tristörlerin tam veya sıfır iletim kontrolü ile reaktansı kademeli olarak değiştirilen, paralel bağlı tristör anahtarlama bir kondansatördür. TSC bir alternatif akım kısıyıcı ile buna seri bağlı bir kondansatörden meydana gelmektedir. Bu ünitelerin aynı yük barasına paralel olarak bağlanmasıyla reaktif güç ihtiyacı kademeli olarak karşılanabilir [3]. Tek fazlı tristör anahtarlama kondansatör (TSC) Şekil 2.7’de gösterilmiştir.



Şekil 2. 7 Temel TSC devresi ve gerilim dalga şekilleri

Bu reaktöre öncelikle, anormal işletme koşulları altında, tristör valfindeki ani akımları sınırlamak için ihtiyaç vardır. Ayrıca bu reaktör belirli frekanslarda sistem empedansı ile rezonanstan korunmak amacıyla da kullanılmaktadır. Kararlı hal şartlarında tristör valfi kapandığında ve TSC kolu bir sinüzoidal AC gerilim kaynağına bağlandığında gerilim $v = V \cdot \sin(\omega t)$ olmak üzere koldaki akım,

$$i(\omega t) = V \frac{n^2}{n^2 - 1} \omega C \cos \omega t \quad (2.4)$$

ile verilir. Burada n,

$$n = \frac{1}{\sqrt{\omega^2 LC}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_L}} \quad (2.5)$$

ile hesaplanmaktadır. Kondansatörün iki ucu arasındaki gerilimin genliği,

$$V_C = \frac{n^2}{n^2 - 1} V \quad (2.6)$$

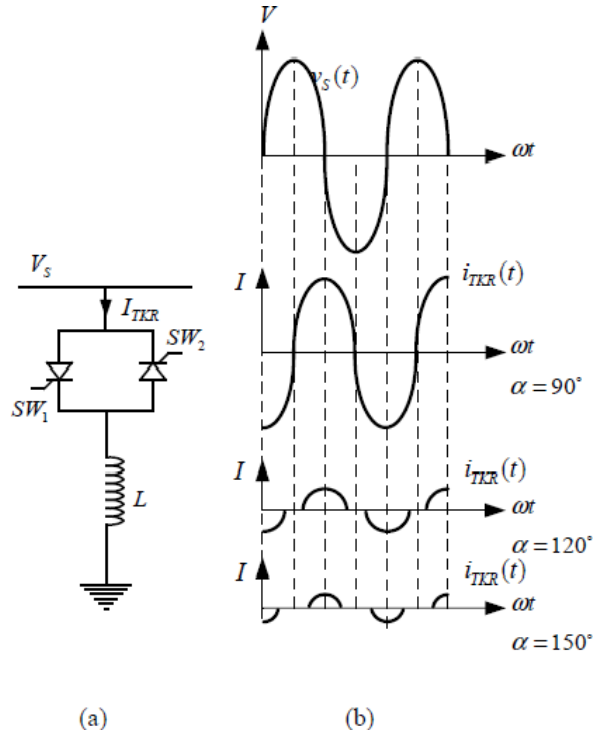
eşitliği ile bulunmaktadır. TSC kolu, akımın herhangi bir sıfır anında tristör valfine sinyal verilerek devre dışı bırakılır. Akımın sıfır geçişlerinde kondansatör gerilimi en yüksek değerindedir. Bu durumda kondansatör şarj durumundadır. Bağlantısı kesilen kondansatör bu gerilim değerinde şarja sahiptir ve bu nedenle iletken olmayan tristör valfinin uçlarındaki gerilim, uygulanan AC gerilimin sıfır ve tepe değerleri arasındadır (Şekil 2.7).

Bağlantısı kesilen kondansatörün uçlarındaki gerilim değişmeden kalırsa, uygulanan AC gerilimin uygun tepe değerinde hiçbir geçici durum olmadan TSC grubu tekrar

anahtarlanabilir. Normalde kondansatör bağlantısı açıldıktan sonra kondansatör deşarj edilir. Böylelikle, kondansatörün tekrar bağlanması sıfır ile $V.n^2/(n^2-1)$ arasındaki bazı artık kondansatör gerilimlerinde gerçekleştirilmelidir. Tristör valfinin uçlarındaki gerilim sıfır olduğunda uygulanan AC gerilim ve kondansatör artık gerilimi birbirine eşittir [4].

2.3.2 Tristör Kontrollü Reaktör (TCR)

Şekil 2.8(a)' da tristör kontrollü reaktörün basit modeli gösterilmektedir. TCR, ters paralel tristörlerden ve bu tristörlere seri bağlı hava çekirdekli reaktörden oluşur. Ters paralel bağlı tristör çifti iki yönlü anahtar gibi çalışmaktadır, 1.tristörü kaynak geriliminin pozitif yarı periyodunda iletimdeyken, 2.tristörü kaynak geriliminin negatif yarı periyodunda iletimdedir. Tristörlerin tetikleme açıları sıfır gerilim geçişleri referans alınarak belirlenir. Tetikleme açısı değiştirilerek, akım sıfırla maksimum değerleri arasında sürekli olarak ayarlanır. Tetikleme açısının değeri arttırılarak, akımın temel bileşeninin değeri azaltılır. Farklı bir ifadeyle, tetikleme açısının artışı reaktör endüktansında artışa ve reaktör akımına bağlı olarak da reaktif güç değerinde azalmaya neden olur. TCR kontrol edilebilir süseptans gibi davranır ve bu özelliğinden dolayı da statik VAR kompanzasyon sistemi olarak kullanılabilir [3].



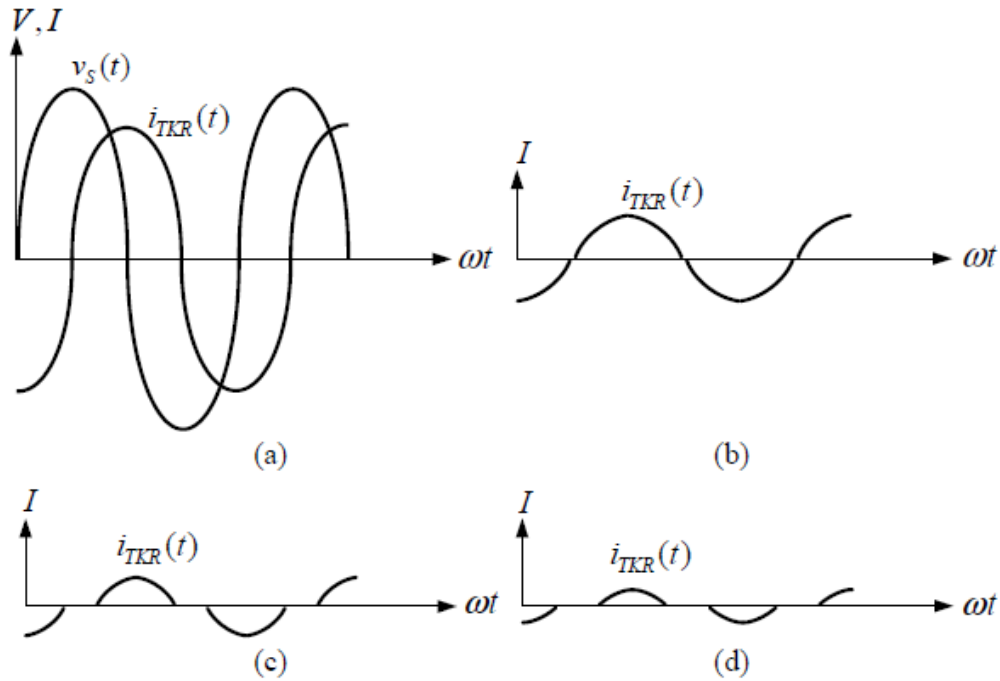
Şekil 2. 8 Tristör kontrollü reaktörüne ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) tetikleme açısı α 'ya göre akım değişimleri

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

Reaktör değeri tristörlerle kontrol edilir. Böylece tetikleme açısı α ' ya bağlı ve kontrol edilebilir süseptans fonksiyonu elde edilir. Reaktörlerin küçük de olsa bir iç direnci vardır, dolayısıyla pratikte akımla gerilim arasındaki faz farkı tam olarak 90 ° değildir. Fakat iç dirençten kaynaklanan bu durum ihmal edilir ve akımın gerilimden 90° geride olduğu kabul edilir. Gerilim ile akımın temel frekanstaki dalga şekilleri ve tetikleme açısı α 'yla değişen akımların dalga şekilleri Sekil 2.9 (a)' da gösterilmektedir. Tetikleme açısı α ve iletimde kalma açısı σ arasındaki ilişki

$$\sigma = 2. (\pi - \alpha) \quad (2.7)$$

eşitliğiyle ifade edilmektedir.



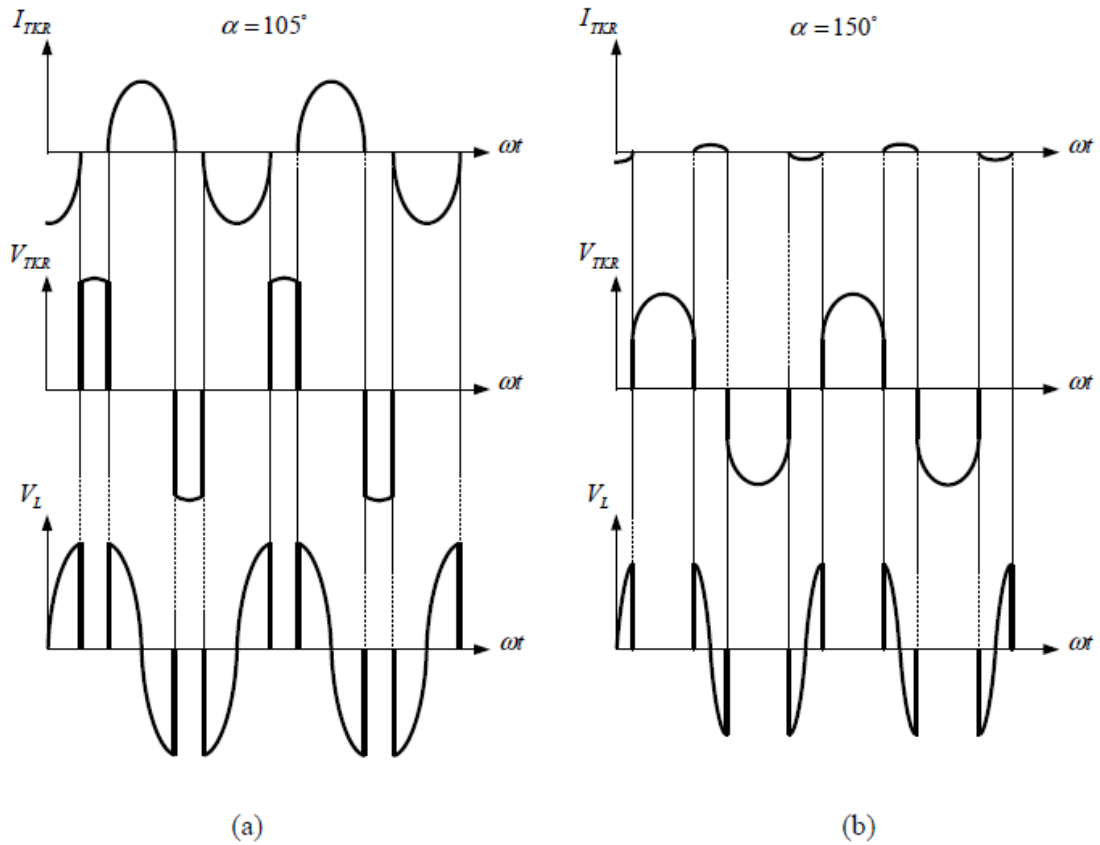
Şekil 2. 9 Tristör kontrollü reaktör modeline ait (a) $\alpha=90^\circ$ ve $\sigma=180^\circ$, (b) $\alpha=100^\circ$ ve $\sigma=160^\circ$, (c) $\alpha=130^\circ$ ve $\sigma=100^\circ$, (d) $\alpha=150^\circ$ ve $\sigma=60^\circ$ durumlarındaki akım dalga şekilleri

Tetikleme açısına bağlı olan TCR akımı, Sekil 2.9(b), 2.9(c) ve 2.9(d)' de gösterilmektedir. Tetikleme açısının değeri 90° nin üstüne çıktıkça, akımın temel bileşeninin genliği zayıflar ve TCR' nin akımı sinüs dalga şeklinden uzaklaşır. Ayrıca bu

durum reaktörün endüktans değerinin artmasına, dolayısıyla kaynaktan çekilen reaktif gücün azalmasına neden olur [3].

2.3.2.1 Tristör Kontrollü Reaktörün Akım ve Gerilim İfadeleri

TCR' de tetikleme açısı α' nın aralığı 90° den 180° ye kadardır. 90° lik bir tetikleme açısı, TCR içinden tam ve sürekli sinüzoidal akım geçmesini sağlar. Şekil 2.10' da gösterildiği gibi, tetikleme açısı α , 90° den yaklaşık 180° ye kadar değişirken, pozitif ve negatif yarı periyotlarda sürekli olmayan darbeler biçiminde simetrik akımlar gerçekleşmektedir. Bir tristörün iletme sokulmasından sonra tetikleme açısındaki herhangi bir değişim sadece sonraki yarı periyotta gerçekleştirilebilir. Bu durum tristör ölü zamanı olarak adlandırılmaktadır.



Şekil 2. 10 Tristör kontrollü reaktör modeline ait (a) $\alpha=105^\circ$ ve (b) $\alpha=150^\circ$ için akım ve gerilim dalga şekilleri [3]

Kaynak gerilimi, $V_s(t) = V_m \sin(\omega t)$ (2.8) olarak ifade edilmektedir. Aynı zamanda reaktör gerilimi de,

$$v_L(t) = L \cdot \frac{di_{TCR}(t)}{dt} = v_s(t) \quad (2.9)$$

diferansiyel denklemlerle gösterilir. Burada L, TCR' nin endüktansdır. (2.9) eşitliğinin integrali alınarak,

$$i_{TCR}(t) = \frac{1}{L} \int v_s(t) \cdot dt + c \quad (2.10)$$

eşitliği elde edilir. Burada c sabit değerdir. (2.10) eşitliğinin çözümü yapıldığında (2.11) eşitliği elde edilir.

$$i_{TCR}(t) = -\frac{V_s}{\omega \cdot L} \cos \omega t + c \quad (2.11)$$

(2.11) eşitliğinde sınır şartları kullanıldığında,

$$i_{TCR}(t) = -\frac{V_s}{\omega \cdot L} \cdot (\cos \alpha - \cos \omega t) \quad (2.12)$$

eşitliği elde edilir. Burada α , uygulanan gerilimin pozitiften sıfır geçişine göre ölçülen tetikleme açısıdır. TCR akımının temel bileşeni i_{TCR1}' i elde etmek için Fourier analizi kullanılarak,

$$i_{TCR1}(\alpha) = a_1 \cdot \cos \omega t + b_1 \cdot \sin \omega t \quad (2.13)$$

elde edilir. Burada, tek dalga ve yarım dalga simetrisinden dolayı a_1 katsayısı,

$$a_1 = \frac{4}{T} \cdot \int_0^{T/2} f(x) \cdot \cos \frac{2\pi \cdot t}{T} \cdot dt \quad (2.14)$$

eşitliğiyle verilir. a_1 katsayısından yararlanarak,

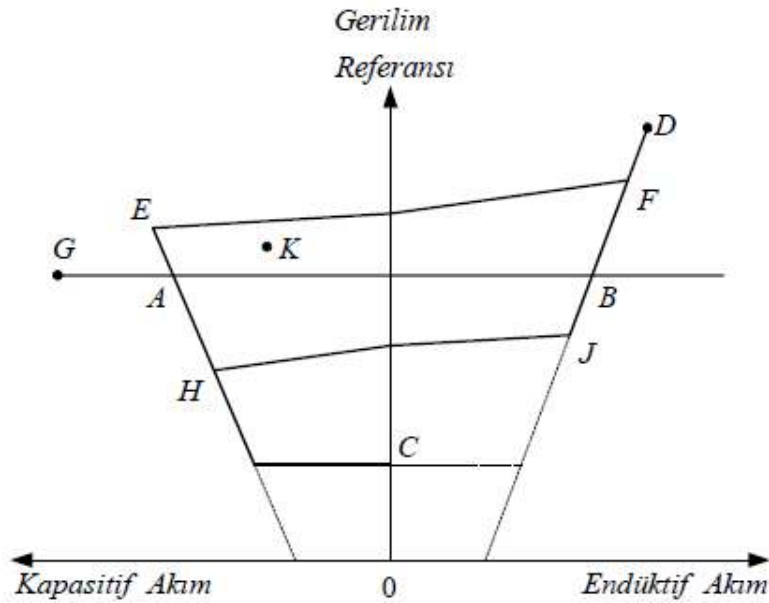
$$i_{TCR1}(a) = \frac{V_s}{\omega \cdot L} \cdot \left(2 - \frac{2a}{\pi} + \frac{1}{\pi} \cdot \sin 2\alpha \right) \quad (2.15)$$

eşitliği elde edilir [3].

2.3.2.2 Tristör Kontrollü Reaktörün Akım ve Gerilim Karakteristiği

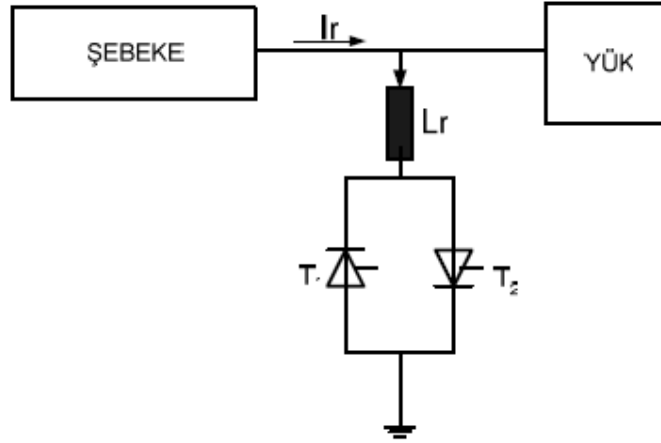
TCR' nin akım ve gerilim karakteristikleri, Sekil 2.11' de gösterilen, AEFBJH sınırlarını aşmayacak şekilde tasarlanır. TCR' de tetikleme açısı $\alpha=90^\circ$ için, kompanzasyon sistemine ait akım ve gerilim değerleri reaktör empedansının değerine bağlı olarak, FD

eğrisi üzerindeki bir noktadır. Şekil üzerindeki noktalar, sistem ihtiyaçlarına uygun olarak belirlenmektedir.



Şekil 2. 11 Tristör kontrollü reaktöre ait akım ve gerilim karakteristiği [3]

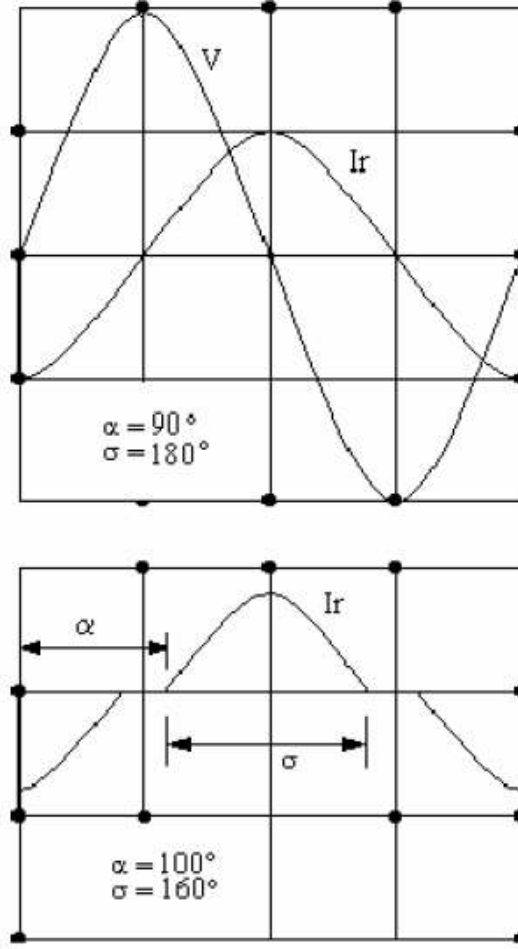
Güç sistemlerinde kullanımı hızlı bir biçimde artan tristör kontrollü reaktör içeren statik Var kompanzatörler, sürekli ve hızlı bir reaktif güç ve gerilim kontrolü sağlama özellikleri sebebiyle sistemin performansını ve kalitesini pek çok yönden geliştirebilmektedirler. Bunlar; güç frekansında geçici aşırı gerilimlerin kontrolü, gerilim çökmesinin önlenmesi, geçici kararlılığın artırılması, iletim ve dağıtım sistemlerinde dengesiz yükleri besleyen üç fazlı sistemlerin dengelenmesi ve kesintili sürelerde çalışan yüklerin sebep olduğu gerilim salınımlarının önlenmesi olarak sıralanabilir [16].



Şekil 2. 12 Bir fazlı TCR yapısı

İletim sistemlerinde kullanılan tristör kontrollü reaktör, kapalı çevrim gerilim regülatörü ve tristör tetiklemeli kontrol sistemi içerir. Genel bir TCR yapısı Şekil 2.12’de verilmiştir. Bu şekilden de görüldüğü gibi TCR, paralel bağlı iki tristör ve bunlara seri bağlı bir reaktörden oluşur. Bu iki ters paralel tristör simetrik bir biçimde kapılanmıştır. Buradaki tristörler zamana bağlı olarak akımın temel bileşenini kontrol eder. Tristörlerin her biri, uçlarındaki gerilimin sıfır geçiş anından itibaren ölçülen tetikleme açısına (α°) ya da iletim açısına (σ°) bağlı olarak dönüşümlü olarak yarım periyotluk sürelerle iletimde olurlar. Şekil 2.13’te görüldüğü gibi tetikleme açısının 90° ile 180° değerleri arasında kısmi iletim söz konusudur. Tetikleme açılarının 0° ile 90° değerleri arasında olması durumunda, doğru akım bileşenli asimetrik akımlar meydana geleceğinden, bu aralıklarda işletimine pratikte müsaade edilmez. Tam iletim 90 derece tetikleme açısında elde edilir. Bu durumda akım, reaktif karakterde ve sinüzoidaldir.

Kısmi iletimler ise 90 ile 180 derece arasındaki açılarda elde edilir. Tetikleme açısının arttırılmasının etkisi akımın temel bileşeninin düşürülmesidir. Bu değer, reaktörün reaktif gücünü ve akımının düşmesini sağlar dolayısıyla reaktörün endüktans değerinde de bir artış meydana gelir. Akımın temel bileşeniyle ilgili olduğu kadarıyla tristör kontrollü reaktör kontrol edilebilir bir süseptanstır [16].



Şekil 2. 13 TCR'ye ait akım ve gerilim dalga şekilleri

Şekil 2.13'te görülen tristörlerin α tetikleme açıları ya da σ iletim açıları uygun seçilmek şartıyla, reaktör akımının efektif değeri, istenilen sınırlar içinde ayarlanabilir. Akım dalga şeklinin Fourier analizi sonucu temel bileşen reaktör akımı,

$$I_r^{(1)}(\sigma) = \frac{V}{X_r} \left[1 - \frac{2\pi - \sigma}{\pi} - \frac{1}{\pi} \sin(2\pi - \sigma) \right] \quad (2.16)$$

olarak elde edilir. Burada, X_r temel frekanstaki reaktörün reaktansıdır. Tetikleme açısı α 'nın artması (σ iletim açısının azalması) sonucu, temel bileşen akımının ($I_r^{(1)}$) değeri düşecektir. Tetikleme açısıyla iletim açısı arasında,

$$\sigma = 2(\pi - \alpha) \quad (2.17)$$

eşitliği vardır. Akımın temel frekans bileşeni dikkate alındığında, tristör kontrollü reaktör, kontrol edilebilir bir süseptans elemanı olarak algılanabilir. Temel frekansta, iletim açısı σ 'nın fonksiyonu olarak efektif süseptans,

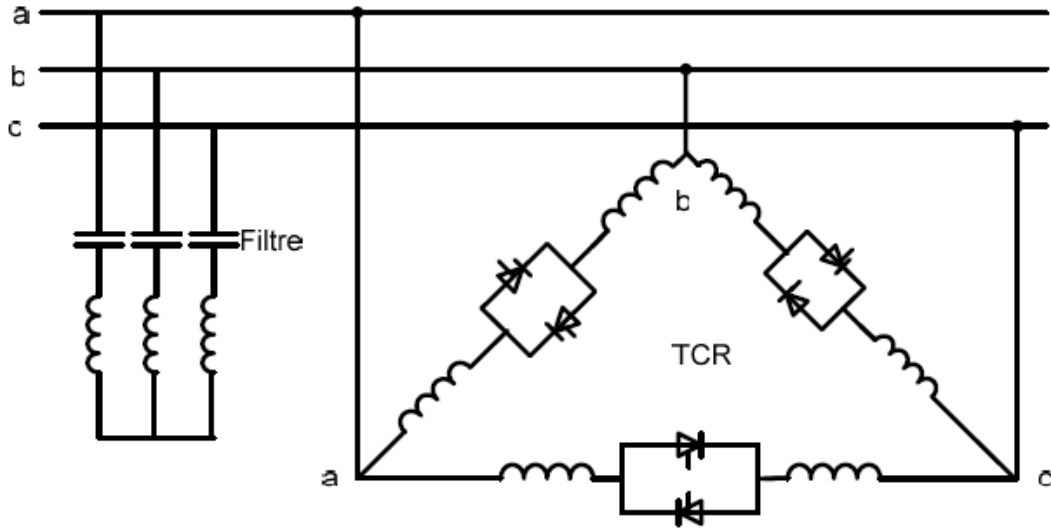
$$B(\sigma) = \frac{\sigma - \sin \sigma}{X_r \pi} \quad (2.18)$$

ile belirlenir [3]. Şekil 1.12’de verilmiş olan TCR için efektif süseptansın değerleri Çizelge 2.1’ deki gibi değişmektedir.

Çizelge 2. 1 TCR’nin tetikleme ve iletim açılarına bağlı olarak değişimi

α	σ	B	Açıklama
90°	180°	$(X_r)^{-1}$	Maksimum süseptans
110°	140°	$0.5732(X_r)^{-1}$	-
130°	100°	$0.2421(X_r)^{-1}$	-
150°	60°	$0.0577(X_r)^{-1}$	-
180°	0°	0	Minimum süseptans

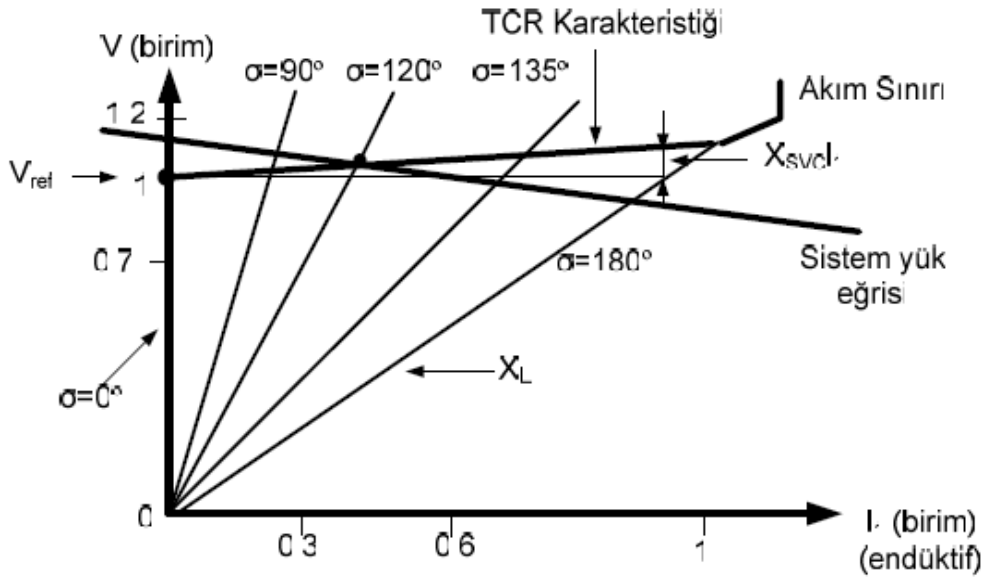
Şekil 2.14’te 3 fazlı üçgen bağlı TCR bağlantısı ve harmonikleri filtre etmek için kullanılan filtre elemanları gösterilmiştir.



Şekil 2. 14 Üçgen bağlı TCR ve filtreler

Sekil 2.15’te verilen TCR akım-gerilim karakteristiğine göre (TCR karakteristiği ile sistem yük eğrisinin kesiştiği nokta) $L = 120^\circ$ için V bara gerilimi 1 pu değerinin az üstündedir.

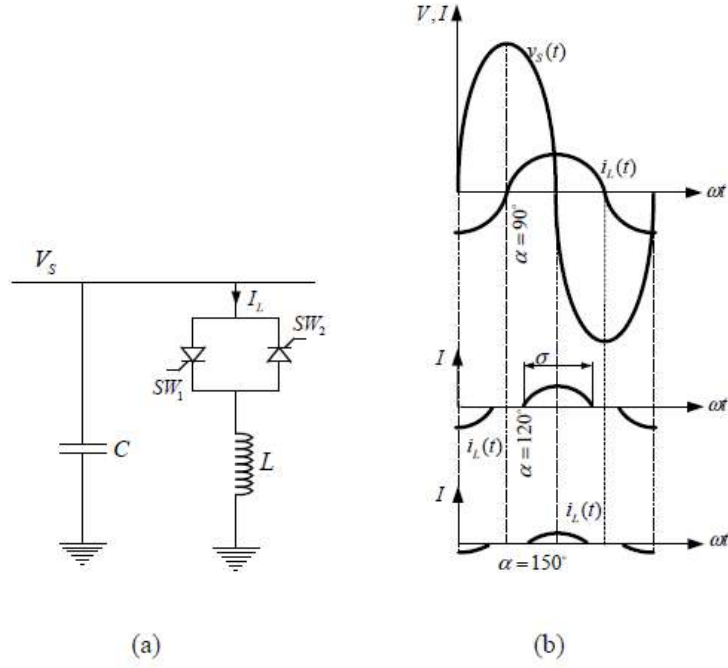
Diğer bir ifade ile mevcut yük durumu için $L = 120^\circ$ 'de çalışılması durumunda TCR amacına yönelik çalışmış ve bara geriliminin de referans değerinde tutulması sağlanmış olacaktır.



Şekil 2. 15 TCR'ye ilişkin V-I karakteristik eğrisi [4]

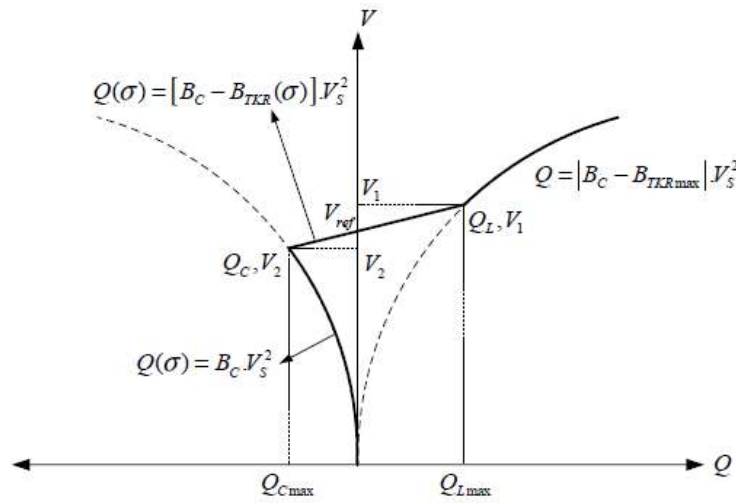
2.3.3 Tristör Kontrollü Reaktör ve Sabit Kondansatör (FC TCR)

Şekil 2.16(a)' da tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait basit model gösterilmektedir. Bu modelde, iki ters paralel tristör ile seri endüktans ve bunlara paralel kondansatör bulunur. Bu tristörlerin tetikleme açılarıyla endüktans akımının temel bileşeni ve böylece reaktif güç ayarlanabilir. Farklı tetikleme açıları altında sistemin gerilimi ve reaktör akımının dalga şekilleri Şekil 2.16(b)' de gösterilmektedir.



Şekil 2. 16 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait (a) basit devre modeli ve (b) akım dalga şekilleri

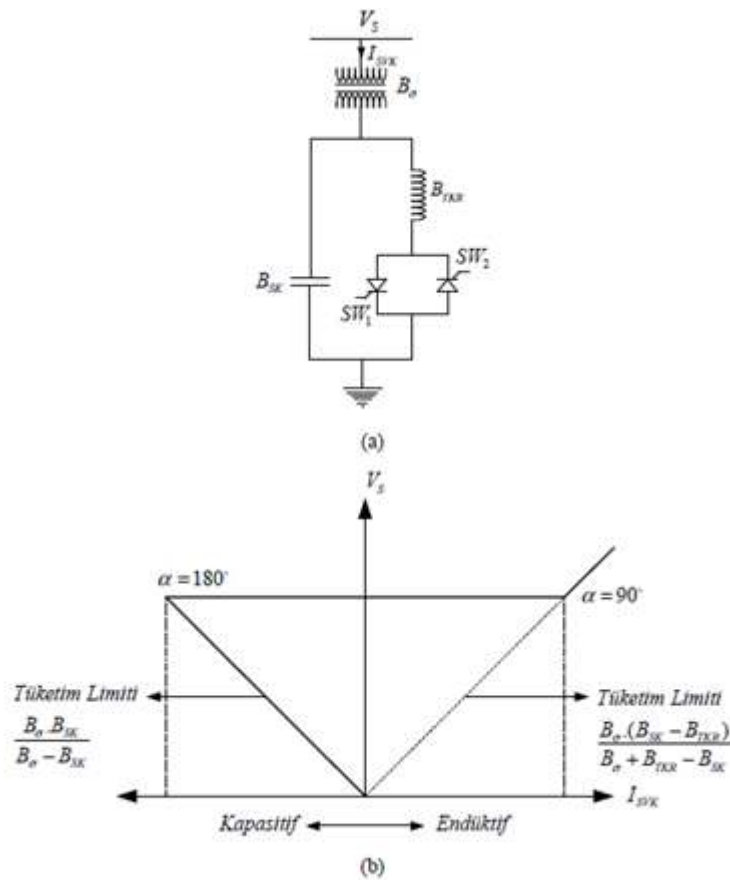
Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör birlikte kullanılarak, hem kapasitif hem de endüktif yüklerin kompanzasyonu sağlanır. Uygulamalarda, kondansatörün gücü, yükün endüktif reaktif gücünü tümüyle kompanze edecek şekilde seçilir. Yükün endüktif reaktif gücünde bir azalma olması durumunda kondansatör yükü kompanze etmekle beraber, sisteme fazladan kapasitif reaktif güç verecektir. Bu durumda tristör kontrollü reaktör devreye girecek ve kompanzasyonu sağlayacaktır [4].



Şekil 2. 17 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde gerilim ile reaktif güç değişimi

Şekil 2.17' den görüldüğü gibi kompanzasyon sisteminin kontrolü V_1 ve V_2 gerilimleri arasındaki bölgede yapılır. Bu aralıkta, tristörlerin tetikleme açısı α' ya bağlı olarak, gerilim ile reaktif güç arasında lineer değişim vardır. 90° den 180° ye kadar değişirken (Q_C, V_2) noktasından (Q_L, V_1) noktasına doğru lineer bir değişim gerçekleşir. Maksimum kapasitif reaktif güç çıkışı 180° de gerçekleşirken maksimum endüktif reaktif güç çıkışı 90° de meydana gelir [4].

Şekil 2.18' da gösterildiği gibi, FC TCR'ler, yüksek gerilimli AA güç sistemine transformatörle bağlanırlar.



Şekil 2. 18 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatörde düşürücü transformatörün olduğu durumdaki (a) basit devre modeli ve (b) akım gerilim karakteristiği

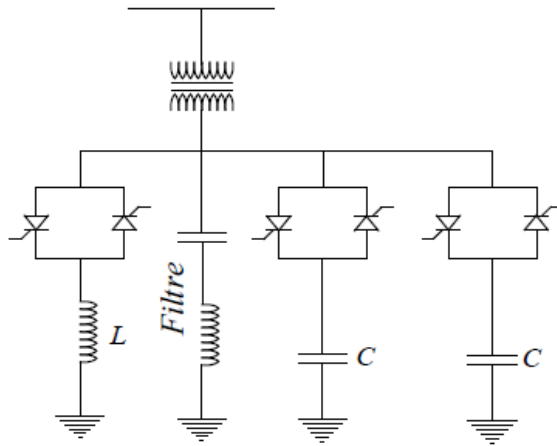
FC TCR yapısının bir dezavantajı, büyük endüktans akımı yüzünden endüktif bölgede büyük güç kayıplarının oluşmasıdır. Aynı zamanda sabit kondansatörler olası sistem düzensizliklerinde, AA güç sistemi üzerinde ters etkiye sebep olurlar. Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatörlerde tek bir TSC yerine birbirine paralel TSC' ler kullanılır. Sabit kondansatörlü yapıdan farklı olarak, kondansatörler sürekli

olarak devrede olmayıp, yalnızca endüktif bölgede devreye alınırlar. Bu durumda reaktörlerin kullanımını azaltmış olur [3],[4].

2.3.4 Tristör Kontrollü Reaktör ve Tristör Anahtarlama Kondansatör (TSC TCR)

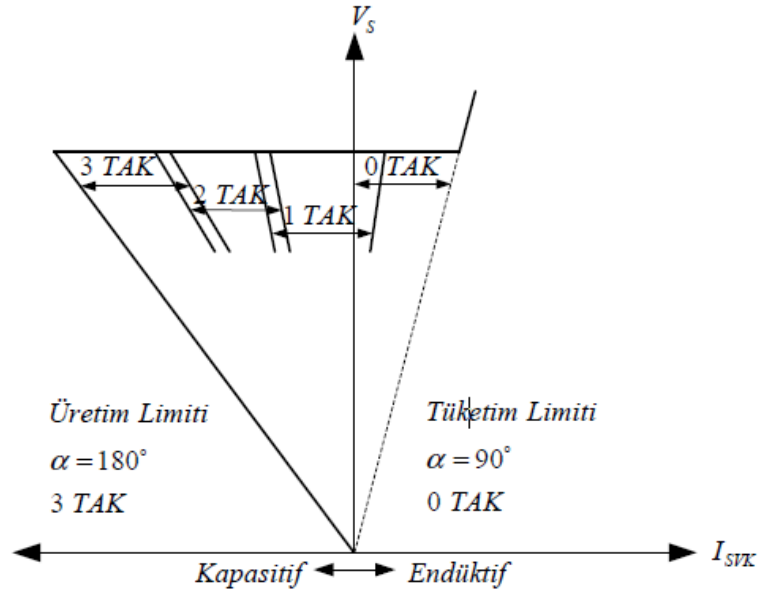
Şekil 2.19' da gösterildiği gibi, tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatör n tane paralel bağlı tristör anahtarlama kondansatörle ve tristör kontrollü reaktörden oluşur. TCR' nin değeri, kompanzasyon sisteminin toplam reaktif gücünün $1/n$ değerinde olacak şekilde tasarlanır. Kondansatörler ayrı ayrı anahtarlamlar ve her adımda reaktif gücünün sürekli kontrolü TCR tarafından sağlanır.

TCR' nin boyutu küçük olduğundan, harmonik üretimi de aynı zamanda küçüktür. TSC TCR' ların kullanılmasındaki en büyük neden kararlı hal kayıplarının iyi olmasıdır. FC TCR'lerdeki sabit kondansatör, AA güç sistemi empedansı ile rezonansa girerek, paralel LC devresi gibi davranabilirler. Bu durumda kondansatörler devreden çıkarılamazlar. TSC TCR' lerdeise, olası bir rezonans durumunda tüm kondansatörlerin kompanzasyon sisteminden bağlantısı kesilir [3].



