T.C.
YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİK PROBLEMİ OLAN TESİSLERDE HARMONİK FİLTRELİ KOMPANZASYON SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

MEHMET BAHA ŞERBETÇİ

YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ ANABİLİM DALI
ELEKTRİK TESİSLERİ PROGRAMI

DANIŞMAN
DR. ÖĞR. ÜYESİ ERDİN GÖKALP

İSTANBUL, 2019

T.C.

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

HARMONİK PROBLEMİ OLAN TESİSLERDE HARMONİK FİLTRELİ KOMPANZASYON SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Mehmet Baha ŞERBETÇİ tarafından hazırlanan tez çalışması 20.05.2019 tarihinde aşağıdaki jüri tarafından Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı'nda **YÜKSEK LİSANS TEZİ** olarak kabul edilmiştir.

Tez Danışmanı

Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP

Yıldız Teknik Üniversitesi

Jüri Üyeleri

Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

Prof. Dr. Osman KILIÇ

Marmara Üniversitesi _____

Doç. Dr. Recep YUMURTACI

Yıldız Teknik Üniversitesi _____

ÖNSÖZ

Elektrik enerjisi hayatımızda yeri doldurulamaz bir konumdadır. Elektrikten temel beklentilerimiz, kesintisiz, ekonomik, emniyetli, verimli, kaliteli ve çevreci olmasıdır. Harmonikler tüm bu beklentiler üzerinde olumsuz etkileri olan önemli bir güç kalitesi problemidir. Bu problemin çözümü için öncelikle harmonik üretmeyen makine ve cihazların tercih edilmesi, bunun mümkün olmadığı durumlarda harmonik filtrelerinin kullanılması gerekmektedir.

Bu çalışmada ülkemizde yaygın olarak kullanılan harmonik filtreli kompanzasyon sistemlerinin teknik analizi yapılmıştır. Konuya ilişkin bir çelik tel üretim tesisinde saha uygulaması ve simülasyon çalışması gerçekleştirilerek elde edilen sonuçlar sunulmuştur.

Tez çalışmamın faydalı olacağı temennisiyle;

Bana her türlü konuda ilgi ve desteğini esirgemeyen tez danışmanım Sayın Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP'e, sahip olduğu kaynaklar ve bilgisiyle çalışmama önemli katkılarda bulunan Sayın Dr. Öğr. Üyesi Oktay ARIKAN'a, yaklaşık 40 senedir gerçekleştirdiği projelerden edindiği tecrübe ve bilgileri paylaşan PESA Elektrik ailesine, bir çok konuda fikrine ve yardımına başvurduğum değerli Ağabeyim Barış ŞERBETÇİ'ye, yoğun çalışma dönemlerimde anlayışıyla ve sabrıyla bana desteğini hiçbir zaman esirgemeyen sevgili eşim Asena Berra ŞERBETÇİ'ye, sevgisiyle moral ve motivasyon kaynağım olan Oğlum Selim'e, Annem'e, Babam'a, Ablam'a ve emeği geçen herkese teşekkür ederim.

Mayıs, 2019

Mehmet Baha ŞERBETÇİ

İÇİNDEKİLER

Sayfa

SİMGE LİSTESİ vii

KISALTMA LİSTESİ ix

ŞEKİL LİSTESİ x

ÇİZELGE LİSTESİ xii

ÖZET xiii

ABSTRACT xv

BÖLÜM 1

GİRİŞ 1

1.1 Literatür Özeti 2
1.2 Tezin Amacı 6
1.3 Hipotez 7

BÖLÜM 2

HARMONİKLERLE İLGİLİ TANIM VE KAVRAMLAR 8

2.1 Harmoniklerin Tanımlanması 8
2.1.1 Harmonikli Dalga Şekline Örnek – 1 10
2.1.2 Harmonikli Dalga Şekline Örnek – 2 12
2.2 Harmoniklerin Matematiksel İfadesi 15
2.2.1 Fourier Analizi 15
2.2.2 Elektriksel Büyüklükler 16
2.2.2.1 Akım ve Gerilim Denklemleri 16
2.2.2.2 Güç Denklemleri 17
2.2.2.3 Toplam Harmonik Bozulma (THB) 17
2.2.2.4 Toplam Talep Bozulumu (TTB) 18
2.2.2.5 Güç Faktörü (PF) 18
2.2.2.6 K Faktörü 19
2.3 Standart ve Yönetmelikler 20

2.3.1 Limit Değerler 20
2.3.2 Harmonik Ölçümü ve Sonuçların Değerlendirilmesi 23

BÖLÜM 3

HARMONİKLERİN OLUŞUMU VE ETKİLERİ 25

3.1 Harmonik Kaynakları 27
3.1.1 Transformatörler 27
3.1.2 Generatörler 28
3.1.3 Ark Fırınları 28
3.1.4 Kaynak Makineleri 28
3.1.5 Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS) 29
3.1.6 Asenkron Motor Hız Kontrol Sürücüleri 29
3.1.7 Gaz Deşarjlı ve Led Aydınlatma Armatürleri 30
3.2 Harmoniklerin Etkileri 30
3.2.1 Harmoniklerin Enerji Verimliliğine Olan Negatif Etkisi 30
3.2.1.1 İletkenler Üzerindeki Kayıplar 31
3.2.1.2 Transformatörler Üzerindeki Kayıplar 31
3.2.1.3 Motor ve Generatörler Üzerindeki Kayıplar 32
3.2.1.4 Dielektrik Kayıpları 33
3.2.2 Kondansatörlerin Hasar Görmesi 33
3.2.3 Koruma Sistemlerinin Hatalı Çalışması 34
3.2.4 Rezonans Etkisi 35

BÖLÜM 4

HARMONİK FİLTRE TÜRLERİ 37

4.1 Aktif Filtreler 38
4.1.1 Seri Aktif Filtre 39
4.1.2 Şönt Aktif Filtre 39
4.1.3 Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyicisi 40
4.2 Pasif Filtreler 40
4.2.1 Seri Pasif Filtre 40
4.2.2 Şönt Pasif Filtre 41
4.2.2.1 Tuned Filtre 41
4.2.2.2 Çift Ayarlı Filtre 42
4.2.2.3 Sönümlü (Yüksek Geçiren) Filtre 42
4.2.2.4 HFKS (Detuned) Filtre 42
4.3 Hibrit Filtreler 43
4.3.1 Seri Aktif ve Şönt Pasif Filtre 43
4.3.2 Şönt Aktif ve Şönt Pasif Filtre 43
4.3.3 Seri Pasif ve Şönt Pasif Filtre 44

BÖLÜM 5

HARMONİK FİLTRELİ KOMPANZASYON SİSTEMLERİ (HFKS) 45

5.1 HFKS‘nin Tasarımı 49

5.2 Rezonans Frekansı 134 Hz Olan Filtreler 51
5.3 Rezonans Frekansı 189 Hz Olan Filtreler 53
5.4 Rezonans Frekansı 210 Hz Olan Filtreler 54
5.5 Örnek Tasarım ve Karşılaştırma 56
5.5.1 Filtresiz Kompanzasyonun Paralel Rezonans Analizi 59
5.5.2 134 Hz Rezonans Frekanslı HFKS'nin Paralel Rezonans Analizi 61
5.5.3 189 Hz Rezonans Frekanslı HFKS'nin Paralel Rezonans Analizi 63
5.5.4 210 Hz Rezonans Frekanslı HFKS'nin Paralel Rezonans Analizi 64
5.5.5 Limit Değerler Açısından Karşılaştırma 66

BÖLÜM 6

UYGULAMA VE SİMÜLASYON ÇALIŞMASI 68

6.1 Limit Değerlerin Belirlenmesi ve Ölçüm Metodu 72
6.2 Uygulama Öncesi Ölçüm Sonuçları 75
6.3 Filtre Tasarımı 83
6.4 Simülasyon Çalışması 84
6.5 Uygulama Sonrası Ölçüm Sonuçları 89
6.6 Sonuçların Karşılaştırılması 97

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER 98

KAYNAKLAR 101

ÖZGEÇMİŞ 104

SİMGE LİSTESİ

THD_I	Akım için toplam harmonik distorsiyon oranı
R	Direnç
L	Endüktans
C	Kapasitans
I_{SC}	Şebeke bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımı
I_L	12 aylık ölçüm süresince şebeke bağlantı noktasından çekilen yük akımının temel bileşen etkin değerinin 15 veya 30 dakikalık ortalamalarının en büyüğü
f	Frekans
f_1	Temel frekans
n	Harmonik bileşenin mertebesi
U	Gerilim
I	Akım
A_0	İşaretin DC bileşeni
V_n	Gerilimin n. harmonik bileşen etkin değer
I_n	Akımın n. harmonik bileşen etkin değer
w	Açısal hız
w_1	Temel bileşen açısal hız
ϕ_n	n. bileşendeki gerilim faz açısı
δ_n	n. bileşendeki akım faz açısı
I_{RMS}	Akımın efektif değeri
V_{RMS}	Gerilimin efektif değeri
D	Distorsiyon güç
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
S	Görünür güç
THB_U	Gerilim için toplam harmonik bozulma
THB_I	Akım için toplam harmonik bozulma
U_1	Gerilimin temel bileşen etkin değeri
I_1	Akımın temel bileşen etkin değeri
U_h	Gerilimin harmonik bileşen etkin değeri
I_h	Akımın harmonik bileşen etkin değeri
HB_U	Gerilim için tekil harmonik bozulma oranı
TB	Akım için tekil talep bozulumu oranı

GF	Güç faktörü
THB_I	Akım için toplam harmonik bozulma oranı
k	Transformatör k katsayısı
S_H	Transformatörün emniyetli bir şekilde verebileceği güç değeri
$S_{nominal}$	Transformatörün nominal güç değeri
Z	Empedans
P_k	Isı kayıpları
P_L	Dielektrik kayıpları
tanδ	Dielektrik kayıp faktörü
U_C	Kondansatör uçlarındaki gerilim etkin değeri
X_C	Kapasitif reaktans
X_L	Endüktif reaktans
X_{Cn}	n. harmonik bileşendeki kapasitif reaktans
X_{Ln}	n. harmonik bileşendeki endüktif reaktans
$X_Ş$	Şebeke reaktansı
X_{tr}	Transformatör reaktansı
X_t	Şebeke reaktansı ile transformatör reaktansı toplamı
n_r	Rezonansın meydana geldiği harmonik bileşen
S_{tr}	Transformatör görünür güç değeri
Q_C	Kapasitif reaktif güç
u_k	Transformatörün bağıl kısa devre gerilimi
p	Filtre reaktör faktörü
f_r	Rezonans frekansı
X_{filtre}	Filtre reaktansı
Q_{filtre}	Filtre reaktif gücü
X_{trn}	Transformatörün n. harmonikte reaktansı
X_{fn}	Filtrenin n. harmonikte reaktansı
X_{cn}	Kondansatörün n. harmonikte reaktansı
ω	Akım ile gerilim arasındaki açı
S_k''	Başlangıç kısa devre gücü
I_a	A fazı akımı
I_b	B fazı akımı
I_c	C fazı akımı
V_a	A fazı – nötr gerilimi
V_b	B fazı – nötr gerilimi
V_c	C fazı – nötr gerilimi

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternating current
AG	Alçak gerilim
APF	Aktif güç filtresi
DC	Direct current
deg	Degree
EN	European Norm
HFKS	Harmonik filtreli kompanzasyon sistemi
IEC	The International Electrotechnical Commission
IEEE	The Institute of Electrical and Electronics Engineers
IGBT	Insulated Gate Bipolar Transistor
OG	Orta gerilim
RMS	Root mean square
SPF	Seri pasif filtre
Std	Standart
TCPF	Tristör kontrollü pasif filtre
TDD	Total Demand Distortion
THB	Toplam Harmonik Bozulma
THD	Total Harmonic Distortion
TS	Türk Standartları
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
TTB	Toplam Talep Bozulumu
UNFPA	United Nations Population Fund
UPS	Uninterruptible Power Source
VSI	Gerilim kaynağı inverteri
YG	Yüksek gerilim

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 2. 1 Harmonik içeren bir dalga şekli 8
Şekil 2. 2 Ram makinesine ilişkin gerilim ve akım dalga şekilleri 10
Şekil 2. 3 Ram makinesine ilişkin gerilim ve akım harmonikleri faz açıları 10
Şekil 2. 4 6 Darbeli UPS'e ilişkin gerilim ve akım dalga şekilleri 13
Şekil 2. 5 6 Darbeli UPS'e ilişkin gerilim ve akım harmonikleri faz açıları 13
Şekil 3. 1 Lineer yüklerin akım – gerilim karakteristikleri 26
Şekil 3. 2 Bir diyota ilişkin akım – gerilim karakteristiği 26
Şekil 3. 3 Akım harmoniklerinin gerilim düşümü etkisi 27
Şekil 3. 4 Seri rezonans durumunda tek hat ve empedans diyagramı 35
Şekil 3. 5 Paralel rezonans durumunda tek hat diyagramı 36
Şekil 4. 1 Harmonik filtre yapıları 37
Şekil 4. 2 Seri aktif filtre bağlantı şekli 39
Şekil 4. 3 Şönt aktif filtre bağlantı şekli 40
Şekil 4. 4 Birleşik güç kalitesi düzenleyicisi 40
Şekil 4. 5 Seri pasif filtre bağlantı şekli 41
Şekil 4. 6 Tuned (ayarlı) filtre bağlantı şekli 42
Şekil 4. 7 Çift ayarlı filtre bağlantı şekli 42
Şekil 4. 8 Seri aktif ve şönt pasif filtre bağlantı şekli 43
Şekil 4. 9 Şönt aktif ve şönt pasif filtre bağlantı şekli 44
Şekil 4. 10 Seri pasif ve şönt pasif filtre bağlantı şekli 44
Şekil 5. 1 HFKS (detuned filtre) bağlantı şekli 46
Şekil 5. 2 HFKS'nin frekans – empedans karakteristiği 47
Şekil 5. 3 Harmonik filtreli kompanzasyon panosu 48
Şekil 5. 4 İş merkezine ilişkin gerilim ve akım dalga şekilleri 57
Şekil 5. 5 Filtresiz kompanzasyon durumunda paralel rezonans eşdeğer devresi 59
Şekil 5. 6 Filtreli kompanzasyon durumunda paralel rezonans eşdeğer devresi 59
Şekil 5. 7 Filtresiz kompanzasyon durumunda tek hat diyagramı 60
Şekil 5. 8 134 Hz HFKS tek hat diyagramı 62
Şekil 5. 9 189 Hz HFKS tek hat diyagramı 63
Şekil 5. 10 210 Hz HFKS tek hat diyagramı 65
Şekil 6. 1 Tesisin tek hat diyagramı 70
Şekil 6. 2 Tesise ilişkin dağıtım şirketinin ölçüm raporu 71
Şekil 6. 3 Hioki PW3198 ile harmonik ölçümü 74
Şekil 6. 4 Uygulanan HFKS fotoğrafı 74

Şekil 6. 5 Uygulama öncesi gerilim harmonikleri 75
Şekil 6. 6 Uygulama öncesi şebekeden çekilen akımın temel frekans değeri 76
Şekil 6. 7 Uygulama öncesi toplam talep bozulumu grafiği 77
Şekil 6. 8 Uygulama öncesi 5. akım harmoniği grafiği 78
Şekil 6. 9 Uygulama öncesi 7. akım harmoniği grafiği 79
Şekil 6. 10 Uygulama öncesi 11. akım harmoniği grafiği 80
Şekil 6. 11 Uygulama öncesi 13. akım harmoniği grafiği 81
Şekil 6. 12 Uygulama öncesi 17. akım harmoniği grafiği 82
Şekil 6. 13 Tesisin tek hat şeması 83
Şekil 6. 14 Tesisin Matlab Simulink modeli 84
Şekil 6. 15 34500 Volt kaynak modellemesi 84
Şekil 6. 16 İletim hattı modellemesi 85
Şekil 6. 17 Transformatör modellemesi 85
Şekil 6. 18 Yük modellemesi 86
Şekil 6. 19 HFKS modellemesi 86
Şekil 6. 20 Akım harmonikleri modellemesi 87
Şekil 6. 21 Akım kaynağı modellemesi 87
Şekil 6. 22 Simülasyon sonuçları 88
Şekil 6. 23 Uygulama sonrası gerilim harmonikleri 89
Şekil 6. 24 Uygulama sonrası şebekeden çekilen akımın temel frekans değeri 90
Şekil 6. 25 Uygulama sonrası toplam talep bozulumu grafiği 91
Şekil 6. 26 Uygulama sonrası 5. akım harmoniği grafiği 92
Şekil 6. 27 Uygulama sonrası 7. akım harmoniği grafiği 93
Şekil 6. 28 Uygulama sonrası 11. akım harmoniği grafiği 94
Şekil 6. 29 Uygulama sonrası 13. akım harmoniği grafiği 95
Şekil 6. 30 Uygulama sonrası 17. akım harmoniği grafiği 96
Şekil 6. 31 THD-U grafiği 97
Şekil 6. 32 THD-I grafiği 97

ÇİZELGE LİSTESİ

Sayfa

Çizelge 2. 1 Harmonik bileşenler 9
Çizelge 2. 2 Harmonik tanımları 9
Çizelge 2. 3 Ram makinesi gerilim harmonikleri etkin değerleri 11
Çizelge 2. 4 Ram makinesi akım harmonikleri etkin değerleri 11
Çizelge 2. 5 Ram makinesi gerilim harmonikleri faz açıları 12
Çizelge 2. 6 Ram makinesi akım harmonikleri faz açıları 12
Çizelge 2. 7 6 Darbeli UPS gerilim harmonikleri etkin değerleri 13
Çizelge 2. 8 6 Darbeli UPS akım harmonikleri etkin değerleri 14
Çizelge 2. 9 6 Darbeli UPS gerilim harmonikleri faz açıları 14
Çizelge 2. 10 6 Darbeli UPS akım harmonikleri faz açıları 15
Çizelge 2. 11 Akım ve gerilimin harmonik etkileşimi 21
Çizelge 2. 12 34,5 kV ve altındaki gerilim seviyesinde uygulanan gerilim harmonikleri sınır değerleri 21
Çizelge 2. 13 34,5 kV ve altındaki gerilim seviyesinde uygulanan akım harmonikleri için maksimum yük akımına (I_L) göre sınır değerler 22
Çizelge 3. 1 Harmonik bileşenlerin motor dönüş yönüne etkisi 32
Çizelge 5. 1 Rezonans frekansına göre filtre reaktör faktörleri 49
Çizelge 5. 2 Rezonans frekansı 134 Hz olan bir HFKS'nin elektriksel değerleri 52
Çizelge 5. 3 Rezonans frekansı 189 Hz olan bir HFKS'nin elektriksel değerleri 54
Çizelge 5. 4 Rezonans frekansı 210 Hz olan bir HFKS'nin elektriksel değerleri 55
Çizelge 5. 5 Sektörde yaygın olan rezonans frekansı belirleme çizelgesi 56
Çizelge 5. 6 İş merkezine ilişkin elektriksel bilgiler 57
Çizelge 5. 7 İş merkezine ilişkin gerilim harmonikleri etkin değerleri 58
Çizelge 5. 8 İş merkezine ilişkin akım harmonikleri etkin değerleri 58
Çizelge 5. 9 Filtresiz kompanzasyonun paralel rezonans analizi 60
Çizelge 5. 10 134 Hz HFKS paralel rezonans analizi 62
Çizelge 5. 11 189 Hz HFKS paralel rezonans analizi 64
Çizelge 5. 12 210 Hz HFKS paralel rezonans analizi 66
Çizelge 5. 13 Akım harmonikleri limit değer tablosu 66
Çizelge 5. 14 Filtresiz kompanzasyon ve HFKS karşılaştırma tablosu 67
Çizelge 6. 1 Akım harmonikleri limit değer tablosu 72
Çizelge 6. 2 Tesisin akım harmonikleri limitleri 73
Çizelge 7. 1 Filtresiz kompanzasyon ve HFKS karşılaştırma tablosu 100

ÖZET

HARMONİK PROBLEMİ OLAN TESİSLERDE HARMONİK FİLTRELİ KOMPANZASYON SİSTEMLERİNİN TASARIMI VE ANALİZİ

Mehmet Baha ŞERBETÇİ

Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Yüksek Lisans Tezi

Tez Danışmanı: Dr. Öğr. Üyesi Erdin GÖKALP

Harmonikler elektrik enerjisinin üretiminden tüketimine kadar olan tüm aşamalarında teknik sorunlara ve maddi kayıplara yol açarak enerji verimliliğini önemli oranda azaltan bir güç kalitesi problemidir. Tanım olarak sinüzoidal formdaki akım ve gerilim dalga şekillerinin bozulmaya uğraması anlamına gelmektedir. Harmoniklere ilişkin üretim, iletim, dağıtım ve tüketim tesislerinin yükümlülüklerini belirleyen yönetmelik ve standartlar bulunmaktadır.

İlke olarak daha az harmonik üreten ekipmanların kullanımı en doğru uygulamadır. Ancak bunun mümkün olmadığı durumlarda harmoniklerin kaynağına en yakın noktada filtrelenmesi gerekmektedir. Bunun için aktif, pasif ve hibrit filtreler geliştirilmiştir. Aktif filtreler harmoniklere 180 derece zıt yönde işaret üreterek sisteme enjekte etme prensibiyle çalışmaktadır. Pasif filtrelerde R-L-C elemanları farklı kombinasyonlarda bağlanarak harmoniklerin istenen yöne akması sağlanmaktadır. Hibrit filtreler ise aktif ve pasif elemanların entegrasyonu ile oluşturulmuştur.

Bu çalışmada ülkemizde yaygın olarak kullanılan harmonik filtreli kompanzasyon sistemleri (kısaca HFKS olarak anılacaktır) diğer adıyla detuned – düşük ayarlı pasif filtreler ele alınmaktadır. Harmonik problemi yaşanan bir çelik tel üretim fabrikasında ölçümler yapılarak filtre tasarımı gerçekleştirilmiştir. HFKS uygulaması sonucunda tesisteki harmonikler yönetmeliklerde belirlenen limit değerlerin altına düşürülmüştür. Özellikle gerilim harmoniklerinin yüksek olduğu tesislerde reaktif güç kondansatörlerinin şebekeden çektiği akım harmoniklerini azaltmada bu yöntemin son

derece etkili olduğu görülmüştür. Uygulanan filtre yönteminin Matlab Simulink programında simülasyonu gerçekleştirilmiştir.

Anahtar Kelimeler: Harmonik, harmonik filtreli kompanzasyon, düşük ayarlı detuned pasif filtre, seri ve paralel rezonans, harmonik limitleri.

ABSTRACT

DESIGN AND ANALYSIS OF DETUNED HARMONIC FILTERS IN FACILITIES HAVING HARMONIC PROBLEM

Mehmet Baha ŞERBETÇİ

Department of Electrical Engineering

MSc. Thesis

Adviser: Asst. Prof. Dr. Erdin GÖKALP

Harmonics is a power quality problem that significantly reduces energy efficiency by causing technical problems and financial losses at all stages from the production of electricity to consumption. By definition, it is the distortion of sinusoidal waveform of current and voltage. There are harmonics related regulations and standards that determine the obligations of production, transmission, distribution and consumption facilities.

In principle, the most accurate application is the use of non-harmonic equipments. However, where this is not possible, harmonics must be filtered at the closest point to the source. Active, passive and hybrid filters have been developed for this purpose. Active filters work with principle of generating reverse signal to harmonics and injecting these signals to system. In passive filters, the R-L-C elements are connected in different combinations to allow harmonics to flow in the desired direction. Hybrid filters are formed by integration of active and passive elements.

This study discusses harmonic filter compensation systems (detuned passive filters) generally used in Turkey. Filters are designed by making measurements in a steel wire factory having harmonic problem. As a result of this application, the harmonics in the plant have been reduced below the limit values specified in the regulations. This method has been found to be extremely effective in reducing the current harmonics of

the reactive power capacitors from the grid, especially in the plants where voltage harmonics are high. The applied filter method was simulated in Matlab Simulink program.

Keywords: Harmonic, harmonic filter compensation, detuned passive filters, series and parallel resonance, harmonic limits.

BÖLÜM 1

GİRİŞ

Ülkemizde ve dünyada enerjinin önemi günden güne artmaktadır. Birleşmiş Milletler Nüfus Fonu (UNFPA) verilerine göre 1900 yılında yaklaşık 1,5 milyar olan dünya nüfusu günümüzde 7,5 milyar seviyesine ulaşmıştır. Bu rakamın 2050 yılında 10 milyar seviyelerine ulaşacağı öngörülmektedir. Nüfus artışının doğal sonucu olarak gıda, tekstil ürünleri, konut, her türlü malzeme ve enerjiye olan talebin giderek artacağı aşikârdır. Buna karşılık kömür ve doğalgaz gibi önemli enerji kaynaklarının günden güne azalması yakın gelecekte arz talep dengesinin bozulacağını ve enerji maliyetlerinin önemli oranda artacağını göstermektedir.

Türkiye gibi enerjide dışa bağımlı ülkeler için kaynakların verimli kullanılması son derece önemlidir. 2017 yılında 47,4 milyar dolar olan toplam cari açığın 37,2 milyar dolarlık kısmı enerji ithalatı sebebiyledir. Elektrik üretim, iletim, dağıtım ve tüketim tesislerinde daha az harmonik üreten ürünlerin ve sistemlerin tercih edilmesi enerji verimliliğini arttırarak hem çevre için olumlu sonuçlar doğurmakta hem de direkt olarak ekonomik kazanç sağlanmasına sebep olmaktadır.

Harmonik probleminin önemli bir etkisi de endüstriyel tesislerde iç arızalara sebep olarak üretim verimini düşürmesidir. Günümüzde endüstriyel tesislerde üretim yapan makineler ileri teknoloji özelliklerle donatılmıştır. Bu makinelerin istenen verimde ve kalitede ürün üretebilmeleri için temel ihtiyaçları olan basınçlı hava, kızgın yağ, buhar, hammadde vb. bileşenlerin kaliteli olması gerektiği gibi elektrik enerjisinin de belirli kalite standartlarını sağlaması gerekmektedir. Kaliteli bir elektrik enerjisi de ancak harmonik değerlerinin limitlerin altında kalması ile mümkündür.

Güç sistemlerinde harmoniklerin analizi oldukça kompleks bir konudur. Enerji üreten çeşitli tür ve ölçekteki santrallar, enerji iletim hatları, dağıtım şirketleri ve dağıtım sistemi kullanıcıları (tüketiciler) iletkenler ile birbiriyle irtibatlıdır. Dolayısıyla tüm bu sistem aktörlerinin birbirleri üzerinde olumsuz etkileri bulunmaktadır. Bu sisteme bağlanan tüm tesislerin uymakla yükümlü oldukları kurallar yönetmelik ve standartlarca belirlenmiştir. Kuralların dışına çıkan tesislere çeşitli yaptırım hükümleri, özellikle tüketiciler için belirlenen limit değerlerin aşılması halinde tüketicinin bağlantısının kesileceği hükmü yönetmeliklerde yer almaktadır.

Harmonik filtreli kompanzasyon sistemleri (HFKS) sağladığı faydalara göre düşük yatırım maliyetine sahip oluşu, yapısında kullanılan elemanların yerli üretim olması nedeniyle hızlı tedarik edilebilmesi ve düşük bakım giderleri nedeniyle ülkemizde oldukça yaygınlaşmıştır.

Bu tez çalışmasında bir çelik tel üretim fabrikasında harmoniklerin teknik ve hukuki anlamda değerlendirmeleri yapılmıştır. İşletme için hem mevzuat açısından hem de üretim verimliliği açısından problem teşkil eden harmoniklerin HFKS kullanımı ile istenen değerlere düşürülmesi sağlanmıştır. Yapılan saha uygulaması Matlab Simulink programında simule edilmiştir. Sahada gerçekleştirilen ölçümler ve simülasyondan elde edilen sonuçlar karşılaştırmalı olarak sunulmuştur.

1.1 Literatür Özeti

Elektrik sistemlerinde harmonikler konusu 20. yüzyılın başlarından itibaren araştırılmaya başlanmıştır. 1914 yılında Clinker ve Curtis yıldız – üçgen bağlı transformatörlerin harmonik analizi konusunda, 1933 yılında ise Morgan, Bairos ve Kimball 3 ve 3'ün katı harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkisi konusunda makaleler yayınlamışlardır. 1950'li yıllarda yarı iletken elemanların kullanımının yaygınlaşmasıyla birlikte statik dönüştürücülerin harmonik etkinliği araştırmaları üzerinde durulmuştur. 1997 yılında Jos Arrillaga tarafından yazılan ''Power System Harmonic Analysis'' kitabı ve bilimsel yayınları modern anlamda harmoniklerin modellenmesi konusunda öncü olan eserler arasındadır.

Bu bölümde güç sistemlerinde harmonikler konusunda ülkemizde ve dünyada son 10 yılda yayınlanan bazı bilimsel çalışmalar gösterilmiştir.

2017 senesinde Patil, Bhosale ve Bolaj tarafından 3 fazlı indüksiyon ocaklarında harmoniklerin azaltılması için pasif filtre tasarımı konusunda bir çalışma yapılmıştır. Gerçek ölçüm sonuçları kullanılarak simülasyonda pasif filtre tasarımı yapılmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre indüksiyon ocağının THD_I değeri %25'ten %5 seviyelerine düşürülmüştür [1].

2011 senesinde Liang ve Ilochonwu tarafından 6 darbeli sürücülerin kontrol ettiği yüklerde denizaltı kablo uygulamaları ele alınmıştır. Geleneksel pasif harmonik filtre uygulamalarından farklı olarak denizaltı güç sistemlerinde kullanılmak üzere kararlılık, güvenilirlik ve esneklik yönünden avantajlı bir pasif filtre düzeni tasarlanmıştır [2].

2016 senesinde Sirjani ve Mehmet Kuşaf daha önceden Derviş Karaboğa tarafından geliştirilen Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu Algoritması'nı pasif harmonik filtre tasarımında kullanmışlardır. Simülasyon ortamında gerçekleştirilen çalışmada pasif filtrede kullanılacak R-L-C elemanlarının optimum değerlerinin hesaplanmasında geliştirilen Yapay Arı Kolonisi Optimizasyonu Algoritması'ndan yararlanılmıştır [3].

2013 senesinde Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü öğretim üyeleri tarafından harmonik kaynağının tespiti için kullanılan metotların hangisinin daha doğru sonuç verdiğinin anlaşılması için bir çalışma yapılmıştır. Üniversitenin Çayırova yerleşkesinin farklı noktalarından gerçek zamanlı harmonik ölçüm verileri alınmıştır. Labview tabanında tasarlanan bir yazılım yardımıyla harmonik kaynağının tespitinde kullanılan farklı metotlar karşılaştırılmıştır. Bunun sonucunda bazı metotların gerçek ölçümlere yakın, bazılarının ise uzak sonuçlar verdiği tespit edilmiştir [4].

2012 senesinde Elmathana, Zobaa ve Abdel Aleem tarafından Mısır'ın Giza kentindeki bir endüstriyel tesis için ekonomik ve çok kollu bir pasif harmonik filtre tasarımı çalışması yapılmıştır. Tesisin akım harmoniği değerlerinin IEEE limitlerinin üzerinde olduğu gösterilmiştir. Büyük güçlü ve büyük harmonik bozulmaların olduğu tesisler için en düşük yatırım maliyetiyle ve en düşük güç kaybı özelliklerine sahip kabul edilebilir efektif sonuçlar veren, geleneksel yöntemden farklı olarak pasif filtre tasarımı yapılmıştır [5].

2010 senesinde Çin'de endüstriyel üretim uygulamaları için pasif filtre tasarımında transfer fonksiyonu yaklaşımı uygulanmıştır. Bu yaklaşımla sistemde ölçüm ve analiz,

filtre yerinin tayini, filtre elemanlarının hesaplanması, rezonans frekansına karar verilmesi, sisteme uygun filtrenin belirlenmesi transfer fonksiyonu yaklaşımıyla belirlenmiştir. Simülasyonu ve deney sonuçları yapılarak bu yaklaşımın işletmeyi IEEE-519 limit değerlerinin altına indirmeyi sağladığı gösterilmiştir [6].

2015 senesinde Gazi Üniversitesi öğretim üyeleri tarafından hat reaktörü olarak adlandırılan seri harmonik filtre tasarımı yapılmıştır. Belirli bir hat akımı için 3 farklı hat reaktörü tasarlanmıştır. Tasarlanan reaktörlerin endüktans kararlılığı, kayıpları ve standartlara uygunluğu sonlu elemanlar metodu ile karşılaştırılmıştır. Manyetik devre Ansys-Maxwell ile modellenmiştir. Nüve malzemesi olarak farklı tür silisli saclar ve bunların kayıpları karşılaştırılmıştır [7].

2015 senesinde Hindistan'da Desai ve Basva tarafından 33 kV gerilimli 6 MW gücünde bir sistemde pasif filtre kullanılarak harmoniklerinin azaltılması konusunda bir çalışma yapılmıştır. Öncelikle I_{sc} / I_L değeri kullanılarak müşterinin akım harmoniği limitleri IEEE-519 standardına uygun olup olmadığı belirlenmiştir. Ardından bazı harmonik bileşenler için ayarlı filtre tasarımı yapılmıştır. Sistemi şebeke ile paralel rezonansa sokmayacak şekilde filtre elemanları hesaplanmıştır [8].

2016 senesinde Kahramanmaraş'ta bir hidroelektrik santralin şebekedeki harmonik oluşumuna etkisinin incelenmesi konusunda bir çalışma yapılmıştır. Çalışma kapsamında Torlar HES adında 15 MW gücünde bir santralda 1 ay boyunca güç kalitesi analizörü kullanılarak kayıt alınmıştır. Ölçüm sonuçlarına göre gerilim harmoniklerinin 5 ve 7. Bileşenin baskın olduğu, THB değerinin %4 seviyelerinde olduğu, akıma ait THB değerinin ise %2 seviyelerinde olduğu tespit edilmiştir [9].

2016 senesinde Düzce Üniversitesinde, şebekede güç kalitesi parametrelerine göre otomatik şebeke anahtarlaması yapan bir sistem geliştirilmiştir. Çalışmada iki farklı şebekenin güç kalitesi parametrelerini devamlı olarak takip eden ve bir otomatik transfer anahtarı kullanılarak daha az problemli şebekeyi tercih eden Labview tabanında bir algoritma geliştirilmiştir [10].

2013 senesinde Bitlis Eren Üniversitesinde harmoniklerin aktif filtre kullanılarak yok edilmesi konusunda Simplorer programı kullanılarak bir simülasyon çalışması yapılmıştır. Çalışma kapsamında Van ilindeki bir fabrikada saha ölçümleri yapılmıştır.

Elde edilen verilere göre IGBT kontrollü bir paralel aktif güç filtresi tasarlanmıştır. Simülasyon sonuçlarına göre işletmede standartlara uygunluk sağlanmıştır [11].

Tomas Hruby ve Stanislav Kocman tarafından geniş bantlı pasif harmonik filtresi kullanılarak AC sürücüler üzerinde harmoniklerin azaltılması konusunda bir çalışma yapılmıştır [12].

2015 senesinde Yıldız Teknik Üniversitesinde yol aydınlatmasında kullanılan dimmerlenebilir led armatürlerin harmonik analizi konulu bir yüksek lisans tez çalışması tamamlanmıştır. Bu çalışmada iki farklı led armatürün laboratuvar ortamında tam gerilimde ve yarı gerilimde harmonik salınımları ölçülmüş ve sonuçlar kıyaslanmıştır [13].

2013 senesinde İstanbul Teknik Üniversitesinde bir karayolu tünelinin elektrik alt yapısının harmonik analizi ve filtre tasarımı konulu bir yüksek lisans tez çalışması gerçekleştirilmiştir. Bu çalışma kapsamında tünelin harmonik ölçümleri yapılmış, standartlarda verilen limit değerlere uymadığı tespit edilen sistemden elde edilen verilere göre ayarlı pasif filtre tasarımı yapılmıştır. Tasarlanan filtrenin matlab Simulink programında simülasyonu yapılmıştır [14].

2008 senesinde Yıldız Teknik Üniversitesinde harmoniklerin dijital aşırı akım röleleri üzerindeki etkisinin incelendiği bir yüksek lisans tezi yayınlanmıştır. Çalışma kapsamında 3 farklı dijital aşırı akım rölesi laboratuvar ortamında harmonikli akım çeken bir deney seti kullanılarak test edilmiş ve rölelerin farklı harmonik bozulma oranlarında arızaya cevap verme süreleri incelenmiştir [15].

2010 senesinde İstanbul Teknik Üniversitesinde şebekelerde harmonik kaynaklarının yerinin tespit edilmesi konusunda bir doktora tezi yayınlanmıştır. Bu çalışmada şebeke için belirli parametrelerde kararlılık kabulleri yapılarak her bir harmonik bileşen için ayrı ayrı süperpozisyon teoremi uygulanarak harmonik kaynağının yeri saptanmıştır. Bunun yanı sıra kompleks yapıda olmayan şebekelerde uygulanabilir mesafe – empedans bilgisine dayalı bir metot geliştirilmiştir. Ayrıca bu çalışma kapsamında harmonik kaynağının yerinin saptanmasında kullanılan güç kalite analizörlerinin optimum dağılımının yapılması amacıyla bir algoritma tasarlanmıştır [16].

1.2 Tezin Amacı

Harmonikler elektrik enerjisinin üretimi, iletimi, dağıtımı ve tüketiminin her aşamasında önemli zararlara yol açan bir olgudur. Özellikle enerjinin üretiminden tüketimine kadar olan sürecin tamamında güç kayıplarına sebep olarak enerji verimini önemli oranda etkilemektedir. Bunun yanı sıra şebekelerde rezonans olayları, işletmelerde iç arızalar ve üretim kayıpları, motorlarda aşırı ısınmalar ve gürültülü çalışma, kondansatörlerin hasar görmesi, aşırı akım rölelerinin hatalı ölçüm yapması ve koruma sisteminin hatalı çalışması, aydınlatma elemanlarında ve ekranlarda titreşimler, yalıtım malzemelerinin zorlanması gibi bir çok zararlı etkileri bulunmaktadır. Bu nedenle mümkünse harmonik üretmeyen sistemlerin tercih edilmesi, mümkün değilse üretilen harmoniklerin kaynağına en yakın noktada filtrelenmesi enerji verimliliğinin sağlanması ve tüm bu zararların önüne geçilmesi açısından son derece önemlidir.

Son yıllarda harmonik üreten sistemlerin kullanımı önemli ölçüde artış eğilimindedir. Örneğin enerji depolama sistemleri, raylı ulaşım sistemleri, güneş enerjisi santralları, endüstride motor hız kontrol sürücüleri ve aydınlatmada led ürünler şebekelerdeki harmonik distorsiyonunu arttıran önemli etkenlerdir.

