İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ

ATIKSU ARITMA TESİSİNDE HARMONİKLERİN ÖLÇÜLEREK TOPLAM HARMONİK BOZULMANIN TESPİT EDİLMESİ VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI - GEBZE ATIKSU ARITMA TESİSİ ÖRNEĞİ

Hasan ÖZEL

UZMANLIK TEZİ

NİSAN 2017

İLBANK

TÜRKİYE'NİN YAPICI GÜCÜ

İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ

ATIKSU ARITMA TESİSİNDE HARMONİKLERİN ÖLÇÜLEREK TOPLAM HARMONİK BOZULMANIN TESPİT EDİLMESİ VE ÇÖZÜM YÖNTEMLERİNİN ARAŞTIRILMASI - GEBZE ATIKSU ARITMA TESİSİ ÖRNEĞİ

Hasan ÖZEL

UZMANLIK TEZİ

Tez Danışmanı (Kurum)
Güzide GÖKAŞAN

Tez Danışmanı (Üniversite)
Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU

ETİK BEYAN

İLLER BANKASI ANONİM ŞİRKETİ Uzmanlık Tezi Yazım Kurallarına uygun olarak hazırladığım bu tez çalışmasında; tez içinde sunduğum verileri, bilgileri ve dokümanları akademik ve etik kurallar çerçevesinde elde ettiğimi, tüm bilgi, belge, değerlendirme ve sonuçları bilimsel etik ve ahlak kurallarına uygun olarak sunduğumu, tez çalışmasında yararlandığım eserlerin tümüne uygun atıfta bulunarak kaynak gösterdiğimi, kullanılan verilerde herhangi bir değişiklik yapmadığımı, bu tezde sunduğum çalışmanın özgün olduğunu, bildirir, aksi bir durumda aleyhime doğabilecek tüm hak kayıplarını kabullendiğimi beyan ederim.

Hasan ÖZEL
03/04/2017

Atıksu Arıtma Tesisinde Harmoniklerin Ölçülerek Toplam Harmonik Bozulmanın Tespit Edilmesi ve Çözüm Yöntemlerinin Araştırılması – Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Örneği

(Uzmanlık Tezi)

Hasan ÖZEL

İLBANK A.Ş.

Nisan 2017

ÖZET

Elektrik enerjisine olan ihtiyacın gün geçtikçe artması, elektrik enerjisi üretiminde kullanılan kaynakların azalması, elektrik enerjisi kalitesi kavramını çok daha önemli bir konuma getirmiştir. Bu tez kapsamında güç kalitesinin en önemli faktörlerinden biri olan harmonik bozulmalar detaylı bir şekilde incelenerek, atıksu arıtma tesisinde yapılan harmonik ölçümleri neticesinde kapsamlı bir harmonik analizi yapılacaktır. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde yapılan harmonik ölçümler ışığında, harmonik kaynağı olan tesis ekipmanları ve harmonikten etkilenebilecek noktalar, bir atıksu arıtma tesisi özelinde incelenecektir. Harmonikleri gidermek için kullanılan filtreleme sistemleri irdelenip, ölçüm sonucu bulunan toplam harmonik bozulmaya göre atıksu arıtma tesisine uygun filtreleme yöntemi belirlenecektir. Harmonik bozulma verileri ve uygulanabilir filtreleme sistemleri çerçevesinde İlbank A.Ş. tarafından yapılacak olan atıksu arıtma tesisleri ve benzer yük karakteristiğine sahip tesislerin, harmonikten kaynaklanan kayıplarını ve arızalarını en aza indirgemek için alınabilecek önlemler belirlenecektir.

Anahtar Kelimeler	:	Harmonik Bozulma, Filtreleme, Atıksu Arıtma
Sayfa Adedi	:	83
Tez Danışmanı	:	Güzide GÖKAŞAN (Kurum) Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU (Üniversite)

Finding the Total Harmonic Distortion Using the Harmonic Measurements in Wastewater Treatment Plants and Exploring the Solutions – Gebze Wastewater Treatment Plant

(Expertise Thesis)

Hasan ÖZEL

İLBANK A.Ş.

April 2017

ABSTRACT

The increasing need for electrical energy each and everyday and the decrease in the sources used in generating electricity made the concept of good quality electrical energy more important. The purpose of this study is to analyze in detail the harmonic distortion which is one of the most important factors of power quality and to perform the harmonic analysis using the data obtained from a wastewater treatment plant. The equipment with harmonic sources in the plant and the points that can be affected by the harmonics are examined in the wastewater treatment plant in the light of the harmonic measurements gathered from Gebze Wastewater Treatment Plant. The filtering systems for minimizing the harmonics are studied and the appropriate filtering method for the wastewater treatment plant is determined according to the harmonic distortion found in the measurements. The precautions to minimize the losses and the malfunctions caused by the harmonics in wastewater treatment plants and plants that have similar load characteristics to be built by Ilbank A.Ş. are determined within the framework of harmonic distortion data and applicable filtering systems.

Key Words	:	Harmonic Distortion, Filtering, Wastewater Treatment
Page Number	:	83
Supervisor	:	Güzide GÖKAŞAN (Corporate) Prof. Dr. M.Cengiz TAPLAMACIOĞLU (University)

TEŞEKKÜR

Tez yazım aşamasında bilgi ve tecrübelerini esirgenemeyen "Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi, Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden" Prof. Dr. M. Cengiz TAPLAMACIOĞLU'na;

İller Bankası A.Ş.'de çalışmaya başladığım günden itibaren her türlü desteği sağlayan "İller Bankası A.Ş. Yatırım Koordinasyon Dairesi Başkanlığından" çok değerli Elektrik Grubu Sorumlusu Teknik Uzman Güzide GÖKAŞAN'a;

Son olarak hayatım boyunca maddi manevi her türlü desteği sağlayan ve hakkını hiçbir zaman ödeyemeyeceğim aileme teşekkürü borç bilirim.

İÇİNDEKİLER

Sayfa

ÖZET i
ABSTRACT ii
TEŞEKKÜR iii
İÇİNDEKİLER iv
ÇİZELGELERİN LİSTESİ vi
ŞEKİLLERİN LİSTESİ vii
RESİMLERİN LİSTESİ ix
SİMGELER VE KISALTMALAR x
GİRİŞ 1

1. ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ VE HARMONİKLER 3
1.1. Güç Kalitesi 5
1.1.1. Güç kalitesini etkileyen faktörler 5
1.1.2. Güç kalitesindeki bozulmalar 6
1.1.3. Sinüzoidal ve nonsinüzoidal dalga biçimi 7
1.2. Harmoniğin Tanımı 9
1.2.1. Harmoniklerin fourier serisi ile ifade edilmesi 10
1.3. Harmonikler ile İlgili Terimler 11
1.3.1. Toplam harmonik bozulma 11
1.3.2. Toplam talep distorsiyonu 12
1.3.3. Şekil faktörü 12
1.3.4. Tepe faktörü 13
1.3.5. Telefon etkileşim faktörü 13
1.3.6. Transformatör k-faktörü 13
1.4. Nonlineer Elemanlar 13
1.4.1. Magnetik lineersizlik 15
1.4.2. Elektriksel lineersizlik 15
1.5. Harmonik Standartları 16
1.6. Harmonik Kaynakları 18
1.6.1. Konverterler, sürücüler 19
1.6.2. Transformatörler 20
1.6.3. Jeneratörler 21
1.6.4. Gaz deşarjı ile çalışan lambalar 22
1.6.5. Elektronik balastlar 22
1.6.6. Bilgisayar, yazıcı ve televizyonlar 23
1.7. Harmoniklerin Oluşturduğu Etkiler 24
1.7.1. Rezonans etkisi 25
1.7.2. Döner makineler üzerindeki etkisi 27
1.7.3. İletkenler üzerinde etkisi 28
1.7.4. Kondansatör üzerinde etkisi 30
1.7.5. Transformatörler üzerinde etkisi 30
1.7.6. Kesiciler, sigortalar üzerinde etkisi 30
1.7.7. Aydınlatma elemanları üzerinde etkisi 31
1.7.8. Elektronik elemanlar üzerinde etkisi 31

2. HARMONİKLERİ FİLTRELEME YÖNTEMLERİ 33
2.1. Harmonik Filtre Kavramı 33
2.2. Harmonik Filtrelerin İşlevleri 33
2.3. Pasif filtreler 34
2.3.1. Seri pasif filtreler 34
2.3.2. Paralel pasif filtre 35
2.4. Aktif Filtre 39
2.4.1. Seri aktif filtreler 40
2.4.2. Paralel aktif filtre 41
2.5. Filtre Tasarım Kriterleri 41

3. ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE HARMONİK ANALİZİ 43
3.1. Atıksu Arıtma Tesisinde Harmonik Kaynakları 43
3.1.1. Transformatörler 44
3.1.2. Jeneratörler 44
3.1.3. Gaz deşarjı ile çalışan lambalar 45
3.1.4. Elektronik balastlar 45
3.2. Harmoniklerin Atıksu Arıtma Tesislerindeki Ekipmanlara Etkileri 46
3.2.1. Harmoniklerin atıksu arıtma tesislerindeki rezonans etkisi 46
3.2.2. Atıksu arıtma tesislerindeki döner makineler üzerindeki etkisi 47
3.2.3. Atıksu arıtma tesislerindeki kondansatörler üzerindeki etkisi 47
3.2.4. Atıksu arıtma tesislerindeki transformatörler üzerindeki etkisi 48
3.2.5. Atıksu arıtma tesislerindeki kesiciler ve sigortalar üzerindeki etkisi 49
3.2.6. Atıksu arıtma tesislerindeki aydınlatma elemanları üzerindeki etkisi 50

4. GEBZE ATIKSU ARITMA TESİSİ'NDE HARMONİK ÖLÇÜMÜ VE FİLTRELEME ÖNERİLERİ 51
4.1. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi 51
4.2. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde Harmonik Ölçümü 52
4.2.1. Trafo-1 panosu harmonik ölçümü 55
4.2.2. Trafo-2 panosu harmonik ölçümü 60
4.2.3. MCC-2B panosu harmonik ölçümü 64
4.3. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi İçin Filtreleme Önerileri 66
4.3.1. Filtre tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar 67
4.3.2. Tek ayarlı filtre tasarımı 67
4.3.3. MCC-2B panosu için uygun paralel aktif filtre 71

SONUÇ VE ÖNERİLER 75

KAYNAKLAR 79
ÖZGEÇMİŞ 83

ÇİZELGELERİN LİSTESİ

Çizelge **Sayfa**

Çizelge 1.1. Sinüzoidal akımın 0°-360° arasındaki seyri 8

Çizelge 1.2. Temel bileşen ve harmonikler 10

Çizelge 1.3. IEEE STD 519-1922 standardına göre gerilimdeki bozulma sınırları..... 17

Çizelge 1.4. IEEE standardına göre akımdaki bozulma sınırları 18

Çizelge 1.5. Transformatörün mıknatıslanma akımının, sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımına oranı 21

Çizelge 3.1. Trafo gücüne göre atıksu arıtma tesislerindeki takribi şalt malzemesi adedi 49

Çizelge 3.2. Trafo gücüne göre atıksu arıtma tesislerindeki takribi gaz deşarjlı lamba adedi 50

Çizelge 4.1. Özel bir firmadan alınan pasif filtre teklifi 70

Çizelge 4.2. Aktif filtre teklifi..... 73

ŞEKİLLERİN LİSTESİ

Şekil **Sayfa**

Şekil 1.1. Dünya elektrik üretimi 4

Şekil 1.2. Temel bileşen - Harmonik - Bozulmuş gerilim/akım 6

Şekil 1.3. Alternatif akım dalga şekli 7

Şekil 1.4. Lineer ve nonlineer yüklerde akımın durumu 9

Şekil 1.5. Lineer elemanın uç karakteristiği 14

Şekil 1.6. Nonlineer elemanın olası uç karakteristikleri 14

Şekil 1.7. Bipolar anahtarlamada harmonik spektrum 20

Şekil 1.8. Histerisiz hariç trafo mıknatıslanması (a) mıknatıslanma; (b) akı ve mıknatıslanma akımı. 21

Şekil 1.9. Yarık kutup şekli sonucu oluşan dalga şekli 22

Şekil 1.10. Elektronik balast devresi 23

Şekil 1.11. (a) TV ünitesi tarafından yaratılan harmonik bozulma (b) PC-printer ikilisinin harmonik spektrumu. 24

Şekil 1.12. Seri rezonans devresi. 27

Şekil 1.13. n. Harmonik için indüksiyon motorunun tek fazının eş değer devresi. 28

Şekil 1.14. Akımın büyük çoğunluğunun aktığı ‘δ’ yüzeyi 29

Şekil 2.1. (a) Düşük Q tipi filtre ve (b) yüksek Q tipi filtre 34

Şekil 2.2. Seri pasif filtre devresi 35

Şekil 2.3. Paralel pasif filtre devresi 36

Şekil 2.4. (a) Tek ayarlı filtre devresi (b) ve empedans değişimi 37

Şekil 2.5. (a) Çift ayarlı filtre devresi ve (b) empedans değişimi 38

Şekil 2.6. (a) Birinci derece, (b) ikinci derece, (c) üçüncü derece, (d) C tipi sönümlü filtreler 38

Şekil 2.7. Sönümlü filtrede f-empedans ilişkisi 39

Şekil 2.8. Aktif harmonik filtresi çalışma prensibi 40

Şekil 2.9. (a) Paralel aktif filtre ve (b) seri aktif filtre prensibi 40

Şekil 2.10. Seri aktif filtre bağlantı şeması 41
Şekil 2.11 Paralel aktif filtre bağlantı şeması 41
Şekil 4.1. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi tek hat şeması 52
Şekil 4.2. Ölçüm esnasında reaktif güç sarfiyatının seyri 56
Şekil 4.3. Ölçüm esnasında akımın seyri 56
Şekil 4.4. 3., 5. ve 7. gerilim harmoniklerinin seyri 57
Şekil 4.5. Gerilim harmoniklerinin çubuk grafiği 58
Şekil 4.6. Akımdaki 3., 5. ve 7. harmoniklerin bozulma durumu 58
Şekil 4.7. Akımdaki toplam harmonik bozulma (TDD) 59
Şekil 4.8. Akım harmoniklerinin çubuk grafiği 59
Şekil 4.9. L2 fazında 5. harmonik 60
Şekil 4.10. Ölçüm esnasında TR-2 reaktif güç sarfiyatının seyri 61
Şekil 4.11. TR-2 gerilim harmonikleri 62
Şekil 4.12. TR-2 gerilim harmonikleri çubuk grafiği 62
Şekil 4.13. TR-2 akımdaki toplam ve tekil harmonik bozulmalar 63
Şekil 4.14. MCC-2B'de 3 fazın gerilimindeki bozulma 65
Şekil 4.15. MCC-2B'de 3 fazın akımlarındaki bozulma 65
Şekil 4.16. Akım harmoniklerinin faz-faz dağılımı 66
Şekil 4.17. L2 fazında akım harmonikleri 69
Şekil 4.18. MCC-2B Harmonik akım spektrumu 72

RESİMLERİN LİSTESİ

Resim **Sayfa**

Resim 3.1. İdeal bir kompanzasyon panosu (sol); Gebze A.A.T.'deki kompanzasyon panosu (sağ) 48

Resim 4.1. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde harmonik ölçümünün yapıldığı ölçüm aleti 53

Resim 4.2. Ana dağıtım panosu ile ölçü aletinin bağlantısı..... 54

Resim 4.3. Ölçüm öncesinde TR-1'in faz başına amperaj durumu 55

Resim 4.4. Ölçüm esnasında kompanzasyon durumu 61

Resim 4.5. Ölçüm esnasında MCC-2B analizörü 64

SİMGELER VE KISALTMALAR

Bu çalışmada kullanılmış simgeler, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur.

Simgeler	Açıklamalar
A_0	Sabit terimdir, elektrikte ortalama değerdir
A_1	Temel bileşendir, 50 Hz. frekanslı tam sinüzoidal dalgadır.
δ	Akımın aktığı yüzey
cm^2	Santimetrekare
f	Frekans (1/s)
f_p	Paralel rezonans frekansı
f_s	Seri rezonans frekansı
h	Harmonik
Hz	Hertz
I	Akım
I_{sc}	Ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımı
I_L	Maksimum talep yük akımı
I_n	Nominal akım
k	Tam katsayı
k	Kilo
kA	Kiloamper
kV	Kilovolt
kVA	Kilovolt amper
kVAr	Kilovolt amper reaktif
kW	Kilovat
kWh	Kilovat saat
mm	Milimetre
m_f	Modülasyon oranı
n	Harmoniğin mertebesi
p	Konverterin darbe adedi
Q	Kalite faktörü
R	Direnç
S	Görünür güç
t	Zaman değişkeni

V	Volt
$\mathbf{V_{Tepe}}$	Tepe gerilimi
$\mathbf{V_{Ort}}$	Ortalama gerilim
W	Vat
ω	Açısal frekans
$\mathbf{x_c}$	Kapasitif reaktans
$\mathbf{x_L}$	Endüktif reaktans
$\mathbf{Z_f}$	Filtrenin belli frekanstaki empedansı

Bu çalışmada kullanılmış kısaltmalar, açıklamaları ile birlikte aşağıda sunulmuştur

Kısaltmalar	**Açıklamalar**
AA	Alternatif Akım
AAT	Atıksu Arıtma Tesisi
AG	Alçak Gerilim
AGAT	Alçak Gerilim Dağıtım Panosu
Banka	İller Bankası Anonim Şirketi
C	Kapasitör
DD	Akımdaki Tekil Harmonik Bozulma
EMO	Elektrik Mühendisleri Odası
EN	Avrupa Standardı
IEC	Uluslararası Elektroteknik Komisyonu
IEEE STD	Elektrik ve Elektronik Mühendisleri Enstitüsü Standardı
EPDK	Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu
ETKB	Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı
Harm.	Harmonik
HD	Tekil Harmonik Bozulma
L	Endüktans
L1	Birinci Faz
L1	İkinci Faz
L1	Üçüncü Faz
LED	Işık Yayan Diyot
MCC	Motor Kontrol Panosu

PWM	Darbe Genişlik Modülasyonu
Sin	Sinüs
SPS	Anahtarlamalı Güç Kaynağı
TDD	Toplam Talep Bozulma
THD	Toplam Harmonik Bozulma
TEF	Telefon Etkileşim Faktörü
TEİAŞ	Türkiye Elektrik İletim Anonim Şirketi
TR1	Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Birinci Trafosu
TR2	Gebze Atıksu Arıtma Tesisi İkinci Trafosu
TL	Türk Lirası
Trafo	Transformatör
TRAG	Trafo Alçak Gerilim Panosu
UPS	Kesintisiz Güç Kaynağı

GİRİŞ

Gün geçtikçe artan enerji ihtiyacı, en pratik ve yaygın enerji çeşidi olan elektrik enerjisine dönük talebi de hızla artırmaktadır. Modern yaşamın en temel sonucu olan elektrik enerjisi tüketimi, ülkelerin gelişmişlik seviyelerinin de bir göstergesi olmuştur. Bununla beraber, enerji kaynakları günbegün azalmaktayken enerjiye olan talep de artmaktadır. Hâl böyle olunca, elektrik enerjisinde 'güç kalitesi' terimi sıkça telaffuz edilir hale gelmiştir. Kaynakların idareli kullanılmasının yanı sıra, bahsi geçen enerjinin de kayıplara yol açmayacak şekilde kaliteli ve sürekli olması oldukça önemli hale gelmiştir.

Şebekeden çekilen yükün bir süreklilik arz etmesinin yanında, sabit gerilimde ve sabit frekansta, tam sinüs formunda olması istenir. Kaynağın bozulmamış ve yükün tamamen lineer (doğrusal) olduğu bir elektrik sistemi, günümüzde artık mümkün görülmemektedir. Gelişen yarı iletken teknolojisi ile son yıllarda artan nonlineer (doğrusal olmayan) yükler, akım-gerilim karakteristiği doğrusal olmayan yüklerdir. Bu yükler elektrik sistemlerinde güç kalitesinin temel problemlerinden olan harmoniklere sebep olurlar. Temel şebeke frekansı dışındaki diğer sinüs formdaki akımlara harmonik denir (Yalçın, 2004). Harmonikler, nonlineer bir yüke lineer bir kaynak uygulanması ile meydana geldiği gibi; lineer bir yük de sistemdeki bozulmadan dolayı harmoniğe maruz kalabilir.

Sistemde meydana gelen harmonikler; alternatif akımın temel dalga şeklini bozar, nonsinüsoidal bir elektrik akımı ve gerilimi oluşmasına sebebiyet verir. Bu bozulma tesislerde kayıplara, ölçü aletlerinde sapmalara ve nonsinüsoidal elektrik ile beslenen elektrik ekipmanlarında arızalara sebebiyet verir (Electrotech Aylık Dergisi, 2016). Elektrik ekipmanlarının tasarımında, harmonik üretmemesi son zamanlarda bir kıstas olmaya başlasa da; harmoniğe sebep olan yarı iletken, transformatör, kesintisiz güç kaynağı, jeneratör vb. ekipmanların kullanılması kaçınılmaz olduğundan, harmonik konusundaki çalışmalar, harmoniklerin giderilmesi üzerine yoğunlaşmıştır. Bu gelişmeler ülkeleri ve standardizasyon kuruluşlarını, harmonikleri sınırlama yoluna itmiştir.

Harmonikler, elektrik sistemine entegre edilen filtreler yardımı ile süzülerek, toplam harmonik bozulma düşürülmeye çalışılır. Günümüzde, basit pasif filtrelerden aktif

filtrelere kadar çok çeşitli çözüm yöntemleri geliştirilmiştir. Bu yöntemlerin her birinin kendine has avantaj ve dezavantajları vardır. İlbank A.Ş.'nin yapımına müdahil olduğu tesislerin, özellikle de atıksu arıtma tesislerinin, yük karakteristikleri sebebiyle, harmonik üreten ve harmonikten etkilenen bir konumda olduğu düşünülebilir. Atıksu arıtma tesisi karakteristiğindeki bir sistemin, harmonik bozulma seviyesinin ve uygulanabilecek filtreleme sistemlerinin belirlenmesi oldukça önem arz etmektedir. Bu sebeple inşa edilmiş örnek bir tesisin, harmonik ölçümünün yapılmasının ve harmonik spektrumunun ortaya serilip uygun önlemlerin belirlenmesinin, İlbank A.Ş.'nin ileride yapacağı tesisler için oldukça faydalı olacağı düşünülmektedir.

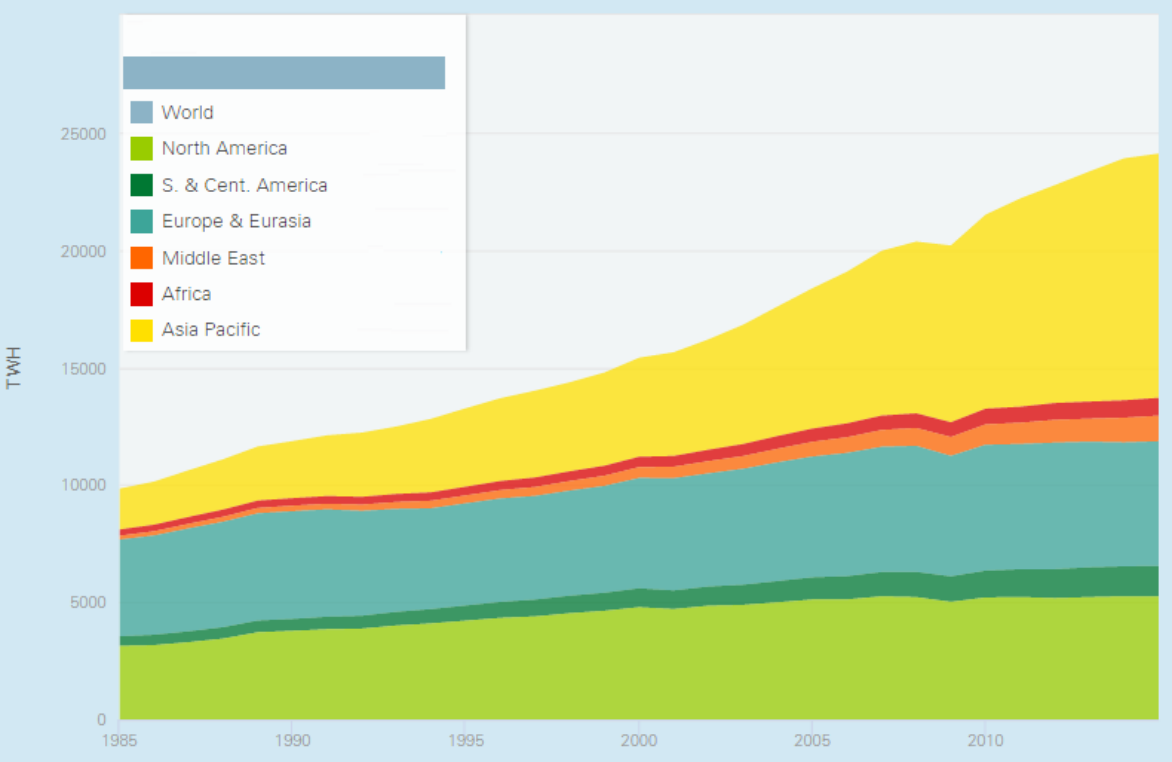
Bu tez kapsamında, Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde yapılan harmonik ölçümler ışığında, atıksu arıtma tesisi ekipmanları ve harmonikten etkilenebilecek kısımlar, bir atıksu arıtma tesisi özelinde incelenecektir. Filtreleme yöntemleri irdelenerek ölçülen harmoniğe göre ideal filtre belirlenecektir. İlbank A.Ş. tarafından yapılan atıksu arıtma tesisleri ve benzer yük karakteristiğindeki tesislerin, harmonik kaynaklı kayıplarını ve arızalarını azaltmaya yönelik önlemler, hem ihale öncesi hem de yapım aşamaları açısından tespit edilerek, öneriler sunulacaktır.