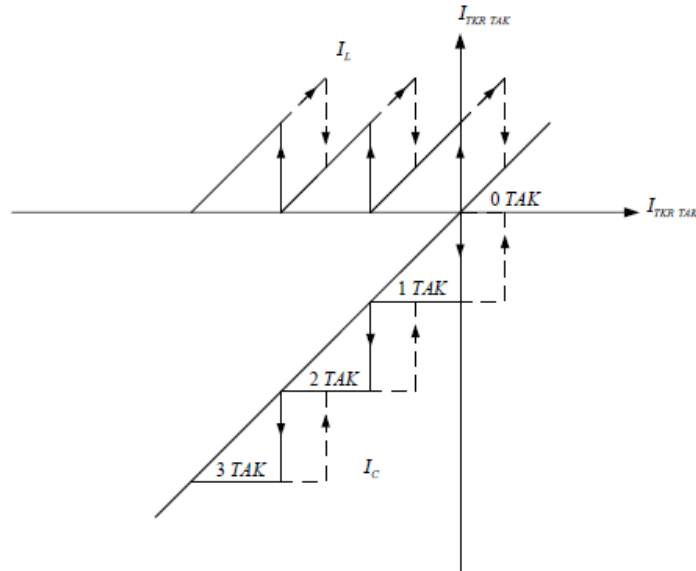
Şekil 2. 19 Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlama kondansatöre ait basit devre modeli

Şekil 2.20' de TSC TCR' nin işletim karakteristiği gösterilmektedir. Bu karakteristikte TSC TCR' ye ait üretim ve tüketim limitleri görülmektedir.



Şekil 2. 20 Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlmalı kondansatörlere ait akım ve gerilim karakteristiği

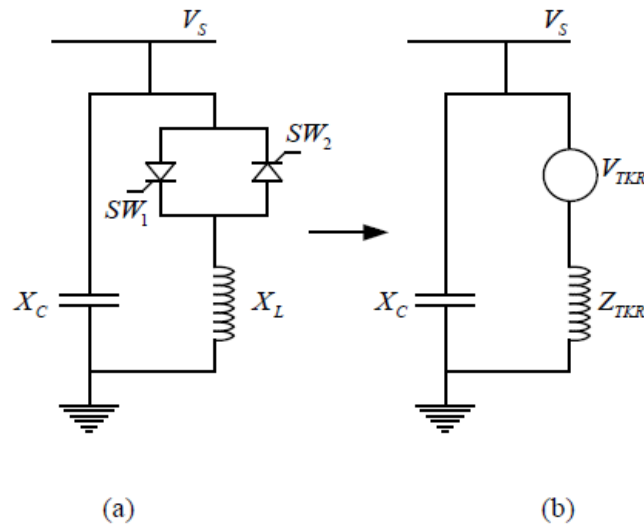
Şekil 2.21 de TSC TCR' nin akım karakteristiği gösterilmektedir. Bu karakteristikte sadece TCR'nin devrede olduğu duruma ait ve sadece TSC'lerin devrede olduğu duruma ait akımlar gösterilmektedir.



Şekil 2. 21 Tristör kontrollü reaktör ve tristör anahtarlmalı kondansatöre ait akım karakteristiği [3]

2.4 SVC'nin Matematiksel Olarak İncelenmesi

SVC ile AA güç sisteminin paralel reaktansı ayarlanarak, gerilim ve reaktif güç kontrolü gerçekleştirilir. SVC' nin iki popüler konfigürasyonu, tristör kontrollü reaktör (TCR) ile sabit kondansatör (FC) kombinasyonu ve tristör kontrollü reaktör (TCR) ile tristör anahtarlama kondansatör (TSC) kombinasyonudur. Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatör (FC TCR) modeli Şekil 2.22 (a)' da gösterilmektedir. Güç akış analizinde, SVC' nin toplam süseptansı, gerilim ve reaktif güç kontrol denklemi için temel alınacaktır. Şekil 2.22(a)' daki SVC modeli, güç akış analizi için Şekil 2.22(b)'de gösterilen eşdeğer devreye dönüştürülür.



Şekil 2. 22 Tristör kontrollü reaktör ve sabit kondansatöre ait (a) basit güç sistemi modeli ve (b) güç akış analizi için eşdeğer gösterimi

Şekil 2.22(b)' deki Z_{TCR} ifadesi

$$Z_{TCR} = j(X_{TCRmin} + X_{TCRmax})/ 2 \quad (2.19)$$

eşitliğiyle ifade edilir. Burada X_{TCRmin} ile X_{TCRmax} TCR kolunun değişken reaktansının alt ve üst sınırlarıdır. Şekil 2.22(a)' daki TCR kolunun değişken reaktansı Z_{TCR} empedansı ile değişken gerilim kaynağı V_{TCR} birbiriyle seridir.

Değişken gerilim kaynağı V_{TCR}' in alt ve üst sınırları aşağıdaki (2.20) eşitliğinde verilmiştir.

$$V_{TCRmin} \leq V_{TCR} \leq V_{TCRmax} \quad (2.20)$$

TCR kolunun değişken reaktansı X_{TCR} 'nin alt ve üst sınırları aşağıdaki (2.21) eőitlięin de verilmiştir.

$$X_{TCRmin} \leq X_{TCR} \leq X_{TCRmax} \quad (2.21)$$

X ifadesi

$$X_{TCR} = |V_{TCR} \cdot Z_{TCR} / (V_i - V_{TCR})| \quad (2.22)$$

eşitliğiyle ifade edilir. [3]

L dağıtım sisteminde uzun teller yüzünden kaynak endüktans, I_R kullanıcı tarafından çekilen ve genelde reel ve imajiner bileşenleri bulunan bir akım, V_S kaynak gerilimidir. Tüketicie verilen gerilim (2.25) eşitliğinde ifade edilmektedir.

$$V_R = V_S - j \cdot \omega \cdot L \cdot I_R \quad (2.25)$$

(2.25) eőitlięindeki kullanıcı tarafından çekilen I_R akımı (2.26) eşitliğinde gösterilmektedir

$$I_R = I_P - j \cdot I_Q \quad (2.26)$$

(2.26) eőitlięinden yararlanarak

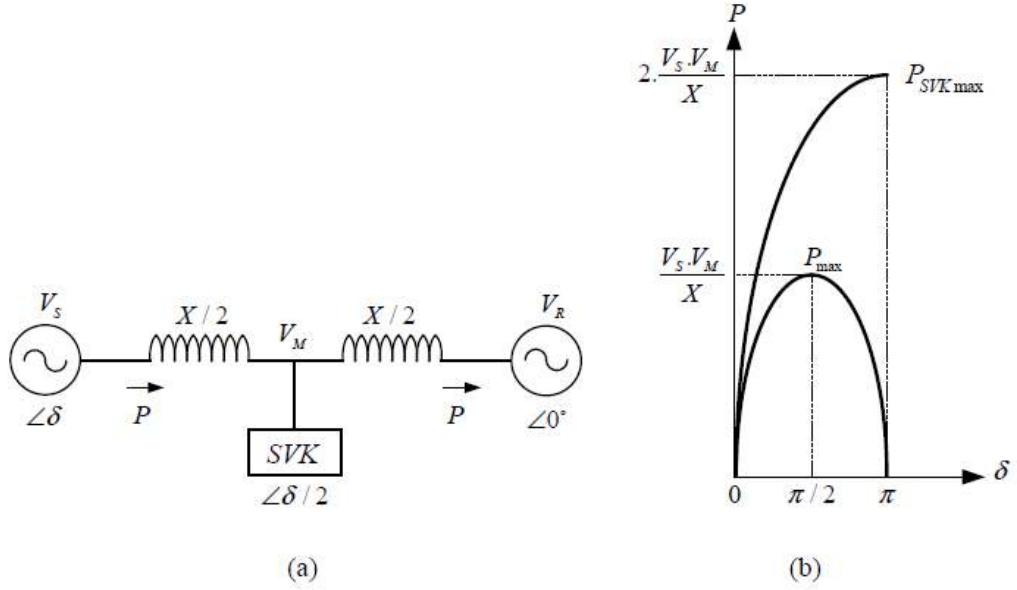
$$V_R = V_S + \omega \cdot L \cdot I_Q - j \cdot \omega \cdot L \cdot I_P \quad (2.27)$$

eőitlięini elde edebiliriz.

Yük akımının reaktif bileşeni I_Q , V_R geriliminin reel bileşenini doğrudan etkilemektedir. Diğer yandan yük akımının aktif bileşeni I_P , gerilimin genliğine çok büyük bir etkide bulunmaz. Dolayısıyla hat geriliminin genliği şebekeden çekilen reaktif güce bağlıdır. I_Q akımının kontrolüyle hat geriliminin kontrol edilmesi, statik VAR kompanzasyonunun bir görevidir. AA güç sistemleri tasarlanırken, gerilim genliğindeki değişim ve fazların dengeli yüklenmeleri dikkate alınır. Genellikle gerilim genliğindeki deęiőimin 5% ile 10% aralığında kalması istenir [3].

Paralel SVC' nın prensibi şekil 2.23' de gösterilmektedir. Statik VAR kompanzasyon sistemi AA iletim hattının ortasında, reaktif güç üretir veya çeker. Eğer eşit şekilde ikiye bölünmüş AA iletim hattı için V_M gerilimi, tüm güç seviyelerinde kontrol edilebilir ve

sabit tutulabilirse, Şekil 2.23(b)' de gösterilen SVC' lı ve SVC'siz durumlardaki güç ile güç açısı arasındaki ilişki elde edilir.



Şekil 2. 23 AA iletim hattına ait (a) paralel statik VAR kompanzasyonu uygulanmış basit güç sistemi modeli ve(b) güç iletim karakteristiği

Şekil 2.23(a)' dan yararlanarak aşağıda gösterilen (2.28) eşitliği elde edilir.

$$P = \frac{V_s V_M}{\frac{X}{2}} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) = \frac{V_M V_R}{\frac{X}{2}} \cdot \sin\left(\frac{\delta}{2}\right) \quad (2.28)$$

Şekil 1.23(b)' de SVC kullanılması sonucu, maksimum güç limiti P_{max} ' ın iki katı olan, teorik maksimum güç limiti P_{SVCmax} ' a ulaşılmıştır. Hattın güç açısı bu güç seviyesinde yüksektir. [3]

2.5 Örnek SVC Uygulamaları

Rüzgar santralleri (RS) sahip olduğu generatörlerin özelliklerinden dolayı sistemden reaktif güç çekerler. Bu reaktif güç ihtiyacının büyük miktarda olması sistem geriliminin dalgalanmasına yol açar. Bazen bu gerilim değişimleri, sisteme bağlı yükler tarafından da meydana gelebilmektedir. Bunun ötesinde RS'lerin doğası gereği de belli oranda gerilim dalgalanmaları meydana gelir. Düzenli gerilim flikeri (kırpışması), kule gölge etkileri ve türbülanslı rüzgar etkisinden kaynaklanan etkiler de sorunların bir parçasıdır.

Bu gerilim dalgalanmaları enerji sürekliliğinin sağlanması açısından çeşitli sorunlar çıkarabilmektedir. Belirli bir dereceye kadar, şebekedeki reaktif güç açığından kaynaklanan gerilim kontrol problemleri, sabit veya mekanik olarak anahtarlanan şönt kondansatörlerin kullanılmasıyla düzeltilebilir. Ancak bu çözüm, rüzgar generatörlerinin değişken çıkışından kaynaklanan gerilim dalgalanmalarının düzeltilmesine yardımcı olmayacaktır. Bunun ötesinde şebeke hatalarından kaynaklanan gerilim çökmeleri ve reaktif güç desteği için paralel kondansatörler içeren dağıtım şebekelerinin, rüzgar gücünün ani değişimi ile ilgili ani aşırı gerilimler de bu sorunlara neden olabilmektedir.

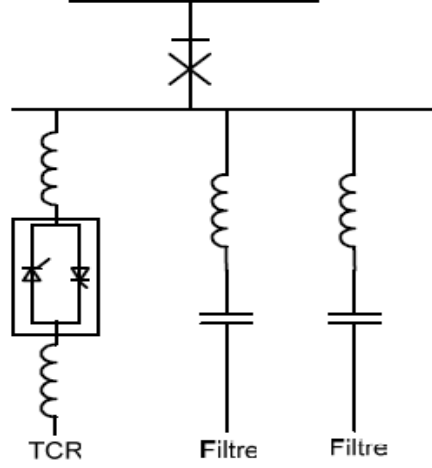
Güç sistemi üzerindeki gerilim dalgalanmalarının ve çökmelerinin aşırı yük veya arıza (hata) anlarında reaktif güç ihtiyacından dolayı olduğu bilinirdi. Bu dalgalı yüklerin büyüklüğü ve sayısı arttıkça fliker, harmonikler ve dengesizlik problemleri gibi güç kalite problemleri de artmıştır. Ancak rüzgar santrallerinin de işin içine girmesiyle, türbin generatörlerinin şebeke üzerine bozucu etkileri de ön plana çıkmıştır.

Bu problemlerin giderilmesi için birçok yöntem uygulanmaktadır. Bunlardan birisi olan SVC, FACTS ailesinin bir üyesi olarak reaktif gücün tristör kontrolü aracılığıyla, şebekeyle ortak bağlantı noktasında dinamik gerilim kontrolünün yapılmasına olanak sağlar. SVC'ler flikeri ve dengesizliği azaltmak için bazı fabrikalarda zaten kullanılmaktadır. Dünyada 900'ün üstünde SVC uygulaması bulunmaktadır [4].

Şebekeye doğrudan bağlanan SVC'lerde, şebeke ile SVC arasına indirici trafo bağlanmasına ihtiyaç yoktur. SVC'de amaç reaktif güç denetimi ile gerilim regülasyonu sağlamaktır. Bu özelliği SVC'nin daha kolay kurulumunu, kurulum maliyetinin azalmasını, kapladığı alanın daha az olmasını, kayıpların azalmasını ve diğer birçok avantajı beraberinde getirmektedir. Şekil 2.24'de bu uygulamaya ait baraya direkt bağlanmış, filtreli yapıya sahip SVC'nin tek hat diyagramı verilmiştir. Buradaki filtreler harmonikleri elimine etmek içindir. Direkt bağlı SVC konseptleri tipik olarak seri bağlı tristör valf modülleri içerirler, aksi takdirde klasik ekipman kullanılır. Bu konsept aşağıdaki ana bölümlerden oluşur:

- Bir yüksek gerilim devre kesicisi
- Bir tristör kontrollü reaktör (TCR)
- Bir harmonik filtre seti (FC)

- Kontrol ve koruma ekipmanı
- Yardımcı güç ekipmanı



Şekil 2. 24 Tek hat diyagramı, direkt bağlı SVC

Sabit hızlı endüksiyon generatörlü rüzgar türbinlerinde SVC uygulamaları mevcuttur. Karada kurulan çoğu rüzgar çiftliklerinde sabit hızlı endüksiyon generatörleri (FSIG) kullanılmaktadır. Bu tip generatörler stator mıknatıslanması için şebekeden önemli miktarlarda reaktif güç çekerler. Daha büyük rüzgar çiftliklerinde enerji üretiminde kısa devre oranı (SCR) düşüktür. Daha önceki araştırmalar, SCR çok düşükse iletim hattındaki arızaların, şebeke geriliminin kararsızlığına ve generatörün aşırı hızlanmasına sebep olabileceğini göstermektedir. Bu tür sistemlerde arıza giderildikten sonra generatör tarafından yüksek oranda reaktif güce ihtiyaç duyulmaktadır. Bu reaktif güç sağlanamazsa makine kontrolsüz hızlanacak ve güç sisteminden ayrılması gerekecektir. Küçük kapasiteli rüzgar çiftliklerinin kayıpları kabul edilebilirken, büyük güçlü rüzgar çiftlikleri şebeke bağlantı standartlarına bağlı kalmalıdır ve sistemde meydana gelen dalgalanma anlarında da belli bir süre devrede kalabilmelidirler. Çalışmalar gösteriyor ki, rüzgar çiftliklerinde bara geriliminin kontrolüyle geçici ve sürekli hal kararlılığı artırılabilir. Böylelikle daha büyük rüzgar çiftliklerinin şebekeye bağlantısı sağlanabilir. Sabit hızlı endüksiyon generatörü kullanılan rüzgar çiftliklerinin sistem kararlılığı incelenmiştir. Bir çiftliğin şebekeye bağlandığı noktada STATCOM ve SVC bağlantısı

Şebekeye bağlı sabit hızlı endüksiyon generatör bazlı rüzgar türbininin şeması, Şekil 2.25’de verilmiştir. Generatör tarafından çekilecek olan reaktif gücün kompanzasyonu için güç faktör düzenleyici kondansatörler (PFC) aynı baraya bağlanmıştır. Sabit hızlı endüksiyon generatörlü rüzgar çiftliklerinin kararlılığı, bağlanmış olduğu şebekenin gücüne, arıza süresindeki ve sonrasındaki AC gerilimine ve rüzgar hızına bağlıdır. Sistemde SVC yapısı olarak paralel bağlı tristör kontrollü reaktör (TCR) ile tristör anahtarlama kondansatörler (TSC) kullanılmıştır. SVC, kapalı çevrim AC gerilim kontrolü veya reaktif güç kontrolü sağlamak için uygulanmıştır. [4]

Kurulan rüzgar santralinin şebeke bağlantısında, SVC veya STATCOM kullanılması arasındaki seçim, ekonomik incelemelere ve ayrıca rüzgar çiftliği bağlantısının güç kalitesi konularına bağlıdır. Birkaç STATCOM uygulaması, rüzgar çiftliklerinde halen

kullanımdadır. Ancak maliyetlerinin yüksek olması sebebiyle yaygın değildir. SVC'nin güç sistemlerinde uygulanması diğer yöntemlere göre daha kolay ve ucuz bir yöntemdir. Hatta ilk kurulum maliyetleri açısından karşılaştırıldığında SVC, STATCOM' a göre çok daha ucuzdur [4].

Ayrıca SVC sistemleri, değişken yüklenme, düşük yüklenme, hattın devreye alınması gibi çalışma şartlarında gerilim düzenlemesini sağlar. SVC sistemlerinin özellikle ark ocağı gibi fliker üreten yerlerde fliker oluşumunu etkin bir biçimde önlediği tespit edilmiştir [9].

SVC iletim hatları kompanzasyonunda, raylı sistemleri besleyen hatların kompanzasyonunda, haddehanelerin bozucu etkilerinin giderilmesinde ve ark ocaklarının kompanzasyonunda hem reaktif güç kompanzasyonu amaçlı, hem de fliker oluşumunu önleme amaçlı kullanılmaktadır. SVC'nin reaktif güçlerdeki değişimi kompanze etme özelliği, SVC'yi fliker emisyonunu azaltmak için uygun kılmaktadır. Bu amaçla kullanılan SVC sistemleri genellikle filtreli bir TCR'den oluşur (TSC kullanılmaz). SVC'nin ark fırınları ile beraber kullanılması sadece fliker emisyonunu azaltmaz aynı zamanda gerilimin regüle edilmesine bağlı olarak çelik üretimini ve üretilen çeliğin kalitesini de artırır. Ancak SVC'nin fliker üzerine etkisini sınırlayan tek etken, cevap verme süresinin uzunluğudur.

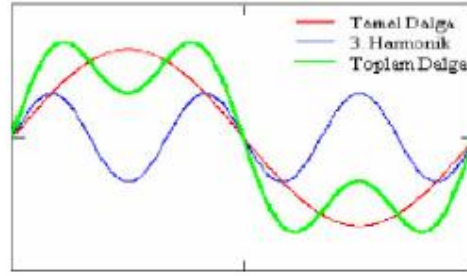
BÖLÜM 3

HARMONİKLER

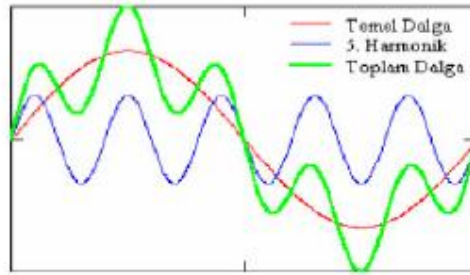
Güç sistemlerinin başlangıcından itibaren nonlinear elemanlar ve nonlinear yükler var olmuştur. Örneğin, transformatörler nominal çalışma koşulları dışına çıktıklarında nonlinear şebeke elemanı olarak davranırlar. Nonlinearlik etkisi ve nonlinear eleman sayısı, harmonik üreten elemanların güç sistemlerine bağlanmasıyla hızlı bir şekilde artmıştır. Bu artışın temel sebebi, yüksek güçlü yarı iletken anahtarlarının gelişimi ve onların doğrultucu, evirici ve çeşitli elektronik devrelerde uygulanmasıdır. (DC iletim konverter istasyonları, motor kontrol devreleri, statik VAR generatörleri, v.b.)Yarı iletken elemanların tabiatı gereği ve sanayide kullanılan bazı yüklerin (transformatörler, ark fırınları, v.b.) etkisiyle, akım ve gerilim dalga biçimleri periyodik olmakla birlikte, frekans ve genliği farklı diğer sinüsoidal dalgaların toplamından meydana gelmektedir. Temel dalganın dışındaki sinüsoidal dalgalara “Harmonik” adı verilir. Temel dalga ile birlikte 3. ve 5. harmoniklerin bileşkesi aşağıda Şekil 3.1 de gösterilmiştir [7].

Sinüsoidal alternatif akım uygulanan bir alıcının şebekeden harmonikli bir akım çekmesi, alıcının yapısı gereğidir. Yani, alıcı nominal çalışması sırasında, harmonik meydana getirecek akım çekiyor demektir. Harmonik üreten bu alıcılardan başka, karakteristikleri itibarıyla lineer oldukları halde harmonikli akımlara sebebiyet veren alıcılar da vardır. Bu durum ise, alıcıya uygulanan gerilimin nonsinüsoidal olmasından kaynaklanmaktadır. Alternatif akımın üretilmesi sırasında, alternatörlerde yapılan iyileştirmeler yardımıyla, elektrik enerjisinin dalga şekli mümkün olduğunca sinüsoidal forma yaklaştırılmakta olmasına rağmen, lineer bir alıcıya, aynı şebekeye bağlı diğer

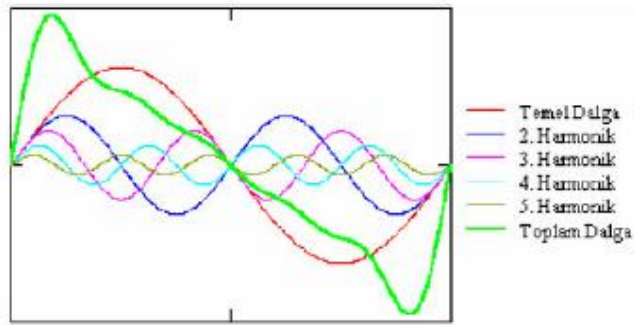
nonlineer yükler tarafından etki edilmektedir. Uygulamalarda en çok 3., 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerle karşılaşmaktadır. Ancak 11. ve 13. harmoniklerin genlikleri temel bileşene göre daha küçük olduklarından, özel durumlar dışında dikkate alınmazlar. Elektrikli aygıtlara en büyük zararı 5 kHz' den küçük harmoniklerin verdiği kabul edilmektedir [7].



(a)

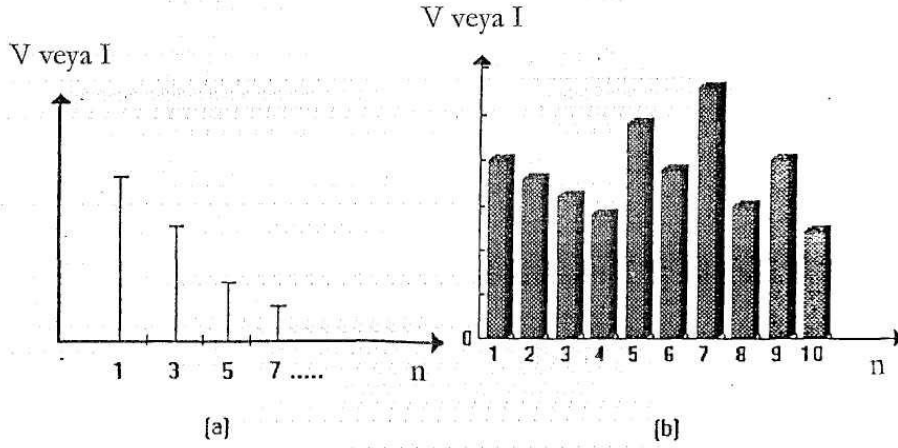


(b)



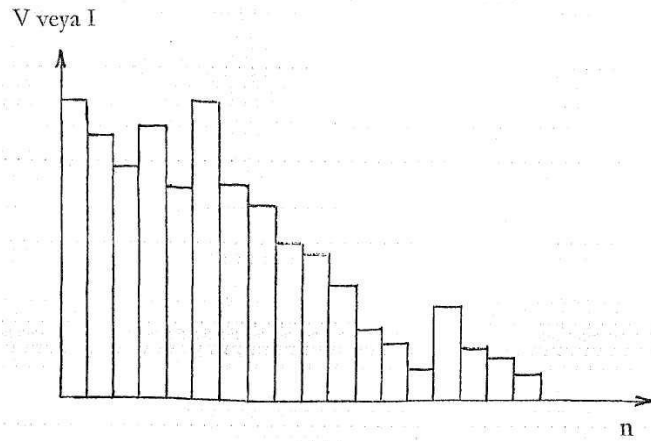
(c)

Şekil 3. 1 Temel dalga, (a) 3. ve (b) 5. harmoniklerle (c) bileşke dalga



Şekil 3. 2 Harmonik spektrum gösterimi: 2 -boyutlu (a) ve 3-boyutlu (b) gösterim

Harmonik bileşenlerin temel bileşene oranla büyüklüklerini göstermek üzere "Harmonik spektrumu" gösterimi kullanılabilir. Yatay eksen harmonik mertebesini verirken düşey eksen harmonik genliğini verir. Bu gösterim 2-boyutlu olabileceği gibi 3-boyutlu da olabilir (Şekil 3 .2) .Harmonik histogram gösterimi de kullanılabilir (Şekil 3.3). Bu metot harmonik mertebesinin çok olduğu (mesela $n=50$ gibi) hallerde, yatay eksenin daraltılması durumunda tercih edilebilir.



Şekil 3. 3 Harmonik histogram gösterimi

3.1 Temel Harmonik Kaynakları

Doğru akımla enerji iletiminde akü ve fotovoltaik sistemlerde sık sık kullanılan hat komütasyonlu dönüştürücüler, bugün güç sistemlerinde harmoniklerin ana kaynağı olmaktadır [17].

Reaktif gücü ayarlayarak bara gerilimini kontrol eden statik VAR generatörler de nonlinear bir eleman olarak davranırlar. Bu konu ile ilgili Gyugyi 1978 yıllarında çalışmalarda bulunmuştur [17].

Nonlinear aydınlatma elemanları olarak gaz deşarj aydınlatması yapan elemanlarla ilgili çalışmalar; floresan lambaların modellenmesi Waymouth tarafından 1971' li yıllarda, cıva ve yüksek basınçlı sodyum lambaların modellenmesi Herrick tarafından 1980' li yıllarda, cıva ark lambalarının elektriki çalışma karakteristiğinin modellenmesi Laskowski ve Donoghue tarafından 1981' li yıllarda yapılmıştır [17]. Transformatörlerdeki 3. ve 3' ün katları harmoniklerin geniş araştırılması ve 3 fazlı transformatörlerle ilişkisi Pender ve Delmar tarafından 1967 yılında ortaya atılmıştır. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışmasının, nüveyi daha çok doymaya götürmesi ve harmonik akımlarının hızlı bir şekilde artmasına sebep olduğu ifade edilmiş, bu durum Mc Graw tarafından 1980' de, Szabados ve Lee tarafından da 1981 yıllarında deneysel olarak ispatlanmıştır [13], [17].

Bilindiği gibi elektrik güç sistemlerinde gerilim ve akımın dalga şeklinin sinüs formundan sapmasına neden olan harmonik bileşenleri, harmonik kaynağı olarak nitelendirilen ve akım gerilim karakteristiği lineer olmayan elemanlar tarafından üretilmektedir. Harmonik kaynakları, genel olarak ark oluşturarak çalışan sistemler, magnetik doyma özelliğine sahip elemanlar, güç elektroniği devreleri, fotovoltaiik sistemler ve gaz deşarjı prensibine göre çalışan aydınlatma elemanlarıdır. Ark fırınları, transformatörler, döner makineler, HVDC sistemleri, statik VAR sistemleri, motor kontrol devreleri, cıva ve sodyum buharlı lambalar ile floresan lambalar bunlara örnek olarak verilebilir (Kocatepe [17]). Bir güç sisteminin harmonik simülasyonunun gerçekleştirilmesi bakımından sistemdeki harmonik kaynaklar üç gruba ayrılabilir.

1. Sistem içerisine dağılmış çok sayıdaki küçük güçlü nonlinear elemanlar,
2. Büyük güçlü, karakteristiği sürekli ancak rastgele değişen nonlinear yükler,
3. Büyük güçlü statik konverterler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği düzenleri.

Birinci gruptaki harmonik kaynakları, çoğu alçak gerilim cihazının (TV, bilgisayar vb.) besleme kaynağı durumundaki bir fazlı köprü diyotlu doğrultuculardır. Gaz deşarjı prensibine göre çalışan lambalar da bir fazlı alçak gerilim ile çalışmaları ve düşük güçlü

olmaları sebebiyle bu gruba dâhil edilebilir. Tek tek ele alındığı zaman her birinin gücünün düşük olmasına rağmen bu elemanların bir fazlı olması ve sistemde çok sayıda olmaları göz önüne alındığında tümünün etkisi önemli olabilmektedir [18].

İkinci gruptaki harmonik kaynaklarının başlıca örneği; yüksek gerilim iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan genellikle yeterli bir filtre sistemi ile donatılmamış bulunan ark fırınlarıdır. Bu fırınların empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olmakta ve simülasyonu güçleştirmektedir [18].

Üçüncü gruptaki büyük güçlü konverterlerin ve güç elektroniği düzenlerinin gerek kontrol sistemlerinin çok karmaşık olması ve gerekse güçlerinin büyük olması nedeniyle simülasyonu zordur. Ayrıca konverterin çalışması sırasında üretilen harmonik bileşenleri güç kaynağına olumsuz etki yapmaktadır. Bu nedenle konverterin problemsiz çalışması için güç sisteminin harmonik simülasyonuna önem verilmelidir [18].

3.2 Başlıca Harmonik Kaynaklarından Bazıları

3.2.1 Transformatörler

Enerji sistemlerinde transformatörler gibi bir demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelen elemanlar, doyma özelliğine sahip demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonikler üretirler. Bilindiği gibi transformatörlerin mıknatıslanma akımının dalga şekli sinüs formundan oldukça uzaktır. Bu nedenle mıknatıslanma akımı yüksek genlikli harmonik akım bileşenleri içerir. Ancak transformatörün mıknatıslanma akımı, anma akımının %1'i seviyesindedir. Elektronik güç konverterleri ve ark fırınları gibi nominal akımlarının %20' sine varan oranlarda harmonik akımları üreten diğer harmonik kaynakları ile güç transformatörleri karşılaştırılırsa, güç transformatörleri sistemde büyük harmonik kaynakları olarak dikkate alınmayabilir. Bu nedenle harmonik yük akış çalışmalarının bir kısmında transformatörlerin lineer devre elemanları olarak modellendiği görülmektedir. Ancak bir dağıtım sisteminde yüzlerce transformatörün olduğu göz

önüne alınırsa, bir bütün olarak transformatörler harmonik kaynağı olarak ele alınabilir. Çizelge 3.1’ de bir dağıtım transformatörünün harmonik akım bileşenleri transformatörün mıknatıslanma akımının yüzdesi olarak verilmiştir. Burada I_n transformatörün sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımıdır [6].

Çizelge 3. 1 Bir dağıtım transformatörünün harmonik spektrumu

Harmonik Derecesi (n)	$(\%) \frac{I_n}{I}$
3	50
5	20
7	5
9	2.6

Güç transformatörleri mıknatıslanma eğrisinin lineer olduğu bölgede çalışmak üzere dizayn edilir. Ancak transformatör yükünün az olduğu zamanlarda gerilimin yükselmesi sebebiyle magnetik çekirdek aşırı uyarılır ve çalışma mıknatıslanma eğrisinin lineer olmayan bölgelerinde gerçekleşir. Bu durumda transformatör harmonik üretir ve Çizelge 3.1’ de gösterildiği gibi özellikle üçüncü harmonik bileşenleri etkin olur [18]. Transformatörlerin lineer olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin nonsinüsoidal akımlar çeken yükleri besleyebilme kapasitesinin bir ölçütü olarak kabul edilen “K-Faktörü” tanımlanmıştır. K-Faktörü de anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür. Bu faktör,

$$K - \text{faktörü} = \sum_{n=1}^{\infty} I_n^2 n^2 \quad (3.1)$$

olarak tanımlanır. Bu bağıntıda n harmonik mertebesi, I_n ise baz değeri olarak transformatörün anma akımının alınması ile hesaplanan n .harmonik akım bileşeninin per-unit değeridir. K-faktörü, anma gücü 500 kVA'ın altında ki transformatörler için tanımlanmıştır. Transformatör bağlantı grubunun üç ve üçün katı harmoniklere etkisi incelendiğinde, dengeli olduğu kabul edilen bir nonlineer yük akımının temel bileşeninin efektif değeri I_1 ve temel frekans için hesaplanan açısal hızı ω_1 olmak üzere, a,b,c fazlarına ait yük akımlarının temel bileşenlerinin ani değerleri,

$$i_a(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t)$$

$$i_b(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t - 2\pi/3) \quad (3.2)$$

$$i_c(\omega t) = \sqrt{2}I_1 \sin(\omega_1 t + 2\pi/3)$$

olarak tanımlanır. Nonlineer yük akımının n . harmonik bileşeninin efektif değeri I_n olmak üzere; a,b,c faz akımlarının n . harmonik bileşenlerinin ani değerleri,

$$i_{an}(\omega t) = \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t)$$

$$i_{bn}(\omega t) = \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t - 2\pi n/3) \quad (3.3)$$

$$i_{cn}(\omega t) = \sqrt{2}I_n \sin(n\omega_1 t + 2\pi n/3)$$

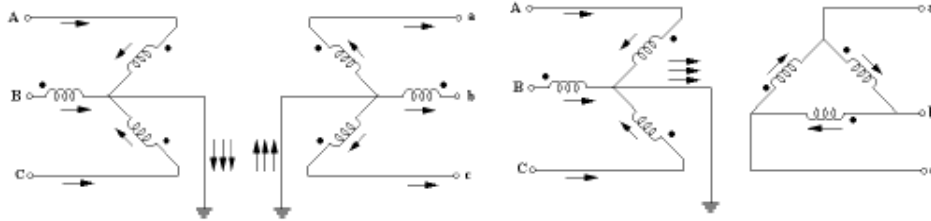
eşitlikleri ile hesaplanabilir. Özel bir durum olarak $k=1,2,3,\dots$ olmak üzere $n=3k$ mertebesindeki harmonik bileşenlerinin (3.,6.,9., ...) ani değerleri (3.4) eşitliklerine göre;

$$i_{a_{3k}}(\omega t) = i_{b_{3k}}(\omega t) = i_{c_{3k}}(\omega t) = \sqrt{2}I_{3k} \sin(3k\omega_1 t) \quad (3.4)$$

değerini alır. Yukarıdaki eşitlikte de görüldüğü gibi, dengeli şebeke ve yük koşulları altında üç ve üçün katı harmonik bileşenlerinin her üç faz akımları birbirine eşittir. Transformatörün yıldız noktasının topraklanması halinde; her üç faza ait dengeli temel bileşen akımlarının toplamının sıfır olması sebebiyle nötr iletkeninden geçen akım sıfır olur. Bu durum üç ve üçün katı harmonikler dışındaki tüm dengeli harmonik akım bileşenleri için geçerlidir. Şekil 2.4' de gösterildiği gibi her üç fazın üç ve üçün katı harmonik akım bileşenlerinin birbirine eşit olması nedeniyle, bir fazdan geçen üç ve

üçün katı harmonik akımının üç katı nötr iletkeninden geçer ve nötr iletkeni bu akım nedeniyle aşırı ısınabilir. Bu nedenle nötr iletkeninin kesitinin belirlenmesinde 3. harmonik akımının da göz önüne alınması gereklidir [6].

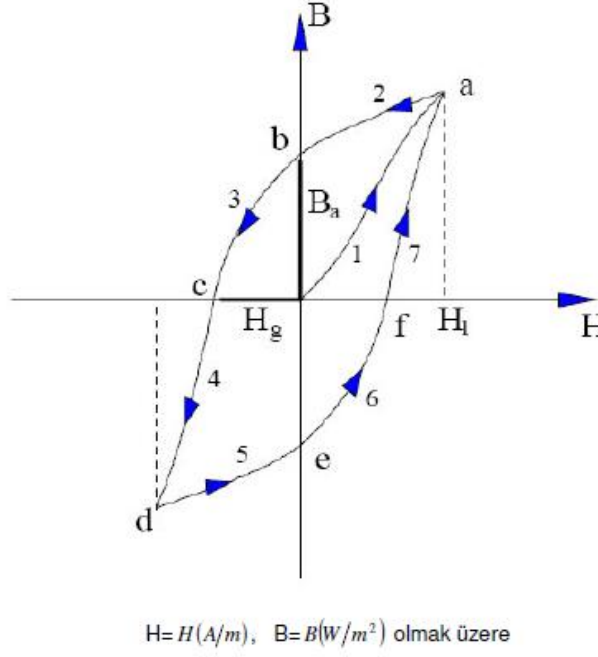
Transformatörün sekonderi üçgen bağlı ise Şekil 3.4'de gösterildiği gibi üçgen bağlantının her bir düğümünde akım toplamının sıfır olması nedeniyle şebekeye üç ve üçün katı harmonik akımları geçmez. Bu özellikten yararlanarak şebekenin üç ve üçün katı harmoniklerden etkilenmesini önlemek için transformatörün yıldız/üçgen (nonlineer yük tarafının yıldız ve şebeke tarafının üçgen) bağlı olması tavsiye edilir. Transformatörün yıldız-topraklı / yıldız topraklı bağlı olması halinde üç ve üçün katı harmonikler şebekeye geçer.



Şekil 3. 4 Y/Y ve Y/Δ bağlı transformatörlerde üç ve üçün katı harmonik akım yönleri

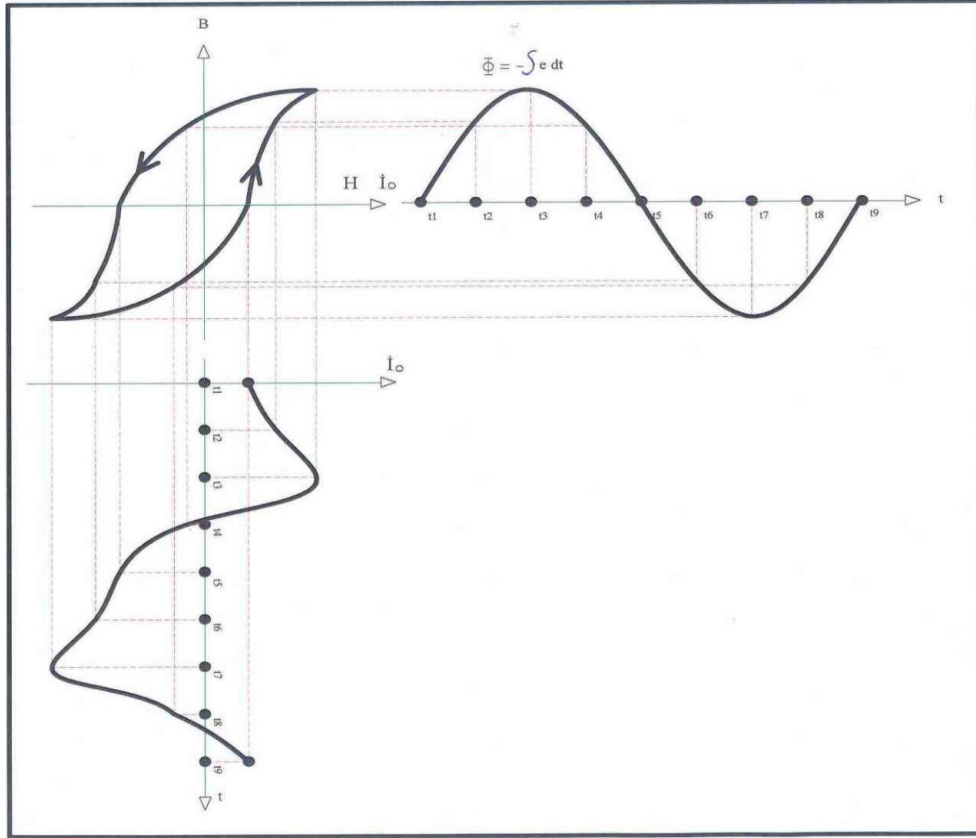
Nonlineer yük dengesiz ise transformatör bağlantısı ne olursa olsun üç ve üçün katı harmonik akımları dengesizlik sebebiyle şebekeye geçer [6]

Enerji sisteminde demir çekirdeği bulunan bobinler harmoniklere yol açarlar bu tür elemanların başında güç sistemindeki en önemli elemanlardan transformatörler gelir. Bunların harmonik üretme özelliği, demir çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmamasından, yani transformatörün doymasından kaynaklanmaktadır. Demir çekirdeğin $B = f(H)$ eğrisine mıknatıslanma eğrisi denir. Mıknatıslanma eğrisi, Şekil 3.5.'de verilmiştir. Transformatör çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiği lineer özelliğe sahip olmadığından, uygulanan sinüsoidal uyarma akımı sonucu sinüsoidal akı ve gerilim oluşmamaktadır[7],[13].