Harmonik probleminin artış eğiliminde olması yönetmeliklerde belirtilen harmonik limitlerine uymayan dağıtım sistemi kullanıcıları için bir takım yaptırımlar getirilmesine yol açmıştır. Bu nedenle tüm işletmeler hem kendi iç kayıplarının ve iç arızalarının azaltılması için, hem de mevzuatın gerektirdiği limitlere uygunluk sağlanması amacıyla harmonik değerlerini kontrol altında tutmak durumundadır. Ülkemizde bu amaçla ekonomik ve faydalı bir yöntem olarak harmonik filtreli kompanzasyon sistemleri (HFKS) yaygın olarak kullanılmaktadır. Özellikle harmonik etkinliği fazla olan endüstriyel tesislerde, yeni yapılan hemen hemen tüm ticarethane işlevindeki binalarda HFKS görmek mümkündür. HFKS'nin temel kullanım amacı kondansatörlerin tek başlarına kullanımındaki bozucu etkileri filtre reaktörü sayesinde azaltmaktır. Ayrıca HFKS kullanımıyla şebeke empedansına ve HFKS'nin nonlineer yüke olan uzaklığına bağlı olarak kendisine paralel bağlı nonlineer yükün ürettiği harmonik akımların bir miktar filtre edilmesi mümkündür. Bunun yanı sıra HFKS kondansatörlerin tek başlarına kullanımındaki şebeke ile rezonansa girme olasılığını azaltmaktadır. Özellikle yüksek

mertebeli gerilim harmoniklerinin bulunduğu tesislerde kondansatörlerin filtreli kullanımı kondansatör ömrü açısından da faydalı olmaktadır. Düşük yatırım maliyetine oranla sağladığı faydalar göz önünde bulundurulduğunda HFKS hem şebeke hem de tesisler için son derece faydalı bir uygulamadır. Ancak bazı tesislerde şebeke şartlarına uyumlu seçilmeyen filtreler veya reaktif güç ihtiyacının çok üzerinde büyük kademelerden oluşan sistemler aşırı ısınma, kondansatörlerin patlaması, sistemin kararsız çalışması gibi sıkıntılarla karşılaşılmaktadır.

Bu tezin yazılma amacı ülkemizde yaygın olarak kullanılan HFKS'nin performans testlerinin gerçekleştirilmesi, optimum tasarım için temel kriterlerin belirlenmesi, etkin sistemlerin kurulması sonucunda hem işletme açısından harmonik promlemlerinin minimize edilmesi, hem de güç sistemlerinde harmonik probleminin azaltılması, güç sisteminin veriminin artması ve sonucunda daha ekonomik ve daha çevreci bir elektrik enerjisi kullanımına katkıda bulunmaktır.

1.3 Hipotez

Yük karakterine, yükün reaktif güç ihtiyacına ve bağlı bulunduğu şebeke koşullarına göre uygun tasarlanmış HFKS şebekelerdeki harmonik bozulma oranlarını azaltıcı etkiye sahiptir. Özellikle gerilim harmonikleri açısından problemli baralardan enerji alan tüketim tesislerinde, reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılan kondansatörlerin şebeke ile arasına seri harmonik filtre reaktörü bağlanarak kondansatörlerin çektiği akım harmonikleri önemli ölçüde azaltılabilir. Bu sayede işletmeler mevzuatta belirtilen harmonik limitlerine uygunluk sağlayabilir. Bu durumun enerji verimliliğine ve işletme elemanlarının çalışma ömrünün arttırılmasına katkısı vardır. Bunun yanı sıra kondansatörlerin filtreli kullanılması, kondansatörlerin şebeke ile rezonansa girme olasılığını önemli oranda azaltmaktadır.

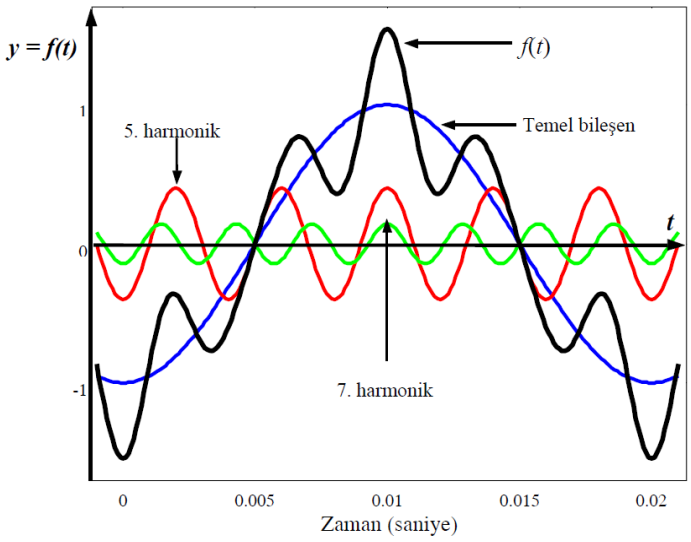
BÖLÜM 2

HARMONİKLERLE İLGİLİ TANIM VE KAVRAMLAR

2.1 Harmoniklerin Tanımlanması

Harmonik kelimesi etimolojik olarak incelendiğinde 15. Yüzyıldan itibaren çeşitli kaynaklarda müzikle ilgili bir kavram olarak armoni, uyumlu, ayarlı, ahenkli, senfoni, ritim gibi anlamlarda kullanıldığı görülmüştür [17].

Harmonik kavramı en basit ifadeyle, akım ve gerilim dalga şekillerinin sinüzoidal formdan sapması olarak tanımlanabilir. Şekil 2. 1'de harmonik içeren bir dalga şeklinin fonksiyon grafiği verilmiştir [18].



Şekil 2. 1 Harmonik içeren bir dalga şekli

Harmonik kavramı, Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği'nde; ''Doğrusal olmayan yükler veya gerilim dalga şekli ideal olmayan jeneratörlerden dolayı bozulmaya uğramış bir alternatif akım veya gerilimde, ana bileşen frekansının tam katları frekanslarda oluşan sinüzoidal bileşenlerin her biri'' şeklinde tanımlanmıştır [19].

Çizelge 2. 1 Harmonik bileşenler

Harmonik Bileşen Mertebesi	**Frekans (Hz)**
Temel Bileşen	50
2. harmonik	100
3. harmonik	150
4. harmonik	200
5. harmonik	250
∞	∞

Bir elektriksel dalganın, temel frekansın tam katı frekanslarında olmayan bileşenlerine ara harmonikler denmektedir. Ara harmoniklere sebep olan kaynaklar AC sürücüler, kaynak makineleri ve endüksiyon ocaklarıdır. Genel olarak sistem üzerinde harmoniklerin etkilerine benzer etkileri vardır ancak ara harmonikler harmonik olarak nitelendirilmezler. İstisnai durumlar haricinde genlikleri ihmal edilecek seviyelerdedir.

0 Hz ile temel frekans arasındaki harmoniklere ise alt harmonikler denmektedir. En önemli etkisi aydınlatma elemanlarında kırpışmaya (Flicker) sebep olmasıdır. Flicker için standartlarda limit değerler belirlenmiştir.

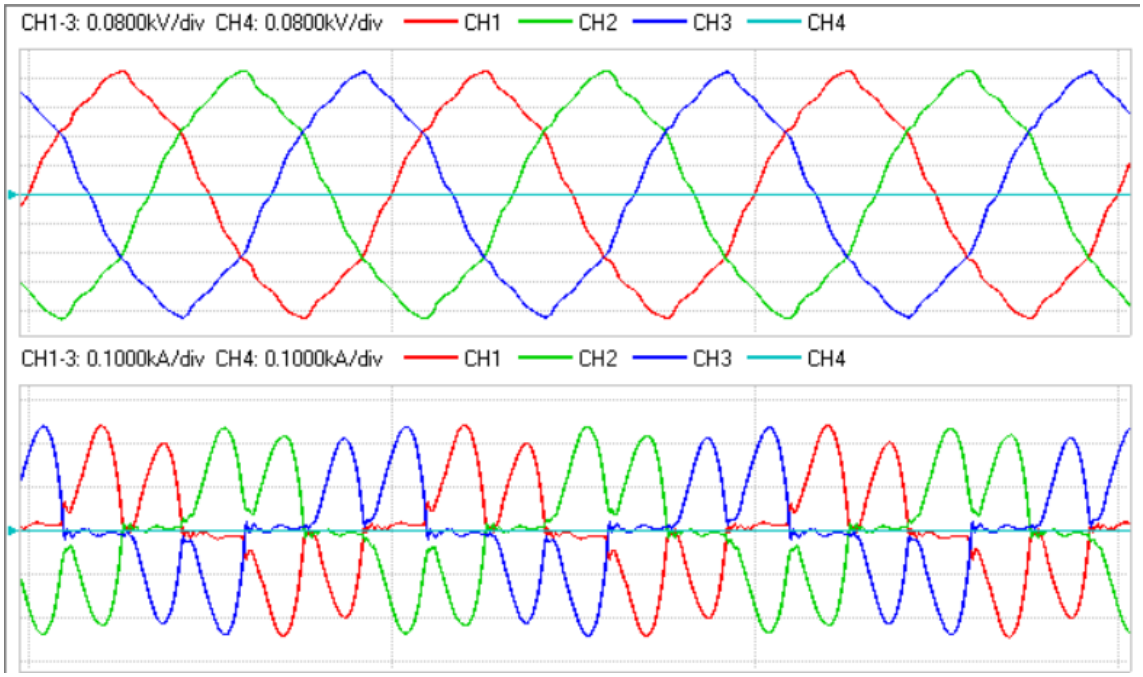
Çizelge 2. 2 Harmonik tanımları

Frekans	**Tanım**
f=0	DC bileşen
$0 < f < f_1$	Alt harmonik (Flicker)
$f=n.f_1$ (n tam sayı ise)	Harmonik
$f=n.f_1$ (n>1 ve n tam sayı değil ise)	Ara harmonik

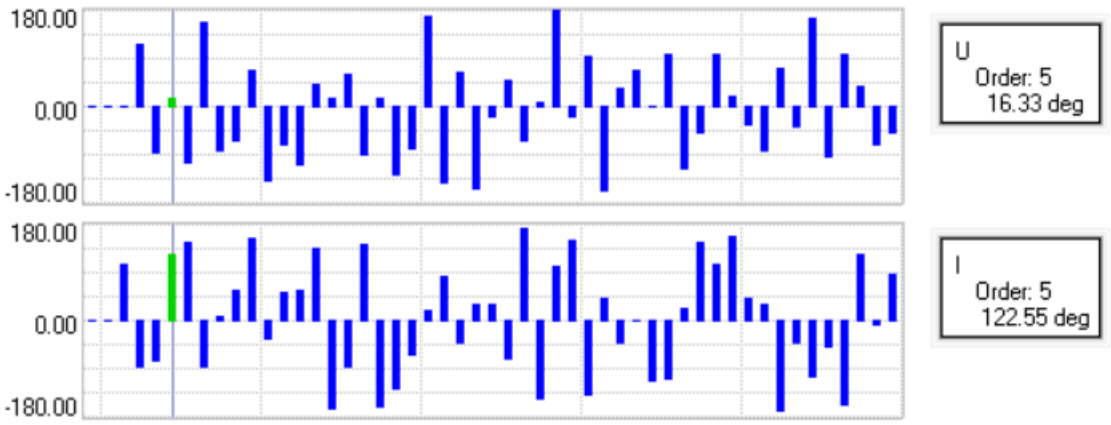
Genellikle elektriksel yüklerin akım dalga şekilleri pozitif ve negatif alternansta simetrik özellik gösterdiğinden dolayı temel frekansın çift katı olan mertebelerdeki harmonik bileşenler çok düşük değerler alırlar ve ihmal edilebilecek seviyelerde olurlar.

2.1.1 Harmonikli Dalga Şekline Örnek – 1

Bu örnekte tekstil sektöründe kullanılan bir ram makinasına ilişkin gerilim ve şebekeden çekilen akımın dalga şekilleri verilmiştir. Ram makinası içindeki elektriksel yüklerin neredeyse tamamı AC motor sürücülerinden meydana geldiği için bu örnekteki dalga şekilleri AC motor sürücüsü olarak değerlendirilebilir. Gerilim ve akıma ilişkin 50. bileşene kadar olan etkin değerler ve faz açıları sunulmuştur.



Şekil 2. 2 Ram makinesine ilişkin gerilim ve akım dalga şekilleri



Şekil 2. 3 Ram makinesine ilişkin gerilim ve akım harmonikleri faz açıları

Çizelge 2. 3 Ram makinesi gerilim harmonikleri etkin değerleri

Order	(V)	Order	(V)	Order	(V)	Order	(V)
0	0.03	16	0.13	32	0.01	48	0.01
1	225.39	17	2.33	33	0.38	49	0.08
2	0.02	18	0.09	34	0.01	50	0.01
3	1.43	19	0.41	35	0.06	THD	5.10 (%)
4	0.04	20	0.02	36	0.01		
5	9.31	21	0.73	37	0.11		
6	0.09	22	0.01	38	0.00		
7	3.57	23	0.61	39	0.07		
8	0.07	24	0.02	40	0.01		
9	0.73	25	0.25	41	0.02		
10	0.05	26	0.02	42	0.00		
11	3.67	27	0.70	43	0.03		
12	0.11	28	0.01	44	0.01		
13	2.70	29	0.29	45	0.12		
14	0.03	30	0.02	46	0.01		
15	1.33	31	0.16	47	0.10		

Çizelge 2. 4 Ram makinesi akım harmonikleri etkin değerleri

Order	(A)	Order	(A)	Order	(A)	Order	(A)
0	0.02	16	0.11	32	0.04	48	0.01
1	100.09	17	2.62	33	1.50	49	0.71
2	0.30	18	0.08	34	0.06	50	0.03
3	9.50	19	2.28	35	1.73	THD	66.38 (%)
4	0.34	20	0.02	36	0.04		
5	56.27	21	1.14	37	0.67		
6	0.21	22	0.05	38	0.03		
7	31.03	23	2.92	39	1.22		
8	0.16	24	0.06	40	0.05		
9	3.07	25	0.92	41	1.34		
10	0.17	26	0.03	42	0.02		
11	9.07	27	1.45	43	0.57		
12	0.14	28	0.06	44	0.03		
13	7.44	29	2.43	45	1.10		
14	0.06	30	0.04	46	0.04		
15	1.83	31	0.64	47	1.22		

Çizelge 2. 5 Ram makinesi gerilim harmonikleri faz açıları

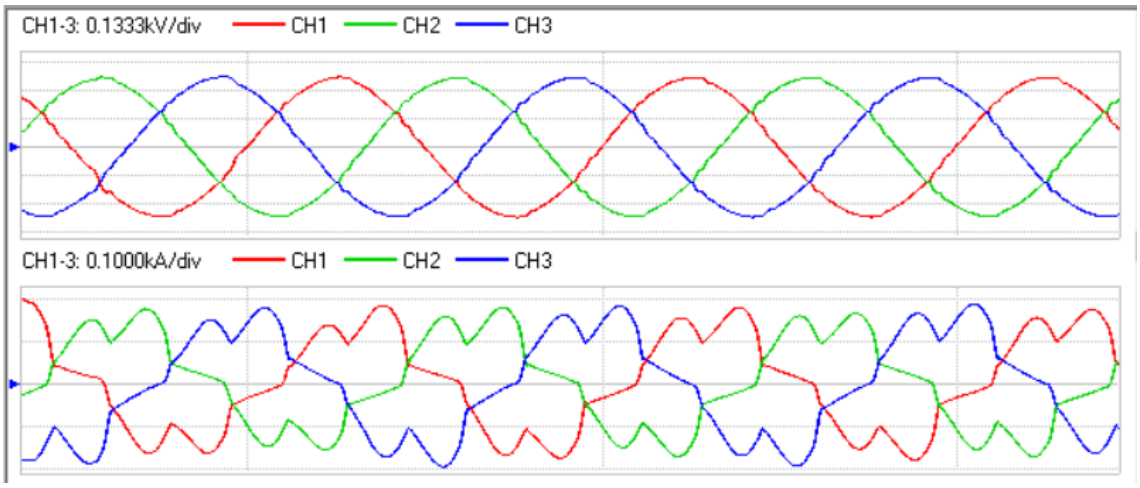
Order	(deg)	Order	(deg)	Order	(deg)	Order	(deg)
0	0.00	16	58.67	32	-159.38	48	36.89
1	0.00	17	- 93.76	33	32.73	49	- 73.16
2	- 1.17	18	15.11	34	68.03	50	- 52.89
3	115.61	19	-128.94	35	- 0.99	THD	5.10 (%)
4	- 88.15	20	- 83.51	36	94.75		
5	16.33	21	165.47	37	-118.53		
6	-106.59	22	-143.15	38	- 50.56		
7	155.36	23	63.06	39	97.99		
8	- 83.62	24	-155.37	40	16.70		
9	- 67.06	25	- 23.78	41	- 38.54		
10	66.82	26	49.75	42	- 84.63		
11	-141.56	27	- 67.45	43	72.08		
12	- 75.02	28	6.31	44	- 39.68		
13	-110.82	29	179.92	45	161.75		
14	39.98	30	- 20.46	46	- 96.42		
15	15.35	31	93.29	47	95.20		

Çizelge 2. 6 Ram makinesi akım harmonikleri faz açıları

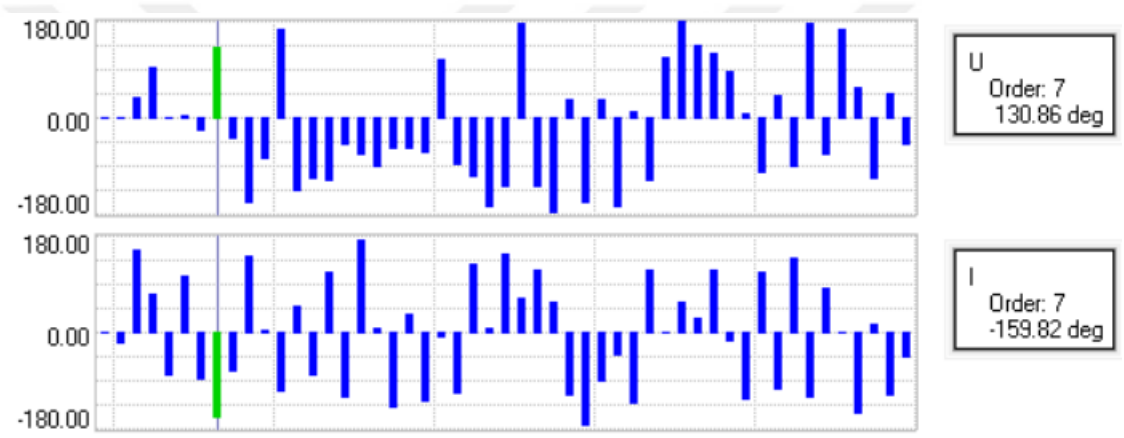
Order	(deg)	Order	(deg)	Order	(deg)	Order	(deg)
0	0.00	16	- 90.43	32	41.57	48	123.11
1	- 1.14	17	141.67	33	- 45.83	49	- 9.95
2	103.27	18	-162.39	34	- 0.72	50	84.52
3	- 87.30	19	-130.57	35	-116.83	THD	66.38 (%)
4	- 76.53	20	- 67.89	36	-113.17		
5	122.55	21	17.81	37	22.89		
6	146.37	22	80.14	38	145.12		
7	- 89.22	23	- 45.70	39	102.85		
8	6.65	24	31.21	40	154.52		
9	54.17	25	29.56	41	40.50		
10	152.62	26	- 74.07	42	31.04		
11	- 38.44	27	169.10	43	-170.68		
12	52.60	28	-147.66	44	- 46.33		
13	55.32	29	99.64	45	-106.31		
14	134.69	30	148.75	46	- 50.29		
15	-166.42	31	-139.33	47	-159.98		

2.1.2 Harmonikli Dalga Şekline Örnek – 2

Bu örnekte 6 darbeli bir UPS'e ilişkin gerilim ve şebekeden çekilen akımın dalga şekilleri verilmiştir. Gerilim ve akıma ilişkin 50. bileşene kadar olan etkin değerler ve faz açıları sunulmuştur.



Şekil 2. 4 6 Darbeli UPS'e ilişkin gerilim ve akım dalga şekilleri



Şekil 2. 5 6 Darbeli UPS'e ilişkin gerilim ve akım harmonikleri faz açıları

Çizelge 2. 7 6 Darbeli UPS gerilim harmonikleri etkin değerleri

Order	(V)	Order	(V)	Order	(V)	Order	(V)
0	- 0.10	16	0.48	32	0.24	48	0.03
1	229.55	17	0.72	33	0.51	49	0.35
2	0.16	18	0.53	34	0.13	50	0.02
3	0.30	19	0.47	35	1.20	THD	1.97 (%)
4	0.98	20	0.39	36	0.12		
5	1.49	21	0.32	37	1.13		
6	0.39	22	0.48	38	0.05		
7	1.92	23	0.57	39	0.18		
8	0.55	24	0.27	40	0.07		
9	0.74	25	0.34	41	0.36		
10	0.33	26	0.47	42	0.04		
11	0.86	27	0.40	43	0.55		
12	0.28	28	0.44	44	0.03		
13	1.47	29	0.96	45	0.08		
14	0.60	30	0.22	46	0.05		
15	0.67	31	1.03	47	0.19		

Çizelge 2. 8 6 Darbeli UPS akım harmonikleri etkin değerleri

Order	(A)	Order	(A)	Order	(A)	Order	(A)
0	- 0.03	16	0.26	32	0.02	48	0.02
1	108.29	17	2.41	33	0.20	49	0.28
2	1.88	18	0.16	34	0.06	50	0.02
3	1.85	19	1.65	35	0.60	THD	24.71 (%)
4	1.62	20	0.12	36	0.03		
5	24.49	21	0.32	37	0.66		
6	0.23	22	0.13	38	0.04		
7	7.78	23	1.42	39	0.14		
8	0.48	24	0.07	40	0.06		
9	0.56	25	1.24	41	0.30		
10	0.28	26	0.05	42	0.02		
11	4.92	27	0.27	43	0.42		
12	0.28	28	0.06	44	0.02		
13	2.36	29	0.88	45	0.11		
14	0.38	30	0.05	46	0.04		
15	0.37	31	0.98	47	0.15		

Çizelge 2. 9 6 Darbeli UPS gerilim harmonikleri faz açıları

Order	(deg)	Order	(deg)	Order	(deg)	Order	(deg)
0	0.00	16	- 71.43	32	-166.17	48	-114.17
1	0.00	17	- 91.66	33	10.62	49	45.65
2	37.60	18	- 60.48	34	-118.00	50	- 51.06
3	92.90	19	- 60.45	35	112.82	THD	1.97 (%)
4	- 4.80	20	- 66.49	36	176.57		
5	3.36	21	107.67	37	132.70		
6	- 25.48	22	- 88.60	38	116.91		
7	130.86	23	-110.31	39	84.66		
8	- 42.42	24	-166.28	40	9.16		
9	-160.79	25	-131.19	41	-104.82		
10	- 76.82	26	172.85	42	41.90		
11	163.35	27	-128.77	43	- 92.01		
12	-136.49	28	-178.51	44	176.20		
13	-116.78	29	33.10	45	- 71.86		
14	-120.20	30	-161.14	46	164.16		
15	- 53.22	31	34.29	47	57.11		

Çizelge 2. 10 6 Darbeli UPS akım harmonikleri faz açıları

Order	(deg)	Order	(deg)	Order	(deg)	Order	(deg)
0	0.00	16	171.81	32	- 44.74	48	13.21
1	- 22.02	17	5.70	33	-134.16	49	-117.27
2	150.64	18	-141.97	34	115.18	50	- 48.59
3	70.12	19	32.42	35	- 0.95	THD	24.71 (%)
4	- 82.18	20	-128.55	36	55.86		
5	105.60	21	- 11.56	37	27.45		
6	- 88.45	22	-113.61	38	114.75		
7	-159.82	23	126.35	39	- 19.75		
8	- 73.69	24	6.81	40	-126.91		
9	139.38	25	145.38	41	112.82		
10	4.17	26	61.85	42	-106.66		
11	-110.11	27	114.74	43	136.40		
12	49.56	28	55.38	44	-121.25		
13	- 80.49	29	-118.66	45	80.04		
14	111.41	30	-175.24	46	- 0.96		
15	-123.72	31	- 93.26	47	-153.40		

2.2 Harmoniklerin Matematiksel İfadesi

1822 yılında Fransız fizikçi ve matematikçi Joseph Fourier sinüzoidal olmayan periyodik dalga şekillerinin, temel bileşen frekansının tam katı frekanslarda başka sinüzoidal dalgaların toplamından oluştuğunu ispatlamıştır. Bu yöntem kullanılarak sinüzoidal olmayan dalga şekilleri bileşenlerine ayrılabilmektedir. Her hangi bir dalga şekline bu teoremin uygulanabilmesi için Dirichlet koşullarının sağlanması gerekmektedir. Bu koşullar bir periyot içinde sonlu sayıda süreksizlik bulunması, sonlu sayıda maksimum ve minimum noktalarının bulunması ve ortalamasının sonlu değer almasıdır.

2.2.1 Fourier Analizi

Sinüzoidal olmayan dalga şekillerini matematiksel olarak ifade etmek için fourier serileri kullanılır. Denklem (2.1) nonsinüzoidal işaretleri zaman domeninde ifade etmek için kullanılabilir. Bu denklemde n harmonik bileşenin mertebesini, A_0 ise fonksiyonun sabit terimini ifade etmektedir.

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n sinnt + B_n cosnt) \tag{2.1}$$

A_0, A_n ve B_n katsayılarının trigonometrik gösterimi denklem (2.2) (2.3) ve (2.4)'te gösterilmiştir.

$$A_0 = \frac{1}{2\pi}\int_0^{2\pi} f(t).dt \tag{2.2}$$

$$A_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t).\sin(nt).dt \tag{2.3}$$

$$B_n = \frac{1}{\pi}\int_0^{2\pi} f(t).\cos(nt).dt \tag{2.4}$$

2.2.2 Elektriksel Büyüklükler

Bu bölümde harmonikli devrelerin analizinde kullanılan temel elektriksel büyüklüklerin formüllerine ve matematiksel kavramlara yer verilmiştir.

2.2.2.1 Akım ve Gerilim Denklemleri

Harmonikli bir devrede akım ve gerilimin ani değeri denklem (2.5) ve (2.6) kullanılarak hesaplanır. Bu formüllerde DC bileşenler istisnai durumlar haricinde 0'a çok yakın olduğundan dolayı ihmal edilmiştir. V_n ve I_n n. harmonik bileşendeki gerilim ve akımın efektif değerleridir. ω_1 temel frekanstaki açısal hızdır. ϕ_n ve δ_n sırasıyla n. harmonik bileşendeki gerilim ve akıma ait faz açılarıdır.

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}.V_n.\sin(n.\omega_1.t + \Phi_n) \tag{2.5}$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}.I_n.\sin(n.\omega_1.t + \delta_n) \tag{2.6}$$

Harmonikli devrelerde akım ve gerilimin efektif değeri diğer adlarıyla etkin değeri veya RMS değeri artmaktadır. Bu değer harmonikli bir dalga şeklinde temel bileşen de dahil olmak üzere her bir harmonik bileşenin karelerinin toplamının karekökü olarak hesaplanmaktadır. Sistemler tasarlanırken akım ve gerilimin RMS değerlerinin dikkate alınması gerekmektedir. Uygulamada genellikle çift harmonik bileşenler sıfıra çok yakın olduğundan ihmal edilerek sadece tek bileşenler hesaba katılmaktadır.

$$I_{RMS} = \sqrt{{I_1}^2 + {I_2}^2 + {I_3}^2 + \cdots {I_n}^2} \tag{2.7}$$

$$V_{RMS} = \sqrt{{V_1}^2 + {V_2}^2 + {V_3}^2 + \cdots {V_n}^2} \quad (2.8)$$

2.2.2.2 Güç Denklemleri

Harmonikli devrelerde aktif güç ve reaktif güç her bir harmonik bileşene ait aktif ve reaktif güçlerin toplamıdır. Yalnızca aynı mertebedeki akım ve gerilim işaretlerinin çarpımının aktif ve reaktif güce etkisi vardır. Bu denklemlerde D ile gösterilen ifade yaygın olarak harmonik distorsiyon (bozulma) gücü olarak kabul edilmektedir.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n . I_n . \cos(\Phi_n - \delta_n) \quad (2.9)$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n . I_n . \sin(\Phi_n - \delta_n) \quad (2.10)$$

$$S = V_{RMS} . I_{RMS} = \sqrt{P^2 + Q^2 + D^2} \quad (2.11)$$

2.2.2.3 Toplam Harmonik Bozulma (THB)

Yabancı kaynaklarda THD (Total Harmonic Distortion) olarak geçen bu ifade, Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği ve Elektrik Şebeke Yönetmeliği'nde ''Gerilim harmonik bileşenlerinin etkin değerlerinin kareleri toplamının karekökünün, ana bileşenin etkin değerine oranı olan ve dalga şeklindeki bozulmanın yüzde olarak ifadesidir.'' cümlesiyle tanımlanmıştır. Ancak hizmet kalitesi yönetmeliğinde belirtilen formülasyonda 40. mertebeye kadar olan harmonik bileşenler dikkate alınırken şebeke yönetmeliğinde ise 50. mertebeye kadar dikkate alınmaktadır [20].

$$THB_U = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40} (U_h)^2}}{U_1} . 100 \quad (2.12)$$

Bunun yanı sıra yönetmeliklerde her bir gerilim harmoniği bileşeninin temel bileşene oranı olarak tekil harmonik bozulma tanımı yapılmıştır ve her bir bileşen için aşağıdaki formülle hesaplanmaktadır.

$$HB_U = \frac{U_h}{U_1}.100 \tag{2.13}$$

THB değeri gerekli durumlarda akım için de hesaplanmaktadır ancak yönetmeliklerde tüketicilerin akım harmoniği limit değerlerine uygunluğunun belirlenmesinde Toplam Talep Bozulumu (TTB) ve Tekil Talep Bozulumu (TB) parametrelerine göre işlem yapılmaktadır.

2.2.2.4 Toplam Talep Bozulumu (TTB)

TTB ifadesi hizmet kalitesi yönetmeliğinde ve şebeke yönetmeliğinde aynı cümle ile tanımlanmaktadır. Bu tanım; ''Akım harmonik bileşenlerinin etkin değerlerinin kareleri toplamının karekökünün, maksimum yük akımına (I_L) oranı olan ve dalga şeklindeki bozulmanın ifadesidir.'' şeklindedir. IEEE Std 591-1992'de TDD (Total Demand Distortion) olarak tanımlanmıştır. I_L değeri 12 aylık ölçüm süresince şebeke bağlantı noktasından çekilen yük akımının temel bileşen etkin değerinin 15 veya 30 dakikalık ortalamalarının en büyüğü şeklinde tanımlanmaktadır. Bu tanımda hangi durumlarda 15 dakikalık ortalamaların, hangi durumlarda 30 dakikalık ortalamaların en büyüğünün alınacağı konusunda her hangi bir bilgiye rastlanmamıştır [21].

$$TTB = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{40}(I_h)^2}}{I_L}.100 \tag{2.14}$$

Ayrıca standartlarda her bir akım harmoniği bileşeni için limit değerler tanımlanmıştır. Aşağıdaki formül kullanılarak her bir akım harmoniği bileşeni için tekil talep bozulumu değerleri hesaplanır.

$$TB = \frac{I_h}{I_L}.100 \tag{2.15}$$

2.2.2.5 Güç Faktörü (PF)

Güç faktörü elektrik devrelerinde aktif gücün görünür güce oranı olarak tanımlanmaktadır. Bu kavram AC güç devrelerinde akımın ne kadar verimlilikle kullanıldığını ifade etmek için kullanılmaktadır [22].

$$\mathrm{GF} = \frac{\mathrm{P}}{S} \tag{2.16}$$

Harmonik içermeyen devrelerde güç faktörü cosφ değerine eşittir. Akım ile gerilim arasındaki açının cos değeri güç faktörü olarak ifade edilmektedir. Ancak harmonikli devrelerde güç faktörü değeri her zaman cosφ değerinden daha düşüktür ve aşağıdaki formül ile hesaplanır.

$$PF = \frac{P}{V_1.I_1.\sqrt{1+\left(\frac{THB_U}{100}\right)^2}.\sqrt{1+\left(\frac{THB_I}{100}\right)^2}} \tag{2.17}$$

2.2.2.6 K Faktörü

Transformatörlerin endüktif reaktansı frekansla doğru orantılıdır. Eğer devrede yüksek frekanslı harmonik bileşenler bulunuyorsa transformatörlerin bu frekanslarda endüktif reaktansı arttığından dolayı yüklenme kapasitesi düşmektedir. K faktörü transformatörün emniyetli bir şekilde verebileceği güç değerini hesaplamada kullanılan bir katsayıdır [23].

$$K = \frac{\sum_{n=1}(n.I_n)^2}{\sum_{n=1} {I_n}^2} \tag{2.18}$$

Denklemde görüldüğü üzere pay kısmında harmonik bileşenin mertebesi yer aldığından dolayı çok yüksek frekanslarda K faktörü değeri büyümektedir. Transformatörün nominal güç değeri üzerinden yüzdesel olarak ne kadar güç değerinde emniyetli bir şekilde çalışabileceğini hesaplamak için denklem (2.19) kullanılır.

$$D = \frac{1{,}15}{1+0{,}15.K} \tag{2.19}$$

Transformatörün emniyetli bir şekilde çalışabileceği güç değeri denklem (2.20) kullanılarak hesaplanır.

$$S_H = D.S_{nominal} \tag{2.20}$$

Transformatör gücü belirlenirken akım ve gerilimin RMS değerleri üzerinden güç hesabı yapılmalı ve harmoniklerin transformatörün yüklenme kapasitesine olan etkisi mutlaka hesaba katılmalıdır.

2.3 Standart ve Yönetmelikler

Enerjinin üretilmesinden tüketilmesine kadar olan tüm süreçlerde harmonikler konusunda uyulması gereken kuralları belirleyen ulusal yönetmeliklerimiz ve uluslararası standartlar vardır. Bunlardan başlıcaları:

1. Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği (Bu çalışmada kısaca hizmet kalitesi yönetmeliği denecektir.)
2. Elektrik Şebeke Yönetmeliği (Kısaca şebeke yönetmeliği denecektir.)
3. EN 50160-1999 Standardı
4. IEC 61000-4-30 Standardı
5. IEEE Std 519-2014 Standardı

Hizmet kalitesi yönetmeliği özellikle dağıtım tesisleri ve tüketicilerle ilgili, şebeke yönetmeliği ise her seviyede iletim tesisleriyle ilgili konuları ele almaktadır. EN 50160 şebeke enerji kalitesi konusunu ele alan Avrupa Standardı'dır. IEC 61000-4-30 standardı güç kalitesi parametrelerinin ölçümü ile ilgili kural ve teknikleri belirlemektedir. IEEE 519-2014 ise özellikle güç sistemlerinde harmonikler konusunu tüm yönleriyle ele alan standarttır. Ulusal yönetmeliklerimiz genellikle bu standartlar referans alınarak hazırlanmıştır.

2.3.1 Limit Değerler

Harmonik konusu standartlarda belirtilen limit değerler açısından ele alındığında tüketiciler şebekeden çektikleri akım harmonikleri değerlerine, dağıtım şirketleri ise tüketiciye sundukları gerilim harmonikleri değerlerine dikkat etmek durumundadır. Ancak Çizelge 2. 11'de görüldüğü gibi akımın ve gerilimin birbiri üzerinde bozucu etkileri olmaktadır. Örneğin yük lineer bir yük olsa dahi bu yüke uygulanan gerilim harmonik bileşenler içermekteyse yük akımı da gerilimde bulunan harmonik bileşenleri içermektedir. Aynı şekilde kaynak gerilimi sinüzoidal olmasına rağmen nonlineer bir yükün çektiği harmonikli akım iletkenler üzerinde gerilim düşümü meydana

getireceğinden dolayı kaynak gerilimi de bozulmaya uğrayacaktır. Dolayısıyla şebeke gerilimindeki toplam harmonik bozulmaya kimin ne oranda katkısı olduğunu kestirmek güçtür. Bunu belirlemenin en kesin yolu sistemin yüksüz haldeyken ölçümünü yapmak ve her bir yükü tek başına sisteme bağlı tutarak ölçümünü gerçekleştirmektir. Bu sayede hangi yükün toplam harmonik bozulmaya ne oranda etki ettiği daha kesin bir şekilde anlaşılabilir. Ancak bu yöntemi pratikte uygulamak oldukça zordur. Harmoniklerin kaynağının daha basit ve uygulanabilir yöntemlerle tespit edilmesi amacıyla bilimsel araştırmalar yapılmaktadır.

Çizelge 2. 11 Akım ve gerilimin harmonik etkileşimi

Gerilim	**Yük**	**Akım**
Sinüzoidal	Lineer	Sinüzoidal
Sinüzoidal*	Nonlineer	Harmonikli
Harmonikli	Lineer	Harmonikli
Harmonikli	Nonlineer	Harmonikli

*Akımdaki harmonik bozulma iletkenlerde gerilim düşümü meydana getirdiğinden dolayı kaynak gerilimi de bozulmaya uğrar.

Çizelge 2. 12 34,5 kV ve altındaki gerilim seviyesinde uygulanan gerilim harmonikleri sınır değerleri

Tek Harmonikler				Çift Harmonikler	
3'un Katları Olmayanlar		3'un Katları Olanlar			
Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)	Harmonik Sırası h	Sınır Değer (%)
5 7 11 13 17 19 23 25	% 6 % 5 % 3,5 % 3 % 2 % 1,5 % 1,5 % 1,5	3 9 15 21	% 5 % 1,5 % 0,5 % 0,5	2 4 6…..24	% 2 % 1 % 0,5

THB için sınır değer 34,5 kV'a kadar olan tesislerde %8 olarak uygulanır. 34,5 kV'un üzerindeki yüksek gerilim tesislerinde Elektrik Şebeke Yönetmeliğinde farklı limit değerler belirlenmiştir.

Ölçüm periyodu boyunca ölçülen her bir gerilim harmoniği etkin değerinin 10'ar dakikalık ortalamalarının en az % 95'i, Tablo 10'da verilen değerlerden küçük veya bu değerlere eşit olmalıdır. Örneğin dağıtım sistemine 400 Volttan bağlanan bir kullanıcının şebeke bağlantı noktasında 5. harmonik gerilimi limit değeri 400 x 0,06 = 24 Volt'tur. Eğer ölçüm periyodu boyunca yani kesintisiz 1 hafta boyunca ölçülen 10'ar dakikalık toplam 1008 adet ortalama değerin %5'inden fazlası yani en az 51 adet örnekleme 24 Volt'un üzerinde ise kullanıcı dağıtım şirketine teknik kalite standartlarına uyulmadığı gerekçesiyle talepte bulunabilir.

Şebeke yönetmeliğinde 154 kV ve 400 kV gerilim seviyeleri için farklı sınır değer çizelgeleri vardır.

Çizelge 2. 13 34,5 kV ve altındaki gerilim seviyesinde uygulanan akım harmonikleri için maksimum yük akımına (I_L) göre sınır değerler

Tek Harmonikler						
I_{SC}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TTB
<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
Çift harmonikler, kendinden sonraki tek harmonik için tanımlanan değerin %25'i ile sınırlandırılmıştır.						