1. ELEKTRİK SİSTEMLERİNDE GÜÇ KALİTESİ VE HARMONİKLER

Elektrik, cismin yüklü parçacıklarının hareket etmesi ile meydana gelen enerji türüdür. 19. yüzyılın son çeyreği itibari ile kullanımına başlanan elektrik enerjisi, pratikliği ve diğer enerji çeşitlerine evirme metotlarının gelişmesi ile kısa zamanda yaygın bir enerji çeşidi olmuştur. Gelişen teknoloji ile birlikte, elektrik enerjisinin iletimi ve dağıtımı kolaylaşmış, hanelerde dahi ısı enerjisi, mekanik enerji ve diğer enerji türlerine dönüştürülmesi, elektrikli aygıtlar ile çok basit bir hal almıştır.

Elektrik enerjisinin giderek pratikleşmesi ile kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi artmış, dolayısı ile de elektrik enerjisi üretimi, Şekil 1.1'de görüldüğü gibi hızla yükselerek, 1985-2015 yılları arasında yaklaşık 2,5 katına çıkmıştır (BP, 2016). Günümüz dünyasında kişi başına düşen elektrik enerjisi tüketimi ülkelerin gelişmişlik seviyelerinin de bir göstergesi olarak kabul edilmiştir. Ülkemizde kişi başına düşen yıllık elektrik tüketimi 2010 yılında 2498 kWh iken 2012 yılında %12 artışla 2794 kWh'ye çıkmıştır. Aynı değer; 2015 yılında Norveç için 23 658 kWh iken İzlanda için 53 203 kWh'dir (Wikipedia, 2016). 2003-2014 yılları arasında Türkiye'nin birincil enerji[1] talebi %4,12 artmıştır. Türkiye'nin elektrik enerjisi brüt tüketimi, 2013 yılı sonu itibariyle 248,3 milyar kWh, 2014 yılının sonunda ise 257,2 milyar kWh olarak belirtilmiştir (Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı [ETBK], 2016).

[1] Herhangi bir dönüşüme uğramamış enerji, birincil enerji olarak adlandırılır.



Şekil 1.1. Dünya elektrik üretimi (BP, 2016)

Birincil enerji talebinde doğal gazın payı %32,5; kömürün oranı %29,2; petrolün oranı %28,5; hidrolik enerjinin payı %2,8; hidrolik hariç yenilenebilir enerji kaynaklarının oranı ise %6,7 ve diğer kaynakların oranı %0,3'tür (ETBK, 2016). Fosil yakıtların elektrik enerjisine dönüştürülmesi işlemi, çevre kirliliği oluşturmakta ve sebep olduğu sera etkisi ile gezegenimizin ikliminde değişikliklere yol açmaktadır. Fosil kaynaklı yakıtların giderek azalması, elektrik tüketiminin hızla artması, elektrik fiyatlarına artış olarak yansımakla birlikte bahsedilen enerjinin kullanımında çok daha itinalı olmamız gerekliliğini ortaya çıkarmıştır.

Tüketiciler açısından, temiz ve kaliteli bir elektrik enerjisi temin etmek ve bu enerjiyi, kayıpları en aza indirgemiş şekilde kullanmak yegâne amaç haline gelmiştir. Hal böyle olunca elektrik sistemlerindeki harmonikler ve güç kalitesi gibi terimler daha sık telaffuz edilir olmuştur. Günümüzde artık teknoloji, güç kalitesi ve harmonik gibi elektriksel verilerin iyileştirilmesi doğrultusunda ilerlemektedir.

1.1. Güç Kalitesi

Elektrik enerjisi üreten ve kullanıcıya ileten kurumların amacı, bu hayati enerjiyi kesintisiz, ekonomik ve kaliteli olarak tüketiciye ulaştırmaktır. Bir elektrik sisteminde güç kalitesinin yüksek olması isteniyorsa, bu sistemdeki elektrik gerilimi, sabit sinüzoidal biçimli, sabit frekansta ve sabit genlikli olmalıdır.

Tüketiciye istenen kalitede elektrik enerjisi ulaştırılması için bu alanda çeşitli standardizasyonlara gidilmiştir. Elektrikte güç kalitesini konu alan bazı önemli standartlara aşağıda değinilmiştir.

- EN 50 006: Elektrik şebekesinde, elektronik aygıtlar ile donatılmış cihazlardan kaynaklanan bozulmayı konu alır.
- IEC 100-3-2: Elektrik sistemlerinde alçak gerilimde dalgalanma sınırları ve gerilim frekansındaki periyodik artma ve azalmayı sınırlar.
- IEC 61000-2-4: Endüstriyel tesisler için toplam harmonik bozulma sınırını belirler.
- IEEE STD 519-1992: Güç sistemlerindeki harmonik sınırlarını konu alır (Uçar, 2012: 3).

Bahsettiğimiz bu standartlardan IEE STD 519-1992'nin belirlediği gerilimdeki bozulma sınırı atıksu arıtma tesisi gibi bir tesiste %5 olmaktadır. Akımdaki sınırlama ise tesisin karakteristiğine göre değişmektedir. Bu değerlerin detaylı tanımı ve analizi, harmonikler başlığı altında yapılacaktır.

1.1.1. Güç kalitesini etkileyen faktörler

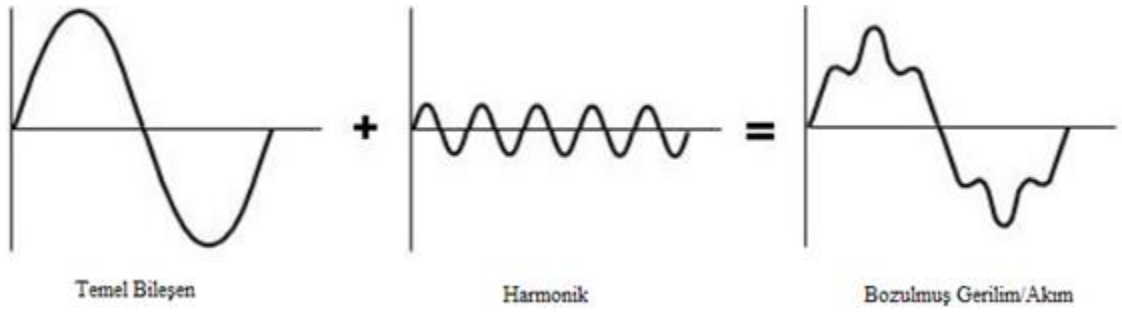
Elektrik enerjisinde kalite, gerilimin ve frekansın anma değerinin periyotta belirlenen bir nokta için sabit kalması ve sinüzoidal biçimini koruması durumudur. Gerilim ve akımın genliğinin değişmesi, gerilim ve akımda kesinti yaşanması, darbe ve çökme, sinüzoidalden uzaklaşma, üç faz arasındaki dengesizlikler bu kaliteyi olumsuz etkileyen faktörlerdir.

Ayrıca gerilim akım karakteristikleri lineer olmayan yükler şebekeden sinüzoidal olmayan akım çektiğinden, elektrik enerjisinin istenen biçimden uzaklaşmasına, şebeke geriliminin bozulmasına yol açar (Kaşıkçı, 2008: 171).

1.1.2. Güç kalitesindeki bozulmalar

Elektrik enerjisi kayıplarına, aygıtların arızalanmasına sebebiyet veren bozulmaların başlıcaları aşağıda belirtilmiştir.

- Kesinti: Şebekeden kaynaklanan bu bozulma, yarım dalgadan daha uzun bir süre gerilimin olmaması durumudur.
- Gerilim darbesi: Gerilimdeki ani artıştır, yük veya şebeke açma kapamalarında kontaklar arasındaki arktan ve yıldırımdan kaynaklanır.
- Harmonikler: Elektrik enerjisi dalga biçiminin, doğal şekli olan sinüs formundan uzaklaşmasıdır. Ark ilkesi ile çalışan aygıtlar, güç elektroniği devreleri ve doyuma ulaşmış elektro-mekanik aygıtlar başlıca sebeplerindendir. Elektrik sistemlerinde ciddi hasarlara ve arızalara yol açar.



Şekil 1.2. Temel bileşen - Harmonik - Bozulmuş gerilim/akım (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

- Fliker: Gerilimin frekansının 8-10 Hz. azalması ya da artması durumudur, elektro-mekanik aygıtlarda, frekans eviricilerde, bazı lamba çeşitlerinde arızalara yol açar.
- Elektromanyetik Girişim: Bu girişim olayı elektromanyetik dalganın istenen alıcıya ulaşmasını engellediği gibi, başka elektrikli aygıtlarda istenmeyen akım indüklenmelerine yol açar.

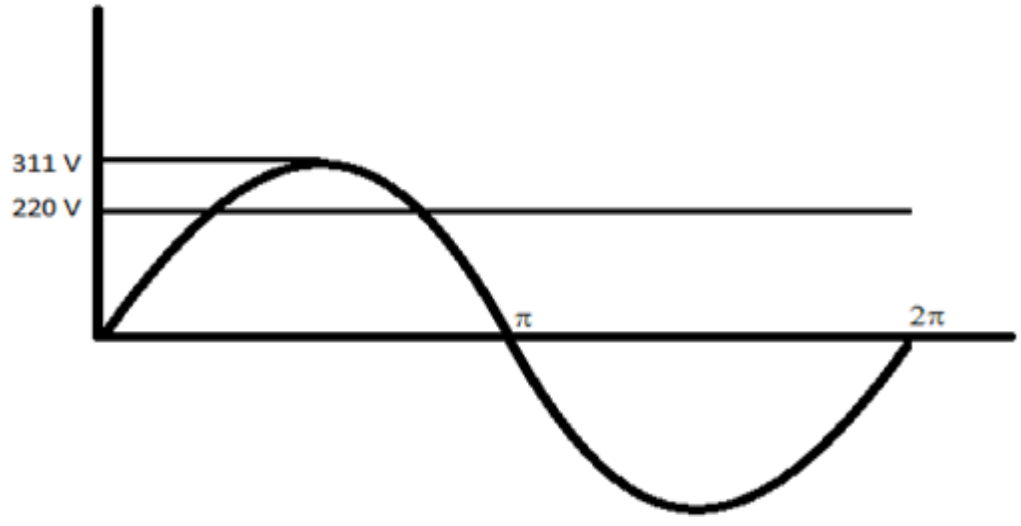
- Elektriksel Gürültü: Elektronikte iletilmek istenen sinyale karışan, istenmeyen sinyalleri ifade eder (İlaslaner, 2006: 5-7).

Bu bozulmalar dışında; gerilim yükselmesi, gerilim düşmesi, doğru gerilim bileşeni, çentik gibi bozulmalar da elektrik sistemlerinde görülebilir.

Bahsi geçen bozulma çeşitlerinin, en tehlikelilerinden biri olan harmonikler, yarı iletken teknolojisinin gelişmesinin de etkisi ile üzerinde en fazla durulan bozulma çeşitlerinden biri olmuştur. Bu çalışmada, harmoniklerin sebepleri, etkileri ve önleme yöntemleri üzerinde detaylıca durulacak; Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde yapılan ölçümler sonucu, harmonik bozulma atıksu arıtma tesisi bazında değerlendirilecektir.

1.1.3. Sinüzoidal ve nonsinüzoidal dalga biçimi

Yönü ve genliği periyodik bir şekilde değişen akıma alternatif akım denir ve AC olarak gösterilir. Ülkemizde elektrik enerjisi AC olarak kullanıcıya ulaştırılır. AC akım birçok formda üretilip dağıtılabilir fakat en yaygın olanı ve ülkemizde kullanılanı sinüs dalga biçimli alternatif akımdır. Sinüs dalga biçimindeki alternatif akım diğer dalga biçimlerine kondansatör, diyot, röle gibi elektrik devre elemanları ile dönüştürülebilir. Lineer bir yük şebekeden düzgün sinüzoidal bir akım çeker. Ülkemizde bu elektrik enerjisinin frekansı 50 Hz.'dir. Tüketiciye sunulmaya çalışılan, ideal elektrik Şekil 1.3'de gösterildiği gibidir:



Şekil 1.3. Alternatif akım dalga şekli (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

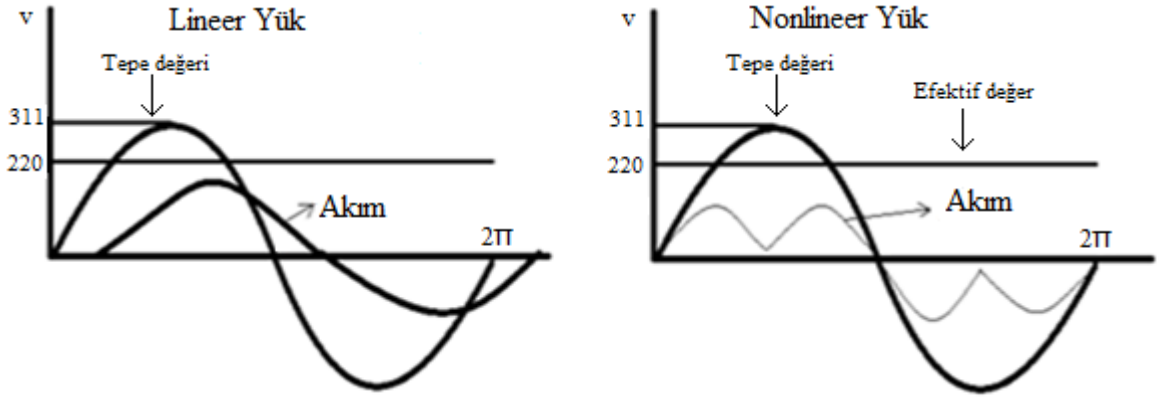
Sinüzoidal dalga formundaki akımın 0°-360° arsındaki seyri Çizelge 1.1'de verilmiştir.

Çizelge 1.1. Sinüzoidal akımın 0°-360° arasındaki seyri (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Açı (°)	Sin (açı)	Dalga alternansı	Açı (°)	Sin (açı)	Dalga alternansı
0	0.0000	(sıfır)	180	0.0000	(sıfır)
15	0.2588	+	195	-0.2588	-
30	0.5000	+	210	-0.5000	-
45	0.7071	+	225	-0.7071	-
60	0.8660	+	240	-0.8660	-
75	0.9659	+	255	-0.9659	-
90	1.0000	(Pozitif tepe)	270	-1.0000	(Negatif tepe)
105	0.9659	+	285	-0.9659	-
120	0.8660	+	300	-0.8660	-
135	0.7071	+	315	-0.7071	-
150	0.5000	+	330	-0.5000	-
165	0.2588	+	345	-0.2588	-
180	0.0000	(sıfır)	360	0.0000	(sıfır)

Alternatif akıma uygun üretilmiş elektrikli aygıtların uzun ömürlü olması ve istenilen şekilde çalışması için, aygıta uygulanan alternatif gerilimin sinüs formunda olması gerekir; bu da gerilim değerinin, değişen açıya göre yukarıda belirtilen değerlerde olması demektir. Çizelgede yer verilen sinüs değeri, $V(t)= V_{tepe} \cdot \sin(\omega t)$ olarak verilen alternatif gerilim eşitliğindeki 'sin(ωt)', yani gerilimin tepe noktasının katsayısıdır.

Yük lineer olduğunda akım da Şekil 1.4'teki V-t grafiğine paralel seyir izler; fakat nonlineer yükte bu seyir bozularak sistemdeki akımın nonsinüzoidal olmasına sebep olur ve Şekil 1.4'tekine benzer bir durum ortaya çıkarır. Bu dalga şekli şebekede bozulmalara yol açarak, istenmeyen durumlara sebebiyet verir.



Şekil 1.4. Lineer ve nonlineer yüklerde akımın durumu (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Sinüzoidal olmayan gerilim beslemeleri; kayıplara, arızalara, şalt aletlerinin gereksiz açmasına sebebiyet verirler. Dalga formu bozulmuş ve arızalara yol açan besleme geriliminin nedeni sistemde bulunan harmoniklerdir.

1.2. Harmoniğin Tanımı

Daha önce Sinüzoidal ve nonsinüzoidal dalga biçimi başlığı altında bahsettiğimiz 50 Hz. frekanslı sinüzoidal dalga, elektrik sistemlerinde temel bileşen olarak kabul edilir. Yüklerin şebekeden çektiği akım, bu temel bileşen ve frekans ile genliği değişik diğer dalgaların toplamından ibarettir. Burada temel dalga haricindeki diğer sinüzoidal dalgaların her birine harmonik adı verilir. Harmonikler temel dalga bileşeni frekansının katları şeklinde frekanslara sahiptirler. Ülkemizde temel dalganın frekansı 50 Hz. olduğu için, harmoniklerin frekansı 50 Hz., 100 Hz., 150 Hz., 200 Hz. olarak artmaktadır.

Çizelge 1.2'de ülkemizdeki 50 Hz.'lik şebekede karşılaşılabilecek harmonikler (9. dereceye kadar) ve frekansları gösterilmektedir.

Çizelge 1.2. Temel bileşen ve harmonikler (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Bileşen	Frekans (Hz.)
Temel (1. Derece)	50
2. derece harmonik	100
3. derece harmonik	150
4. derece harmonik	200
5. derece harmonik	250
6. derece harmonik	300
7. derece harmonik	350
8. derece harmonik	400
9. derece harmonik	450

Alternatif akımda demir çekirdekli bobinler kullanılmaya başlandığından beri, elektrik sistemlerinde harmonik bozulma da kendini göstermiştir. İlk karşılaşılan harmonik bozulmalar, elektrik motorları ve transformatörlerde manyetik doyuma ulaşma durumunda açığa çıkan üçüncü derece harmonik sebebi ile oluşmuştur (Kocatepe, Uzunoğlu, Yumurtacı, Karakaş ve Arıkan, 2003: 8-1). Daha sonraları ark prensibi ile çalışan aygıtlar ve deşarj lambalarının kullanımının yaygınlaşması, elektrik sistemlerindeki toplam harmonik bozulmayı artırmıştır. Son olarak güç elektroniği devrelerinin kullanımına başlanması ile harmoniklerde trajik bir artış olmuştur.

Doğrusal olmayan gerilimin yüke uygulanması veya doğrusal gerilimin, doğrusal olmayan yüke uygulanması ile açığa çıkan harmoniklerin analizi için kullanılan başlıca yöntem, bahsedilen bileşke dalgayı Fourier serisine açmaktır.

> "Fourier serilerinin teorisi ilk olarak, Fransız fizikçi ve matematikçi Joseph Fourier tarafından 1882'de yayınlanan 'Analytic Theory of Heat' isimli makalesinde tanıtılmıştır. Teori, trigonometrik serilerin belirli tiplerinde rastgele fonksiyonların belirli tiplerini içermektedir. Temel frekans bileşeni ve bu temel frekansın tam katlarından oluşan harmonik bileşenlerinin toplamını, bir zaman aralığında herhangi bir periyodik fonksiyon olarak ifade edebilmek, bu teori ile mümkün olmaktadır" (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 2-1).

1.2.1. Harmoniklerin fourier serisi ile ifade edilmesi

Periyodu olan bir fonksiyon, sonsuz sayıda kosinüs ve sinüs fonksiyonun bileşkesi olarak ifade edilebilir. Temel bileşen dışındaki her bir bileşenin frekansı, temel bileşenin tam katıdır. Bir f(t) fonksiyonu; sonlu sayıda süreksizlik içeriyor ise, sonlu sayıda tepe

noktaları varsa ve ortalaması sonlu bir değer ise Eş. 1.1'deki gibi Fourier serisine açılabilmektedir (Sucu, 2003: 2).

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos t +$$
$$A_2 \cos_2 t\, A_3 \cos_3 t + \ldots + A_n \cos_n t + B_1 \sin t + B_2 \sin_2 t + B_3 \sin_3 t + \ldots + B_n \sin_n t \quad (1.1)$$

Kısaca:

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nt + B_n \sin nt) \quad (1.2)$$

Denklemlerde kullanılan kısaltmalar şöyledir:

t: Bağımsız değişken (Elektrikte ωt olmaktadır.)

A_0: sabit terimdir elektrikte ortalama değerdir.

A_1: Temel bileşendir, 50 Hz. frekanslı tam sinüzoidal dalgadır. 2, 3, 4,..., *n* indisleri ile belirtilen bileşenler ise harmoniklerdir.

n : 1, 2, 3,...,n (pozitif tam sayı) harmoniklerin mertebeleridir.

Elektrik sistemlerinde t'yi ωt olarak gösterir isek harmonik içeren bir alternatif akımın gösterimi Eş. 1.3'teki gibi olur:

$$f(\omega t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos n\omega t + B_n \sin n\omega t) \quad (1.3)$$

1.3. Harmonikler ile İlgili Terimler

Bu çalışmada üzerinde durulacak olan; harmoniklerin sebepleri, analizi, ölçümü ve etkilerini giderme yöntemlerine geçmeden evvel, harmonikler ile alakalı önemli terimlerin bilinmesi gereklidir.

1.3.1. Toplam harmonik bozulma

Harmonik sınırlama standartlarında adı sıkça geçen bu kavram; harmonikli bir akımın ya da gerilimin harmonik bileşenlerinin etkin değerlerinin toplamının, temel bileşenin etkin değerine oranıdır (Özcan, 2006: 20). İngilizce ismi olan 'total harmonic

distortion' kelimelerinin baş harfleri ile kısaca 'THD' olarak ifade edilir. Gerilimdeki toplam harmonik bozulma aşağıdaki gibi ifade edilir:

$$THD_v = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nt + B_n \sin nt) \quad (1.4)$$

Aynı şekilde Eş. 1.5'te verilen akımdaki toplam harmonik distorsiyon da harmonik dalgaların etkin değerlerinin toplamının, temel bileşenin etkin değerine oranıdır (Özcan, 2006: 20).

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} (In)^2}}{I_1} \quad (1.5)$$

Toplam harmonik bozulma değeri, harmoniklere sınırlama getiren standartlarda ve harmonik analizlerinde en çok kullanılan terimdir. İşletmelere getirilen harmonik sınırlamaların başlıcası bu değer üzerinden yapılmaktadır. Harmonik sınırlamalarına konu olan bir diğer önemli terim ise toplam talep distorsiyonudur.

1.3.2. Toplam talep distorsiyonu

İngilizce ismi olan 'total demand distortion' tamlamasının baş harfleri 'TDD' ile gösterilen toplam talep distorsiyonu, eşitlikten de anlaşılacağı üzere; akım harmoniklerinin etkin değerleri ile I_L arasındaki bir orandır. Burada I_L, besleme şebekesi ile olan ortak bağlantı noktasından çekilen temel frekanslı maksimum akımdır (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 3-4).

$$TDD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (1.6)$$

1.3.3. Şekil faktörü

Şekil faktörü k_1 olarak gösterilir ve harmonikli bir dalga için, efektif değerinin ortalama değerine oranı olarak tanımlanır (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 3-5). Burada ortalama değer hesaplanırken negatif alternans da pozitif kabul edilir.