Şekil 3. 5 Demir çekirdeğin mıknatıs eğrisi

$V(t)=V_{\max} \cdot \sin(\omega t)$ biçiminde sinüsoidal şebeke geriliminin uygulanması halinde uyarma akısı yine sinüsoidal bir akı üretilecektir. Transformatörler, normal işletme şartlarında sinüsoidal gerilimle çalışma altında lineer mıknatıslama karakteristiği bölgesinde sinüsoidal çıkış büyüklüğü verecek şekilde tasarlanırlar. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması nüvenin daha çok doymasına ve harmonik akımları seviyesinin hızla artmasına sebep olabilmektedir. Transformatörün mıknatıslanma akımı Şekil 3.6.'de verilmiştir. Transformatörlerin mıknatıslanma akımları harmonikler içerir. Kararlı çalışma durumunda manyetik endüksiyon bir sinüs formu olup histerizis ihmal edilirse, mıknatıslanma eğrisi sıfır noktasına göre simetrik olduğundan mıknatıslanma akımı $n = 1,3,5,7,9,\dots$ tek dereceden sinüsoidal bileşenlerin toplamı şeklinde ifade edilebilir.



Şekil 3. 6 Transformör mıknatıslanma akımı

Mıknatıslanma akımının eğrisi sinüs formundan uzak bir şekilde bulunur. Bu akım da periyodik bir akımdır ve içinde 1, 3, 5, 7, 9,... gibi tek dereceli harmonikler bulunur. F demir çekirdek kesiti olmak üzere, şayet F demir kesiti küçük tutulursa B büyür, mıknatıslanma akımında yüksek harmonikler oluşur. şayet F büyük tutulursa mıknatıslanma akımının sinüs forma yaklaşması sağlanır. Mıknatıslanma akımı harmonikleri günün erken saatlerinde en yüksek seviyeye ulaşır, çünkü o saatlerde sistemdeki yük az olduğundan temel bileşen akımı azalmakta ve THD yükselmektedir. Aşırı uyarmayla oluşan akım harmoniklerinde 3., 5. ve 7. harmonikler etkili olurlar. Akım şiddeti bakımından en önemli harmonik 3. harmoniktir. 3. ve 3'ün katları arasındaki harmonikler fazlar arasında 360 derecenin tam katları kadar (n , harmonik dereceleri olmak üzere n . harmonik bileşenleri arasında $n \cdot 120^\circ$ 'lik) faz farkı olduğundan hepsi aynı fazdadır [7],[13].

Mıknatıslanma akımındaki harmoniklerin şebekeye geçip geçmemesi şu koşullara bağlıdır [7];

1. Transformatörün bağlantı grubu,
2. Primerin yıldız bağlı olması halinde, yıldız noktasının şebekenin nötrüne bağlı olup olmaması,
3. Transformatördeki manyetik devrenin geometrik yapısı.

a) Yıldız/Yıldız bağlı transformatörler:

Primer yıldız noktası nötre bağlı ise; Faz akımlarının n. Harmonikleri arasındaki faz farkı şunlara eşittir,

$$\phi_n = n\phi_1 = n \frac{2\pi}{3} = n120^\circ \quad (3.5)$$

bu bağıntıdan da görüleceği gibi, üçlü harmonikler her üç fazda da aynı fazda olduklarından, nötr hattında birbirlerine eklenirler. Buna karşılık, diğer harmoniklerin toplamı, aralarında 120 derece faz farkı olduğundan sıfır olacaktır. Primer yıldız noktası nötre bağlı değil ise; üçlü harmonikler yıldız noktasına yığılırlar. Dolayısıyla, sargılarda üçlü harmonikler dışında diğer tek mertebeli tüm harmonikler dolaşır. Böylece, indüklenen emk' lar sinüs biçiminden ayrılırlar. Yıldız noktasında yığılan bu akımların oluşturduğu akılarda her üç fazda aynı yöndedirler. Bu akılar devrelerini tamamlamak için yol arayarak, hava veya yağ içinde kendilerine yol seçerler. Eğer imkan bulurlarsa kazana atlarlar ve kazanda emk' lar indükleyerek kazanın ısınmasına neden olurlar. Ayrıca, bu üçlü harmonikler, her üç fazda aynı fazlı gerilim düşümü meydana getirerek yıldız noktasının kaymasına sebep olurlar [7].

b) Yıldız/Üçgen bağlı transformatörler:

Primer yıldız noktası nötre bağlı ise; karşılaşılan durum Yıldız/Yıldız bağlı transformatörlerdeki ile aynıdır. Primer yıldız noktası nötre bağlı değil ise; 3. ve 3'ün katı akı harmonikleri üçgen sargıda 3 ve 3' ün katı frekanslı sirkülasyon akımlarının geçmesine sebep olur. Bu akımlar kendisini indükleyen akiya zıt etkileyerek bunları söndürürler [7].

c) Üçgen/Yıldız bağlı transformatörler:

Primer sargısı üçgen bağlı transformatörün mıknatıslama akımının aynı fazda olan üçlü harmonik bileşenleri üçgen sargıda dolaşırlar. Üçlü harmonik bileşenler primer

şebekeye geçemediklerinden, şebeke hatlarında diğer tek mertebeli harmonikler (5., 7., 11., v.b.) görülür.

Primer sargısının üçgen olması halinde, bacaklardaki simetrisizliğin neden olduğu mıknatıslama akımlarındaki eşitsizliğinde bir sakıncası kalmaz. Çünkü orta bacağın mıknatıslama akımı diğer iki dış bacağın mıknatıslama akımlarından küçük olmasına rağmen, şebekeden çekilen her üç koldaki akımlar birbirine eşittir [13]. Transformatörler nasıl bağlanırsa bağlansın, primer şebekenin nötrüne bağlansın yada bağlanmasın, nüve tipi nasıl olursa olsun şebekeden temel bileşenlerin yanında 5., 7., 11., 13. gibi harmonik bileşenli mıknatıslama akımlarını daima çekerler [7]. Üçlü harmoniklerin kötü etkilerinden kurtulmak için tersiyer sargı kullanılır. Görmüş olduğu görevden dolayı buna dengeleyici sargı da denir. Tersiyer sargı, transformatörün anma gücünün $1/3$ mertebesinde olan üçüncü bir sargıdır ve üçgen şeklinde bağlanır. Tersiyer sargı üzerinden mıknatıslama akımının üçlü harmoniklerinin dolaşması ile alan ve faz sargıları bu harmoniklerden kurtulmuş olur.

3.2.2 Döner Makineler

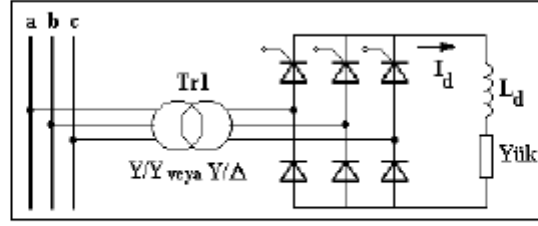
Bir döner makinenin oluşturduğu harmonikler, ilke olarak makinenin stator ve rotorundaki olukların neden olduğu manyetik relüktanstaki değişimlerle ilgilidir. Döner makinelerin harmonik üretmelerinin başlıca iki nedeni; alan şekli ve ana devreler ile kaçak yollardaki doymalardır. Bir makine için gerçek alan şekli makine tasarımının bir fonksiyonudur. Günümüzdeki ileri tasarım teknikleri (oluk ve kutup geometrisi, sargı yapısı) ile döner makinelerdeki harmonik etkinliği en aza indirilmiştir. Döner makineler içerisinde en önemli harmonik üreticisi senkron generatörlerdir [19].

En doğal harmonik üreticileri generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşmasından, kaçak akımlardan, sık aralıklardan ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Döner makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir. Senkron generatörlerin oluşturduğu harmonikler, generatör gücü 100 kVA' dan büyük olmadığı sürece dikkate alınmaz [7],[11].

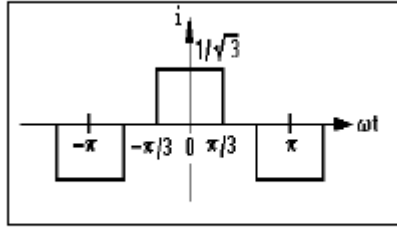
Generatörlerin bağlantı şekilleri de harmonikler için belirleyici özellikler taşır. Generatör sargısı yıldız bağlı ise; 3 ve 3' ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunup fazlar arası gerilimlerinde bulunmazlar. Yıldız bağlı bir generatöre üç fazlı simetrik ve doğrusal bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası generatör yıldız noktasına bağlanmaz ise; 3 ve 3' ün katı harmonikli akımlar geçmezler. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3' ün katı frekanslı I_0 akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3I_0$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3'ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler [7]. Generatör sargısı Üçgen bağlı ise; bu sargılarda 3' ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur. Bu sebeplerden dolayı, generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir. Fakat generatörün 4 iletkenli bir şebekeyi beslemesi gerekiyorsa, zigzag bağlı bir bobinde oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Generatörlerin sebep olduğu 3 ve 3' ün katları harmonik akımları, generatör veya blok transformatörün birinde üçgenbağlama kullanılmak suretiyle bloke edilir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun dizayn edilerek 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür. Burada dikkate değer en düşük harmonik 11. harmoniktir [6], [11].

3.2.3 Konverterler

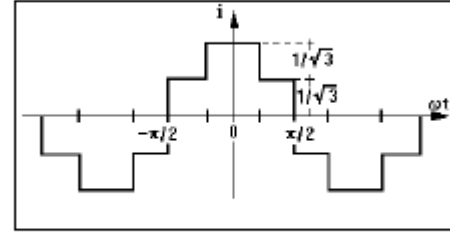
Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklarından biri de üç ve bir fazlı hat komütasyonlu konverterlerdir. DC iletim sistemleri, akü ve fotovoltaik sistemler hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenir [17]. Sistemdeki bir fazlı büyük güçlü konverterlerin (Kontrollü doğrultucuların) kullanım alanlarından birisi de elektrikli demiryolu ulaşım sistemleridir. Üç fazlı ideal (dengeli) konverterlerin bir fazlı konverterlere göre avantajı, üç fazlı konverterlerin üç ve üçün katı harmonikleri üretmemesidir. Üç fazlı konverterler, konverter transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen a.c. akımın dalga formunun içerdiği darbe sayısı ile tanınır. Şekil 3.7'de 6 darbeli bir konverterin bağlantı şeması ve hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir.



(a)



(b)



(c)

Şekil 3. 7 Üç fazlı 6 darbeli konverter

(a) Bağlantı şeması

(b) Transformatörün Y/Y bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli

(c) Transformatörün Y/Δ bağlı olması hali için hat akımı dalga şekli

Transformatörün Y/Y bağlı olması halinde dengeli olarak çalışan konverterin Şekil 3.7b ile verilen a-fazı hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - 117 \cos 17\omega t + \dots \right) \quad (3.6)$$

olarak ifade edilebilir [7]. Transformatörün Y/Δ bağlı olması halinde, Şekil 3.7c ile verilen a-fazı hat akımı ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{2\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t + \frac{1}{5} \cos 5\omega t - \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t + 117 \cos 17\omega t - \dots \right) \quad (3.7)$$

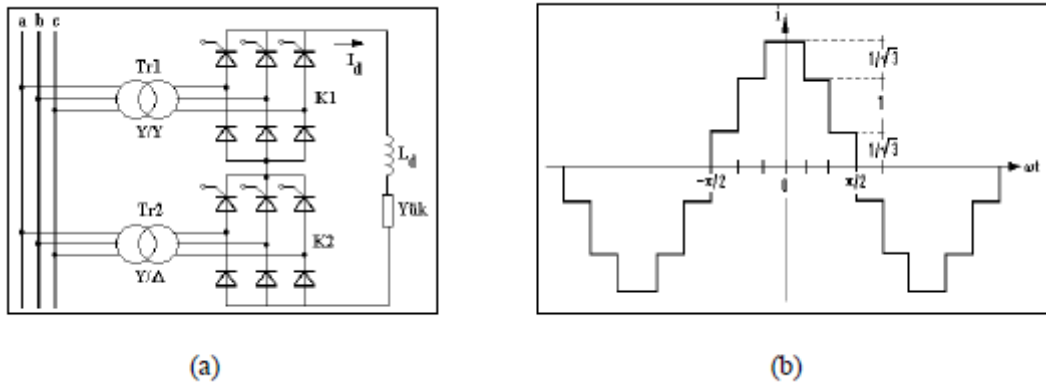
olarak ifade edilebilir [7]. Bu durumda $k=1, 3, 5, \dots$ olmak üzere $6k \pm 1$ mertebesindeki harmonikler (5., 7., 17., 19., ..) Y/Y bağlı transformatörlü konverterin ürettiği harmoniklerin ters işaretlisi olmaktadır. Yukarıda akım ifadeleri verilen her iki tip altı

darbeli konverterin dc çıkışları seri bağlanarak elde edilen 12 darbeli konverter ile $6k \pm 1$ ($k=1, 3, 5, \dots$) mertebesindeki harmoniklerin (5., 7., 17., 19., ..) a.c şebekeye geçmesi önlenir. 12 darbeli konverter şebekeye $k=1, 2, 3, \dots$ olmak üzere sadece $12k \pm 1$ mertebesindeki harmonikleri (11., 13., 23., 25., ..) enjekte eder.

Şekil 3.8’de on iki darbeli konverterin bağlantı şeması ve a-fazı hat akımının zamana göre değişimi gösterilmiştir [7]. Burada hat akımının ani değeri,

$$i_a(\omega t) = \frac{4\sqrt{3}}{\pi} I_d \left(\cos \omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \frac{1}{23} \cos 23\omega t + \frac{1}{25} \cos 25\omega t - \dots \right) \quad (3.8)$$

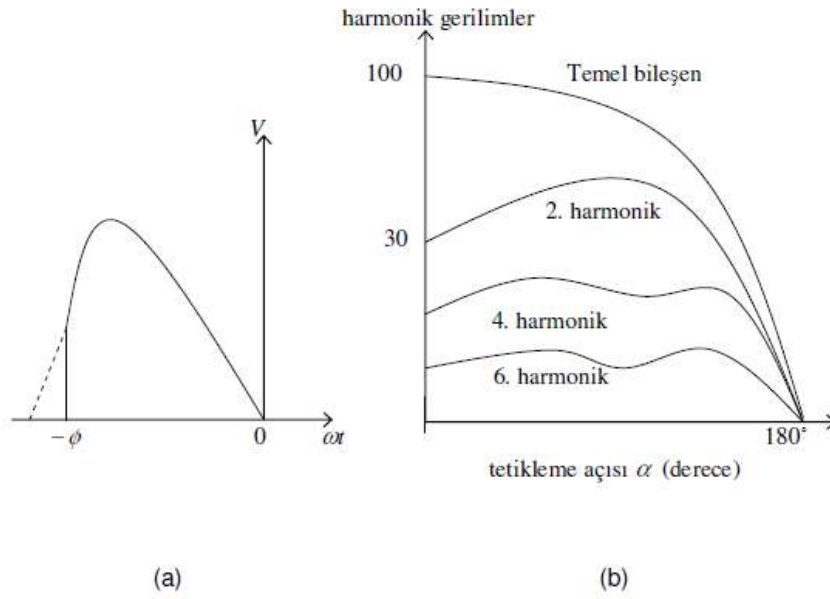
olarak ifade edilebilir. (Bu kısımda verilen konverter devrelerinde ve eşitliklerinde transformatörlerin çevirme oranı 1:1 olarak alınmıştır.)



Şekil 3. 8 Üç fazlı 12 darbeli konverter (yarı kontrollü doğrultucu)

(a) Bağlantı şeması (b) Hat akımı dalga şekli

Transformatörlerden sonra ana harmonik kaynağı günümüzde hat komütasyonlu konverterlerdir. Belirli şartlarda, alternatif akım ile enerji iletimine göre daha ekonomik iletim sağlayan doğru akım enerji iletim sistemleri (HVDC) ile akü, fotovoltaik sistemler ve bazı endüstriyel donanımlar hat komütasyonlu konverterler üzerinden beslenirler. Örneğin yarım dalga kontrollü bir doğrultucu devresinde sinüsoidal dalga tristörlerin tetikleme açısına bağlı olarak belirli bir ϕ açısından kesildiğinde devrede nonsinüsoidal dalga meydana gelmektedir. Şekil 3.9.a’da nonsinüsoidal dalga, Şekil 3.9.b’ de ise bu dalga ile oluşan harmonikler gösterilmiştir.



Şekil 3. 9 Yarım dalga kontrollü doğrultucu devresi için (a) dalga şekli, (b) oluşan harmonikler

Bir konverterin meydana getirdiği harmonikler, konvertörlerin tristör sayısına (darbe sayısına) bağlı olarak ifade edilebilir. Örneğin; 6 darbeli bir konverterin akımı aşağıdaki gibidir;

$$I_a = \frac{\sqrt{2}}{\pi} I_d \cos \omega t - \frac{1}{5} \cos 5\omega t + \frac{1}{7} \cos 7\omega t - \frac{1}{11} \cos 11\omega t + \frac{1}{13} \cos 13\omega t - \dots \quad (3.9)$$

Burada görüldüğü gibi harmonik akımların genliği harmonik frekansı ile ters orantılıdır. Harmonik derecesi ne kadar yüksekse harmonik akımların genliği o kadar düşmektedir. Konverterlerde darbe sayısı $P/6$, 12 , 18 ve 36 'dır. Buna bağlı olarak meydana gelen harmonik bileşenlerin frekansları şu şekilde ifade edilebilir;

$$n = kp \pm 1 \quad (3.10)$$

n : harmonik mertebesi

p : çeviricinin darbe sayısı

k : pozitif bir tam sayıdır. (1,2,3,4,5 ... gibi)

[7]

3.2.4 Ark Fırınları

Ark fırları geniş harmonik spektrumları ile enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından biri olarak önemli bir yer tutar. Bunlar, yüksek gerilim iletim şebekesine direkt olarak bağlanan, anma g  c  MW mertebesinde olan ve elektriksel ark oluşumu esasına dayanan fırlardır. Elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle ark fırları harmonik üretirler. Ark olayının başlamasının ardından ark gerilimi azalırken, sadece g    sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırabilen ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür. Ark fırlarının empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olduğu için ark fırlarının modellenmesi oldukça zordur. Ayrıca ark olayında akım ile gerilim ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişir. Buna ait değişimler osilogram ile kaydedildikten sonra harmonik analizörleri yardımıyla harmonik spektrumu elde edilebilir [17]. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalardan çeşitli değerler elde edilmiştir. Örneğin, tipik bir ark fırlarında 2,3,..., 9 mertebesinde akım harmonikleri bulunmuş ve maksimum harmonik bileşeninin temel bileşenin %30'  kadar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 2,3,4 ve 5 mertebesindeki akım harmoniklerinin temel bileşen akımının yaklaşık %2'si ile %4'  arasında ve 6,7,...,10 mertebesindeki akım harmoniklerinin ise temel bileşen akımının yaklaşık %0.4'  ile %1.3'  arasında dağılım gösterdiği de tespit edilmiştir [6].

Ark fırları, geniş spektrumlu harmonikler içeren yüklerin önemli bir örneğidir. Ark fırlarını bulunan işletmeler için harmonik oluşum nedeni olarak ark fırlarındaki ateşleyici elektrotların özellikleri ve ark akım-gerilim karakteristikleri verilir.

Ark fırlarının aktif direnci sabit değildir. Bir yarı periyodun başlangıcında direnç büyüktür, bundan sonra bir minimum değere düşer ve yarı periyodun sonuna doğru tekrar yükselir. Bu yüzden akım tam bir sinüs şeklinde değildir ve birçok harmonikler ihtiva eder. Ergitme aşamasının başında akım harmonikleri çok fazladır ve hurda eridikten sonra yani ark sakinleşince harmonik azalır. Çizelge 3.2.' de ark fırlarının ortalama harmonik değerleri verilmiştir.

Ark fırınlarının çalışma şartlarında ki bu değişmelerden dolayı güç sisteminden çektikleri akımlar da geliş güzel olur. Bunun sonucu olarak, şebeke gerilimi de akıma bağlı olarak sinüs formunda uzaklaşır. Akım ve gerilimdeki bu bozulmalar, şebekeye harmonikli bileşenlerin verilmesi anlamına gelir.

Ark fırınlarında harmonik dağılımın kuramsal olarak saptanması için güç sistemi modelinin tam olarak kurulması gerekir. Bu modele harmonik meydana getiren elemanların modellerinin eklenmesi gerekir. Daha sonra sistem çözülerek harmoniklerin baralara göre dağılışı elde edilir [6].

Çizelge 3. 2 Ark fırınının ortalama harmonik değerleri

Harmonikler	Ortalama Genlik (%)
2	4-9
3	6-10
4	2-6
5	2-10
6	2-3
7	3-6
9	2-5

Bu açıklamalardan da anlaşıldığı gibi, ark fırını sisteme bir harmonik generatörü gibi etki eder. Ark fırınına paralel bağlı devrelerde, şartların gerçekleşmesi halinde rezonans olayları baş gösterebilir. Bugün ark fırınlarının düşük güç katsayısı ile çalıştırılması tercih edilir. Bu yüzden fırın daha büyük bir reaktif güç çeker. Bunu kompanze etmek için büyük güçlü kondansatör bataryası kullanılır. Böylece şebekenin rezonans frekansı düşer [6], [11].

3.2.5 Statik VAr Generatörleri

Statik VAr generatörleri; alternatif akım kısıyıcı ile akımı değiştiren bir reaktör, paralel bağlı kondansatörler, kumanda ve kontrol elemanlarından oluşur. Bu sistemlerin çalışma özelliği gerekli reaktif gücü en hızlı bir şekilde ve her faz için ayrı ayrı verebilmesidir. Zira geleneksel kompanzasyon düzenleri ile çok hızlı değişen reaktif güç ihtiyacı karşılanamaz. Örneğin; ark fırınlarında fırının çektiği reaktif gücün değişimi çok hızlı olduğundan normal mekanik cihazlarla kompanzasyon gücünü karşılamak

mümkün olmaz. Fakat yarı iletken elemanların sağladığı imkânlar sayesinde reaktör elemanlarını ark fırınının çalışması gerektiği hızda devreye sokup çıkarmak mümkündür. Bunun için tristörlerden yararlanılır [19]. Tristörler, bir senkron anahtar gibi çalışırlar. Kumanda devrelerine uygun sinyal verilerek devreye uygulanan gerilimin efektif değeri ve buna bağlı olarak da devreden geçen akım kayıpsız olarak istenildiği gibi ayarlanabilir. Bu sistem tristör ile kumanda edilen, reaktör ile dengelenen, sabit kondansatör ile kompanzasyon metodudur. Doymalı reaktörler kompanzasyon ark fırınları için ideal bir çözüm getirmemektedir. En uygun çözüm, fırının reaktif gücünün ani değerini ölçmek ve buna göre gerekli endüktif gücü, gerekli sayıda reaktörü devreye sokup çıkarmakla sağlamaktır. Bu suretle fırın gücü ile reaktör gücünün toplamı sabit tutulur ve sabit kondansatör tarafından kompanze edilir [19].

3.2.6 Gaz Deşarjı Prensibi ile Çalışan Aydınlatma Elemanları

Bir tüp içerisindeki gazın deşarjı prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma elemanları (civa buharlı lambalar, floresan lambalar, sodyum buharlı lambalar vb.) nonlineer akım gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler. Bu tip lambalar iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Bina ve yol aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan floresan lamba tesislerinde tek harmoniklerin seviyesi önemli oranda sistemi etkiler. Özellikle üçüncü harmonik ve üçüncü harmoniğin katları mertebesindeki harmonik akım bileşenleri, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçerek yüklenen iletkenin ısınmasına neden olur [6].

Ayrıca floresan lambalara bağlanan balastların da bir magnetik devreleri olması nedeniyle bu yardımcı elemanlar da harmonik üretirler. Son yıllarda magnetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlamalı güç kaynağı prensibi ile çalışan elektronik balastlar da harmonik üretmekle beraber balast içerisine monte edilen filtre ile elektronik balastın ürettiği harmonik bileşenlerini elimine etmek mümkündür. Aşağıdaki çizelgede magnetik balastlı bir fluorescent lamba akımının harmonik spektrumu verilmiştir [6].

Çizelge 3. 3 Magnetik balastlı bir floresan lamba akımının harmonik spektrumu

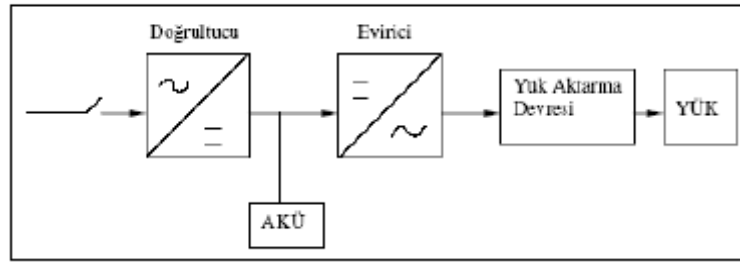
	Harmonik (n)										
	1	3	5	7	9	11	13	15	17	19	21
$(\%) \frac{I_n}{I_1}$	100,0	19,9	7,4	3,2	2,4	1,8	0,8	0,4	0,1	0,2	0,1

Gaz deşarjlı aydınlatma elemanları, örneğin floresan, cıva, ark, neon v.b. ve yüksek basınçlı sodyum lambalar şebekeden harmonikler içeren akımların çekilmesine neden olurlar. Bu tür aydınlatma elemanları özellikle büyük şehir alanlarında daha çok hissedilen harmonikler meydana getirirler. Bu tip lambaların elektriksel karakteristiği nonlineer olup akım geçişi esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Ev ve işyerlerinde yaygın olarak kullanılan flüoresan lambalar balastlarından ve gaz deşarjlarından kaynaklanan harmonik bileşenlerin meydana gelmesine sebep olmaktadır. Üç fazlı sistemde, faz nötr gerilimle beslenen aydınlatmada (üç fazlı dört telli montajda) 3. harmonik akımı nötr iletkeninden toprağa geçer. Harmonik etkinliği açısından bakıldığında, flüoresan aydınlatmada tek mertebeli harmoniklerin büyüklüğü önemli oranda devreyi etkiler [7].

3.2.7 Kesintisiz Güç Kaynakları

Gerilim dalgalanmasının ve kesintisinin yol açtığı zararlardan kurtulmak için bilgisayarlar, hastaneler, hava alanları v.b. diğer önemli yerlerde kullanılan kesintisiz güç kaynakları, alternatif gerilimin doğru gerilime çevrilerek depolanması ve sonra evirici yardımı ile alternatif akıma çevrilerek tüketiciye iletilmesi esasına göre çalışır. Kesintisiz güç kaynaklarında evirici, ara devre gerilimi olan doğrultucu çıkış gerilimini, evirmek suretiyle istenen genlik ve frekansta dalgalı gerilime dönüştürür. Dönüşüm sırasında tam sinüs dalgası elde edilemediği için çıkış işaretinin Fourier serisinin açılımının belirttiği frekanslarda, belirli genliklerde harmonikler oluşturacaklardır. Bu durum gerek yükte gerekse kaynakta gereksiz yüklenmelere, ek ısınmalara, verimlilik kaybına, motor uygulamalarında salınımlara v.b. istenmeyen durumlara neden olabilmektedir. Ortaya çıkan bu harmonikler işletme cihazlarında çoğu kez istenen performansın alınabilmesini engellediği için istenmez. Sonuçta çıkış işaretindeki harmoniklerin belirli miktarlarda bastırılması çoğu kez gerekli bir işlem olmaktadır.

Kesintisiz güç kaynaklarında harmonikler evirici tipine, evirici çıkışını elde etmek için kullanılan modülasyon tipine, mikroişlemci kontrollü olup olmadığına v.b. etkenler bağlı olarak değişmektedir. Bir güç elektroniği düzeni olan kesintisiz güç kaynakları, esas olarak şebeke geriliminin uygulandığı bir doğrultucu, doğrultucu çıkışında paralel olarak uygulanmış olan akü düzeni ile, doğrultulmuş gerilimi dalgalı gerilime dönüştürerek, yüke veren evirici düzenini içerir. Bu temel elemanlar yanında, elde edilip yüke verilecek sinüsoidal gerilimin istenilen özelliklerde olmasını sağlamak, güvenilir bir çalışma elde etmek üzere yardımcı düzenler de vardır. Kesintisiz güç kaynaklarında doğrultucu ve evirici devreleri, uygun geri beslemelerle kapalı çevrim kontrollü çalıştırılırlar. Bundan dolayı çıkış gerilimleri çok kararlıdır, yükten etkilenmez. Şekil 3.10'de bir kesintisiz güç kaynağının prensip şeması görülmektedir [19].



Şekil 3. 10 Kesintisiz güç kaynağının prensip şeması

3.2.8 Elektronik Balastlar

Gün geçtikçe hayatımızın her safhasına daha belirgin bir biçimde giren elektronik sanayi, şebekede harmonik etkinliğinin de artmasına sebep olmaktadır. Aydınlatmada kullanılan elemanlardan elektronik balastlar da harmonik üreticisidirler. Filtreli ve fitesiz olarak imal edilen bu balastlar, eğer filtreli ise harmonik etkinliği yok sayılır. Filtresiz olarak kullanılan yüksek frekanslı elektronik balastlarda en etkin harmonik bileşenler 3., 5., 7. ve 9.bileşenlerdir, 13. harmonikten sonra temel bileşenin $1/3'$ ünden daha küçük değerde harmonik bileşenlere sahiptirler [6].

Enerji tasarrufu sağladığı söylenerek, promosyonu yapılan kompakt floresan lambalar, elektronik balastları tarafından şebekeye harmonik akımlar gönderirler. İngiltere' deki Eastern Electricity tarafından çeşitli kompakt floresan lambalar kullanılarak yapılan araştırmaların sonucu Çizelge 3.4.' de verilmiştir [6].

Çizelge 3. 4 Temel değerin % olarak harmonik içerikleri

2. Harmonik	0.12	0.23	0.25	0.82	0.1
3. Harmonik	21.11	25.13	78.87	88.83	1.04
5. Harmonik	29.84	15.53	54.08	71.77	2.7
7. Harmonik	8.44	3.61	41.75	56.00	0.40
9. Harmonik	6.27	2.03	35.36	47.70	1.12
11. Harmonik	12.11	6.33	24.39	45.03	0.01
13. Harmonik	4.45	1.2	12.77	43.25	0.27
THD	41.47	40.18	118.21	176.27	4.00

3.2.9 Güç Elektroniği Elemanları

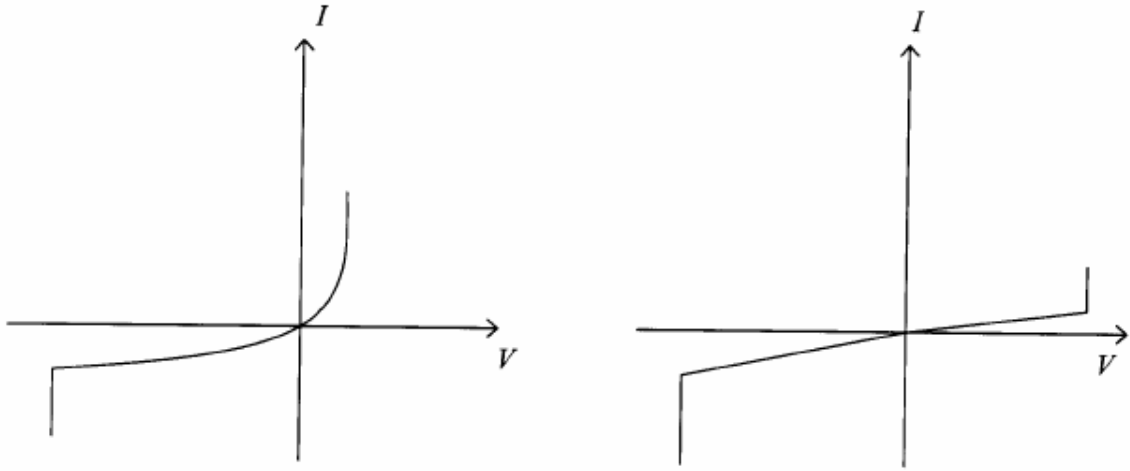
Çeşitli güç elektroniği elemanları küçük uygulamalardan büyük endüstriyel uygulamalara kadar birçok alanda kullanılmaktadır. Yüksek çalışma verimine ve istenilen çalışma durumlarına sahip olmaları nedeni ile geniş kullanım alanı bulmuşlardır. Televizyon alıcıları, bilgisayarlar ve diğer elektronik uygulamaları kapsayan küçük güçlü tek fazlı elektronik güç dönüştürücülerin sayısı gün geçtikçe artmaktadır.

Üç fazlı güç elektroniği elemanları ise geniş bir kullanım ve tasarım alanına sahiptirler. Başlıca güç dönüşüm grupları şunlardır:

- Doğrultma
- Frekans kontrolü
- Gerilim kontrolü
- Evirme
- Diğer uygulamalar [7].

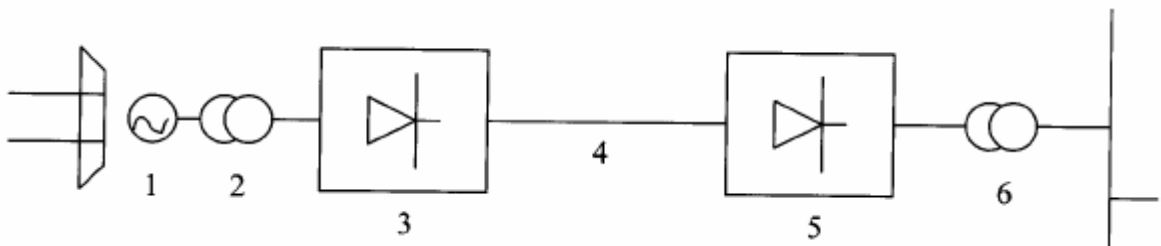
Güç elektroniği elemanlarındaki toplam harmonik distorsiyonu tipik olarak yük akımının %10'u ile %30'u arasındadır. Yarı iletken elemanlar çalışma karakteristiğinin nonlineerliğinden kaynaklanan harmonikler üretirler. Şekil 3.11' de örnek olarak bir

diyot ve tristöre ait çalışma karakteristiğinden de görüldüğü gibi akım ve gerilim lineer olarak değişmediği için şebekede harmoniklerin oluşmasına neden olurlar.



Şekil 3. 11 Diyot ve tristöre ait çalışma karakteristikleri [16] a) diyot b) tristör [7]

1960' lı yıllardan başlayarak, yarı iletken teknolojisinin de gelişmesiyle, doğru akım ile enerji nakli (HVDC-High Voltage Direct Current) gündemdedir. Kararlılık probleminin olmaması ve farklı frekanslı iki noktanın birleştirme olanağının olması, doğru akımla enerji iletimini tercih edilir yapmaktadır. Bu teknikte alternatif-doğru ve doğru-alternatif çeviricileri kullanılmaktadır. Alternatif olarak üretilen gerilim doğrultulmakta ve enerji nakil hattını beslemekte, hattın ucunda tekrar alternatifte çevrilerek tüketiciye iletilmektedir. Şekil 3.12' de bir doğru akımla enerji iletim hattının basit bağlantı şekli verilmiştir.



Şekil 3. 12 Bir doğru akım enerji iletim hattının prensip bağlantı şeması,(1: Generatör, 2: Yükseltici transformatör, 3: Doğrultucu, 4: İletim hattı, 5: Evirici, 6: İndirci transformatör)

Doğru akım enerji iletim hatlarında hat başında ve sonunda yer alan büyük güçlü çeviriciler (doğrultucu ve evirici bloklar) yarı iletken elemanlardan oluştuklarından, birer

harmonik kaynağı olmaktadır. Örneğin, altı yollu çeviricilerin kullanıldığı bir doğru akımla enerji iletim hattında faz akımının efektif değeri;

$$I = I_1 \left[1 + \left(\frac{1}{5} \right)^2 + \left(\frac{1}{7} \right)^2 + \left(\frac{1}{11} \right)^2 + \dots \right]^2 \quad (3.11)$$

şeklinde ifade edilebilir. Burada I_1 , temel bileşenin efektif değeridir. Uygulamada harmoniklerin olabildiğince az olduğu çevirici düzenlerden yararlanılır. Yapılan incelemelerden, tek kutuplu iletim modelinde 5., 7., 17. ve 19. harmoniklerin ortaya çıktığı, buna karşılık iki kutuplu iletim modelinde bu mertebeden harmoniklerin oluşmadığı gözlenmiştir [7].

3.3 Harmoniklerin Zararları

Güç sistemlerindeki harmonikler, sistemi gün geçtikçe artan bir oranda etkilemekte, tesislerde enerji kesintilerine ve zaman kaybına neden olmaktadır. Her ne kadar filtre devreleri yaygın olarak kullanılmaya başlanmışsa da, filtreleme tesislerinin toplam maliyeti arttırması nedeniyle, maliyet optimizasyonuna ihtiyaç duyulmuştur [6].

Harmoniklerin enerji sistemlerinde varlığı, sinüsoidal formdaki akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmalar ile anlaşılır. Harmoniklerin enerji sistemlerinde yol açtığı problemler genel olarak şöyle özetlenebilir [17].

- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin sinüs formundan sapması sebebiyle tüketicilerin çalışma koşullarının bozulması.
- Enerji sistemi elemanlarında ve yüklerde harmonikler nedeniyle ek kayıpların oluşması.
- Akımın harmonik bileşenleri nedeniyle gerilim düşümünün artması.
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve dielektrik zorlanma nedeniyle hasar görmeleri.
- Senkron ve asenkron motorlarda salınımların meydana gelmesi ve bu nedenle aşırı ısınmaları.
- Koruma sistemlerinin harmonikler nedeniyle hatalı çalışmaları.

- Kontrol sistemlerinde hatalı çalışmalar.
- Endüksiyon tipi sayaçların yanlış ölçüm yapması.
- İzolasyon malzemesinin delinmesi.
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi ve aşırı gerilim veya akımların oluşması.

Enerji sistemlerinde harmonikler sebebiyle ortaya çıkan problemler arasında en etkili olanları kayıpların artması ile ölçü ve koruma sistemlerinin hatalı çalışmasıdır. Harmonik akım bileşenleri omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır [6].

Harmoniklerin koruma rölelerinin çalışmasına etkilerini incelemek üzere yapılmış çalışmalar da bulunmaktadır. Bu çalışmalarda, harmoniklerin koruma rölelerine etkisi konusunda tam bir analitik yaklaşım ortaya konulamamış, elde edilen deneysel sonuçlar üzerine yorumlar yapılarak harmoniklerin etkisinin rölenin tipine, imalatçısına ve röle girişindeki ölçü transformatörünün magnetik doyma karakteristiğine göre değişim gösterdiği ifade edilmiştir [6].