I_L değeri 12 aylık ölçüm süresince şebeke bağlantı noktasından çekilen yük akımının temel bileşen etkin değerinin 15 veya 30 dakikalık ortalamalarının en büyüğü şeklinde tanımlanmaktadır. Bu değer IEEE 519-2014'e göre kullanıcının kesintisiz 12 ay boyunca izlenmesi sonucunda belirlenmektedir [24]. Ancak ulusal yönetmeliklerimizde I_L değerinin belirlenmesi konusunda pratik bir bilgiye rastlanmamıştır.

I_{SC} değeri şebeke bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımını ifade etmektedir. Bu değer genellikle ilgili dağıtım şirketinden temin edilebilmektedir. Veya ana indirici merkezden itibaren kullanıcının şebeke bağlantı noktasına kadar olan şebeke elemanlarının etiket değerleri biliniyorsa hesaplanabilmektedir.

I_{SC} / I_L oranı belirlendikten sonra kullanıcının limit değerlerinin hesaplanacağı katsayılar elde edilmiş olmaktadır. Örneğin I_{SC} değeri 3000 A ve I_L değeri 85 A olan bir kullanıcı için I_{SC} / I_L oranı 35,3 çıkmaktadır. Tabloda 35 rakamının bulunduğu aralığa ait olan satır

kullanıcının akım harmoniği limit değerlerini hesaplarken kullanacağı katsayıları vermektedir. Örneğin bu kullanıcı için 5. harmonik limit değeri 85 x %7 = 5,95 A'dir. Akım harmoniklerinin değerlendirilmesinde tesisin şebeke bağlantı noktasındaki değerlerin dikkate alınması esastır.

Yönetmelikteki limit değerlere uyum sağlayamayan tüketicilerin AG abonesi ise 60 gün içinde, OG abonesi ise 120 gün içinde limit değerlere uyum sağlamaları zorunludur. Aksi taktirde abonenin enerjisinin kesileceği hükmü yer almaktadır.

2.3.2 Harmonik Ölçümü ve Sonuçların Değerlendirilmesi

- Harmonik ölçüm periyodu, TS EN 61000-4-30'da en az bir haftalık kesintisiz ölçüm zamanı olarak tanımlanmıştır. Bunun sebebi hafta içi ve hafta sonu arasındaki farkın analizinin yapılabilmesi içindir [25].
- Ölçümler esas olarak tesisin şebeke bağlantı noktasından yapılır. Ancak dağıtım şirketinin uygun görmesi halinde sayacın bulunduğu noktadan da yapılabilir.
- Ölçümlerin geçerli sayılabilmesi için ölçüm cihazının class A özellik taşıması gerekmektedir.
- Ölçümler her bir faz için ayrı ayrı değerlendirilir.
- Kesintisiz 7 günlük ölçümün sonunda 10'ar dakikalık ortalama değerlerin en az %95'i tablolarda verilen limit değerlerin altında olmalıdır. Bunun anlamı her bir bileşen için ölçülen 1008 adet örneklemenin en fazla 50 tanesi limit değerleri aşabilir.
- Ölçümlerin normal işletme koşullarında gerçekleştirilmesi esastır.

Tesis içerisinde etkin bir harmonik analizinin yapılabilmesi için aşağıdaki kriterlere dikkat edilebilir:

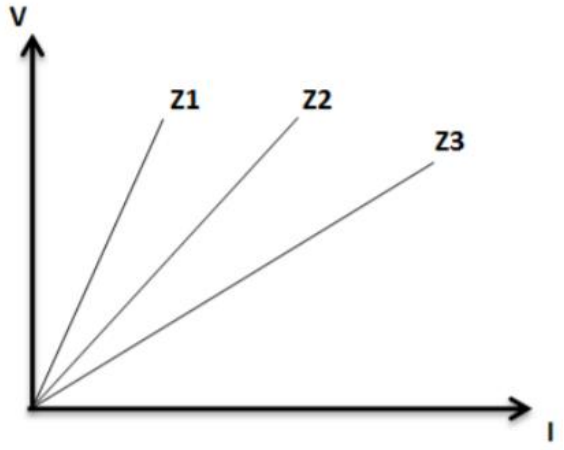
- Ölçüm yapmadan önce tesisin tek hat şeması incelenmeli ve ölçüm yapılacak noktalara karar verilmelidir.
- Ölçümlerin çok noktadan eş zamanlı olarak yapılması daha kesin sonuçlar elde edilmesini sağlar.

- Kondansatörlerin harmonikleri arttırıcı etkisini görebilmek için kompanzasyon sistemi devredeyken ve devrede değilken ayrı ayrı ölçümler yapılması ve sonuçların karşılaştırılması gerekmektedir.
- Hem gerilim hem akım harmoniklerinin yüksek olduğu yerlerde gerilim harmoniklerinin yükten bağımsız durumunu görebilmek için yük devreden çıkarılarak ayrı bir kayıt alınması gereklidir.
- Yüklerin devreye giriş ve çıkış saatleri kayıt altına alınarak hangi yükün harmonik bozulmaya ne oranda etki ettiği tespit edilmelidir.
- Ölçümlerin tamamlanmasının ardından hedef değerler belirlenmeli ve harmonikleri bu hedef değerlere çekebilecek en etkin ve en ekonomik çözüm projelendirilmelidir. Tasarlanan filtrenin harmonik kaynağına yakın konumlandırılması filtre etkinliğini arttıracak ve iç kayıpları azaltacaktır.

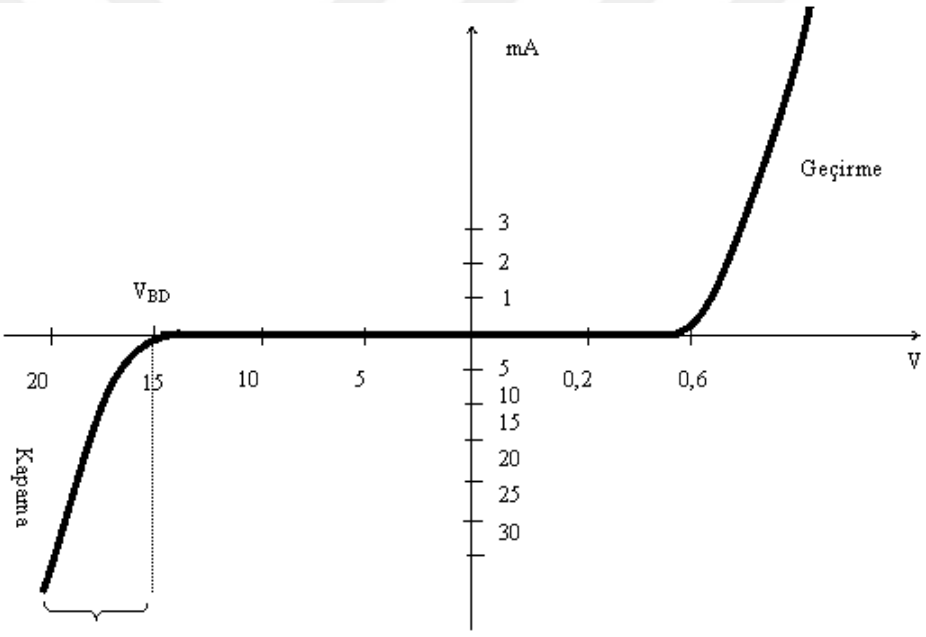
BÖLÜM 3

HARMONİKLERİN OLUŞUMU VE ETKİLERİ

Harmonikler genellikle nonlineer özellikli yükler tarafından meydana getirilmektedir. IEEE 519-2014 standardında nonlineer yük ifadesi, ‘’AC güç devresinin doğal sinüzoidal dalga şeklini değiştiren yükler’’ olarak tanımlanmıştır. Nonlineer özellikli yükler akım – gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Bu nedenle bu yüklere sinüzoidal formda bir gerilim uygulansa dahi yük akımının dalga şekli sinüzoidal olmaz ve harmonik bileşenler içerir. Özellikle yarı iletken devre elemanları içeren makine ve elektronik cihazlar nonlineer yüklere örnektir. Elektrik – elektronik endüstrisinde germanyum, silisyum, çinko oksit vb. yarı iletken element ve bileşikler kullanılarak üretilen diyot, transistör vb. devre elemanları kullanılmaktadır. Bu elemanlar normal koşullarda yalıtkan özellik gösterip, belirli bir gerilim değeri aşıldıktan sonra iletime geçmektedirler. Bu nedenle akım – gerilim karakteristikleri doğrusal değildir. Bu elemanların kullanıldığı kesintisiz güç kaynakları (UPS), motorlara yol vermede kullanılan soft starter yol verme düzenleri ve frekans konvertörleri harmoniklerin oluşmasına sebep olmaktadır. Harmoniklere sebep olmayan lineer yüklerin akım gerilim karakteristikleri Şekil 3. 1’deki gibi doğrusaldır. Nonlineer elemanlara örnek olarak ise Şekil 3. 2’de bir diyotun akım gerilim karakteristiği gösterilmiştir.

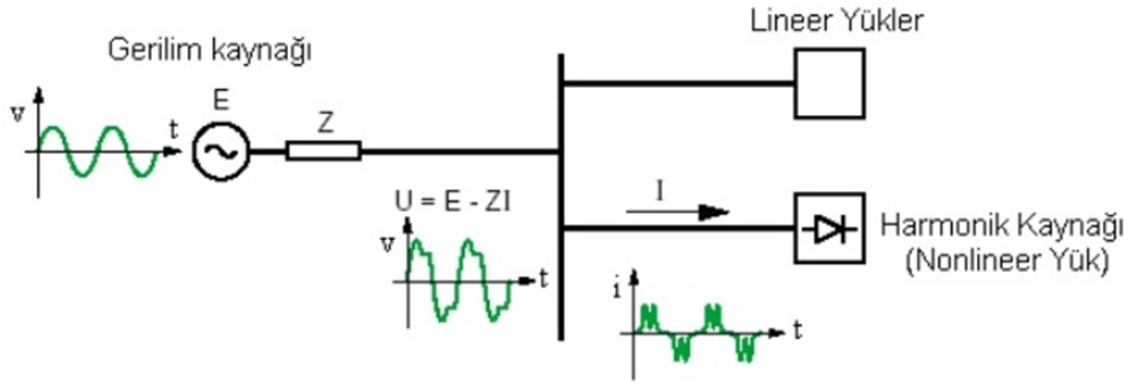


Şekil 3. 1 Lineer yüklerin akım – gerilim karakteristikleri



Şekil 3. 2 Bir diyota ilişkin akım – gerilim karakteristiği

Akım harmonikleri iletkenler üzerinde Şekil 3. 3'te gösterildiği gibi gerilim düşümü meydana getirdiğinden dolayı gerilim de bozulmaya uğrar ve gerilim harmonikleri oluşur. Gerilim harmoniklerinin oluşmasına sebep olan bir diğer etken ise generatörlerin sargı ve oluklarının ideal yapıda olmamasıdır. Bu generatörlerin çıkış gerilimi harmonik bileşenler içermektedir. Bunun yanı sıra güneş enerjisi santrallerinde kullanılan inverterlerden dolayı bu santrallerin gerilimleri de harmonik içermektedir.



Şekil 3. 3 Akım harmoniklerinin gerilim düşümü etkisi

3.1 Harmonik Kaynakları

Genel olarak bakıldığında yarı iletken devre elemanlarının kullanıldığı sistemler, manyetik devresi olan elektrik makinaları ve kısa devre prensibiyle çalışan cihazlar akım gerilim karakteristiği nonlineer özellikte olduğundan dolayı şebekeden harmonikli akım çekerler.

Bu bölümde harmoniklere sebep olan elektriksel yükler ve kaynaklara değinilmiştir.

3.1.1 Transformatörler

Transformatörlerde demir çekirdeğin mıknatıslanma eğrisi doğrusal değildir. Manyetik nüve doyuma yaklaştıkça mıknatıslanma akımı bozulur. Bunun sonucunda akım ve gerilimde harmonik bileşenler, ilave ısı kayıpları ve dielektrik kayıpları oluşur. Transformatörün yüklenme kapasitesi azalır [26].

Transformatör sargılarının bağlantı şekli 3 ve 3'ün katı harmonik bileşenlerin analiz edilmesinde önemlidir. 3 ve 3'ün katı harmonik bileşenler fazör olarak incelendiğinde fazlar arasında açı farkı olmadığı görülür. Bunun anlamı 3 ve 3'ün katı harmoniklerin oluşması için nötr iletkenine ihtiyaç vardır. Eğer transformatör sargılarından primer veya sekonder üçgen bağlanırsa 3 ve 3'ün katı harmonikler şebekeye geçemez ancak sargılarda dolaşmaya devam eder. 3 ve 3'ün katı harmonik bileşenlerin etkisinin tamamen yok edilebilmesi için tersiyer sargı kullanılır. Bu sargı 3 ve 3'ün katı harmonik bileşenlerin aktığı sargıdır. Bu sayede faz sargılarının gereksiz yere yüklenmesi önlenmiş olur.

3.1.2 Generatörler

Generatörlerin harmonik üretme özelliği fiziksel yapısından kaynaklanmaktadır. Çıkık kutbun şekli, sargı oluklarının yapısı, sargıların doyuma ulaşması gibi nedenlerle çıkış gerilimi harmonik bileşenler içermektedir. Bunu önlemek için yapısal tedbirler ve amortisman sargıları kullanılmaktadır.

3 ve 3'ün katı harmoniklerin analizinde sargılarında bağlantı şekli önemlidir. Stator sargısı yıldız bağlı ve topraklıysa, transformatör sargıları da yıldız bağlı ve topraklıysa bu durumda generatör sargılarından 3 ve 3'ün katı harmonik akımları geçer. Bunu önlemek için generatör sargıları yıldız noktası yalıtılmalı veya transformatör sargılarından biri üçgen bağlanarak 3 ve 3'ün katı harmonikler bloke edilebilir.

3.1.3 Ark Fırınları

Ark fırınları büyük kurulu güce sahip tesisler olması nedeniyle harmoniklerin şebekeye etkileri açısından önemli bir yere sahiptir. Şebekeden çekilen harmonik akımların genliği büyük olduğundan dolayı bağlı bulunduğu şebekenin kısa devre gücünün büyük olması gerekmektedir. Aksi takdirde büyük genlikli harmonik akımların gerilim düşümü etkisi fazla olacağından dolayı sistemdeki diğer tüketiciler bundan fazlaca etkilenecektir. Bu nedenle büyük güçlü demir çelik tesislerinin kısa devre gücü büyük olan şebekelerden enerji alması önemlidir.

Ark fırınları metalin kısa devre edilerek eritilmesi prensibi ile çalışmaktadır. Ergiyen metalin empedansı devamlı olarak değiştiği için çekilen akım kararsız yapıdadır ve her bir periyod değişen harmonik spektrumuna sahiptir. Bu nedenle ark fırınlarının harmonik spektrumunun elde edilmesi oldukça zordur. Bu problemin çözümü için bilimsel araştırmalar yapılmaktadır [27].

3.1.4 Kaynak Makineleri

Metal sektörü ve özellikle gemi tersanelerinde yaygın olarak kaynak makineleri ark fırınlarında olduğu gibi kısa devre prensibi ile çalışmaktadır. Birleştirilmek istenen metal parçalar bir araya getirilerek bir elektrot yardımıyla birleşim noktasından kısa

devre edilir. Bu sayede birleşim noktasından kA mertebesinde yüksek akım geçer. Oluşan çok yüksek ısı metal parçaları yumuşatarak birbirine geçmesini sağlar. Bu işlem sırasında şebekeden sinüzoidal olmayan akımlar çekilir.

3.1.5 Kesintisiz Güç Kaynakları (UPS)

Kesintisiz güç kaynakları (UPS), içerisinde yer alan aküler sayesinde şebekede enerji kesilmesi durumunda yükü belli bir süre daha besleyebilmek için kullanılan elektronik cihazlardır. UPS'ler genellikle ofislerde, telefon santrali, server kabini, bilgisayarlar, kamera sistemleri gibi küçük güçlü cihazları beslemek için kullanılırlar. Bunun yanı sıra otomasyonla yönetilen üretim makinalarında olası bir şebeke enerjisi kesilmesi durumunda kontrol panelinde program hafızasının silinmemesi için de UPS cihazları kullanılmaktadır.

Girişinde AC şebeke enerjisi bir doğrultucu sayesinde DC'ye dönüştürülür ve aküler şarj edilir. Akülerin çıkışı ise bir inverter devresi ile tekrar AC'ye dönüştürülerek yük beslenir. Doğrultucu devresinde kullanılan yarı iletken devre elemanları UPS akımının nonsinüzoidal olmasına sebep olmaktadır. Doğrultucunun 6 darbeli veya 12-18-24 darbeli olması UPS'in şebekeden çektiği akımın harmonik etkinliğini belirlemektedir. 6 darbeli UPS'ler en düşük maliyetli, en çok harmonik içeren ve en yaygın UPS'lerdir. Doğrultucunun darbe sayısı arttıkça harmonik bozulma azalmaktadır. En düşük harmonik içeren UPS'ler hem doğrultucu devresinde hem inverter devresinde IGBT kullanılan UPS'lerdir [28].

3.1.6 Asenkron Motor Hız Kontrol Sürücüleri

Endüstride en yaygın kullanımı olan motor türü asenkron motorlardır. Hız kontrolü yapılması gereken uygulamalarda asenkron motorlar frekans konvertörleri kullanılarak sürülürler. Asenkron motorların devir sayısı frekansla doğru orantılı olarak değişmektedir. Frekans konvertörleri yapısında AC giriş gerilimini DC'ye çeviren bir doğrultucu ve bu DC gerilimi istenen frekansta AC gerilime dönüştüren bir inverter bulunur. Bu yapıda yarı iletken devre elemanları kullanıldığından dolayı şebekeden çekilen akım harmonik bileşenler içerir. Son yıllarda çok hızlı anahtarlama yapabilme

özelliği sayesinde çok düşük seviyede harmonik üreten IGBT kontrollü sürücüler üretilmektedir. Fiyatları normal sürücülerin ortalama 4 katı olan bu sürücülerin henüz yaygın kullanımı bulunmamaktadır. Standart sürücülerin toplam akım harmoniği bozulma oranı %65 seviyelerinde iken IGBT kontrollü sürücülerin toplam akım harmoniği bozulma oranı %5'in altındadır.

3.1.7 Gaz Deşarjlı ve Led Aydınlatma Armatürleri

Gaz deşarjı prensibi ile çalışan aydınlatma armatürleri içerisinde yarı iletken gazlar bulunmaktadır. Bu gazlar gerilim belli bir değerin üzerine çıktığında iletken hale geçer. Bu nedenle bu elemanların akım – gerilim karakteristiği lineer değildir. Bunun yanı sıra iç yapısında kullanılan balastlar da birer harmonik kaynağıdır. Manyetik balastlar manyetik devrenin mıknatıslanma akımının nonlineerliği nedeniyle, elektronik balastlar ise anahtarlama devresinde kullanılan yarı iletken elemanlar nedeniyle harmonik üretirler.

Led aydınlatma armatürleri DC gerilimle çalıştıklarından dolayı içerisinde doğrultucu içeren bir sürücüleri bulunmaktadır. Bu sürücüler yapısındaki yarı iletken devre elemanları nedeniyle şebekeden harmonikli akım çekilmesine sebep olurlar.

3.2 Harmoniklerin Etkileri

Harmoniklerin dolaylı olarak ve direkt olarak birçok olumsuz etkisi bulunmaktadır. Bu olumsuz etkilerden belki de en önemlisi sistemde ilave güç kayıplarına sebep olarak enerji verimliliğini düşürmesidir. Bu bölümde harmoniklerin etkilerinden söz edilecektir.

3.2.1 Harmoniklerin Enerji Verimliliğine Olan Negatif Etkisi

Verimli bir enerji kullanımı için enerjinin üretiminden tüketimine kadar olan süreçte minimum kayıp yaşanması istenir. Ancak harmonikler bu sürecin tamamında güç sisteminde ilave kayıplara yol açarak sistemin verimini önemli oranda düşürmektedir. Harmonikler iletkenler, transformatörler, generatörler, motorlar ve dielektrik malzemeler üzerinde direkt olarak kayıplara yol açmasının yanı sıra dolaylı olarak da bir

çok yönden parasal kayıplara sebep olmaktadır. Fabrikalarda yaşanan elektronik kart arızaları sonucunda yaşanan üretim kayıpları, rezonans sonucunda devre elemanların zarar görmesi, sistemin enerjisiz kalması vb. bir çok zararlı etki örnek olarak verilebilir.

3.2.1.1 İletkenler Üzerindeki Kayıplar

Bir iletkenden akım geçtiğinde iletken üzerinde meydana gelen ısı kayıpları denklem (3.1) ile hesaplanmaktadır.

$$P_k = {I_{RMS}}^2 . R \tag{3.1}$$

Harmonik bileşenler içeren bir akım dalgasının RMS değeri arttığından dolayı bu harmonik bileşenler iletkenler üzerinde önemli oranda ısı kayıpları meydana getirmektedir. Bunun yanı sıra deri etkisi olarak bilinen yüksek frekanslarda iletkenlerin etkin olarak kullanılan kesiti azalmakta ve dolayısıyla direnci artmaktadır.

Deri etkisi harmoniklerin iletkenler üzerindeki kayıplarını arttıran bir diğer etkendir. Bilindiği gibi iletkenlerin direnci alternatif akımda doğru akımdakinden daha fazladır. Bunun sebebi frekans arttıkça iletkenin etkin olarak kullanılan kesit alanı azalmaktadır. Dolayısıyla yüksek mertebeli harmonik bileşenlerde deri etkisinin önemi daha da artmaktadır.

Harmoniklerin iletkenler üzerinde kayıplara yol açtığı bir diğer konu ise nötr iletkenleri üzerindeki kayıplardır. Bilindiği gibi 3 fazlı dengeli sistemlerde nötr iletkeninden akım geçmez ancak 3 ve 3'ün katı harmonik bileşenler fazör olarak incelendiğinde aralarında açı farkı olmadığı görülmektedir. Dolayısıyla 3 faz akımı toplanarak nötr üzerinden devresini tamamlamaktadır. Bu da nötr iletkenleri üzerinde ilave ısı kayıpları oluşmasına sebep olmaktadır.

3.2.1.2 Transformatörler Üzerindeki Kayıplar

Harmonikler transformatörler üzerinde ilave bakır kayıpları ve demir kayıplarına yol açmaktadır.

Akım harmoniklerinin varlığı sonucunda akımın RMS değeri yükseldiğinden dolayı transformatör sargılarında oluşan ısı kayıpları artmaktadır. Buna bakır kayıpları denmektedir. Ayrıca harmonikler demir nüveler üzerinde ilave gerilim endüklenmesine sebep olur. Bu endüklenen gerilim nüve içinde ve yüzeyinde dolaşan fuko (eddy) akımlarını arttırır. Fuko akımları nüvelerde aşırı ısınmaya sebep olmaktadır.

Bunun yanı sıra harmonikli devrelerde transformatör içindeki manyetik devrede oluşan histerisiz kayıpları yüksek frekanslı genlikler nedeniyle daha da artmaktadır. Histerisiz kayıpları ilave ısı kaybı şeklinde oluşmaktadır.

3.2.1.3 Motor ve Generatörler Üzerindeki Kayıplar

Harmoniklerin etkisi ile aynı transformatörlerde olduğu gibi motor ve generatörlerde de sargılarda oluşan ısı kayıpları ve manyetik çekirdekte oluşan demir kayıplarında artış olmaktadır. Ayrıca harmonikler fazör olarak incelendiğinde 1, 7, 13, 19 bileşenlerin motoru ileri yönde döndürme etkisinde olduğu, 5, 11, 17, 23 bileşenlerin ise motoru geri yönde döndürme etkisinde olduğu gözlemlenmektedir. Bunun sonucunda motorda aşırı ısınma, gürültü ve titreşim olayları meydana gelmektedir.

Çizelge 3. 1 Harmonik bileşenlerin motor dönüş yönüne etkisi

Harmonik Mertebesi	Frekans (Hz)	Sequence (sıra) tipi	Motor Dönüş Yönü
1	50	+	İleri
3	150	0	-
5	250	-	Geri
7	350	+	İleri
9	450	0	-
11	550	-	Geri
13	650	+	İleri
15	750	0	-
17	850	-	Geri
19	950	+	İleri
21	1050	0	-
23	1150	-	Geri

3.2.1.4 Dielektrik Kayıpları

Yalıtkan malzemelerin yüzeyinden toprağa doğru uygulanan gerilimin frekansına ve genliğine bağlı olarak kapasitif akımlar akmaktadır. Bu akımlar güç sistemlerinde kayıp anlamına gelmektedir. Frekansın yükselmesiyle kapasitif reaktans değeri düşeceğinden dolayı eğer gerilimde yüksek frekanslı bileşenler mevcutsa yalıtkan yüzeyinden akacak kapasitif kaçak akımlar artacaktır. Yalıtkan malzeme yüksek bir direnç değerine sahip olduğundan bu kapasitif akımlar ısı olarak kayıplara yol açmaktadır.

$$P_L = w.C.V^2.tan\delta \tag{3.2}$$

3.2.2 Kondansatörlerin Hasar Görmesi

Hem harmoniklerin kondansatörler üzerinde, hem de kondansatörlerin şebekedeki harmonik bozulma üzerinde önemli etkileri vardır.

Kondansatörler akım gerilim karakteristiği açısından lineer yüklerdir. Dolayısıyla sinüzoidal gerilimlerde şebekeden harmonikli akım çekmezler. Ancak bilindiği üzere kondansatörlerin kapasitif reaktansı frekansla ters orantılı olarak değişmektedir. Eğer kondansatöre uygulanan gerilimde harmonik bileşenler bulunuyorsa bu durumda kondansatör akımının harmonik bileşenleri hem gerilimin genliği ile, hem de mertebe ile doğru orantılı olarak artacaktır.

Kondansatörün harmoniklerden dolayı hasar görmemesi için kondansatör dayanma geriliminin U_C değerinden büyük olması gerekmektedir.

$$U_C = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} {U_h}^2} = \sqrt{3\sum_{h=1}^{\infty} \left(X_{C_h}.I_h\right)^2} \tag{3.3}$$

Kondansatörlerin şebekedeki harmonik bozulma etkisi üzerine bir örnek vermek gerekirse; bir fabrikanın reaktif güç kompanzasyonu amacıyla tesis ettiği 500 kVAr gücünde bir sisteme faz – nötr arası 5 V efektif değerine sahip bir 7. harmonik gerilimi uygulanırsa şebekeden çekilecek 7. harmonik akımının hesabı;

$$X_{C1} = \frac{V^2}{Q_C} = \frac{400^2}{500.10^3} = 0{,}32\ \Omega \tag{3.4}$$

Kondansatörün 7. harmonikteki kapasitif reaktansı, temel frekanstaki kapasitif reaktansının 7'de 1'i kadardır.

$$X_{C7} = \frac{X_{C1}}{7} = \frac{0{,}32}{7} = 0{,}0457\ \Omega \tag{3.5}$$

$$I_7 = \frac{V_7}{X_{C7}} = \frac{5}{0{,}0457} = 109{,}4\ A \tag{3.6}$$

Görüldüğü gibi 5 V gibi küçük olarak değerlendirilebilecek bir gerilim değeri kondansatöre uygulandığında, şebekeden 109,4 A gibi yüksek bir akım harmoniği çekilmesine sebep olmaktadır.

3.2.3 Koruma Sistemlerinin Hatalı Çalışması

Harmonikler, koruma rölelerinin açma sinyali vermesi gerektiği durumlarda bunu gerçekleştirememesine veya sistemde her hangi bir arıza veya aşırı akım durumu söz konusu değilken gereksiz yere açma sinyali üretmesine sebep olabilmektedir. Bu konuda geçmişte yapılan bazı çalışmalara göre eski tip mekanik aşırı akım rölelerinde THD_I değeri arttıkça açma zamanı uzamaktadır. Bu durumda arıza akımı zamanında kesilemediği için sistem elemanları zarar görebilmektedir. Dijital aşırı akım röleleri ise mekanik rölelerin aksine THD_I değeri arttıkça açma zamanı kısalmaktadır.

Koruma elemanlarının harmonikli devrelerde hatalı çalışmasına bir diğer örnek ise 3 ve 3'ün katı harmonik bileşenlerin devresini toprak üzerinden tamamladığı için rölenin bu akımları toprak arızası olarak görmesidir. Böylece sistemde her hangi bir arıza yokken röle gereksiz yere açma sinyali vererek enerjiyi kesmektedir. Bu durum ancak sekonderi yıldız bağlı transformatörlerde sekonder tarafında yani yük tarafında çalışan rölelerde söz konusudur. Üçgen bağlı trafolarda 3 ve 3'ün katı harmonik bileşenler şebekeye geçemediği için rölelere böyle bir etkide bulunmazlar.

Her bir aşırı akım koruma rölesi harmonikli akımlarda farklı tepki sürelerine sahip olabilir. Bunun nedeni her bir rölenin devre yapısının, yazılımının, çalışma prensibinin farklı olmasından kaynaklanmaktadır. Bu nedenle rölelerin seçiminde ve ayarlarının

yapılmasında yük akımının harmonik içeriği dikkate alınmalıdır. Mümkünse röle test cihazları kullanılarak rölelerin harmonikli akımlarda nasıl davranacağı test edilmelidir.

3.2.4 Rezonans Etkisi

Rezonans elektrik devrelerinde endüktif reaktans ile kapasitif reaktansın belirli bir frekansta eşitlenmesi durumunu ifade etmektedir. Rezonans olayı sistemde aşırı gerilim, aşırı akım gibi istenmeyen sonuçlara sebep olarak devre elemanlarında tahribata yol açmaktadır.

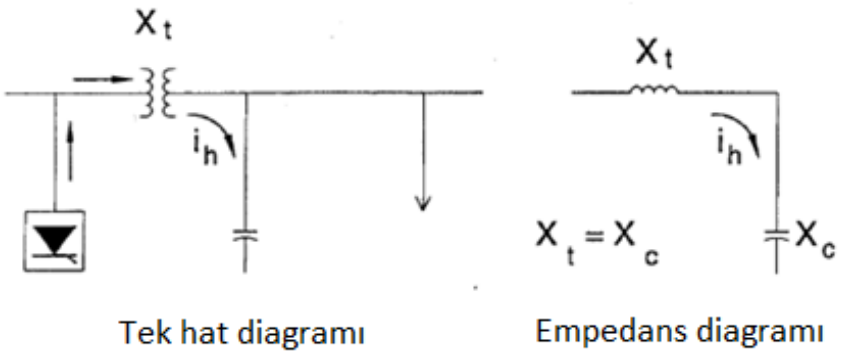
Endüktif reaktans frekansla doğru orantılı, kapasitif reaktans ise frekansla ters orantılı olarak değişmektedir.

$$X_L = 2.\pi.f.L \tag{3.7}$$

$$X_C = \frac{1}{2.\pi.f.C} \tag{3.8}$$

Temel frekansta rezonansa girmeyen devreler yüksek frekanslarda rezonansa girebilmektedir. Eğer sistemde bu frekansta veya yakın frekanslarda akım veya gerilim genlikleri mevcut ise bu durumda devrede çok yüksek genlikte harmonik akım ve gerilimler oluşacaktır. Elektrik devrelerinde seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki türde rezonans olayı gerçekleşebilir.

Seri rezonans sistemde genellikle yükün ani olarak devre dışı kalması neticesinde meydana gelmektedir. Bu durumda devrede sadece seri olarak transformatör endüktif reaktansı ve kondansatörlerin kapasitif reaktansı kalır. Bu seri devrenin rezonans frekansı denklem 3. 9 kullanılarak hesaplanır.



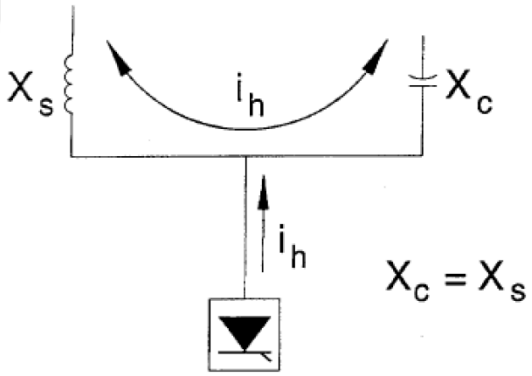
Şekil 3. 4 Seri rezonans durumunda tek hat ve empedans diyagramı

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} = f_1.\sqrt{\frac{X_C}{X_t}} \tag{3.9}$$

Eğer sistemde rezonans frekansına çok yakın frekanslarda genlikler mevcut ise bu durumda oluşacak akım yalnızca transformatörün ve kondansatörlerin omik direnci ile sınırlandırılacaktır. Genellikle bu dirençler mΩ mertebesinde ihmal edilecek kadar düşük seviyelerdedir.

Paralel rezonans frekansı ise eş değer empedansın maksimum değer aldığı frekanstır. Bu durum kompanzasyon ile transformatörün paralel rezonansa girmesiyle meydana gelir. Bu durumda yük tarafından üretilen harmonik akımlar kompanzasyon üzerinde aşırı gerilimler oluşmasına kondansatörlerin hasar görmesine sebep olur. Paralel rezonansın meydana geldiği harmonik bileşen denklem 3. 10 kullanılarak hesaplanır.

$$n_r = \sqrt{\frac{S_{tr}}{Q_C.u_k}} \tag{3.10}$$



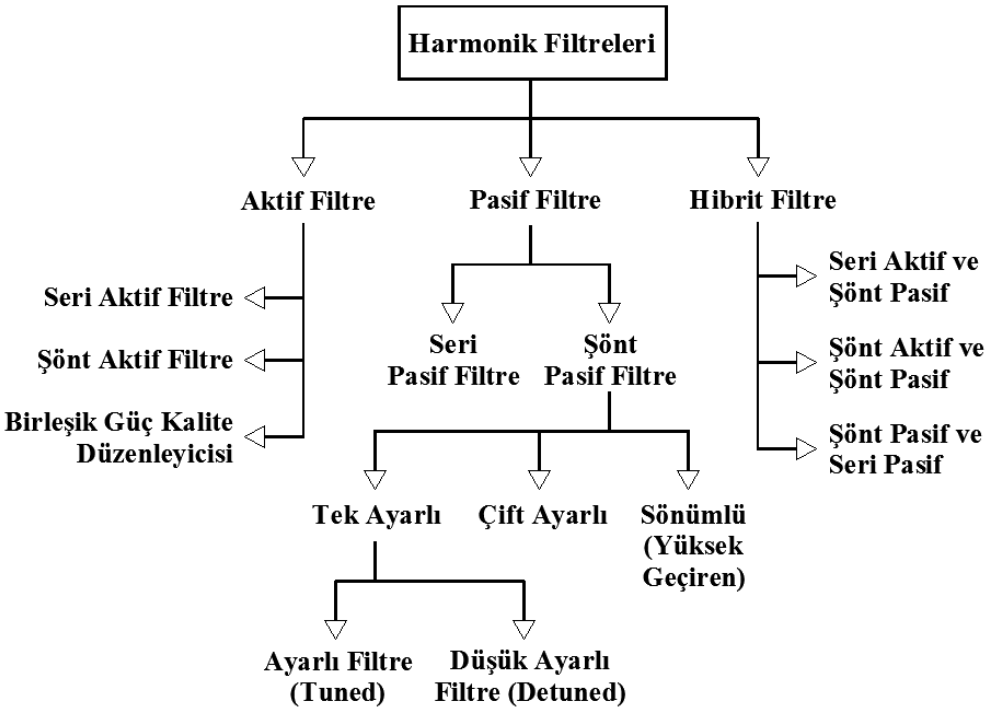
Şekil 3. 5 Paralel rezonans durumunda tek hat diyagramı

Seri ve paralel rezonansın önlenmesi amacıyla kondansatörlere seri endüktans bağlanmasıyla yapı HFKS şeklini almaktadır. Bu seri endüktans temel frekansta küçük bir endüktif reaktansa sahip olup, devrenin eşdeğer reaktansını fazla değiştirmemektedir. Ancak bu seri LC devresi rezonans frekansından yüksek frekanslarda endüktif bölgede çalışmaktadır ve kondansatörlerin yüksek frekanslarda transformatör ve şebeke ile rezonansa girmesini engellemektedir.

BÖLÜM 4

HARMONİK FİLTRE TÜRLERİ

Prensip olarak harmonik üretmeyen veya alternatiflerine göre daha az üreten makine ve elektriksel cihazların tercih edilmesi en doğru olandır. Bu sayede harmoniklerin filtre edilmesi gibi bir zorunluluk oluşmayacaktır. Ancak bazı durumlarda harmonik problemi yaşanması kaçınılmaz olmaktadır. Harmoniklerin zararlı etkilerinin önlenmesi ve yönetmeliklerin belirlediği limit değerlere uygunluk sağlanması amacıyla harmonik filtreleri kullanılmaktadır. Şekil 4. 1'de harmonik filtre türleri verilmiştir [29].



Şekil 4. 1 Harmonik filtre yapıları

Harmonik filtrelerinden temel beklentiler:

- Her koşulda akım ve gerilim harmonik değerlerini hedeflenen değerlere düşürebilme,
- Sistemde farklı arıza ve problemlere sebep olmama,
- Kolay kurulum ve basit işletme yapısına sahip olma,
- Uzun ömürlü olma,
- Düşük yatırım ve işletme maliyetine sahip olma.

Harmonik filtreleri projelendirilirken öncelikle harmonik probleminin kaynağı ve hedef değerler belirlenmelidir. İşletmeyi hedef değerlere ulaştıracak yöntemler maliyet analizi yönünden karşılaştırılmalıdır. En etkin ve en ekonomik yöntem tercih edilmelidir.

Bir tesiste harmonik filtre uygulaması projelendirilirken öncelikle tesisle ilgili harmonik bilgilerine ihtiyaç duyulur. Bunun yanı sıra akım, gerilim, aktif güç, reaktif güç, güç faktörü gibi temel elektriksel bilgiler temin edilmelidir. Mümkünse işletmenin elektriksel tek hat şeması oluşturulmalıdır. Bu şema üzerinde hangi yükün toplam harmonik bozulmaya ne oranda etki ettiği belirlenmelidir. Harmonik filtrenin yüke yakın bir noktada konumlandırılması etkin bir filtreleme ve tesis iç kayıplarının azaltılması açısından son derece önemlidir.

Harmonik filtreleri çalışma prensibi açısından aktif ve pasif filtreler olmak üzere iki gruba ayrılmaktadır. Bir de aktif ve pasif filtrelerin çeşitli kombinasyonlarda bağlanmasıyla oluşturulan hibrit filtreler kullanılmaktadır.