V_{ort} =0,636 * V_{maks} eşitliğinden şebeke geriliminin ortalama değeri 197,87 V olarak bulunur. Yukarıda verdiğimiz k_1 bağıntısına göre sinüzoidal bir dalganın şekil faktörü, 1,11 olarak bulunur.

1.3.4. Tepe faktörü

Sinüzoidal olmayan akım veya gerilimin, maksimum değeri ile ana bileşeninin etkin değerine olan oranıdır. Sinüzoidal elektrik dalgasında tepe faktörü $\sqrt{2}$'dir.

1.3.5. Telefon etkileşim faktörü

TDD ve THD terimlerinden sonra özellikle telekomünikasyon alanında en sık kullanılan harmonikle alakalı terim telefon etkileşim faktörüdür.

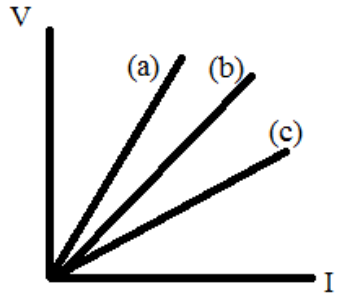
> "Telefon etkileşim faktörü, elektrik sistemlerindeki, harmonik akım ve gerilimden kaynaklanan telefon gürültü değerinin tayin edilmesine yarayan bir büyüklüktür…. Söz konusu bu büyüklük gerilim ve akım için matematiksel olarak;
>
> $$TEF_V \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty}(w_n V_n)^2}}{V_{ef}} \text{ ve } TEF_I \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty}(w_n I_n)^2}}{I_{ef}} \quad (1.7)$$
>
> Bağıntıları ile hesaplanır. Burada w_n, n'inci mertebeden harmonik frekansı için işitsel ve endüktif kuplaj etkisini hesaplara dahil eden bir katsayıdır" (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 3-5).

1.3.6. Transformatör k-faktörü

Transformatörler nonlineer yükleri beslediğinde üzerinden nonsinüzoidal akım akar. k-faktörü, bu harmonikli durum hasıl olduğu zaman, transformatörün standart yüklenme kapasitesindeki düşüşü hesaplamada kullanılan bir katsayıdır (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 3-6).

1.4. Nonlineer Elemanlar

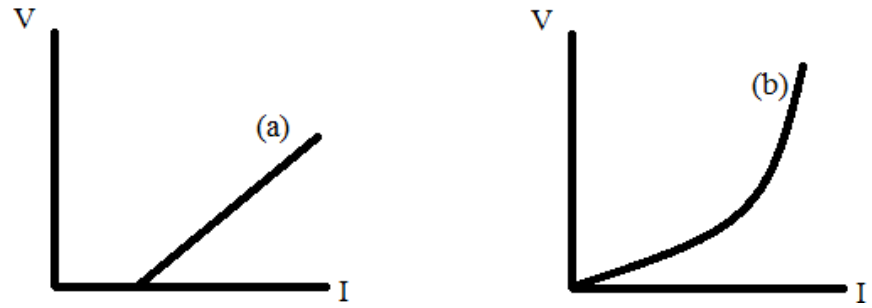
Lineer karakterdeki elemanlar, sinüzoidal bir kaynağa bağlandıklarında harmonik meydana getirmezler. Bu elemanların akım-gerilim ilişkisi yani uç karakteristiği Şekil 1.5'tekine benzer şekilde doğrusaldır.



Şekil 1.5. Lineer elemanın uç karakteristiği (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Pratikte bu tip devrelerden ziyade daha çok nonlineer elemanlı devreler ile karşılaşırız. Bu elemanların uç karakteristikleri doğrusal değildir ve bunlara sinüzoidal bir gerilim uygulandığında harmonikler meydana gelir.

Bu tip elemanlara uygulanan gerilimde, V değerindeki her değişim, I değerinde aynı değişimi oluşturmaz. Dolayısıyla nonlineer eleman, uç karakteristiği ohm kanununu gerçeklemeyen eleman olarak da tanımlanabilir. V/I karakteristiği Şekil 1.6'dakine benzer.



Şekil 1.6. Nonlineer elemanın olası uç karakteristikleri (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Elektrik sistemlerinde karşımıza çıkan başlıca nonlineer elemanları şu şekilde sıralayabiliriz:

- Transformatörler,
- Gaz deşarj lambalar (floresan, neon, xenon vb.),
- Elektronik balastlar,
- Ark fırınları,
- Konverterler, Frekans dönüştürücüler,
- Tristör anahtarlamalı güç kaynakları,

- TV, bilgisayarlar,
- Statik VAr kompanzatörleri,
- UPS'ler (Kesintisiz güç kaynağı),
- Işık dimmerleri,
- Kaynak makineleri,
- Fotovoltaik sistemler (Efe, 2006: 13-17).

Genel olarak demir çekirdekli bobinler ve yarı iletken elemanlar nonlineer elemanlar olarak sayılabilir (Grady, 2016: 4-1).

Bu elemanlar dışında günümüzde oldukça yaygın kullanım alanına sahip olan termistörler de harmonik üreten nonlineer elemanlar arasındandır. Sıcaklık ile direnci değişen termistör, uygulanan gerilim sonucu yapısı gereği üzerinden lineer olmayan bir akım geçirdiği için nonlineer bir elemandır.

Besleme kaynağından bağımsız olarak bahsi geçen lineer olmama durumunu; magnetik lineersizlik ve elektriksel lineersizlik olarak ikiye ayırabiliriz.

1.4.1. Magnetik lineersizlik

Magnetik bir devrede akı, belli bir süre akım ile birlikte artış gösterir fakat aralarında doğrusal bir bağıntı yoktur. Magnetik devre doyuma ulaştıktan sonra akım ne kadar artırılırsa artırılsın akıda çok fazla değişim olmaz. Bu lineersizlik harmonik oluşumuna sebebiyet verir. Başka bir deyişle; demir çekirdekli bir elemanda magnetik doyma olayı, devrede nonsinüzoidal büyüklükleri meydana getirir. Bundan ötürüdür ki bu tip elemanlar doyma bölgesinden uzak çalıştırılmalıdır.

1.4.2. Elektriksel lineersizlik

Bir devrede akım ile gerilim aynı oranda değişmiyor ise bu devrede elektriksel lineersizlikten bahsedilir. Bu durum da magnetik lineersizlikte olduğu gibi harmonik oluşturmaktadır.

Pratikte mevcut elektrik sistemlerimizi göz önüne alacak olursak, harmonik içermeyen bir sistemden bahsetmek ya da bu sistem üzerine yapacağımız analizlerimizde harmoniği hesaba katmamak gerçek dışı olur. Bilindiği gibi sadece sinüzoidal beslemeli lineer yüklü bir sistemde harmonik görülmez bunun dışında özetleyecek olursa aşağıdaki durumların her birinde harmonikler açığa çıkar:

- Sinüzoidal bir gerilim kaynağına sahip, nonlineer yük bulunan bir elektrik sisteminde harmonik oluşur. Burada bahsi geçen harmonik, yükün karakteristiğinden dolayı akımda görülür. Bu özelliklerdeki devrede gerilimde harmonik görülmez (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 4-10).
- Nonsinüzoidal gerilim kaynaklı ve lineer yüke sahip bir devrede hem gerilimde hem de akımda harmonik bulunur. Akım ve gerilim harmonikleri aynı mertebedendir.
- Nonsinüzoidal kaynaklı ve nonsinüzoidal yüklü bir devrede hem akımda hem de gerilimde harmonikler görülür. Burada bahsi geçen akım harmonikleri ve gerilim harmonikleri aynı mertebeden olduğu gibi; farklı mertebelerden de olabilir.

1.5. Harmonik Standartları

Harmoniklerin sistemlere olan zararları ülkeleri ve bazı standardizasyon kuruluşlarını, harmoniklere bir sınır belirleme yoluna itmiştir. Harmonik sınırları belirlenirken kullanılan 3 temel kavram; toplam harmonik bozulma, toplam talep bozulma ve tekil harmonik bozulmadır.

Harmonik sıralamasında iki ayrı metot kullanılır. Bunlardan ilki; International Electrotechnic Comission (IEC) tarafından uygulanan yöntemdir ki tek tek her bir yükün harmoniğinin sınırlandırılmasını öngörür. İkinci yöntem ise IEEE tarafından benimsenir ve birden çok yükün enerjilendiği noktada sınırlamalar belirlemiştir. Uygulamada IEEE'nin yöntemi kabul görmüştür (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 12-4).

IEEE 519-1992 numaralı standart ve IEC 1000-3-2 standardı, yükler tarafından üretilen harmoniklere yapılması gereken sınırlamaları belirler. Ayrıca bazı ülkeler de toplam harmonik bozulma için kendi sınırlarını belirlemiştir. İsveç'te bu sınır 250 volt için

%4 iken İngiltere'de yine alçak gerilimde bu sınır %5'tir. Fransa'da ise tüm gerilimler için bu sınır %1,6 olarak belirlenmiştir (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 12-7).

Toplam harmonik bozulmayla alakalı olan IEEE STD 519-1922 standardı, akımdaki toplam bozulma ve gerilimdeki toplam bozulma için ayrı sınırlar belirlemiştir.

Çizelge 1.3. IEEE STD 519-1922 standardına göre gerilimdeki bozulma sınırları (Akmaz, 2012: 19)

Ortak bağlantı noktasındaki gerilim (V)	Gerilimdeki Bozulma (bireysel) (%)	Toplam gerilim bozulması (%)
69 kV ve altı	3.0	5.0
69 kV – 161 kV	1.5	2.5
161 kV üstü	1.0	1.5

Çizelge 1.3'te de görüldüğü üzere dağıtım sistemlerinde gerilimdeki bozulmaya sınırlama getirilmiştir. Bu sınır, ortak bağlantı noktasındaki gerilime göre değişmektedir. Tezin konusu olan atıksu arıtma tesislerindeki harmonik bozulmanın gerilim sınırı 69 kV ve altı gerilimler için belirlenmiş olandır. Bu çalışmada harmonik ölçümü yapılan atıksu arıtma tesisi için gerilimdeki toplam harmonik bozulma sınırı %5 olarak düşünülmüştür.

Gerilim için getirilen bu sınırlama, elektrik sistemindeki akım değeri için de ayrı olarak belirlenmiştir. Çizelge 1.4'e göre akımdaki toplam bozulmaya getirilen sınırlama, tesisin I_{SC}/I_L oranına göre değişkenlik göstermektedir. Tesisin teknik ekibinin verdiği bilgiye göre bu değer Gebze Atıksu Arıtma Tesisi için 20'den küçüktür. Ölçüm çalışması esnasında tesisin teknik ekibi tek hat şemasını ve ilgili ölçüm değerlerini göstermekten imtina etmiştir. I_{SC}, tesisin ortak bağlantı noktasındaki maksimum kısa devre akımıdır. Bu kısa devre akımı üç fazın da dikkate alındığı kısa devre akımıdır. Diğer bileşen olan I_L ise maksimum talep yük akımıdır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta, bahsedilen maksimum akımın, ani bir tepe akımından ziyade, hesaplanan maksimum talep akımı olduğudur. İşletmeler bu değerleri kendileri ölçebileceği gibi, ilgili dağıtım şirketinden de yardım alabilirler. Tesislerin ortak bağlantı noktaları yüksek gerilim altında olduğu için, daha güvenli olması adına, dağıtım şirketinden yardım almak daha pratik olacaktır.

Çizelge 1.4. IEEE standardına göre akımdaki bozulma sınırları (Grady, 2012: 7-2)

Akımdaki Harmonik Bozulma Sınırları						
Tekil Harmonik Bozulma						
I_{SC}/I_L	<11	11≤h<17	17≤h<23	23≤h<35	35≤h	TDD_I
<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

Görüldüğü gibi bir tesisin akımdaki toplam harmonik bozulma sınırı, I_{SC}/I_L oranına bağlıdır. Bu iki değer her tesis için farklı olacağından, bu tesislere uygulanacak olan toplam akım bozulması sınırlaması da farklı olacaktır.

1.6. Harmonik Kaynakları

Elektrik sistemlerinde harmonik üreten elemanlar genel manada şu şekildedir:

- Transformatörler,
- Döner Makineler,
- SPS (Anahtarlamalı güç kaynakları),
- Yarı iletken içeren devreler,
- Diyotlu ve tristörlü sürücüler,
- Elektronik balastlar,
- UPS'ler,
- Frekans dönüştürücüler,
- Elektrikli ulaşım sistemleri,
- Statik VAr kompanzatörler,
- Endüksiyon fırınları,
- Enerji iletim sistemleri,
- Ark fırınları,
- Kaynak makineleri,
- Fotovoltaik sistemler,

- Jeneratörler,
- Gaz deşarj lambaları,
- Bilgisayarlar ve printerler (Akmaz, 2012: 6), (İlaslaner, 2006: 12).

Bu çalışmada, sayılan ekipmanlardan atıksu arıtma tesisi ile alakalı olanların detaylı incelenmesi yapılacaktır. Harmonik üreten elemanları temel manada üç ayrı kısımda incelemek, konunun anlaşılması açısından kolaylık sağlayacaktır. Bu üç grup şöyledir:

- Elektrik sisteminde yayılmış olan çok sayıda küçük güçteki harmonik üreten elemanlar,
- Sistemde az sayıda bulunan, yüksek güçteki nonlineer yük karakteristiği bulunan elemanlar,
- Güç elektroniği düzenekleri, konverterler (Kocatepe ve diğerleri 2003: 6-2).

1.6.1. Konverterler, sürücüler

Karmaşık yapıları olan bu ekipmanlar sistemde harmoniğe sebebiyet verir. Genelde konverterin ürettiği harmonik Eş.1.8 ile ifade edilebilir:

$$n = k * p \pm 1 \tag{1.8}$$

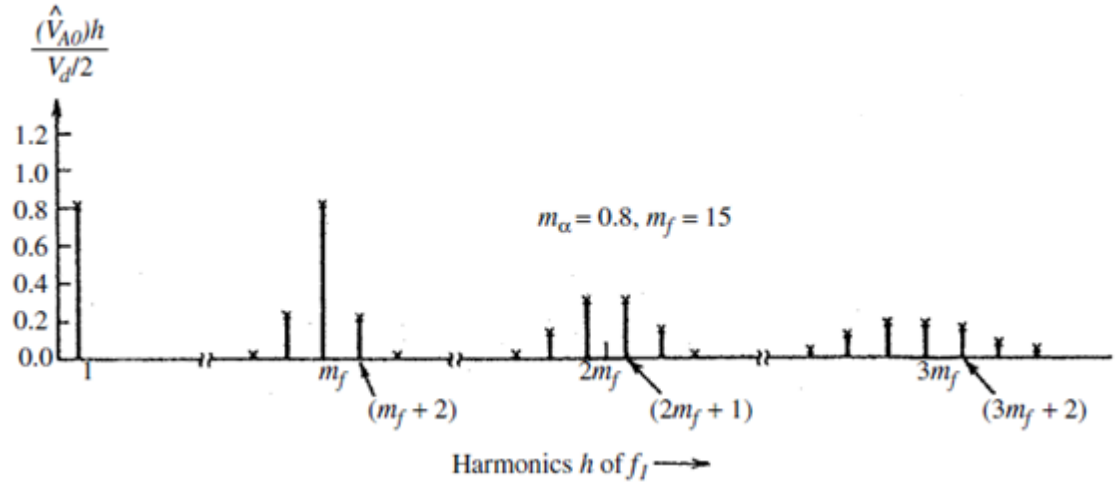
k burada 1,2,3 gibi tam sayılar olup p konverterin darbe adedidir (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 6-3). Bu bağıntıya göre 6 darbeli bir bir konverterin üreteceği başlıca harmonikler 5., 7., 11. ve 13. harmoniklerdir.

Konverterler ve sürücüler başlığı altında dalga genişlik modülasyonu (PWM) ve bu yöntemin harmoniklerle olan ilişkisinden de bahsetmek uygun olacaktır. Dalga genişlik modülasyonu elektrikte birçok yerde kullanılabilir; fakat atıksu arıtma tesisi ile olan ilişkisi, bu yöntemin motor sürmede yaygın olarak kullanılmasından kaynaklanır. Darbe genişlik modülasyonu, çıkışta istenen sinyali veya analog değeri elde etmek için üretilen darbenin genişliğinin değiştirilmesi prensibine dayanır (Yaz O., Karakulak O., Köybaşı E., Bıçakçı S., Candan C. ve Akdaş D., 2012: 214).

Eş.1.9, dalga genişlik modülasyonu metodu ile kontrol yapan bir aygıtın oluşturacağı harmonikleri verir.

$$h = k * m_f \pm n \tag{1.9}$$

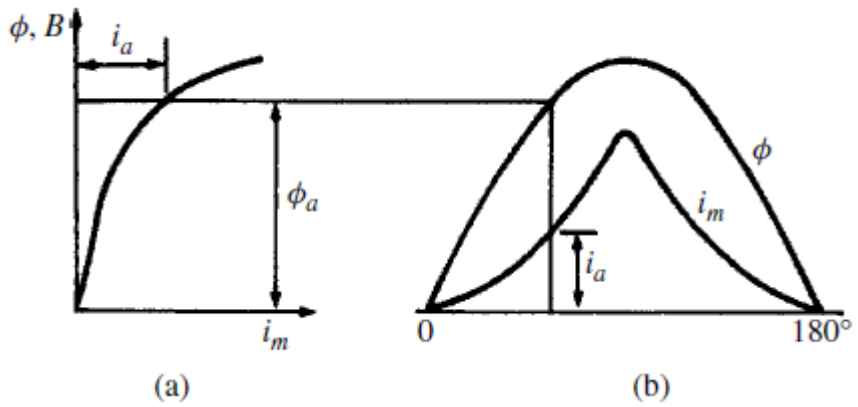
m_f modülasyon oranı olup, k ve n'yi tam sayı alırsak harmonik dizilerin Şekil 1.7'de de görüldüğü gibi anahtarlama frekansının ve katlarının etrafında kümelendiği görülür (Arrillaga, Watson, 2003: 124).



Şekil 1.7. Bipolar anahtarlamada harmonik spektrum (Arrilaga, Watson, 2003: 124)

1.6.2. Transformatörler

Alternatif akım sistemini, frekansını değiştirmeden farklı şiddette ve gerilimde bir başka alternatif akım sistemine eviren elektrik cihazlarına transformatör denir. Trafolar %99-%99,5 arası verimleri ile en verimli elektrik makineleridir ve temelde birbirine izole edilmiş ve demir nüveye sarılmış iki sargı grubundan oluşur (Şenol, Bekiroğlu ve Aybar, 2005: 106).



Şekil 1.8. Histerisiz hariç trafo mıknatıslanması (a) mıknatıslanma; (b) akı ve mıknatıslanma akımı (Arrillaga, Watson, 2003: 63).

Şekil 1.8'de de görüldüğü gibi trafoların mıknatıslanma eğrileri lineer değildir ve bu manyetik lineersizlik durumu harmoniğe sebebiyet verir. Bu harmoniğin sisteme geçip geçmemesi; trafo bağlantı grubu, yıldız noktasının şebekenin nötr noktasına bağlı olup olmaması ve magnetik devrenin yapısına bağlıdır (Arrillaga, Watson, 2003: 63). Çizelge 1.5'de bir dağıtım transformatörünün harmonik akım bileşenleri, transformatörün mıknatıslanma akımının yüzdesi olarak verilmiştir.

Çizelge 1.5. Transformatörün mıknatıslanma akımının, sisteme enjekte ettiği n. harmonik akımına oranı (Şahin, 2003: 6)

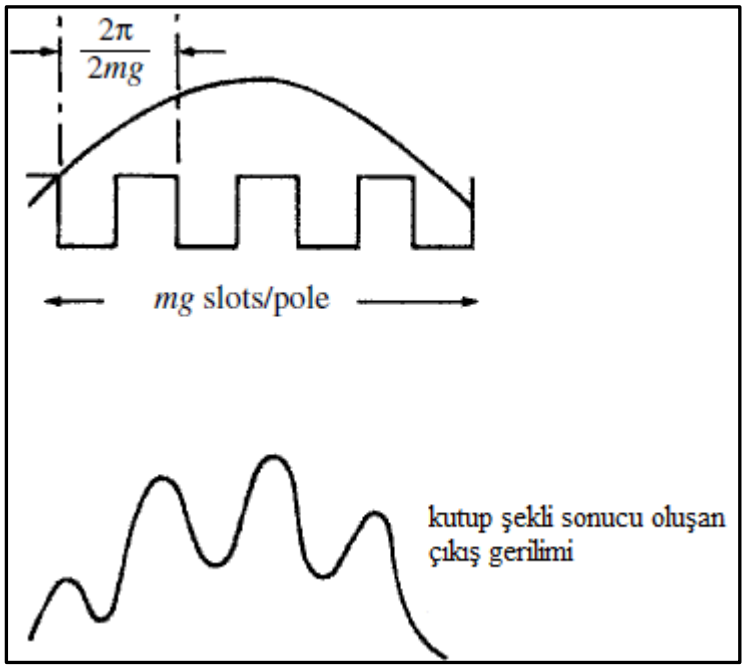
Harmonik Derecesi (n)	$(\%)\frac{I_n}{I_\mu}$
3	50
5	20
7	5
9	2.6

1.6.3. Jeneratörler

Jeneratörler, mekanik enerjiyi elektrik enerjisine çeviren makinelerdir. Jeneratörler de transformatörler gibi birer harmonik kaynaklarıdır. Jeneratörlerin harmonik üretme sebeplerini şu şekilde sıralayabiliriz:

- Çıkık kutbun şekli (Bkz. Şekil 1.9),
- Magnetik direncin oluklara göre değişmesi,

- Ana devrenin doyması,
- Asimetrik sönüm sargıları (Efe, 2006: 15).



Şekil 1.9. Yarık kutup şekli sonucu oluşan dalga şekli (Arrillaga, Watson, 2003: 70)

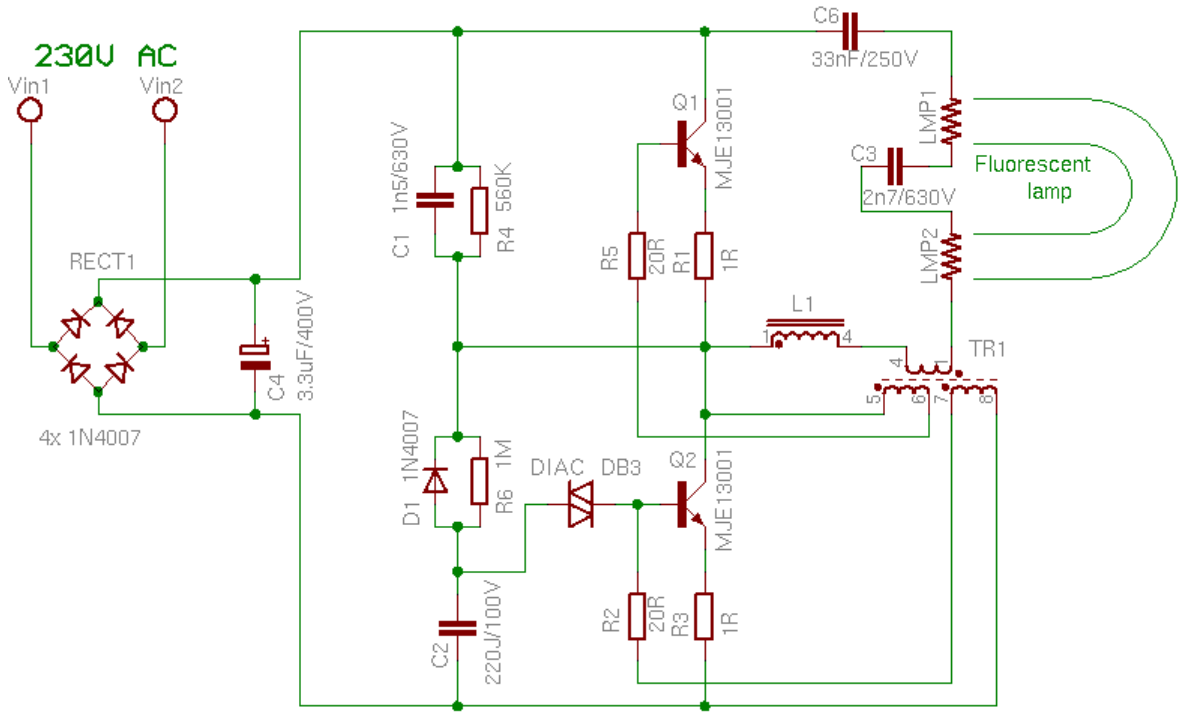
1.6.4. Gaz deşarjı ile çalışan lambalar

Bir tüp içerisine sıkıştırılmış civa ya da sodyum gazının boşalması ile çalışan aydınlatma elemanlarına gaz deşarjı ile çalışan lamba denir. Bu lambalar, iletim esnasında negatif direnç gösterirler. Nonlineer bir karakteristiğe sahip olduklarından harmonik üretirler. Özellikle 3. ve katı harmonikler nötr iletkenine geçerek sisteme zarar verir (Bayrak, Bilgin, Alboyacı, 2012: 314). Gaz deşarjı ile çalışan lambalar çalışma esnasında yardımcı ekipmanlara ihtiyaç duyarlar. Bunlardan balastlar da kendi başlarına birer harmonik kaynağıdır. Elektronik balastların harmonik ilişkisine ayrıca değinilecektir.