Harmonikler güç sistemlerinde; ek kayıplar, ek gerilim düşümleri, rezonans olayları, güç faktörünün değişmesi v.b. gibi teknik ve ekonomik problemlere yol açar [7]

Enerji sistemlerinde harmoniklerle gerilim ve akım dalga şekillerinin bozulması çok çeşitli problemlere yol açmaktadır. Bunlar maddeler halinde şöyle verilebilir:

- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması
- Gerilim düşümünün artması
- Kompanzasyon tesislerinin aşırı reaktif yüklenme ve dielektrik zorlanma nedeniyle zarar görmesi
- Enerji sistemindeki elemanlarda ve yüklerde kayıpların artması
- Senkron ve asenkron motorlarda moment salınımlarının ve aşırı ısınmanın meydana gelmesi

- Endüksiyon tipi sayaçlarda yanlış ölçmeler
- Uzaktan kumanda, yük kontrolü v.b. yerlerde çalışma bozuklukları
- şebekede rezonans olayları, rezonansın neden olduğu aşırı gerilimler ve akımlar
- Koruma ve kontrol düzenlerinde sinyal hataları
- İzolasyon malzemesinin delinmesi
- Elektrik aygıtlarının ömrünün azalması
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarında parazit ve anormal çalışma
- Mikro bilgi işlemciler üzerinde hatalı çalışma

Bu etkiler içinde teknik ve ekonomik yönden en olumsuz sonuçlara yol açanları, kayıplardaki artış ve sistem ölçü cihazlarındaki hata paylarının artması şeklinde özetlemek mümkündür. Bunlardan birincisi omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır. İkincisi ise ölçü ve kayıt cihazlarındaki istenmeyen hata miktarlarının oluşması, bir başka deyişle kayıt/ölçüm hatalarının artmasıdır [7].

3.3.1 Transformatörler Üzerine Etkileri

Transformatörlerde meydana gelen akım ve gerilim harmoniklerinin neden olduğu problemler şöyle sıralanabilir: Akım harmonikleri sargı bakır kayıplarında ve kaçak akı kayıplarında artışa, çekirdek kaybının artmasına ve haberleşme sistemlerinde kötü etkiye neden olur. Gerilim harmonikleri ise fuko ve histerezis akımlarından dolayı demir kayıplarında artışa ve yalıtımın zorlanmasına neden olur. Transformatör endüktansı ve transformatörlere bağlı bir tüketicinin kapasitansı arasında rezonans meydana gelebilir. Akım ve gerilim harmonikleri transformatörlerde ek ısınmalar oluşturur. Harmonik akım ve gerilimlerinin oluşturduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Manyetik çekirdekteki alternatif manyetik alanın yön değiştirmesi, yüksek frekanslarda daha hızlı olduğundan manyetik çekirdekteki histerezis kayıpları artar. Ayrıca zamanla değişen manyetik akı, iletkenleri kestikçe değişken manyetik alan çekirdek dilimlerinde eddy akımları oluşturur. Buda ek kayıplara neden olur. Yani frekans arttıkça transformatördeki eddy kayıpları artar. Bu yüzden transformatörün

ısınmada yüksek frekanslı harmonikli bileşenler, düşük frekanslı harmonikli bileşenlerden daha önemlidir. IEEE transformatörün yük akımındaki harmonikler için bir limit saptamıştır. Buna göre akım için THD limiti %5' tir. Gerilim için ise yük durumuna göre bazı limitler saptanmıştır. Yüksüz durumda %10, anma yükünde %5' tir [8].

Genel olarak, manyetik çekirdekli bir elemanda (motor, transformatör v.b) oluşacak demir(nüve) kayıpları, bu elemana uygulanacak gerilim şekli ile ilgilidir. Manyetik çekirdekli bir elemana uygulanan gerilimin yani harmonikli gerilimin N tane harmonik bileşen içermesi durumunda ani değeri,

$$v(t) = \sum_{n=1}^N v_n(t) \quad (3.12)$$

ve efektif değeri,

$$V = (\sum_{n=1}^N V_n^2)^{1/2} \quad (3.13)$$

olmak üzere elemanda oluşacak demir kayıpları,

$$P_{Fe} \cong K_m \cdot V^2 = K_m \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (3.14)$$

ile ifade edilir. Burada K_m makinenin yapısı ile ilgili bir sabittir. Bu değer aynı şekilde n.harmonik için tanımlanan “gerilim harmoniği oranı” ifadesi

$$\beta_n = V_n/V_1 \quad (n = 2, 3, \dots, N) \quad (3.15)$$

Kullanılarak

$$P_{Fe} \cong K_m \cdot V_1^2 (1 + \sum_{n=2}^N \beta_n^2) = P_{Fe1} + P_{FeH} \quad (3.16)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeden de görüldüğü gibi sinüsoidal gerilimin meydana getirdiği demir kaybına P_{Fe1} ilave kayıplar P_{FeH} gerilim harmoniklerine bağlı olarak söz konusu olmaktadır [8].

3.3.2 Döner Makineler Üzerine Etkileri

Gerek gerilim gerekse akım harmonikleri döner makineler üzerinde olumsuz etkiler yapar. Bu etkilerden birincisi, ek (harmonik) kayıplardır. Harmoniklerin varlığı diğer

elemanlarda olduğu gibi stator sargılarında, rotor devresinde, stator ve rotor saçlarında ek kayıplara yol açar. Stator ve rotor uç sargılarında harmonik akımlarının oluşturduğu kaçak alanlarda ek kayıplar meydana getirir. Örneğin 16 kW' lık bir indüksiyon motoru 60 Hz temel frekanslı sinüsoidal gerilimle beslenirken oluşan toplam kayıp 1303 W iken, kare dalga ile bir besleme yapıldığında toplam kayıpların 1600 W' a çıktığı gözlenir. Harmoniklerin yol açtığı diğerk bir olay da, harmonik momentleridir. Nonsinüsoidal gerilim uygulandığında motor veriminde ve momentinde bir düşüş olur. Harmoniklerin ortalama moment üzerindeki etkisi çoğu zaman ihmal edilebilir ancak önemli sayılabilecek moment salınımlarına yol açabilir. Sinüs biçimli olmayan bir beslemeye sahip üç fazlı bir indüksiyon motorundaki harmonik akımlarının oluşturduğu akı yoğunluğu dalgaları arasındaki etkileşim gürültüye neden olabilir. Ayrıca harmoniklerin, hava aralığında bir bileşke akı üretmesi nedeni ile indüksiyon motoru kalkış yapamayabilir veya limitlerin çok altındaki düşük hızlarda çalışabilir. Standartlar, motorlar için kesin gerilim veya akım harmonik sınırlamaları vermemesine rağmen, indüksiyon motorları için %5' lik bir gerilim harmoniği sınırlaması kabul edilebilir [7].

Harmonik gerilim ve akımların en büyük etkisi, harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıplarının artışı ile döner makinelerin ısısının artmasıdır. Harmonik bileşenler, bu yüzden döner makinelerin verimi ile momentinin düşmesine ve sinüsoidal beslemeli bir motorla karşılaştırıldığında daha gürültülü çalışmasına neden olurlar. Aynı zamanda harmoniklerin, endüksiyon motorlarındaki hava aralığında bir bileşke akı üretmesinden dolayı, motorun kalkış yapamaması ve senkronlanma sağlayamaması gibi durumlar da görülebilir. Elektrik makinelerinde rotorun aşırı ısınması, harmoniklerden kaynaklanan gerilim distorsiyonlarının neden olduğu başlıca sorunlardan biridir. Elektrik makinelerindeki kayıplar, uygulanan gerilimin frekansına bağlıdır. Harmonikler sebebi ile motor sıcaklığının artması motor ömrünü kısaltmakta, bu durumdan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir. Harmonik bileşenler, motor performansını %5 ile %10 arasında azaltmaktadır.

Çizelge 3. 5 Darbeli bir konverterin döner makine üzerindeki harmonik etkinliği

Harmonik mertebesi	Frekans(Hz)	Faz dizi bileşeni	Stator harmoniği	Harmonik dönüş yönü	Rotor harmoniği
1	50	+	1	İleri	-
5	250	-	5	Geri	6
7	350	+	7	İleri	6
11	550	-	11	Geri	12
13	650	+	13	İleri	12
17	850	-	17	Geri	18
19	950	+	19	İleri	18
23	1150	-	23	Geri	24
25	1250	+	25	İleri	24

Çizelge 3.5’de 6-darbeli bir çeviricinin oluşturduğu karakteristik harmonik mertebeleri ve döner bir makineye etkileri gösterilmiştir. Bu harmoniklerin her biri, toplam akımın pozitif ya da negatif dizi simetrik bileşenidir. Her bir harmonik gerilimi(5.,7.,11.,...), makinenin statorunda bir harmonik akım endükleyecek ve stator sargılarında ilave ısı meydana getireceklerdir. Böylece temel akım bileşeninin neden olduğu ısı seviyesine gelecek ilavelerle makinenin ısısı yükselecektir. Genellikle rotordaki harmonik akımlarının akışı daha da önemlidir. Statordaki her bir harmonik akım, makinenin rotorundan akım endükleyecek biçimde hava aralığında bir manyeto motor kuvvet (MMK) üretecektir. Her bir karakteristik harmonik, pozitif ya da negatif dizi bileşen olarak tanımlanabilirken, harmoniklerin dönüş yönüne göre ya ileri ya da geri olacaktır. 5.harmonik geri yönde (negatif dizi bileşeni) dönecektir, bundan dolayı temel hava aralığı frekansı ve 5.harmonik bileşeni arasındaki net dönme farkına karşılık gelen frekansla (5.harmonik frekansına 1 ilave edilerek yani 6.harmonik frekansıyla) rotorda bir harmonik akımı endüklenecektir. 7.harmonikileri yönde (pozitif dizi bileşeni) döndüğü için, temel hava aralığı frekansı ve 7.harmonik frekansı arasında net dönme frekansına karşılık gelen bir frekansla (7.harmonik frekansından 1 çıkarılarak yani 6.harmonik frekansıyla) rotorda bir harmonik akım endüklenecektir. Böylece rotor ısındığından, statordaki 5. ve 7. harmonikler, rotorda bir 6.harmonik akım bileşeni üretmek için birleşirler. 11. ve 13.harmonikler, rotorda 12.harmonik akımı üretmek için aynı biçimde etkili olurlar, daha yüksek mertebeden harmonikler için de aynı durum söz konusu olacaktır [8].

3.3.3 İletim Sistemleri Üzerine Etkileri

İletim sistemi (hava hattı veya yer altı kablosu) üzerindeki etkileri, iki bölüm altında incelemek mümkündür. Bunlardan birincisi akım bileşenlerinin oluşturduğu ek I^2R kayıplarıdır. Bu kayıplar;

$$P_K = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (3.17)$$

şeklinde verilebilir. Diğer taraftan harmonik akımların hat boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde oluşturduğu gerilim düşümleri de ayrı bir etkidir. n. akım harmoniğinin oluşturduğu gerilim düşümü;

$$(\Delta V)_n = I_n Z_n \quad (3.18)$$

olarak yazılabilir.

Kablolu iletim durumunda harmonik gerilimler, tepe gerilim değeri ile orantılı olarak dielektrik zorlanmayı arttırmırlar. Buda kablonun kullanım ömrünü kısaltır. Aynı zamanda hata sayısını ve bu nedenle de onarım masraflarını arttırır. Aşırı gerilimler nedeni ile yalıtkan kablolarda delinme meydana gelebilir. Harmoniklerin korona başlangıç koruma ve sönme seviyeleri üzerindeki etkileri gerilimin tepeden tepeye değerinin bir fonksiyonudur. Tepe gerilimi ise, temel ve harmonik gerilim arasındaki faz ilişkisine bağlıdır [7].

3.3.4 Kondansatör Grupları Üzerine Etkileri

Gerilim bozulmasından en çok etkilenen eleman, güç faktörü düzeltiminde kullanılan kondansatör gruplarıdır. Kondansatörlerde en önemli problem, aşırı etkin akımlardır. Diğer bir problem de tepe geriliminin oluşturduğu yalıtım zorlanmasıdır. Kapasitif reaktans frekansla ters orantılı olarak değiştiğinden, temel bileşendeki değeri X_C olan kapasitif reaktans, harmonik mertebesi n olan bir akımda;

$$X_{Cn} = \frac{X_C}{n} \quad (3.19)$$

değerini alır, yani akımın frekansı büyüdükçe kapasitif reaktans küçülür. Bu nedenle, kondansatörler harmonik frekanslarında daha büyük akımlar çekerler ve aşırı yüklenirler. n. harmonik için U_n harmonik gerilimi altında kondansatörün çektiği akım;

$$I_n = n\omega C U_n \quad (3.20)$$

değerini alır. Burada, ω temel bileşen açısal frekansıdır. Kondansatör uçlarındaki gerilimin etkin değeri;

$$U_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} U_n^2} \quad (3.21)$$

olur. Kondansatör akımının etkin değeri, aynı şekilde harmonik akımlarının karesel ortalamasına eşittir,

$$I_C = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} \quad (3.22)$$

Bu akım, harmonikli gerilimin etkin değerine eşit bir sinüs biçimli gerilim altında kondansatörün çektiği akımdan büyüktür [8]. Kompanzasyon tesislerinin tasarımında bu durumların göz önüne alınması gereklidir. Gerilim bozulması durumunda kondansatörlerde oluşacak ek kayıplar;

$$\text{Ek kayıplar} = \sum_{n=2}^n C (\tan \delta)_n \omega_n V_n^2 \quad (3.23)$$

olarak ifade edilir. Burada;

$(\tan \delta)_n$: kayıp faktörü

$$\omega_n = 2\pi f_n$$

V_n : n Geriliminin etkin genliği

Gerilim harmoniklerinden dolayı kondansatör gücü de artar. Şebeke işletmesinde sadece temel bileşene ait güç önem taşır. Buna karşılık, kondansatörün dielektrik kayıpları, yani ısıl zorlanma bakımından toplam kondansatör gücü geçerlidir. Dolayısıyla ısıl zorlanmada artar. Temel bileşeni ve harmonikleri içeren toplam reaktif güç ifadesi;

$$Q_T = \sum_{n=1}^{\infty} Q_n \quad (3.24)$$

olarak verilir. Toplam reaktif güç ifadesi, reaktif gücün anma değerini aşmamalıdır. TS 804' e göre sinüs biçimli gerilim altında anma etkin gerilimi için %110, anma etkin akımı için ise %130 olarak sınır değer konmuştur. Kondansatör karakteristikleriyle ilgili standartlar, sinüs biçimli olmayan bir dalga uygulandığında, güvenilir bir işletme

amacıyla aşılması gereken sınırlamaları içerir. IEEE standartlarına göre, kondansatör için gerilim, akım ve reaktif güç sınırlamaları şöyledir [8]:

Anma etkin gerilimi : %110

Anma etkin akımı : %180

Anma reaktif gücü : %135

Tepe gerilimi : %120

Genelde, kondansatör keskin bir rezonans koşulunda bulunmadıkça gerilim bozulması arızaya neden olacak kadar büyük değildir. Endüstriyel güç sistemlerinde daha sık karşılaşılan harmonik problemlerinin ilk belirtilerinden biri kondansatör gruplarında oluşan arızadır. Daha önce açıklandığı gibi, genelde tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucunda oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörde ısınmayı ve gerilim zorlanmalarını arttırarak ömürlerini kısaltırlar [7].

3.3.5 Direnç Üzerindeki Etkisi

Harmoniklerin frekansının artması ile deri etkisi (skin effect) sonucu iletkenin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin temel bileşen omik direnç değerine harmoniklerden dolayı R_H direnci ilave olmaktadır. Deri etkisi ile oluşan direnç değeri literatürde yaygın olarak kabul gören ampirik bir bağıntıyla hesap edilebilir.

$$x = 1,585 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{f}{R_0}} \quad (3.25)$$

olmak üzere,

$$0 \leq x \leq 3 \text{ için } R = R_0 K_1$$

$$x > 3 \text{ için } R = R_0 K_2 \quad (3.26)$$

dir. Burada,

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\sqrt{1 + \frac{x^4}{48}} + 1 \right] \quad (3.27)$$

$$K_2 = \left[\frac{x}{2.828} + 0.26 \right] \quad (3.28)$$

dir.

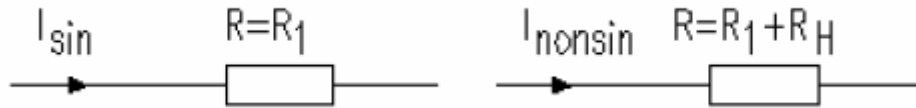
Burada,

f : frekans

R_0 : Doğru akım direnci

R : Deri etkisi dahil direnç olarak tanımlanmıştır. [7]

Bilindiği gibi harmonik bileşenlerin mertebesi arttıkça frekans değeri de aynı oranda artmaktadır. Harmoniklerin frekansının artması ile oluşan deri etkisi sonucu (skin effect), iletkenin etkin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin doğru akımdaki direncinden daha büyük olan alternatif akımdaki direnci harmoniklerle daha da artış göstermektedir. İletkenin sinüoidal akımdaki temel bileşen omik direnç değerine (R_1) nonsinüoidal akım akış halinde harmonik bileşenlerin her biri için Şekil 3.13'deki gibi (R_H)direnci ilave edilmektedir. Böylelikle, tüm bileşenlerle birlikte harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri $R=R_1+R_H$ olur. Analizlerin çoğunda harmonik bileşenlerden ilave olan direnç ihmal edilmekle birlikte, daha detaylı analizlerde bunun etkisi de dâhil edilmektedir. Deri etkisi ile oluşan direnç değeri literatürde yaygın olarak kabul gören Arnold'un verdiği ampirik bir formülle ifade edilir. Şekil 2.13'de farklı akım durumlarında direncin frekansla değişimi görülmektedir [8].



Şekil 3. 13 Omik direncin frekansla artması (a) sinüoidal akımlı durum (b) nonsinüoidal durum

3.3.6 Güç Elektroniği Elemanları Üzerine Etkileri

Güç elektroniği elemanları birçok durumda çok önemli bir harmonik kaynağı olmalarının yanı sıra, harmonik bozulmaya karşı çok duyarlıdırlar. Bu elemanların düzenli çalışmaları gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Sıfır geçiş noktası birçok elektronik kontrol devresi için kritik noktalar. Harmonik bozulmasının bu noktaları kaydırması sonucu oluşan komütasyon hataları, elemanın çalışmasını olumsuz yönde etkiler. Ayrıca, gerilimin tepe değerine göre cevap vererek çalışan

elemanlarda da sorunlar çıkabilir. Buna en güzel örnek diyottur. Eleman, dalga şeklinin etkin değerine tam olarak karşılık gelmeyen tepe değerine karşı duyarlı olduğundan, harmoniklerin varlığında düzenli çalışmayabilir. Güç elektroniği cihazlarına ait diğer arızaları şöyle sıralayabiliriz;

- a) ölçme cihazlarında hatalar
- b) röleler ve kesicilerde oluşan arızalar
- c) sıfır gerilim geçişli ateşleme devrelerinin kararsız çalışması
- d) motor kontrolleriyle ilgili parazitler [7].

Bir güç elektroniği elemanı, harmonik bileşenlerin bulunduğu bir sisteme bağlı olabilir. Bu elemanların doğru çalışması, gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Harmonik distorsiyon, gerilimin sıfır geçişlerini kaydırabilir veya bir noktadaki fazlar arası gerilim, diğer noktadaki fazlar arası gerilimden daha büyük olması sonucunu doğurabilir. Elektronik kontrol devrelerinin pek çok çeşidi için bu iki durum kritik noktalar oluştururlar ve bu kayma nedeniyle oluşan komutasyon hatalarıyla yanlış işlemlere yol açarlar. Örneğin, tristör kontrollü devrelerde harmonik distorsiyon, tristörlerin ateşleme anlarının değişmesine de neden olabilir [8].

3.3.7 Koruma Sistemleri Üzerine Etkileri

Bilindiği gibi koruyucu sistemler çoğunlukla temel gerilim ve akımlara göre tasarlanırlar. Tepe gerilimine, akım veya gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler harmonik distorsiyonundan çeşitli biçimlerde etkilenirler. Olabilecek harmoniklerin süzüldüğü veya ihmal edilebilir düzeyde olduğu kabul edilirse, elektromanyetik röle uygulamalarında (aşırı akım koruması gibi) yüksek harmoniklerin çok fazla etkinliğinin olmadığı söylenebilir. Ancak özellikle mesafe korumalarında, harmonik akımları (özellikle 3. harmonik bileşeni) büyük oranda ölçme değerlendirme hatalarına ve toprak rölelerinin hata yapmasına neden olabilmektedir. Dijital mesafe koruma sistemlerinde, akım ve gerilim harmoniklerinin mutlaka filtre edilmesi gerekmektedir. Rölelerin harmoniklerden başlıca etkileniş biçimleri şunlardır;

- Röleler daha büyük tepe değerleri ile yavaş çalışmak yerine daha küçük tepe değerleri ile hızlı çalışma eğilimi gösterirler.

- Statik rölelerin çalışma karakteristiklerinde önemli değişiklikler gözlenir.
- Aşırı akım ve gerilim rölelerinin çalışma karakteristikleri değişir.
- Harmonik bileşene bağlı olarak rölelerin çalışma momentlerinin yönü değişebilir.
- Çalışma zamanları, ölçülen büyüklükteki frekansın bir fonksiyonu olarak oldukça büyük bir farklılık gösterebilir.
- Dengeli empedans röleleri hem ayar ötesi hem ayar gerisi çalışma gösterebilirler.
- Fark röleleri yüksek hızla çalışmayabilirler.

Genelde rölelerin çalışmasını etkileyen harmonik seviyeleri, diğer elemanlar için kabul edilebilir maksimum harmonik seviyelerinden daha büyüktür. Bununla birlikte, koruyucu elemanlar (röleler) üzerinde yapılan testlerden %20'lik bir harmonik seviyesine kadar rölelerde fazla bir işletme probleminin oluşmadığı gözlenmiştir [7].

Akım ve gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan etkilenebilmektedir. Akım ve gerilim dalga formlarının bozulması, rölelerin performansını etkilemektedir. Her bir röle harmoniklerin sistemde bulunması karşısında farklı davranış biçimleri göstermektedir. Aynı tipte rölelerin farklı modelleri bile aynı distorsiyona değişik biçimde cevap verdiği gibi, bu durum aynı modellerde bile söz konusu olabilmektedir. Harmonikler, rölelerin arıza koşullarında çalışmamasına ya da sistemin normal çalışma koşullarında gereksiz yere açma kumandası vermesine neden olabilir. Bununla birlikte, röleler üzerinde yapılan incelemelerde, harmonik distorsiyonun %10-20 seviyelerine kadar bir işletme problemi oluşturmadığını gözleyen çalışmalar vardır. Fakat farklı bir çalışmada, indüksiyon diski aşırı akım rölesinin frekansı 3. harmonikten 9. harmoniğe kadar artırıldığında çalışma değeri artış göstermiştir. Harmoniklerin koruma rölelerine etkisi konusunda tam bir analitik yaklaşım ortaya konulamamış, elde edilen deneysel sonuçlar üzerine yorumlar yapılarak harmoniklerin etkisinin; rölenin tipine, imalatçısına ve röle girişindeki ölçü transformatörünün manyetik doyma karakteristiğine göre değişim gösterdiği ifade edilmiştir.

Termik aşırı akım rölesi için yapılan bir deneyde sinüsoidal ve nonsinüsoidal besleme hali araştırılmıştır. Termik röle sinüsoidal ve nonsinüsoidal besleme durumunda aynı zamanda açmıştır. Termik rölenin çalışması, içindeki bimetal elamanın ısınmasına bağlı olduğundan, sinüsoidal durumundaki besleme akımı ile, aynı efektif değere sahip nonsinüsoidal besleme akımının etkisi aynı olmuştur. Akımın efektif değerinin harmoniklerle artış göstermesi durumunda açma zamanının daha da kılalacağı açıktır[8].

Akımda meydana gelen harmonik distorsiyon, devre kesicilerin akım kesme yeteneklerini etkilemektedir. Devre kesicilerin çalışmasındaki aksaklık, elektromanyetik endüksiyon bobininin, harmoniklerin bulunduğı durumlarda doğru çalışmamasından kaynaklanmaktadır. Bilindiğı gibi, açma esnasında oluşan ark, bobin tarafından oluşturulan manyetik alan ile ark hücrelerine sürölmektedir. Bobinin çalışmasındaki anormallikler arkın yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına yol açmaktadır. Harmonik akımları ayrıca ilave ısınmalara neden olduklarından, sigortaların çalışma karakteristiklerinin değışmesi ile akımı zamansız kesmeler sözkonusu olur. Harmonik akımlar, anahtarlama elamanlarında ısınmayı ve kayıpları artırır. Böylece, sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır ve bazı izolasyon malzemelerinin ömrü kısalır. Ayrıca, harmonik bileşenler, anahtarlama elemanlarının akım sıfır geçişinden temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değışim hızına yol açabilmekte ve bu da sonuçta akım kesme işlevini zorlaştırebilmektedir [8].

3.3.8 Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkileri

Ölçü aletleri, başlangıçta tam sinüsoidal işaretlere göre kalibre edilirler. Gerilimin karesi ile orantılı döndürme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda, gerilim harmoniklerinin oluşması bazı kayıt hatalarına yol açacaktır. Şebeke frekansından başka frekanslardaki enerjileri okumak için tasarlanmayan konvansiyonel sayaçların harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görölmüştür. Ancak gelişmiş elektronik sayaçlar bozulmuş dalga şekillerini hassasiyetle okuyabilmektedirler. Elektrik sayaçları ve aşırı akım röleleri gibi indüksiyon disk aygıtları etkin olarak temel bileşene göre çalışırlar. Diskte oluşan moment, akının ve diskte indüklenen girdap akımlarının çarpımı ile orantılıdır. Her ikisi de yüksek

frekanslarda orantısız olarak azalır. Bu da elektrik sayacının temel frekanstan daha yüksek frekanslarda hatalı ölçme yapmasına neden olur. Harmonik distorsiyonunun oluşturduğu faz dengesizlikleri de bu elemanların hatalı çalışmalarına neden olur. Genelde önemli hataların oluşması için distorsiyon seviyesinin %20' den büyük olması gerekir[7].

Etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş olan voltmetre ve amperetreler harmoniklerin var olması durumunda hatalı sonuçlar vermektedir. Örneğin, 45°'lik bir ateşleme açısıyla kıyılmış bir sinüs işaretinin etkin değerini bu tip aletler %13 oranında düşük ölçmektedir. Eğer söz konusu alet amperetre ise, aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilmemesi gibi bir takım sakıncalı durumların ortaya çıkması söz konusu olabilir. Akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler, mükemmel bir performans göstermektedir. Yapılan testler sonucunda bu aletlerin sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hatalarının %0,1'den daha az olduğu tespit edilmiştir [8].

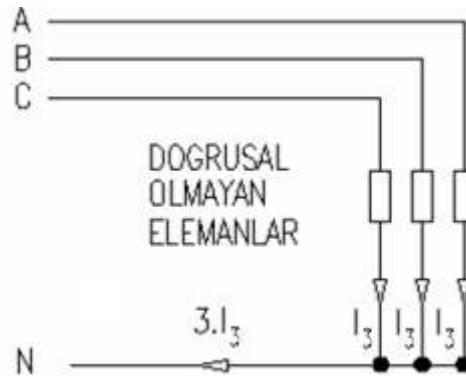
3.3.9 Harmoniklerin Yol Açtığı Rezonans Olayları

Harmoniklerin şebeke ve sistem üzerinde yaptığı en büyük etkilerden birisi rezonans olaylarına sebebiyet vermesidir. Rezonans; şebekeden çekilen akımın endüktif ve kapasitif etkiden kurtulup tamamen omik yük etkisi altında kalmasıdır. Bir başka deyişle sistemdeki kapasitif ve endüktif yüklerin uyum sağlayarak (reaktans değerlerinin eşitlenmesi) devrede tamamen omik yükün etkili olmasıdır. Bu da hat empedansının yani omik direncinin küçük olmasından dolayı yüksek akım değerinin geçmesi demektir. Hattaki kapasitif yükün yaklaşık tamamını reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılan kondansatörler oluşturur. Tesise uygulanan gerilimin sinüsoidal olması durumunda yani gerilimin 50 Hz temel frekansa sahip olması durumunda, bir rezonans söz konusu olmamaktadır. Çünkü kompanzasyon için gerekli kapasitif yük hesabı bu temel frekans durumuna göre yapılır ve rezonansın meydana gelmemesine dikkat edilir. Harmonikli bir gerilimin tesise uygulanması halinde ise rezonans oluşturacak harmonik frekansları oluşabilir. Yüksek harmonik frekans değerlerinde rezonansın meydana gelmesi tehlikeli sonuçlar doğurabilmektedir. Frekansla kapasitif reaktans değerinin ters orantılı olarak değişmesi

sebebiyle, yüksek harmonik değerlerinde şebekeden yüksek kapasitif akımlar çekilir, bu da şebekenin zorlanmasına ve arızalanmasına yol açar [7].

3.3.10 Harmoniklerin İletkenler Üzerindeki Etkisi

Harmonik akımlar iletkenlerde kayıpların artmasına dolayısıyla da ısınmanın artmasına neden olurlar. Harmonik akımlar iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma meydana getirirler. Birincisi literatürde “skin effect” olarak bilinen deri etkisidir. Harmonik frekansının artmasına bağlı olarak akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşması sonucu etkin direncin artması ile meydana gelen ek artıştır. İkinci etki ise tek fazlı yükleri besleyen 3-fazlı 4 telli sistemlerin nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesi ile karşımıza çıkar. Bazı doğrusal olmayan elemanlar büyük değerde 3 ve 3'ün katları harmonik bileşenleri üretirler. Temel frekanstaki dengeli 3-fazlı akımların toplamı sıfır olduğundan nötr iletkeninden akım geçmemesine neden olurlar. Ancak 3 fazlı sistemlerde 3.mertebeden harmonikler nötr iletkeninde birbirini zayıflatmaz, tam tersine güçlendirirler. Harmonik mertebesi n için fazlar arasında $n.120$ lik faz farkı olduğundan 3 ve 3'ün katı harmoniklerin her biri 360 derecelik faz farkına yani birbirine eklenmesine neden olur.



Şekil 3. 14 Nötr hattının 3. harmonik bileşenlerle yüklenmesi

Şekil 3.14’de sadece 3.harmonik bileşenlerin nötrde toplanması ile bu hattın aşırı yüklemesi gösterilmiştir. Bu nedenle nötr akımının değeri faz akımının değerinin 1.7 katına kadar çıkabilir. Nötr iletkenleri faz iletkenleri ile aynı kesitte olsa bile bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu sorun en çok, 3 fazlı dağıtım sisteminin tek

fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Söz konusu soruna karşı en yaygın önlem, nötr iletkeninin faz iletkeninin iki katı büyüklüğünde kesitlerde yapmaktır [8]

HARMONİK STANDARLARI VE YÖNETMELİKLERİ

Harmoniklerin genlik olarak belirli değerlerin üzerinde olması, güç sisteminde kirlenmeye sebep olabilir. Harmonik akımlarının güç sistemi empedansı üzerinden gerilim dalga şeklinde bozulmaya sebep olduğu daha önceki bölümlerde vurgulanmıştı. Bu söz konusu gerilim harmonikleri yakın çevredeki diğer yükler ile etkileşime geçebilir. Daha önceki bölümlerde bahsi geçen istenmeyen durumlar ortaya çıkabilir. Sistem içindeki negatif etkileri dışında öngörülemez bir biçimde diğer sistemleri de etkileyebilirler. Bu sebeplerden ötürü bir çok kuruluş, bir yükün şebekeye enjekte edebileceği harmonik akım büyüklüğünü standart limitler içine alma yoluna yönelmiştir. Amerikan ordusu da bu problemi fark eden ilk kuruluşlardan biri olmuş, çok sıkı bir şekilde THD değerini %3 değerinde tutmayı öngörmüşlerdir [8].

Harmonik distorsiyonu olarak anılan ve enerji sistemindeki harmonik bileşenler sonucu meydana gelen harmonik kirliliği, özellikle güç elektroniği elemanlarının yaygın kullanımı ile giderek artış göstermektedir. Bu distorsiyon sonucu oluşan olumsuzlukların giderilmesi bakımından harmonik sınırlamanın yapılması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle elektrik enerjisindeki harmonik kirliliği bazı ülkelere sınırlandırılmış ve güç kalitesinin artması hedeflenmiştir. Son yıllarda ülkemizde yarı-iletken kontrol elemanlarının hızla yaygınlaşması, ark fırınlarının kullanıldığı demir-çelik tesislerindeki kapasite artırımları vb. dikkate alındığında, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi, gerek akımlar ve gerekse gerilimler için THD, TTD ve HD değerlerine ilişkin izin verilen maksimum değerleri standartlaştırmak önemli yararlar sağlar. Harmonik bileşenlerin sınırlandırılması, sistemde harmoniklerin oluşturdukları ek kayıpların azaltılması,

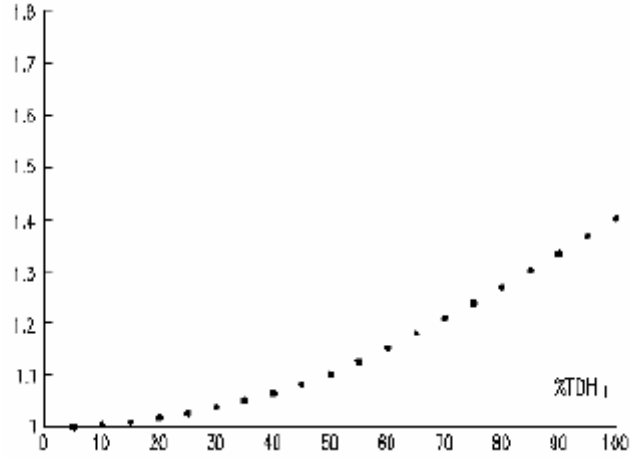
sistemdeki elemanların tam kapasite ile kullanılması ve meydana getirdikleri zorlanma ve arızaların giderilmesi bakımından son derece gereklidir [8].

Standartlarda harmonik bozulmanın değeri için en çok kullanılan tanımlar: Toplam harmonik distorsiyonu (THD), tekil harmonik distorsiyonu (HD) ve toplam talep distorsiyonu (TTD)'dur. Bölüm 3 de de ifade edildiği gibi THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu büyüklük, harmonikleri içeren periyodik dalga formunun mükemmel bir sinüs dalga formundan sapmasını tespit etmek için kullanılır. Temel frekansta saf sinüs dalga formu için THD sıfırdır. Benzer şekilde, tekil harmonik distorsiyonu da bölüm 3 de tanımlanmıştır. Harmonik bozulma ile ilgili diğer bir kavram, çekilen yük akımları için tanımlanan ve "IEEE Standard 519" uygulamasında özellikle belirtilen "toplam talep distorsiyonu" kavramıdır. Elektrik devrelerinin temel büyüklükleri olan gerilim ve akım, harmonikler içerdiğinde efektif değerleri harmonik distorsiyona bağlı olarak şu şekilde ifade edilir:

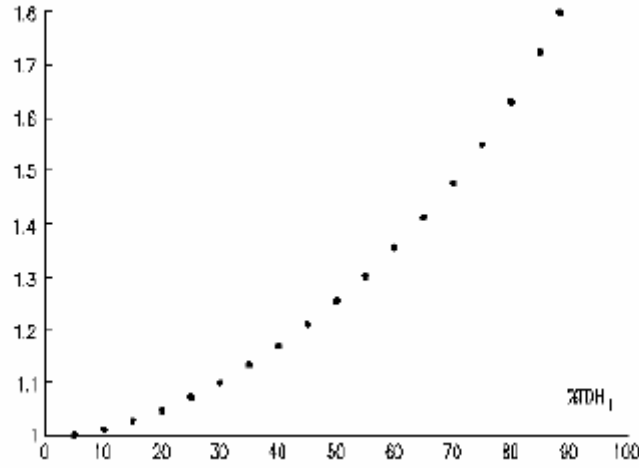
$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad (4.1)$$

$$I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (4.2)$$

Buradaki V_1 ve I_1 , gerilimin ve akımın efektif değeri olarak temel bileşenidir. Görüldüğü gibi gerilim ve akım değerleri harmonik bileşenlerin artması ile artış göstermektedir. Akımın artışı ile sistemdeki kayıp güç değeri de artış gösterecektir. Şekil 4.1'de akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi, Şekil 4.2'de ise kayıp gücün (Pk) toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi görülmektedir.



Şekil 4. 1 Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (i=sbt)



Şekil 4. 2 Sistemin kayıp gücünün toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (I.R=sbt)

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin bu harmonik etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekir. Bu amaçla, nonlinear yüklerin toplam harmonik distorsiyonu ve harmoniklerin temel bileşene oranı, her ülke tarafından sınırlandırılmaktadır.

4.1 Türkiye’de ve Dünyada Kullanılan Harmonik Standartları

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerin miktarını sınırlamak maksadıyla iki ayrı yöntem vardır. Bunlardan birincisi, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnic Commission, IEC) tarafından da tercih edilen herhangi bir doğrusal olmayan yükün bağlandığı noktada uygulanan yöntemdir. İkinci yöntem ise

IEEE (International Electrical and Electronics Engineers) tarafından benimsenen birden fazla doğrusal olmayan yükün beslediği bir veya daha fazla merkezi noktada uygulanan bir yöntemdir.

IEC tarafından ön görülen sınırlamanın mantığında, tek tek her bir yükten kaynaklanan harmoniklerin sınırlandırılması söz konusudur. Böylece harmoniklerin toplamsal etkisinin de sınırlandırılacağı kabulüne dayanır. Bu mantık düşünsel bazda etkin olmakla birlikte uygulamada harmonik sınırlama için yapılan kabuller nedeniyle gerçekte oldukça farklı olmaktadır. IEEE tarafından ön görülen değerler, hem akım ve hem de gerilim harmoniklerine sınırlar getirmeleri bakımından daha etkin ve sınırlayıcı olarak görünmektedir [8].

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerin olumsuz etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli seviyenin altında tutulması gerekmektedir. Bu amaçla bazı ülkeler, nonlinear yüklerin meydana getirdiği harmonik bileşenleri bir yaptırım olarak sınırlandırmışlar ve harmonik standartları oluşturmuşlardır [20]. Harmonik standartları, harmonikler için sınırlama getirmektedir. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519-1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000-3-2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için nonlinear yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırları vurgulamaktadırlar [7].

IEEE ve VDE-0839 da endüstriyel kullanıcılarla birlikte elektrik üretim ve dağıtımı ile harmonik standartlar içermektedir. Bu standartlarda, şebeke gücünün bir fonksiyonu olarak akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin, temel bileşenlere oranı verilmiştir [8]. Çeşitli ülkeler tarafından farklı gerilimler için harmoniklerin sınırlanmış değerleri toplam harmonik distorsiyonu olarak Çizelge 4.1 'de verilmiştir [20].

Çizelge 4. 1 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

Ülke	Gerilim(kV)	THDv(%)
A.B.D.	Genel	5
	2.4-69	1.5
	115<	8
	Özel	1.5
Almanya	2.4-69	10
	115<	10
Avustralya	Tüm Gerilimler (15. Harmoniğe kadar)	5
	Dağıtım	3
	33>	1.5
	İletim	1.5
Finlandiya	22,33,66	5
	110<	4
	1	3
	3 – 20	1.5
Fransa	30 – 45	1.6
	110	1.6
	Tüm Gerilimler (15. Harmoniğe kadar)	1.6
	0.415	5
İngiltere	6.6 – 11	4
	33 – 66	3
	132	1.5
	0.43 / 0.25	4
İsveç	3.3 – 24	3
	84>	1
	84>	1

Ülkemiz açısından harmonik standartlar değerlerine bakıldığında, bu konuda sadece küçük ev aletleri için geliştirilmiş TS 9882 nolu “ Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar” adlı harmonik standardı vardır. TS 9882 standardının kapsamına giren elektrikselsel donanımlar, pişirme ve ısıtma cihazları, motorla çalıştırılan veya manyetik olarak tahrik edilen cihazlar, taşınabilir aletler, ışık kırıcılar ile radyo ve televizyon alıcılarıdır. TS 9882 standardı, ev ve benzeri yerlerdeki bu elektrik donanımının besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalara karşı öngörülen şartların belirlenmesi ile bu şartların pratik olarak uygulanma kurallarına ve bozulmalarla ilgili tip deneylerin uygulanma metotlarıyla ilgilidir (Kocatepe [20]).Yine ülkemizde, Enerji Piyasası Düzenleme Kurulu (EPDK) tarafından hazırlanmış “Elektrik Piyasaları Şebeke Yönetmeliği” içerisinde OG ve YG için kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri tanımlanmıştır (Çizelge 4.2 – Çizelge 4.3).