4.1 Aktif Filtreler

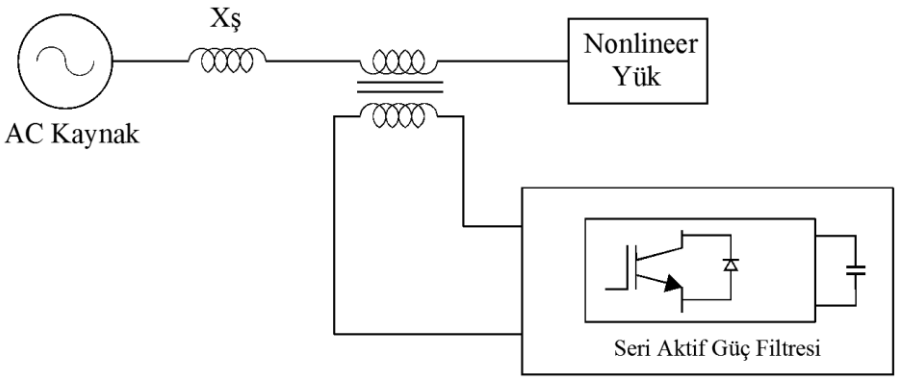
Aktif filtreler akımı veya gerilimi istenen sinüzoidal forma yaklaştıran bir gerilim kaynağı inverteridir. Filtre edilmek istenen yükün harmonik değerlerini ve faz açılarını ölçerek bu harmonik bileşenlerle aynı frekansta aynı genlikte ve 180 derece zıt yönde

dalga üreterek sisteme enjekte ederler. Bu sayede devrede sadece temel bileşene ait işaret kalmaktadır.

Aktif filtrelerin pasif filtrelere göre bir çok üstünlükleri bulunmaktadır. Bunlardan en önemlileri değişken yüklere uyum sağlayabilmeleri ve tek bir cihaz ile 50. harmoniğe kadar tüm bileşenlerin filtrelenebilmesidir. Pasif filtrelerin performansı bir çok dış etkene bağlı iken aktif filtreler daha güvenilir bir filtrasyon işlemi gerçekleştirebilmektedir.

4.1.1 Seri Aktif Filtre

Seri aktif filtreler gerilim yükselmesi, gerilim düşümü gibi istenmeyen durumlarda gerilim regülasyonu amacıyla kullanılmaktadır. Yüke uygulanan gerilimin tam sinüzoidal olmasını sağlamaktadır. Gerilim dalgalanmalarına karşı hassas yüklerde uygulanmaktadırlar.

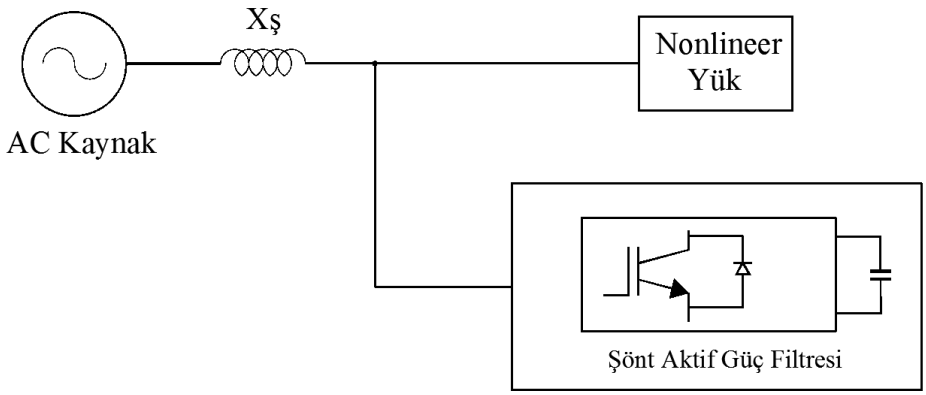


Şekil 4. 2 Seri aktif filtre bağlantı şekli [30]

4.1.2 Şönt Aktif Filtre

Şönt aktif filtreler filtre edilmek istenen yüke paralel bağlanırlar. Yük akımının harmonik bileşenlerinin genliklerini ve faz açılarını ölçerek bu harmonik akımlarla aynı frekansta ve genlikte fakat 180 derece zıt yönde dalga üreterek sisteme enjekte ederler. Bu sayede şebekeden çekilen akım sinüzoidal forma yaklaşmış olmaktadır.

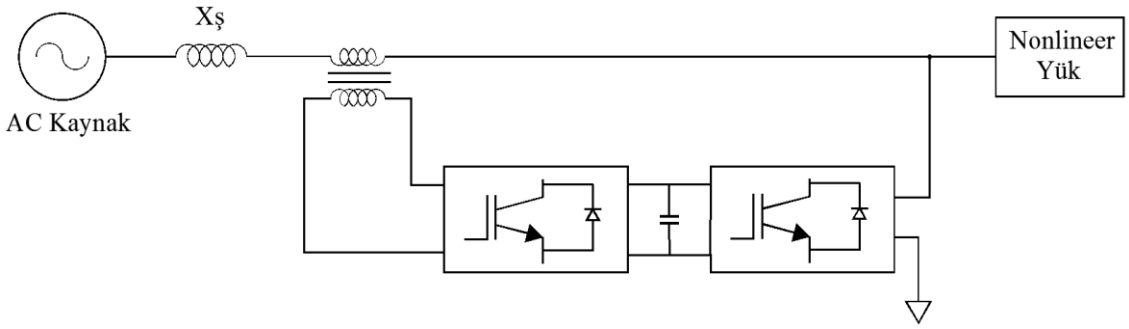
Şönt aktif filtreler harmonikleri süzmesinin yanı sıra güç faktörünün iyileştirilmesi, faz dengesizliğinin giderilmesi, nötr kayıplarının azaltılması gibi faydaları vardır. Bu sistemler her türlü yük için uygun olmakla beraber pasif filtrelere göre maliyetleri oldukça yüksektir.



Şekil 4. 3 Şönt aktif filtre bağlantı şekli [30]

4.1.3 Birleşik Güç Kalitesi Düzenleyicisi

Bu filtre yöntemi seri ve aktif filtrelerin entegre edilmesiyle oluşturulmuştur. Hem akım dalga formunu, hem de gerilim dalga formunu devamlı olarak tam sinüzoidal formda tutmak için tasarlanmışlardır. Bu sistemler bir güç sisteminde meydana gelebilecek neredeyse tüm kalite problemlerini engelleyebilmektedirler.



Şekil 4. 4 Birleşik güç kalitesi düzenleyicisi [30]

4.2 Pasif Filtreler

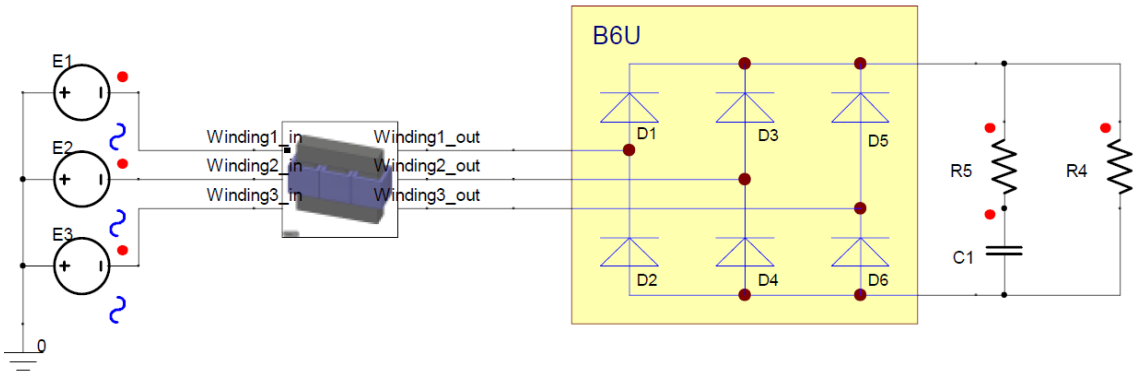
Pasif filtreler R-L-C elemanlarının farklı kombinasyonlarda bağlanmasıyla elde edilmektedir. Pasif filtrelerde harmonikler yok edilmez. Sadece harmoniklere düşük empedanslı veya yüksek empedanslı devreler bağlanarak harmoniklerin istenen yöne akması sağlanmaktadır.

4.2.1 Seri Pasif Filtre

Seri filtreler harmonik üreten yük ile şebeke arasına bağlanırlar. Amaç temel frekanstaki akıma düşük empedans göstererek geçirmek, yüksek frekanslı akımlara

yüksek empedans göstererek gerilim düşümü oluşturmaktır. Bu sayede harmoniklerin şebekeye olan etkileri azaltılmış olur.

Seri filtreler yük akımının tamamını taşıdığı için kalın kesitli iletkenler kullanılarak sarılmaktadır. Dolayısıyla ebatları büyük, maliyetleri fazladır. Genellikle AC motor sürücüleri ile şebeke arasına bağlanarak harmonik filtrasyonu gerçekleştirilmektedir.



Şekil 4. 5 Seri pasif filtre bağlantı şekli

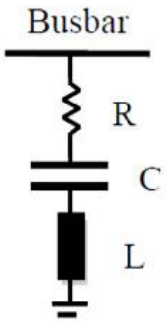
4.2.2 Şönt Pasif Filtre

Şönt pasif filtreler nonlineer yüke paralel bağlanırlar. Amaç yük tarafından üretilen harmonik akımlara düşük empedans göstererek harmoniklerin kısa devre edilmesini sağlamaktır. Bu yöntemin en önemli dezavantajı, kaynak gerilimi harmonik bileşenler içeriyorsa filtre devresi şebekeden de harmonikli akım çekmektedir. Dolayısıyla yük akımı filtre edilirken şebekeden çekilen harmonikler istenen oranda azalmayacaktır. Bu nedenle şönt pasif filtre tasarımı yapılırken şebeke koşulları dikkate alınmak durumundadır.

4.2.2.1 Tuned Filtre

Tuned filtreler diğer adıyla ayarlı filtreler seri L-C devresinden meydana gelmektedir. Bu seri L-C devresi filtre edilmek istenen frekansa yakın bir frekansa akort edilirler ve yüke paralel bağlanırlar. Bu sayede o frekansta filtre eşdeğer empedansı neredeyse 0 ohm olacağından dolayı harmonik akımların filtre devresine akması sağlanacaktır. Filtre devresinin aşırı akım çekerek hasar görmesini önlemek amacıyla devreye küçük bir seri R direnci eklenmektedir. R direncinin değeri filtre devresinin ayar keskinliğini yani

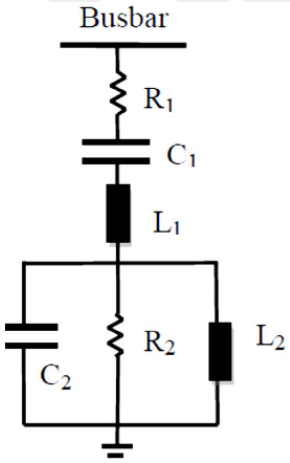
performansını etkilemektedir. Şebekedeki gerilim harmonikleri ve yükün akım harmonikleri genliklerine göre R-L-C elemanlarının değerleri belirlenir.



Şekil 4. 6 Tuned (ayarlı) filtre bağlantı şekli

4.2.2.2 Çift Ayarlı Filtre

Çift ayarlı filtreler iki farklı frekansa akort edilmiş devrelerdir. Bunun anlamı iki farklı frekansta düşük empedans göstermektedirler. Diğer frekanslarda ise yüksek empedans göstermektedirler.



Şekil 4. 7 Çift ayarlı filtre bağlantı şekli

4.2.2.3 Sönümlü (Yüksek Geçiren) Filtre

Sönümlü filtreler ayar keskinliği düşük olan filtrelerdir. Bu filtrelerin amacı belirli bir frekansa değil, geniş bir bant aralığındaki tüm frekanslardaki harmonik bileşenlerin süzülmesini sağlamaktır. Genelde yüksek mertebeli bileşenleri süzmek için kullanılırlar.

4.2.2.4 HFKS (Detuned) Filtre

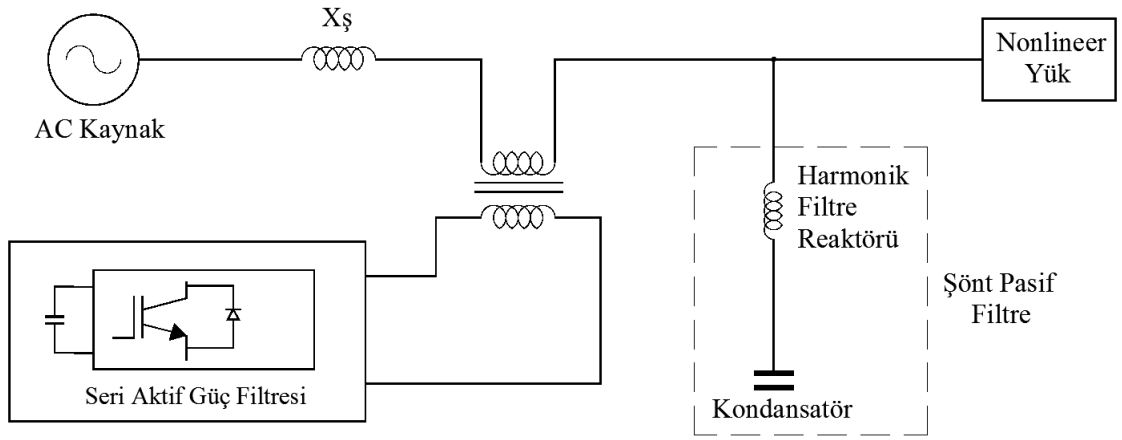
HFKS (Detuned – düşük ayarlı) filtrelere 5. bölümde detaylı olarak değinilmiştir.

4.3 Hibrit Filtreler

Hibrit filtreler aktif ve pasif filtrelerin ihtiyaca yönelik farklı şekillerde bağlanmasıyla oluşturulmuştur.

4.3.1 Seri Aktif ve Şönt Pasif Filtre

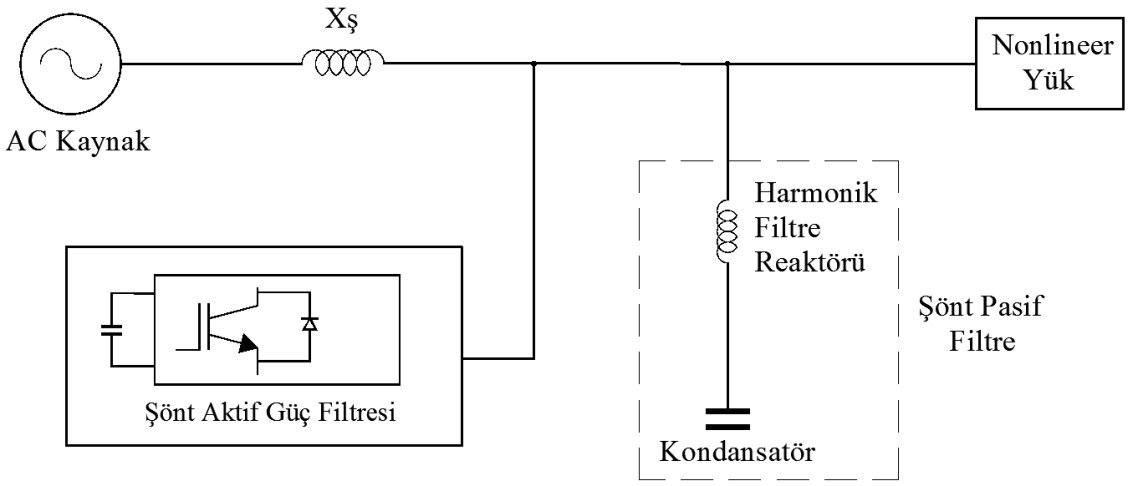
Bu filtre yapısında yükün ürettiği akım harmoniklerini şönt pasif filtre süzmektedir. Seri aktif filtre ise devredeki gerilim regülasyonunu sağlamaktadır. Bu yapıda hem akım hem de gerilim harmonikleri verimli bir şekilde elemine edilmiş olmaktadır.



Şekil 4. 8 Seri aktif ve şönt pasif filtre bağlantı şekli [30]

4.3.2 Şönt Aktif ve Şönt Pasif Filtre

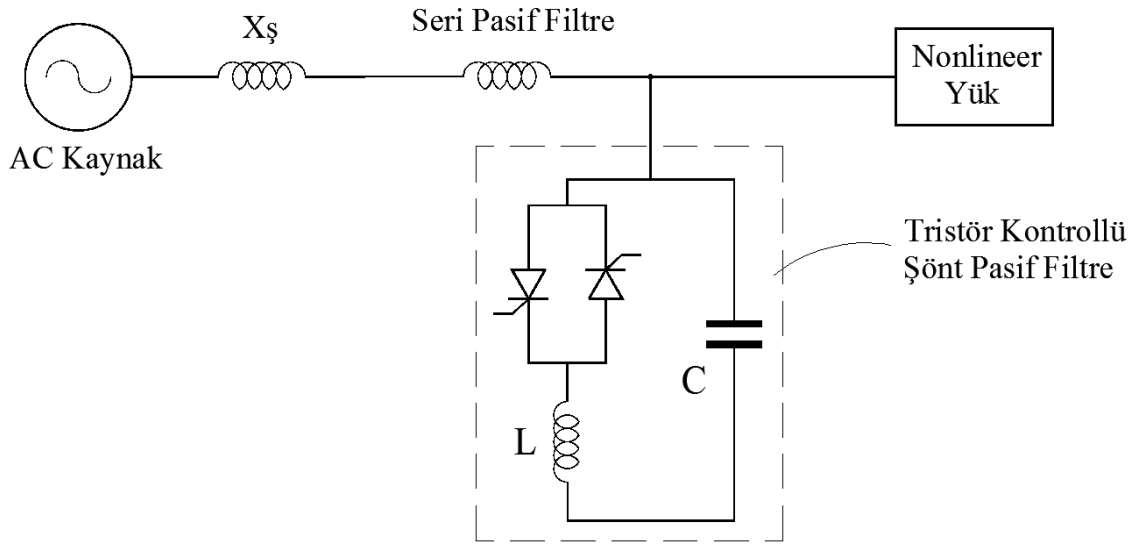
Bu modelde şönt pasif filtre büyük genlikteki harmonikleri süzmektedir. Pasif filtrenin kaçırdığı genlik olarak küçülen harmonikler ise aktif filtre tarafından temizlenmektedir. Harmoniklerin tamamının aktif filtreler kullanılarak süzülmesi çok daha maliyetli olacağından dolayı bu model maliyet ve etkinlik açısından son derece verimlidir.



Şekil 4. 9 Şönt aktif ve şönt pasif filtre bağlantı şekli [30]

4.3.3 Seri Pasif ve Şönt Pasif Filtre

Bu filtre yapısı seri bağlı pasif ve paralel bağlı tristör kontrollü pasif filtreden meydana gelmektedir. Paralel filtrelerin temel dezavantajlarından biri olan bozuk gerilimlerde şebekeden harmonik çekilmesini azaltmak amaçlı, hem de paralel filtrenin etkinliğini arttırmak amaçlı seri filtre kullanılmıştır. Yük tarafından üretilen harmonik akımlar seri filtre ve şebeke bölgesinde yüksek empedans göreceği için paralel filtre koluna yönelmektedir. Aynı zamanda paralel filtrenin şebekeden çekeceği harmonikler azaltılmaktadır. Tristör kontrolü sayesinde paralel filtrenin rezonans frekansı değiştirilerek filtrenin değişken yüklere daha etkin cevap verebilmesi sağlanmaktadır.



Şekil 4. 10 Seri pasif ve şönt pasif filtre bağlantı şekli

BÖLÜM 5

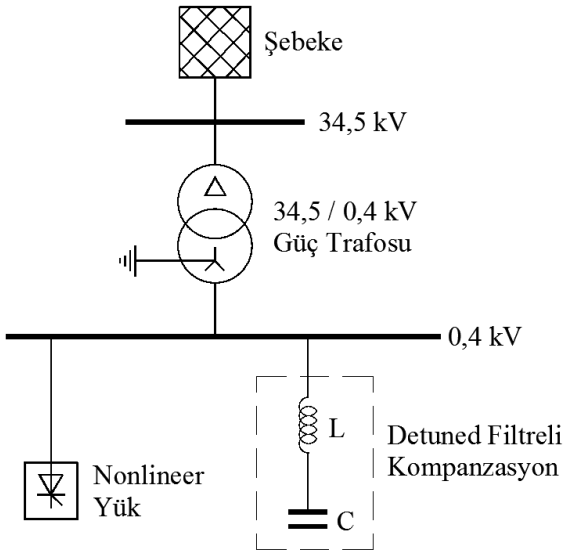
HARMONİK FİLTRELİ KOMPANZASYON SİSTEMLERİ (HFKS)

Tüketim tesislerinde şebekeden çekilen harmonik akımların oransal olarak önemli bir kısmı kondansatörler nedeniyledir. Kondansatörler aslında lineer karakteristiğe sahip elemanlardır ancak uygulanan gerilim harmonik bileşenler içeriyorsa şebekedeki harmonik bozulma miktarını çok fazla arttırırlar. Bu nedenle harmonik filtreli kompanzasyon sistemleri ülkemizde yaygın olarak kullanılmaktadır. Bunun temel sebepleri;

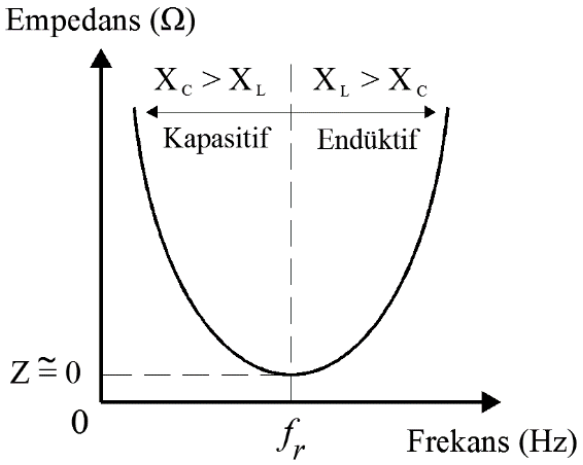
- Kondansatörlerin şebekeden çektikleri akım harmoniklerinin önemli oranda azaltılması,
- Kondansatörlerin şebeke ile rezonansa girmesinin önlenmesi,
- İşletmenin temel frekansta kapasitif güç ihtiyacının karşılanması,
- Yük tarafından üretilen harmoniklerin bir miktar süzülmesinin sağlanması,
- Kondansatörlerin çalışma ömrünü uzatması,
- Yatırım ve işletme maliyetlerinin sağladığı faydalara oranla düşük olması,
- Basit yapısı nedeniyle kurulum ve işletme kolaylığına sahip olması,
- Kullanılan devre elemanlarının standart değerlerde, yerli üretim ve stok malzemesi olması nedeniyle hızlı teslimat süreleri.

HFKS esas olarak yükün ürettiği harmonik akımları filtrelemeden ziyade kondansatörlerin filtresiz kullanımındaki harmonik bozulma oranını arttırıcı etkiyi önlemek için kullanılmaktadır. Özellikle 17, 19, 23, 25 gibi yüksek mertebeli harmonik bileşenler sistemde yüksek oranda bulunuyorsa kompanzasyon sistemleri mutlaka harmonik filtreli olmalıdır. Çünkü kondansatörlerin yüksek frekanslarda empedansı çok düşük değerler aldığından şebekeden yüksek oranda harmonik akımlar çekilecektir. Bunun sonucunda kondansatör arızaları ve rezonans olayları yaşanması muhtemeldir. Kondansatörlere seri reaktör bağlanması durumunda hem tesisin şebekeden çekilen harmonik akımları azaltılmış, hem de şebeke gerilimindeki harmonik bozulma oranı azaltılmış olmaktadır. Kondansatörlerin harmonik bozulmalara olan negatif etkisinden Bölüm 3.2.2.'de verilen örnekle bahsedilmişti.

HFKS seri L-C devresinden oluşmaktadır. Bu devrenin temel frekanstaki eşdeğer reaktansı kapasitif özelliktedir ve reaktif güç kompanzasyonu yapmaktadır. Bu devreye filtre rezonans frekansından daha yüksek frekanslarda gerilimler uygulandığında devrenin bu frekanslardaki eş değer reaktansı endüktif bölgede çalışmaktadır. Dolayısıyla hem şebeke reaktansı hem filtre reaktansı endüktif olduğunda rezonans oluşma ihtimali ortadan kalkmaktadır.



Şekil 5. 1 HFKS (detuned filtre) bağlantı şekli



Şekil 5. 2 HFKS'nin frekans – empedans karakteristiği

HFKS sektörde 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz rezonans frekansında standartlaşmıştır. Bunun sebebi filtre rezonans frekansının sistemde seri veya paralel rezonans oluşma ihtimali olan en küçük harmonik mertebesi olan 5. harmonik frekansından daha düşük bir değere akort edilmesi zorunluluğudur. Eğer filtre 275 Hz gibi bir değere set edildiği taktirde filtre 250 Hz frekansında kapasitif bölgede çalışacağından dolayı filtre devresinin şebeke ile rezonansa girme ihtimalini önleyemez. Benzer şekilde 240 Hz gibi 250 Hz'e çok yakın bir noktada akort sağlanırsa bu durumda filtre eş değer reaktansı 5. harmonik bileşenine karşı çok düşük bir empedans göstereceğinden dolayı şebeke gerilimindeki çok küçük 5. harmonik genlikleri olsa dahi filtre devresi şebekeden çok büyük akım harmonikleri çekecektir. HFKS'nin temel amaçlarından biri şebekeden çekilen akım harmoniklerini azaltmak olduğundan istenen sonuç elde edilemeyecektir. Bu nedenlerden dolayı sektör bu duruma bir standart getirmiştir ve 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz rezonans frekansı genel kabul görmüştür. Kondansatör ve filtre reaktörü imalatçıları ürünlerini bu standart değerlere göre üreterek bir bakıma yapılması muhtemel olan hatalı seçimlerin önüne geçilmektedir. Ancak özel uygulamalarda şebeke şartları ve yük harmonik spektrumu dikkate alınarak özel tasarımlar yapılması mümkündür.

Yük tarafından üretilen harmonik akımlar en düşük empedans yoluna yöneleceğinden dolayı bu sistemlerin filtreleme performansı filtre empedansının şebeke empedansından küçük olmasına bağlıdır. Bu nedenle HFKS'nin harmonik kaynağı yüke

en yakın baraya bağlanması filtre performansı açısından son derece önemlidir. Bu sayede tesis iç kayıpları da minimize edilmiş olmaktadır.



Şekil 5. 3 Harmonik filtreli kompanzasyon panosu

Paralel filtrelerin genel dezavantajlarından biri HFKS için de geçerlidir. Özellikle dağıtım tesisine alçak gerilimden bağlanan aboneler aynı baradan enerji alan diğer tüketicilerin ürettiği harmonik akımların bir kısmını bu filtreler nedeniyle üzerine çekmektedir. Bu akımlar sayaç üzerinden de geçtiği için diğer tesislerden gelen harmonik akımlar filtre devresini kuran işletmeyi ekonomik zarara uğratmaktadır. Bu durum kendi transformatörü olan yüksek gerilim aboneleri için nispeten geçerli değildir. Çünkü transformatör reaktansı frekansla doğru orantılı olarak değiştiğinden dolayı bir nevi seri filtre gibi işlev görerek şebeke tarafından tesise harmoniklerin akmasını engellemektedir.

HFKS'nde kondansatörün önüne bağlanan endüktans nedeniyle filtre eşdeğer reaktansı bir miktar azalır. Eş değer reaktansın azalması filtre akımının artmasına, bu da kondansatör uçlarına düşen gerilimin artmasına sebep olur. Bu nedenle

kondansatörlerin filtreli kullanımında kondansatörler bu gerilime dayanabilecek nitelikte seçilmelidir. Ayrıca filtre akımının artması nedeniyle filtre devresinin reaktif gücü kapasitif yönde bir miktar artmaktadır.

5.1 HFKS'nin Tasarımı

HFKS'nin tasarımında öncelikle filtre rezonans frekansının belirlenmesi gerekmektedir. Sektörde filtre rezonans frekansı olarak 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz standart olarak kullanılmaktadır. Hangi frekansın daha etkin çözüm olacağının tahmin edilebilmesi için yük akımının ve şebeke geriliminin harmonik değerlerinin bilinmesi gerekmektedir. HFKS yüke paralel bağlandıklarından dolayı direkt olarak şebeke gerilimine maruz kalırlar. Filtre tasarımı yapılırken sistemde var olan her bir harmonik bileşen için filtre eşdeğer reaktansı hesaplanmalıdır. Örneğin şebekede V_5 genliği yüksek ise 210 Hz kullanımı şebekeden çekilen I_5 akım harmoniklerini önemli oranda arttıracaktır.

Filtre rezonans frekansı belirlendikten sonra L ve C elemanlarının hesaplanmasında kullanılmak üzere filtre reaktör faktörü belirlenir. Genellikle yüzdesel olarak ifade edilen filtre reaktör faktörü p harfi ile gösterilir ve denklem (5.1) ile hesaplanır.

$$p = \frac{{f_1}^2}{{f_r}^2} \tag{5.1}$$

Standart rezonans frekansları olan 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz için filtre reaktör faktörleri Çizelge 5.1'de verilmiştir.

Çizelge 5. 1 Rezonans frekansına göre filtre reaktör faktörleri

Filtre Rezonans Frekansı	Filtre Reaktör Faktörü (p)
134 Hz	%14
189 Hz	%7
210 Hz	%5,67

Filtre elemanları belirlenmeden önce temel frekansta ihtiyaç duyulan reaktif güç belirlenir. Temel frekansta ihtiyaç duyulan reaktif güç değeri kullanılarak filtre

devresinin 50 Hz'teki eşdeğer reaktansı hesaplanır. Bu denklemde U filtreye uygulanacak fazlar arası gerilim değeridir.

$$X_{filtre} = \frac{U^2}{Q_{filtre}} \tag{5.2}$$

Kondansatör kapasitans değeri denklem (5.3) ile hesaplanır.

$$C = \frac{1 - p}{w.X_{filtre}} \tag{5.3}$$

Kapasitans değeri belirlendikten sonra denklem (5.4) ile endüktans değeri belirlenir.

$$L = \frac{p}{w^2.C} \tag{5.4}$$

Hesaplanan L ve C değerleri seri rezonans frekansı formülü ile kontrol edilir. Bu hesap sonucunda ilk başta belirlenen filtre rezonans frekansı bulunmalıdır.

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L.C}} \tag{5.5}$$

Filtre elemanları belirlendikten sonra filtreden geçecek akım ve kondansatör uçlarında oluşacak gerilim RMS olarak hesaplanmalıdır. Çünkü filtre devresinden harmonik akımlar da akacaktır. Dolayısıyla reaktörün sargı kesitleri, kondansatör dayanma gerilimi, elemanlar arasındaki kablo ve iletken bağlantıları, sigorta ve kontaktör elemanları bu RMS değerlere uygun olmak zorundadır.

Filtre devresi hem yük tarafından hem de şebeke tarafından harmonik akımlar çekecektir. Yük tarafından üretilen harmoniklerin ne kadarlık bir kısmının filtre devresine akacağını belirlemek oldukça zordur. Çünkü bu akımların bir kısmı şebekeye, bir kısmı tesis içerisindeki diğer düşük empedanslı elektriksel yüklere, bir kısmı filtre devresine akacaktır. Ancak filtrenin şebekeden ne kadar harmonik çekeceği denklem (5.6) ile her bir harmonik bileşen için ayrı ayrı hesaplanır. Bu formülde V_n harmonik bileşenin faz-nötr gerilimidir. 3 fazlı kondansatörler iç yapısında üçgen bağlı olduğundan dolayı 3 ve 3'ün katı harmonik bileşenler çekmezler.

$$I_n = \frac{V_n}{(X_{trn} + X_{fn} - X_{cn})} \tag{5.6}$$

Her bir bileşen için ayrı ayrı akım harmonikleri hesaplandıktan sonra aşağıdaki formüller kullanılarak filtreden geçecek akımın RMS değeri, ve kondansatör uçlarına düşecek gerilimin RMS değeri hesaplanır.

$$I_{RMS} = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} (I_h)^2} \tag{5.7}$$

$$U_{C_{RMS}} = \sqrt{3 \sum_{h=1}^{\infty} \left(X_{C_h} . I_h\right)^2} \tag{5.8}$$

Bölüm 5.2'de 471 µF kapasitans değerine sahip bir kondansatörün rezonans frekansı 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz olan reaktörlerle kullanıldığında filtre devresinin empedans değişimi ve diğer elektriksel parametreler incelenmiştir.

5.2 Rezonans Frekansı 134 Hz Olan Filtreler

134 Hz'lik HFKS 189 Hz ve 210 Hz'e göre rezonans açısından en güvenli bölgede çalışmaktadır. Şebeke geriliminin çok fazla harmonik içerdiği tesislerde yük akımının ise çoğunlukla lineer özellikte olduğu tesislerde tercih edilirler.

134 Hz'lik HFKS'nin yükün ürettiği harmonik akımları filtreleme özelliği hemen hemen hiç yoktur. Çünkü filtre edilme ihtimali olan en düşük frekans olan 250 Hz'te bile filtre devresinde yüksek bir empedans oluşmaktadır. Bu nedenle harmoniklerin küçük bir kısmı filtre devresine yönelirken büyük bir kısmı şebekeye ve diğer düşük empedanslı elektriksel yüklere akmaktadır.

Çizelge 5. 2'de 471 µF kapasitans değerine sahip bir kondansatörün rezonans frekansı 134 Hz olan bir filtre devresinde kullanılması durumunda devrenin elektriksel değerleri verilmiştir.

Çizelge 5. 2 Rezonans frekansı 134 Hz olan bir HFKS'nin elektriksel değerleri

Şebeke Gerilimi (V)							**400**
Kondansatör Kapasitesi (µF)							**471**
Filtre Rezonans Frekansı (Hz)							**134**
Filtre Reaktör Faktörü (%)							**13,92**
Filtre Endüktans Değeri (mH)							**2,995**
Kondansatör Tek Başına Bağlı İken Temel Frekans Akımı (A)							**34,17**
Kondansatör Reaktör İle Bağlı İken Temel Frekans Akımı (A)							**39,70**
Kondansatör Tek Başına Bağlı İken Temel Frekans Reaktif Güç (kVAr)							**23,68**
Kondansatör Reaktör İle Bağlı İken Temel Frekans Reaktif Güç (kVAr)							**27,50**
Kondansatör Tek Başına Bağlı İken Üzerine Düşen 50 Hz Gerilim (V)							**400**
Kondansatör Reaktör İle Bağlı İken Üzerine Düşen 50 Hz Gerilim (V)							**464,70**
Frekans (Hz)							
50	**134**	**150**	**250**	**350**	**450**	**550**	**650**
Kondansatör Tek Başına İken Kapasitif Reaktans (Xc) Değerleri (Ω)							
6,76	**2,52**	**2,25**	**1,35**	**0,97**	**0,75**	**0,61**	**0,52**
Reaktör Tek Başına İken Endüktif Reaktans (X_L) Değerleri (Ω)							
0,94	**2,52**	**2,82**	**4,70**	**6,59**	**8,47**	**10,35**	**12,23**
Kondansatör ve Reaktör Seri Bağlandığında Filtre Eşdeğer Reaktans Değerleri (Ω)							
5,82 Kapasitif	**0,00 Rezonans**	**0,57 Endüktif**	**3,35 Endüktif**	**5,62 Endüktif**	**7,72 Endüktif**	**9,74 Endüktif**	**11,71 Endüktif**

471 µF değerinde bir kondansatör 400 V bir baraya filtresiz olarak devrede tek başına bağlı iken şebekeden 34,17 A akım ve 23,68 kVAr kapasitif güç çekmektedir. 50 Hz'te 6,76 ohm'luk bir kapasitif reaktans değerine sahiptir. Ancak devreye 2,995 mH değerinde seri reaktör eklendiğinde bu durumda devrenin eş değer reaktansı 5,82 ohm'a düştüğünden dolayı şebekeden çekilen akım 39,7 A'e ve kapasitif güç ise 27,5 kVAr'a yükselmektedir. Devreye endüktif bir eleman eklenmesine rağmen kapasitif gücün artma sebebi kondansatörün üzerine düşen gerilim değerinin 464,7 V'a yükselmesidir. Kondansatörün bu gerilime sürekli olarak dayanabilmesi gerekmektedir. Şebeke geriliminin özellikle gece saatlerinde bir miktar daha yükseleceği ve devreden

temel bileşenin dışında harmonik akımların da bir miktar geçeceği düşünülürse 134 Hz'lik HFKS'nde 525 V'luk kondansatörlerin kullanılması uygundur.

Bu sistem rezonans açısından değerlendirildiğinde; filtresiz durumda 250 Hz frekansında 1,35 ohm'luk bir kapasitif reaktans söz konusu iken frekans yükseldikçe kapasitif reaktans düşmektedir. Bu da tesisin şebeke bağlantı noktasından itibaren şebeke reaktansı ve transformatör reaktansı toplamı ile belirli bir frekansta rezonansa girme ihtimali anlamına gelmektedir. Filtreli durumda ise 250 Hz'te 3,35 ohm'luk bir endüktif reaktans oluşmuştur. Filtre devresi harmonik frekansların tamamında endüktif davranacağı için şebeke ve transformatör ile rezonansa girmesi engellenmiştir.

134 Hz'lik HFKS tasarımı yapılırken filtre devresinin temel frekansta şebekeden çekeceği reaktif gücün artış göstereceği bilinmelidir. Cosω değerinin çok hassas ayarlanması gereken uygulamalarda bu artış göz önünde bulundurulmalıdır.

Bu sistemlerin 3. harmonik üzerinde etkili olabilmesi için nötr iletkenine ihtiyaç olduğundan dolayı kondansatörlerin içten yıldız bağlı olması veya monofaze devre kurulması gerekmektedir.

5.3 Rezonans Frekansı 189 Hz Olan Filtreler

Rezonans frekansı 189 Hz olan devreler en çok tercih edilen filtre yapılarıdır. Sistem hem rezonans tehlikesi açısından güvenli bir bölgede çalışmakta, hem kondansatörlerin şebekeden çektikleri harmonikleri azaltmakta, hem de yük akımının küçük bir kısmını süzmektedir. Bu sistemler tercih edildiğinde kondansatör uçlarına düşen gerilim 430 V seviyesine ulaşmaktadır.

Çizelge 5. 3'te 471 µF kapasitans değerine sahip bir kondansatörün rezonans frekansı 189 Hz olan bir filtre devresinde kullanılması durumunda devrenin elektriksel değerleri verilmiştir.