1.6.5. Elektronik balastlar

Floresan lambalar negatif bir dirence sahip olduklarından gaz deşarjı başladığı andan itibaren çekilen akım devamlı artar. Bu tip lambalarda bu akımı dengelemek amacı ile balastlar kullanılır. Balastlar, gerilim ve akımı istenen aralıkta tutarak, lambanın ömrünün uzamasını sağlar. Daha eski bir teknoloji olan manyetik balastlarla sadece gerilim

ve akım ayarlaması mümkün iken, onların yerini almaya başlamış olan elektronik balastlar ile hem gerilim-akım dengelemesi hem de frekans kontrolü yapılabilir ki bu sayede, manyetik balasttaki titreme de giderilmiş olur. Elektronik balastın devre şeması Şekil 1.10'da verilmiştir.



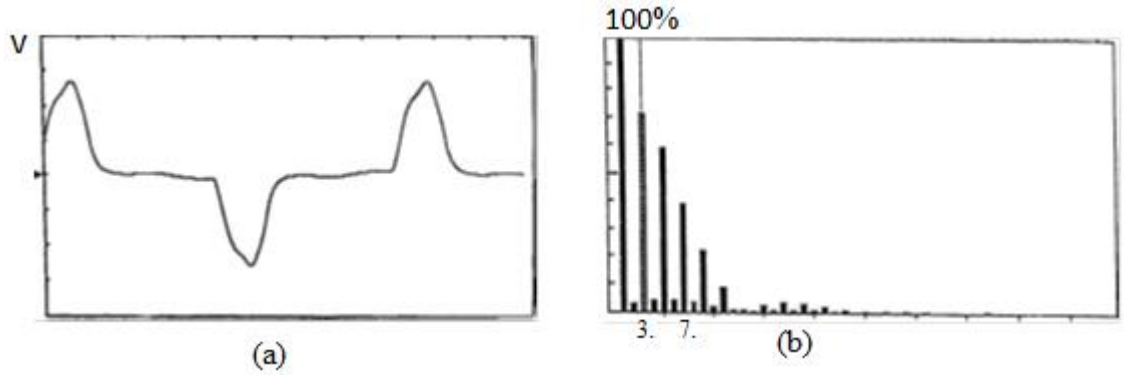
Şekil 1.10. Elektronik balast devresi (320volt, 2016)

Elektronik balastlar, devre şemasında da görüldüğü üzere basit olmayan bir yapıya sahiptir ve yarı iletken elemanlar içerir. Manyetik balastlarda istenmeyen bir durum olarak karşımıza çıkan reaktif güç tüketimi, elektronik balastlarda ortadan kalkmış ise de elektronik balastların harmonik üretiyor olması bir dezavantaj olarak görülebilir. Yapıları sebebi ile 3., 5., 7., ve 9. harmoniklere sebebiyet verirler.

1.6.6. Bilgisayar, yazıcı ve televizyonlar

Bilgisayarlar oldukça hassas yüklerdir. Sistemdeki bozulmalardan hemen etkilenmelerinin yanı sıra, kendileri de elektrik enerjisini bozucu etki yaratırlar. Bilgisayarların, TV ve ofis ekipmanlarının lineer olmayan karakteristikleri elektrik sistemlerinde; nötr iletkeninin aşırı yüklenmesi, anormal gerilim düşümleri ve bozulmalarına sebebiyet verir. Şekil 1.11'de bir bilgisayar ve yazıcı kombinasyonunun

yarattığı harmonik bozulma gösterilmiştir. Görüleceği üzere ana etken 3. harmonik %72 civarında ve bunu 5. harmonik %60 ve 7. harmonik %40 ile takip ediyor (Arrillaga, Watson, 2003: 82).



Şekil 1.11. (a) TV ünitesi tarafından yaratılan harmonik bozulma (b) PC-printer ikilisinin harmonik spektrumu (Arrillaga, Watson, 2003: 82).

1.7. Harmoniklerin Oluşturduğu Etkiler

Elektrik sistemlerinde harmonikler zararlı etkilere sahiptirler. Bu etki elektrik kaybı, şalt ekipmanlarının devreyi kesip; sistemi gereksiz yere elektriksiz bırakması, elektronik devrelerde arızalar vb. olarak kendini gösterebilir.

Harmoniklerin vereceği zararın derecesi, sistemi oluşturan elemanların toleransına bağlıdır. Örneğin; ısıtma amaçlı kullanılan cihazlarda, fırınlarda harmonik kendini ısı olarak göstereceği için çok sıkıntı yaratmayacaktır fakat yine de şalterlerde gereksiz açmalara sebep olacağı gibi şebekeye de harmonik verecektir. Diğer taraftan elektrik motorlarında ve jeneratörlerde harmonikler demir ve bakır kayıplarında artışa sebebiyet vererek aşırı ısınmaya ve kayba yol açar (Filiz, 2006: 67). Yine harmoniklerin etkisi ile bu makinelerin verimi ve torku düşer.

Harmoniklerin oluşturduğu etkiler ve meydana getirdiği zararlardan, çalışmanın üçüncü kısmında detaylı olarak atıksu arıtma tesisindeki ekipmanlar bazında bahsedilecektir. Elektrik sistemlerimizde istenmeyen bu büyüklüklerin genel manada bilinen temel zararlarını şöyle sıralayabiliriz:

- Elektrik dağıtım sistemlerinde gerilim düşümünü artırarak, kayıpların artmasına, kablo kesitlerinin yanlış hesaplanmasına ya da gereksiz yere daha kalın kesitli kablo kullanılmasına sebebiyet verir.
- Jeneratör geriliminin ve şebeke geriliminin normal dalga şeklini bozar.
- Yüklerde fazladan kayıplara yol açar.
- Toprak kısa devre akımının hesaplanandan daha yüksek olmasına sebep olur.
- 50 Hz. için tasarlanmış kompanzasyon kondansatörlerinde aşırı yüklenmeye ve patlamalara sebep olur.
- Motorlarda salınımlara dolayısı ile aşırı ısınmalara yol açar.
- UPS'lerde verim düşmesinin sebeplerindendir
- Aydınlatma elemanlarında ve monitörlerde titreşime sebep olur.
- Şalt ekipmanlarında arızaya ve yersiz çalışmaya mahal verir. Bu nedenle elektrikli sistemlerde sebepsiz kesintiler ortaya çıkar.
- Ölçü aletlerinden yanlış değerlerin alınmasına yol açar.
- İletişim aletlerinin parazitli çalışmasına neden olur.
- Mikroişlemcilerde hataya yol açar.
- Elektrikli cihazların ömrünü kısaltır, daha gürültülü ve daha fazla kayıplı çalışmasına neden olur.
- Elektrik enerjisi üretimi, iletimi ve kullanımında verimliliğin azalması,
- Seri ve paralel rezonans olaylarının meydana gelmesi (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 7-1–7-2), (Arrillaga, Watson, 2003: 143).

Tam sinüzoidal akım ve gerilimin bulunduğu ve yük karakteristiğinin lineer olduğu sistem harmoniksiz bir sistemdir ve pratikte böyle bir sistemle karşılaşmak artık imkânsız gibidir. Nonlineer elemanların git gide daha yaygın şekilde kullanılması harmoniklerin oluşturduğu etkileri de trajik şekilde artırmaktadır. Hal böyle olunca kullandığımız elektrikli ekipmanların harmoniğe maruz kaldığındaki davranışı ve harmoniğe olan hassasiyetleri oldukça önem arz etmektedir. Bahsi geçen etkilerden önemli olanlarının özellikle incelenmesinde fayda vardır.

1.7.1. Rezonans etkisi

Fizikte rezonans, bir cismin doğal frekansının dışında bir frekansla uyarılması sonucu ortaya çıkan olaya denir, rezonansa girmiş cisim aşırı bir şekilde titreşir (Çağlayan,

2004: 55). Bilindiği üzere bobinin ve de kondansatörün akıma gösterdiği dirence reaktans denir ve X ile gösterilir. Bobin reaktansını X_L ve Kapasitör reaktansını X_C olarak gösterirsek, bunların bağıntıları Eş. 1.10 ve Eş. 1.11'deki gibi olur:

$$X_L = 2\pi fL \tag{1.10}$$

$$X_C = \frac{1}{2\pi fC} \tag{1.11}$$

Devrede endüktif reaktans ile kapasitif reaktansın eşit olduğu frekansa rezonans frekansı, bu duruma ise elektriksel rezonans denir. Bu durumda endüktif reaktans ile kapasitif reaktans birbirini sıfırlayacağından, toplam empedans minimuma iner, bu durum devrede kısa devre etkisi gösterir ve istenmeyen yükseklikteki değerlerde akım çekilir. Bu durum sistemlerde büyük tahriplere yol açar.

Sistemdeki harmonikler, kapasitif ve endüktif reaktansların bir birine eşit olacağı bir frekansa sebep olarak, rezonans meydana getirebilirler. Atıksu arıtma tesislerinde de kompanzasyon amacı ile sisteme entegre edilen kondansatörler rezonans oluşumuna zemin hazırlar. Elektrik sistemlerinde rezonans olayı, oluşma şekline göre paralel rezonans ve seri rezonans olarak iki kısımda incelenebilir. Seri rezonans harmonik akıma küçük bir empedans gösterirken, paralel rezonans büyük empedans gösterir. Sistemin karakteristiğini analiz etmek ve sistem rezonans sorunlarını gidermek çok önemlidir (Shipp, 1979: 453-458).

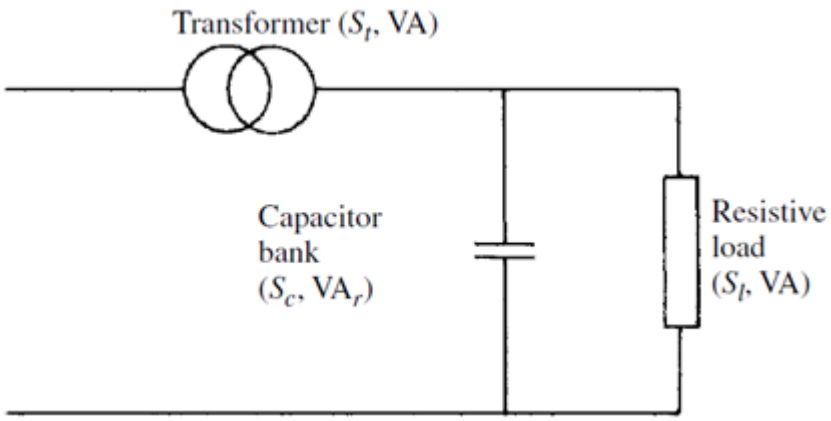
Paralel rezonans

Paralel rezonans, devredeki paralel empedansların tüm kollarında aniden yükselen harmonik akımı ve gerilimi olarak kendini gösterir. Bir çok sebepten ötürü meydana gelebilir. Örneğin kondansatörler, harmonik kaynağı ile aynı baraya bağlı ise sistem empedansı ile kapasitör arasında rezonans oluşabilir (Arrillaga, Watson, 2003: 144). Paralel rezonansın gerçekleşme frekansı olan f_p şu şekilde ifade edilebilir:

$$f_p = Temel\ Frekans * \sqrt{\frac{Kısa\ devre\ VAr}{Kapasite\ VAr}} \tag{1.12}$$

Seri rezonans

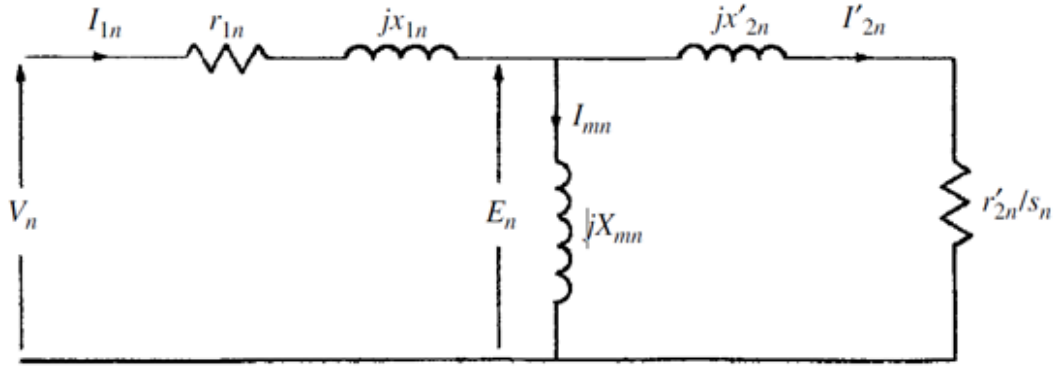
Şekil 1.12 ’deki devrede kapasitör ve endüktansın reaktansları eşitlendiğinde seri rezonans olayı meydana gelir bunun sonucunda düşük harmonik voltajında dahi yüksek akım çekilebilir. Rezonans olayının etkileri arasında; devre elemanlarında arızalar, kondansatörlerde delinmeler, büyük gerilim düşümleri ve şebeke geriliminin bozulması, anahtarlama elemanlarının aşırı ısınması, bozulması gibi başlıcaları sayılabilir.



Şekil 1.12. Seri rezonans devresi (Arrillaga, Watson, 2003: 145).

1.7.2. Döner makineler üzerindeki etkisi

Harmonikli voltajlar döner makinelerde aşırı ısınmaya ve fazladan titreşime sebebiyet verir. Motorlar için genelde harmoniklerin etkisi büyük boyutlarda değilse fark edilmez. Harmoniklere maruz kalma süresi uzun ise ve harmonik bozulma %5’in üzerinde ise döner makineler için harmonik etkisi önemsenmelidir (Arrillaga, Watson, 2003: 149). Belirtilen sınırların üstünde döner makineler ciddi problemler yaşarlar.



Şekil 1.13. n. Harmonik için indüksiyon motorunun tek fazının eş değer devresi (Arrillaga, Watson, 2003: 150).

Harmonikli akımlar stator sargılarında ve rotor devresinde kaybı artırır (Bkz. Şekil 1.13). Ayrıca harmonik akımları tarafından oluşturulan sızıntı akımlarının alanı kaybı daha da artırır. Yapılan bir araştırmada bir inverter - fed makinenin harmonik kaynaklı kaybı stator sargısı için %14,2 ve rotor için %41,2 olarak kaydedilmiştir (Arrillaga, Watson, 2003: 150).

Harmonikli akımların döner makineler üzerindeki bir diğer etkisi de harmonik torktur. Temel frekansta elektrik enerjisinin indüklendiği gibi, harmonik büyüklükler de sargılarda kendi indüklemesini oluşturur ve şafta pozitif veya negatif yönde tork verir. Mekanik zorlanma ve de elektriksel kayıp olarak karşımıza çıkan bu etkinin, mekanik ve elektriksel hesaplara katılması gerekir. Türkiye'deki net elektrik tüketiminin yaklaşık %36'sının sadece üç fazlı AC indüksiyon motorlarında kullanıldığı düşünülürse, harmoniklerin döner makineler üzerinde yarattığı kayıplara özellikle itina gösterilmesi gerekliliği anlaşılabilir (Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü [EİE], 2016).

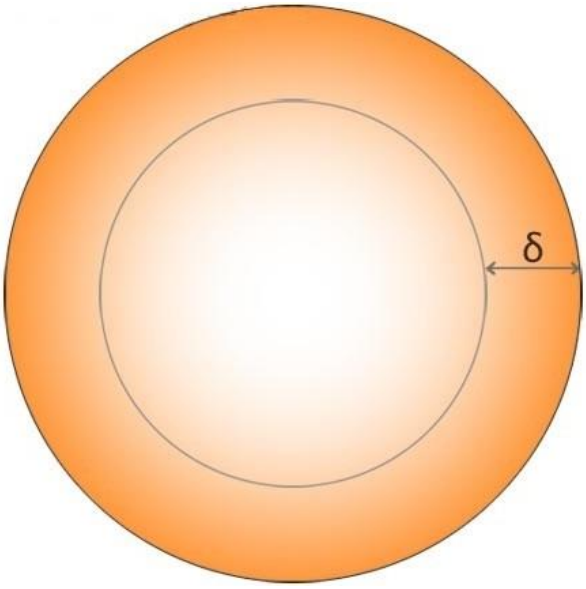
1.7.3. İletkenler üzerinde etkisi

İletkenler, elektrik sistemlerimizin temel elemanlarından biridir ve karşımıza çıkan kayıpların birçoğunun yaşandığı kısımdır. Atıksu arıtma tesislerinde kesitleri çok büyük güç kablolarından, küçük kesitli data kablolarına kadar fazla miktarda iletken kullanılır. Harmonikli akımlar, kablolarda elektrik kayıplarının artmasına neden olurlar. Bu kayıp iki şekilde kendini gösterir:

- Deri etkisi sebebi ile,

- Nötr iletkeninin büyük akımlarla yüklenmesi ile.

Şekil 1.14'de gösterilmiş olan deri etkisi literatürde 'skin effect' olarak bilinir. Alternatif akımda akımın iletkenin yüzeyinden akma eğilimidir. Alternatif akımda kablonun direnci doğru akımdakine göre daha yüksektir. Alternatif gerilimde karşımıza çıkan deri etkisi kablo direnç değerinin doğru gerilimdekinden fazla olmasına sebep olur. Bahsi geçen etki %3,7 mertebesindedir ki bu değer damarlı kablolar için geçerlidir. Damarlı olmayan kablolarda ve baralarda bu etki daha da yüksektir. Harmonik frekansının artması ile ilişkili olarak kablodan geçen akımın, kablonun yüzeyine yoğunlaşması sebebi ile etkin direncin artması sistemlere harmonik kaynaklı ek kayıplar olarak yansır (Çubukçu, 2000: 2).



Şekil 1.14. Akımın büyük çoğunluğunun aktığı 'δ' yüzeyi (Electricaleasy, 2016)

İkinci etmen ise tek fazlı bir yük üç fazlı ve dört iletkenli bir sistem tarafından beslendiğinde kendini gösterir. Üç fazlı dengeli bir sistemde harmonik de yok ise nötr iletkeninden akım geçmez. Üçüncü mertebeden harmonik ve bu harmoniğin katları olan harmonikler (9. ve 15.) sistemde mevcut ise bunlar nötr iletkeninde birbirini güçlendirerek bu iletkende yüksek bir akım akmasına sebep olurlar, öyle ki nötr akım değeri fazdaki akımın $\sqrt{3}$ katına kadar çıkabilir; bu durum da ekstra bir elektrik kaybı demektir (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 7-3).

1.7.4. Kondansatör üzerinde etkisi

Kondansatörlerin kendisi harmonik üretmez fakat harmonik seviyesinin üzerinde oldukça etkisi vardır. Frekans büyüdükçe kondansatör reaktansı düştüğü için çekilen akım da artar. Harmonik akımlar kondansatörlerde aşırı reaktif yüklenmeye ve sıcaklıklarının artışına sebep olur, bu da kondansatör ömrünü kısaltır. Daha ciddi durumlarda harmonikler, kondansatörlerde patlamalara sebep olur (Akpınar, 2016: 17). Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkisini şu şekilde özetleyebiliriz:

- Kondansatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışmasına neden olurlar.
- Kondansatörlerdeki dielektrik malzemenin zorlanmasına, delinmesine sebep olurlar.
- Kondansatörlerin aşırı yüklenmesine sebebiyet verirler.
- Kondansatörler sistemde gerilimin artmasına sebep olacağından, yüklerin az olduğu esnada trafoyu doyma bölgesine sokup, harmoniklerin artmasına neden olacaktır (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 9-9), (Alaşahan, 2014: 42-43).

1.7.5. Transformatörler üzerinde etkisi

Harmonik üreten eleman olarak daha önce de bahsi geçen trafolar aynı zamanda bu harmoniklerden olumsuz etkilenen ekipmanlardır. Harmoniklerin zararlı etkisi; trafolarda aktif güç kaybı, ısınma ve gürültü olarak kendini gösterir. Diğer taraftan trafo endüktansı ile sistem kapasitansı arasında oluşması muhtemel rezonans tehlikesi de bu etkiler arasında sayılabilir. Akım harmonikleri bakır kayıplarını artırırken, gerilim harmonikleri demir kayıplarının artmasına sebep olur (Arrillaga, Watson, 2003: 153). Bakır kaybında da demir kaybında da ek ısınma ortaya çıkar bu da trafoların ömrünü kısaltır (Emanuel, A.E., Wang., X., 1985: 628-636).

1.7.6. Kesiciler, sigortalar üzerinde etkisi

Harmonikler devre kesicilerin çalışmasını olumsuz etkiler. Açma sırasında meydana gelen ark, kesicinin bobini tarafından oluşturulan manyetik alanla hücrelere sürülür. Harmonikli ortamda bobin düzgün çalışmaz ve kesicinin çalışmasında aksaklık oluşturur.

Harmonikli akımlar, şalt elemanlarında fazladan ısınmaya sebep olduğundan, bu elemanların çalışma karakteristiğinin farklılaşmasına ve yersiz kesme yapmasına neden olur. Bahsedilen ısınma, kaybı artırdığı gibi, elemanın akım taşıma kapasitesini de olumsuz etkiler. Bu etki; zamansız atma, erken yıpranma hatta yanma olarak kendini gösterebilir.

1.7.7. Aydınlatma elemanları üzerinde etkisi

Gaz deşarjlı lambalar birer harmonik üreticisi olduğu gibi aynı zamanda bu harmoniklerden oldukça etkilenmektedirler (Bayrak, Bilgin ve Alboyacı, 2012: 313).

Harmonikler, gaz deşarjlı lambalarda bazen insan kulağı ile duyulabilecek bir gürültü yapar. Bu gürültü haricinde harmonikler floresan lambalarda demir kayıplarının artmasına sebep olur. Akkor telli lambalarda ise harmonik etki kendini daha çok ömür kısalması olarak gösterir. Harmoniklerden dolayı lambanın maruz kaldığı gerilimin %5 artması, lambanın ömrünün %50 azalması manasına gelmektedir (EMO, 2016: 20).

Çeşitli avantajlarından ötürü son dönemlerde teknolojisi ve kullanım alanı hızla gelişen LED lambalarda, mevzu harmonik olduğunda farklı bir durum karşımıza çıkmaktadır. Yük olarak floresan lambaların bulunduğu filtresiz bir sistemde yapılan harmonik ölçümleri sonucu toplam harmonik bozulma iki faz için %25-26 civarı ve üçüncü faz için %30-31 civarında çıkmıştır. Aynı ölçüm, aynı aydınlatma şiddetini sağlayan LED lambaların bulunduğu sistemde yapıldığında, toplam harmonik bozulma değeri ilk iki faz için %98-100 civarında ve üçüncü fazda %85 olarak ölçülmektedir (Bayrak ve diğerleri, 2012: 318). Burada ölçülen harmonik LED lamba tarafından değil de daha ziyade LED lambanın sürücüsü tarafından üretilmektedir. LED lambaların ileride harmonikler açısından daha sıkıntısız ekipmanlar haline gelmesi, sürücülerinin teknolojilerinin geliştirilmesi ile sağlanacaktır.