Çizelge 4. 2 380 KV iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No.	Harmonik Gerilim (%)
5	1.25	3	1.0	2	0.75
7	1.0	9	0.4	4	0.6
11	0.7	15	0.2	6	0.4
13	0.7	21	0.2	8	0.4
17	0.4	>21	0.2	10	0.4
19	0.4			12	0.2
23	0.4			>12	0.2
25	0.4				
>25	0.2+0.2(25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi %2					

Çizelge 4. 3 20- 154 KV arası iletim sisteminde kabul edilebilir harmonik gerilim seviyeleri

Tek Harmonikler (3'ün katı olmayan)		Tek Harmonikler (3'ün katı olan)		Çift Harmonikler	
Harmonik No. "h"	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. "h"	Harmonik Gerilim (%)	Harmonik No. "h"	Harmonik Gerilim (%)
5	1.5	3	1.5	2	1.0
7	1.5	9	0.75	4	0.8
11	1.0	15	0.3	6	0.5
13	1.0	21	0.2	8	0.4
17	0.75	>21	0.2	10	0.4
19	0.75			12	0.2
23	0.5			>12	0.2
25	0.5				
>25	0.2+0.3(25/h)				
Toplam harmonik bozulma seviyesi %3					

Akım harmonik limitleri, yine EPDK tarafından yayımlanan “ Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenliği ve Kalitesi” yönetmeliğinde tanımlanmıştır (Çizelge 4.4).

Çizelge 4. 4 Kabul edilebilir akım harmonik limitleri [6]

Harmonik Sırası		OG 1<Un<34,5					YG 34.5<Un<154					ÇYG Un>154				
Grup	No	k/I					k/I					k/I				
		<20	20-50	50-100	100-1000	> 1000	<20	20-50	50-100	100-1000	> 1000	<20	20-50	50-100	100-1000	> 1000
T E K H A R M O N İ K L E R	3	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	5	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	7	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	9	4	7	10	12	15	2	3,5	5	6	7,5	1	1,8	2,5	3	3,8
	11	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	13	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	15	2	3,5	4,5	5,5	7	1	1,8	2,3	2,8	3,5	0,5	0,9	1,2	1,4	1,8
	17	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	19	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	21	1,5	2,5	4	5	6	0,8	1,25	2	2,5	3	0,4	0,6	1	1,25	1,3
	23	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	25	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	27	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	29	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	31	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	33	0,6	1	1,5	2	2,5	0,3	0,5	0,75	1	1,25	0,15	0,25	0,4	0,5	0,6
	h>33	0,3	0,5	0,7	1	1,4	0,15	0,25	0,35	0,5	0,7	0,75	0,12	0,17	0,25	0,35
Çift harmonikler izleyen tek harmoniğin 0.25 katı ile sınırlıdır.																
Toplam Akım Distorsiyonu		5	8	12	15	20	2,5	4	6	7,5	10	1,3	2	3	3,75	5
Bu değerler 3 saniyelik ortalamalardır.																

k : Ortak kuplaj noktasındaki maksimum sistem kısa devre akımı

I : Ortak kuplaj noktasındaki maksimum yük akımının en büyük bileşeni

IEC-555, elektronik ev aletleri donanımı ile ilgili harmonik standartları içerir. Bu standartta, cihazların sınıflandırılmasına göre akım harmoniklerinin kabul edilebilir seviyesi verilmiştir.

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) harmonik sınırlamasını çeşitli yükler için sınırlamış ve bunlara ait tablolarda sınır değerleri vermiştir. IEC 61000-2-2 konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir. Bunlar Çizelge 4.5’de verilmiştir. Yine IEC tarafından endüstri için 2.sınıf olarak verilen IEC 61000-2-4 deki sınır değerler Çizelge 4.6’de görülmektedir.

Çizelge 4. 5 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC-61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri

Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V_n	n	% V_n	n	% V_n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥ 21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥ 12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥ 29	k				

$$(k=0,2+12,5/n)$$

Çizelge 4. 6 Endüstriyel santraller için IEC-61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf elemanlar)

Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V_n	n	% V_n	n	% V_n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6	0,5	15	0,3
13	3	8	0,5	≥ 21	0,2
17	2	10	0,5		
19	1,5	≥ 12	0,2		
23	1,5				
25	1,5				
≥ 29	k				

$$(k=0,2+12,5/n)$$

IEC 61000-2-4, 3.sınıf olarak endüstriyel tesislere ait iç alan bağlantı noktasındaki harmonik gerilim yüzdelerinin sınır değerleri Çizelge 4.7'de gösterildiği gibidir.

Çizelge 4. 7 Endüstriyel santraller için IEC-61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3. sınıf elemanlar)

Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V_n	n	% V_n	n	% V_n
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1,5	9	2,5
11	5	≥ 6	1	15	2
13	4,5			21	1,75
17	4			≥ 27	1
19	4				
23	3,5				
25	3,5				
≥ 29	m				

$$(m=5\sqrt{11}/n)$$

Avrupa standartları EN 50160’da alçak gerilim ve orta gerilime ait gerilim harmoniklerinin sınır değerleri verilmiştir, bu değerler alçak gerilim şebekesi için Çizelge 4.6a’da, orta gerilim şebekesi için Çizelge 4.6b’de görülmektedir. IEC tarafından cihaz giriş akımı faz başına 16A ve altında olan alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanan özel bir dalga şekline sahip donanımlar için belirtilen D sınıfı cihazlar için kabul edilebilen en büyük harmonik akım değerleri IEC 61000-3-2’de verilmiştir. Bu değerler 220V un altındaki gerilimli sistemler için henüz uygulanmamaktadır. Ayrıca IEC/TS 61000-3-4 ‘deki teknik rapor, 16A’ın üstündeki akım değerlerine sahip alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanacak şu donanımlarla ilgilidir [6].

- Nominal gerilimi 240V’a kadar, tek fazlı,iki veya üç telli
- Nominal gerilimi 600V’a kadar, üç fazlı,üç veya dört telli
- Nominal frekansı 50Hz veya 60Hz olan sistemler

Çizelge 4. 8 Konutlarla ilgili orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri

(a) Alçak Gerilim Şebekesi ($\leq 1\text{kV}$)					
Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3’ün katı Harmonikler	
n	$\%V_n$	n	$\%V_n$	n	$\%V_n$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6...24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

(b) Ortam Gerilim Şebekesi ($1\text{kV} < V < 35\text{kV}$)					
Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3’ün katı Harmonikler	
n	$\%V_n$	n	$\%V_n$	n	$\%V_n$
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1,5
11	3,5	6...24	0,5	15	0,5
13	3			21	0,5
17	2				
19	1,5				
23	1,5				
25	1,5				

Çizelge 4. 9 D sınıfı donanım için IEC 61000-3-2' e gore izin verilen maksimum harmonik akımları

n	3	5	7	9	11	13	15.....39
$Max I_n$	2,3	1,14	0,77	0,4	0,33	0,21	0.15....0.15/n
Faz başına donanım giriş akımı $\leq 16A$							

IEC-1000-2-2 ise alçak gerilim şebekeleri ile ilgilidir. Gerilimde bulunan harmonik bileşenlerinin temel bileşene oranları için sınır değerler oluşturulmuştur. IEEE'nin harmonik sınır standartları Çizelge 4.10 ve 4.11'de verilmiştir. Bu tablolarda; I_K , sistemin kısa devre akımını, I_L , yüke ait maksimum talep akımını (ortalama 15 veya 30 dakikalık), TTD ise toplam talep distorsiyonunun değerini göstermektedir. (TTD değeri,temel bileşen akımının yerine I_L akımının kullanılmış olması hali dışında THD değeri ile aynıdır).

Çizelge 4. 10 IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları

Bara Gerilimi (V_n)	Tekil Harmonik Büyüklüğü (%)	THDv (Toplam Harmonik Distorsiyonu) (%)
$V_n \leq 69kV$	3,0	5,0
$69 \leq V_n \leq 161kV$	1,5	2,5
$V_n > 161kV$	1,0	1,5

Transformatör akımındaki harmonikler IEEE C 57.1200-1987 tarafından %5 olarak sınırlandırılmıştır [7].

Çizelge 4. 11 IEEE'nin dağıtım sistemlerine ait akım harmonik distorsiyon sınırları

$V_n \leq 69kV$						
I_K''/I_L	$n < 11$	$11 \leq n < 17$	$17n < 23$	$23 \leq n < 35$	$n \geq 35$	TTD(%)
<20	4,0	2,0	1,5	0,6	0,3	5,0
20-50	7,0	3,5	2,5	1,0	0,5	8,0
50-100	10,0	4,5	4,0	1,5	0,7	12,0
100-1000	12,0	5,5	5,0	2,0	1,0	15,0
>1000	15,0	7,0	6,0	2,5	1,4	20,0
$69 \leq V_n \leq 161kV$						
<20	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
20-50	3,5	1,75	1,25	0,5	0,25	4,0
50-100	5,0	2,25	2,0	0,75	0,35	6,0
100-1000	6,0	2,75	2,5	1,0	0,5	7,5
>1000	7,5	3,5	3,0	1,25	0,7	10,0
$V_n > 161kV$						
< 50	2,0	1,0	0,75	0,3	0,15	2,5
≥ 50	3,0	1,5	1,15	0,5	0,22	4,0

Toplam Harmonik Distorsiyon (THD)

THD, harmonik içeren periyodik dalga şeklinin tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel dalgadan oluşan bir sistem için THD sıfırdır. THD, harmonik bileşenlerinin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değere oranıdır. Eşitlik (4.3) ve (4.4)'de akım ve gerilim için THD gösterilmektedir,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (4.3)$$

ve

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (4.4)$$

THD'nin gerilim için diğer eşitlikleri aşağıdaki gibi gösterilebilir:

$$THD = \frac{[V^2 - V_1^2]^{1/2}}{V_1} \quad (4.5)$$

veya

$$THD = \left[\left(\frac{V}{V_1} \right)^2 - 1 \right]^{1/2} \quad (4.6)$$

Toplam Talep Distorsiyonu (TTD)

Yüke ait bir değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (4.7)$$

I_L : yük tarafında, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. Hesap yapılacak tarihten bir yıl öncesine kadar süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır.

Dünyadaki başlıca harmonik standartları, ülkelere göre şöyle uygulanmaktadır [7]:

- **Fransa** : Bu ülkede, ilgili kuruluş EDF' nin kayıtlarına göre, bağlantı noktasındaki tek harmoniklerin %1.0 çift harmoniklerin ise %0.6 değerini aşmaması öngörülmüştür. Bu oranlar temel bileşen cinsinden verilmektedir.

- **Almanya** : Bu ülkede, DIN 57160 normuna göre, toplam harmonik gerilimi temel bileşenin %10' unu aşmamalıdır. Ayrıca, 15. harmoniğe kadar izin verilen gerilim harmoniği %5 iken 100. harmoniğe kadar ise %1' lik gerilim harmoniğine izin verilebilmektedir.
- **İsveç** : Bu ülkedeki ilgili kuruluş SEF' in toplam harmonik distorsiyonu (THD) ile ilgili sayısal verileri Çizelge 4.12.' de verilmiştir.

Çizelge 4. 12 İsveç SEF kuruluşunca izin verilen THD

İşletme Gerilimi	THD (%)
400 / 250 V	4.0
2.2 kV,....., 24 kV	3.0
84 ≥ kV	1.0

- **Amerika Birleşik Devletleri** : Bu ülkede IEEE' nin THD ile ilgili sınırlamaları genel enerji sistemleri için Çizelge 4.13.' de verilmiştir.

Çizelge 4. 13 IEEE'nin ABD için belirlediği THD sınırları

İşletme Gerilimi	THD(%)
2.2 kV,....., 69 kV	5.0
115kV ve üzeri	3.0

- **Avustralya**: Avustralya standardı AS 2279, gerilim kademesini dikkate alarak değerlendirme yapmıştır. Örneğin, tek ve çift harmonik sınırlamaları şu şekilde belirtilmiştir:

Çizelge 4. 14 AS 2279 standardına göre Avustralya harmonik sınırları

İşletme Gerilimi	THD (%)	Tek(%) Harmonikler	Çift(%) Harmonikler
33 kV' a kadar	5	4	2
22-33-66 kV	3	2	1
110kV ve üzeri	1.5	1.5	0.5

- **Yeni Zelanda**: Bu ülkenin 1981 yılında yayımlanan ilgili yönetmeliği, akım ve gerilim harmoniklerinin sınırlarını 66 kV ve üzerindeki gerilim kademeleri için vermektedir. Harmonik mertebesine göre gerilim harmoniklerinin sınırları Çizelge 4.15. 'de verilmiştir.

Çizelge 4. 15 Yeni Zelanda için harmonik sınırları

Harmonik Mertebesi (n)	U_n /Nominal Faz Gerilimi
3	2.3
5	1.4
7	1.0
9	0.8
11	0.7
13	0.6
15	0.5
17-21	0.4
23-49	0.3
2	1.2
4	0.6
6	0.6
8 ve 10	0.3
12-50	0.2

- **Finlandiya:** Benzer yaklaşımla hareket eden Finlandiya yönetmeliğinin sınır değerleri de aşağıda Çizelge 4.16. da verilmiştir.

Çizelge 4. 16 Finlandiya yönetmeliğine göre harmonik sınırları

İşletme Gerilimi	Gerilim için THD (%)	Akım için THD (%)
1 kV	5	-
3kV,.....,20kV	4	10
30kv,.....,44kV	3	7
110kv ve üzeri	1.5	5

- **İngiltere:** İngiltere’ de ilgili yönetmelik G5/3’ e göre THD sınır değerleri Çizelge 4.17.’ da verilmiştir.

Çizelge 4. 17 İngiltere yönetmeliğine göre harmonik sınırları

Kaynak Gerilimi (kV)	Toplam Harmonik Distorsiyonu (%)	Harmonik Distorsiyonu (%)	
		Tek	Çift
0.415 kV	5	4	2
6.6 ve 11 kV	4	3	1.75
33 kV	3	2	1
132 kV	1.5	1	0.5

Fikir vermesi ve diğer standartlarla kıyaslama açısından Norveç Teknoloji Standartları(NTS) Federasyonu tarafından yayınlanan NORSOK standartları ile ilgili gerilim bazlı değerler Çizelge 4.18 da, akım bazlı değerler ise Çizelge 4.19’de verilmiştir [7].

Çizelge 4. 18 NORSOK E-001/2 harmonik distorsiyon limitleri

	$\%V_n$	%THD,	IEC 61000-2-4
YG(>1kV) baralar	6	8	2. Sınıf
AG(<1kV) baralar	8	10	3. Sınıf

Çizelge 4. 19 Müsaade edilen çevirici yükler

I_K'' / I_L	$S_{\text{çevirici}}/S_L$ (%)	
	6 darbeleri	12 darbeleri
<20	17	36
20-50	27	57
50-100	40	86
100-1000	50	100
>1000	67	100

I_K'' ; ortak bağlantı noktası barası kısa devre akımını

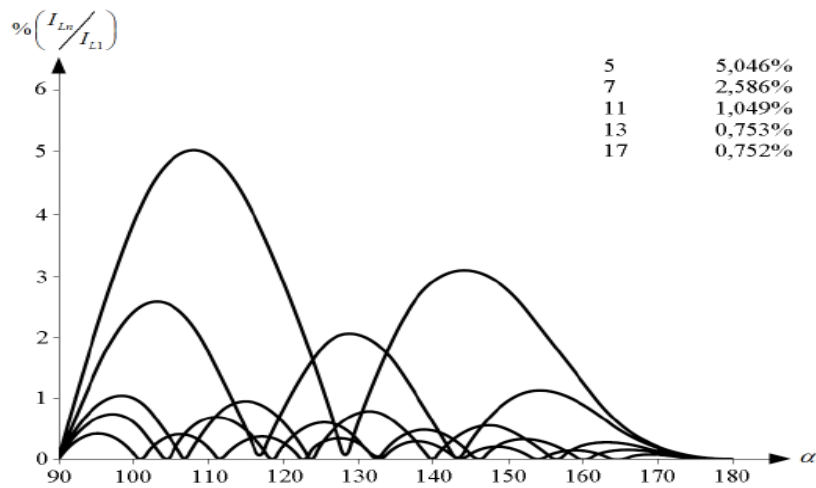
I_L ; ortak bağlantı noktası barasındaki yük akımını

$S_{\text{çevirici}}$; çevirici görünür gücünü

S_L ; ortak bağlantı noktası barasındaki görünür gücü ifade etmektedir [8].

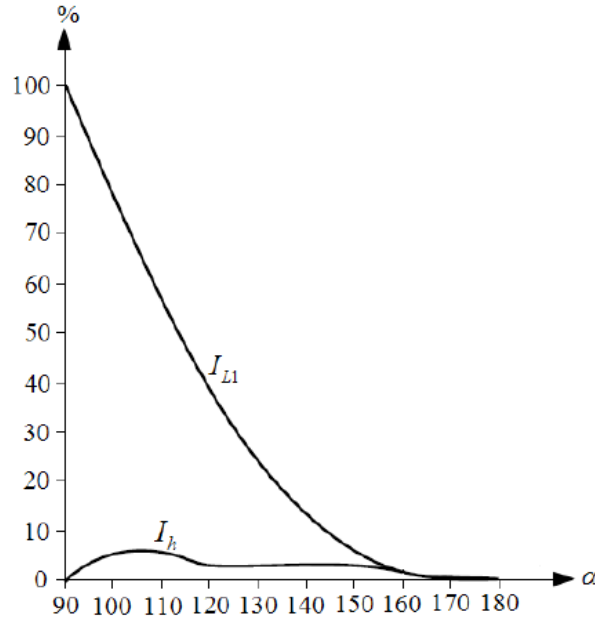
SVC NİN HARMONİK ETKİSİNİN İNCELENMESİ

Genellikle SVC bir tristör kontrollü reaktör (TCR) ve bir sabit kapasitörden (FC) oluşur. Ancak TCR harmoniğe neden olur. Bir diğer sorun ise harmonik artıştır. TCR harmonik akım üretir ve FC de bu harmonik akımları yükseltir. Endüktansa genellikle paralel olarak bağlanan FC ler TCR nin karakteristik harmonik frekansında ayarlı pasif filtre gibi davranırlar. Ancak pasif filtreler sadece karakteristik harmonikleri bastırır ve bu filtrelerin rezonansa neden olma ihtimalleri bulunmaktadır [12].



Şekil 5. 1 Tristör kontrollü reaktörde akım harmonikleri

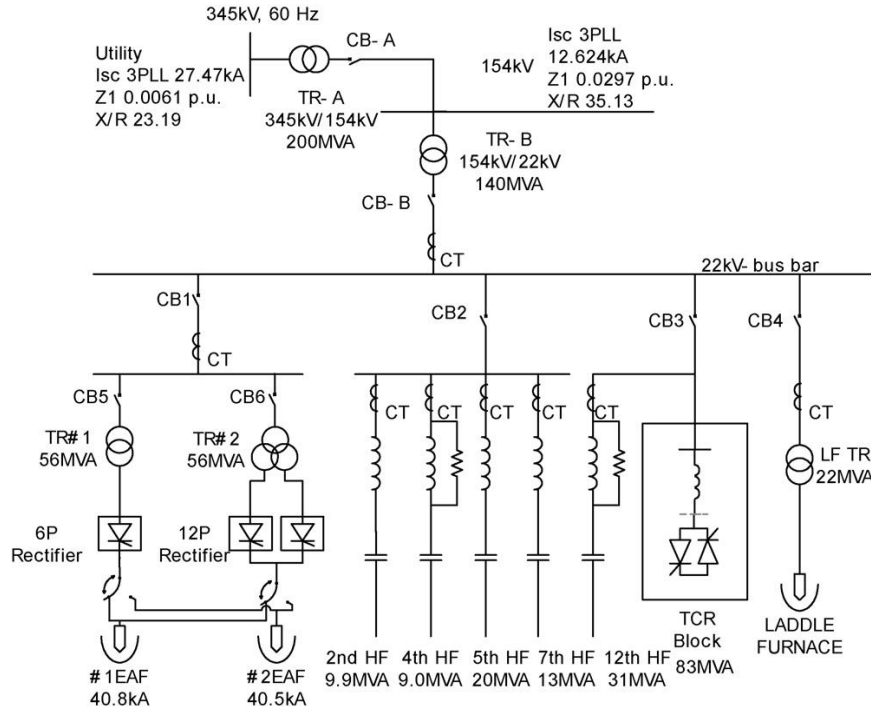
Farklı harmoniklerin genliğinin değişimi Şekil 5.1 de, toplam harmonik akım değişimi Şekil 5.2’de gösterilmektedir. Tüm harmoniklerin aynı tetikleme açısında tepe değere ulaşmadığı görülmektedir.



Şekil 5. 2 Tristör kontrollü reaktörde I_{L1} ve I_h akımları

Gwangyang Kore'deki geniş ölçekli çelik fabrikası, kullandıkları elektrikli ark fırınlarının enterkonnekte güç sisteminde oluşturdukları güç kalitesi problemini gidermek amacıyla SVC sistemlerini kullanmaktadır. SVC sisteminin temel görevi reaktif gücü kompanze etmek, harmonik akımını azaltmak ve fliker etkisini azaltmaktır. Elektrik ark fırınlarında SVC, TCR ile sistemin başlıca güç faktörünü kontrol eder. Bir reaktör ve bir anti paralel tristör anahtardan oluşan TCR bir süreksiz akım modunda çalışır. Bu nedenle elektrikli ark fırınları ve TCR'ler başlıca harmonik akım kaynağıdır. Enterkonnekte elektrik güç sistemine harmonik akım akışını bastırmak için SVC birkaç tek ayarlı harmonik filtre ihtiva eder [10].

1982 den bu yana çalışan Gwangyang Çelik fabrikası, çelik endüstrisi alanında Kore'deki en önemli işletmelerden biridir. Birkaç yıl önce üretimde talep edilen bir adım olarak tesisin trafo gerilimi elektrik güç kapasitesini artırmak amacıyla 154kV dan 354 kV a yükseltildi. Bu olay SVC'nin kapasitör filtresinde arızaya neden oldu çünkü daha önce sistemin konfigürasyonu değişmiştir [10].



Şekil 5. 3 Gwangyang Çelik Fabrikasının güç sisteminin basitleştirilmiş tek hat diyagramı

Gwangyang Çelik Fabrikasının güç sisteminin basitleştirilmiş tek hat diyagramı Şekil 5.3 de gösterilmiştir. Nominal değeri 52MVA olan iki DC elektrik ark fırını 22MVA lık bir (ladle furnace) servis fırını ile birlikte çalışmaktadır. SVC bu iki ark fırınının ve servis fırınının reaktif gücüne göre dizayn edilmiştir. SVC sistemi 22 kV da 83 MVAR için bir TCR ve beş harmonik filtreden oluşmaktadır. TCR, ark fırının güç dalgalanmasına yanıt verecek şekilde sürekli ayarlanır. Filtre kondansörler yükün güç faktörünü düzenlemek için reaktif güç sağlarlar. Aynı zamanda TCR ve elektrikli ark fırınlarından kaynaklanan harmonikleri yok etmek için harmonik filtre olarak da görev yaparlar. Bu filtreler 2. (9.9 MVAR), 4. (yüksek geçiren sönümlü 9.0 MVAR), 5. (20 MVAR), 7. (13MVAR) ve 12. (yüksek geçiren sönümlü 31MVAR) harmoniklere ayarlıdır. Bu hattın 345kv da 3 faz kısa devre kapasitesi 18,572 MVA dır [10].

Sık sık üzerindeki arıza nedeniyle tesis 2. harmonik filtresi olmadan çalışmaktadır. Bu arızalar 2. harmonik akımının filtreler ve transformatör TR-B arasında rezonansa neden olarak geniş bir amplifikasyonla sonuçlanabileceği tahmin edilmiştir. Bu nedenle 22kV bara üzerinde 2. harmonik filtre etkinleştirilerek ve pasifleştirilerek PSCAD/ EMTDC simülasyonları kullanılarak empedans ölçümleri yapılmış ve sistem empedansı 120Hz de 2. harmonik filtre ile 0.4 bulunmuş, 2 harmonik filtresiz ise 1.732 bulunmuştur. 180 Hz de ise harmonik filtreli şekilde 24.9, harmonik filtre olmadan 73.5 bulunmuştur[10].

SVC'nin 3. harmonik akımı filtrelenmemiş şekilde dizayn edilirse 3. harmonik akım paralel rezonansa sebep olabilir [13]. Sonuç olarak 2. ve 3. harmonik akımın 2. harmonik filtreye girişi 2. harmonik filtrenin sık arızaya girmesine neden olur. Bu nedenle sistem paralel rezonans durumunu önlemek için geçici durumlarda 2. harmonik fitle olmadan çalışır. Elektrik ark fırının ilk erime periyodunda fırının tranformatöründeki devre kesici CB6 anahtarlandığı zaman yüksek miktarda 2. ve 3 harmonik akım oluşur ve bu akım TR2 fırın trafosunda inrush akımının oluşmasına neden olur.

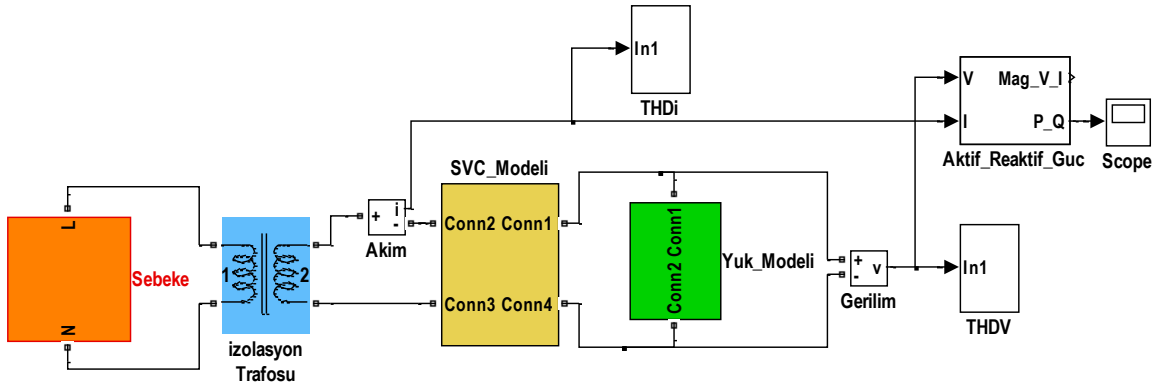


Şekil 5. 4 2. Harmonik filtrenin hasarlı kapasitör birimleri[10].

Bununla birlikte AHF (Aktif harmonik filtre) reaktif güç kompanzasyonu, akım ve gerilim dengesizlikleri ve nötr akımı kompanzasyonu için de kullanılmaktadır. AHF, doğrusal olmayan yükün ürettiği akım harmoniklerinin devreye etkilerini azaltabilmekte, reaktif güç çekebilmekte veya üretebilmektedir. Paralel aktif güç filtreleri, çoğunlukla akım harmoniklerinin süzülmesi ve tepkin güç kompanzasyonu amacıyla; seri aktif güç filtreleri ise çoğunlukla gerilim harmoniklerinin süzülmesi, gerilim regülasyonu ve harmonik izolasyon amacıyla kullanılmaktadır [13].

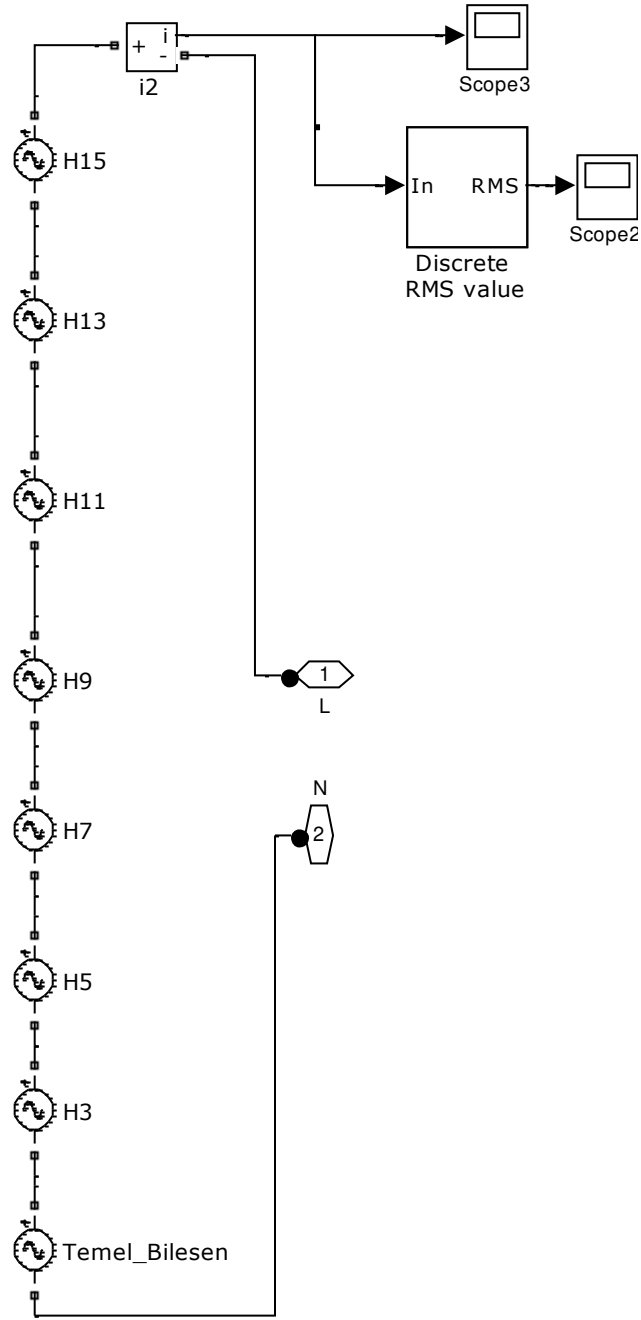
SİMULASYON ÇALIŞMALARI

SVC sisteminin harmonik etkilerini incelemek amacı ile yapılacak olan deneysel çalışmalara başlanmadan önce sistem MATLAB & Simulink ortamında modellenmiştir. Deneysel çalışmalara temel oluşturması ve karşılaşılabilecek sorunların önceden tespiti için simülasyon modellemesi önem taşımaktadır. Bu amaçla oluşturulan simülasyon modeli Şekil 6.1’de verilmiştir.



Şekil 6. 1 Simülasyon modeli

Simülasyon modeli oluşturulurken yapılan ölçümler ile elde edilen veriler doğrultusunda şebeke harmonikleri modellenmiştir. Şebeke bağlantı noktasının gücü kullandığımız elemanlara göre çok yüksek değerlere sahip olduğu için şebeke sonsuz şebeke olarak kabul edilmiştir. Şebeke gerilim harmoniklerini oluşturmak için farklı frekansta (50, 150, 250, 350, 550, 650 ve 750 Hz) ve yapılan ölçümlerden edilen genliklerde gerilim kaynakları seri olarak bağlanmıştır. Şebeke gerilim harmoniklerini modellemek için oluşturulan sistem Şekil 6.2’de sunulmuştur.



Şekil 6. 2 Harmonikli şebeke modeli

Oluşturulan şebeke modeli bire bir dönüştürme oranına sahip bir trafodan geçirilerek SVC ve yük sistemine uygulanmıştır. Bunun sebebi daha öncede söylendiği gibi bağlantı noktasının kısa devre gücü oldukça yüksektir bu durumda da bilindiği gibi şebeke empedansı oldukça düşüktür. Böyle bir sistemden düşük harmonikli akımlar çekildiğinde zaten düşük olan şebeke empedansı üzerinde herhangi bir gerilim düşümü yaşanmayacaktır. Bu sebeple de şebeke üzerinde herhangi bir gerilim harmoniği gözlenemeyecektir. Bu amaçla SVC sistemi 1 KVA'lık bir izolasyon trafosu üzerinden

şebekeye bağlanmıştır. Trafo verileri ölçülerek yaklaşık olarak benzer değerleri verecek şekilde modellenmiştir. Modellenen trafonun verileri Şekil 6.3'te verilmiştir.

Block Parameters: izolasyon Trafosu

Linear Transformer (mask) (link)

Implements a three windings linear transformer.

Click the Apply or the OK button after a change to the Units popup to confirm the conversion of parameters.

Parameters

Units: SI

Nominal power and frequency [Pn(VA) fn(Hz)]:
[1000 100]

Winding 1 parameters [V1(Vrms) R1(ohm) L1(H)]:
[220 1.96 435e-6]

Winding 2 parameters [V2(Vrms) R2(ohm) L2(H)]:
[220 1.96 435e-6]

☐ Three windings transformer

Winding 3 parameters [V3(Vrms) R3(ohm) L3(H)]:
[3.15e+005 0.7938 0.084225]

Magnetization resistance and inductance [Rm(ohm) Lm(H)]:
[115 465e-3]

Measurements: None

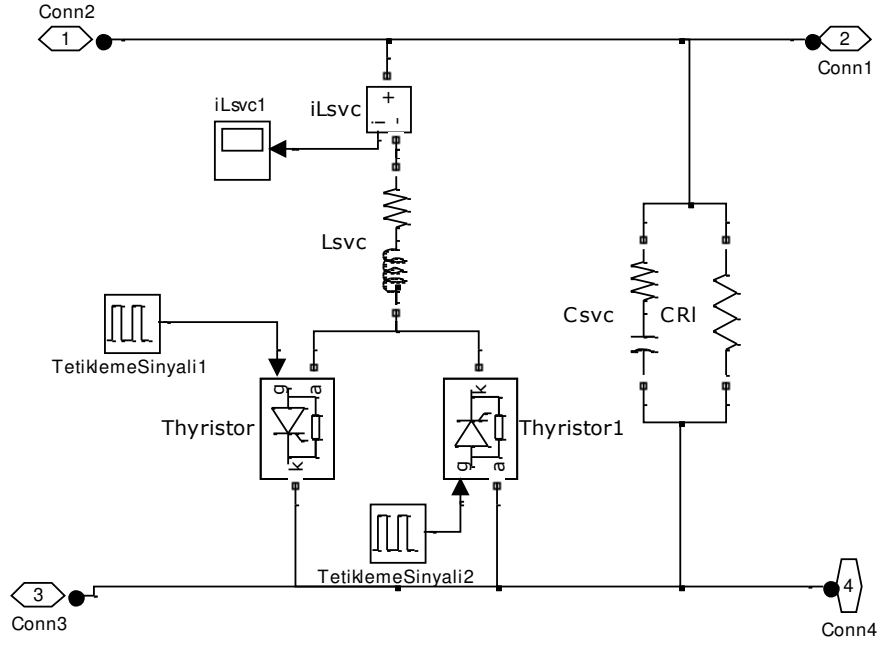
☒ Use SI units

OK Cancel Help Apply

Şekil 6. 3 Trafo verileri

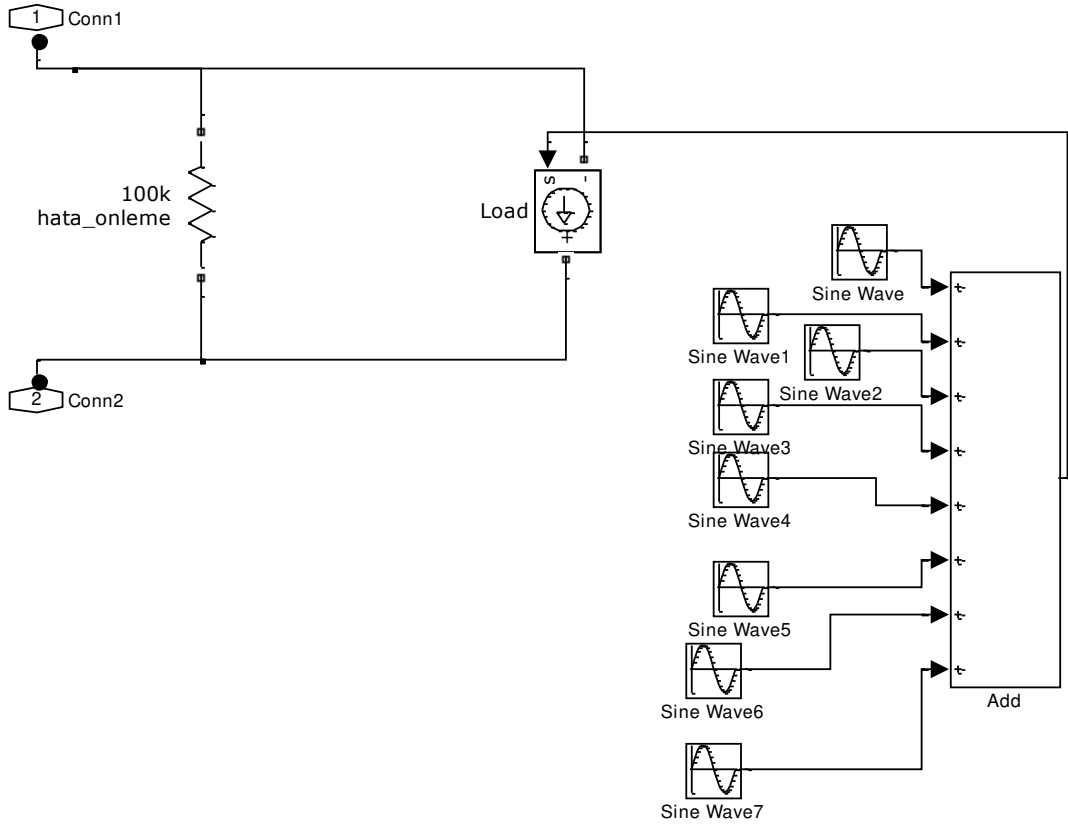
Bu veriler gerçek trafonun verilerinin LCR metre yardımı ile ölçülmesi ile elde edilmiştir. LCR metrenin frekansı minimum 100 Hz'e ayarlandığı için trafo verileri 100Hz için ölçülmüş ve bu frekansa göre modelleme yapılmıştır. Ancak trafo hem deneysel hem de simülasyon çalışmalarında 50 Hz'de çalıştırıldığı için gerçek veriler ile benzer sonuçlar vermiştir.

Harmoniklerini incelemek amacı ile sistemde bir FC-TCR SVC kullanılmıştır. Kullanılacak yükleri uygun şekilde kompanse edebilmek amacı ile sabit kondansatör değeri 30 μ F ve tristörler tarafından anahtarlanacak endüktansın değeri de 200 mH seçilmiştir. Oluşturulan SVC modeli Şekil 6.4'te gösterilmiştir.