Çizelge 5. 3 Rezonans frekansı 189 Hz olan bir HFKS'nin elektriksel değerleri

Şebeke Gerilimi (V)							**400**
Kondansatör Kapasitesi (µF)							**471**
Filtre Rezonans Frekansı (Hz)							**189**
Filtre Reaktör Faktörü (%)							**7,00**
Filtre Endüktans Değeri (mH)							**1,505**
Kondansatör Tek Başına Bağlı İken Temel Frekans Akımı (A)							**34,17**
Kondansatör Reaktör İle Bağlı İken Temel Frekans Akımı (A)							**36,74**
Kondansatör Tek Başına Bağlı İken Temel Frekans Reaktif Güç (kVAr)							**23,68**
Kondansatör Reaktör İle Bağlı İken Temel Frekans Reaktif Güç (kVAr)							**25,46**
Kondansatör Tek Başına Bağlı İken Üzerine Düşen 50 Hz Gerilim (V)							**400**
Kondansatör Reaktör İle Bağlı İken Üzerine Düşen 50 Hz Gerilim (V)							**430,09**
Frekans (Hz)							
50	**150**	**189**	**250**	**350**	**450**	**550**	**650**
Kondansatör Tek Başına İken Kapasitif Reaktans (Xc) Değerleri (Ω)							
6,76	**2,25**	**1,79**	**1,35**	**0,97**	**0,75**	**0,61**	**0,52**
Reaktör Tek Başına İken Endüktif Reaktans (X_L) Değerleri (Ω)							
0,47	**1,42**	**1,79**	**2,36**	**3,31**	**4,26**	**5,20**	**6,15**
Kondansatör ve Reaktör Seri Bağlandığında Filtre Eşdeğer Reaktans Değerleri (Ω)							
6,29 Kapasitif	**0,83 Kapasitif**	**0,00 Rezonans**	**1,01 Endüktif**	**2,34 Endüktif**	**3,50 Endüktif**	**4,59 Endüktif**	**5,63 Endüktif**

5.4 Rezonans Frekansı 210 Hz Olan Filtreler

Rezonans frekansı 210 Hz olan filtreler şebeke geriliminin çok fazla harmonik içermediği, yük akımının ise harmonik etkinliğinin fazla olduğu tesislerde tercih edilirler. Bunun sebebi filtre devresinin 250 Hz'te oldukça düşük empedans göstermesidir. Eğer şebeke geriliminin 5. harmonik bileşeni yüksek bir genliğe sahipse bu durumda filtre devresi şebekeden fazla miktarda 5. harmonik akımı çekecektir. Bu durumda şebekeden çekilen akım harmonikleri azaltılmak istenirken arttırılmış olunacaktır. Bu durum özellikle temel frekansta çok fazla kapasitif güce ihtiyaç duyulan tesislerde etkisini daha fazla göstermektedir. Devreye giren kondansatör kademe sayısı

arttıkça şebekeden çekilen akım harmonikleri de o oranda artacaktır. Bu nedenle 210 Hz rezonans frekansı tercih edilecek tesislerde şebekedeki özellikle 5. harmonik gerilimi efektif değeri 2 V'u geçmemesi önerilmektedir.

Bu filtre sistemi yük akımının 5. ve 7. harmonik bileşenleri üzerinde etkisi olması beklenebilir. Daha yüksek mertebelerde ise filtre empedansı yüksek değerler aldığından dolayı filtre etkinliği yok denecek kadar azdır. Çizelge 5. 4'te 471 µF kapasitans değerine sahip bir kondansatörün rezonans frekansı 210 Hz olan bir filtre devresinde kullanılması durumunda devrenin elektriksel değerleri verilmiştir.

Çizelge 5. 4 Rezonans frekansı 210 Hz olan bir HFKS'nin elektriksel değerleri

Şebeke Gerilimi (V)							**400**
Kondansatör Kapasitesi (µF)							**471**
Filtre Rezonans Frekansı (Hz)							**210**
Filtre Reaktör Faktörü (%)							**5,67**
Filtre Endüktans Değeri (mH)							**1,219**
Kondansatör Tek Başına Bağlı İken Temel Frekans Akımı (A)							**34,17**
Kondansatör Reaktör İle Bağlı İken Temel Frekans Akımı (A)							**36,23**
Kondansatör Tek Başına Bağlı İken Temel Frekans Reaktif Güç (kVAr)							**23,68**
Kondansatör Reaktör İle Bağlı İken Temel Frekans Reaktif Güç (kVAr)							**25,10**
Kondansatör Tek Başına Bağlı İken Üzerine Düşen 50 Hz Gerilim (V)							**400**
Kondansatör Reaktör İle Bağlı İken Üzerine Düşen 50 Hz Gerilim (V)							**424,03**
Frekans (Hz)							
50	**150**	**210**	**250**	**350**	**450**	**550**	**650**
Kondansatör Tek Başına İken Kapasitif Reaktans (Xc) Değerleri (Ω)							
6,76	**2,25**	**1,61**	**1,35**	**0,97**	**0,75**	**0,61**	**0,52**
Reaktör Tek Başına İken Endüktif Reaktans (X_L) Değerleri (Ω)							
0,38	**1,15**	**1,61**	**1,91**	**2,68**	**3,45**	**4,21**	**4,98**
Kondansatör ve Reaktör Seri Bağlandığında Filtre Eşdeğer Reaktans Değerleri (Ω)							
6,38 Kapasitif	**1,10 Kapasitif**	**0,00 Rezonans**	**0,56 Endüktif**	**1,72 Endüktif**	**2,70 Endüktif**	**3,60 Endüktif**	**4,46 Endüktif**

5.5 Örnek Tasarım ve Karşılaştırma

Bu bölümde bir iş merkezinde kompanzasyon sistemi devre dışı iken alınan ölçüm verileri kullanılarak filtresiz kompanzasyon kullanımı, 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz rezonans frekansının etkinlik analizi yapılmıştır.

Bu sistemlerin gerilim harmoniklerine karşı vereceği cevabı incelemek basit bir şekilde yapılabilmektedir. Ancak yükün ürettiği akım harmoniklerine ne oranda etki edeceğini kestirmek son derece zordur. Çünkü akım harmonikleri tesis içerisindeki farklı noktalara ve şebekeye dağılmaktadır. Tesislerdeki elektriksel yüklerin ve şebekenin tüm harmonik frekanslarda modellemesini yapmak neredeyse imkansızdır. Bu nedenle üretici firmaların hangi sistemin tercih edilmesi gerektiği konusunda bir takım çalışmaları olmaktadır. Sektörde yaygın olarak seçim kriteri Çizelge 5.5'teki gibidir.

Çizelge 5. 5 Sektörde yaygın olan rezonans frekansı belirleme çizelgesi

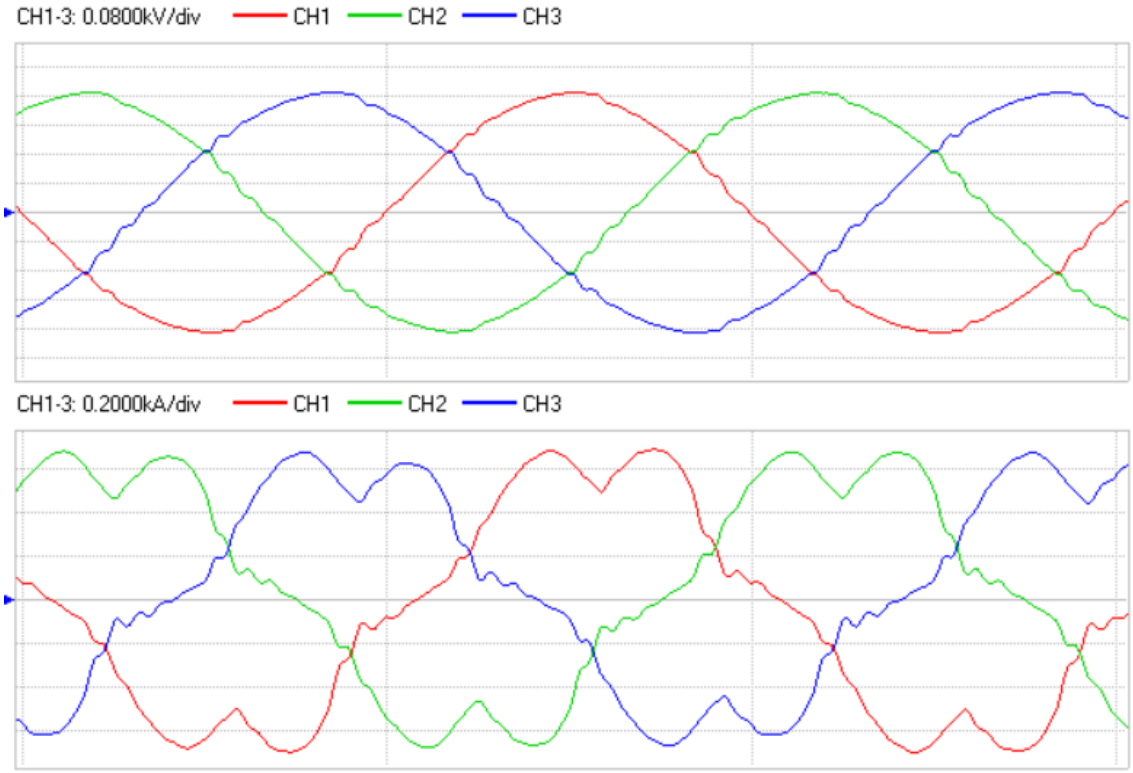
U-THD	I-THD	f_r
< %2	> %25	210 Hz
Diğer tüm durumlar		189 Hz
> %4	< %15	134 Hz

Bu tabloya göre şebeke geriliminin harmonik oranının düşük olduğu ve yük akımının harmonik etkinliğinin fazla olduğu tesislerde diğer bir ifadeyle yük akımının bozuk olmasına rağmen bunun şebekeyi çok fazla etkilemediği tesislerde 210 Hz rezonans frekansı tercih edilmesi uygundur. Çünkü bu durumda harmonik bozulmanın kaynağı yüktür ve yük akımını filtre etme konusunda en etkin seçenek 210 Hz'dir. Hatta bu değerlendirme tekil harmoniklere doğru detaylandırılırsa şebeke 5. harmonik geriliminin 1,5 Voltun altında olduğu ve yük 5. harmonik akımının baskın olduğu durumlarda rezonans frekansı 220-225 Hz seviyelerine kaydırılabilir.

Farklı bir durum olarak şebeke geriliminin bozulma oranının fazla olduğu buna karşılık yükün lineer özellik gösterdiği durumlarda filtre edilmesi gereken ciddi bir yük akımı zaten var olmadığı için 134 Hz kullanımı en uygun sonucu verecektir. Bu sayede kompanzasyonun şebekeden çektiği harmonik akımlar neredeyse 0'a yaklaşacaktır.

Bunun dışındaki durumlar için yani harmonik distorsiyona şebekenin veya yükün ne oranda sebep olduğunun kestirilemediği durumlarda 189 Hz kullanımı uygun olmaktadır. Ülkemizde en çok tercih edilen rezonans frekansı 189 Hz'dir.

Bir iş merkezinde kompanzasyon sistemi devre dışında iken alınan ölçüm sonuçları Şekil 5. 4, Çizelge 5. 6, Çizelge 5. 7 ve Çizelge 5. 8'de verilmiştir.



Şekil 5. 4 İş merkezine ilişkin gerilim ve akım dalga şekilleri

Çizelge 5. 6 İş merkezine ilişkin elektriksel bilgiler

P	303,75 kW	U	230,00 V
S	316,83 kVA	I	433,94 A
Q	90,09 kVAr	THD-U	2,21%
PF	0,9587	THD-I	19,79%
S_{TR}	1000 kVA	U_k	7%
S_k"	1000 MVA		

Çizelge 5. 7 İş merkezine ilişkin gerilim harmonikleri etkin değerleri

Order	(V)	Order	(V)	Order	(V)	Order	(V)
0	- 0.28	16	0.00	32	0.08	48	0.01
1	230.00	17	0.13	33	0.38	49	0.38
2	0.06	18	0.03	34	0.05	50	0.01
3	1.11	19	0.11	35	1.12	THD	2.21 (%)
4	0.04	20	0.03	36	0.07		
5	1.70	21	0.33	37	1.46		
6	0.07	22	0.05	38	0.02		
7	2.28	23	0.87	39	0.12		
8	0.02	24	0.10	40	0.02		
9	1.08	25	0.43	41	0.56		
10	0.02	26	0.05	42	0.02		
11	1.10	27	0.36	43	0.61		
12	0.02	28	0.09	44	0.01		
13	0.89	29	1.59	45	0.07		
14	0.02	30	0.13	46	0.01		
15	0.43	31	2.20	47	0.42		

Çizelge 5. 8 İş merkezine ilişkin akım harmonikleri etkin değerleri

Order	(A)	Order	(A)	Order	(A)	Order	(A)
0	- 0.25	16	0.03	32	0.22	48	0.02
1	433.94	17	1.17	33	0.95	49	0.78
2	1.99	18	0.18	34	0.16	50	0.02
3	15.52	19	0.65	35	3.33	THD	19.79 (%)
4	0.24	20	0.14	36	0.20		
5	78.26	21	0.88	37	3.90		
6	0.61	22	0.23	38	0.06		
7	26.43	23	3.98	39	0.32		
8	0.25	24	0.40	40	0.04		
9	5.83	25	1.66	41	1.39		
10	0.12	26	0.16	42	0.04		
11	9.78	27	1.17	43	1.41		
12	0.24	28	0.30	44	0.02		
13	6.28	29	5.26	45	0.16		
14	0.16	30	0.40	46	0.03		
15	1.78	31	6.92	47	0.91		

İş merkezinin 400 V'a indirgenmiş şebeke ve transformatör reaktans hesapları denklem (5.9), (5.10) ve (5.11)'de, toplam endüktans değeri denklem (5.12)'de verilmiştir.

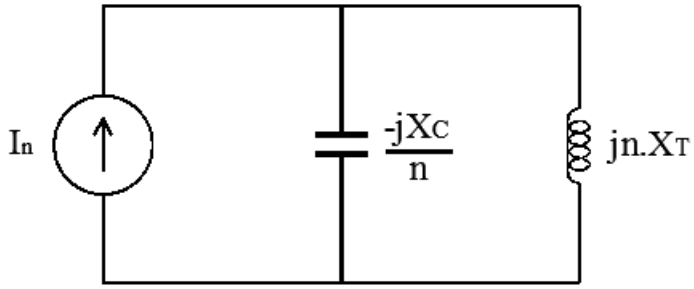
$$X_{Ş} = \frac{1{,}1.\,U^2}{S_k''} = \frac{1{,}1.\,400^2}{1000.\,10^6} = 0{,}000176\ \Omega \tag{5.9}$$

$$X_{tr} = \frac{7}{100}.\frac{0{,}4^2}{1} = 0{,}0112\ \Omega \tag{5.10}$$

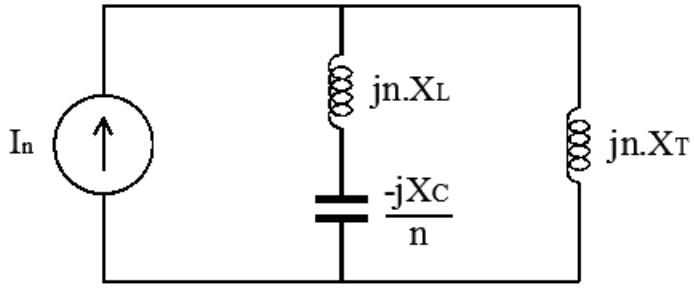
$$X_T = X_{Ş} + X_{tr} = 0{,}000176 + 0{,}0112 = 0{,}011376\ \Omega \tag{5.11}$$

Devredeki toplam seri endüktans değeri:

$$L_T = \frac{X_T}{2.\pi.f} = \frac{0{,}011376}{314} = 3{,}6229.10^{-5}\ H \tag{5.12}$$



Şekil 5. 5 Filtresiz kompanzasyon durumunda paralel rezonans eşdeğer devresi



Şekil 5. 6 Filtreli kompanzasyon durumunda paralel rezonans eşdeğer devresi

5.5.1 Filtresiz Kompanzasyonun Paralel Rezonans Analizi

Kondansatörlerin temel frekanstaki kapasitif reaktansı:

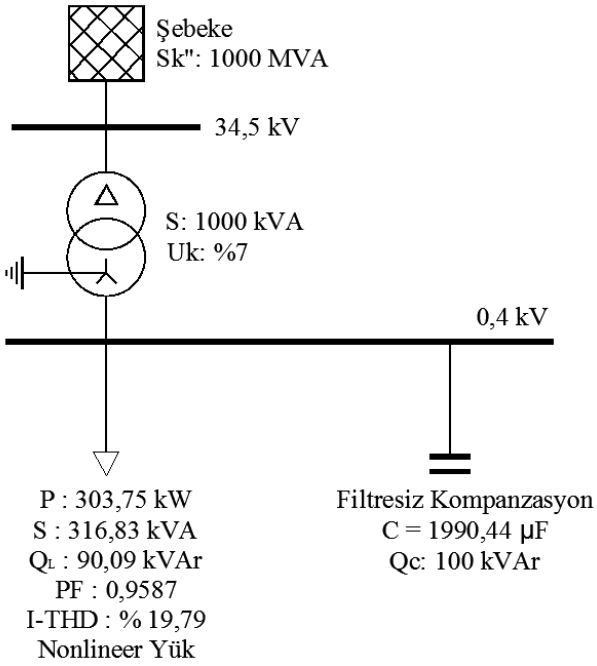
$$X_C = \frac{U^2}{Q_C} = \frac{400^2}{100.10^3} = 1{,}6\ \Omega \tag{5.13}$$

Kondansatörlerin kapasitans değeri:

$$C = \frac{1}{w.C} = \frac{1}{314.1{,}6} = \frac{1}{502{,}4} = 1990{,}44\ \mu F \tag{5.14}$$

Filtresiz kompanzasyon durumunda seri rezonans frekansı:

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{L_T.C}} = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{3{,}6229.10^{-5}.1990{,}44.10^{-6}}} = 592{,}7\ Hz \tag{5.15}$$



Şekil 5. 7 Filtresiz kompanzasyon durumunda tek hat diyagramı

Çizelge 5. 9 Filtresiz kompanzasyonun paralel rezonans analizi

n	f (Hz)	Şebeke Gerilimi (V)	Yük Akımı (A)	jXş + jXtr (Ω)	- jXc (Ω)	Ic Kondansatörlerin Şebekeden Çektiği Akım (A)	Paralel Eşdeğer Reaktans (Ω)	Yük Akımı Nedeniyle Oluşan Gerilim (V)
1	50	230	442,39	0,01138	1,59919	143,82	0,01146	5,07
5	250	1,7	78,26	0,05691	0,31984	5,32	0,06923	5,42
7	350	2,28	26,43	0,07967	0,22846	9,98	0,12233	3,23
11	**550**	**1,1**	**9,78**	**0,12520**	**0,14538**	**7,57**	**0,90182**	**8,82**
13	650	0,89	6,28	0,14796	0,12301	7,23	0,72962	4,58
17	850	0,13	1,17	0,19349	0,09407	1,38	0,18308	0,21
19	950	0,11	0,65	0,21625	0,08417	1,31	0,13780	0,09
23	1150	0,87	3,98	0,26178	0,06953	12,51	0,09468	0,38
25	1250	0,43	1,66	0,28454	0,06397	6,72	0,08252	0,14
29	1450	1,59	5,26	0,33007	0,05514	28,83	0,06621	0,35
31	1550	2,2	6,92	0,35283	0,05159	42,65	0,06042	0,42
35	1750	1,12	3,33	0,39836	0,04569	24,51	0,05161	0,17
37	1850	1,46	3,9	0,42112	0,04322	33,78	0,04816	0,19
41	2050	0,56	1,39	0,46665	0,03900	14,36	0,04256	0,06
43	2150	0,61	1,41	0,48941	0,03719	16,40	0,04025	0,06
47	2350	0,42	0,91	0,53494	0,03403	12,34	0,03634	0,03
49	2450	0,38	0,78	0,55770	0,03264	11,64	0,03467	0,03

Filtresiz kompanzasyon durumunda kondansatör akımının RMS değeri 162,12 A'e ulaşmaktadır. Sistemin şebeke ile paralel eş değer reaktansının 11. harmonik yakınlarında rezonansa girdiği görülmektedir. Ancak rezonans frekansı 550 Hz'e çok yakın olmadığından dolayı oluşan gerilim tehlikeli boyutlarda değildir. Kademeli kompanzasyon sistemlerinde her bir kademe için sistemin paralel rezonans cevabının incelenmesi gerekmektedir. Belirli bir kademe grubu devredeyken şebeke ile belirli bir frekansta paralel rezonans gerçekleşebilir.

5.5.2 134 Hz Rezonans Frekanslı HFKS'nin Paralel Rezonans Analizi

Temel frekansta filtrenin eş değer reaktansı:

$$X_{filtre} = \frac{U^2}{Q_{filtre}} = \frac{400^2}{100.10^3} = 1{,}6\ \Omega \tag{5.16}$$

Kondansatör kapasitans değeri:

$$C = \frac{1-p}{w.X_{filtre}} = \frac{1-0{,}14}{314.1{,}6} = \frac{0{,}86}{502{,}4} = 1711{,}78\ \mu F \tag{5.17}$$

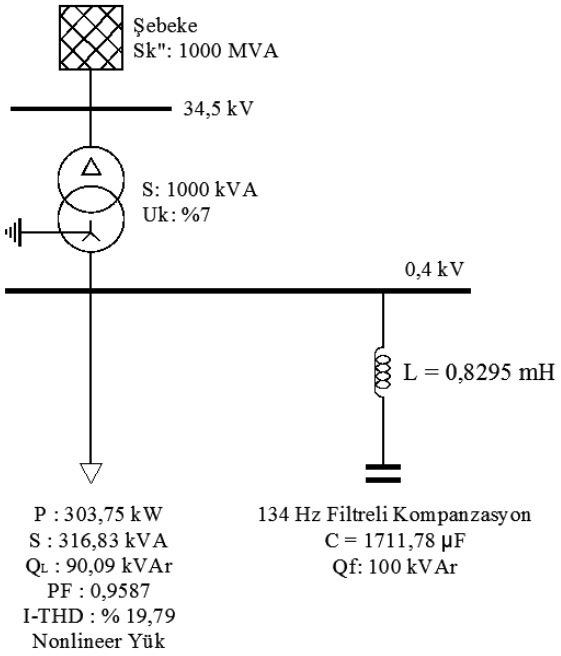
134 Hz harmonik filtre reaktörünün endüktans değeri:

$$L = \frac{p}{w^2.C} = \frac{0{,}14}{314^2.1711{,}78.10^{-6}} = 0{,}8295\ mH \tag{5.18}$$

134 Hz filtreli kompanzasyon durumunda seri rezonans frekansı:

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{(L+L_T).C}} = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{(0{,}8295.10^{-3}+3{,}6229.10^{-5}).1711{,}78.10^{-6}}} = 130{,}7\ Hz \tag{5.19}$$

134 Hz HFKS kullanılması durumunda sistem seri rezonans ve paralel rezonans açısından güvenli bölgede çalışmaktadır. Bu yapının en önemli dezavantajı yük akımını filtre etme performansının çok düşük olmasıdır. Bu sistemlerin tercih edilmesi durumunda kondansatörlerin üzerine düşecek olan gerilim 460 V seviyelerinde olacağından kullanılacak olan kondansatörler en az 480 V olmak zorundadır.



Şekil 5. 8 134 Hz HFKS tek hat diyagramı

Çizelge 5. 10 134 Hz HFKS paralel rezonans analizi

f (Hz)	Şebeke Gerilimi (V)	Yük Akımı (A)	jXş + jXtr (Ω)	jXfiltre (Ω)	Filtrenin Şebekeden Çektiği Akım (A)	Paralel Eşdeğer Reaktans (Ω)	Yük Akımı Nedeniyle Oluşan Gerilim (V)	Filtreye Yönelen Harmonik Akımlar
50	230	442,39	0,01138	1,59893	143,85	0,01146		
250	1,7	78,26	0,05691	0,93107	1,83	0,05363	4,20	4,51
350	2,28	26,43	0,07967	1,55852	1,46	0,07580	2,00	1,29
550	1,1	9,78	0,12520	2,69750	0,41	0,11965	1,17	0,43
650	0,89	6,28	0,14796	3,24469	0,27	0,14151	0,89	0,27
850	0,13	1,17	0,19349	4,32073	0,03	0,18520	0,22	0,05
950	0,11	0,65	0,21625	4,85343	0,02	0,20703	0,13	0,03
1150	0,87	3,98	0,26178	5,91283	0,15	0,25068	1,00	0,17
1250	0,43	1,66	0,28454	6,44049	0,07	0,27250	0,45	0,07
1450	1,59	5,26	0,33007	7,49313	0,21	0,31614	1,66	0,22
1550	2,2	6,92	0,35283	8,01846	0,27	0,33796	2,34	0,29
1750	1,12	3,33	0,39836	9,06769	0,12	0,38159	1,27	0,14
1850	1,46	3,9	0,42112	9,59175	0,15	0,40341	1,57	0,16
2050	0,56	1,39	0,46665	10,63904	0,05	0,44704	0,62	0,06
2150	0,61	1,41	0,48941	11,16234	0,05	0,46885	0,66	0,06
2350	0,42	0,91	0,53494	12,20840	0,03	0,51248	0,47	0,04
2450	0,38	0,78	0,55770	12,73120	0,03	0,53430	0,42	0,03

5.5.3 189 Hz Rezonans Frekanslı HFKS'nin Paralel Rezonans Analizi

Temel frekansta filtrenin eş değer reaktansı:

$$X_{filtre} = \frac{U^2}{Q_{filtre}} = \frac{400^2}{100.10^3} = 1{,}6\ \Omega \tag{5.20}$$

Kondansatör kapasitans değeri:

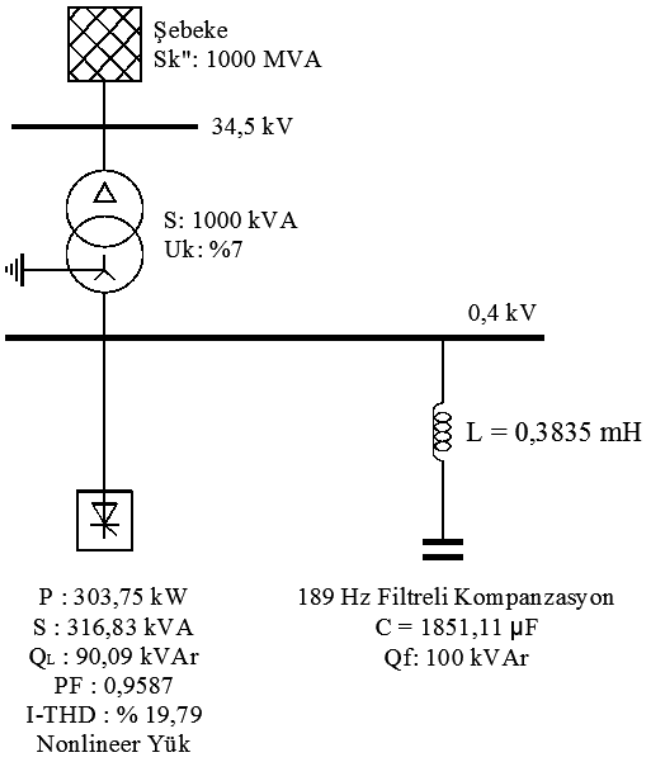
$$C = \frac{1-p}{w.X_{filtre}} = \frac{1-0{,}07}{314.1{,}6} = \frac{0{,}93}{502{,}4} = 1851{,}11\ \mu F \tag{5.21}$$

Harmonik filtre reaktörünün endüktans değeri:

$$L = \frac{p}{w^2.C} = \frac{0{,}07}{314^2.1851{,}11.10^{-6}} = 0{,}3835\ mH \tag{5.22}$$

189 Hz filtreli kompanzasyon durumunda seri rezonans frekansı:

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{(L+L_T).C}} = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{(0{,}3835.10^{-3}+3{,}6229.10^{-5}).1851{,}11.10^{-6}}} = 180{,}6\ Hz \tag{5.23}$$



Şekil 5. 9 189 Hz HFKS tek hat diyagramı

Çizelge 5. 11 189 Hz HFKS paralel rezonans analizi

f (Hz)	Şebeke Gerilimi (V)	Yük Akımı (A)	jXş + jXtr (Ω)	jXfiltre (Ω)	Filtrenin Şebekeden Çektiği Akım (A)	Paralel Eşdeğer Reaktans (Ω)	Yük Akımı Nedeniyle Oluşan Gerilim (V)	Filtreye Yönelen Harmonik Akımlar
50	230	442,39	0,01138	1,59908	143,83	0,01146		
250	1,7	78,26	0,05691	0,25849	6,58	0,04664	3,65	14,12
350	2,28	26,43	0,07967	0,59771	3,81	0,07030	1,86	3,11
550	1,1	9,78	0,12520	1,16896	0,94	0,11309	1,11	0,95
650	0,89	6,28	0,14796	1,43397	0,62	0,13412	0,84	0,59
850	0,13	1,17	0,19349	1,94701	0,07	0,17600	0,21	0,11
950	0,11	0,65	0,21625	2,19862	0,05	0,19689	0,13	0,06
1150	0,87	3,98	0,26178	2,69628	0,32	0,23861	0,95	0,35
1250	0,43	1,66	0,28454	2,94322	0,15	0,25946	0,43	0,15
1450	1,59	5,26	0,33007	3,43462	0,46	0,30113	1,58	0,46
1550	2,2	6,92	0,35283	3,67941	0,60	0,32196	2,23	0,61
1750	1,12	3,33	0,39836	4,16767	0,27	0,36360	1,21	0,29
1850	1,46	3,9	0,42112	4,41128	0,33	0,38442	1,50	0,34
2050	0,56	1,39	0,46665	4,89774	0,11	0,42605	0,59	0,12
2150	0,61	1,41	0,48941	5,14065	0,12	0,44687	0,63	0,12
2350	0,42	0,91	0,53494	5,62597	0,07	0,48849	0,44	0,08
2450	0,38	0,78	0,55770	5,86843	0,06	0,50930	0,40	0,07

189 Hz filtre sisteminin rezonans açısından güvenli olduğu görülmektedir. Filtre etkinliği 134 Hz'e göre daha iyidir. 5. harmonik üzerinde şebekeden çekilen akımları 6,58 A arttırırken, yük akımının 14,12 A'ini filtre etmektedir.

5.5.4 210 Hz Rezonans Frekanslı HFKS'nin Paralel Rezonans Analizi

Temel frekansta filtrenin eş değer reaktansı:

$$X_{filtre} = \frac{U^2}{Q_{filtre}} = \frac{400^2}{100.10^3} = 1{,}6\ \Omega \qquad (5.24)$$

Kondansatör kapasitans değeri:

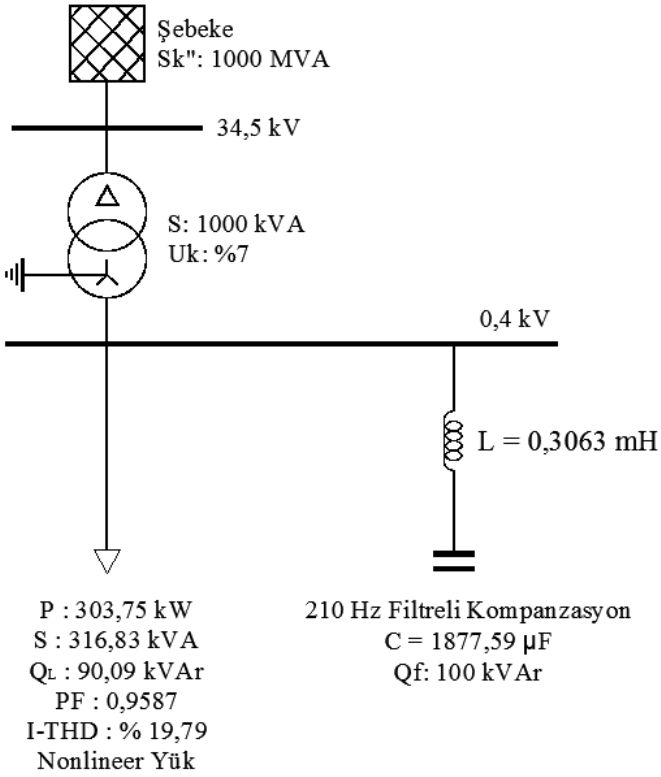
$$C = \frac{1-p}{w.X_{filtre}} = \frac{1-0{,}0567}{314.1{,}6} = \frac{0{,}9433}{502{,}4} = 1877{,}59\ \mu F \qquad (5.25)$$

Harmonik filtre reaktörünün endüktans değeri:

$$L = \frac{p}{w^2.C} = \frac{0{,}0567}{314^2.1877{,}59.10^{-6}} = 0{,}3063\ mH \tag{5.26}$$

210 Hz filtreli kompanzasyon durumunda seri rezonans frekansı:

$$f_r = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{(L+L_T).C}} = \frac{1}{2.\pi.\sqrt{(0{,}3063.10^{-3}+3{,}6229.10^{-5}).1877{,}59.10^{-6}}}$$
$$= 198{,}5\ Hz \tag{5.27}$$



Şekil 5. 10 210 Hz HFKS tek hat diyagramı

210 Hz rezonans frekanslı filtre devresi şebeke ile seri ve paralel rezonans açısından güvenli bölgede çalışmaktadır. Yük tarafından üretilen harmonikleri filtre etme performansı açısından diğer sistemlere göre daha etkilidir. Özellikle şebekeden çekilen 5. harmonik akımını 11,97 A arttırırken yükün ürettiği 78,26 A'lik 5. harmonik akımının 22,38 A'lik kısmını filtre etmektedir. Dolayısıyla bu sistem için en uygun çözüm 210 Hz'lik filtreli kompanzasyondur. Daha etkili çözüm için özel tasarım yapılarak filtre rezonans frekansı bir miktar daha 250'ye yaklaştırılabilir.

Çizelge 5. 12 210 Hz HFKS paralel rezonans analizi

f (Hz)	Şebeke Gerilimi (V)	Yük Akımı (A)	jXş + jXtr (Ω)	jXfiltre (Ω)	Filtrenin Şebekeden Çektiği Akım (A)	Paralel Eşdeğer Reaktans (Ω)	Yük Akımı Nedeniyle Oluşan Gerilim (V)	Filtreye Yönelen Harmonik Akımlar
50	230	442,39	0,01138	1,59909	143,83	0,01146		
250	1,7	78,26	0,05691	0,14207	11,97	0,04063	3,18	22,38
350	2,28	26,43	0,07967	0,43140	5,29	0,06725	1,78	4,12
550	1,1	9,78	0,12520	0,90438	1,22	0,10997	1,08	1,19
650	0,89	6,28	0,14796	1,12054	0,79	0,13070	0,82	0,73
850	0,13	1,17	0,19349	1,53613	0,08	0,17184	0,20	0,13
950	0,11	0,65	0,21625	1,73908	0,06	0,19234	0,13	0,07
1150	0,87	3,98	0,26178	2,13951	0,41	0,23324	0,93	0,43
1250	0,43	1,66	0,28454	2,33786	0,18	0,25367	0,42	0,18
1450	1,59	5,26	0,33007	2,73212	0,58	0,29449	1,55	0,57
1550	2,2	6,92	0,35283	2,92835	0,75	0,31489	2,18	0,74
1750	1,12	3,33	0,39836	3,31950	0,34	0,35568	1,18	0,36
1850	1,46	3,9	0,42112	3,51458	0,42	0,37606	1,47	0,42
2050	0,56	1,39	0,46665	3,90395	0,14	0,41682	0,58	0,15
2150	0,61	1,41	0,48941	4,09833	0,15	0,43720	0,62	0,15
2350	0,42	0,91	0,53494	4,48659	0,09	0,47795	0,43	0,10
2450	0,38	0,78	0,55770	4,68052	0,08	0,49832	0,39	0,08

5.5.5 Limit Değerler Açısından Karşılaştırma

Bu iş merkezinin I_L değeri **600 A** ve I_{SC} / I_L değeri 100 ile 1000 arasında kalmaktadır. Çizelge 5. 13'e göre limit değerler belirlenmektedir.

Çizelge 5. 13 Akım harmonikleri limit değer tablosu

Tek Harmonikler						
I_{SC}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TTB
<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

Limit değerlere göre değerlendirildiğinde filtresiz kompanzasyon kullanımının yüksek frekanslı tüm bileşenlerde uygunsuz olduğu görülmektedir. 134 Hz filtrenin ise yük akımını filtre etme performansının düşük olmasından dolayı şebekeden çekilen 5.

harmonik akım değeri limitlerin üstünde kalmaktadır. 189 Hz ve 210 Hz sistemlerin her ikisi de limit değerler açısından uygundur ancak 210 Hz rezonans frekanslı filtre bu tesis için daha etkin filtreleme yaptığından dolayı en uygun çözüm olarak görülmektedir.

Çizelge 5. 14 Filtresiz kompanzasyon ve HFKS karşılaştırma tablosu

n	f (Hz)	Oran	Limit Değer (A)	Sadece Yük Akımı (A)	Filtresiz Kompanz.	134 Hz HFKS	189 Hz HFKS	210 Hz HFKS
5	250	12%	**72**	**78,26**	**83,58**	**75,58**	**70,72**	**67,84**
7	350	12%	**72**	**26,43**	**36,41**	**26,61**	**27,14**	**27,59**
11	550	5,50%	**33**	**9,78**	**17,35**	**9,75**	**9,77**	**9,81**
13	650	5,50%	**33**	**6,28**	**13,51**	**6,28**	**6,31**	**6,34**
17	850	5%	**30**	**1,17**	**2,55**	**1,15**	**1,13**	**1,12**
19	950	5%	**30**	**0,65**	**1,96**	**0,64**	**0,64**	**0,64**
23	1150	2%	**12**	**3,98**	**16,49**	**3,96**	**3,95**	**3,95**
25	1250	2%	**12**	**1,66**	**8,38**	**1,66**	**1,66**	**1,66**
29	1450	2%	**12**	**5,26**	**34,09**	**5,25**	**5,26**	**5,27**
31	1550	2%	**12**	**6,92**	**49,57**	**6,90**	**6,91**	**6,93**
35	1750	1%	**6**	**3,33**	**27,84**	**3,31**	**3,31**	**3,31**
37	1850	1%	**6**	**3,90**	**37,68**	**3,89**	**3,89**	**3,90**
41	2050	1%	**6**	**1,39**	**15,75**	**1,38**	**1,38**	**1,39**
43	2150	1%	**6**	**1,41**	**17,81**	**1,41**	**1,41**	**1,41**
47	2350	1%	**6**	**0,91**	**13,25**	**0,91**	**0,91**	**0,91**
49	2450	1%	**6**	**0,78**	**12,42**	**0,78**	**0,78**	**0,78**
TTB		15%	**90**	**84,17**	**125,92**	**81,74**	**77,46**	**75,02**

BÖLÜM 6

UYGULAMA VE SİMÜLASYON ÇALIŞMASI

Bu bölümde İstanbul Hadımköy'de bir sanayi bölgesinde yer alan çelik tel üretim fabrikasında gerçekleştirilen harmonik ölçümü, analizi, filtre uygulaması ve simülasyon çalışmalarına yer verilmiştir.