1.7.8. Elektronik elemanlar üzerinde etkisi

Günümüzde güç elektroniği elemanlarının kullanımı artık kaçınılmaz olmakla birlikte, çalışmanın konusu harmoniklerin son dönmede artışına bu ekipmanlar sebebiyet vermiştir. Elektronik elemanlar düşük voltaj ile çalıştığından, harmonik bozulmalardan oldukça etkilenirler. Güç elektroniği elemanlarının düzgün çalışması gerilimin sıfır olduğu

noktaların tam doğru tespitine bağlıdır. Bu elemanlar harmonikli bir sisteme bağlandığında bu sıfır noktaları kayacağından, elektronik devreler komütasyon[1] hataları nedeniyle yanlış işlem yapar. Yine harmonik bozulma kaynaklı olarak bir noktadaki faz-faz geriliminin, diğer noktadaki faz-faz geriliminden fazla olması da aynı komütasyon hatalarına ve yanlış tetiklemelere sebebiyet verir. Elektronik devrelerin, güç elektroniği elemanlarının yanlış işlem yapmaları dışında, harmoniklerden dolayı ömürlerinin kısalması, koruma devrelerinin yanması gibi durumlar da söz konusudur. Diğer taraftan harmonikler haberleşme devrelerinde gürültüye sebebiyet verirler, bu durum iletişim kalitesini düşürür; gönderilen bilgide kayba sebebiyet verir (Joseph, S., Subjack, J.R. ve McQuilkin, J.S., 1990: 1034-1041).

[1] Elektrikte akımın bir bileşenden diğerine aktarılması olayı

2. HARMONİKLERİ FİLTRELEME YÖNTEMLERİ

2.1. Harmonik Filtre Kavramı

Harmoniklerin elektrik sistemlerinde meydana getirdiği etkiler, işletmeleri, bu istenmeyen elektriksel büyüklüklerin giderilmesine yönelik çalışmalara itti. Günümüzde artık elektronik bir kartın tasarımından, bir fabrikanın elektrik tesisatının projelendirilmesine kadar, hemen hemen her aşamada harmoniklerin etkisi de göz önüne alınmaktadır. Bu zararlı etkilerden kurtulmak için tesislerde ek tedbirler almak gerekmektedir. Bu tedbirler kapsamında sisteme entegre edilen elektrik devrelerine harmonik filtre adı verilmektedir (Ohja, Nadir, Chauan ve Kumar, 2014: 58).

2.2. Harmonik Filtrelerin İşlevleri

Harmonik filtreler çalışma esaslarına göre önleyici veya iyileştirici olabilir (Grady, 2012: 7-1). Harmonik filtreler entegre edildikleri sistemlerde, yükün besleme gerilimini sinüzoidale yakınlaştırır, düzeltir. Örneğin frekans evirici ile sürülen bir pompa motorunun besleme gerilimi harmonikli olacak, motor bu besleme geriliminden olumsuz etkilenecektir. Bu sisteme eklenecek bir harmonik filtresi bu durumun önüne geçecektir. Harmonik filtreler aynı zamanda şebekeye enjekte edilecek olan bozulmaları da önlemektedir.

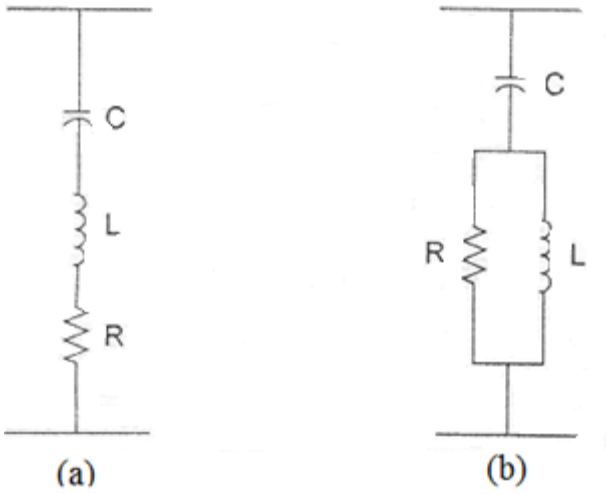
Harmoniklerin etkilerini azaltma yöntemleri temelde iki ana gruba ayrılır. Bunlar; pasif filtreler ve aktif filtrelerdir. Her bir yöntemin avantajları ve dezavantajları olmakla birlikte, herhangi biri için en iyi metottur demek yanlış olur (Ohja ve diğerleri, 2014: 65).

Yanlış seçilmiş bir harmonik filtre ekonomik açıdan olumsuz sonuçlara yol açacağından, harmonik filtre tasarımı mevzusuna oldukça önem gösterilmelidir. Tesis için uygun filtre çeşidinin itina ile seçilmesi gerektiği gibi aynı özen bu filtrenin boyutlandırılmasında da gösterilmelidir. Tesis için büyük olan bir filtre, kurulum aşamasında fazla masraf demek iken; küçük seçilen bir filtre de işletme döneminde kayıplara yol açacaktır. Diğer taraftan bazı durumlarda hem aktif hem de pasif filtrenin bir arada kullanıldığı karma filtreler ekonomik açıdan en uygun çözüm olabilmektedir

2.3. Pasif filtreler

Direnç, endüktans ve kondansatörlerden oluşan, temel bileşen dışındaki büyüklükleri yok etmek için tasarlanmış filtrelere pasif filtre denir (Tunçalp, Sucu, 2006: 264). Yok edilmesi amaçlanan bileşenin frekansında rezonansa girecek olan endüktans ve kondansatör belirlenir. Burada karşımıza her harmonik için ayrı bir filtre konulması gerekliliği çıkıyor ki bu, ekonomik açıdan ve yer açısından istenmeyen bir durumdur. Filtrenin ayar keskinliğini kalite faktörü Q belirlemektedir.

> "Q faktörüne bağlı olarak; filtreler ya yüksek Q ya da düşük Q tipindedirler. Q değeri yüksek Q tipi filtrelerde 30 ile 60 arasında değer alırken, düşük Q tipi filtrelerde 0,5 ile 5 arasında değer almaktadır. Yüksek Q filtresi, düşük harmonik frekanslardan birine ayarlanır. Düşük Q filtresi ise, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptir ve yüksek mertebeli harmonikleri süzmek için kullanıldığında yüksek geçiren filtre olarak da düşünülür" (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 13-2).



Şekil 2.1. (a) Düşük Q tipi filtre ve (b) yüksek Q tipi filtre (Efe, 2006: 35)

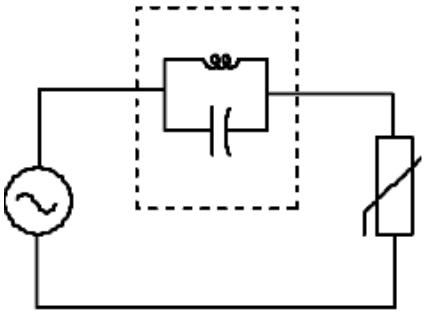
Pasif filtreleri kendi aralarında seri pasif filtre ve paralel pasif filtre olarak iki ana gruba ayırabiliriz. Paralel pasif filtreler ise kendi içinde çeşitlilik gösterirler.

2.3.1. Seri pasif filtreler

Besleme gerilimi ile harmonik kaynağı arasına seri olarak bağlanan bir endüktanstan oluşmaktadır. Bahsi geçen endüktansı Eşitlik 2.1'deki gibi formüle edebiliriz:

$$X_L = 2\,\pi\,f\,L \tag{2.1}$$

Seri bağlanan pasif filtreler, temel frekansta düşük empedans gösterir iken; harmonik frekansında oldukça yüksek bir empedans gösterir (Tunçalp, Sucu, 2006: 264). Filtre yok edilmek istenen harmonik bileşene göre tasarlanır ve o harmoniğin frekansında yüksek empedansa sahip olur.



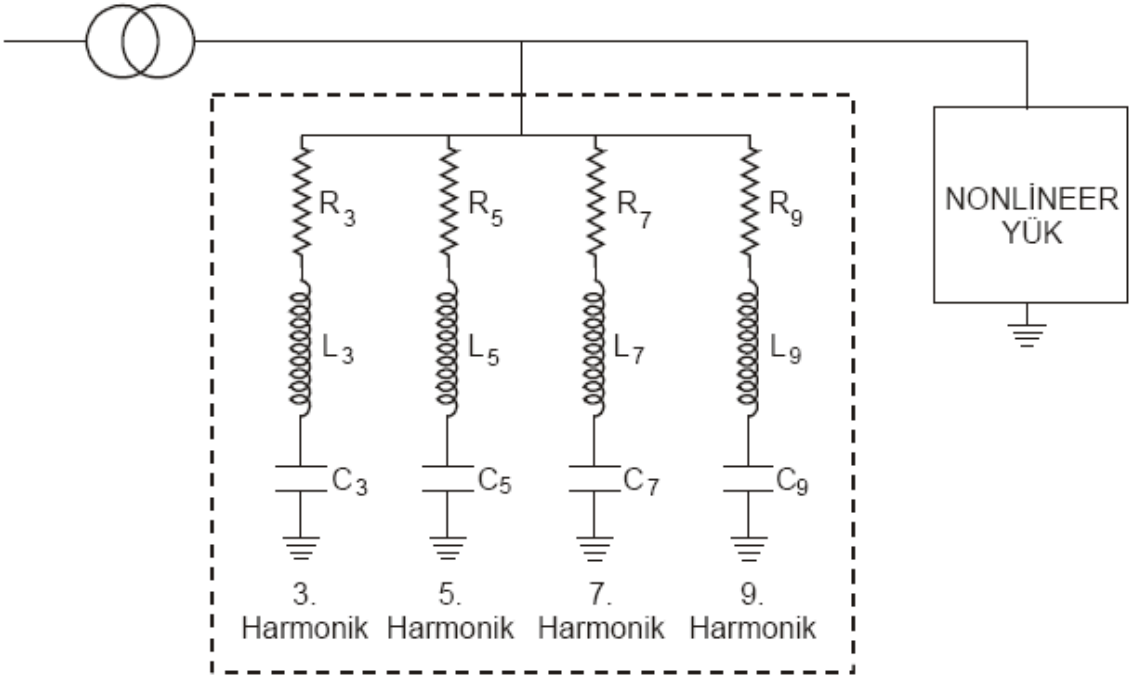
Şekil 2.2. Seri pasif filtre devresi (Akbal, 2011: 42)

Seri pasif filtreler sisteme seri bağlı olduklarından, yük akımını da taşımak zorundadırlar. Bu durum, seri filtrelerin kullanımında bir dezavantaj olarak karşımıza çıkıyor. Seri filtrelerin paralel filtrelere göre avantajı, rezonans problemlerinin olmamasıdır (Efe, 2006: 36).

Hat gerilimine göre yalıtılmış olma gerekliliği ve hat akımının hepsini üzerinden geçiriyor olması gibi özelliklerinden dolayı, seri pasif filtrelerin kullanım alanları sınırlıdır. Seri filtreler, üçüncü harmoniğin yoğun olduğu bir fazlı sistemlerde daha çok kullanılırlar (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 13-4).

2.3.2. Paralel pasif filtre

Paralel pasif filtreler, ana devreye paralel bağlanan ve empedansı küçük filtrelerdir. Bu filtreler yardımı ile harmonikler toprağa aktarılabilir. Harmonik üreten eleman ile şebeke arasına paralel olarak bağlanan bu paralel pasif filtreler, harmonik büyüklüklere karşı çok düşük bir empedans göstermesinden ötürü harmonikli akım bu filtre üzerinden toprağa geçerek ana devreye ulaşmamış olur. Bu sebeple bu tarz filtreler, harmonikli bileşenlerin frekansında düşük empedans değeri oluşturacak şekilde tasarlanırlar (Milli Eğitim Bakanlığı [MEB], 2016: 56).



Şekil 2.3. Paralel pasif filtre devresi (Efe, 2006: 36)

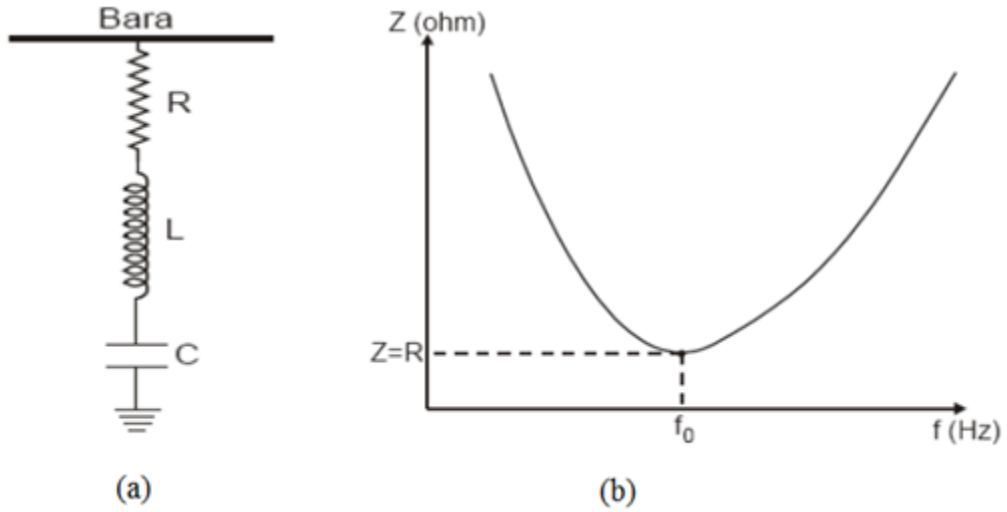
Paralel pasif filtrelerin bir diğer işlevi de sistemin reaktif güç ihtiyacını karşılamaktır ayrıca önceki başlıkta bahsedilen seri pasif filtrelere göre daha ucuz olması ve reaktif güç ihtiyacını karşılıyor olması paralel pasif filtrelerin daha tercih edilir bir filtre türü olmasını sağlamıştır (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 13-5).

Uygulamada paralel pasif filtrelerin temel sakıncası rezonans tehlikesidir. Devreye paralel olarak bağlanan bu filtrelerin güç sistemleri ile paralel rezonansa girme tehlikesi vardır (Tunçalp, Sucu, 2006: 264). Bu sebepten ötürü bir sistem için bu tip bir filtre tasarlamak için öncelikle bağlanacak sistemin çok detaylı bir irdelenmesi gerekmektedir.

Paralel filtreleri, tek ayarlı (bant geçiren), çift ayarlı, yüksek geçiren sönümlü filtreler ve otomatik ayarlı filtreler olmak üzere dörde ayırabiliriz (Efe, 2006: 36).

Tek ayarlı filtre

Tek ayarlı paralel pasif filtreler, belirlenmiş bir frekanstaki harmoniğe düşük empedans göstererek, o harmoniğin yok edilmesini sağlarlar. Yapısını kısaca seri bir RLC devresi olarak özetleyebiliriz (Efe, 2006: 36).



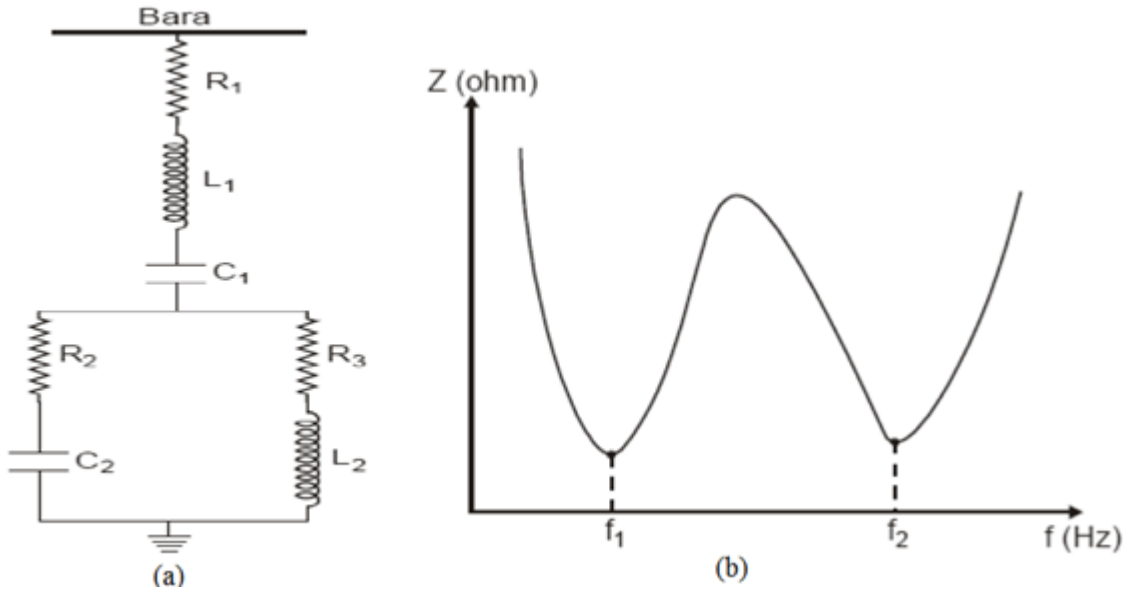
Şekil 2.4. (a) Tek ayarlı filtre devresi (b) ve empedans değişimi (Efe, 2006: 37)

Tek ayarlı paralel pasif filtrenin ω açısal frekansındaki empedansı olan Z_f ifadesinin eşitliği şu şekildedir:

$$Z_f = R + j[\omega L - \frac{1}{\omega C}] \quad (2.2)$$

Çift ayarlı filtre

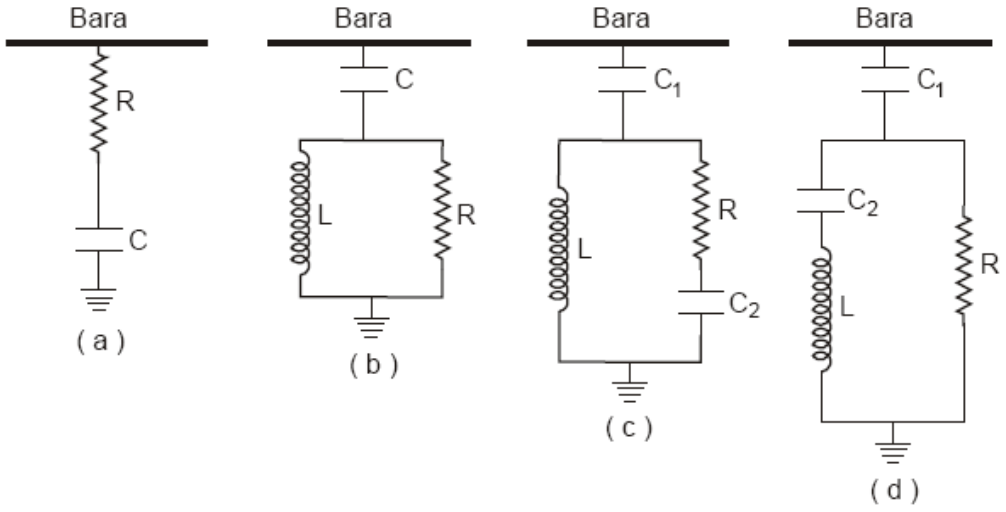
Çift ayarlı filtreler her biri ayrı frekans için tasarlanmış iki adet tek ayarlı filtrenin birleşimi gibi düşünülebilir. Dolayısı ile bu filtreler iki ayrı frekansta harmoniklere karşı çok düşük empedans göstererek bunların elemine edilmesini sağlar. Temel frekansta, tek ayarlı filtreye oranla daha az güç kaybına sebep olması bu filtrelerin önemli bir özelliğidir (Efe, 2006: 36).



Şekil 2.5. (a) Çift ayarlı filtre devresi ve (b) empedans değişimi (Sucu, 2003: 10)

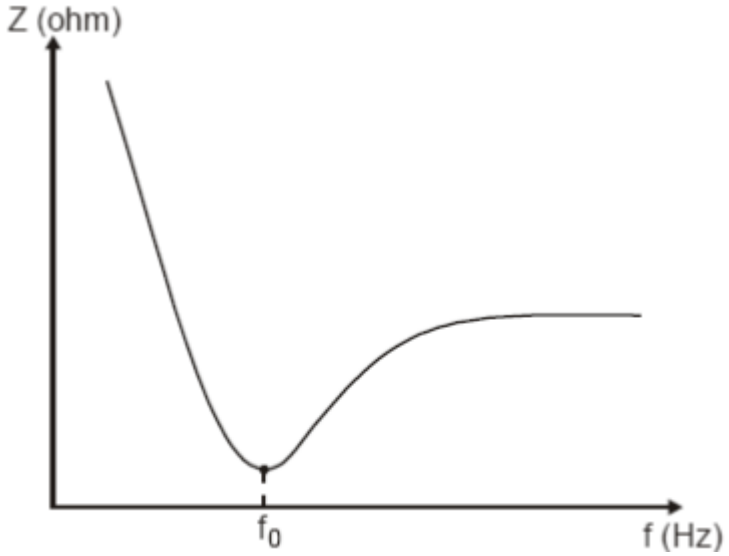
Sönümlü filtre

Sönümlü filtreler yüksek frekanstaki harmoniklerin eleminasyonu için tasarlanmıştır. 17. ve üzeri mertebedeki harmoniklerin filtrelemesinde kullanılan sönümlü filtreler bu özelliklerinden ötürü yüksek geçiren filtre olarak da bilinir (Efe, 2006: 37). Burada dikkat edilmesi gereken husus; bu filtrelerin düşük frekanslarda çok büyük empedans gösteriyor olmasıdır.



Şekil 2.6. (a) Birinci derece, (b) ikinci derece, (c) üçüncü derece, (d) C tipi sönümlü filtreler (Efe, 2006: 38)

Birinci dereceden sönümlü filtre 50 Hz.'de aşırı kayba sebebiyet verir; ikinci derece filtreleme konusunda çok iyi performansa sahip iken üçüncü dereceye göre kaybı fazladır. C tipinin temel artısı ise az kayba yol açmasıdır. Sönümlü filtreler, ısı değişiminden daha az etkilenirler; paralel devrelere gerek duyulmaksızın geniş frekans bandında filtreleme yapabilir (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 13-8 – 13-9).

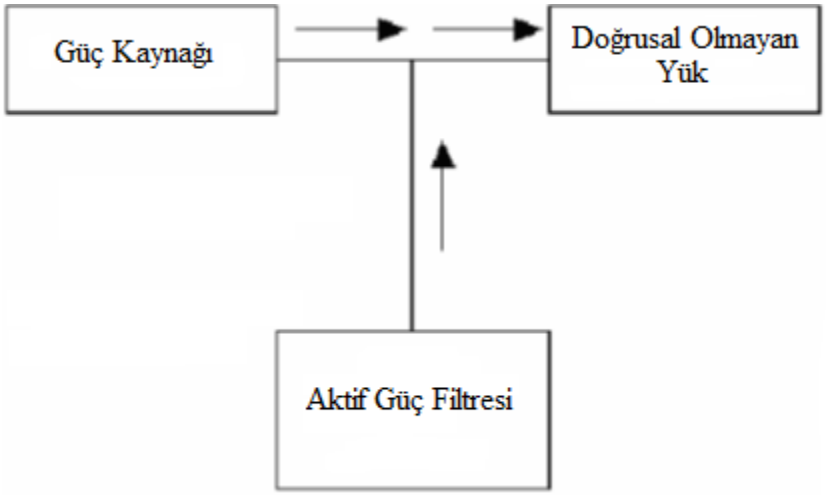


Şekil 2.7. Sönümlü filtrede f-empedans ilişkisi (Efe, 2006: 39)

2.4. Aktif Filtre

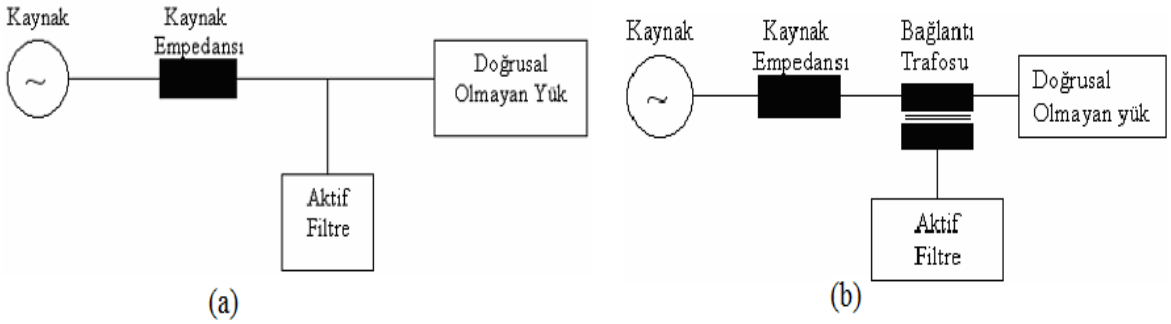
Pasif filtreler, sadece belirlenmiş harmonikleri filtrelediği için, harmonikler arttıkça devre tasarımları karmaşıklaşır ve pratikliğini yitirir. Sisteme yeni yükler eklenmesi durumunda yine pasif filtreler yeni duruma cevap veremez. Ayrıca rezonansa girme ihtimalleri ve büyük yer kaplamaları, pasif filtrelere alternatif olarak aktif harmonik filtrelerin tasarlanmasına yol açmıştır. Kullanımı gün geçtikçe artan aktif filtrelerin esasları Bird (1969) tarafından oluşturulmuş ve Ametani (1972) ile genelleşmiştir (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 13-9).