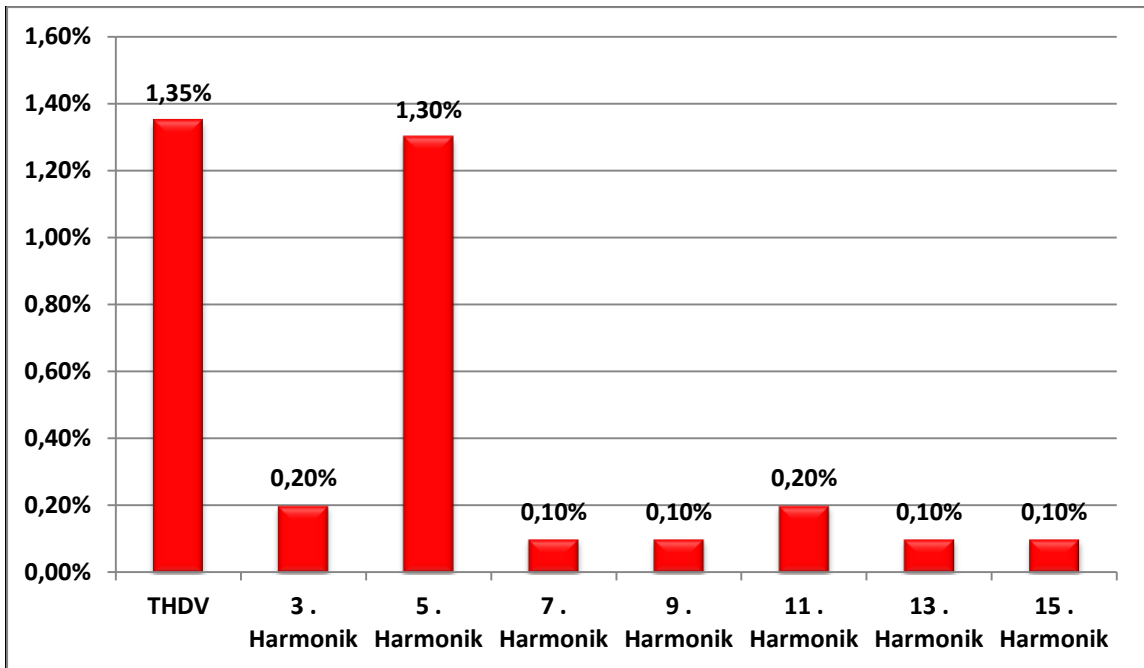
Şekil 6. 4 FC-TCR SVC modeli

Yapılan simülasyon çalışmalarında deneysel sistemde yüklenmeleri göstermek için kullanılan yük bankasına göre yükler modellenmiştir. Seçilen yükler 220Ω ve 400mH 'lik yüklerdir. Bu yükler şebekeye bağlanarak bir ölçüm alınmış elde edilen veriler doğrultusunda nonlineer olan yükler modellenmiştir. Yük modelleri Şekil 6.5'te gösterilmiştir.



Şekil 6. 5 Yük modeli

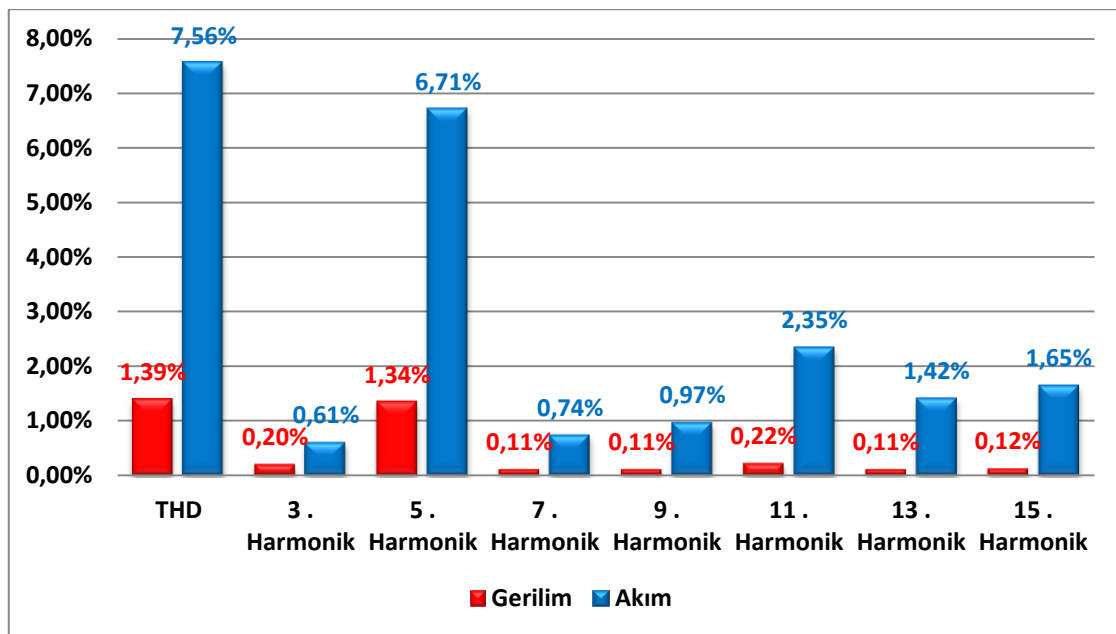
Yapılan şebeke modeli ve trafo modellerini test etmek amacı ile şebeke trafoya bağlanmış ve trafonun ucu boşa bırakılarak gerilim harmonikleri ölçülmüştür. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.6'da verilmiştir.



Şekil 6. 6 Yüksüz ve SVC'siz durumda gerilim harmonikleri spektrumu

Elde edilen veriler ile şebeke verileri ölçülerek uygunluk sağlamıştır. Bu verilerin karşılaştırılması ilerleyen bölümlerde simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırıldığı kısımda gösterilecektir.

Çalışmanın ikinci aşamasında simülasyon ortamında şebekeye trafo üzerinden sadece SVC'nin 30 μ F değerindeki sabit kondansatörü bağlanarak harmonik verileri ölçülmüştür. Bu çalışmanın amacı SVC'nin tristörleri tetiklenmediğinde veya şebekeye paralel olarak sadece bir kondansatör bağlandığında akım ve gerilim harmoniklerini incelemektir. Elde edilen sonuçlar Şekil 6.7'de sunulmuştur.



Şekil 6. 7 Yüksüz, SVC kondansatörü ile akım ve gerilim spektrumu

Sonuçlardan görüldüğü gibi sisteme bağlanan kondansatör harmonik bileşenlere karşı düşük empedans göstermekte ve akım harmonikleri gerilim harmoniklerine oranla artmaktadır.

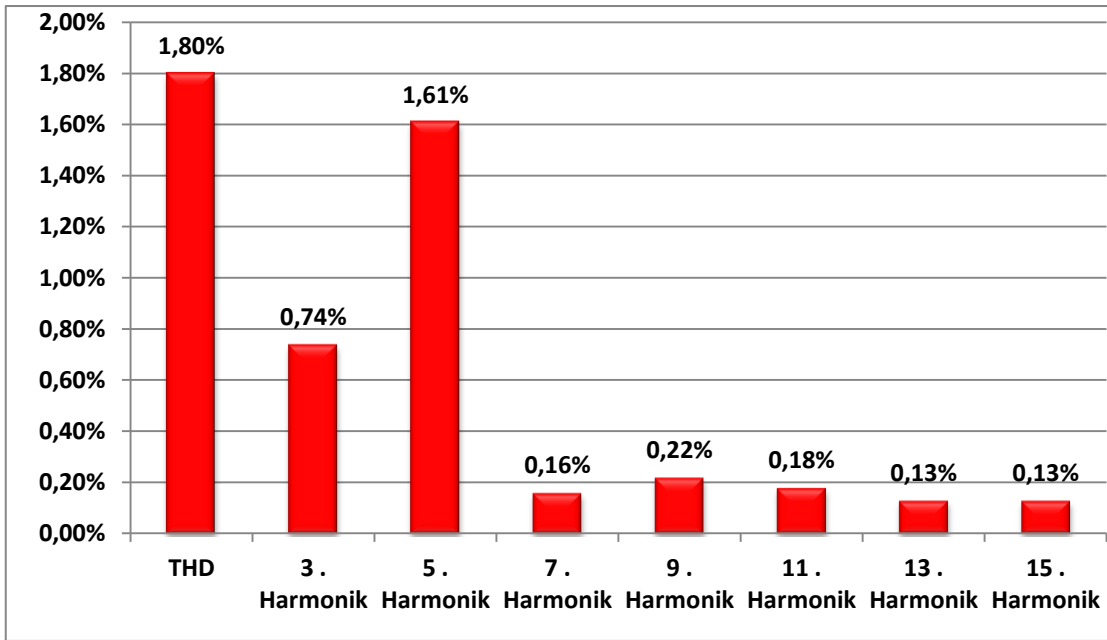
Bu durumda şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri Çizelge 6.1'de verilmiştir.

Çizelge 6. 1 Yüksüz durumda ölçülen parametreler

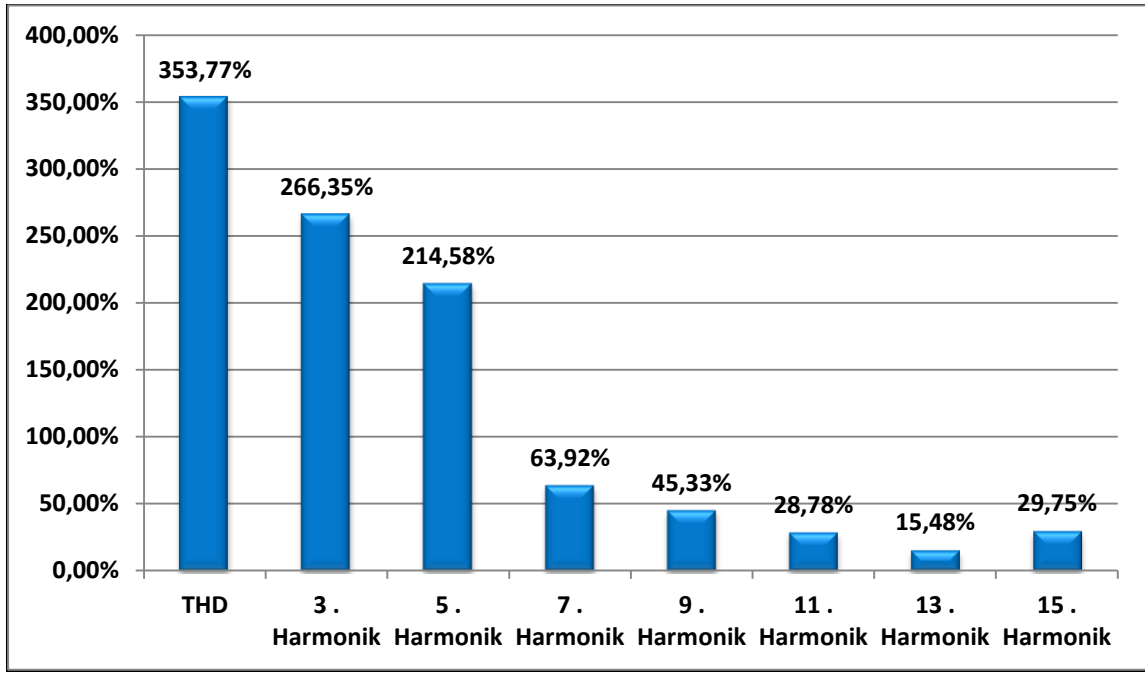
	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	2,09	221,67	464,3	6,73	463 (kap)	0,014	0,032

Çizelge 5.1’de verilen reaktif güç değerine distorsiyon gücü de dahildir. Analizörlerde o şekilde gösterildiği için simülasyonda da ölçümler o şekilde alınmıştır. Sonuçlarda beklenildiği gibi reaktif güç değeri neredeyse görünür güce eşit elemanların aktif güç kayıpları ihmal edilirse sistem kapasitif çıkmıştır. $\cos \phi$ değeri de güç faktörü değeri de sifıra yakın çıkmış ancak çok az da olsa güç faktörü değeri harmoniklerden ötürü $\cos \phi$ değerinden düşüktür.

İncelenen durumlardan bir diğeri de SVC’nin devrede olduğu ancak hiçbir yükün devreye bağlanmadığı durumdur. Bu durumda SVC’nin endüktansı kendi kondansatörünü kompanze edecek kadar tetiklenmiştir ki bunu sağlamak için gerekli açı değeri 106o’dır. Bu durumda çalıştırılan simülasyon sonuçlarından elde edilen harmonik değerleri Şekil 6.8 ve Şekil 6.9’da sunulmuştur.



Şekil 6. 8 Yüksüz durumda SVC aktif ise gerilim harmonikleri



Şekil 6. 9 Yüksüz durumda SVC aktif ise akım harmonikleri

Bu durumda şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri Çizelge 5.2’de verilmiştir.

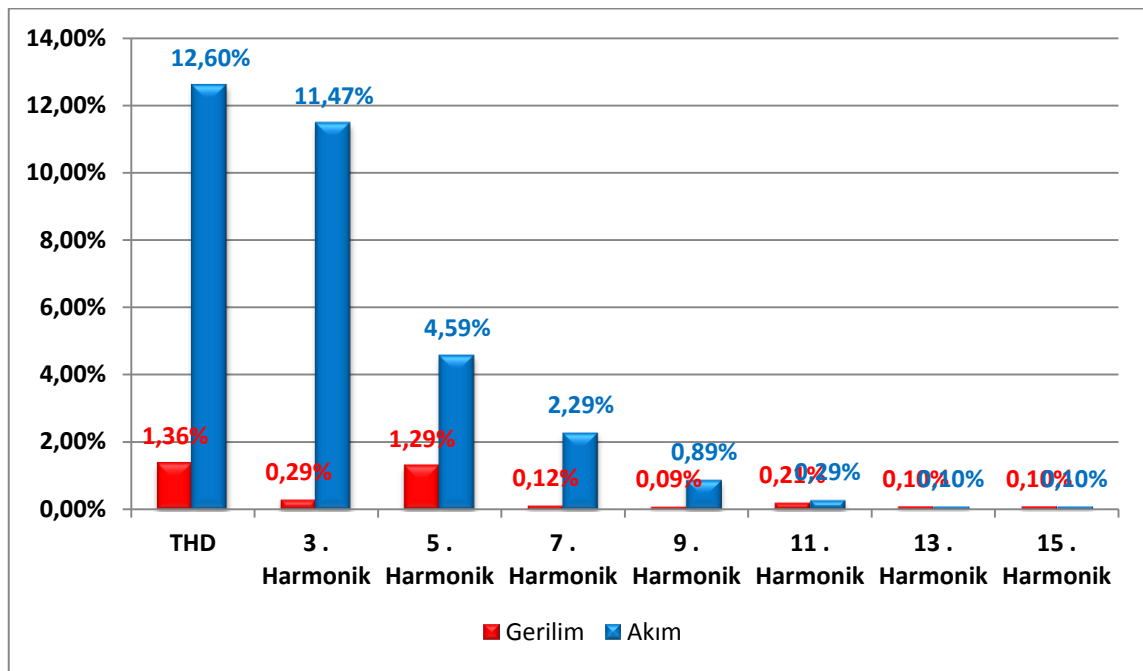
Çizelge 6. 2 Yüksüz durumda SVC aktif iken ölçülen parametreler

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	0,59	220,72	130,2	35,36	125,31 (dist)	0,27	1

Sonuçlardan görüldüğü gibi akım harmonikleri oldukça yüksek değerler almıştır. Bunun sebebi kondansatörler bilindiği üzere harmonikli bir şebekeye bağlandığında (önceki sonuçlardan da gözükmüştür) akım harmoniklerini arttırmaktadır. Ayrıca endüktansın anahtarlanması ve endüktif yük bulunmadığından küçük bir açı ile anahtarlanarak büyük harmonikli akımlar çekmesi harmonik bileşenini arttırmıştır. Ancak dikkat edilmesi gereken önemli bir husus da L ve C elemanlarının reaktif gücü 0 yapacak şekilde ayarlanmasından dolayı zaten temel bileşen akımı 0’a çok yakındır. Aslında X_L ve X_C si 50Hz’de eşit iki elemanın paralel bağlanmasına benzeyen bu durumda şebekeden sadece harmonik bileşenli akımlar çekilmektedir. Bu durumda da şebekeden küçük genlikli ancak bol harmonikli bir akım çekilmektedir. Bu durumun şebeke üzerine olumsuz etkileri tartışılabilir. Çünkü THD’si yüksek olsa da küçük genlikli harmonik akımlar şebeke üzerine büyük bir olumsuz etki oluşturmazlar.

Çalışmanın 4. aşamasında simülasyon ortamında şebekeye izolasyon trafosu üzerinden omik-endüktif bir yük bağlanmıştır. Yük 220Ω ve $0,4\text{ H}$ değerinde iki yükün seri bağlanması ile oluşturulmuştur. Bu çalışmanın hedefi SVC devrede olmadığı zaman yüklerin harmonik durumu ile SVC devrede iken oluşacak harmonikli durumun karşılaştırabilmesidir.

Sadece 220Ω ve $0,4\text{ H}$ değerinde bir yükün devrede olduğu durumda simülasyon sonuçlar Şekil 6.10'da verilmiştir.



Şekil 6. 10 Sadece 220Ω ve $0,4\text{ H}$ 'lik yük ile akım ve gerilim harmonikleri

Sonuçlarda da görüldüğü gibi harmonikli bir şebekeye nonlinear bir yükün bağlanması sonucunda akım harmonikleri oluşmuş ve gerilim harmoniklerini de arttırmıştır.

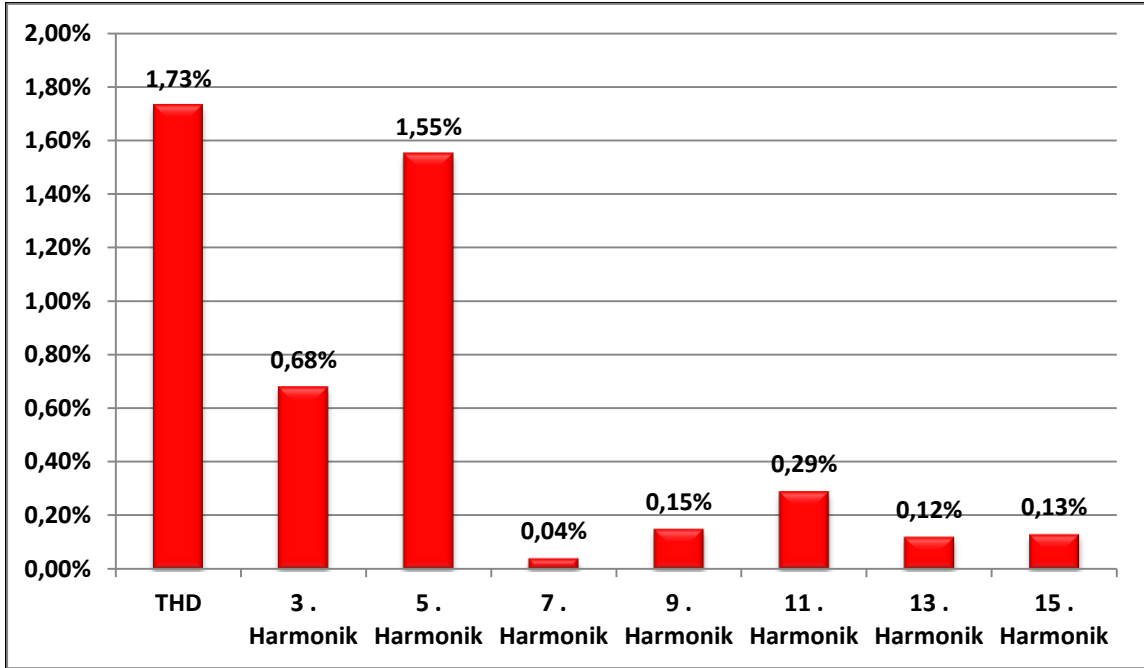
Bu durumda şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri Çizelge 6.3'de verilmiştir.

Çizelge 6. 3 Sadece 220Ω ve $0,4\text{ H}$ 'lik yük ile ölçülen parametreler

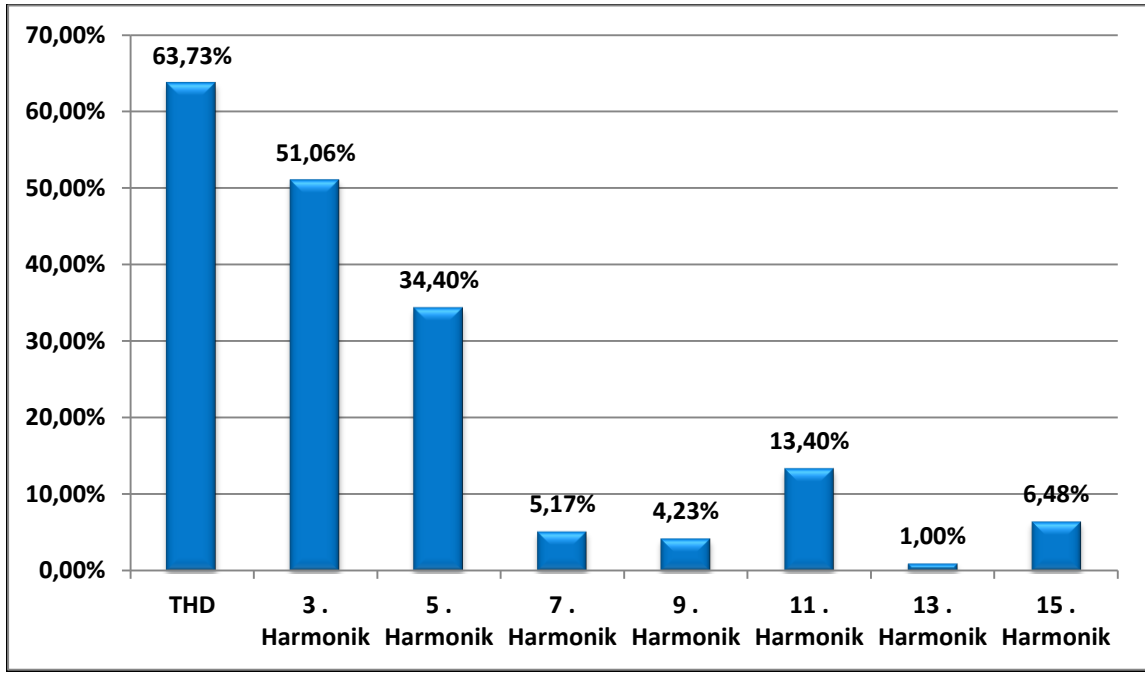
	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	0,791	218,7	172,95	139,99	101,54 (end)	0,8095	0,816

Elde edilen veriler beklendiği gibi olmuştur.

Simülasyon çalışmalarının 5. aşamasında trafo üzerinden SVC bağlanmış ve SVC çıkışına 220Ω , 0,4H (seri) bir yük bağlanmıştır. Trafo çıkışındaki temel bileşene bağlı reaktif güç sıfır olacak şekilde SVC'nin endüktansı 112 derecelik bir açı ile tetiklenmiştir. Bu şartlar altında harmonik bozulmalar Şekil 6.11'de verilmiştir.



Şekil 6. 11 220Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanze edildiğinde gerilim harmonikleri
Görüldüğü gibi gerilim harmoniklerinde artış olmuş özellikle şebekede bulunmayan 3. harmonik değeri belirgin olarak artmıştır. Bu durumun sebebinin anlaşılabilmesi için akım harmonikleri de Şekil 6.12'de gösterilmiştir.



Şekil 6. 12 220Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanse edildiğinde akım harmonikleri

Akım harmonikleride incelendiğinde yüksek 3. Harmonik akımına bağlı olarak trafo empedansı üzerinde 3.harmonik gerilim düşümü yüksek olmuştur. Buna bağlı olarak şebeke geriliminde düşük miktarda bulunan 3. Harmonik değeri belirgin oranda artmıştır.

Bu durumda şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri Çizelge 6.4'te verilmiştir.

Çizelge 6. 4 220Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanse edildiğinde ölçülen parametreler

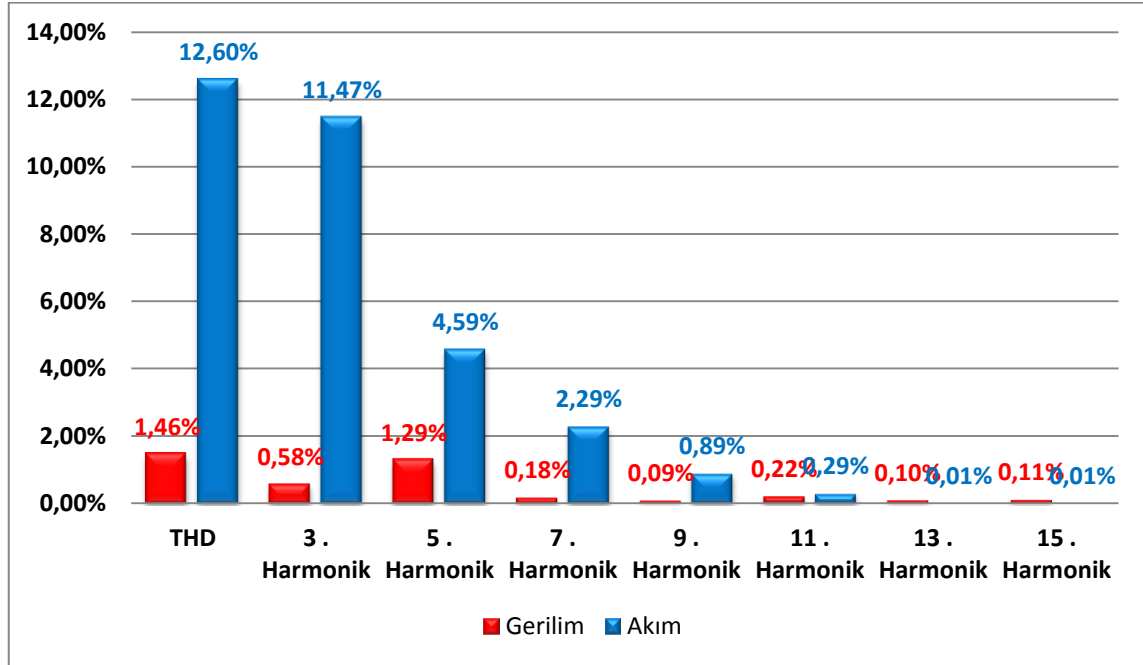
	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	0,913	218,34	199,44	168,13	107.28 (dist)	0,843	1

Sonuçlarda da görüldüğü gibi SVC kompanse edebildiği reaktif güç kapasitesinin altında bir reaktif güçle yükü yüklediği zaman harmonik distorsiyonu oldukça artmakta akımın RMS değeri hiç kompanzasyon olmadığı durumdan yüksek çıkmaktadır. Harmoniklerden ötürü oluşan distorsiyon gücü neredeyse aktif güç değerine eşit olmaktadır.

Çalışmanın 6. aşamasında SVC'nin kompanse edebildiği reaktif güç kapasitesine yakın değerde bir yük seçilmiştir. Bu amaçla yük değeri 3 katına çıkarılmıştır. Öncelikle

nonlineer (doyuma giren endüktanslar) yüklerin harmonik değerlerini ölçmek amacı ile yükler öncelikle tek başına trafo çıkışına bağlanmış ve sonuçlar alınmıştır.

Bu şartlar altında akım ve gerilim harmoniklerinin aldığı değerler Şekil 6.13’de verilmiştir.



Şekil 6. 13 Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4 H’lik yük ile akım ve gerilim harmonikleri

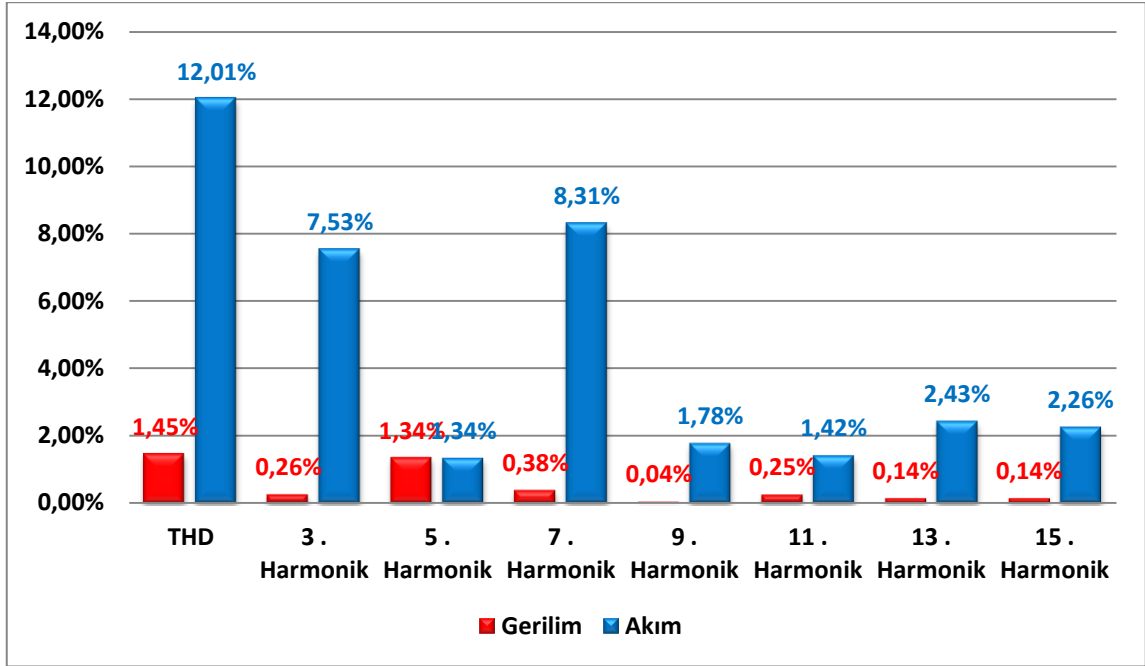
Bu şartlar altında şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri Çizelge 6.5’te verilmiştir.

Çizelge 6. 5 Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4 H’lik yük ile ölçülen parametreler

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	2,37	213,48	506,43	405,62	303,22 (end)	0,8009	0,8074

Sonuçlar öngörüldüğü gibi olmuştur.

Simülasyon çalışmalarının son aşamasında 3 adet 220Ω ve 0,4 H’lik (Endüktanslar nonlineer ve doyuma girebilir özelliktedir.) yük SVC ile kompanze edilmiş bu şartlar altında sonuçlar incelenmiştir. Trafo bağlantı noktasından çekilen temel bileşene bağlı reaktif güç değerini 0’a indirmek için gerekli tetikleme açısı 130° olarak belirlenmiş ve bu şartlar altında simülasyon çalıştırılmıştır bu şartlar altında akım ve gerilim harmoniklerinin aldığı değerler Şekil 6.14’te verilmiştir.



Şekil 6. 14 Üç adet paralel bağlanmış 220Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanze edildiğinde gerilim ve akım harmonikleri

Şekilde görüldüğü gibi akım harmonikleri daha düşük yüklenmelere göre oldukça azalmıştır. Ayrıca akım harmoniklerinden kaynaklanan trafonun empedansı üzerindeki gerilim düşümünün sebep olduğu gerilim harmoniklerinin miktarı da oldukça azalmıştır.

Bu şartlar altında şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri Çizelge 6.6'da verilmiştir.

Çizelge 6. 6 Üç adet paralel bağlanmış 220Ω ve 0,4 H'lik yük SVC ile kompanze edildiğinde ölçülen parametreler

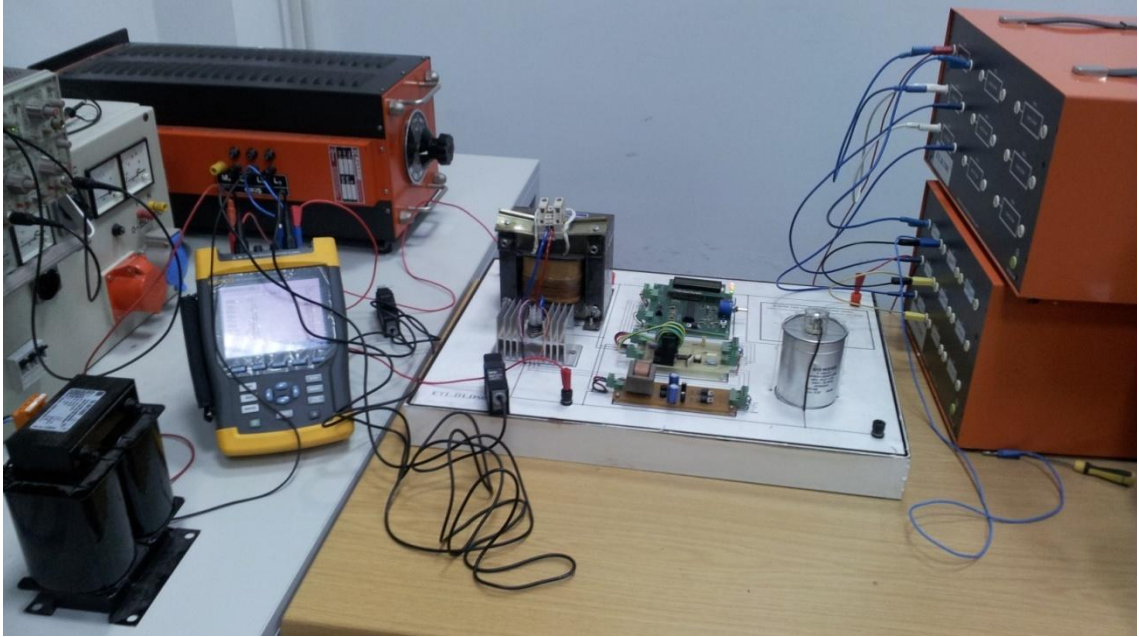
	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	2,009	213,56	429,11	425,87	52,644 (dist)	0,9924	1

Gerçekleştirilen çalışmalar incelendiğinde SVC'nin düşük güçlerde oldukça akım harmonikleri ürettiği ve böylelikle kompanzasyon sebebi ile akımın genliğin azalması gerekirken akımın genliğinin arttığı görülmüştür. Ancak nominal yüklenmelerde başarı ile akımın genliğini azalttığı ve hem güç faktörü hem $\cos \phi$ değerlerini artırdığı görülmüştür.

BÖLÜM 7

DENEYSEL ÇALIŞMALAR

Gerçekleştirilen simülasyon sonuçlarını doğrulamak ve SVC'nin harmonik etkilerini daha gerçekçi bir biçimde incelemek amacı ile Şekil 7.1'de gösterilen deney düzeneği kurulmuştur.



Şekil 7. 1 Deney düzeneği

Şebeke çıkışından alınan 220 V 50Hz lik gerilim Şekil 7.2'de gösterilen 1 kVA'lık bir izolasyon trafosu üzerinden SVC ve yüklere bağlanmıştır. İzolasyon trafosunun kullanılmasının amacı düşük güçlü elemanlardan oluşturulan SVC'nin gerilim harmonikleri üzerine etkilerinin ölçülebilmesi için şebeke empedansına seri olarak trafo empedansının eklenmesi ve bu sayede harmonikli akımlar çekildiğinde empedans üzerindeki gerilim düşümünün artması sağlanmıştır. Kullanılan elemanların kurulu

gücünün maksimum 1 kVA'ya yaklaştığı göz önüne alınarak 1 kVA'lık bir trafo seçilmiştir.



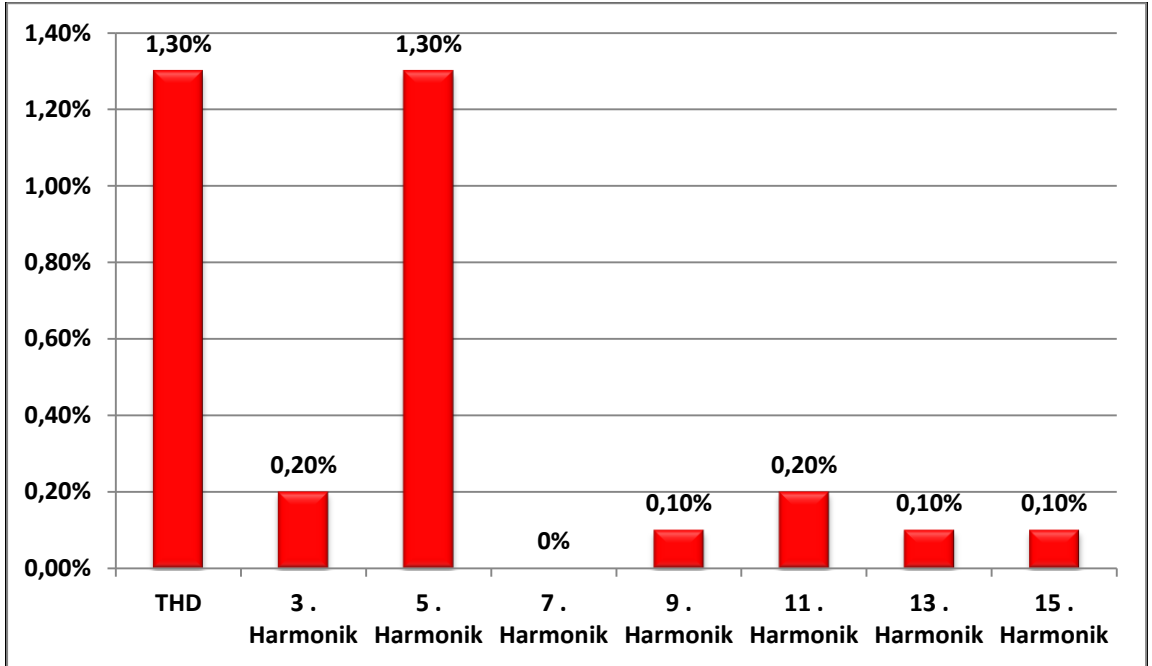
Şekil 7. 2 İzolasyon trafosu

Trafo çıkışına yapılacak çalışmaya göre SVC ya da yükler bağlanmıştır. İlk olarak trafo çıkışından şebeke geriliminde mevcut bulunan harmonikler Şekil 7.3'te verilen Fluke 434 güç kalitesi ve enerji analizörü yardımı ile ölçülmüştür.



Şekil 7. 3 Ölçümlerin yapıldığı güç kalitesi ve enerji analizörü

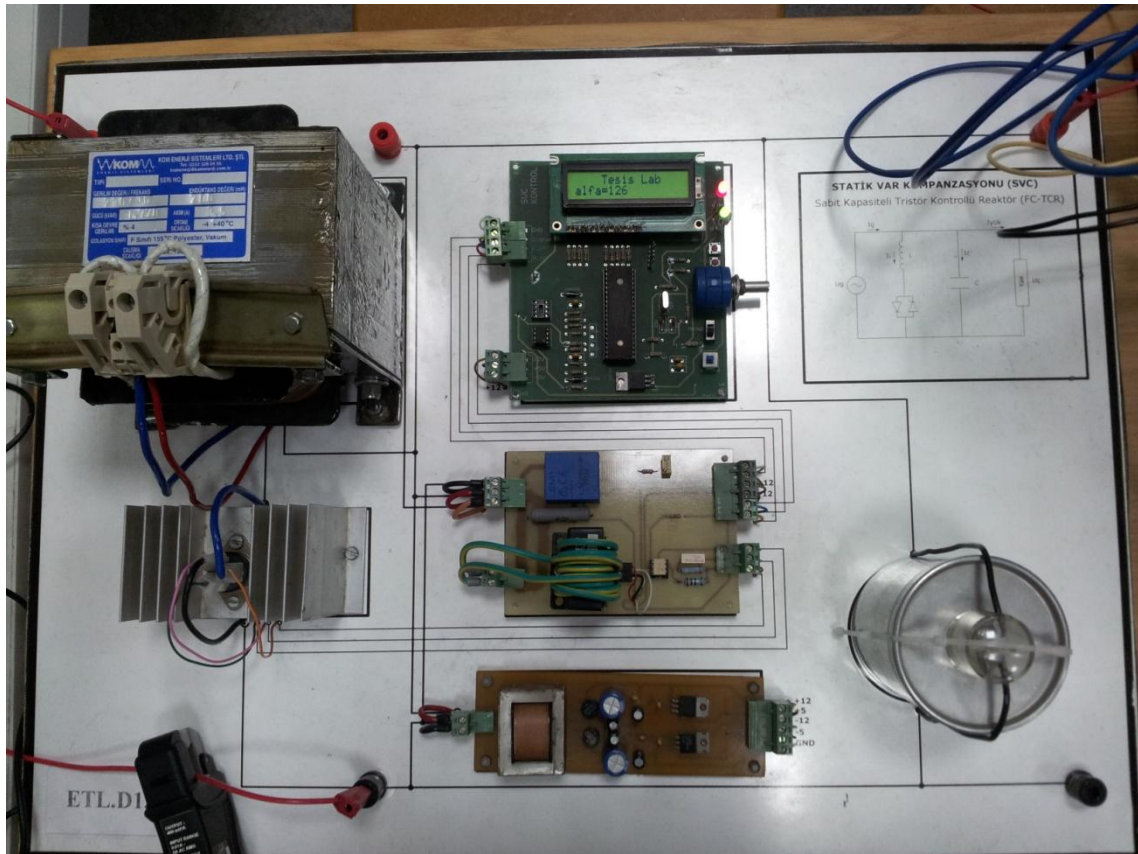
Elde edilen sonuçlar Şekil 7.4'te verilmiştir.