Tesis 34,5 kV bir havai hattan enerji almaktadır. Tesis girişinde 34,5 / 0,4 kV 800 kVA gücünde bir transformatör yer almaktadır. Transformatör çıkışında ana dağıtım panosu ve kompanzasyon panosu tesis edilmiştir. Fabrikada genellikle harmonik etkinliği yüksek olan nonlineer yükler ağırlıktadır. Özellikle 190 kW gücündeki tel ezme hattı ve 90 kW gücündeki tel çekme hattı frekans konvertörlü sürücüler ile kontrol edilen asenkron motorlardan meydana gelmektedir. Bunun dışında çıkan ürünlerin kaplama yapıldığı eloksal banyo hatlarında DC 8 kA üretebilen 100 kW gücünde bir redresör mevcuttur. Fabrikada ihtiyaca göre hava basıncını ayarlayan 55 kW gücünde frekans kontrollü bir basınçlı hava kompresörü bulunmaktadır. İdari binada 30 kVA gücünde 3 fazlı bir UPS mevcuttur. Fabrika aydınlatmasında toplam gücü 40 kW olan flüoresan armatürler kullanılmaktadır.

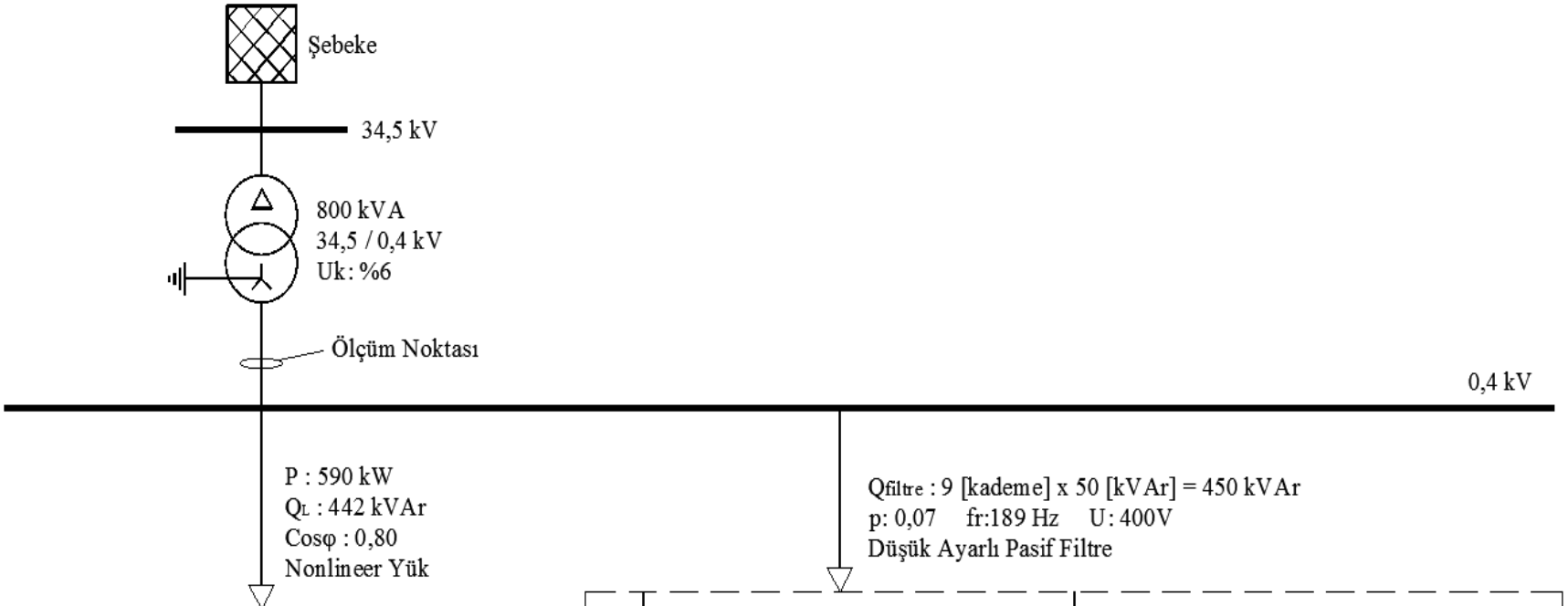
Bölgenin dağıtım şirketi Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği'ne atıfta bulunarak kullanıcının akım harmoniklerine ilişkin performansının limit değerlerin üzerinde olduğunu raporlamıştır. Raporda limit değerlerin ihlal edildiğini ve harmonik bozulmaların sınırlandırılmaması halinde 45 gün içinde bağlantının kesileceği vurgulanmıştır.

Dağıtım şirketinin sunmuş olduğu rapor incelendiğinde yönetmelikte belirtilen kesintisiz 1 haftalık ölçüm periyodu kuralına uyulmadığı dikkat çekmektedir. Rapora göre 217 adet örnekleme alınmıştır. Yönetmeliğe göre ölçüm periyodu kesintisiz 1 hafta boyunca 10'ar dakikalık ortalamaları tanımlamaktadır. Bunun anlamı 1008 adet örnekleme alınması gerekmektedir. 1008 adet örneklemenin en az %95'inin limit değerlerin altında olma zorunluluğu bulunmaktadır. Ayrıca raporda akım harmonikleri için TTB ifadesinin yerine THD ifadesinin kullanıldığı görülmektedir. Rapora göre tesisin 5, 7, 11, 30, 31 bileşenler ve TTB değerlerinin limit değerleri aştığı anlaşılmaktadır.

Bu bölümde dağıtım şirketinin ölçüm raporu referans alınarak tesisin limit değerlerin altına düşürülmesi amacıyla yapılan çalışmalar sunulmaktadır. Öncelikle dağıtım şirketinin raporunun doğrulanması amacıyla yeniden harmonik ölçümleri gerçekleştirilmiştir. Ölçümler sonucunda dağıtım şirketinin raporu ile benzer sonuçlara varılmıştır. Akım harmoniklerinin bir kısmının nonlineer yükler nedeniyle, bir kısmının ise reaktif güç kompanzasyonu amacıyla kullanılan kondansatörler nedeniyle olduğu anlaşılmıştır. Kompanzasyon sistemi devre dışı bırakıldığında tesisin limit değerlerin altına indiği fark edilmiştir. Bu nedenle hem yük tarafından üretilen harmoniklerin bir miktar süzülmesi, hem de kondansatörlerin bozucu etkisini azalmak amacıyla kompanzasyon sisteminin HFKS yapısına dönüştürülmesine karar verilmiştir. Şebeke geriliminin ve yük akımının oldukça bozuk olması nedeniyle filtre rezonans frekansının 189 Hz olması yeterli görülmüştür. Mevcut kondansatörlerin filtreli kullanıma uygun olması nedeniyle bu ürünlerin şebeke ile arasına uygun değerli filtre reaktörleri montajı yapılmıştır. Bu sayede yalnızca filtre reaktör faktörü maliyeti oluşmuştur.

Tasarlanan sistem uygulandığında elde edilecek sonucun kestirilmesi amacıyla sistemin simülasyonu Matlab Simulink programında gerçekleştirilmiştir.

Sonuç olarak uygulanan yöntem ile tesis harmonikleri limit değerlerin altına çekilmiştir.



No	Yükün Adı:	Kurulu Gücü:	Karakteristik:
1	Tavlama Fırını	85 kW	Nonlineer
2	Tel Ezme Hattı	190 kW	Nonlineer
3	Tel Çekme Hattı	90 kW	Nonlineer
4	DC Redresörler	100 kW	Nonlineer
5	Kompresör	55 kW	Nonlineer
6	Aydınlatma	40 kW	Nonlineer
7	UPS	30 kW	Nonlineer

Şekil 6. 1 Tesisin tek hat diyagramı

Toplam Ölçüm Sayısı	217	Isc=4799A	IL=11,2A

Harmonik Sırası	h<11	11<=h<17	17<=h<23	23<=h<35	THD
Limit Değer	12,000	5,500	5,000	3,000	15,000

Değişken	Limit Değeri Sağlamayan Örnek Sayısı	Yüzde
IaH2	1	0,46%
IaH3	0	0,00%
IaH4	0	0,00%
IaH5	98	45,16%
IaH6	0	0,00%
IaH7	17	7,83%
IaH8	0	0,00%
IaH9	0	0,00%
IaH10	0	0,00%
IaH11	48	22,12%
IaH12	0	0,00%
IaH13	0	0,00%
IaH14	0	0,00%
IaH15	0	0,00%
IaH16	0	0,00%
IaH17	0	0,00%
IaH18	0	0,00%
IaH19	0	0,00%
IaH20	0	0,00%
IaH21	0	0,00%
IaH22	0	0,00%
IaH23	4	1,84%
IaH24	0	0,00%
IaH25	4	1,84%
IaH26	0	0,00%
IaH27	1	0,46%
IaH28	0	0,00%
IaH29	4	1,84%
IaH30	26	11,98%
IaH31	4	1,84%
THD-Ia	122	56,22%

Değişken	Limit Değeri Sağlamayan Örnek Sayısı	Yüzde
IbH2	0	0,00%
IbH3	10	4,61%
IbH4	0	0,00%
IbH5	96	44,24%
IbH6	0	0,00%
IbH7	9	4,15%
IbH8	0	0,00%
IbH9	0	0,00%
IbH10	4	1,84%
IbH11	39	17,97%
IbH12	0	0,00%
IbH13	0	0,00%
IbH14	0	0,00%
IbH15	0	0,00%
IbH16	0	0,00%
IbH17	0	0,00%
IbH18	0	0,00%
IbH19	0	0,00%
IbH20	0	0,00%
IbH21	0	0,00%
IbH22	0	0,00%
IbH23	4	1,84%
IbH24	1	0,46%
IbH25	4	1,84%
IbH26	0	0,00%
IbH27	0	0,00%
IbH28	2	0,92%
IbH29	5	2,30%
IbH30	27	12,44%
IbH31	4	1,84%
THD-Ib	103	47,47%

Değişken	Limit Değeri Sağlamayan Örnek Sayısı	Yüzde
IcH2	1	0,46%
IcH3	9	4,15%
IcH4	0	0,00%
IcH5	99	45,62%
IcH6	0	0,00%
IcH7	19	8,76%
IcH8	0	0,00%
IcH9	0	0,00%
IcH10	1	0,46%
IcH11	41	18,89%
IcH12	0	0,00%
IcH13	0	0,00%
IcH14	0	0,00%
IcH15	0	0,00%
IcH16	0	0,00%
IcH17	0	0,00%
IcH18	0	0,00%
IcH19	0	0,00%
IcH20	0	0,00%
IcH21	0	0,00%
IcH22	0	0,00%
IcH23	4	1,84%
IcH24	2	0,92%
IcH25	4	1,84%
IcH26	0	0,00%
IcH27	1	0,46%
IcH28	2	0,92%
IcH29	4	1,84%
IcH30	30	13,82%
IcH31	64	29,49%
THD-Ic	116	53,46%

Şekil 6. 2 Tesise ilişkin dağıtım şirketinin ölçüm raporu

6.1 Limit Değerlerin Belirlenmesi ve Ölçüm Metodu

Kullanıcıların akım harmonikleri limit değerlerinin belirlenmesinde Çizelge 6. 1 kullanılmaktadır. Bu çizelgeye göre I_{SC} ve I_L değerlerinin belirlenmesi gerekmektedir. I_{SC} değeri tesisin şebeke bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımını, I_L değeri ise 12 aylık ölçüm süresince şebeke bağlantı noktasından çekilen yük akımının temel bileşen etkin değerinin 15 veya 30 dakikalık ortalamalarının en büyüğüdür. Bu değerler dağıtım şirketinin raporunda belirtilmiştir.

$$I_{SC} = 4799\ A \tag{6.1}$$

$$I_L = 11{,}2\ A \tag{6.2}$$

$$\frac{I_{SC}}{I_L} = 428{,}5 \tag{6.3}$$

428,5 değerinin tablodaki aralığı kullanıcının uymakla yükümlü olduğu akım harmoniği değerlerinin I_L'ye göre yüzdesel oranını ifade etmektedir.

Çizelge 6. 1 Akım harmonikleri limit değer tablosu

Tek Harmonikler						
I_{SC}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TTB
<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

Buna göre kullanıcının akım harmoniği limit değer genlikleri çizelge 6. 2'de verilmiştir. Eğer limit değerlerin hesaplandığı şebeke bağlantı noktası ile ölçüm noktası arasında transformatör var ise değerlendirme yapılırken limit değerler transformatör çevirme oranı ile çarpılarak ölçüm sonuçları ile karşılaştırılmalıdır. Bu çevirme oranı belirlenirken transformatörün ölçüm anında hangi kademede olduğu bilinmelidir.

$$I_{L(A.G.)} = 11{,}2\ x\ \frac{34{,}5}{0{,}4} = 966\ A \tag{6.4}$$

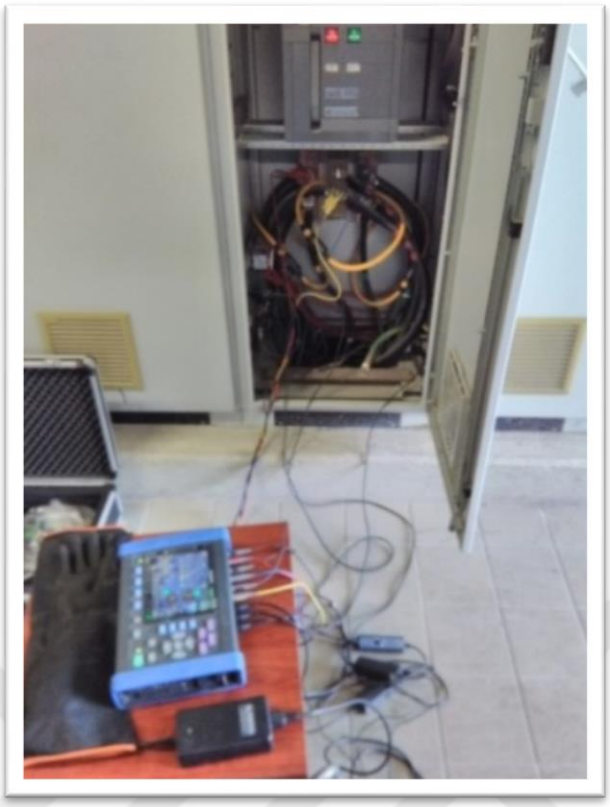
I_{SC} değeri genellikle ilgili bölgenin dağıtım şirketinden temin edilmektedir. Bunun mümkün olmadığı durumlarda ana indirici trafo merkezinden itibaren kullanıcının şebeke bağlantı noktasına kadar iletken kesitleri biliniyorsa I_{SC} değeri yaklaşık olarak

hesaplanabilir. I_L değerinin ise tespit edilmesi konusunda çeşitli tartışmalar yapılmaktadır. Özellikle 1 yıl boyunca ölçülen 15 dakikalık ortalamaların mı yoksa 30 dakikalık ortalamaların mı kullanılacağı konusunda bir karışıklık söz konusudur. Ayrıca kesintisiz 1 yıl boyunca ölçüm alınması gerekliliği bu değerin belirlenmesini oldukça zorlaştırmaktadır.

Çizelge 6. 2 Tesisin akım harmonikleri limitleri

n	f (Hz)	Oran	34,5 kV Baradaki Limit Değer (A)	0,4 kV Baradaki Limit Değer (A)	n	f (Hz)	Oran	34,5 kV Baradaki Limit Değer (A)	0,4 kV Baradaki Limit Değer (A)
2	100	3%	0,336	**28,98**	17	850	5%	0,56	**48,30**
3	150	12%	1,344	**115,92**	18	900	1,25%	0,14	**12,08**
4	200	3%	0,336	**28,98**	19	950	5%	0,56	**48,30**
5	250	12%	1,344	**115,92**	20	1000	1,25%	0,14	**12,08**
6	300	3%	0,336	**28,98**	21	1050	5%	0,56	**48,30**
7	350	12%	1,344	**115,92**	22	1100	0,5%	0,056	**4,83**
8	400	3%	0,336	**28,98**	23	1150	2%	0,224	**19,32**
9	450	12%	1,344	**115,92**	24	1200	0,5%	0,056	**4,83**
10	500	1,375%	0,154	**13,28**	25	1250	2%	0,224	**19,32**
11	550	5,5%	0,616	**53,13**	26	1300	0,5%	0,056	**4,83**
12	600	1,375%	0,154	**13,28**	27	1350	2%	0,224	**19,32**
13	650	5,5%	0,616	**53,13**	28	1400	0,5%	0,056	**4,83**
14	700	1,375%	0,154	**13,28**	29	1450	2%	0,224	**19,32**
15	750	5,5%	0,616	**53,13**	30	1500	0,5%	0,056	**4,83**
16	800	1,25%	0,14	**12,08**	31	1550	2%	0,224	**19,32**
					TTB		**15%**	**1,68**	**144,90**

Ölçümler Hioki marka PW3198 model Class A özellikli güç kalite analizörü kullanılarak yapılmıştır (Şekil 6. 3) Ölçüm yeri fabrika trafosunun çıkışındaki fabrika ana şalteridir. Ölçümler normal işletme koşullarında gerçekleştirilmiştir. Dolayısıyla filtre öncesi 48 saat, filtre sonrası 12 saatlik ölçümler yeterli görülmüştür. 3 ve 3'ün katı olan harmonik bileşenlerin genlikleri çok düşük olduğundan grafikleri hazırlanmamıştır. Aynı şekilde 19 ve üzeri harmonik bileşenler çok düşük seviyede olduğundan dolayı ihmal edilmiştir. Filtre öncesine ait ölçümler kompanzasyon devre dışı iken, filtre sonrasına ait ölçümler ise HFKS devrede iken alınmıştır.

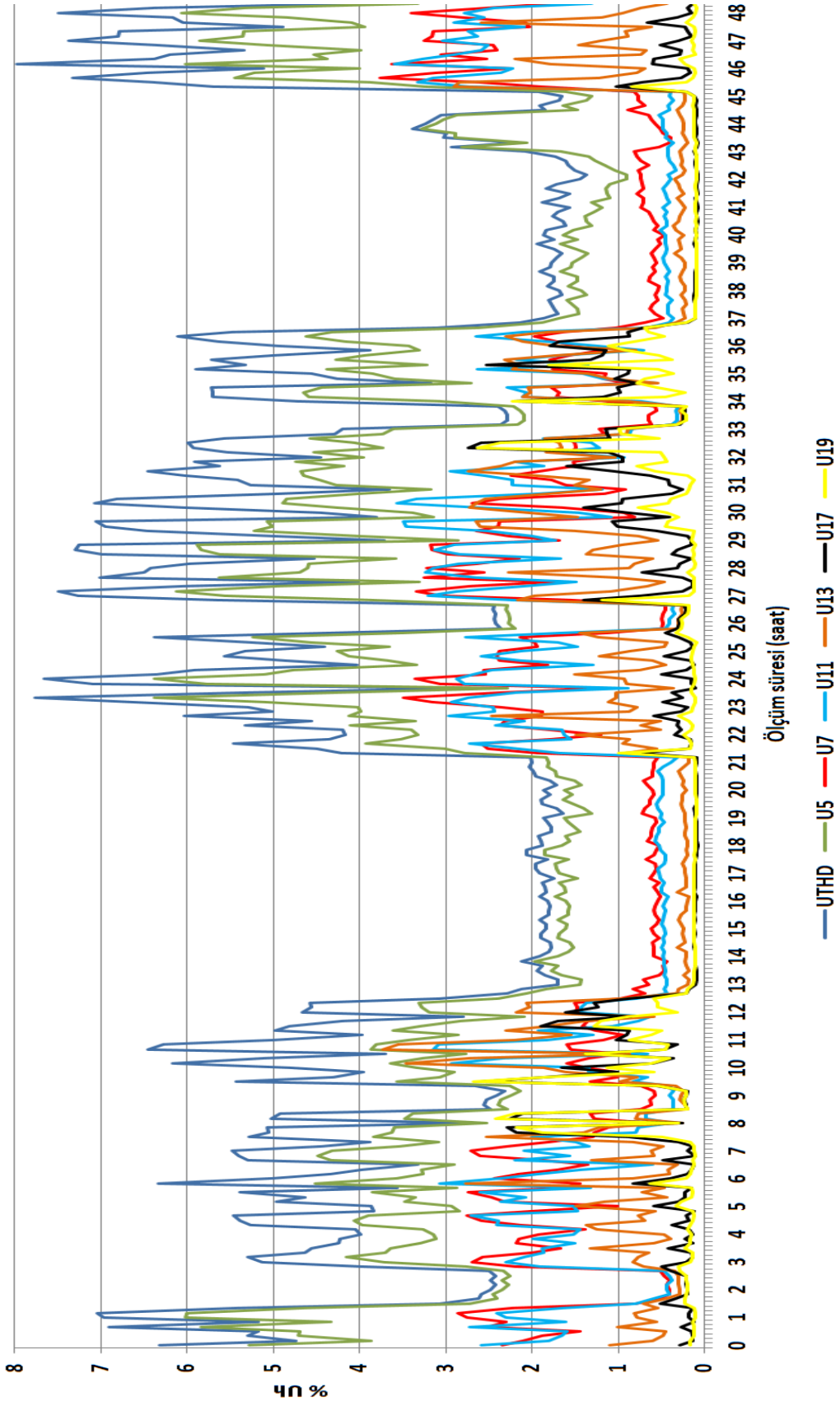


Şekil 6. 3 Hioki PW3198 ile harmonik ölçümü

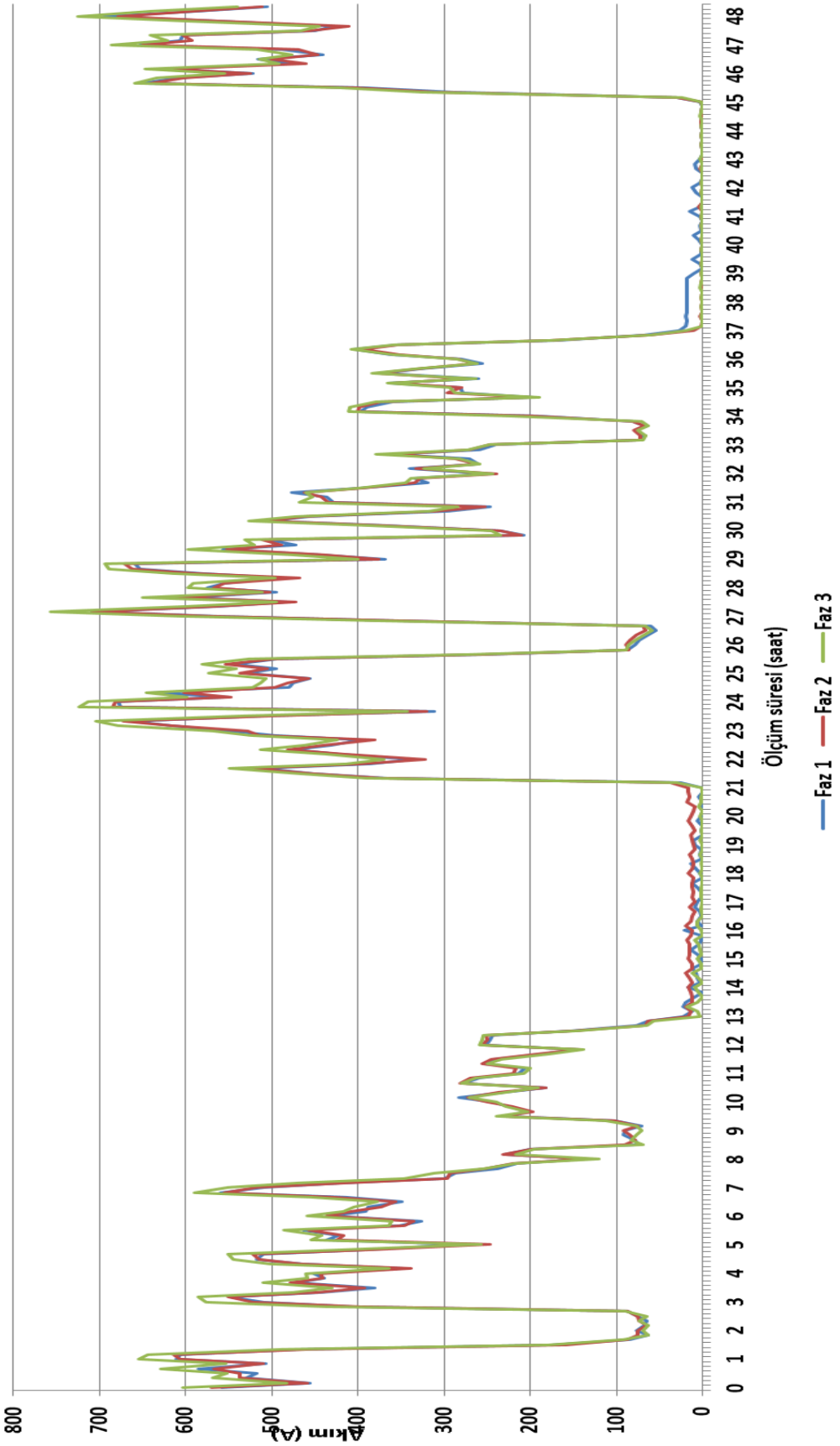


Şekil 6. 4 Uygulanan HFKS fotoğrafı

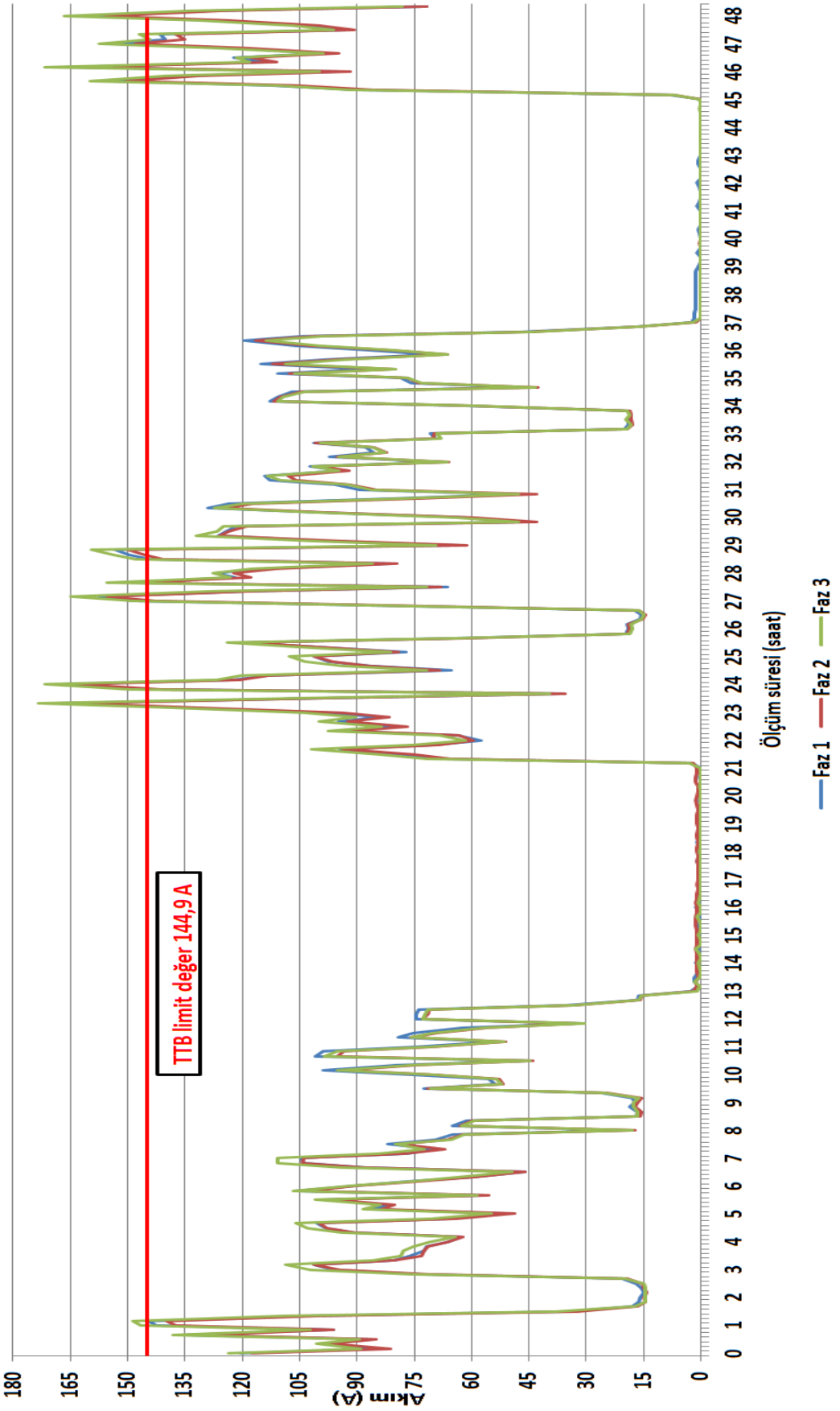
6.2 Uygulama Öncesi Ölçüm Sonuçları



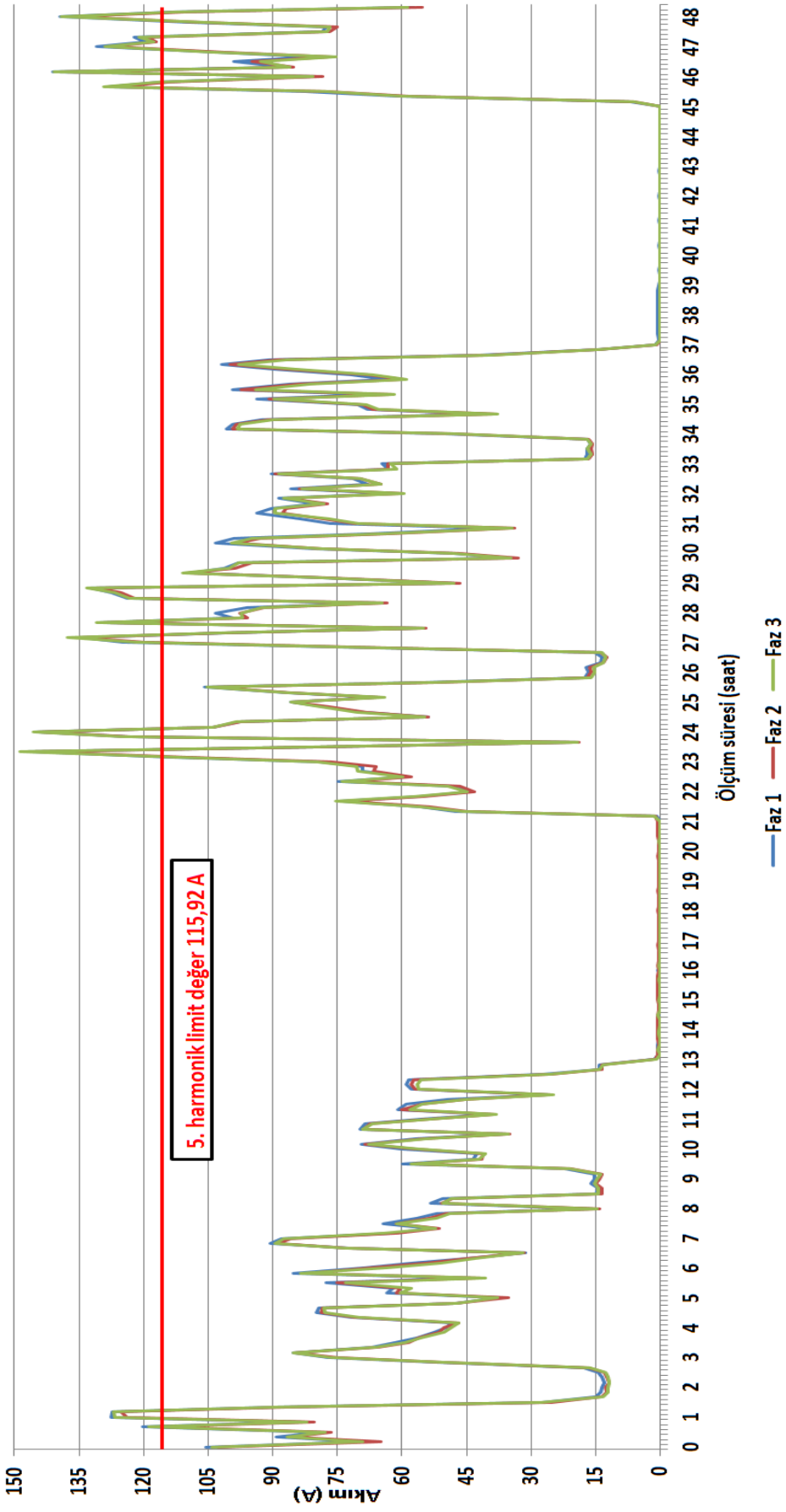
Şekil 6. 5 Uygulama öncesi gerilim harmonikleri



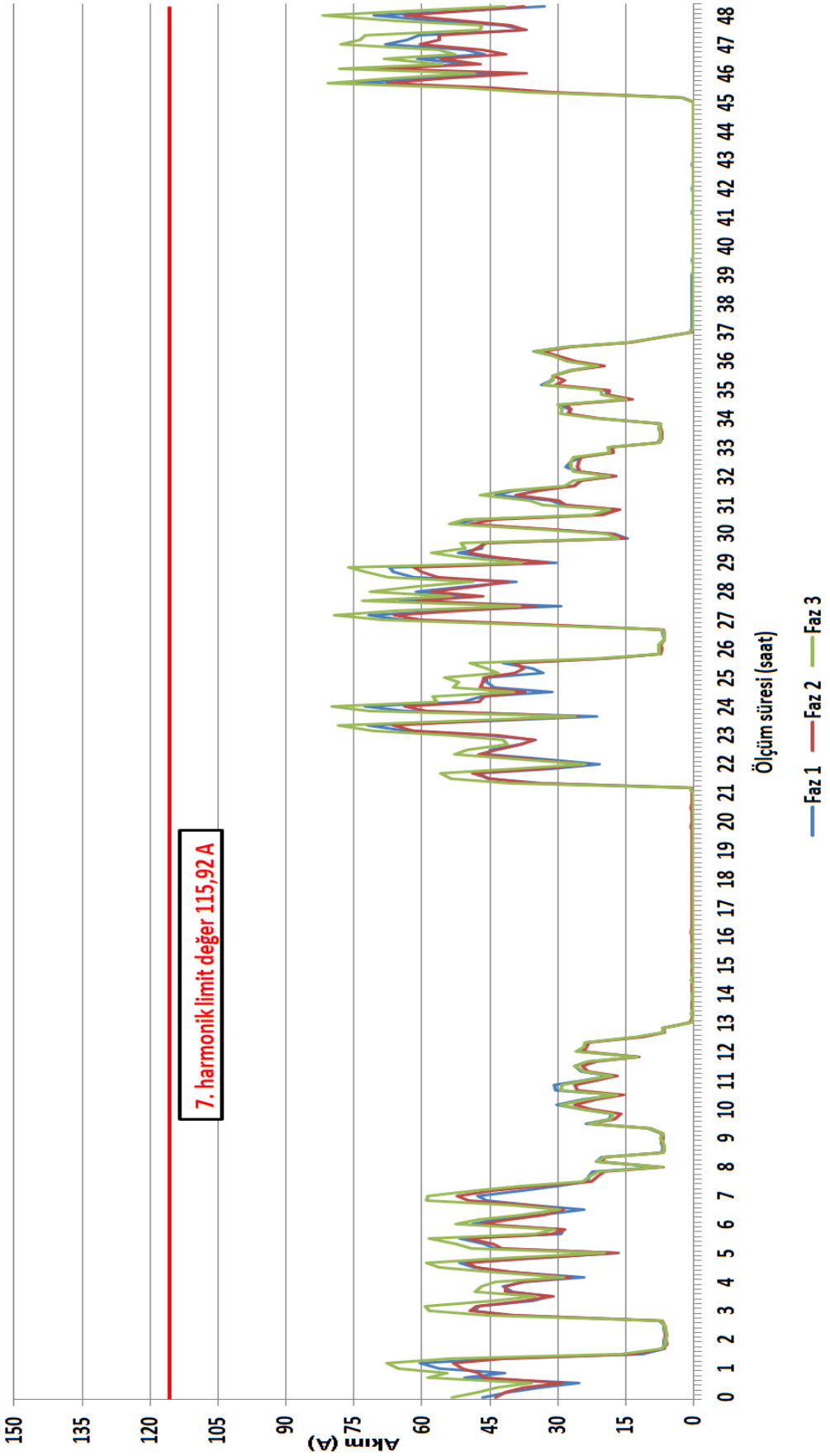
Şekil 6. 6 Uygulama öncesi şebekeden çekilen akımın temel frekans değeri



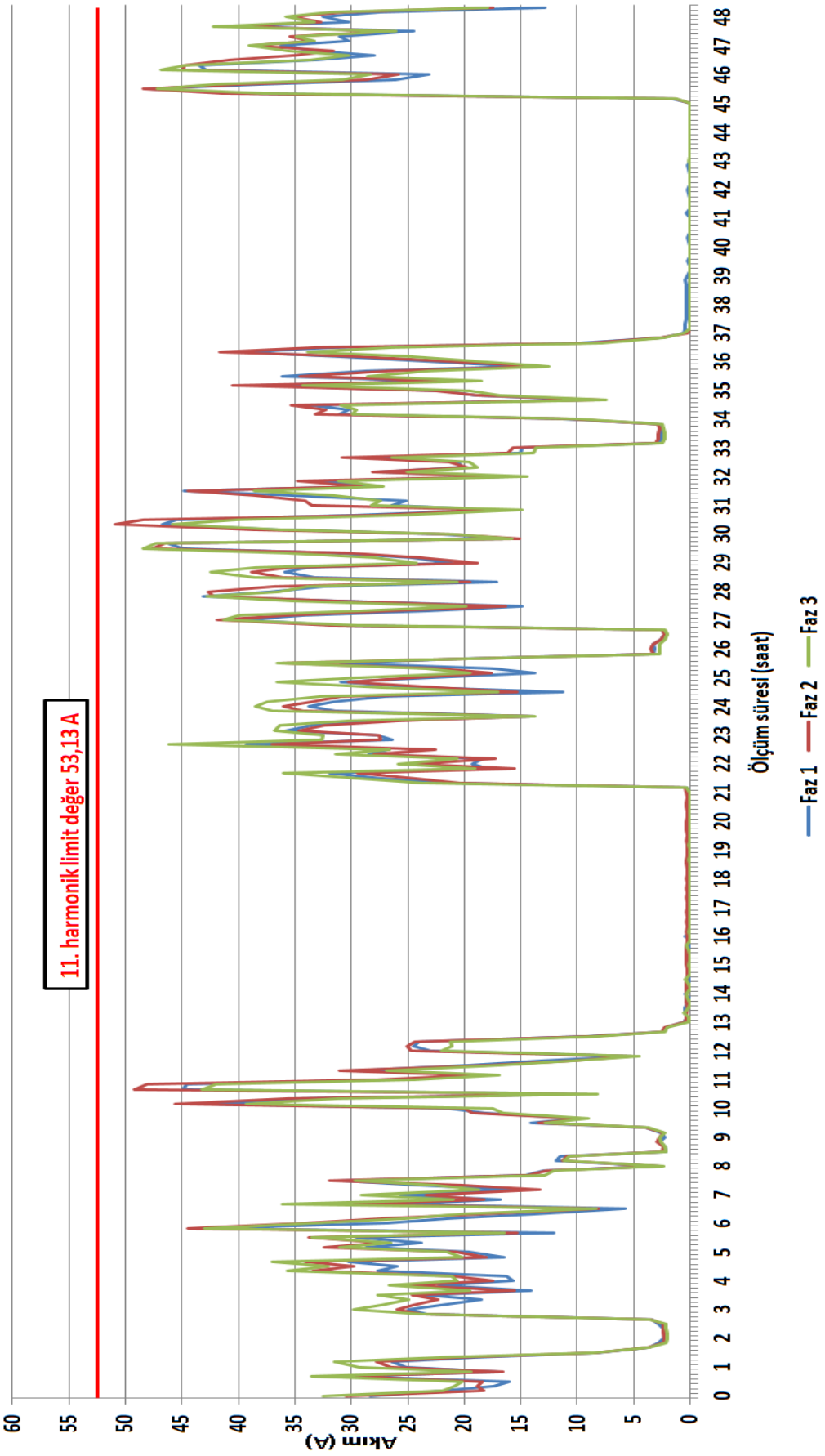
Şekil 6. 7 Uygulama öncesi toplam talep bozulumu grafiği