Aktif filtreler harmonikleri ortadan kaldırırlar. Bu filtreler, nonlineer bir yükün şebekeden çekeceği harmonikleri kendi devresinde üretip yüke verir. Bu sayede nonlineer yük şebekeden harmonikli akım çekmemiş olur. Sisteme verilen akım sinüzoidal formdadır.



Şekil 2.8. Aktif harmonik filtresi çalışma prensibi (İlaslaner, 2006: 46)

Aktif filtreler devreye paralel ve seri olarak iki değişik şekilde bağlanır. Daha yaygın olanı paralel aktif filtredir ve uygulamada pasif filtre ile kombine olarak da çalışabilir (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 13-10). Aktif filtreler genel yapı olarak bir PWM (dalga genişlik modülasyonu) inverterden oluşur ve sistemin reaktif güç ihtiyacına da cevap verir. Güç elektroniği teknolojileri geliştikçe aktif filtrenin işlevi artmakta kullanımı yaygınlaşmaktadır.

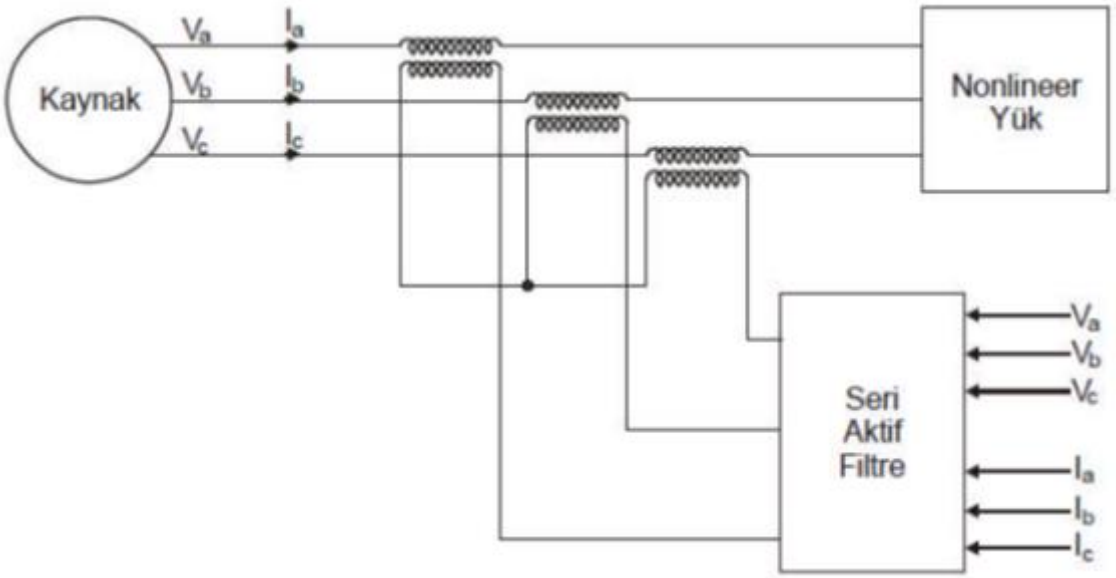


Şekil 2.9. (a) Paralel aktif filtre ve (b) seri aktif filtre prensibi (İlaslaner, 2006: 50)

Bu filtreler karmaşık bir yapıya sahiptirler ve pasif filtreye oranla daha pahalıdır ve yüksek güçlerde yüksek akımlı yarı iletken elemanlara ihtiyaç duyarlar.

2.4.1. Seri aktif filtreler

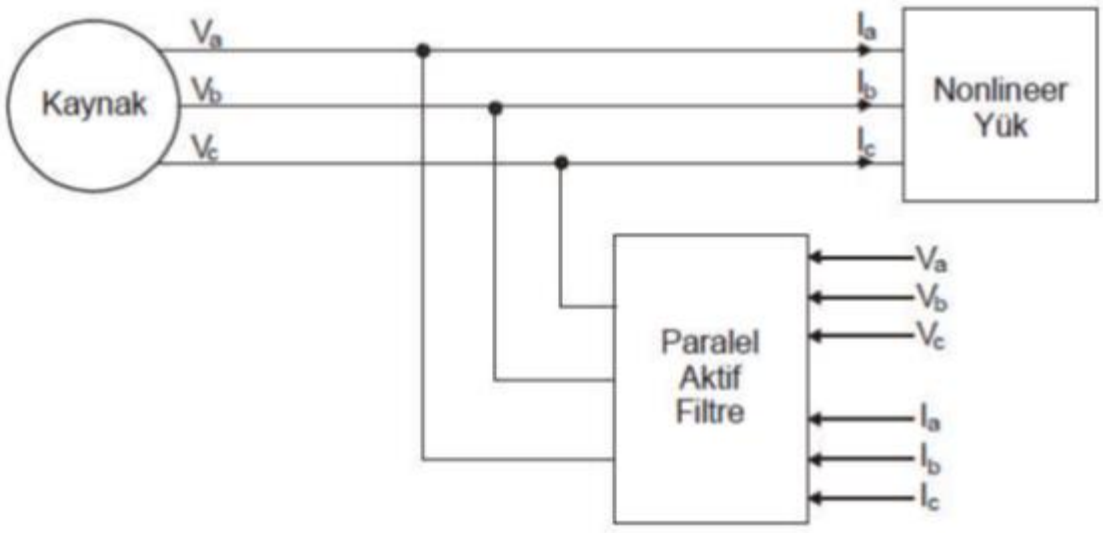
Seri aktif filtrelerin sisteme entegre edilmesi için transformatöre ihtiyaç duyulur. Gerilim harmoniklerini elemine eden seri aktif filtrenin şeması Şekil 2.10'da verilmiştir.



Şekil 2.10. Seri aktif filtre bağlantı şeması (MEB, 2016: 55)

2.4.2. Paralel aktif filtre

Harmonik içeren akım meydana getiren doğrusal olmayan yüklere karşı etkilidir. Kaynakla yük arasına sisteme paralel olarak bağlanır. Bağlantı şeması şekildeki gibidir.



Şekil 2.11 Paralel aktif filtre bağlantı şeması (MEB, 2016: 55)

2.5. Filtre Tasarım Kriterleri

Çalışmada da bahsedildiği gibi çok çeşitli filtreler tasarlanmış olmakla birlikte hepsinin birbirine göre avantajı ve dezavantajı bulunmaktadır. Tasarım için ihtiyaç duyulan

bilgilerin başında, nonlineer yüklerin oluşturduğu harmonik akım durumu ve müsaade edilen harmonik bozulma sınırı gelir. Bunun yanı sıra gereksinim duyulan reaktif güç ve şebekedeki diğer yüklerle sistemin eş değer devresinin harmoniğe göre empedans değişimi de göz önüne alınır. Ayrıca kullanılacak filtrenin çalışacağı frekans ve gerilim ile ortam sıcaklığı da tasarıma etki edecektir. Tesis için uygun çözüm bir pasif filtre olduğu gibi, aktif filtre ya da ikisinin birlikte kullanıldığı hibrit filtre de olabilir. Hifofumi Akagi, seri bir aktif filtre ile pasif filtreyi birlikte kullanarak başarılı sonuçlar elde etmiştir (Hideaki, Hifofumi, 1998: 315-322).

Temel olarak düşük derece harmonikler için tek ayarlı, büyük dereceliler için yüksek geçiren filtre kullanılır. Tek ayarlıda kapasitör değeri yüksek olacaktır, bundan ötürü harmonikler arttıkça bant geçiren filtre daha uygun düşecektir.

> "Tasarım yaparken şu hususlar özellikle göz ardı edilmemelidir: temel frekansta reaktif güç gereksinimini ve harmonik akımlarının anma değerlerini esas alan bir kondansatör anma değeri saptanması, sistem ile filtre arasındaki ters etkileşimlerin kontrol edilmesi, filtre ve sistem admitanslarının kararlı olduğu durumlarda, her harmonik frekansı için minimum toplam eşdeğer empedans hesaplanması ve böylece gerilim distorsiyonunun minimum olması" (Kocatepe ve diğerleri 2003: 13-12).

Harmonik filtre tasarımında en iyi filtrenin, o sisteme en uygun filtre olması gerektiği unutulmamalıdır. Ayrıca filtre tasarımı yapılırken, harmonik kaynağına yakın olacak şekilde konumlandırılması gerekliliği de göz ardı edilmemelidir. Çalışmanın dördüncü kısmında bahsedilecek harmonik ölçümü sonuçlarına göre bahsedilen kriterler de göz önüne alınarak, Gebze Atıksu Arıtma Tesisi için uygun filtrelere yer verilecektir.

3. ATIKSU ARITMA TESİSLERİNDE HARMONİK ANALİZİ

Atıksu arıtma tesisleri elektriksel ekipmanlarla donatılmış, yüksek elektrik tüketimine sahip tesislerdir. Elektrik enerjisini orta gerilimden alan bu tesisler, 34,5 kV'a maruz kalan ekipmanlardan; 5 V ile çalışan elektronik kartlı cihazlara kadar çok çeşitli elektrik-elektronik elemana sahiptir. Bünyesinde, harmonik üreten birçok ekipman bulunduran atıksu arıtma tesisleri, aynı zamanda bu harmonikten etkilenmektedirler.

3.1. Atıksu Arıtma Tesisinde Harmonik Kaynakları

Tez çalışmasının ilk kısmında bahsi geçen 3 grup harmonik kaynağından ilk kategoride anlatılmış olan küçük güçteki elemanlar bir atıksu arıtma tesisinde çok sayıda bulunmaktadır. Özellikle tek fazlı ve köprü diyotlu doğrultucular ile beslenen; televizyon, bilgisayar gibi cihazlar bu kategoride sayılabilir. Aydınlatma elemanları da bu kapsamda ele alana bilinir ve atıksu arıtma tesislerinde çok sayıda bulunur. Atıksu arıtma tesislerinde bulunan bu cihazlar harmonik bozulmada büyük pay sahibidir.

Tez çalışmasının ilk kısmında, ikinci kategoride harmonik kaynağı olarak bahsi geçen ark fırınları oldukça nonlineer bir karakteristiğe sahiptir ve başlıca harmonik kaynaklarındandır. Çok yüksek güç ihtiyacı olan ark fırınları darbeli bir şekilde güç tükettikleri için elektrik sistemlerinin en dengesiz yükleri arasındadır. Ark fırınından kaynaklanan bu olumsuz etkiler, enterkonnekte sistemde, ark fırını bulunmayan tesislerde de etkilerini göstermektedir (Özay N., Ermiş M., Ertaş A. ve Ertan H. B., 2016). Atıksu arıtma tesislerinde ark fırını bulunmaz; fakat tesisteki toplam harmonik bozulma, hem tesiste üretilen harmoniklerin hem de tesisin beslendiği enterkonnekte sistemdeki harmoniklerin toplamıdır. Dolayısı ile Gebze Atıksu Arıtma Tesisi gibi sanayi bölgelerinde bulunan atıksu arıtma tesislerinin, ark fırınlarından kaynaklanan harmoniklerden muzdarip olması kuvvetle muhtemeldir.

Çalışmanın ilk kısmında üçüncü kategori harmonik kaynağı olarak bahsedilen, atıksu arıtma tesislerinde motor sürmede kullanılan güç elektroniği düzenekleri ve konverterler; devrelerinde çokça bulunan yarı iletken elemanlar ve çok karmaşık yapıları sebebi ile nonlineer bir karakteristiğe sahiptirler. Son yıllarda vana motorlarından pompalara kadar tüm motorlarda frekans eviriciler kullanılmaktadır. Güç elektroniği

tekniğindeki gelişme ve bunu takip eden yaygınlaşma, bu kategorideki elemanların toplam harmonik bozulmadaki payını artırmıştır. Atıksu arıtma tesislerindeki başlıca harmonik kaynaklarının ayrıca incelenmesinde fayda olacaktır.

3.1.1. Transformatörler

Trafolar, her atıksu arıtma tesisinde bulunmakta olup birer harmonik kaynağıdırlar. Trafoların mıknatıslanma özelliği harmonik üretmelerinin temel sebebidir (Bkz. Şekil 1.8). Atıksu arıtma tesisinde trafo güçleri tesisin büyüklüğüne göre 100 kVA'dan 6000 kVA'ya kadar çıkabilir. Tesisin AGAT (Alçak Gerilim Dağıtım Panosu) panosuna konuşlandırılan trafonun primer tarafı ve sekonder tarafı yıldız bağlı ve primerin yıldız noktası topraklanmış ise 3 ve katı harmonikler şebekeye akar. Trafonun primeri üçgen bağlı ise; şebekeden 3 ve katları harmonikler çekilmez fakat bu durumda da 5. ve 7. harmonikler tesise verilir. Aynı zamanda sekonder üçgen ise, şebekeye 3. ve katı harmonikler aktarılmaz (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 8-10 - 8-11).

Son dönemde atıksu arıtma tesislerinde eğilim, tesisinin trafosunun yıldız/üçgen bağlanması yönündedir ki harmonikler açısından en uygun bağlantı şekli böyledir.

3.1.2. Jeneratörler

Atıksu arıtma tesisleri çalışma prensibi gereği enerjisiz kalmaması gereken tesislerdir. Dolayısı ile bu tesislerde yedek enerji kaynağı olarak jeneratör kullanmak gereklidir. Arıtma tesislerinde jeneratör gücü genelde trafo gücü ile aynı seçilir.

Tesiste kullanılacak jeneratörlerde de trafolarda olduğu gibi bağlantı şekillerinin harmonikler üzerinde büyük etkisi vardır. Atıksu arıtma tesislerinde kullanılan jeneratörün statoru yıldız bağlı ise 3 ve katı harmonikler sadece faz-nötr geriliminde bulunur. Aynı zamanda yükün yıldız noktası tesisin nötrüne irtibatlı ise faz iletkenlerinden sisteme 3 ve katı harmonikler geçecektir (Efe, 2006: 15).

Atıksu arıtma tesislerinde jeneratörden kaynaklanan harmoniklerin etkisini en aza indirgemek için jeneratörün sargılarının yıldız bağlı olması ve yıldız noktasının izole olması tercih edilir. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde bulunan 2 adet 2250 kVA'lık

trafonun bağlantıları bu şekilde yapılmıştır. Çıkık kutup şekli harmoniğe sebebiyet verdiğinden, tesise alınacak olan jeneratörün kutupların ve endüvi yarıklarının uygun tasarlanması harmonik seviyesini düşürecektir (Bkz. Şekil 1.9).

3.1.3. Gaz deşarjı ile çalışan lambalar

Bu prensibe göre çalışan lambalar, atıksu arıtma tesislerinde hem iç aydınlatmada hem de saha aydınlatmada yaygın şekilde kullanılmaktadır. 630 kVA trafoya sahip bir atıksu arıtma tesisinde yaklaşık 400 adet bu prensiple çalışan lamba olduğunu göz önüne alırsak, bu lambaların arıtma tesislerindeki bozulmada ciddi anlamda bir payı olduğu düşünülebilir. Tez çalışması kapsamındaki harmonik ölçümü gündüz yapıldığı için; elde edilen verilerde bu prensibe göre çalışan lambaların ve balastlarının etkisi bulunmamaktadır. Çevre aydınlatma ve bina aydınlatmaların devreye girmesinin, harmonik bozulmayı artıracağı öngörülmektedir.

3.1.4. Elektronik balastlar

Son zamanlarda, elektronik balastlar çıkışlarında pasif filtre ile birlikte üretilirler (Korovesis, Vokas ve Gonos, 2004: 1787). 630 kVA trafoya sahip bir atıksu arıtma tesisinde yaklaşık 200 adet elektronik balast bulunmaktadır. Atıksu arıtma tesislerinin ihale aşamasında hazırlanan şartnamelerde, kullanılacak elektronik balastların dahili filtreli tarif edilmesinin harmonikler açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Diğer taraftan manyetik balastlı floresan aydınlatmada THD değeri %3,6 iken elektronik balast kullanıldığında bu değer %7,41'e çıkmaktadır (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 6-11). Günümüzde atıksu arıtma tesislerinde, manyetik balast yerine elektronik balast kullanılmaya başlanmış olması, çalışmanın konusu açısından elektronik balastları daha önemli bir yere koymaktadır

Bünyesinde harmonik üreten birçok ekipman bulunduran atıksu arıtma tesisleri, aynı zamanda bu harmonikten etkilenen elemanlara da sahiptir. Bu etkilere ve etkilenen ekipmanlara değinmek faydalı olacaktır.

3.2. Harmoniklerin Atıksu Arıtma Tesislerindeki Ekipmanlara Etkileri

Tez çalışmasının ilk kısmında detaylı şekilde incelenen, harmoniklerin elektrik sistemlerindeki ekipmanlara etkileri bu bölümde atıksu arıtma tesisi özelinde irdelenecektir. İlk bölümde bahsedilen etkilerden; rezonans olayı, döner makineler üzerindeki etkiler, kondansatör üzerindeki etkiler, trafolar, kesiciler, sigortalar ve aydınlatma elemanları üzerindeki etkiler atıksu arıtma tesisi ile ilişikli olduğundan özellikle incelenecektir.

3.2.1. Harmoniklerin atıksu arıtma tesislerindeki rezonans etkisi

Atıksu arıtma tesisleri dizayn edilirken 50 Hz. frekansta rezonansa girmeyecek şekilde tasarlanır, fakat temel frekans dışında frekansı olan akım veya gerilimler diğer bir adı ile harmonikler, tesisi etkiler ise rezonans tehlikesi ortaya çıkar. Tesisin rezonans frekansı herhangi bir harmoniğin frekansına yakın bir değerde oluşur ise bahsi geçen harmoniğin akım ve gerilim genliği aşırı artar. Atıksu arıtma tesisinde yapılan ölçüm rezonans konusunda bilhassa 5. harmonik üzerinde durulması gerektiğini gözler önüne sermiştir. Bu tez çalışmasının 4. bölümünde yer verilen ölçümler, kompanzasyon devrede iken harmoniklerin daha yüksek olduğunu göstermektedir. Gebze Atıksu Tesisi'nde 5. harmoniğin yüksek olması ve kondansatörler devrede iken rezonans frekansına yaklaşıyor olmasının, bu durumun ortaya çıkmasına sebebiyet verdiği düşünülmektedir.

Atıksu arıtma tesislerinde harmonik kaynaklı rezonansın önlenmesi için şu gibi önlemler alınabilir:

- Tesisin tasarımı esnasında ekipman seçiminin, bu durum dikkate alınarak yapılması, trafonun üçgen bağlı olması, pompa motorlarını sürmede yüksek darbe sayılı konverter kullanımı,
- 5. harmoniği süzecek filtre kullanılması,
- Kompanzasyonun gereği kadar yapılması,
- Sistem rezonans frekansının 250 Hz.'den uzak tutulması,
- Kondansatörlere seri bir bobin yerleştirilmesi. Bu durumda bobin rezonansın etkisini sınırlayacaktır (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 10-23).

Tesise yeni bir ekipman eklendiğinde, sistemin rezonans riskinin değiştiği unutulmamalıdır. Özellikle yeni bir trafo, yeni kondansatörler ya da büyük güçlü nonlineer bir yük eklenmesi durumunda yeni bir rezonans ve harmonik analizi söz konusudur.

3.2.2. Atıksu arıtma tesislerindeki döner makineler üzerindeki etkisi

Atıksu arıtma tesislerinde döner makineler yaygın olarak kullanılır, pompa motorları, jeneratörler, blower motorları ve motorlu vanalar bunların başlıcalarıdır. Aşırı ısınma ve diğer sayılan etkiler sonucu harmonikler döner makinelerin performansını %5 ile %10 arasında düşürmektedir (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 7-8). Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nin kurulu gücünün %65'ini motorlar oluşturmaktadır. Özellikle pompa binasında bulunan 315 kW'lık 3 fazlı asenkron motorlarda saatte 15 kWh ile 30 kWh arası bir kayıp söz konusudur.

3.2.3. Atıksu arıtma tesislerindeki kondansatörler üzerindeki etkisi

Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde 1000 kVAr gücündeki kompanzasyonda toplam 80 adet kondansatör kullanılmaktadır. Kondansatörlerin bulunduğu kompanzasyon panolarına bobin yerleştirmek uygulamada sıkça karşılaşılan bir durumdur. Atıksu arıtma tesisleri gibi yüksek elektrik sarfiyatının olduğu ve reaktif gücün fazla olduğu sistemlerde bu uygulama elzemdir; fakat Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde bu bobinler sisteme eklenmemiştir. Resim 3.1'de sol taraftaki pano bobinli kompanzasyon panosudur ve sağ taraftaki atıksu arıtma tesisi kompanzasyon panosuna göre daha idealdir. Sistemdeki harmonik genelde ilk olarak kondansatör patlamaları ve bozulmaları olarak kendini gösterir. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde Teknik ekip ayda ortalama 5-6 kondansatör değişimi rapor etmektedir.

Resim 3.1. İdeal bir kompanzasyon panosu (sol); Gebze A.A.T.'deki kompanzasyon panosu (sağ) (Yazar tarafından fotoğraflanmıştır)

3.2.4. Atıksu arıtma tesislerindeki transformatörler üzerindeki etkisi

Atıksu arıtma tesisleri genelde, yerleşim yerlerine ve sanayi bölgelerine yakın konuşlandırıldığı için; bağlı bulundukları şebeke harmonikler açısından kirli olabilmektedir. Atıksu arıtma tesislerinde 6000 kVA büyüklüğe kadar yağlı tip trafo kullanılmaktadır. Harmoniklerin trafolar üzerindeki etkisinin azaltılması için üretilmiş olan k-faktörlü trafolara tesislerde yer verilmesinin THD'nin düşürülmesi açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Harmonikler var iken hesaplanan toplam girdap akımı kaybının, temel frekanstaki girdap akımı kaybına oranına k-faktör denir (Şekerci, 2013: 37). k-Faktörü anma gerilimi veya anma gücü gibi transformatörler için imalatçısı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğüdür (Linden, 1996: 633-645). k-faktörü ideal olan trafolar temelde normal trafolardan fazla farklılık göstermez fakat harmoniklerin oluşturduğu ilave ısınmaları önleyecek şekilde tasarlanmışlardır. Üretilirken harmonikli durum göz önüne alınmıştır. Örneğin sargılarda çok telli iletken ile girdap kaybı azaltılmaya çalışılmıştır ya

da düşük kayıplı çelik saclar ile manyetik kayıplar minimize edilir denir (Şekerci, 2013: 37). k-faktörlü trafoların hesabı ve seçimi çok dikkatli yapılmalıdır. AAT (Atıksu arıtma tesisi) projelerinin ikinci kademesi de hesaba katılmalıdır. Sisteme yeni ekipmanlar eklendiğinde bu hesabın sapacağı unutulmamalıdır. 4. bölümde yer verilen ölçümler ışığında atıksu arıtma tesisleri için k-13 faktör trafonun yeterli olacağı düşünülmektedir.

Atıksu arıtma tesislerinde harmonik konusunda dikkat edilmesi gereken bir diğer husus, harmoniklerin yaptığı etkinin frekansı ile doğru orantılı artmasıdır. Yüksek mertebeden harmoniklerin etkisi, düşük mertebedekilere göre daha yüksek olacaktır. Bu bilgi çerçevesinde; ölçümlerde ortaya çıkan 35. Ve 37. harmoniklerdeki yüksekliğin üzerinde itina gösterilmesi gerektiği düşünülmektedir.

3.2.5. Atıksu arıtma tesislerindeki kesiciler ve sigortalar üzerindeki etkisi

Kesiciler, sigortalar elektrik devrelerinin aşırı akımdan, yüksek voltajdan zarar görmesini engelleyen hayati elemanlardır. Çizelge 3.1'de de görüldüğü gibi atıksu arıtma tesislerinde çok sayıda sigorta ve kesici bulunur.