Şekil 7. 4 Trafo boşa çalışırken çıkışından ölçülen şebeke harmonikleri

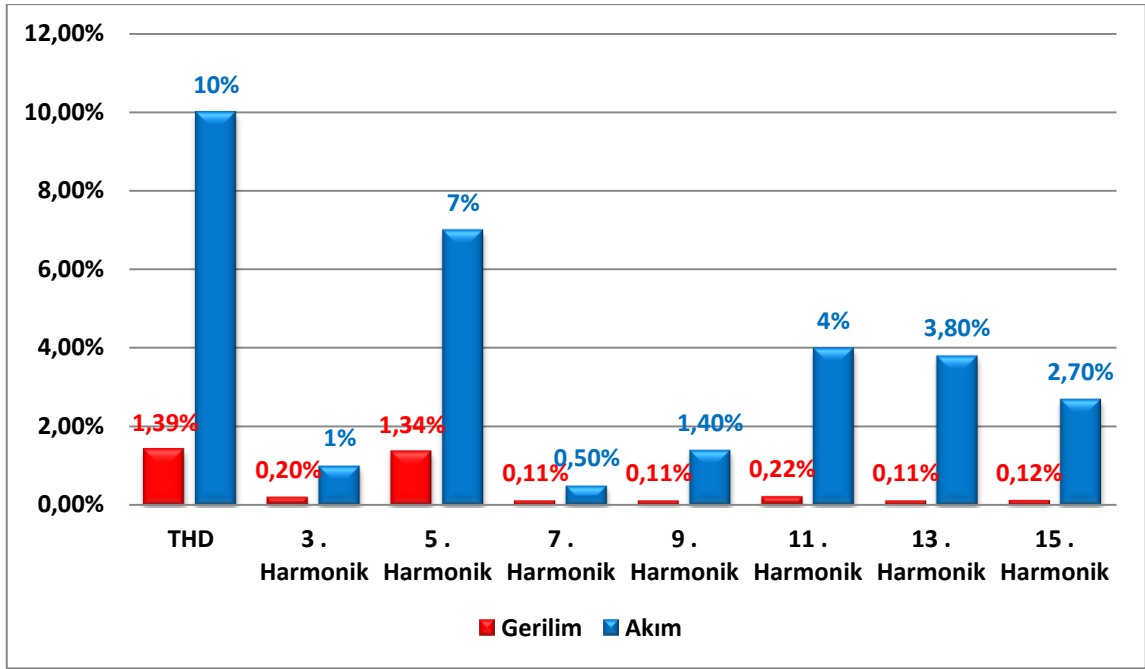
Sonuçlardan da görüldüğü gibi şebeke geriliminin harmonik oranları oldukça düşüktür. Ancak şebekede baskın bir 5. Harmonik gözlenmekte diğer harmonik bileşenler ihmal edilecek kadar düşük oranlardadır.

Simülasyon çalışmalarında olduğu gibi 2. aşamada trafo çıkışına Şekil 7.5'te gösterilen SVC deney düzeneği bağlanmıştır. Şekil 7.5'te de görüldüğü gibi SVC tristör kontrollü reaktör besleme, ölçüm ve tetikleme kartları ve sabit kondansatörden oluşmaktadır. Ancak ilk olarak tristör kontrollü endüktans elemanına tetikleme sinyali verilmeyerek sadece 30 μF 'lık kondansatörü devrede tutulmuştur. Bu çalışma da amaç şebekeye kapasitif bir yük bağlandığında tepkisini görmek veya SVC'nin kontrol sistemi çalışmadığı durumlarda etkisini incelemektir.



Şekil 7. 5 Deneysel çalışmalarda kullanılan FC-TCR SVC sistemi

Sadece SVC'nin 30 μF kondansatörü trafo uçlarına bağlandığında akım ve gerilim harmoniklerinin değerleri Şekil 6.6'de sunulmuştur.



Şekil 7. 6 Trafo çıkışına 30 μ F kondansatör bağlandığında akım ve gerilim harmonikleri Kondansatörün yükselen frekansa bağlı olarak düşen empedansı yüzünden şebekede az bulunan gerilim harmonikleri daha büyük akım harmoniklerine sebep olmuştur. Alınan değerlerden sistemin toplam empedansının 11. Harmonik civarında rezonansa girdiği ve oldukça düştüğü söylenebilir. Böylelikle gerilimde çok düşük oranda bulunan 11 ve 13. Harmonikler akımda büyük değerlere ulaşmıştır.

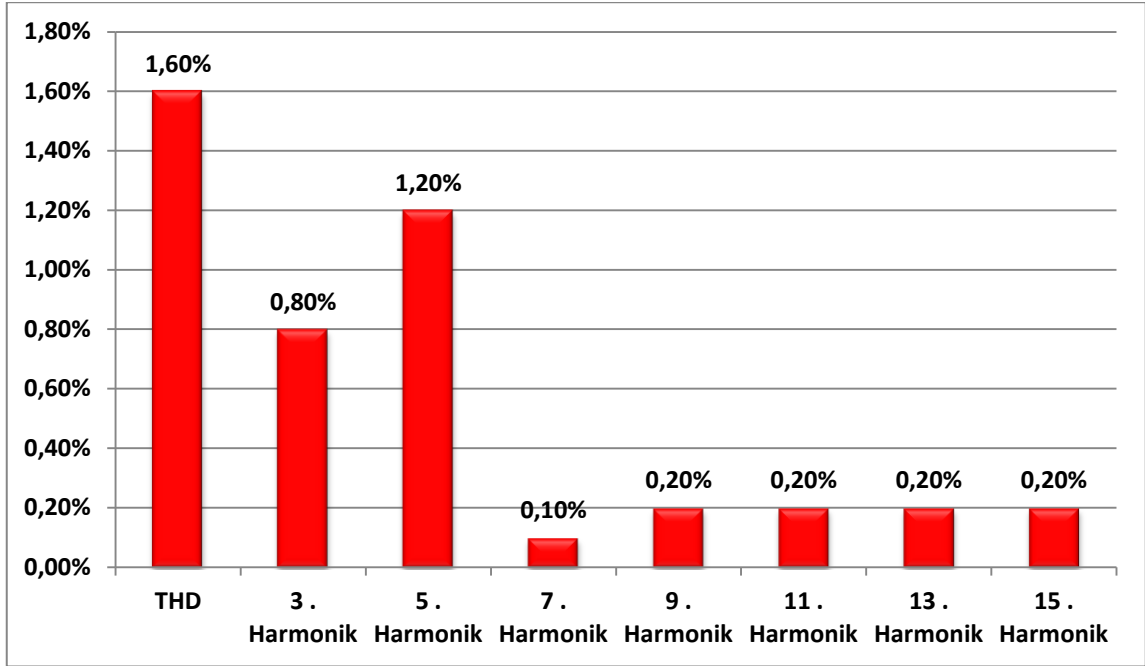
Bu şartlar altında şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri Çizelge 7.1’de verilmiştir.

Çizelge 7. 1 Sadece kondansatör bağlı iken şebekeden çekilen parametreler

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	2,075	221,7	459	6,7	458,8 (kap)	0,01	0,01

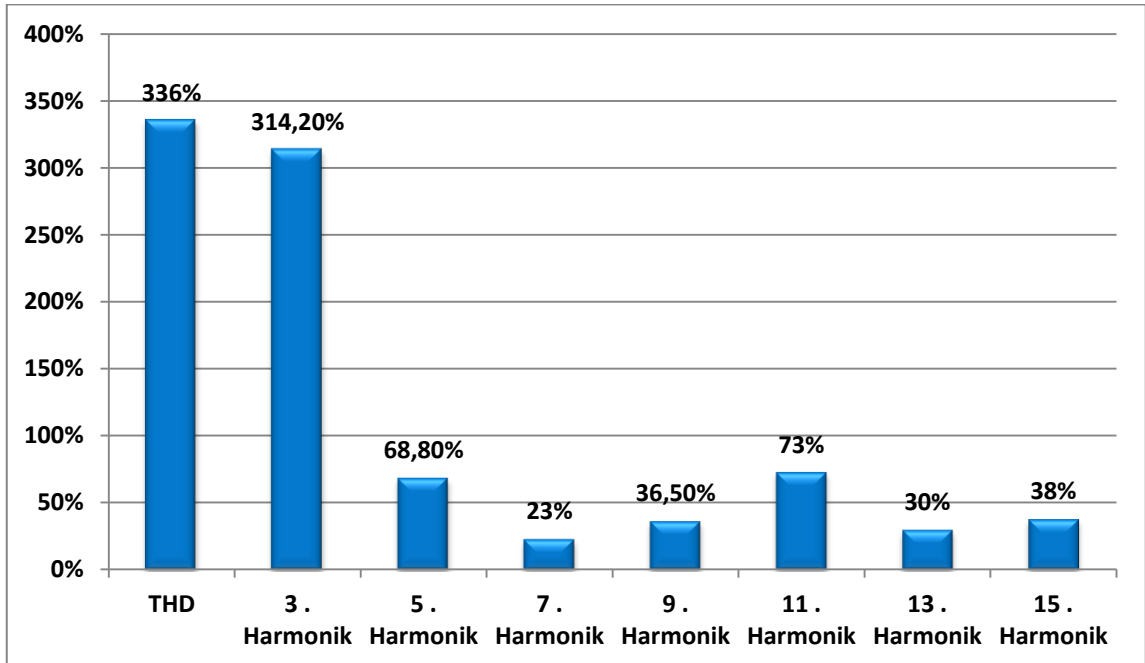
Sonuçlar beklendiği gibi olmuştur gerilim değeri yükselmiş şebekeden kapasitif reaktif güç çekilmiş ve güç faktörü değeri 0’a yakın çıkmıştır.

Bir sonraki aşamada trafo çıkışına SVC bağlanmış ve SVC’nin tetikleme sinyali aktif hale getirilmiş böylelikle ölçümler yapılmıştır. Trafo bağlantı noktasında $\cos \phi$ Değeri sıfır olacak şekilde tristörler 106° açı ile tetiklenmiştir. Bu şartlar altında Gerilim harmonikleri Şekil 7.7’de verilmiştir.



Şekil 7. 7 Sadece SVC sisteme bağlı durumda gerilim harmonikleri

Şekil 7.7’de de gösterildiği gibi gerilim harmoniklerinde artışlar olmuştur. Sebebi ise akım harmoniklerinin trafo empedansı üzerinde oluşturduğu gerilim düşümüdür. Aynı şartlar altında ölçülen Akım harmonikleri de Şekil 7.8’de verilmiştir.



Şekil 7. 8 Sadece SVC sisteme bağlı durumda akım harmonikleri

Akım harmonikleri oldukça yüksek değerler almıştır. Ancak unutulmamalıdır ki şebekeden temel bileşene bağlı çekilen aktif ve reaktif güçler 0’a yakındır. Paralel bağlı

eşdeğer empedansa sahip kondansatör ve endüktans elemanları temel bileşen frekansında paralel rezonansa girerek (tam kompanzasyon hali) şebekeden ihmal edilecek kadar az temel bileşen akımı çekmektedirler. Dolayısı ile çekilen neredeyse tüm akım harmonikli bileşenlere aittir. Bu yüzden akım harmonikleri yüksek değerler almıştır. Ancak Çizelge 7.2’de görüleceği üzere şebekeden çekilen akımın değeri oldukça düşüktür.

Çizelge 7.2’de şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri verilmiştir.

Çizelge 7. 2 Sadece SVC bağlı iken şebekeden çekilen parametreler

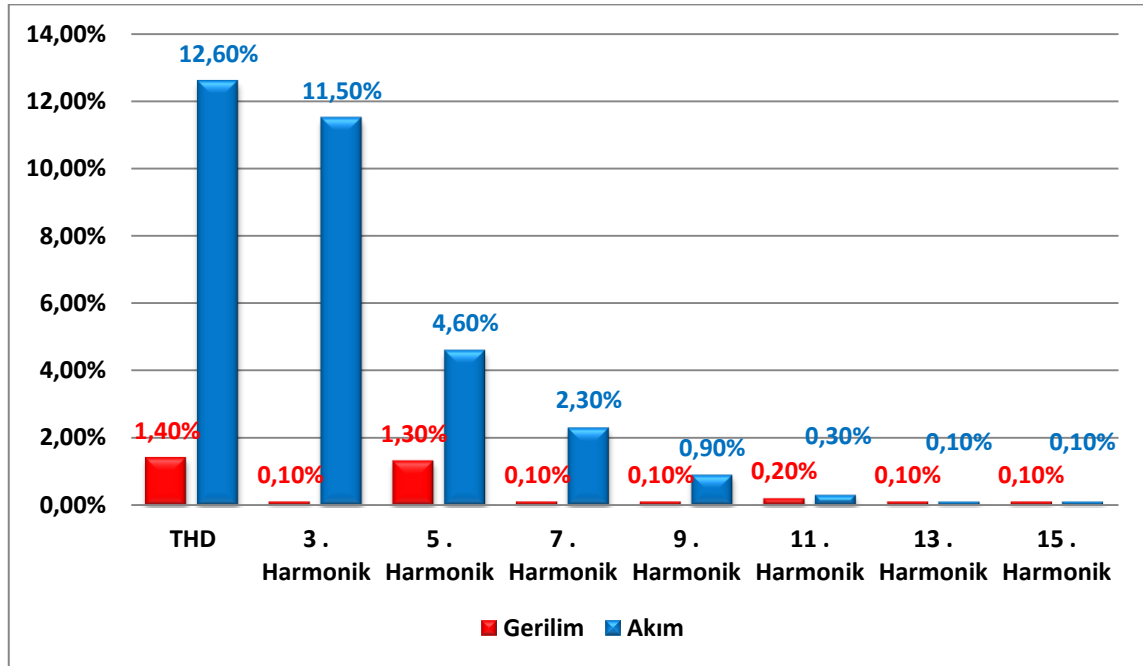
	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	0,6	220,2	132	36,8	132 (dist)	0,28	1

Deneysel çalışmaların 4. aşamasında 220Ω ve $0,4H$ değerlerine sahip iki eleman seri olarak trafonun çıkışına bağlanmıştır. Sisteme nonlineer elemanların bağlanması durumunda oluşacak etkiyi belirlemek için seçilen endüktans nominal şebeke akımında doyuma girecek şekilde seçilmiştir. Bağlanılan elemanlara ait yük bankaları Şekil 7.9’da gösterilmiştir.



Şekil 7. 9 Yük bankaları

Sadece yükler bağlı olduğu durumda analizörden alınan harmonik verileri Şekil 7.10'da sunulmuştur.



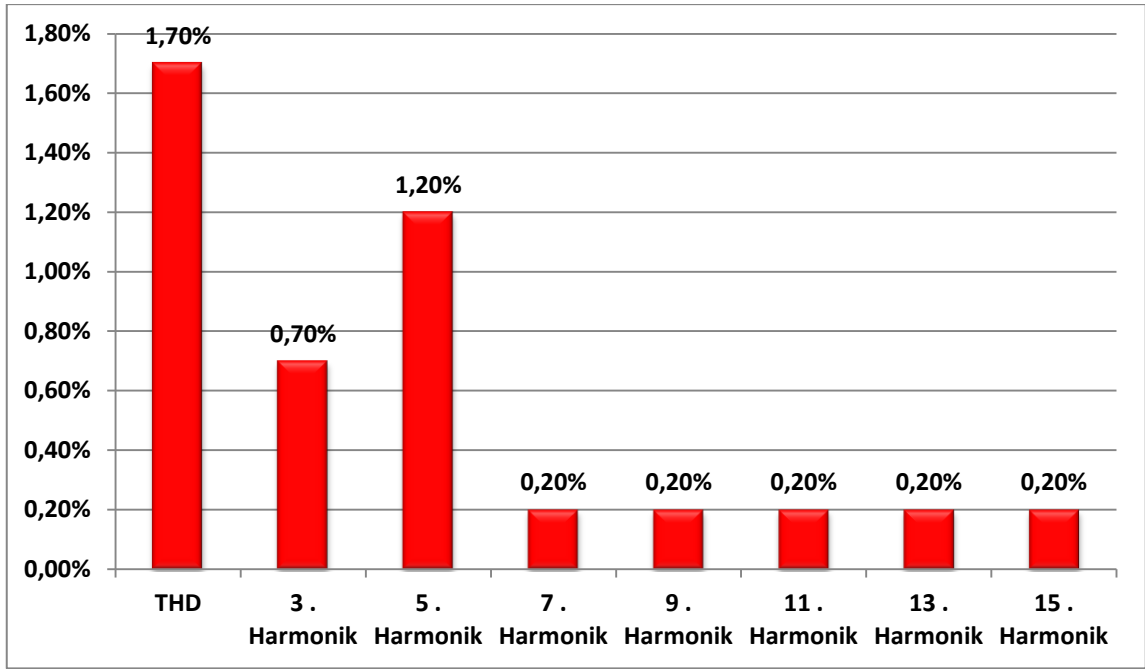
Şekil 7. 10 Sadece 220Ω ve 0,4H değerinde yük sisteme bağlı durumda iken gerilim ve akım harmonikleri

Böylelikle Şekil 7.10'da görüldüğü gibi nominal akımı %12.60 THD'ye sahip bir yük SVC ile test edilecektir. Yükün aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri Çizelge 7.3'te verilmiştir.

Çizelge 7. 3 Nonlineer yükün parametreleri

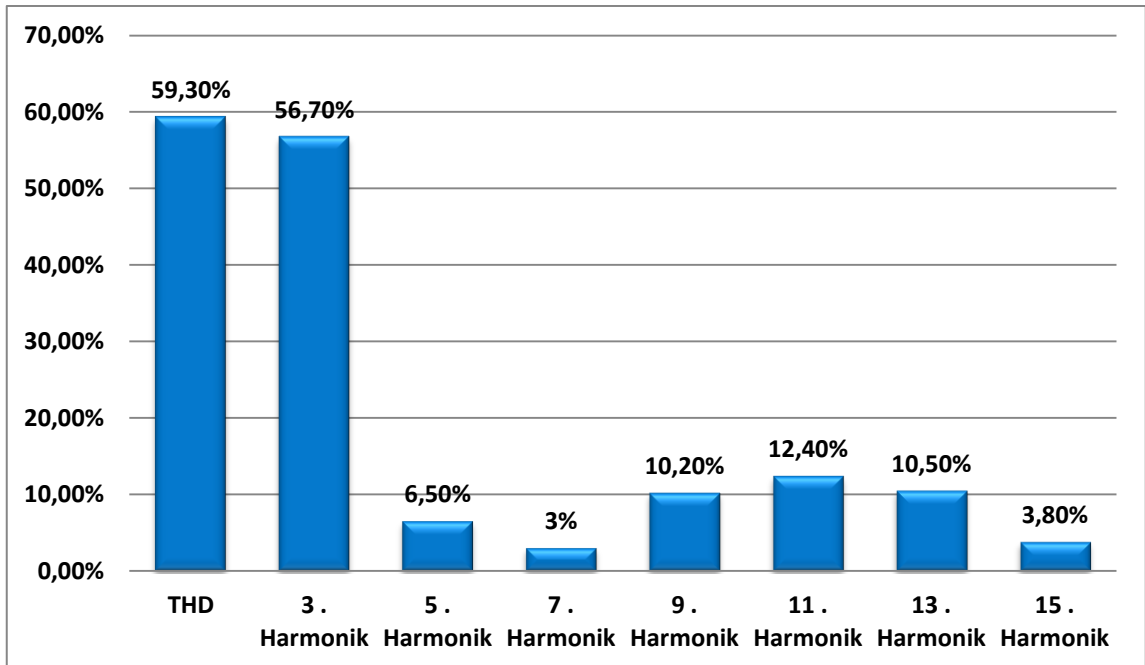
	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	0,789	218,3	171,3	144,3	92,4 (end)	0,84	0,85

Bu yükün SVC ile kompanze edilmesi de deneysel çalışmaların 5. Aşamasını oluşturmaktadır. SVC'nin az da olsa nonlineer akım çeken bir yükte çalışması durumunda sonuçlar incelenmiştir. Trafo bağlantı noktasında $\cos \phi$ değeri 1 olacak şekilde yükün SVC ile kompanzasyonu yapılmıştır. Bunun için triyak elemanı 112° derece ile tetiklenmiştir. Bu şartlar altında gerilim harmonikleri Şekil 7.11'de verilmiştir.



Şekil 7. 11 Nonlineer yük SVC ile kompanze edildiğinde gerilim harmonikleri

Gerilim harmonikleri şebekeden çekilen harmonikli akıma bağlı olarak artmıştır özellikle 3. Harmonik değerinde belirgin şekilde artış olmuştur. Bunun sebebi hem SVC'nin hem de nonlineer yükün 3.harmonik bileşeni içeren akımlarıdır. Şekil 7.12'de akım harmonikleri gösterilmiştir.



Şekil 7. 12 Nonlineer yük SVC ile kompanze edildiğinde akım harmonikleri

Akım harmonikleri de incelendiğinde 3. harmonik bileşenin yüksek olduğu görülmektedir. Buradan anlaşılmaktadır ki gerilim harmoniklerinin 3. bileşenin de oluşan artışın sebebi yüksek oranda çekilen 3. harmonik akımıdır.

Çizelge 7.4'te bu şartlar altında şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri verilmiştir.

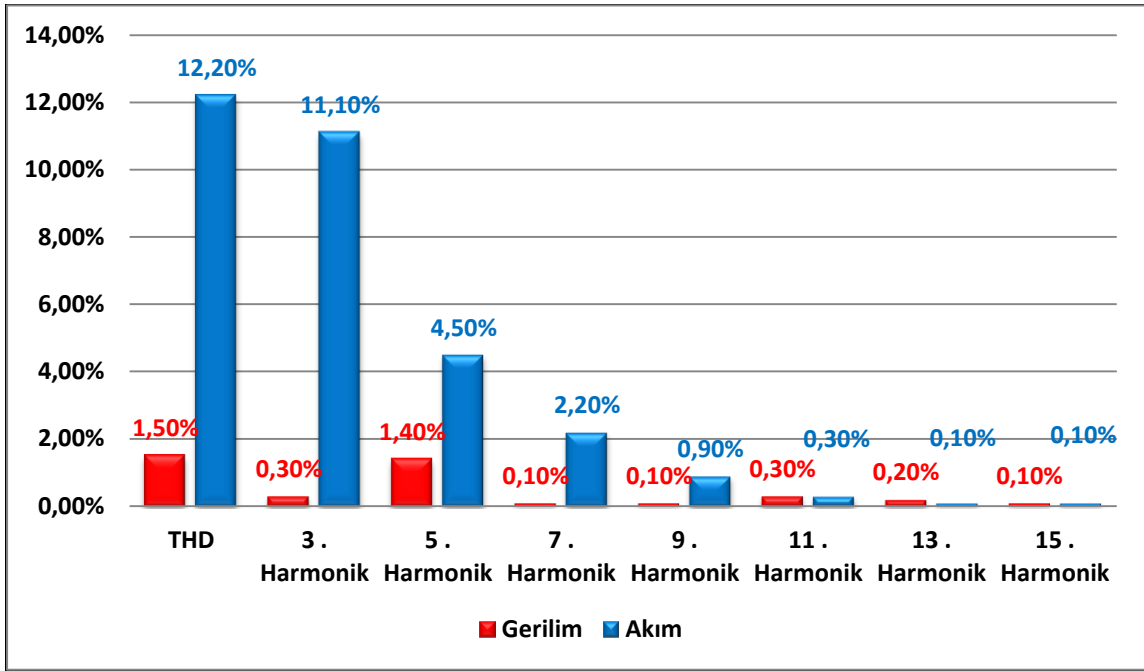
Çizelge 7. 4 Nonlinear yük SVC ile kompanze edildiğinde ölçülen parametreler

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	0,94	217,4	205	173,2	104,5 (dist)	0,85	1

Görüldüğü gibi harmonikli ve SVC gücüne oranla düşük güçlü yüklerin SVC ile kompanze edilmesi durumunda şebekeden çekilen akımın RMS değeri hiç kompanze edilmemiş duruma oranla artmaktadır. Bunun sebebi ise yüksek harmonik bileşenlerdir. Bu durumdan çıkarılabilecek sonuçlardan başlıcaları SVC'nin harmonik filtre olmadan kullanılmasının ve az yüklenmesinin mantıklı olmaması ve denetçi firmalar tarafından sadece $\cos \phi$ değerinin incelenmesinin hatalı olmasıdır.

Bir sonraki aşama ise şebekeye 3 adet 220Ω ve 0,4H değerinde yükün paralel bağlanarak (220Ω direnç ve 0,4H endüktansın seri bağlanmasından oluşan yük grubunun 3 adetinin birbirine paralel bağlanmasıyla) yük değerinin 3 katına çıkarılmasıdır.

Bu çalışma da öncelikle yükler trafo çıkışına bağlanmış ve yüklerin verileri analizör yardımı ile ölçülmüştür. Yük harmonikleri Şekil 7.13'te verilmiştir.



Şekil 7. 13 Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4H değerinde yük sisteme bağlı durumda iken gerilim ve akım harmonikleri

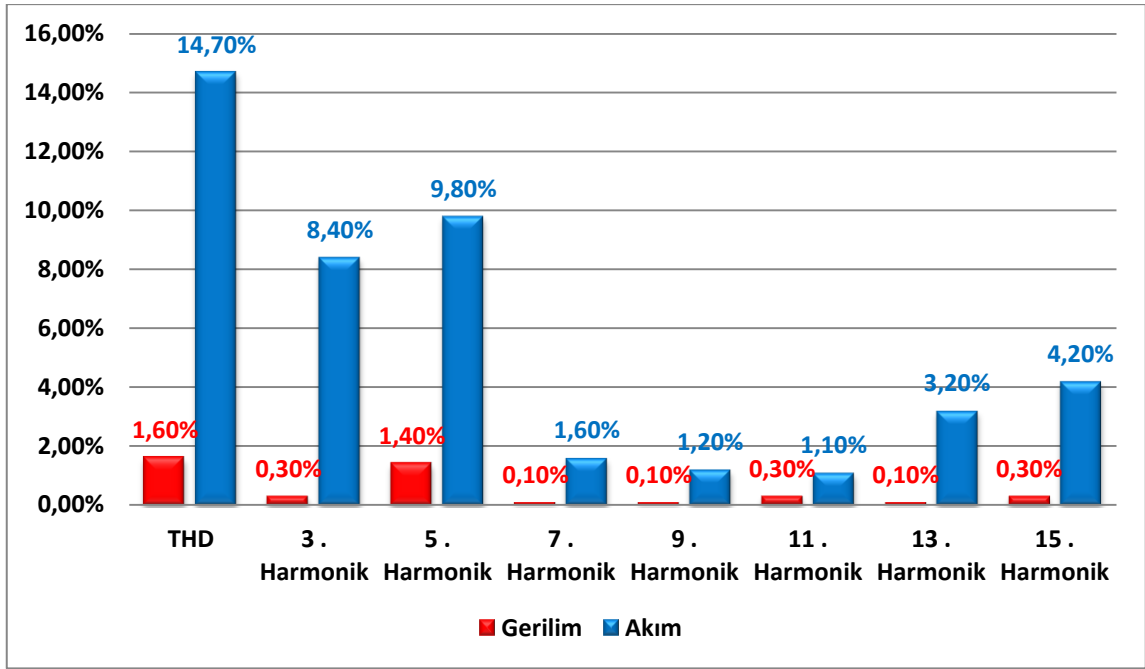
Görüldüğü gibi sadece yükler devredeyken şebekeden büyük oranda 3. Harmonik akımı çekilmekte ve buna bağlı olarak gerilim harmoniklerinde artış gözlenmektedir.

Yüklerin aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri Çizelge 7.5'te verilmiştir.

Çizelge 7. 5 Sadece 3 Adet 220Ω ve 0,4H değerinde yük sisteme bağlı durumda iken ölçülen parametreler

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	2,36	214,3	508	429	268 (end)	0,85	0,86

Son çalışmada ise sadece 3 adet 220Ω ve 0,4H değerinde yük SVC ile kompanze edilmiştir. Yükleri kompanze etmek için gerekli tetikleme açısı 126o olarak belirlenmiş ve endüktansa seri bağlı olan triyak elemanı bu açı ile tetiklendiğinde Cos ϕ değeri 1 olmuştur. Bu şartlar altında analizörden okunan harmonik verileri Şekil 7.14'te verilmiştir.



Şekil 7. 14 Üç adet 220Ω ve 0,4H değerinde yük svc ile kompanze edildiğinde gerilim ve akım harmonikleri

Sonuçlar incelendiğinde görülmüştür ki akım harmoniklerinde yük akımına oranla çok küçük bir miktarda artış olmuş değerler aşırı yükselmemiştir. Ayrıca yüklerin endüktifliği arttığı için SVC'nin tetikleme açısı yükselmiştir. Bu veriler göz önüne alındığında SVC'nin nominal yüküne yakın değerinde yüklenmesi halinde daha az harmonikli sonuçlar ürettiği ve daha başarılı çalıştığı söylenebilir.

Aynı şekilde Çizelge 7.6'da bu şartlar için şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değeri verilmiştir.

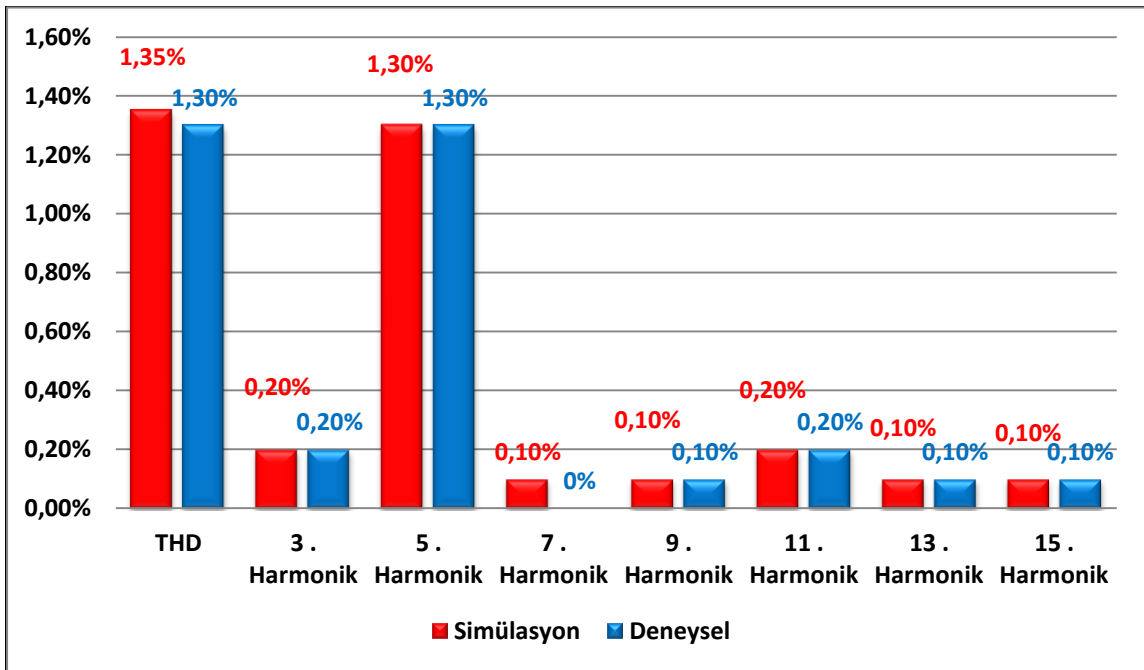
Çizelge 7. 6 3 adet 220Ω ve 0,4H değerinde yük svc ile kompanze edildiğinde sisteme bağlı durumda iken ölçülen parametreler

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Değerler	2,12	213,8	456,5	447,8	75 (dist)	0,95	1

Sonuçlardan görüldüğü gibi sadece yüklerin olması durumuna göre akım görünür güç ve reaktif güç değerlerinde oldukça düşüş yaşanmış ayrıca güç faktörü değeri ve $\cos \phi$ değeri 1'e yaklaştırılmıştır.

SİMÜLASYON VE DENEYSEL ÇALIŞMALARIN KARŞILAŞTIRILMASI

Simülasyon çalışmalarının doğrulanması ve farklı şartlar altında sonuçlarında incelenebilmesi için deneysel çalışmalar ve simülasyon çalışmaları karşılaştırılmıştır. Öncelikle şebeke geriliminin doğru modellenbildiğinin gösterilmesi açısından şebeke gerilimi modellenmiştir. Şebeke gerilim harmonikleri için gerçek değerler ve simülasyon değerlerinin karşılaştırılmış hali Şekil 8.1’de sunulmuştur.

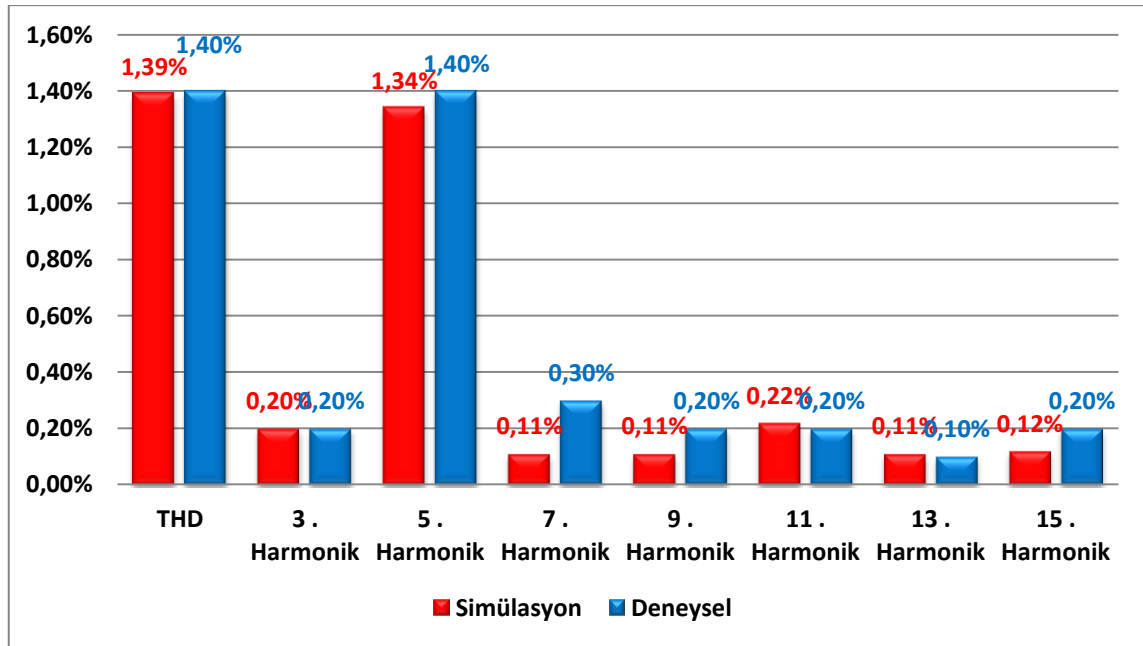


Şekil 8. 1 Trafo boşa çalışırken çıkışından ölçülen şebeke harmonikleri için simülasyon ve deneysel sonuçların karşılaştırılması

Sonuçlar görüldüğü gibi çok yakın çıkmıştır. THD değeri ihmal edilecek kadar simülasyon sonuçlarında daha yüksektir bunun iki sebebi vardır. İlk olarak Matlab

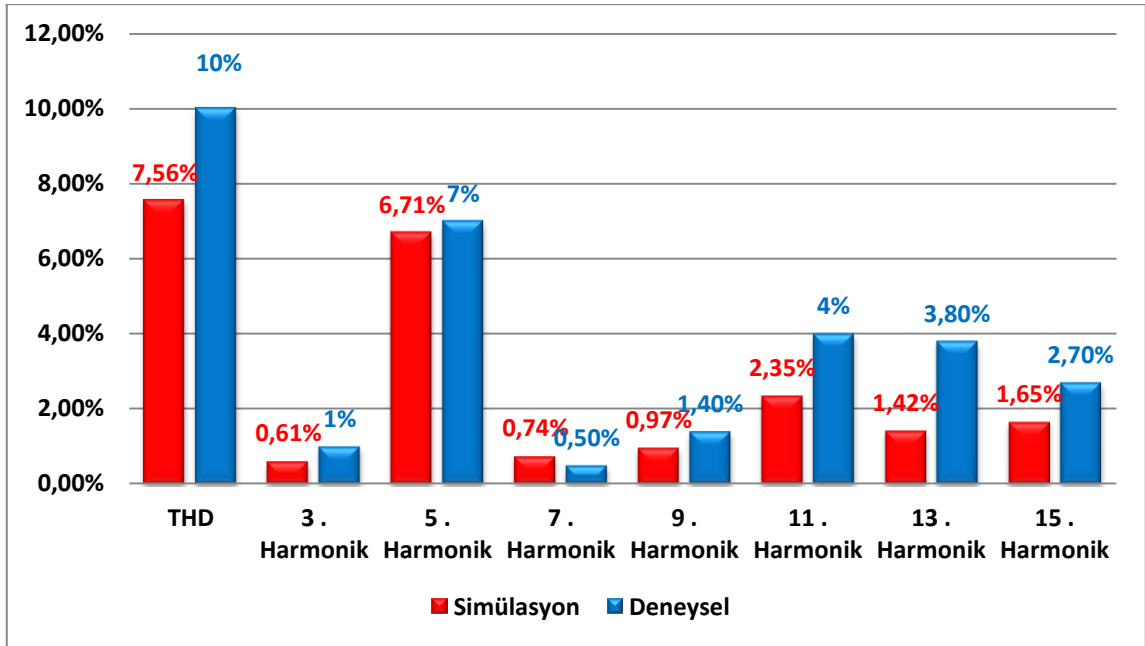
ortamında yapılan simülasyonun daha hassas ölçüm yapabilmekte ve çok daha ileri mertebeli harmonik değerleri az da olsalar THD hesaba katabilmektedir. Kullanılan analizör ise virgülden sonra sadece 1 hane gösterdiği için ayrıntılı veriler alınamamış sonuçlar en fazla bu kadar yaklaştırılabilmiştir. Bir başka sebep ise geliştirilen gerilim kaynağı modeli bütün çalışmalarda kullanılmıştır bu sebeple ileriki çalışmalarda şebeke harmonik verilerinde gözlenen 7. Harmonik değeri en baştan hesaba katılmıştır. Analizörün bu evreyi 0 olarak göstermesinin sebebi muhtemelen hassaslığının daha düşük olmasıdır. Bu sebeplere rağmen şebeke ve trafo oldukça başarılı modellenmiş ve ölçümlere çok yakın sonuçlar elde edilmiştir.

İkinci aşama da ise SVC'nin kondansatörü modellenmiş ve trafo çıkışına bağlanmıştır. Bu çalışmada tetikleme sinyali üretilmesede devre kayıpları dikkate alınacağından SVC sistemi tamamen modellenmiş sadece kontrol sinyalleri üretilmemiştir. Bu şartlar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması Şekil 8.2'de verilmiştir.



Şekil 8. 2 Trafo çıkışına 30 μ F kondansatör bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması

Görüldüğü gibi bu çalışmada da gerilim harmonikleri oldukça yakın bir değerde modellenmiştir. Aynı çalışmada akım harmoniklerinin karşılaştırılması da Şekil 8.3'de verilmiştir.