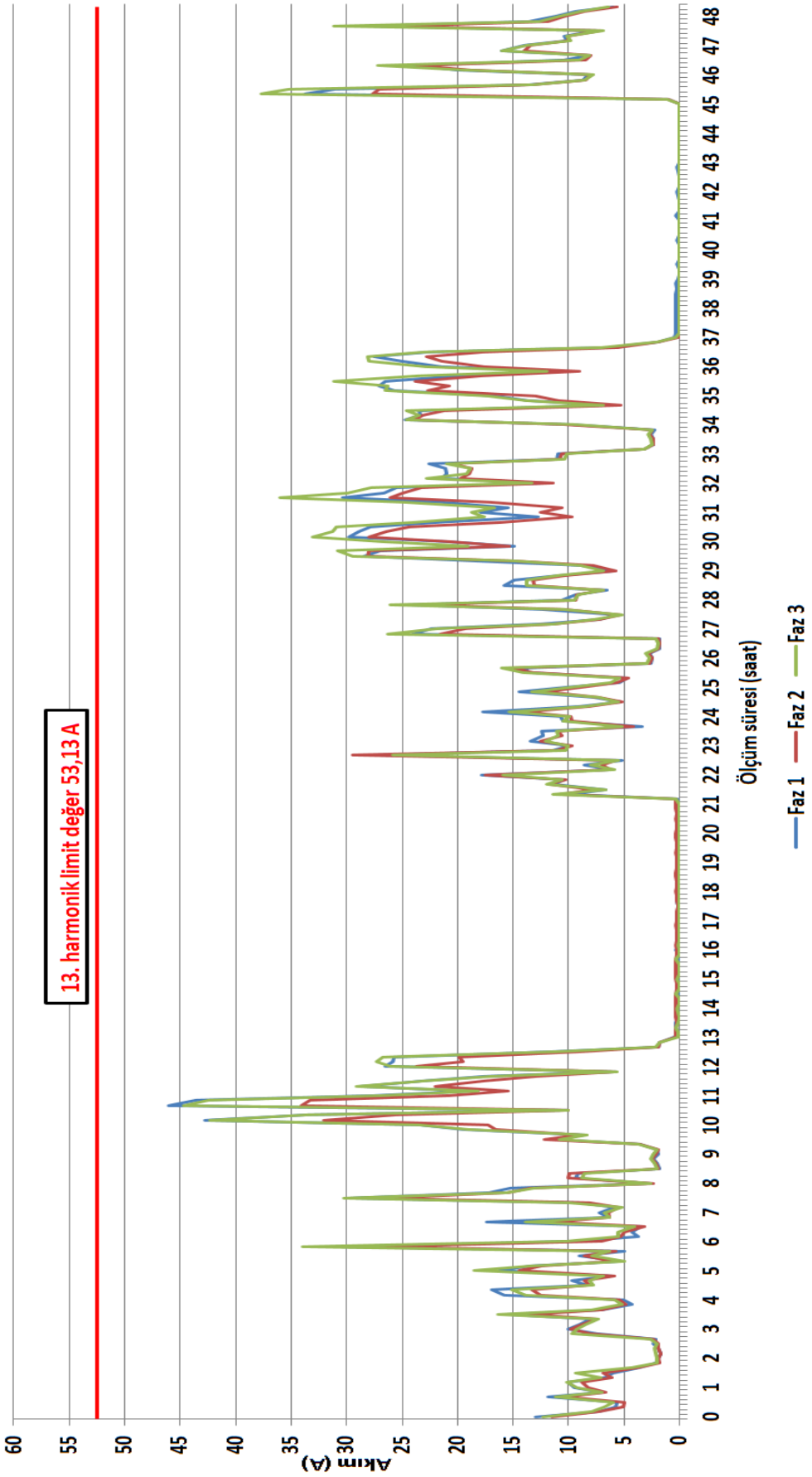
Şekil 6. 8 Uygulama öncesi 5. akım harmoniği grafiği



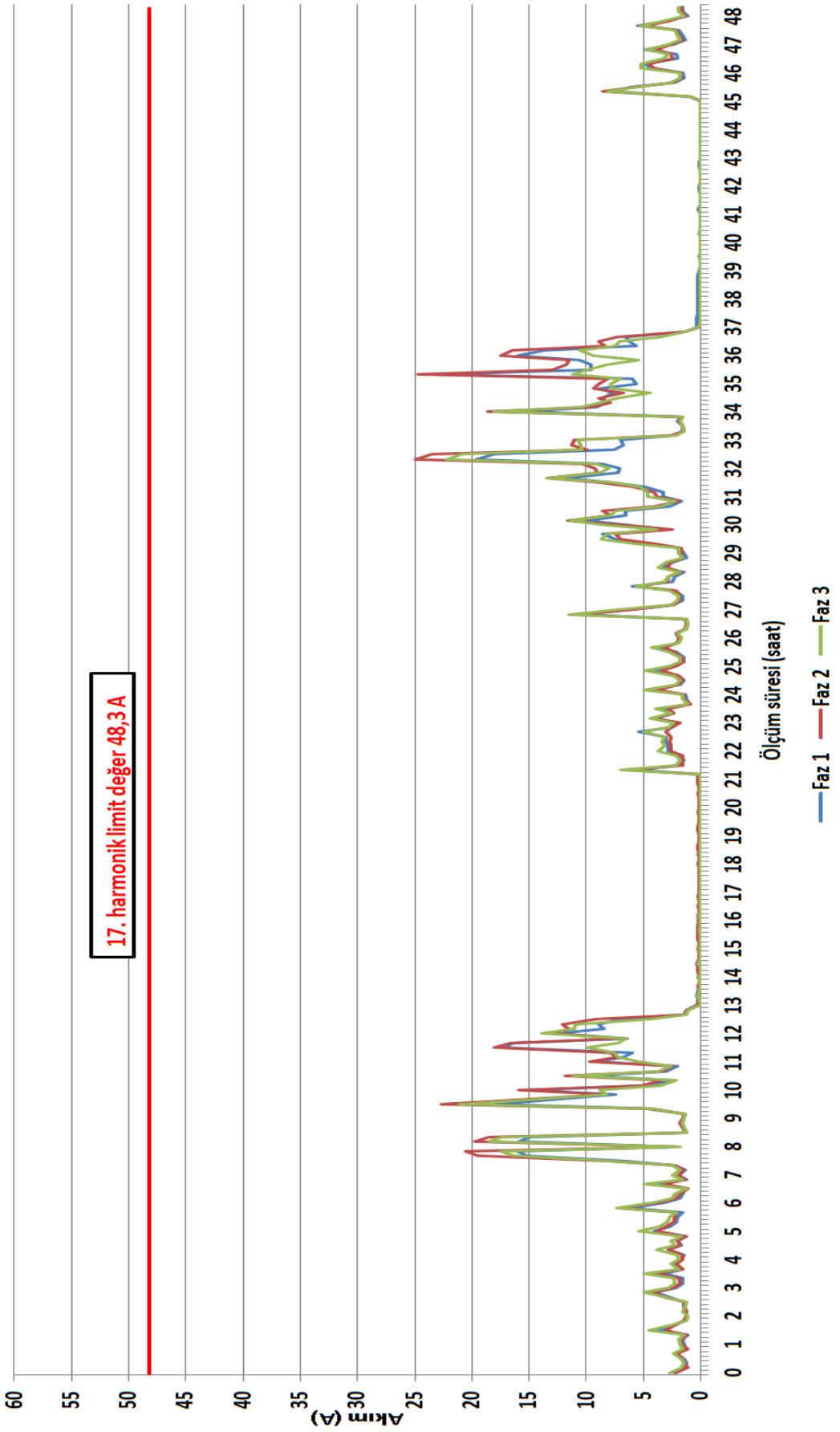
Şekil 6. 9 Uygulama öncesi 7. akım harmoniği grafiği



Şekil 6. 10 Uygulama öncesi 11. akım harmoniği grafiği



Şekil 6. 11 Uygulama öncesi 13. akım harmoniği grafiği



Şekil 6. 12 Uygulama öncesi 17. akım harmoniği grafiği

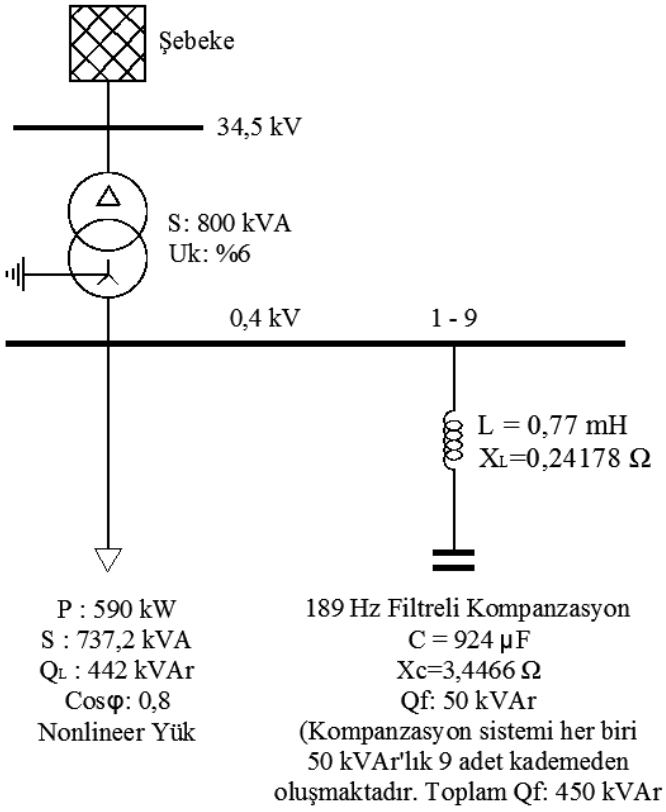
6.3 Filtre Tasarımı

Ölçüm sonuçlarına göre tesiste baskın olan ve limit değerleri aşan bileşenin 5. harmonik olduğu görünmektedir. 5. harmonik akımının filtre edilmesiyle TTB değerinin limitlerin altına ineceği görünmektedir. Ancak şebeke geriliminin de oldukça bozuk olduğu özellikle V_5 geriliminin günün belirli saatlerde 13 Volt seviyelerine (%6 x 220V) ulaştığı görülmektedir. Bu nedenle rezonans frekansı olarak 189 Hz seçilmesi uygun görülmüştür. Tesisin kompanzasyon sisteminde 924 µF değerinde kondansatörler mevcuttur. Bu kondansatörler 480 V etiket değerinden olduğundan dolayı filtreli kullanıma uygundur. Kondansatörlerin önüne seri olarak bağlanacak harmonik filtre reaktörleri denklem 6. 5 kullanılarak hesaplanmıştır.

Harmonik filtre reaktörünün endüktans değeri:

$$L = \frac{p}{w^2.C} = \frac{0{,}07}{314^2.924.10^{-6}} = 0{,}768\ mH \qquad (6.5)$$

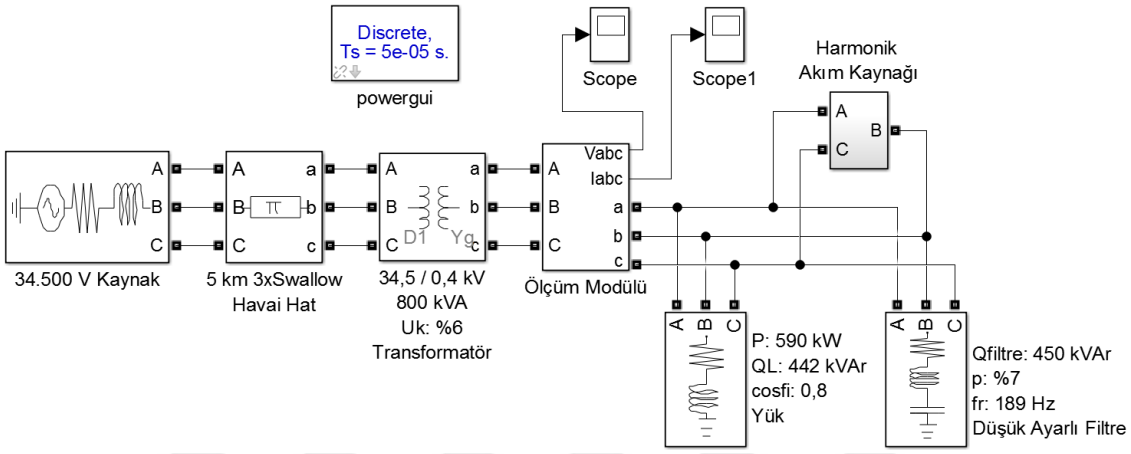
Nominal değer olarak 0,77 mH seçilmiştir.



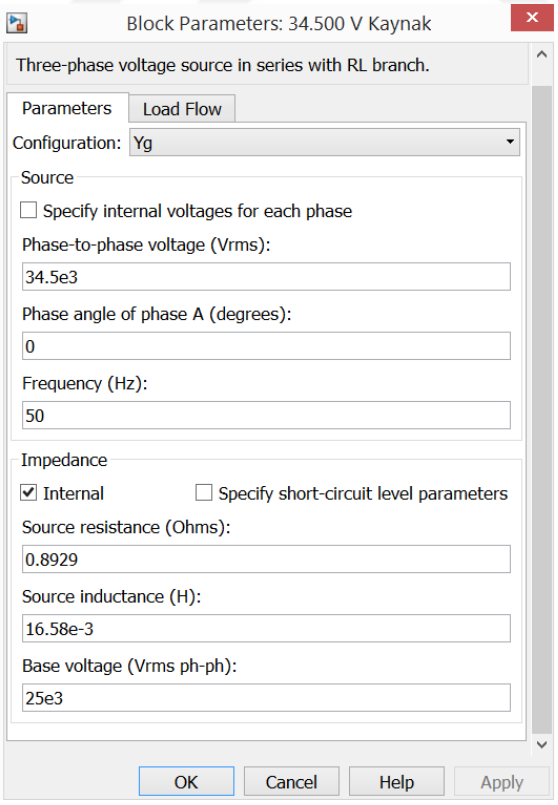
Şekil 6. 13 Tesisin tek hat şeması

6.4 Simülasyon Çalışması

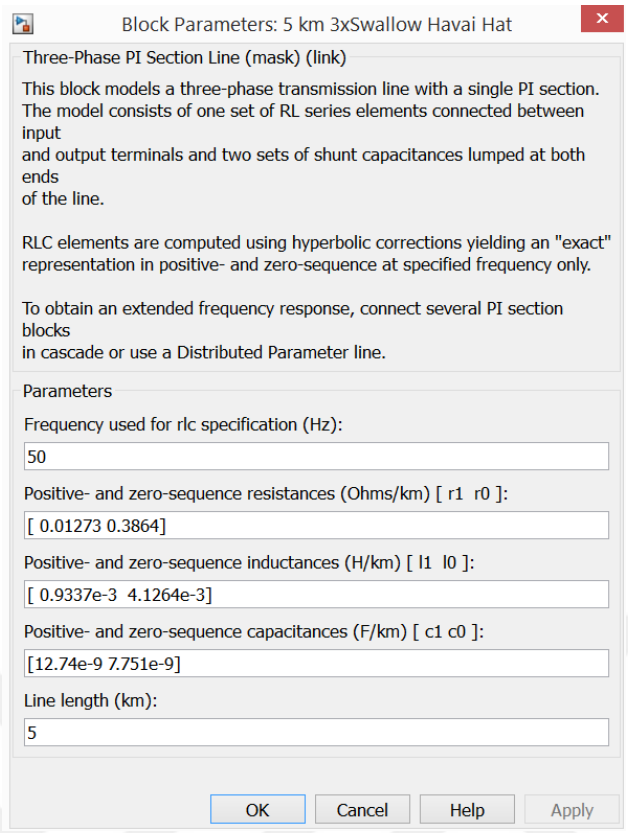
Tesisin Matlab Simulink programında yapılan simülasyon modeli Şekil 6. 12'de verilmiştir. Kaynak 34,5 kV gerilim seviyesinde sinüzoidal olarak modellenmiştir. Şebekenin iletken kesitleri bilinmediğinden dolayı 3 x swallow kesitinde 5 km uzunluğunda bir havai hat pi eşdeğer devre şeklinde modellenmiştir. Tasarlanan HFKS yapısı seri R-L-C yük olarak modellenmiştir. Akım harmonikleri ise ölçümlerden elde edilen sonuçlara göre akım kaynağı şeklinde modellenmiştir.



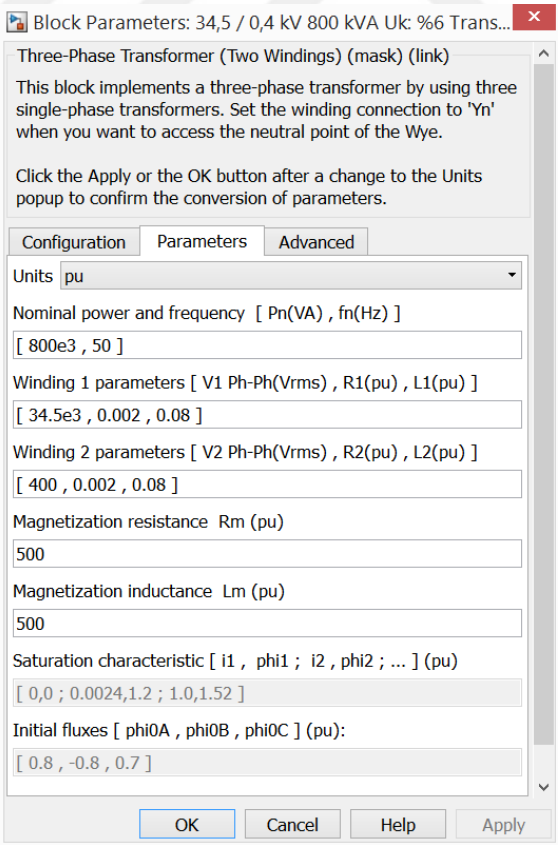
Şekil 6. 14 Tesisin Matlab Simulink modeli



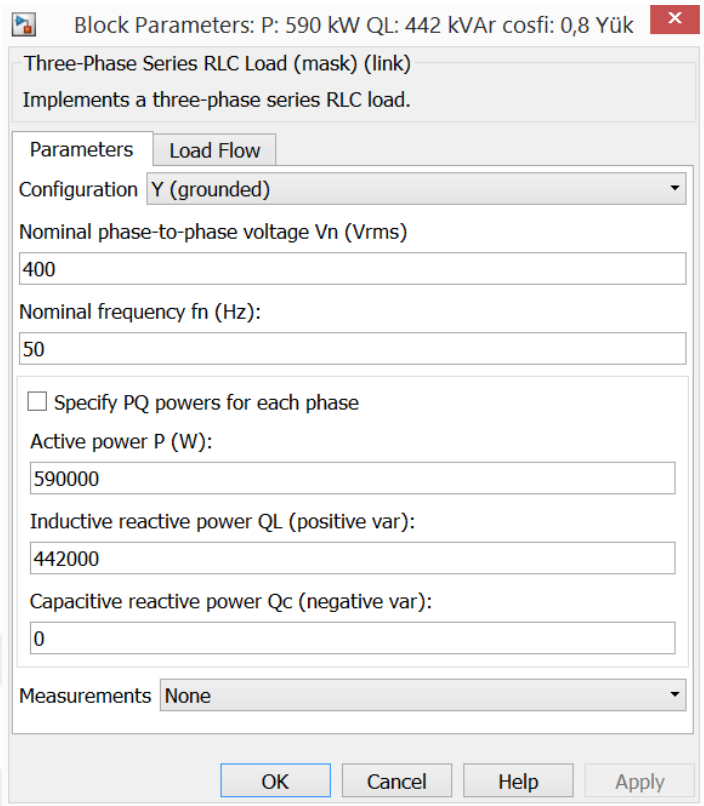
Şekil 6. 15 34500 Volt kaynak modellemesi



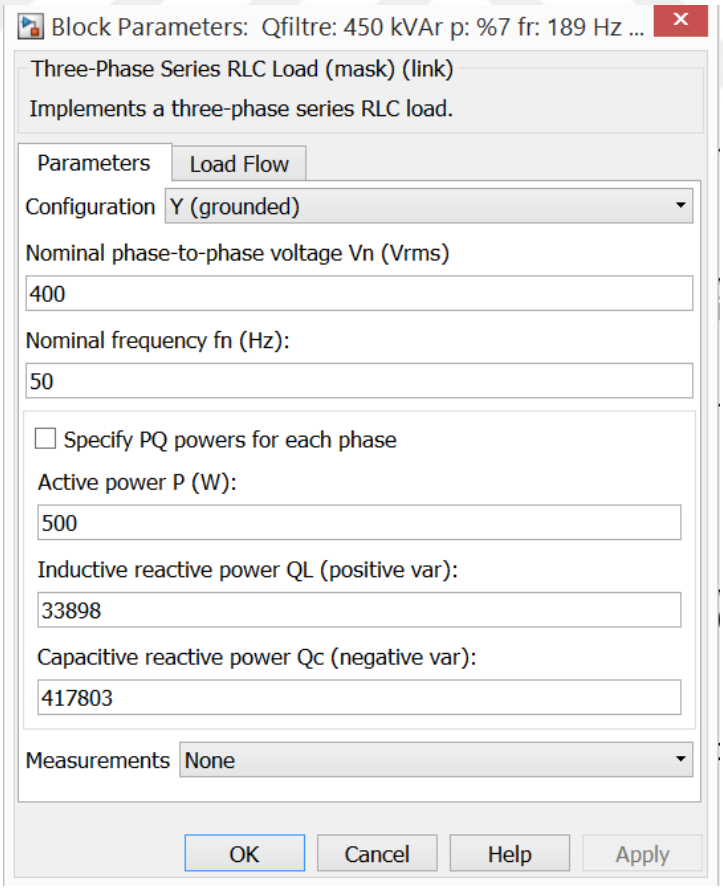
Şekil 6. 16 İletim hattı modellemesi



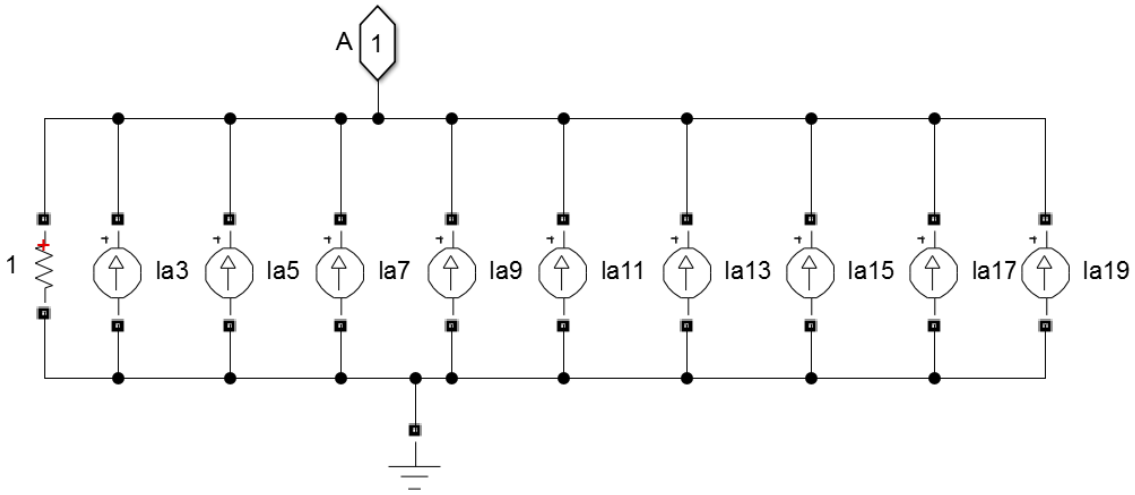
Şekil 6. 17 Transformatör modellemesi



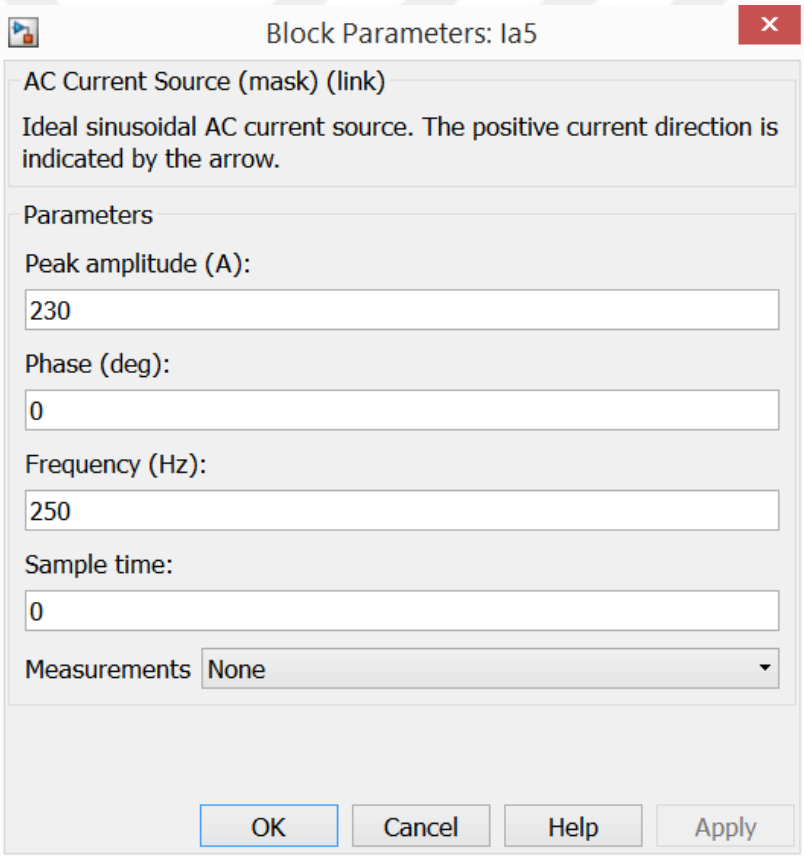
Şekil 6. 18 Yük modellemesi



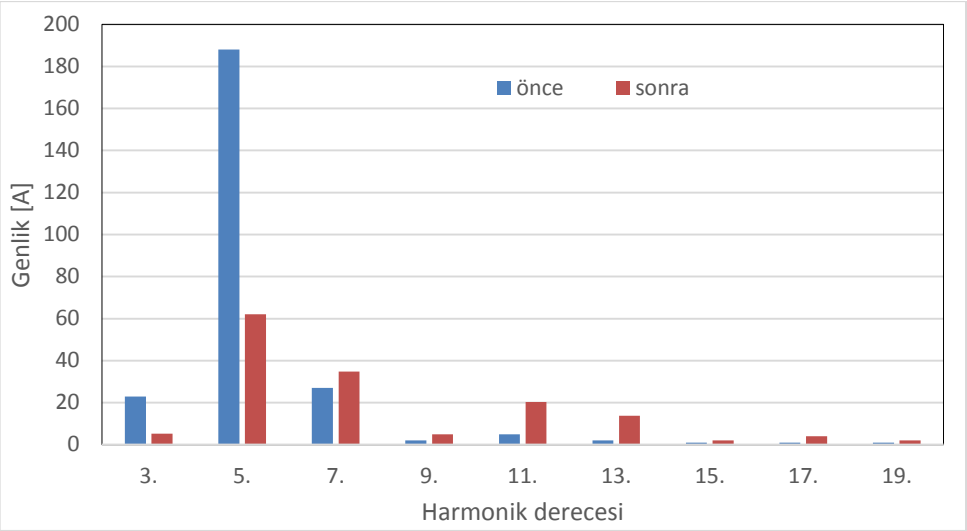
Şekil 6. 19 HFKS modellemesi



Şekil 6. 20 Akım harmonikleri modellemesi

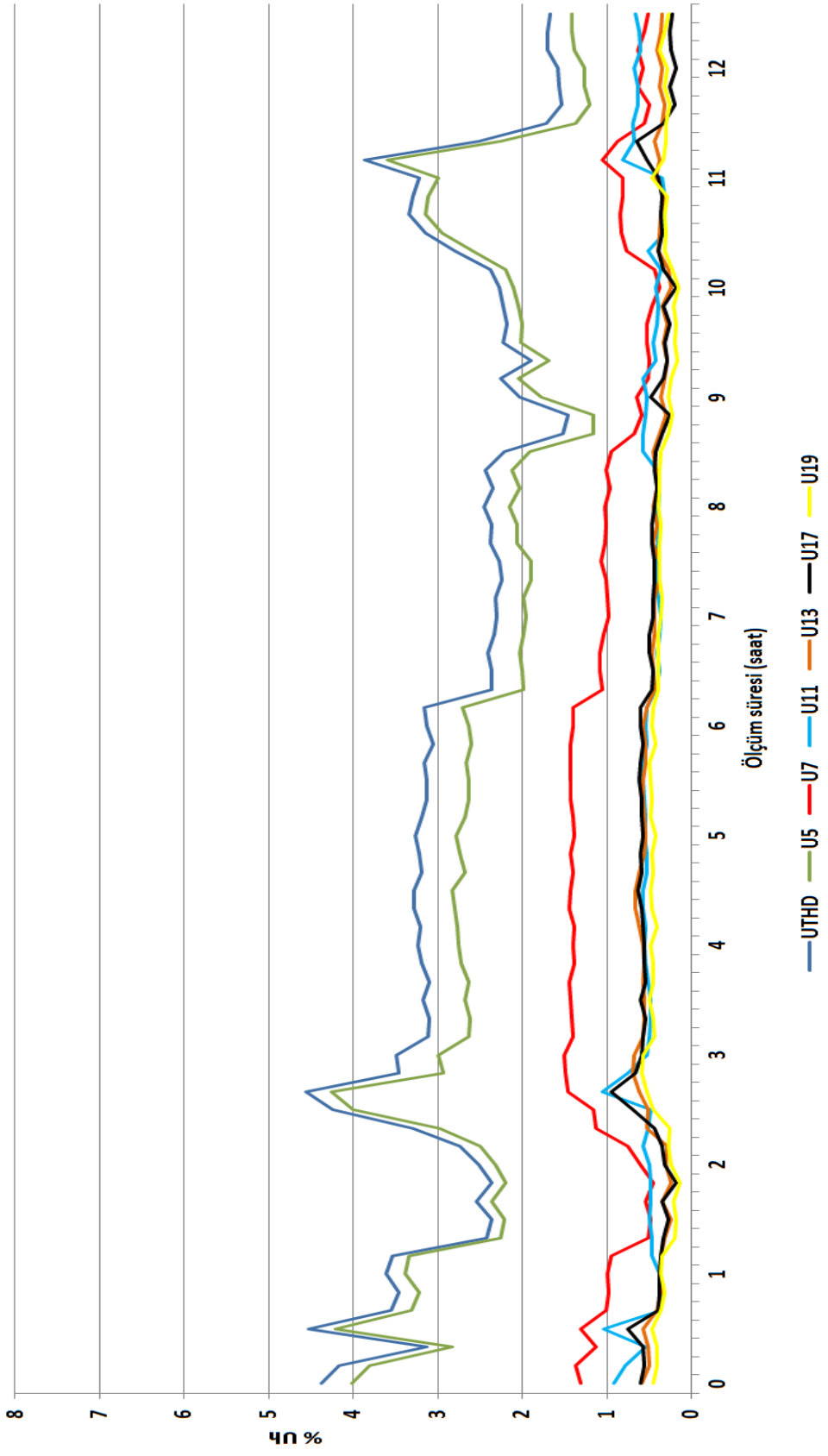


Şekil 6. 21 Akım kaynağı modellemesi

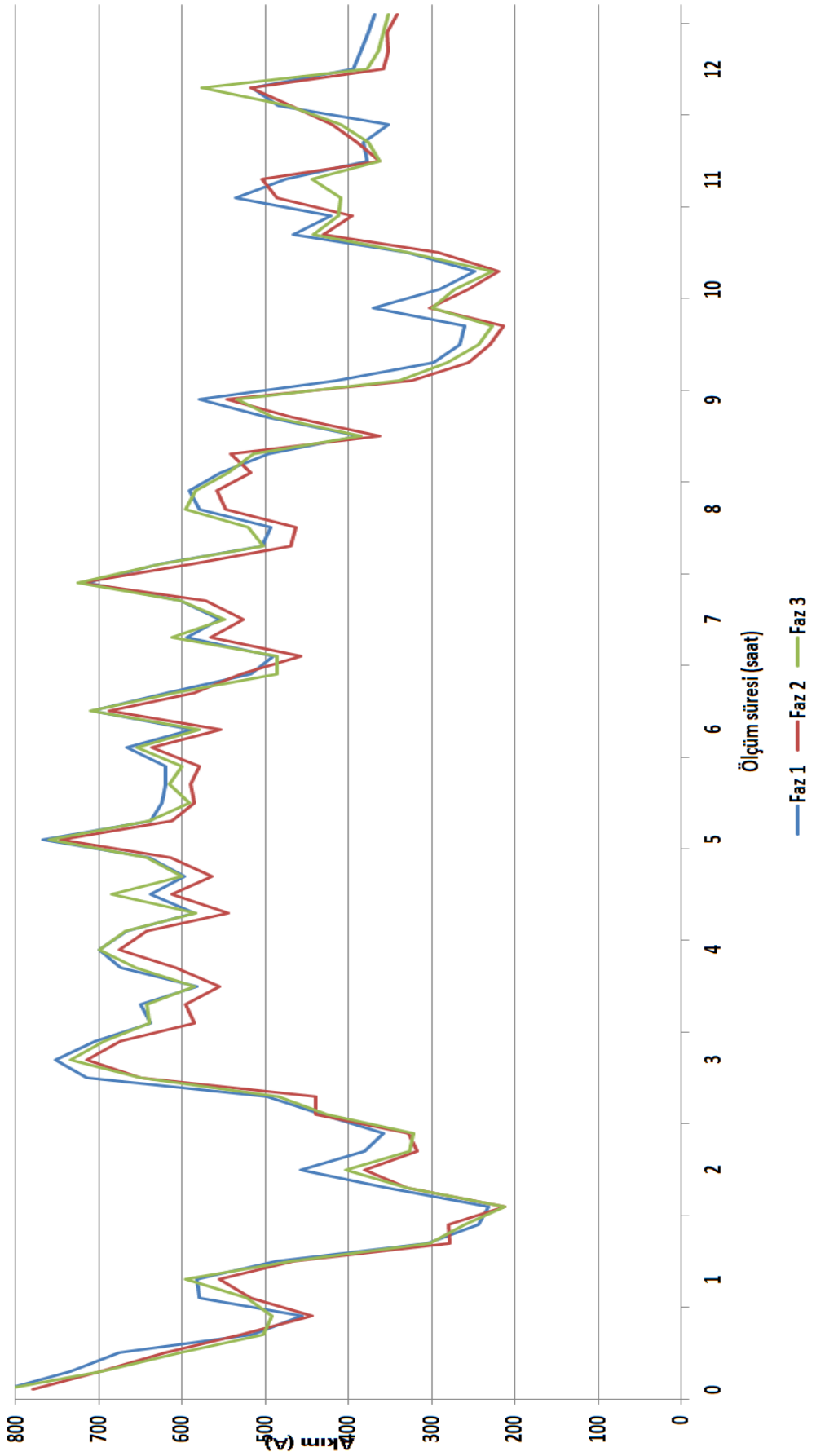


Şekil 6. 22 Simülasyon sonuçları

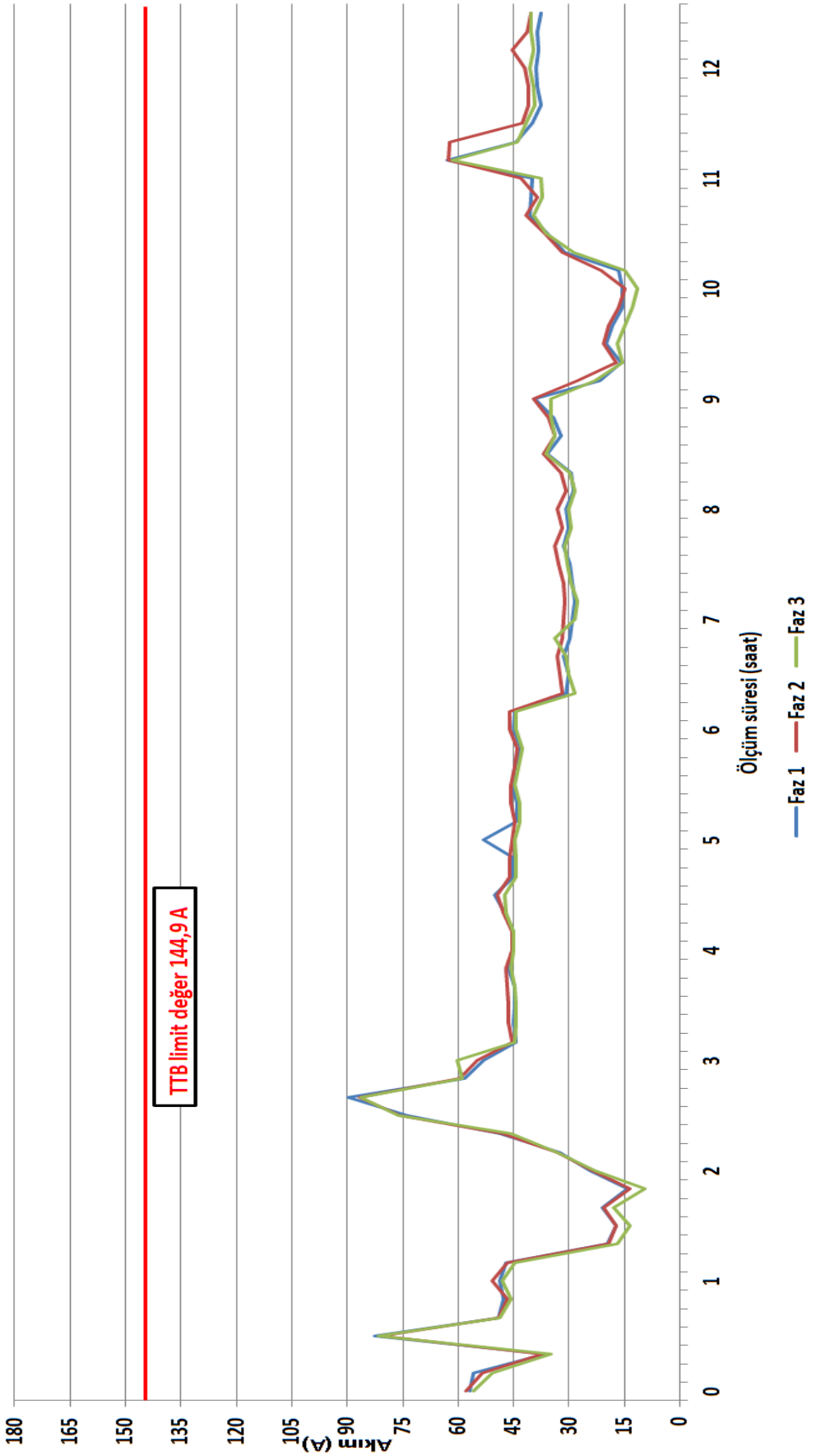
6.5 Uygulama Sonrası Ölçüm Sonuçları



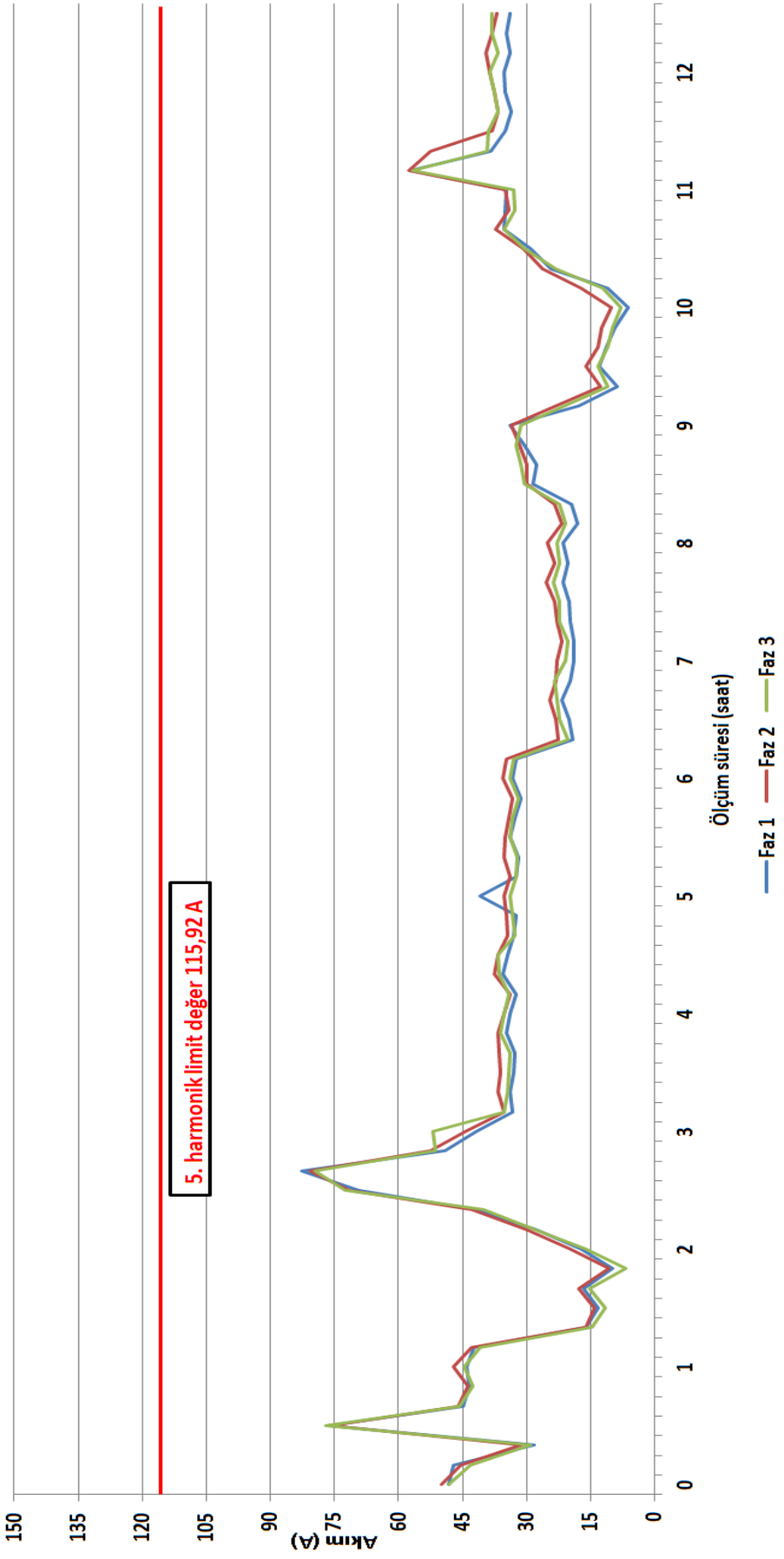
Şekil 6. 23 Uygulama sonrası gerilim harmonikleri