Çizelge 3.1. Trafo gücüne göre atıksu arıtma tesislerindeki takribi şalt malzemesi adedi (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Trafo Gücü kVA	Sigorta ve kesici adedi	Kontaktör adedi
250	265	185
400	285	220
630	326	276
2000	524	423

Şalt elemanları atıksu arıtma tesisinin hayati bölgelerinde yer aldığından, bunların arızalanması, gereksiz atması atıksu arıtma sürecinin kesintiye uğraması ve büyük sorunlar oluşması demektir.

Atıksu arıtma tesisleri, bulunduğu bölgede halk sağlığı açısından çok önemlidir ve bazı bölgelerde özellikle yaz mevsiminde tesisin bir arıza yüzünden çalışamaması durumu

bölge için oldukça önem arz edebilir. Sistemi harmonikten arındırmak bu arızaları en aza indirmek için oldukça faydalı olacaktır.

3.2.6. Atıksu arıtma tesislerindeki aydınlatma elemanları üzerindeki etkisi

Atıksu arıtma tesislerinde genelde gaz deşarjı prensibine bağlı çalışan lambalar kullanılır. İç aydınlatmada floresan lamba kullanılırken, çevre aydınlatmada ve dış aydınlatmada sodyum buharlı lambalar tercih edilir. Tez çalışmasının ilk kısmında da bahsedildiği gibi, kayıplara yol açan harmonikler aynı zamanda lambaların ömrünü kısaltmaktadır.

Çizelge 3.2. Trafo gücüne göre atıksu arıtma tesislerindeki takribi gaz deşarjlı lamba adedi (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

Trafo Gücü kVA	Fluoresant lamba adet	Sodyum buharlı lamba adet
250	188	27
400	316	28
630	336	32
2000	421	34

Çizelge 3.2'de görüldüğü gibi bir atıksu arıtma tesisinde çok sayıda aydınlatma elemanı kullanılmaktadır ve bunların harmonik sebebi ile bozulması ya da aydınlatma kalitesinin düşmesi işletme giderlerinin artırması açısından istenmeyecek bir durumdur.

4. GEBZE ATIKSU ARITMA TESİSİ'NDE HARMONİK ÖLÇÜMÜ VE FİLTRELEME ÖNERİLERİ

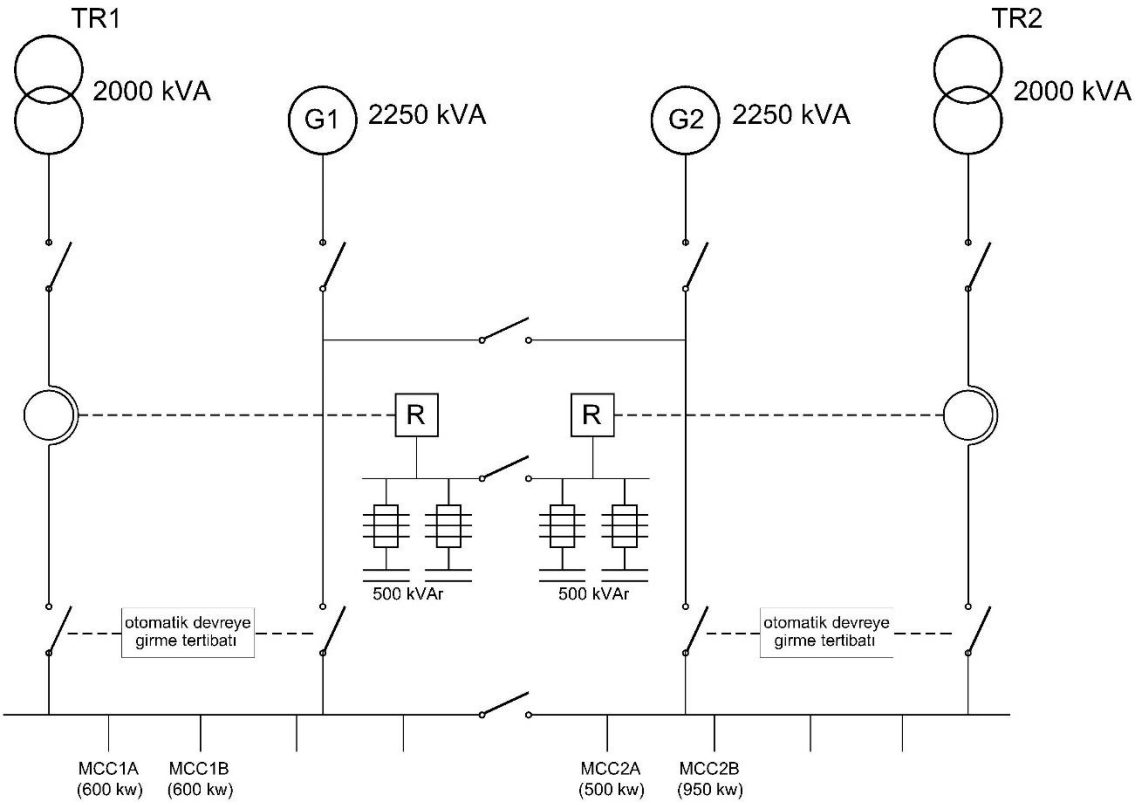
Gebze Atıksu Arıtma Tesisi, Kocaeli ilinde Marmara Denizi kıyısında inşa edilmiş olup konvansiyonel tipte bir arıtma tesisidir. Diğer atıksu arıtma tesislerine harmonik açısından örnek teşkil etmesi adına, çalışmaya temel oluşturan harmonik ölçümleri, harmoniğe karşı herhangi bir önlemi bulunmayan bu tesiste gerçekleştirilmiştir.

> "04.11.2008 tarihinde yapım işi ihalesi yapılmış olan tesis 2011 Nisan ayı içinde işletmeye alınmıştır. 13.09.2011 tarihinde de geçici kabulü yapılan tesis Genel Müdürlüğümüz tarafından işletilmeye başlanmıştır. Tesise Çayırova, Şekerpınar, Eskihisar, Darıca ve Gebze yerleşim alanlarından gelen evsel atıksular alınmaktadır. Tesis, 670 000 kişiye hizmet verecek kapasitededir" (Gebze Plastikçiler Organize Sanayi Bölgesi, 2016).

4.1. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi

670 000 kişiye hizmet veren tesis, teknik ekibinin verdiği bilgiye göre ayda ortalama 850 000 kWh elektrik enerjisi tüketmektedir. 2 adet 2000 kVA'lık kuru tip transformatöre sahip olan tesiste dağıtım odasında bu iki trafonun paralel ya da ayrı ayrı çalışabilmesini sağlamak amacı ile kuplaj panosu da düşünülmüştür.

Gerekli durumlarda tesisi şebekeden izole edilmiş bir şekilde beslemek üzere, tesise 2 adet 2250 kVA gücünde dizel jeneratörler yerleştirilmiştir. Tesiste ayrıca uzaktan izleme sistemi de çalışır haldedir.



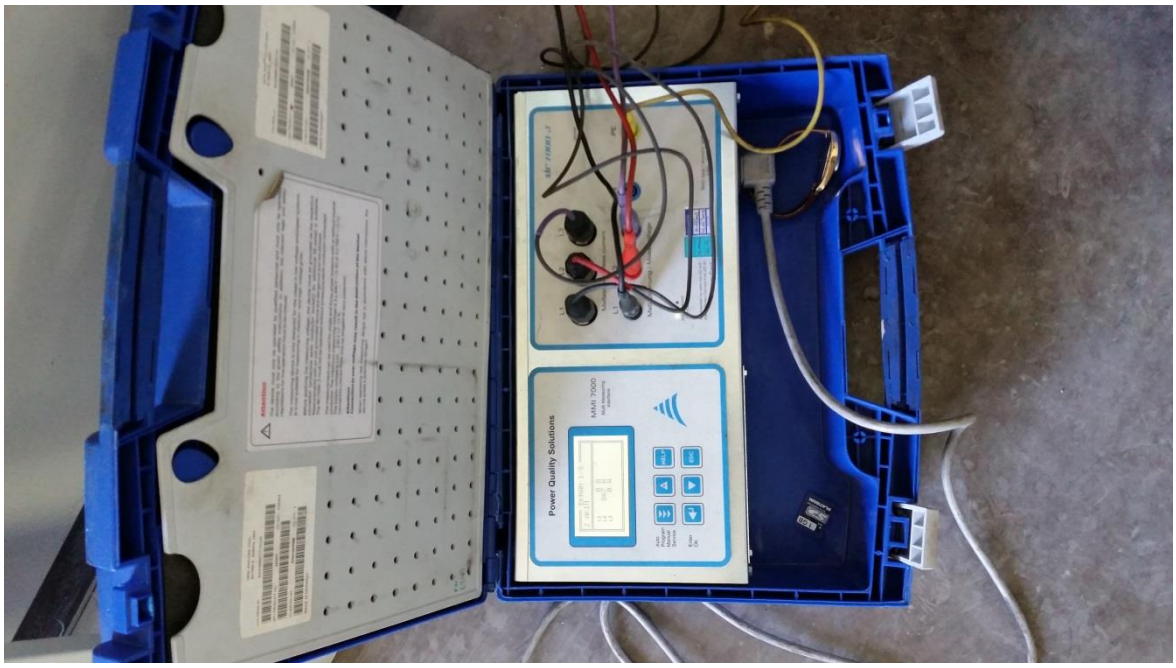
Şekil 4.1. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi tek hat şeması (Yazar tarafından oluşturulmuştur)

4.2. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde Harmonik Ölçümü

Günümüzde sinyal işleme tekniklerinin gelişmesi ile harmonik büyüklüklerin izlenmesi de kolaylaşmıştır, dolayısı ile son zamanlarda harmonik ölçer cihazlar da bu gelişime ayak uydurmuştur. Temelde enerji analizörü gibi çalışan bu cihazlar, temel dalga dışında, harmonik dalgalarını da tespit ederek ölçümde hesaba katar. Harmonik ölçüm cihazının dağıtım panosundaki bağlantılarını yaptıktan sonra, gerekli kayıtların yapılması için bir süre beklemek gerekmektedir. Ölçüm değerleri, ölçü aletini üreten firmanın oluşturduğu Excel tabanlı bir program yardımı ile görüntülenebilmektedir. Ölçüm sonunda, çalışmada kullanılan cihaz bize bu süre zarfında bağlı olduğu baradaki aşağıdaki değerlerin zamana göre kaydını verir:

- Aktif güç, reaktif güç ve görünür güç,
- Akım,
- Gerilim,
- Güç faktörü,
- Frekans,

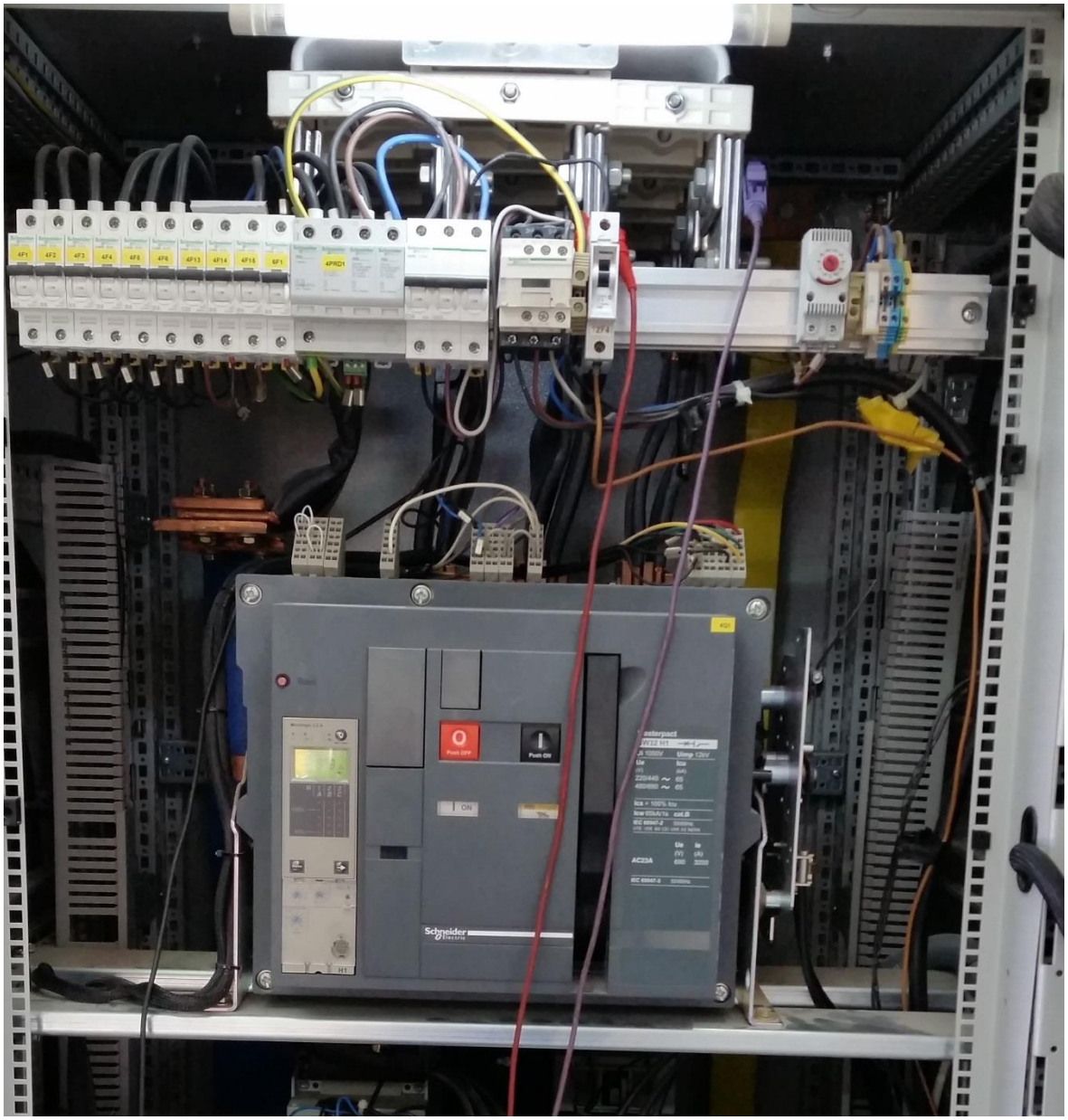
- Toplam harmonik bozulma,
- 3. mertebeden 51. mertebeye kadar gerilim harmonikleri,
- 3. mertebeden 51. mertebeye kadar akım harmonikleri,
- Tüm harmoniklerin amperaj değerleri,
- Tüm harmoniklerin her faz için ölçümleri.



Resim 4.1. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde harmonik ölçümünün yapıldığı ölçüm aleti (Yazar tarafından fotoğraflanmıştır)

Ölçüm 11 Mart 2016 tarihinde 10:00 – 15:00 saatleri arasında yapılmıştır. Ölçüm esnasında, harmonik ölçümü alanında profesyonel olarak çalışan bir elektrik mühendisinden yardım alınmıştır. Ölçüm yapılacak panodan beslenen tesis kısmı ölçüm esnasında yüksek kapasitede işletilmeye çalışılmıştır. Tüm ölçümler, tesisin tam zamanlı çalışanları olan elektrik mühendisi ve elektrik teknisyenlerinin refakatinde gerçekleştirilmiştir.

Ölçüm yapılan aletin üzerinde 3 faz için gerilim girişleri, yine 3 faz için akım girişleri ile nötr girişi ve koruma iletkeni girişi bulunmaktadır. Nötr bağlantısı, ölçü aletine bağlı iletkenin ucundaki bir mandal yardımı ile kolayca panonun nötr barası ile yapılabilmektedir. Aynı şekilde gerilim bağlantıları da mandallar yardımı ile ilgili baralara yapılabilmektedir.



Resim 4.2. Ana dağıtım panosu ile ölçü aletinin bağlantısı (Yazar tarafından fotoğraflanmıştır)

Akım ölçümü, manyetik alan üzerinden yapıldığı için akım bağlantısı, kıvrımlı bir izole iletken düğümünün baranın arkasından geçirilmesi ile mümkün olmaktadır. Bu durum tecrübesiz biri için hayati tehlike oluşturmaktadır. Dağıtım panolarında yapılan harmonik ölçümlerinde fiziki şartlar genelde bazı fazlarda akım bağlantısı yapılmasını imkânsız kılar. Bu çalışma kapsamında yapılan ölçümlerde de, panoların dar yapılarından dolayı MCC-2B Panosu haricindeki ölçümlerde, ölçü aleti ile panonun akım bağlantıları bir fazdan yapılabilmiştir.

Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde transformatörlerin bulunduğu betonarme yapının yakınında tüm tesisin beslendiği bir alçak gerilim dağıtım binası bulunmaktadır. Bu bina içerisinde temel olarak Trafo-1 çıkış hücresi, Trafo-2 çıkış hücresi, Kompanzasyon-1 panosu, Kompanzasyon-2 panosu, kuplaj panosu, ölçü panosu, MCC panoları bulunmaktadır. Bu çalışma kapsamında yapılan harmonik ölçümünde hem Trafo-1 panosunun beslediği kısma hem de Trafo-2 kısmına yer verilmiştir. Ayrıca beslediği ekipmanların karakteristiği ve önemi gereği MCC-2B panosunda da ölçüm yapılmıştır.

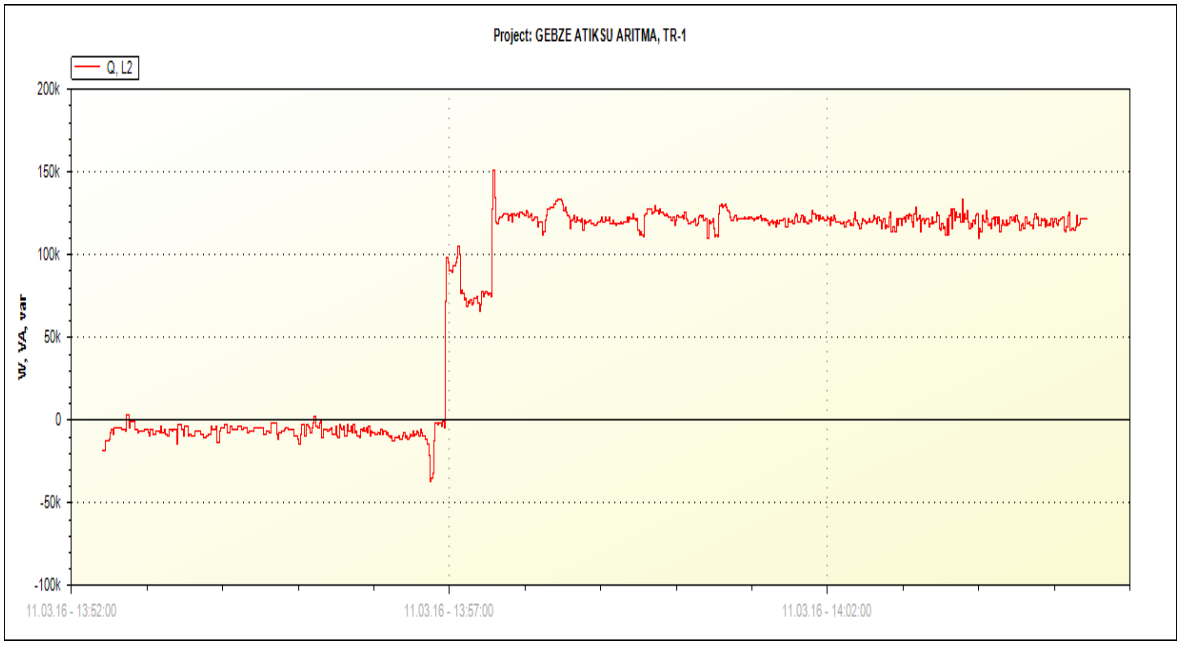
Toplam 3 noktada yapılan ölçümlerin yaklaşık 15'er dakikalık kayıtları, bahsi geçen kısımlar yaklaşık %25-%35 arası bir kapasitede çalışırken yapılmıştır.

4.2.1. Trafo-1 panosu harmonik ölçümü

TR-1 panosu 2000 kVA'lık trafodan aldığı elektriği tesise iletmektedir. Pano tesisteki elektrik motorlarını, pompaları, aydınlatma panolarını, MCC panolarını, bilgisayarları beslemektedir.

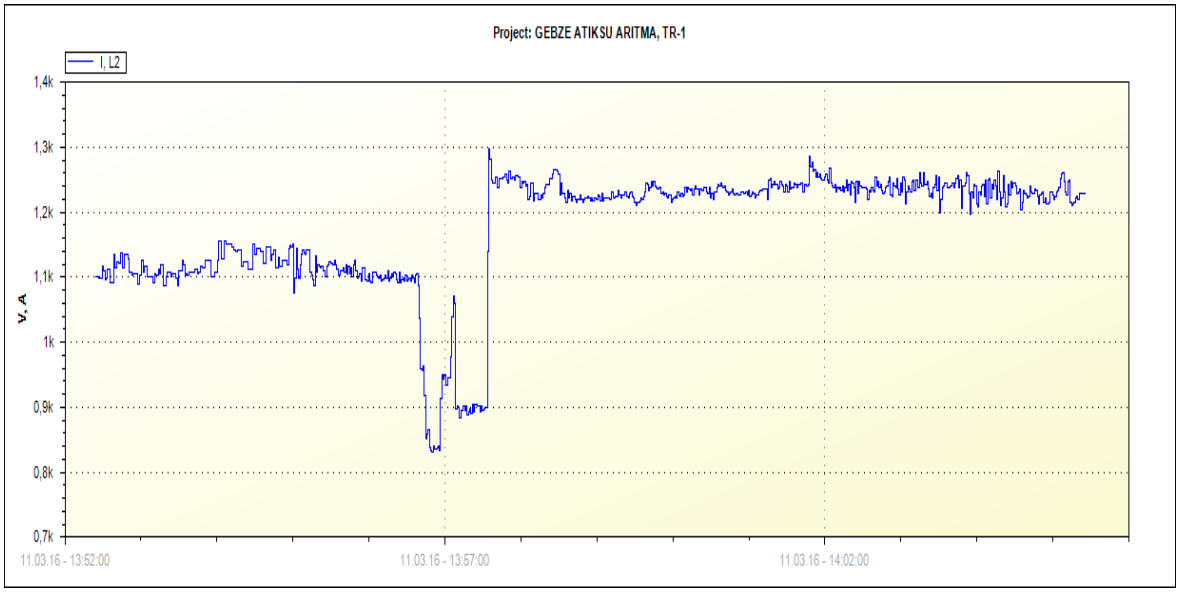
Resim 4.3. Ölçüm öncesinde TR-1'in faz başına amperaj durumu (Yazar tarafından fotoğraflanmıştır)

Yapılan ölçüm sırasında pano yaklaşık 800 kVA'lık bir yükü beslemekte idi. Çalışma esnasında, kompanzasyonun da harmonikler üzerindeki etkisini göz önüne sermek maksadı ile kompanzasyon panosu devre dışı bırakılmış ve bir süre de bu şekilde ölçüm yapılmıştır. Panoda hali hazırda mevcut bir filtreleme sistemi bulunmamaktadır.



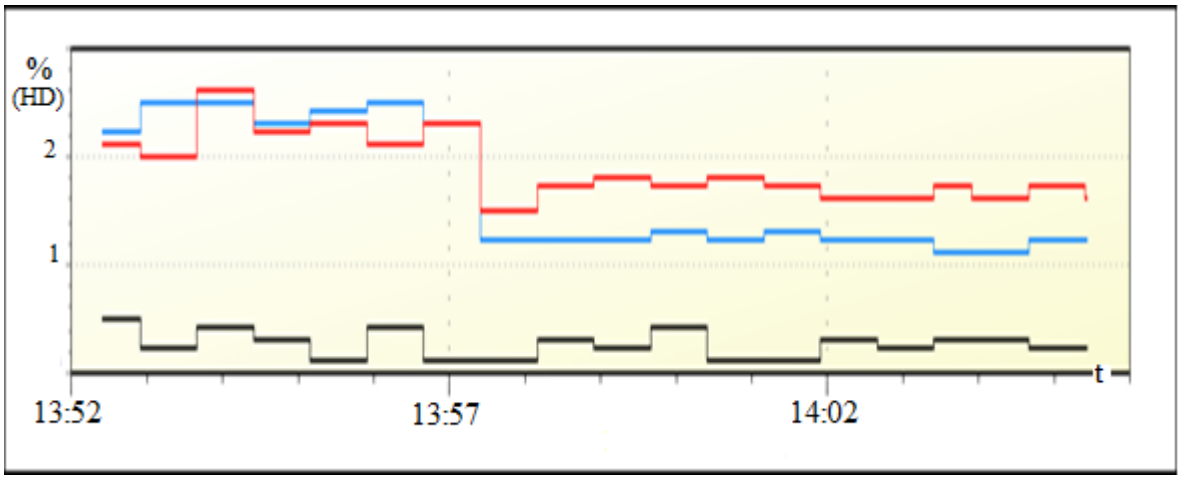
Şekil 4.2. Ölçüm esnasında reaktif güç sarfiyatının seyri

Şekil 4.2'de görüldüğü gibi ölçüme başlandığında sıfırın altında olan reaktif güç, kompanzasyon panosu devre dışı bırakıldıktan sonra 130 kVAr seviyesine çıkıyor. Aynı esnada aktif güç değişmezken, görünür güç reaktif güce bağlı olarak bir miktar artıyor. Bu süre zarfında ana bileşenin frekansı değişmezken, akımın seyri Şekil 4.3'teki gibidir. Burada panonun yapısından dolayı sadece L2 fazından akım bilgisi alınabilmiştir.