Şekil 8. 3 Trafo çıkışına 30 µF kondansatör bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması

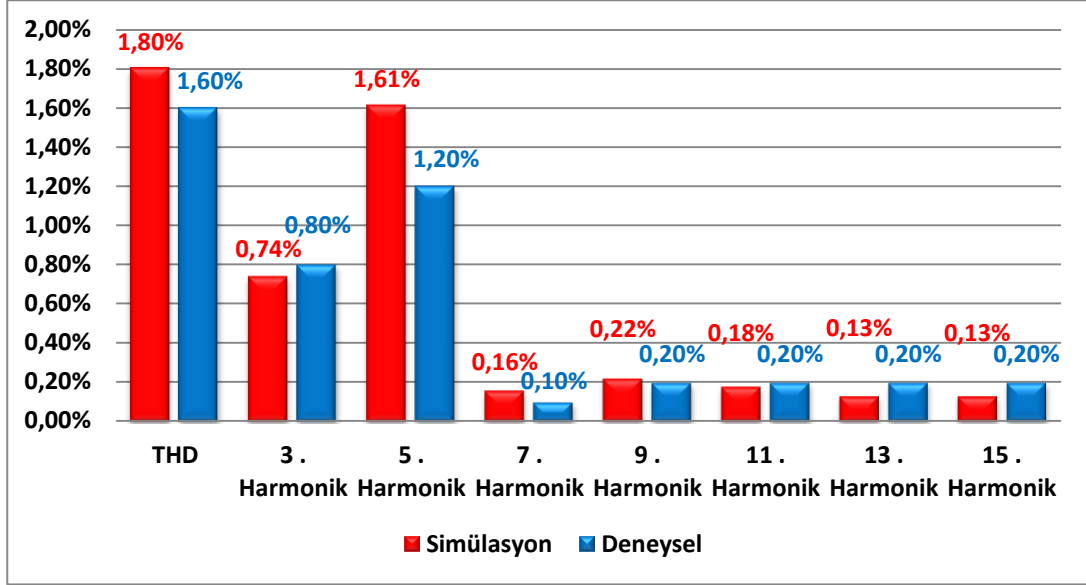
Akım harmonikleri de büyük ölçüde başarıyla modellenmiştir ancak şebeke modeli sonsuz şebeke kabul edildiği için rezonans etkileri tahmin edilenden farklı olabilmiş bu yüzden ufak farklılıklar doğmuştur. Bu şartlar altında Çizelge 8.1’de şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değerleri karşılaştırılmıştır.

Çizelge 8. 1 Trafo çıkışına 30 µF kondansatör bağlandığında şebekeden çekilen parametrelerin karşılaştırılması

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Simülasyon	2,09	221,67	464,3	6,73	463 (kap)	0,014	0,032
Deneysel	2,075	221,7	459	6,7	458,8 (kap)	0,01	0,01

Çizelge 8.1’den okunan değerler de modellemenin oldukça başarılı olduğunu göstermektedir.

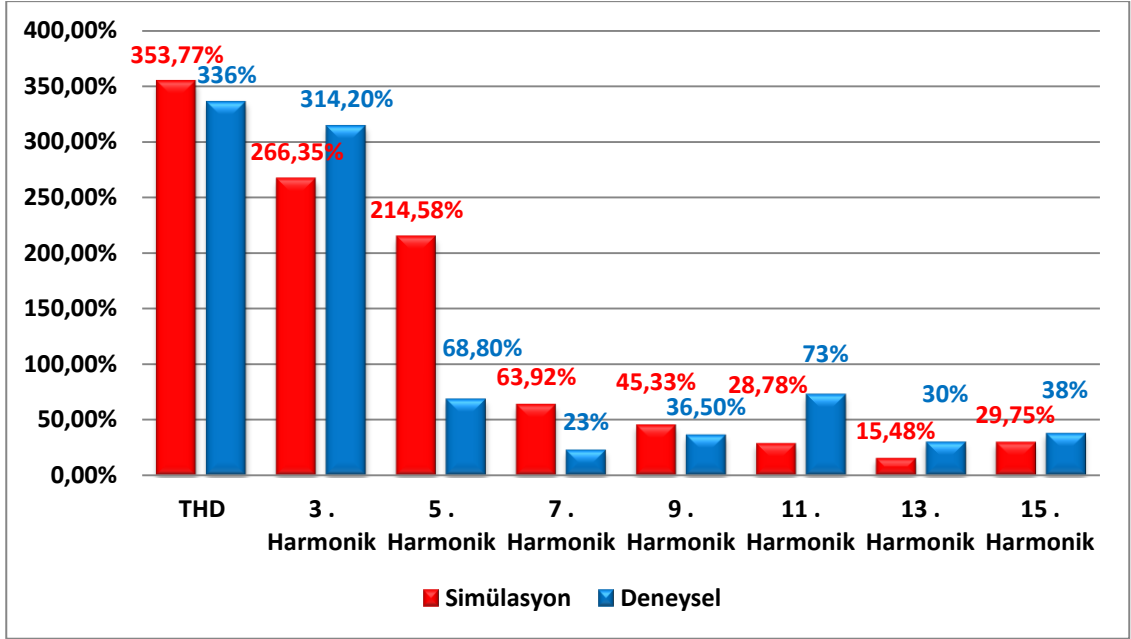
Çalışmanın bir sonraki aşamasında sadece SVC şebekeye bağlanmıştır. Kendi sabit kondansatörünü kompanze edecek şekilde endüktansın triyak veya tristörleri hem simülasyon hem de deneysel çalışmalarda 106° ile tetiklenmiştir. Bu şartlar altında gerilim harmonikleri incelendiğinde Şekil 8.4’teki sonuçlar elde edilmiştir.



Şekil 8. 4 Sadece SVC sisteme bağlı olduğu durumda deneysel ve simülasyon çalışmalarında gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması

Görüldüğü gibi bu şartlar altında da yakın değerler elde edilmiştir. Oluşan bir miktar farklılıkların başlıca sebebi şebeke harmoniklerinin deneysel çalışma sırasında değişkenlik göstermesidir. Simülasyonda ise bu değerler sabit ilk yapılan ölçüme göre alınmıştır. Harmonikler çok büyük değişiklikler göstermeyeceği için sonuçlar genel olarak oldukça yakın çıkmıştır. Ancak hazırlanan model eğer değişken veriler mevcut ise değişken verilerle çalışabilecek şekilde hazırlanmıştır. Yine unutulmaması gereken bir noktada Matlab ile güç analizörünün ölçüm hassaslığının farklı olmasıdır.

Aynı şartlar altında akım harmonikleri de Şekil 8.5’de incelenmiştir.



Şekil 8. 5 Sadece SVC sisteme bağlı olduğu durumda deneysel ve simülasyon çalışmalarında akım harmoniklerinin karşılaştırılması

Sonuçlar birbirine yakın çıkmıştır ancak 5 ve 7. Harmonik mertebelerinde şebeke empedansı ayrıntılı olarak modellenmeyip şebeke sonsuz şebeke kabul edildiği için simülasyonda 5. Harmonik civarında meydana gelen rezonans olayı deneysel çalışmada 11. Harmonik civarlarında meydana gelmiştir. Sonuçlar büyük oranda etkilenmediği için eğer şebeke verilerini elde etmesi zor ise bu model rahatlıkla kullanılabilirliği gösterilmiştir.

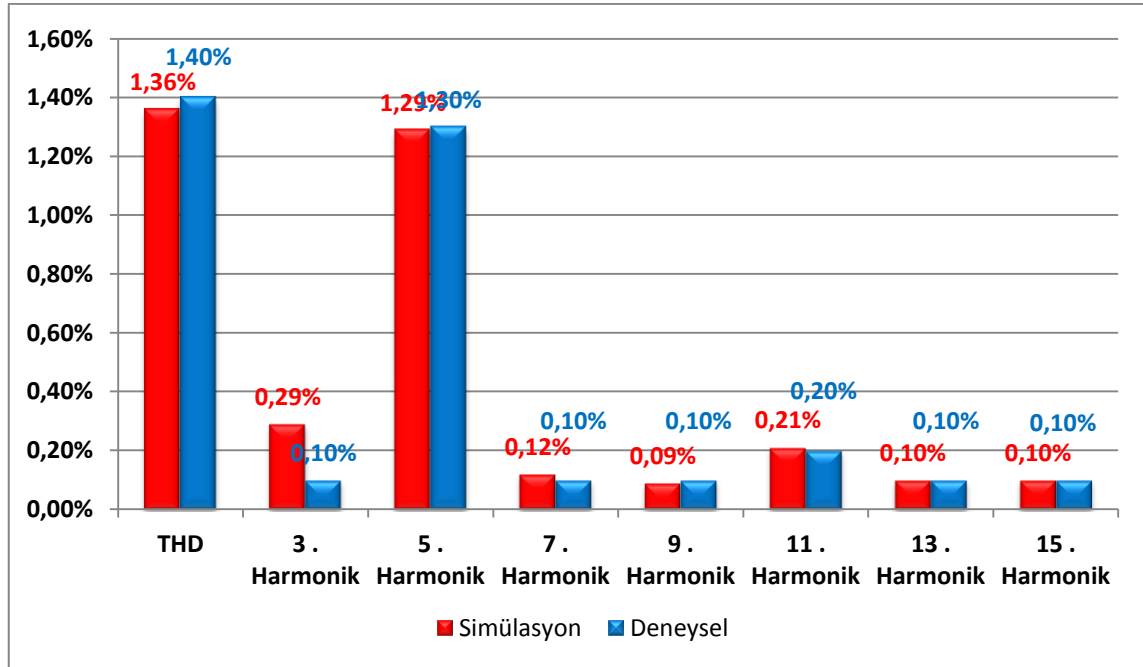
Özellikle Çizelge 8.2’de şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değerleri incelendiğinde sonuçlar daha net anlaşılmaktadır.

Çizelge 8. 2 Sadece SVC sisteme bağlı olduğu durumda şebekeden çekilen parametrelerin karşılaştırılması

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Simülasyon	0,59	220,72	130,2	35,36	125,31 (dist)	0,27	1
Deneysel	0,6	220,2	132	36,8	132 (dist)	0,28	1

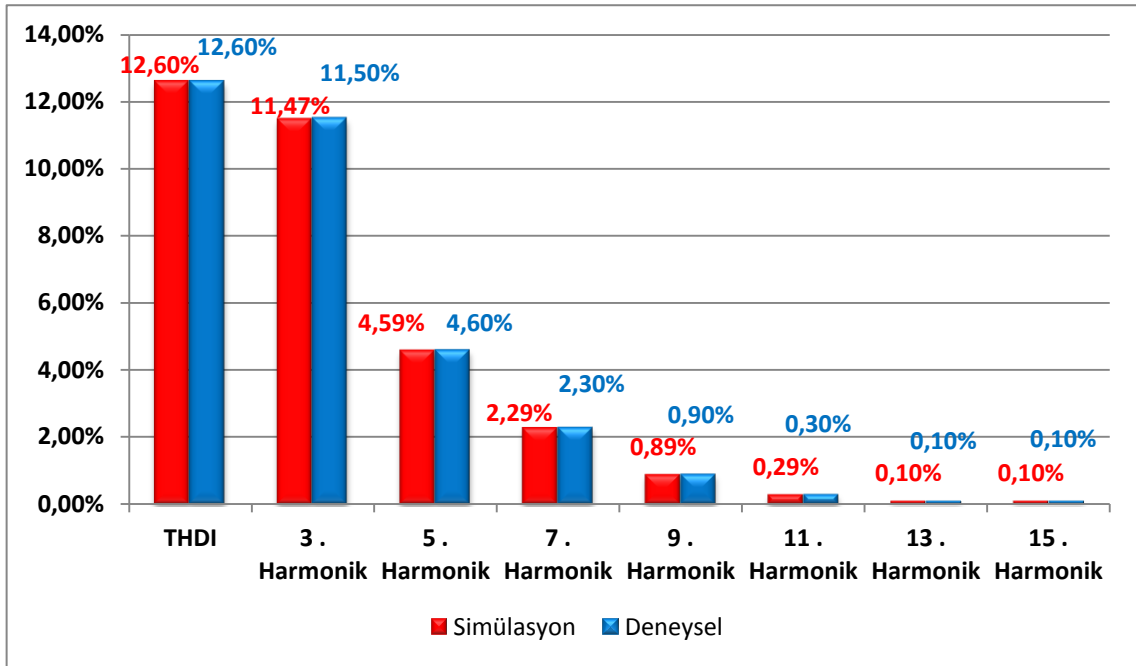
Elde edilen verilerden simülasyon ve deneysel çalışma verilerinin büyük oranda örtüştüğü görülmüştür. Simülasyondaki modeller bu şekilde doğrulandıktan sonra çalışmada bir sonraki aşama olan nonlinear yükler ile çalışma durumu karşılaştırılmıştır.

Bu amaçla trafo çıkışına 220Ω ve 0,4H değerinde nonlinear bir yük bağlanmıştır. Yükün trafo çıkışına bağlanması halinde gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması Şekil 8.6'da verilmiştir.



Şekil 8. 6 Sadece 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması

Gerilim harmoniklerinde büyük bir farka rastlanamamıştır hatta rastlanan farklar analizörün ölçüm hata payı içinde ihmal edilecek kadar azdır. Aynı durum için akım harmoniklerinin karşılaştırılması Şekil 8.7'de verilmiştir.



Şekil 8. 7 Sadece 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması

Sonuçlardan görüldüğü doyuma giren endüktif elemanlar seçilirse akımlar tepe değerlerine ulaşmadan daha düşük değerlerde doyuma girecektir. Bu Şebekeden tepesi kesik akımların çekilmesine böylelikle de 3. Harmonik bileşenli akımların artmasına yol açmaktadır. Sonuçlarda görüldüğü gibi simülasyon ve deneysel çalışma sonuçları oldukça yakındır. Zaten yükler deneysel çalışmalarda ölçülen verilere göre modellenmiştir.

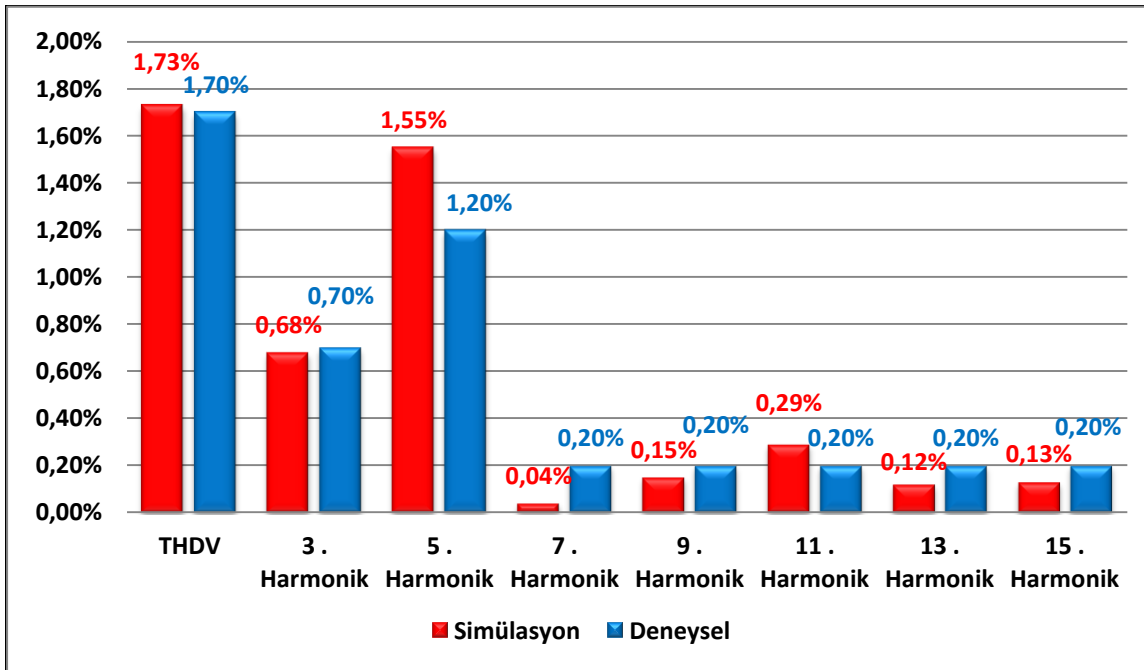
Bu şartlar altında şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değerleri Çizelge 8.3'te verilmiştir.

Çizelge 8. 3 Sadece 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında ölçülen parametrelerin karşılaştırılması

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Simülasyon	0,791	218,7	172,95	139,99	101,54 (end)	0,8095	0,816
Deneysel	0,789	218,3	171,3	144,3	92,4 (end)	0,84	0,85

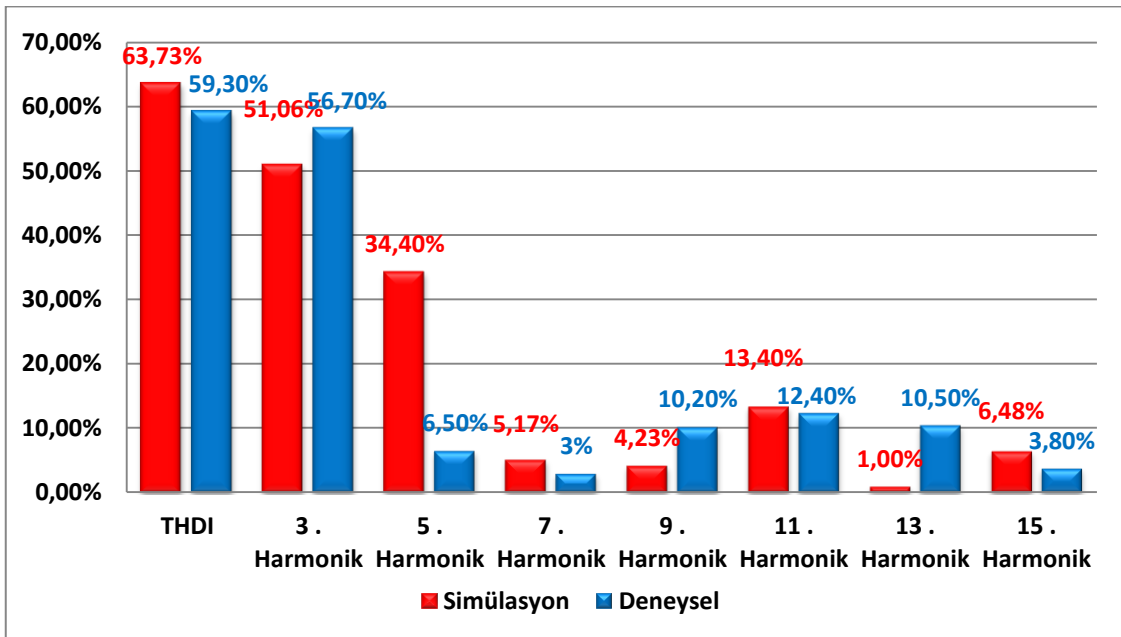
Sonuçlardan görüldüğü veriler birbirine yakın çıkmaktadır.

Aynı yüklerin SVC ile kompanze edildiği durumlar simülasyon ve deneysel çalışmalar için karşılaştırılırsa gerilim harmonikleri Şekil 8.8'deki gibi olur.



Şekil 8. 8 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması

Gerilim harmonikleri SVC'nin aktif olduğu durumda da oldukça yakın çıkmaktadır. Şekil 8.9'da verilen akım harmonikleri incelendiğinde akım harmoniklerinde de (5. Harmonik hariç) oldukça yakın sonuçlar elde edildiği gözlemlenebilir.



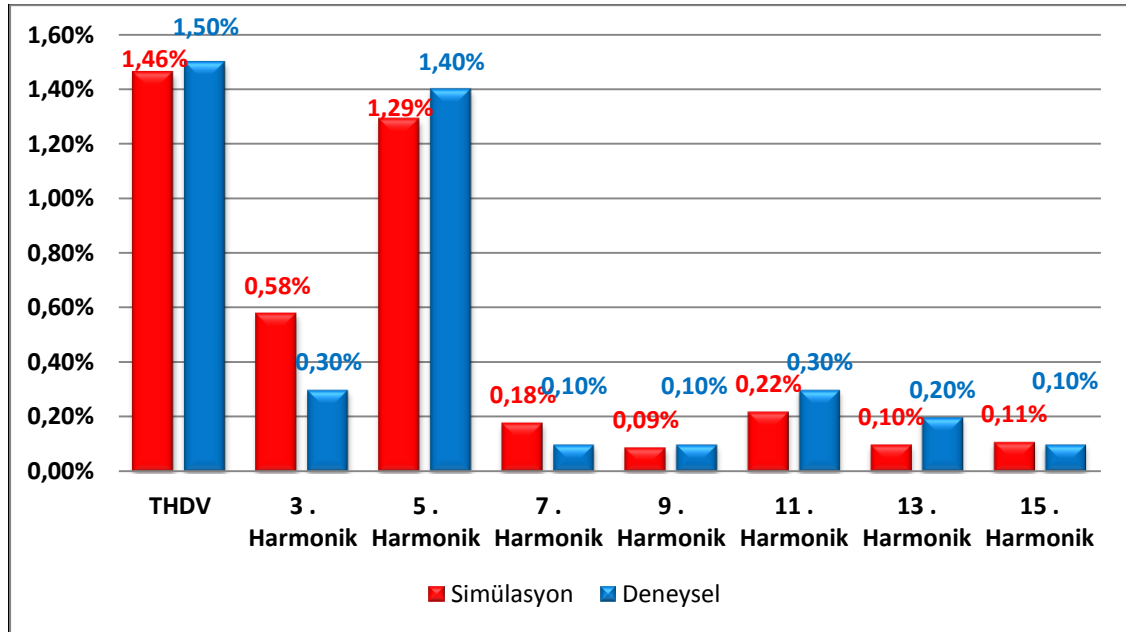
Şekil 8. 9 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması

Şebekenin sonsuz şebeke olarak modellenmesi gibi etkenlerden ötürü değerlerde bazı farklılıklar oluşsa da simülasyon ve deneysel veriler büyük ölçüde yakınlık göstermektedir. Ancak belli noktalarda rezonans frekanslarının kayması hata payını arttırmakla beraber THD değerinde çok büyük bir değişiklik olmamaktadır. Ayrıca Çizelge 8.4'te gözlemlenebildiği gibi şebekeden çekilen aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değerlerinde büyük değişiklikler olmamaktadır.

Çizelge 8. 4 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde ölçülen parametrelerin karşılaştırılması

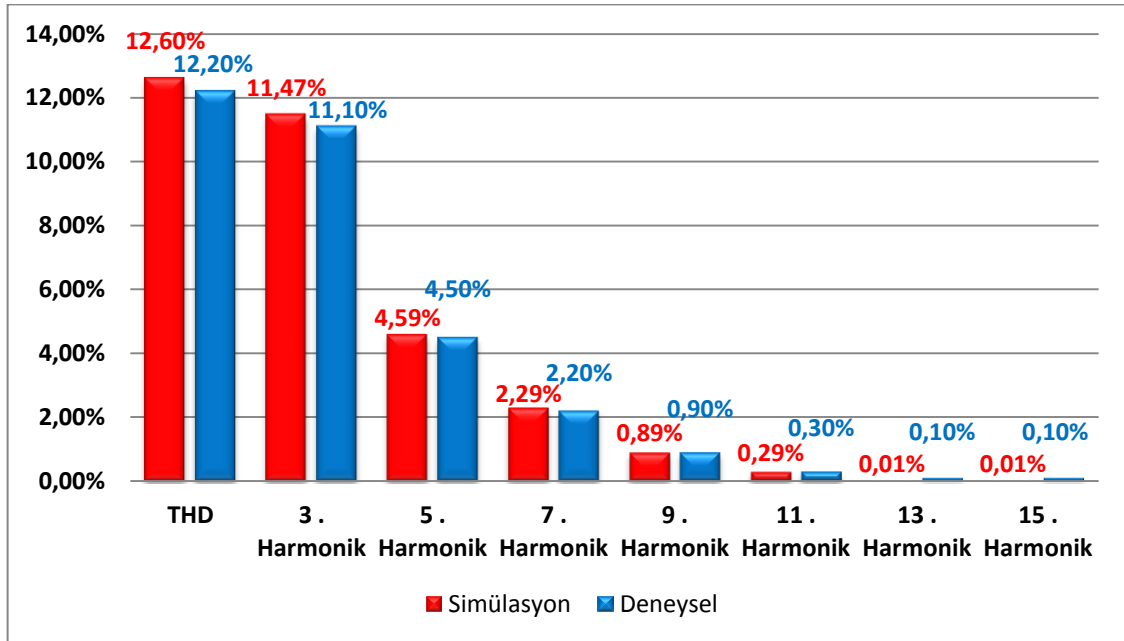
	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Simülasyon	0,913	218,34	199,44	168,13	107,28 (dist)	0,843	1
Deneysel	0,94	217,4	205	173,2	104,5 (dist)	0,85	1

Aynı şekilde yükler 3 katına çıkarıldığında sadece yükler trafo çıkışındayken gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması Şekil 8.10'da verilmiştir.



Şekil 8. 10 Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması

Görüldüğü gibi gerilim harmonikleri bu şartlar altında da oldukça yakın çıkmıştır. Şekil 8.11’de akım harmonikleri karşılaştırılmıştır.



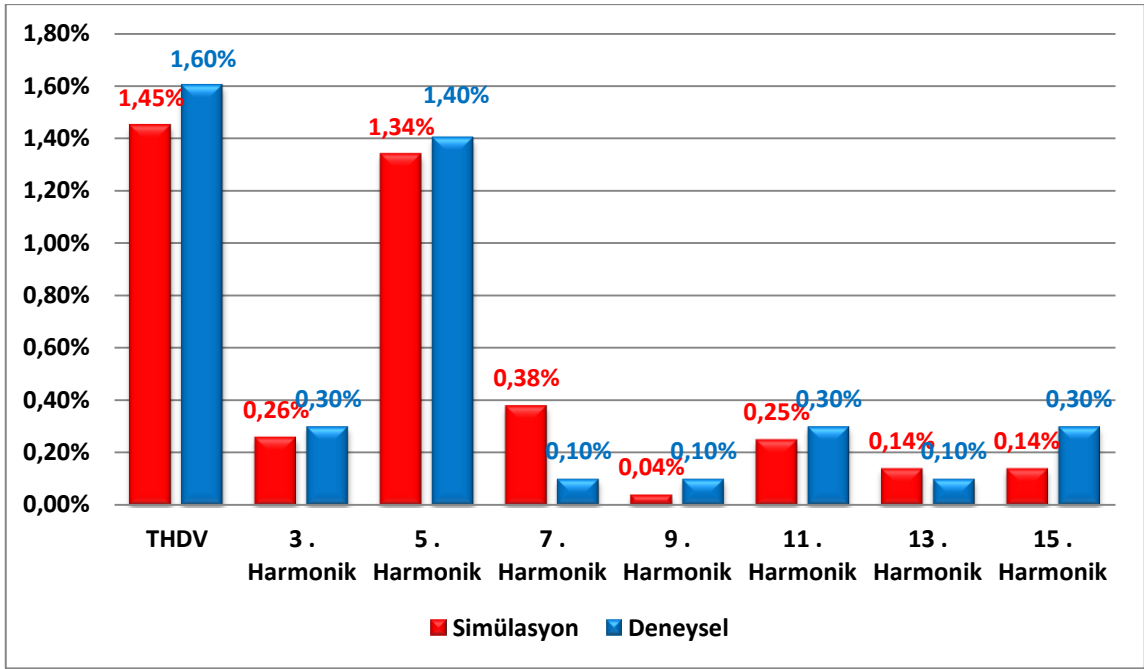
Şekil 8. 11 Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması

Bu yüklerin şebekeden çektikleri aktif, reaktif ve görünür güç değerleri ile akım ve gerilimin RMS değerleri, güç faktörü ve $\cos \phi$ değerleri Çizelge 8.5’te verilmiştir.

Çizelge 8. 5 Sadece 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler trafo çıkışına bağlandığında ölçülen parametrelerin karşılaştırılması

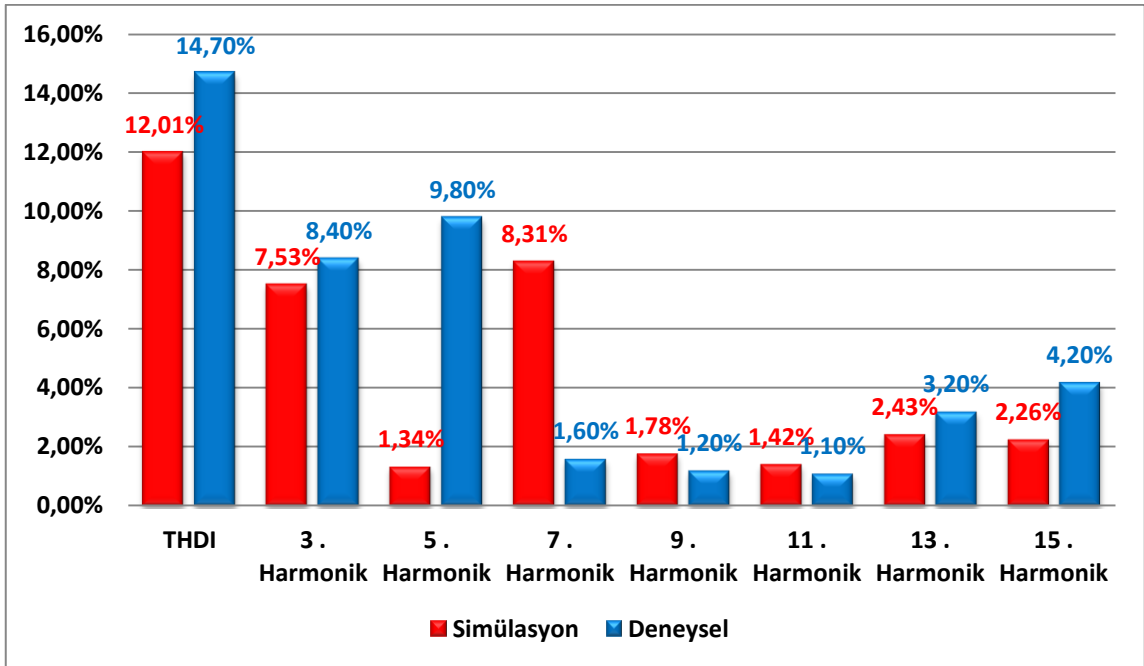
	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Simülasyon	2,37	213,48	506,43	405,62	303,22 (end)	0,8009	0,8074
Deneysel	2,36	214,3	508	429	268 (end)	0,85	0,86

Bu yükler SVC ile kompanze edildiğinde gerilim harmoniklerinin simülasyon ve deneysel çalışmalar için karşılaştırılması Şekil 8.12’de verilmiştir.



Şekil 8. 12 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde simülasyon ve deneysel çalışmalar için gerilim harmoniklerinin karşılaştırılması

Görüldüğü gibi başlıca harmonik bileşenlerdeki farklar azdır. Şekil 8.13'te Akım harmonikleri karşılaştırılması verilmiştir.



Şekil 8. 13 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yükler SVC ile kompanze edildiğinde simülasyon ve deneysel çalışmalar için akım harmoniklerinin karşılaştırılması

Çizelge 8.6'da güç ve güç faktörü değerleri gösterilmiştir.

Çizelge 8. 6 3 adet 220Ω ve 0,4H değerine sahip yük SVC ile kompanze edildiğinde ölçülen parametrelerin karşılaştırılması

	Akım (A)	Gerilim (V)	S (VA)	P (W)	Q (VAr)	PF	Cos ϕ
Simülasyon	2,009	213,56	429,11	425,87	52,644 (dist)	0,9924	1
DeneySEL	2,12	213,8	456,5	447,8	75 (dist)	0,95	1

SONUÇ VE ÖNERİLER

SVC'nin harmonik etkilerini incelemek üzerine yapılan bu tez çalışmasında, SVC farklı yüklenme durumları altında simülasyon ortamında ve deney düzeneği üzerinde test edilmiştir. Yapılan çalışmalarda ilk olarak SVC sistemi modellenebilmesi için şebeke boştayken ölçümler alınmıştır. Bu verilerden faydalanılarak şebeke modeli oluşturulmuştur. Ayrıca şebeke empedansını yükselterek akım harmoniklerinin gerilim harmonikleri üzerine etkilerini daha belirgin görmek amacı ile 1 kVA'lık izolasyon trafosu kullanılmıştır. Trafo verileri ölçümler sonucunda elde edilmiş ve simülasyon ortamında başarılı bir şekilde modellenmiştir. Ardından modellerden elde edilen sonuçlar deneysel sonuçlar ile doğrulanmıştır.

SVC ile yapılan çalışmalarda daha önceden de öngörüldüğü gibi SVC'nin büyük miktarda harmonik bileşen içeren akımlar çektiği görülmüştür. THD'nin çok yüksek değerlere ulaştığı tespit edilmiştir. Genel olarak bu konuda söylenmesi gereken ise SVC sistemlerinin harmonik filtreler ile beraber kullanılması gerektiğidir.

SVC sistemi öncelikle kompanze edebileceği maksimum reaktif gücün çok altında (yaklaşık olarak altıda biri) endüktif reaktif güce sahip bir yükte yüklenmiştir. Bir sonraki aşamada ise kompanze edebileceği maksimum reaktif gücün yaklaşık yarısı değerinde reaktif güce sahip bir güçle yüklenmiştir.

Yapılan çalışmalarda görülmüştür ki SVC sistemleri harmonikli akımlar çektiğinden dolayı nominal gücünün çok altında yükleri kompanze ettiklerinde oluşturdukları distorsiyon gücü kompanze ettikleri reaktif gücün üzerine çıkmaktadır. Bu durumda da

şebekeden çekilen akımın RMS değerini azaltmak için yapılan kompanzasyon işlemi amacından sapmaktadır. $\cos \phi$ değeri 1 olsa da güç faktörü değeri düşmekte ve şebekeden çekilen akımın RMS değeri kompanzasyon yapılmamış değere göre yükselmektedir. Bu sonuçlardan 2 adet çıktı elde edilmektedir. İlk olarak şebeke ölçümlerimde kullanılan sayaç sistemleri harmonik etkileri göz önüne almazsa yapılan kompanzasyon işlemleri fayda değil zarar getirebilmektedir. İkinci çıktı ise SVC sistemleri nominal güçlerinin altında reaktif güçlerle yüklendiğinde oluşturduğu harmoniklerden ötürü faydadan çok zarara sebep olabilmektedir. Bu nedenle mutlaka filtreli kullanıma özen gösterilmeli ve SVC elemanlarının değerleri hesaplanarak seçilmelidir.

Ayrıca deneysel çalışmaların ve simülasyon çalışmaların sonuçları incelendiğinde birbirine yakın sonuçlar elde edilmiştir. Buradan elde edilen bir diğer çıktı ise belirli ölçümler ve kolay elde edilebilir değerler ile karmaşık ve komplike sistemlerin uygulanmadan önce bilgisayar ortamında modellenilebilir ve sonuçların önceden öngörülebilir olduğunun gösterilmiş olmasıdır. Böylelikle sistem için yapılacak filtre tasarımı veya sisteme sonradan eklenecek elemanların sistem üzerine etkileri önceden tahmin edilebilir ve bu durumlara çözüm üretilebilir. Bu şekilde tasarlanan bir sistem sayesinde büyük yatırımların zarar etmesi veya hatalı üretim sonucu büyük maliyet kayıplarının önüne geçilebilir. Aynı şekilde sorun yaşanan sistemlerde bilgisayar üzerinden hızlı analizler ile çözümler üretilebilir ve testler yapılabilir. Bu çalışma sayesinde ileride bu tür sistemlerle karşılaşılması durumunda oluşabilecek problemler ve bunlara üretilebilecek çözümler için alt yapıda oluşturulmuştur.

Yapılan çalışmalarda, SVC'nin reaktör akımı sebebiyle harmonik kaynağı gibi davrandığı gözlenmiş olup, harmonik bileşenlerin azaltılması için yapılması gerekenler ortaya konulmuştur. Bu akımın genişliği ve tetikleme açısına bağlı olarak harmonikler değişkenlik göstermektedir. Çalışmada görüldüğü gibi eğer reaktör elemanı az devreye alınırsa büyük reaktif güce sahip yüklerde olduğu gibi harmonik değerleri oldukça azalmaktadır. Bu amaçla harmonik etkileri azaltmak ve hatta filtresiz kullanımı mümkün kılabilmek için yapılabilecek en uygun çalışmanın TSC-TCR SVC sistemleri olabileceği gözlemlenmiştir. Bu sistemlerde kademeli kondansatör grupları sayesinde sisteme ihtiyaç olunan kadar kondansatör devreye alınmakta ve böylelikle reaktörlerin

boyutları düşürülmektedir. Bu sayede de reaktörlerden kaynaklanan harmonik akımlar oldukça azalmaktadır. Gelecek çalışmalarda üzerine çalışılabilir bir konu olarak TSC-TCR SVC sistemleri öngörülmekte ve önerilmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] Akgün, Ö., (2006). Statik Var Kompanzatör ve Tristör Kontrollü Reaktör Tasarımı, Yüksek Lisans Tezi, Niğde Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Niğde.
- [2] Memiş, R., (2007). Statik Var Sistemlerinin Endüstriyel Ortamda Uygulanması, Yüksek Lisans Tezi, Sakarya Üniversitesi iFen Bilimleri Enstitüsü, Sakarya.
- [3] Ersamut, R., (2009). Statik Var Kompanzasyonu Sistemlerinin İncelenmesi ve Karşılaştırılması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [4] Bostancı, A., (2008). Statik Var Kompanzasyon Sistemi Tasarımı ve Uygulaması, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [5] Kıyan, M., (2010). Tristör Denetimli Reaktörlü Alçak Gerilim Tepkin Güç Kompanzasyonunun Gerçekleştirilmesi, Yüksek Lisans Tezi, Hacettepe Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [6] Çağlar, T., (2009). Harmoniklerin Akım Transformatörü Performansına Etkisinin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [7] Filiz, C., (2006). Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale.
- [8] Yılmaz, M., (2006). Elektrik Sistem Tasarımında Harmoniklerin Giderilmesi İçin Bir Analiz, Yüksek Lisans Tezi, İTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [9] Mutluer, H., (2008). Design, Implementation And Engineering Aspects Of TCR For Industrial SVC Systems, Doktora Tezi, ODTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.
- [10] Park, B., Lee, H., Jang, G. ve Han, B., (2009). "A Fault Analysis Of DC Electric Arc Furnaces With SVC Harmonic Filters In A Mini-Mill plant" Electrical Power System Research, 80:807-814.
- [11] Luo, A., Shuai, Z., Zhu, W. ve Shen, J., (2009). "Combined System for Harmonic Suppression and Reactive Power Compensation", IEEE Transactions on Industrial Electronics, 56:418-428.
- [12] Abdulla, M. ve Salameh, Z., (2000). "A Graphical Method To Determine The Harmonic Magnification In Radial Feeders Due To SVC Operation", Electric Power Systems Research, 57:9-14,
- [13] Chang, Y., Tseng, W. and Tsao, T., (2005). "Application Of Combined Feasible-Direction Method and Genetic Algorithm To Optimal Planning Of Harmonic Filters

Considering Uncertainty Conditions”, IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., 152:729-736.

- [14]Kodsi, S., Canizares, C. and Kazerani, M., (2005). “Reactive Current Control Through SVC For Load Power Factor Correction”, Electric Power Systems Research, 76:701–708.
- [15]Bao, M., Xia, J., Yin, X., Dong, M., He, H. and He, J., (2010). “Harmonic Measurements and Analysis In A Modern Steel Manufacturing Facility”, Huazhong University of Science & Technology, IEEE 978-1-4244-6551-4/10.
- [16]Uzunoglu, M. ve Kocatepe, C., (2001). “Tristör Kontrollü Reaktör İçeren Statik VAR Kompanzatörler ve Harmonik Etkinliği”, 3e-Electrotech, 82:116-120.
- [17]Kocatepe, C., (1995). Sinüsoidal Olmayan Yükleri İçeren Enerji Sistemlerinde HarmonikYük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [18]Yumurtacı, R., (2000). Lineer Olmayan Dengesiz Yükler İçeren Enerji Sistemlerinde Üç Fazlı Harmonik Yük Akışı Analizi ve Simülasyonu, Doktora Tezi, YTÜ Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [19]Yeşil, M., (1996) Enerji Sistemi Üzerindeki Nonlineer Yüklerin Etkileri ve Alınabilecek Önlemler, Yüksek Lisans Tezi, M.Ü Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [20]Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş A., Arıkan, O., (2003). “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi, İstanbul.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Muhammed Ali KOYUNCU
Doğum Tarihi ve Yeri : 20.08.1984, İstanbul
Yabancı Dili : İngilizce
E-posta :mkoyuncu84@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	Alan	Okul/Üniversite	Mezuniyet Yılı
Yüksek Lisans	Elektrik Tesisleri	Yıldız Teknik Üniversitesi	Devam ediyor
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2008
Lise	Fen Bilimleri	Kocaeli Körfez Fen Lisesi	2003

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	Firma/Kurum	Görevi
2010- 2012	Türk Hava Yolları A.Ş	İkinci Pilot Adayı
2009- 2010	Akademi Elektrik Ltd. Şti	Elektrik Mühendisi
2008- 2009	ASM Telekomünikasyon Ltd. Şti	Elektrik Mühendisi