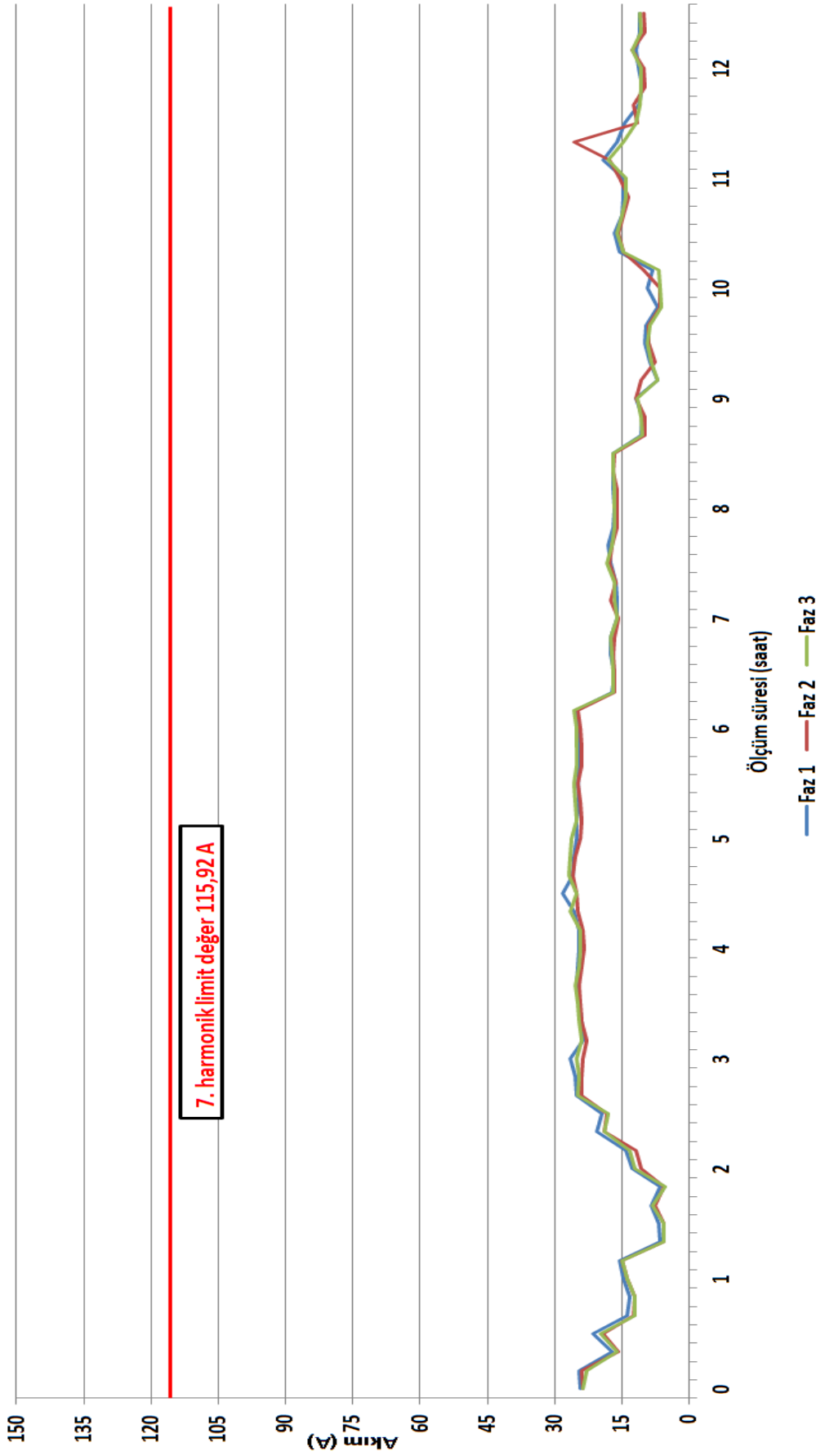
Şekil 6. 24 Uygulama sonrası şebekeden çekilen akımın temel frekans değeri



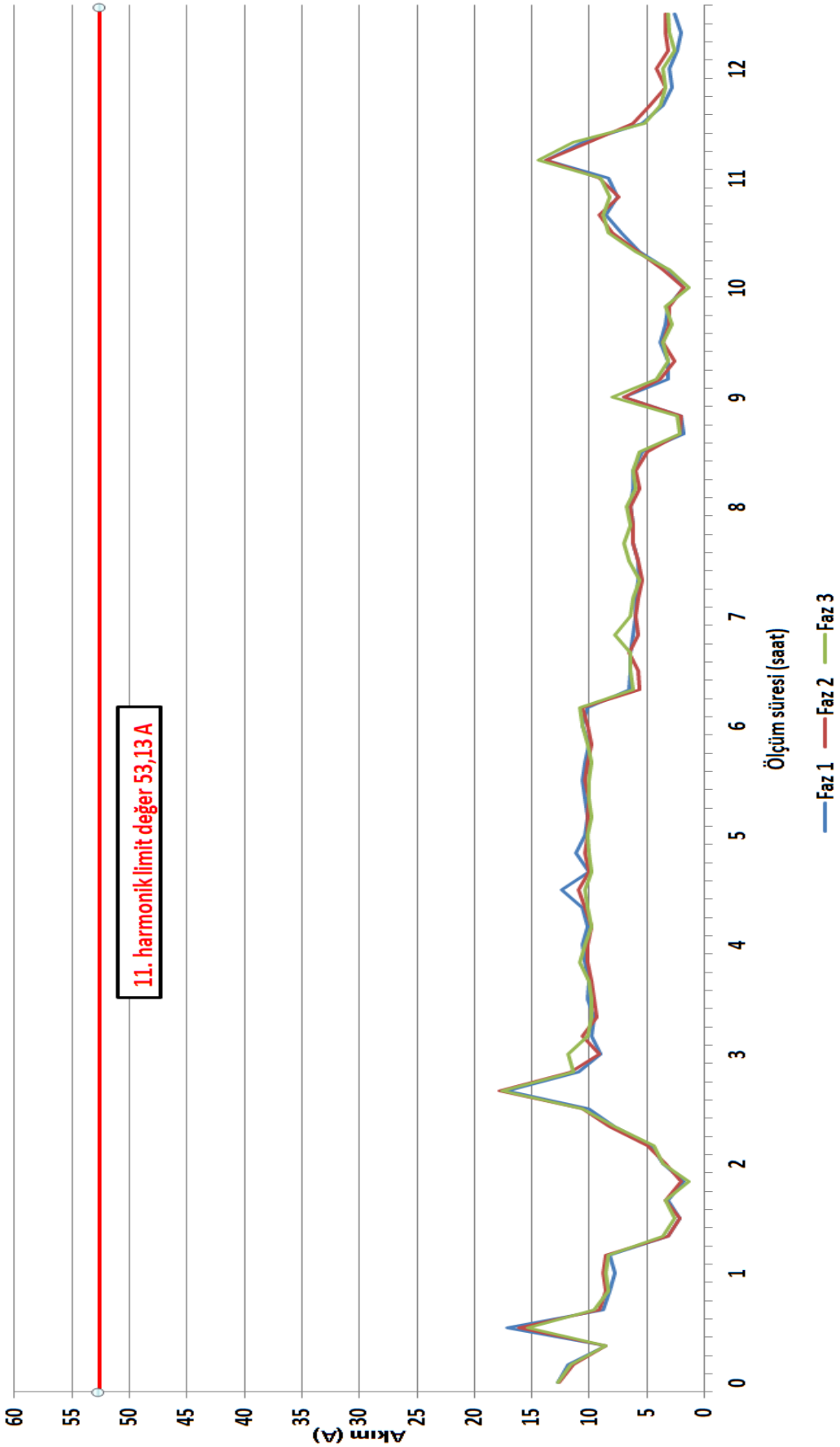
Şekil 6. 25 Uygulama sonrası toplam talep bozulumu grafiği



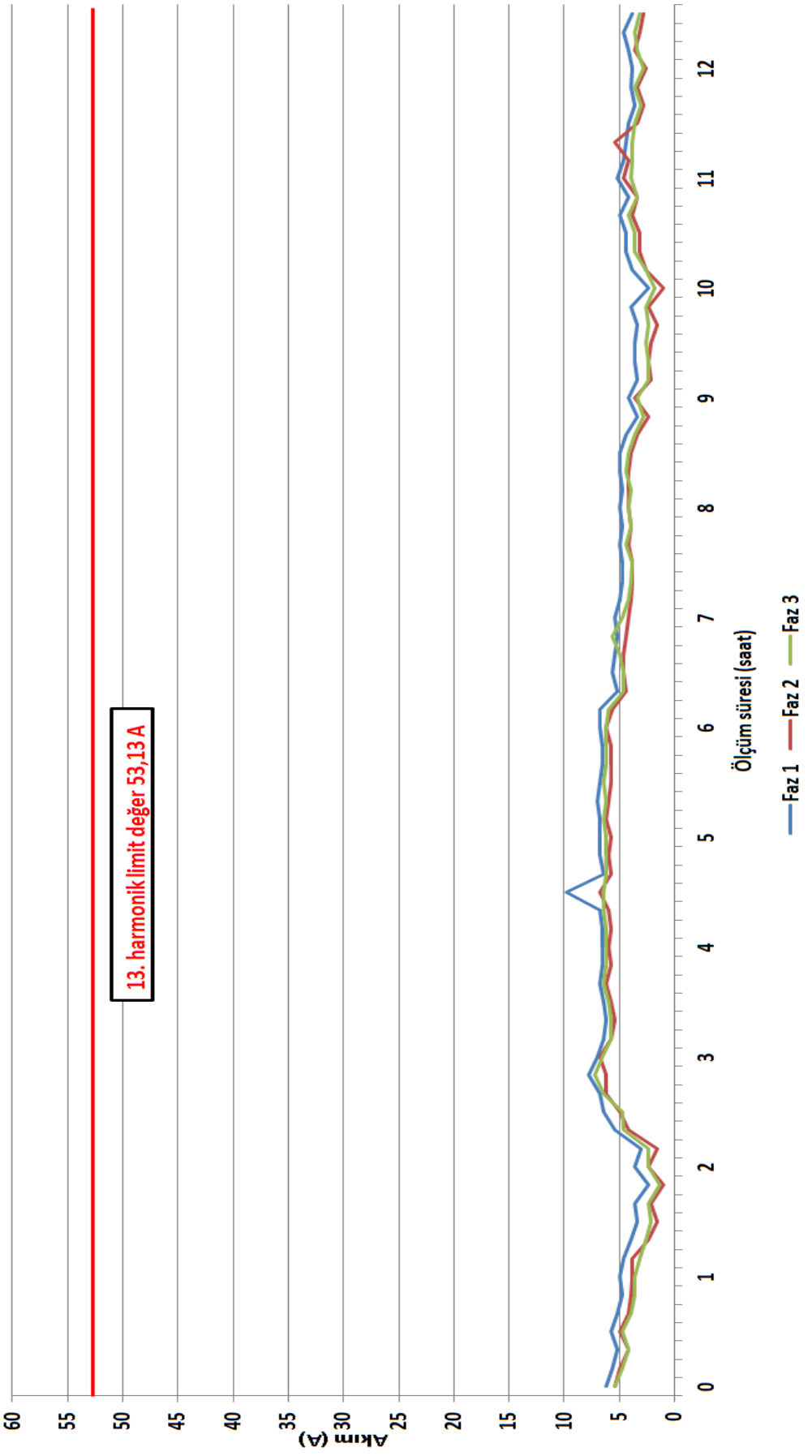
Şekil 6. 26 Uygulama sonrası 5. akım harmoniği grafiği



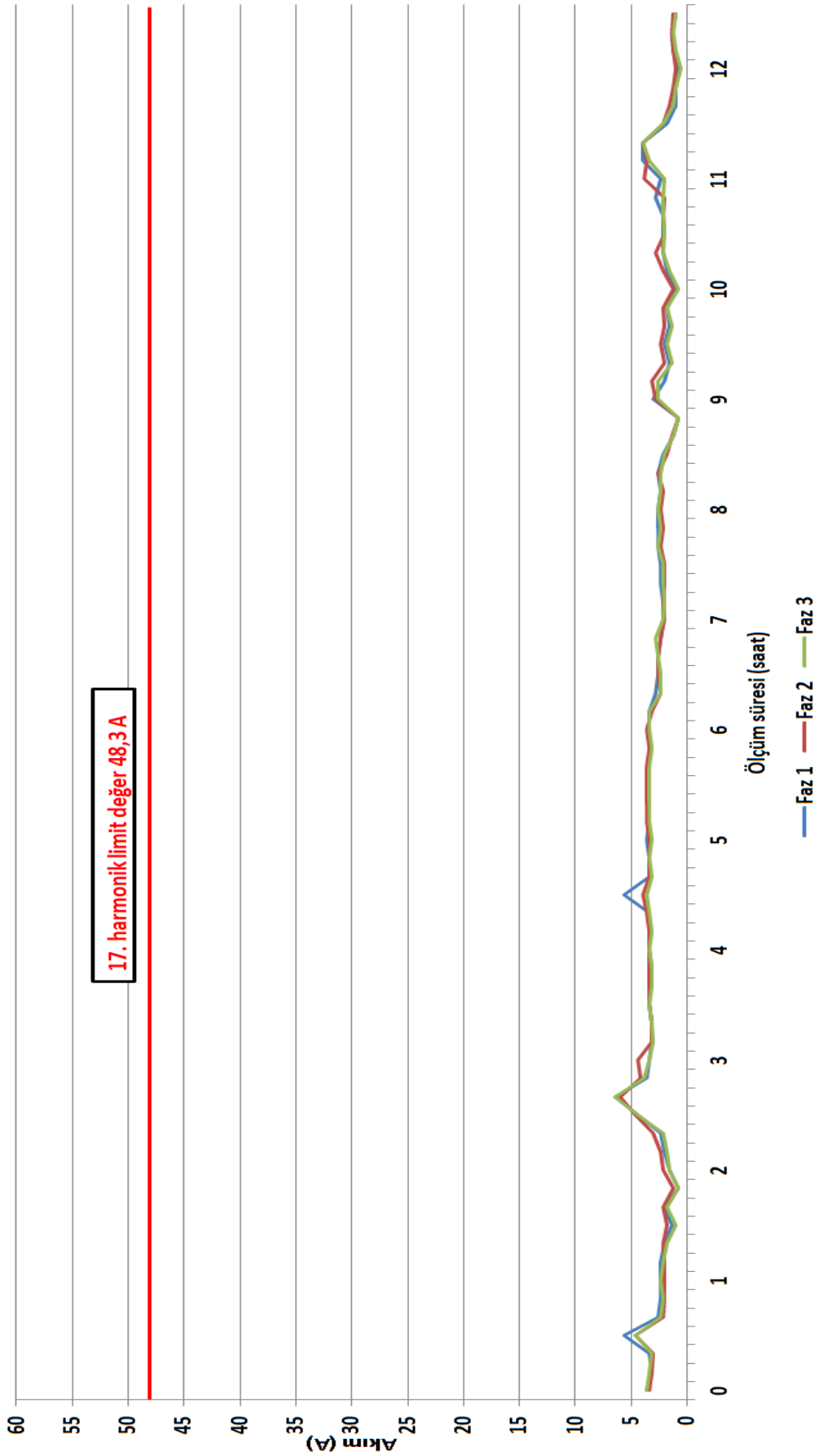
Şekil 6. 27 Uygulama sonrası 7. akım harmoniği grafiği



Şekil 6. 28 Uygulama sonrası 11. akım harmoniği grafiği



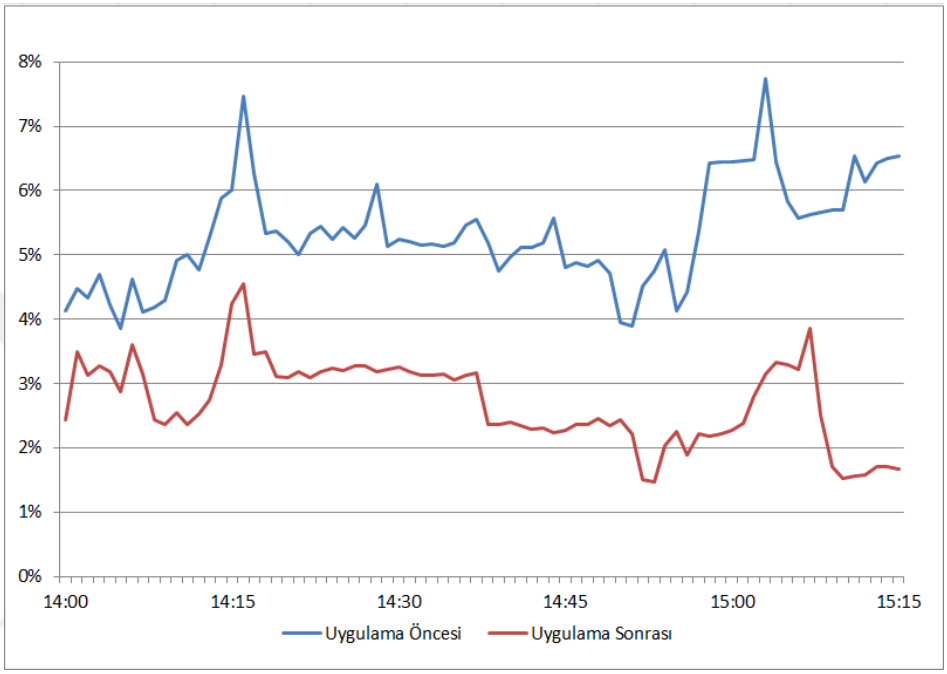
Şekil 6. 29 Uygulama sonrası 13. akım harmoniği grafiği



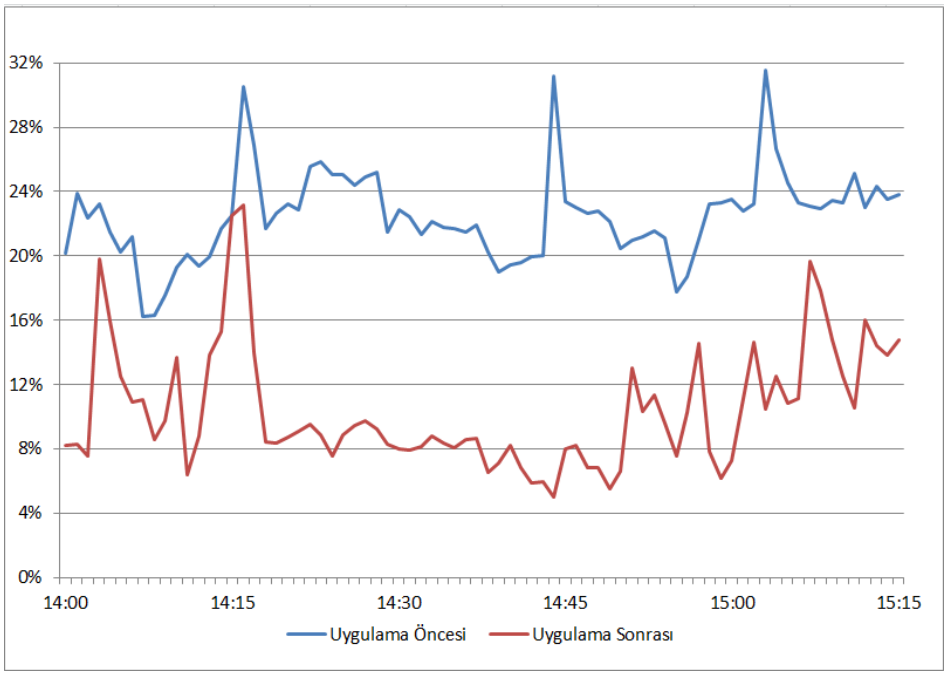
Şekil 6. 30 Uygulama sonrası 17. akım harmoniği grafiği

6.6 Sonuçların Karşılaştırılması

Şekil 6. 28 ve Şekil 6. 29'da uygulama öncesi ve uygulama sonrasına ait sırasıyla gerilim ve akım için toplam harmonik bozulma grafikleri verilmiştir. Her iki karşılaştırma da tesisin tam yük altında çalıştığı saat 14.00 – 15.15 saatleri arasında gerçekleştirilmiştir. Temel frekans akım ve gerilim değerleri her iki eğri için yaklaşık eşittir.



Şekil 6. 31 THD-U grafiği



Şekil 6. 32 17 THD-I grafiği

BÖLÜM 7

SONUÇ VE ÖNERİLER

Harmonikler güç sisteminde ilave parasal kayıplara ve arızalara sebep olan önemli bir güç kalitesi problemidir. Bu problemin çözümü için daha az harmonik üreten cihaz ve ekipmanların tercih edilmesi, üretilen harmoniklerin ise kaynağına en yakın noktada filtre edilmesi gerekmektedir. Filtre yöntemi olarak inverterli akım kaynağı tabanlı aktif filtreler ve R-L-C elemanlarıyla oluşturulan pasif filtreler geliştirilmiştir. Bu çalışmada ülkemizde yaygın olarak kullanılan harmonik filtreli kompanzasyon sistemleri (HFKS), diğer adlarıyla detuned veya düşük ayarlı harmonik filtreler teknik açıdan ele alınmıştır.

HFKS, kondansatörlerin harmonikler üzerindeki bozucu etkisini ve rezonans arızalarını önlemek için kullanılmaktadır. Bu sistemlerin etkinliği şebeke empedansına, bağlantı noktasının yüke olan yakınlığına, akım ve gerilim harmonik değerlerine bağlıdır. HFKS tasarlanırken mutlaka sistemde var olan tüm frekanslar için empedans analizi gerçekleştirilmelidir. Şebeke şartlarına göre uyumlu tasarlanmış bir HFKS ile harmonik problemleri önemli oranda azaltılabilir, ekonomik bir yatırım ile yönetmeliklerde belirtilen limit değerlere uygunluk sağlanabilir.

Sektörde 134 Hz, 189 Hz ve 210 Hz rezonans frekanslı HFKS standartlaşmıştır. Hangi sistemin daha efektif sonuç vereceğinin tespit edilebilmesi için öncelikle tesiste etkili bir harmonik ölçüm ve analizinin gerçekleştirilmesi gerekmektedir. Harmonik ölçümleri gerçekleştirilmeden önce işletmenin yüksek gerilim ve alçak gerilim tek hat şemaları hazırlanmalıdır. Hazırlanan tek hat şemalarına göre ölçüm yapılacak noktalar belirlenmelidir. Ölçümler normal işletme koşullarında gerçekleştirilmelidir. Her bir yük

grubu ayrı ayrı ölçülerek harmonik probleminin kaynağı belirlenmelidir. Reaktif güç kompanzasyon sistemi devredeyken ve devre dışı iken ölçümler alınarak karşılaştırması yapılmalıdır.

134 Hz HFKS özellikle şebeke 5. harmonik gerilimin yüksek olduğu, yük 5. harmonik akımının düşük olduğu tesislerde tercih edilmelidir. Bunun sebebi kompanzasyon sisteminin 250 Hz'te olabildiğince yüksek empedansa sahip olmasını sağlayarak şebekeden çekilecek 5. harmonik akımlarını minimuma indirmektedir.

210 Hz HFKS 134 Hz'in tam tersine şebeke V_5 geriliminin yüksek olmadığı, yük I_5 akımının yüksek olduğu tesislerde tercih edilmelidir. 210 Hz rezonans frekanslı sistemler 250 Hz'te son derece düşük empedansa sahip olurlar. V_5 gerilimi düşük olması sebebiyle şebekeden çekilen I_5 akımını fazla arttırmazlar ancak yük tarafından üretilen I_5 akımını diğer sistemlere göre daha etkili bir performans ile filtre ederler.

189 Hz HFKS ise V_5 ve I_5'in hangisinin daha baskın olduğunun tespit edilemediği tesislerde kullanılmaktadır.

Çizelge 7. 1'de Bölüm 5'te ele alınan iş merkezinin filtresiz kompanzasyon kullanması ve 134 Hz, 189 Hz, 210 Hz HFKS kullanması durumunda şebekeden çekeceği akım harmonikleri gösterilmektedir. Tabloda görüldüğü gibi filtresiz kompanzasyon kullanılması durumunda yüksek frekanslı mertebeler limitleri aşmaktadır. Bu tesis için HFKS'nin optimum rezonans frekansı standart değerler arasından 210 Hz olduğu görülmektedir.

Bu çalışmadan elde edilen sonuçlara göre bir HFKS'nin optimum rezonans frekansı standart değerlerin dışında ara değerlerde de olabilmektedir. Her tesis için optimum HFKS rezonans frekansının hesaplanması, bunun sonucunda uygun sistemlerin tesis edilmesi, daha kaliteli ve daha ekonomik enerji kullanımının önünü açacaktır.

Çizelge 7. 1 Filtresiz kompanzasyon ve HFKS karşılaştırma tablosu

n	f (Hz)	Oran	Limit Değer (A)	Sadece Yük Akımı (A)	Filtresiz Kompanz.	134 Hz HFKS	189 Hz HFKS	210 Hz HFKS
5	250	12%	**72**	**78,26**	**83,58**	**75,58**	**70,72**	**67,84**
7	350	12%	**72**	**26,43**	**36,41**	**26,61**	**27,14**	**27,59**
11	550	5,50%	**33**	**9,78**	**17,35**	**9,75**	**9,77**	**9,81**
13	650	5,50%	**33**	**6,28**	**13,51**	**6,28**	**6,31**	**6,34**
17	850	5%	**30**	**1,17**	**2,55**	**1,15**	**1,13**	**1,12**
19	950	5%	**30**	**0,65**	**1,96**	**0,64**	**0,64**	**0,64**
23	1150	2%	**12**	**3,98**	**16,49**	**3,96**	**3,95**	**3,95**
25	1250	2%	**12**	**1,66**	**8,38**	**1,66**	**1,66**	**1,66**
29	1450	2%	**12**	**5,26**	**34,09**	**5,25**	**5,26**	**5,27**
31	1550	2%	**12**	**6,92**	**49,57**	**6,90**	**6,91**	**6,93**
35	1750	1%	**6**	**3,33**	**27,84**	**3,31**	**3,31**	**3,31**
37	1850	1%	**6**	**3,90**	**37,68**	**3,89**	**3,89**	**3,90**
41	2050	1%	**6**	**1,39**	**15,75**	**1,38**	**1,38**	**1,39**
43	2150	1%	**6**	**1,41**	**17,81**	**1,41**	**1,41**	**1,41**
47	2350	1%	**6**	**0,91**	**13,25**	**0,91**	**0,91**	**0,91**
49	2450	1%	**6**	**0,78**	**12,42**	**0,78**	**0,78**	**0,78**
TTB		15%	**90**	**84,17**	**125,92**	**81,74**	**77,46**	**75,02**

KAYNAKLAR

[1] Patil, G.Q., Bhosale, Y.N. ve Bolaj V.S., (2017). "Passive Filter Design to Mitigate Harmonics in Three Phase Induction Furnace", International Conference on circuits Power and Computing Technologies, India.

[2] Liang, X. ve Ilochonwu, O., (2011). "Subsea Cable Applications With Six-pulse Variable Frequency Drives", IEEE Industry Applications Magazine, Sep-Oct 2011: 36-44.

[3] Sirjani, R. ve Kuşaf, M., (2016). "Optimal Design of Passive Harmonic Filters Using Bee Colony Optimization", 13th HONET-ICT International Symposium, K.K.T.C., 88-92.

[4] Öztürk, O., Köksoy, A., Karacasu, Ö., Balcı, M.E. ve Hocaoğlu, M.H., (2013). "Üç Fazlı Sistemlerde Labview Tabanlı Harmonik Sorumluluk Paylaşım Hesabı", Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu, Kocaeli, 54-58.

[5] Elmathana M.T., Zobaa A.F. ve Abdel Aleem S.H.E., (2012). "Economical Design of Multiple-Arm Passive Harmonic Filters for an Industrial Firm", Harmonics and Quality of Power (ICHQP) IEEE 15th International Conference, China, 438-444.

[6] Cho, Y.S., Kim B.R. ve Cha, H., (2010). "Transfer Function Approach to a Passive Harmonic Filter Design for Industrial Process Application", IEEE International Conference on Mechatronics and Automation, China, 963-968.

[7] Sefa, İ., Balcı, S. ve Altın N., (2015). "Sonlu Elemanlar Metodu İle AA Hat Reaktörlerinin Tasarımı", Politeknik Dergisi, 18 (4): 257-267.

[8] Desai, R. ve Basva N., (2015). "6 MW AFE Drive Harmonic Mitigation Solution by Passive Filter", Petroleum and Chemical Industry Conference, India, 230-242.

[9] Tekin, M., Keçecioğlu, F., Erafşar, Ö. ve Şekkeli M., (2016). "Bir Hidroelektrik Santralin Elektrik Şebekesindeki Harmonik Oluşumuna Etkisinin İncelenmesi", Kahramanmaraş Sütçü İmam Üniversitesi Mühendislik Bilimleri Dergisi, 19 (2): 70-77.

[10] Mutlu, A., Taşkın, S. ve Kuyucuoğlu F., (2016). "Elektrik Enerji Sistemlerinde Güç Kalitesi Parametrelerine Dayalı Anahtarlama Sistemi ile Otomatik Şebeke Seçimi", Düzce Üniversitesi Bilim ve Teknoloji Dergisi, 4: 826-836.

[11] Rüstemli S.i Cengiz M.S. ve Dinçer F., (2013). "Elektrik Tesislerinde Harmoniklerin Aktif Filtre Kullanılarak Yok Edilmesi ve Simülasyonu", Bitlis Eren Üniversitesi Fen Bilimleri Dergisi, 2 (1): 30-38.

[12] Hruby T. ve Kocman S., (2014). "Using Broadband Passive Harmonic Filters for Harmonic Mitigation in AC Drives", IEEE 16th International Conference, Romania, 172-176.

[13] Jouda, H.F., (2015). "Harmonic Analysis of Dimmable Power Leds for Street Lighting", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[14] Bağatır, A.U., (2013). "Sarıyer Çayırbaşı Karayolu Tüneli Elektrik Sistemi Harmonik Analizi ve Filtre Tasarımı", Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[15] Akbaba, S., (2008). "Harmoniklerin Dijital Aşırı Akım Röleleri Üzerine Etkisinin İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[16] Dağ, O., (2010). "Locating Harmonic Sources in Electrical Power Systems", Doktora Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[17] https://www.etymonline.com/, Erişim Tarihi 15 Mart 2019.

[18] Acarkan, B., (2006) "Ofis Donanımının Harmonik Etkinliğinin Kestirimi ve Harmonik Analizi", Doktora Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[19] T.C. Resmi Gazete, Elektrik Dağıtımı ve Perakende Satışına İlişkin Hizmet Kalitesi Yönetmeliği. (28504), 21 Aralık 2012, 2.

[20] T.C. Resmi Gazete, Elektrik Şebeke Yönetmeliği. (29013), 28 Mayıs 2014, 9.

[21] IEEE Standard 519, (1992). "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE, First Edition, New York.

[22] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan O., (2003). "Elektrik Tesislerinde Harmonikler", Birsen Yayınevi, İstanbul.

[23] Kocatepe, C., Umurkan, N., Attar, F., Yumurtacı, R., Uzunoğlu, M., Karakaş, A., Arıkan, O. ve Baysal, M., (2006). "Enerji Kalitesi ve Harmonikler" , TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Yayınları, Ankara.

[24] IEEE Standard 519, (2014). "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", IEEE, First Edition, New York.

[25] IEC Standards 61000-4-30, (2015), "Testing and measurement techniques - power quality measurement methods", IEC, First Edition, Geneva.

[26] Sağlam, H., (2005). "Dağıtım Transformatörlerinin Bağlantı Gruplarına Göre Harmonik Simulasyonu", Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[27] Uz, E., (2005). "Development of Fast and Robust Spectral Decomposition Method for Nonlinear Industrial Loads with Current Frequency Spectrum Rich in

Harmonic and Interharmonic Content ”, Doktora Tezi, Ortadoğu Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara.

[28] Akgeyik, O., (2005). “Kesintisiz Güç Kaynaklarında Kullanılan Doğrultucuların Oluşturduğu Akım Harmoniklerinin Analizi”, Yüksek Lisans Tezi, Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

[29] Şerbetçi, M.B., Gökalp, E. ve Tercan, S.M., (2018). “Harmonik İçeren Endüstriyel Tesislerde Düşük Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Tasarımı ve Uygulaması”, International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, 22-23 Kasım 2018, Ankara, 1034-1041.

[30] Sandeep, A., (2014). “Study of Hybrid Active Power Filter for Power Quality Improvement”, Yüksek Lisans Tezi, National Institute of Technology, Rourkela.

ÖZGEÇMİŞ

KİŞİSEL BİLGİLER

Adı Soyadı : Mehmet Baha ŞERBETÇİ

Doğum Tarihi ve Yeri : 03.09.1990 / İstanbul

Yabancı Dili : İngilizce

E-posta : bahaserbetci@hotmail.com

ÖĞRENİM DURUMU

Derece	**Alan**	**Okul/Üniversite**	**Mezuniyet Yılı**
Lisans	Elektrik Mühendisliği	Yıldız Teknik Üniversitesi	2013
Önlisans	Elektrik Bölümü	Marmara Üniversitesi	2010
Lise	Haydarpaşa Anadolu Teknik Lisesi	Elektrik Bölümü	2008

İŞ TECRÜBESİ

Yıl	**Firma/Kurum**	**Görevi**
2013 – devam ediyor	Pesa Elektrik Malzemeleri Ltd. Şti.	Elektrik Mühendisi

YAYINLARI

Bildiri

1. Şerbetçi, M.B., Gökalp, E., Tercan, S.M., (2018). “Harmonik İçeren Endüstriyel Tesislerde Düşük Ayarlı Pasif Harmonik Filtre Tasarımı ve Uygulaması”, International Eurasian Conference on Science, Engineering and Technology, Ankara, 1034-1041.