Şekil 4.3. Ölçüm esnasında akımın seyri

Kayıt devam ederken, kompanzasyonun devre dışı bırakılma anı saat 13:57 civarındadır. Şekil 4.4'te gerilimin üçüncü, beşinci, yedinci harmoniklerinin seyri verilmiştir.

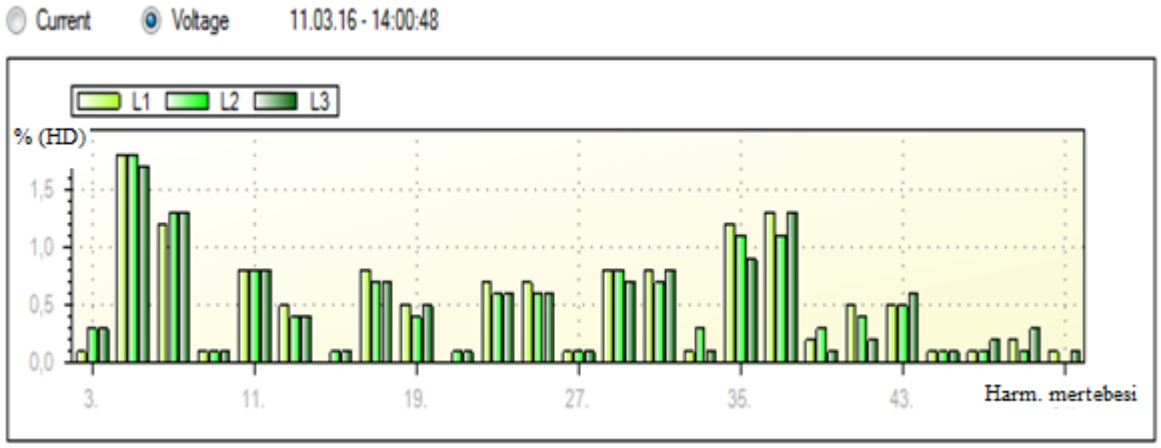


Şekil 4.4. 3., 5. ve 7. gerilim harmoniklerinin seyri

Grafikteki siyah çizgi üçüncü harmoniği, kırmızı çizgi 5. harmoniği ve mavi çizgi 7. harmoniği göstermektedir. Çalışma esnasında gerilimin üç fazında da toplam harmonik bozulma %4 civarındadır. 5. ve 7. harmoniklerde görünen dalgalanma nispeten daha fazladır.

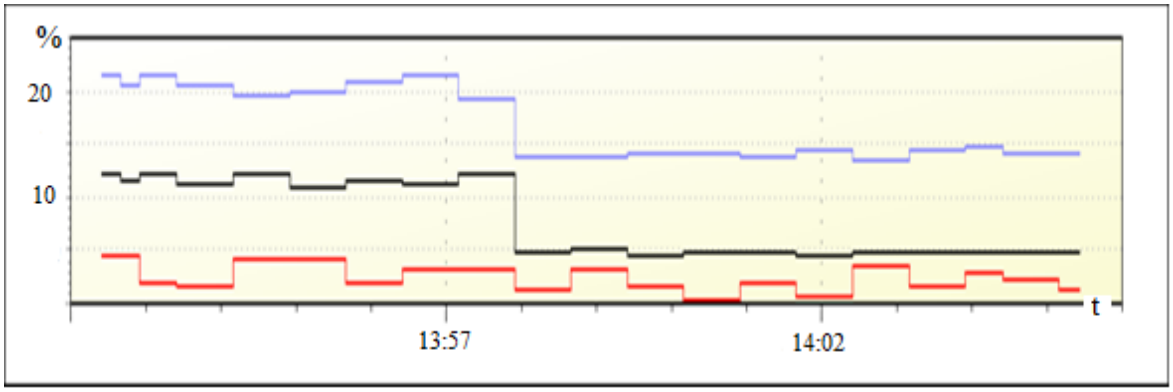
Eldeki sonuçlara göre; kompanzasyonun devreden çıkarılması gerilimdeki toplam harmonik bozulmayı pek etkilememektedir. Hemen hemen eşit yüklenmiş fazların oluşturduğu bu üç fazlı dengeli sistemde gerilimdeki toplam harmonik bozulma az dalgalı bir seyir izlemektedir.

Trafo-1'in gerilim harmoniğinin daha detaylı analiz edilebilmesi için Şekil 4.5, tüm mertebelerdeki harmoniklerin görülebilmesi açısından yardımcı olacaktır. Grafiğe göre en dikkat edilmesi gereken mertebeler beşinci ve yedinci mertebeler olarak göze çarpıyor. Bu durumun ortaya çıkmasının sebebi Trafo-1'in beslediği yüklerin karakteristiği olabileceği gibi besleme gerilimindeki mevcut bozulma da olabilir.



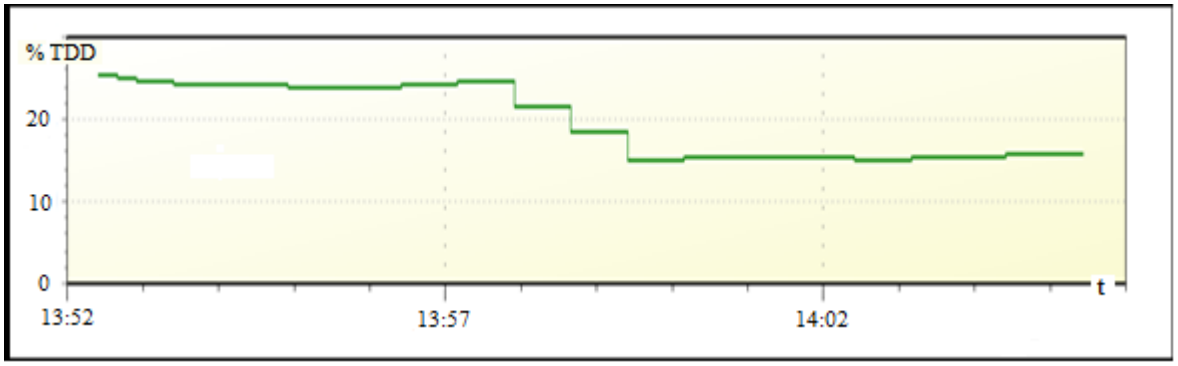
Şekil 4.5. Gerilim harmoniklerinin çubuk grafiği

Akımda bulunan harmonikler, gerilimdekilere oranla üzerinde daha itinalı durulan harmoniklerdir. Bu çalışmada da akım harmoniklerinin üzerinde bilhassa durularak detaylı analizi yapılacaktır. TR-1 panosu harmonik ölçümü senaryosunda akım harmoniklerinin durumu Şekil 4.6' da verilmiştir.



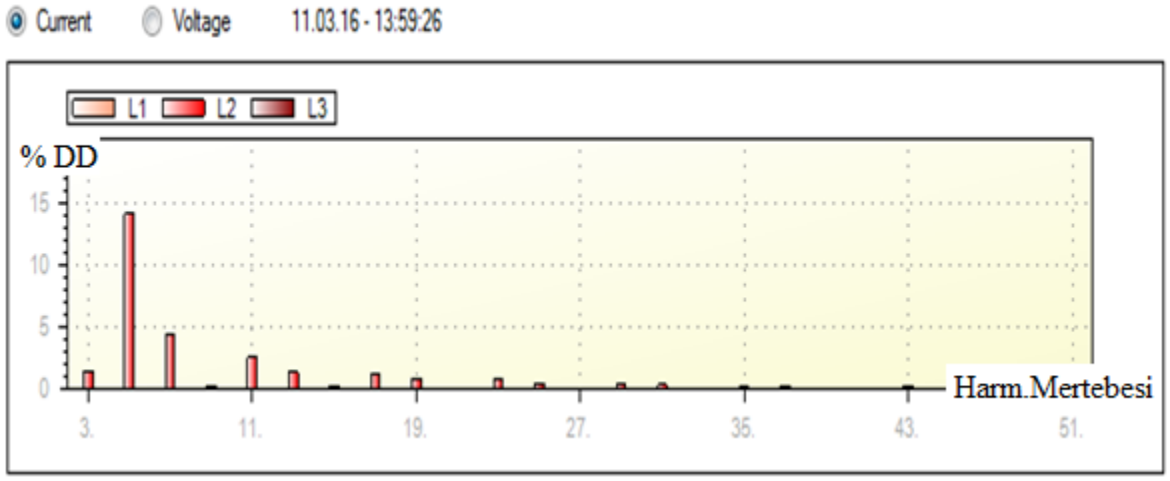
Şekil 4.6. Akımdaki 3., 5. ve 7. harmoniklerin bozulma durumu

Mavi renkli çizgi beşinci harmoniği, siyah çizgi yedinci ve kırmızı çizgi üçüncü harmoniği göstermektedir. Görüldüğü üzere tüm harmonikler 13:57'deki manevradan sonra bir düşüş göstermiştir. Kondansatörler devrede iken harmonikler daha yüksektir. Yapılan manevradan sonra bir miktar düşerler fakat yine de istenmeyen boyuttadırlar. Bu ölçüme göre; tesisin akım harmonikleri tekil olarak ele alındığında da toplam olarak ele alındığında da standartların üzerindedir. Aynı esnada ölçülen akımdaki toplam harmonik bozulma ise; kompanzasyon şalteri kapatılmadan önce kondansatörlerin etkisi ile %25 civarında iken, şalter açıldıktan sonra %17 civarına düşmektedir.



Şekil 4.7. Akımdaki toplam harmonik bozulma (TDD)

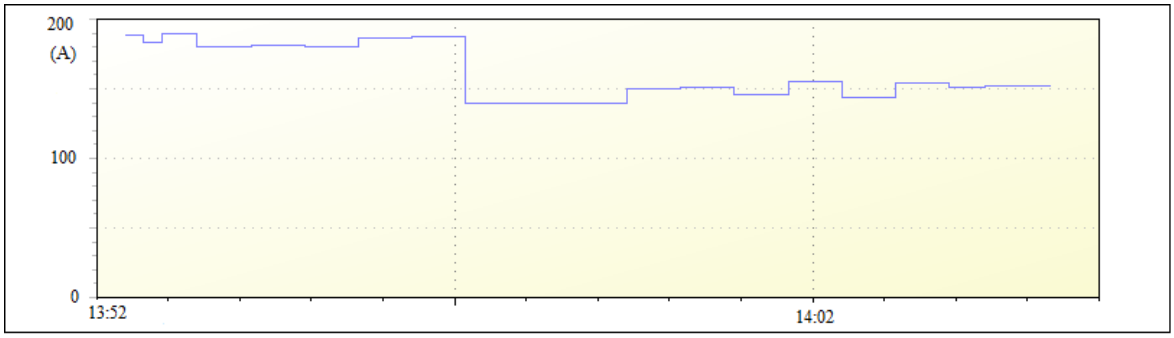
Bahsi geçen bozulma istenmeyen boyutlardadır. Ölçülen tüm akım harmoniklerinin Şekil 4.8'deki çubuk grafiğine bakacak olursak, ön plana çıkan harmoniğin beşinci harmonik olduğunu görürüz.



Şekil 4.8. Akım harmoniklerinin çubuk grafiği

Çubuk grafiklerde dikkat edilmesi gereken husus, manevra öncesi ve sonrasının toplamının süreye bölünmesi ile elde edilen verilerden oluşmasıdır. Tesis için önemli olan normal çalışma şartlarındaki bozulma olduğundan, esas değerler biraz daha yüksek olarak düşünülmelidir.

Diğer taraftan yüzde olarak bahsettiğimiz akım harmoniği bozulmalarına sebebiyet veren akım bileşenlerinin amperaj değerleri de problemin çözümü için kullanılacak filtrelerin tasarlanmasında hesaba katılmalıdır. Bu değer, üzerinde durulan durum için L2 fazında 5. Harmonik için 200 amper civarındadır.



Şekil 4.9. L2 fazında 5. harmonik

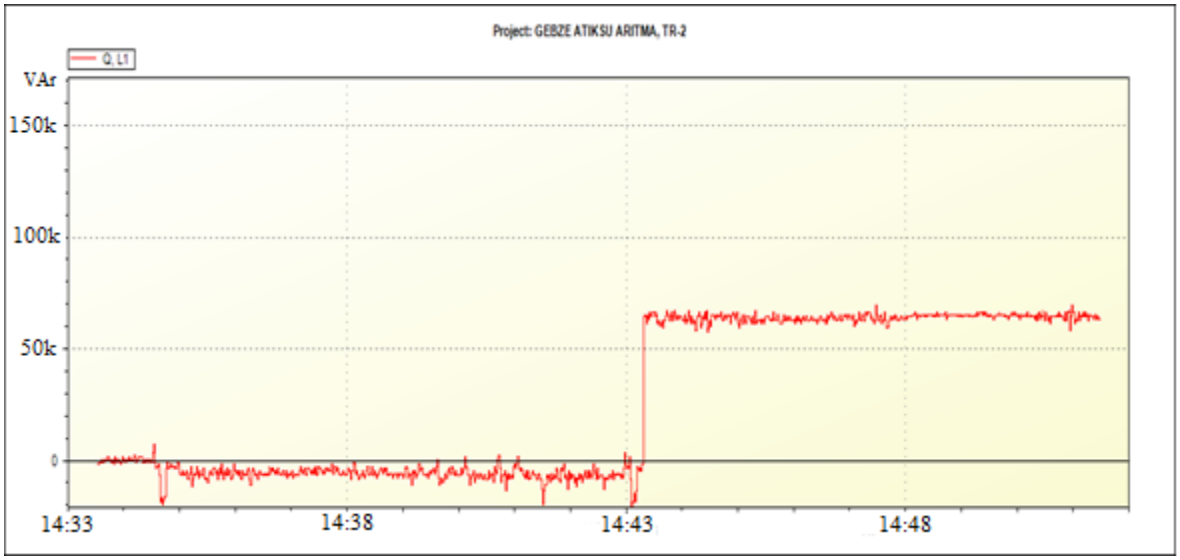
Yapılan ölçüm sonucu tesisin TR-1 kısmında gerilimdeki toplam bozulma %4 civarı ve akımdaki bozulma %25 mertebelerindedir. 200 amperlik 5. harmoniğin aktif gücü 20 kW civarındadır. Bu da 5. harmoniğin sıfırlanmasının elektrik faturasına ayda yaklaşık 1400 Avro yansıması demektir. Ayrıca akımdaki harmonik bozulması %25 -30 civarı olan bir sistemde ortalama 0,96 olan güç faktörü; 0,88'e düşer (Yalçın, 2016). Çalışma esnasında panonun yaklaşık %35 kapasitede çalıştığı düşünülürse daha yüksek kapasitelerde bu değerin artacağı düşünülebilir. Bu değerler, TR-1 panosunun beslediği kısımda harmoniklere önlem alınması gerekliliğini ortaya koymaktadır.

4.2.2. Trafo-2 panosu harmonik ölçümü

Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde yükler, TR-1 Panosu ve TR-2 panosu olmak üzere iki ana pano tarafından beslenmektedir. Trafo-1'dekine benzer şekilde ölçüm, TR-2 panosunda da kompanzasyon devrede iken ve değilken sürdürülmüştür. İşlem sırasında panonun sağladığı görünür güç 350 – 400 kVA arasında idi. Panoda harmonikler için herhangi bir önlem alınmamış olup, beslediği yükler frekans eviricili motorlar gibi, harmonik üretmeye yatkın yüklerdir.

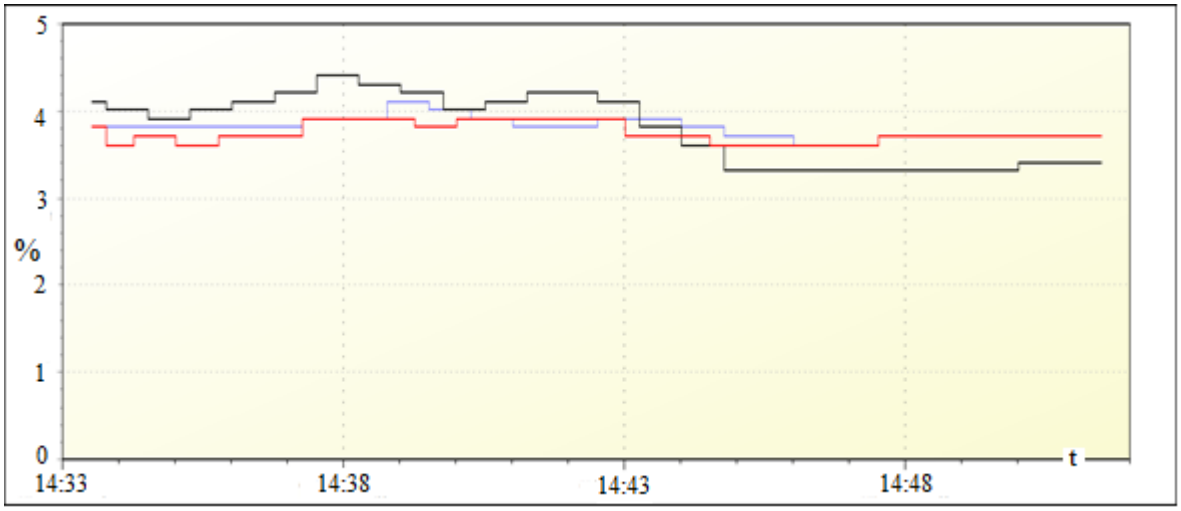
Resim 4.4. Ölçüm esnasında kompanzasyon durumu (Yazar tarafından fotoğraflanmıştır)

Kompanzasyon panosu kapatılmadan evvel yaklaşık 50 kVAr'lık kapasitif reaktif güç sağlayan kondansatör devrede idi. Şekil 4.10, ölçüm esnasındaki reaktif güç seyrini göstermektedir. Buna göre manevra anı saat 14:43 civarıdır.



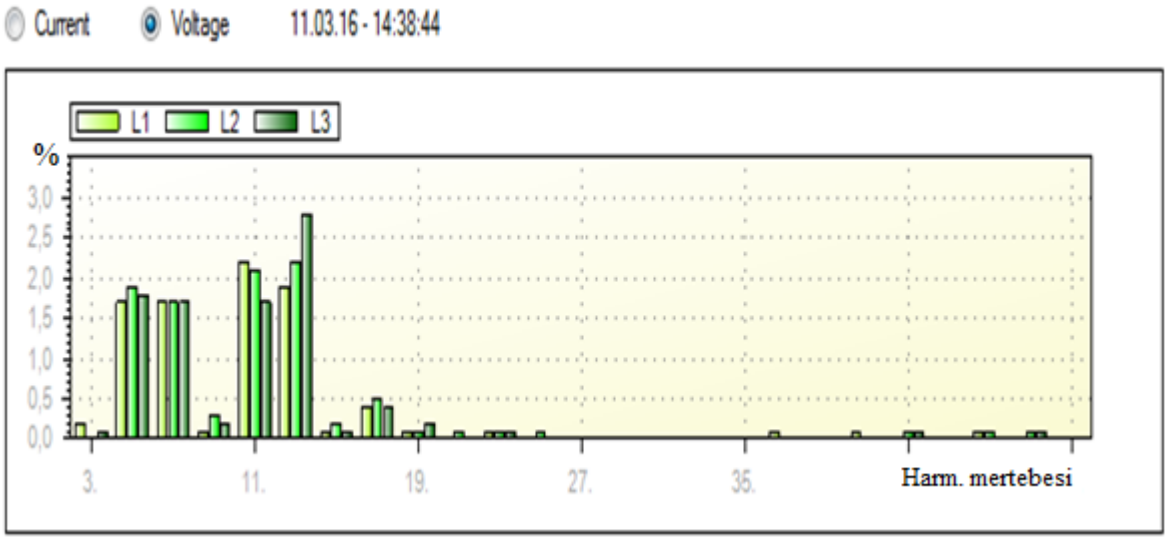
Şekil 4.10. Ölçüm esnasında TR-2 reaktif güç sarfiyatının seyri

TR-2 panosunda akım bilgisi, fiziki kısıtlamalardan dolayı yalnızca L1 fazından alınmıştır. Akımın da dengeli dağılmış olması göz önüne alınarak, diğer fazlardaki akım harmoniklerinin de benzer olacağı öngörülmüştür. 650 amper seviyesinde çekilen akım, kompanzasyon devre dışı kalınca 700 amper civarına çıkıyor. Bu esnada gerilimde görülen harmonikler %5 değerine yakın seyrediyor.



Şekil 4.11. TR-2 gerilim harmonikleri

Şekil 4.11'deki siyah renkli çizgi üçüncü fazı, mavi çizgi ikinci fazı ve kırmızı çizgi birinci fazı göstermektedir. Görüldüğü üzere 14:43'te yapılan manevra gerilim harmoniğini fazla etkilememekle birlikte bir miktar düşüşe sebebiyet veriyor. Gerilim üzerinde yapılan analizler sonucu beşinci, yedinci, on birinci, on üçüncü harmoniklerin tüm fazlarda yüksek çıktığı görülmektedir. Bu durum Şekil 4.12'de kolaylıkla görülebilir.



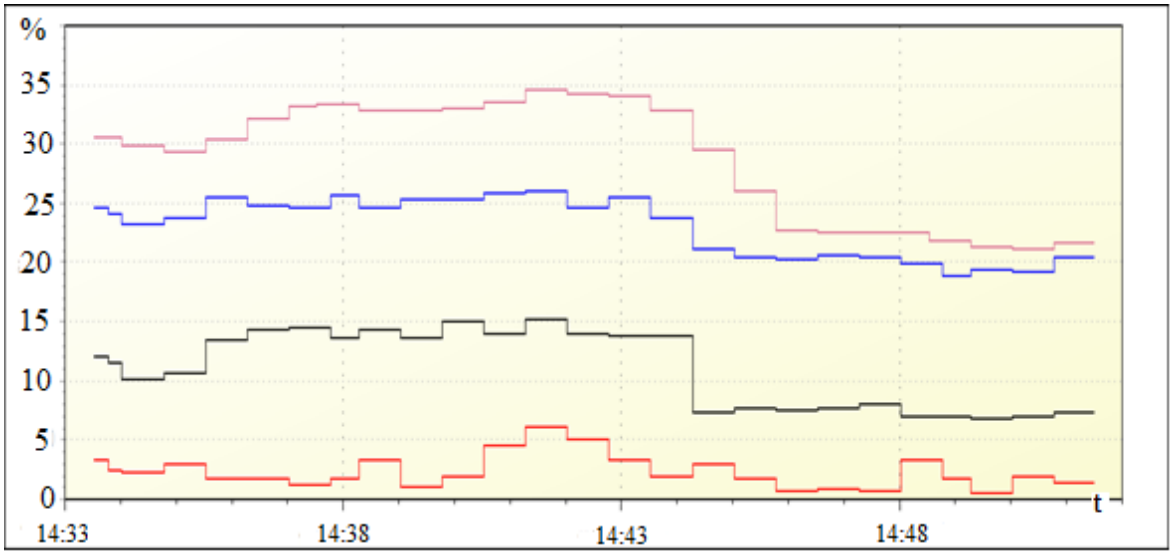
Şekil 4.12. TR-2 gerilim harmonikleri çubuk grafiği

Bu ölçümde de bir öncekine benzer şekilde daha fazla üzerinde durulması gereken kısım akımdaki harmoniklerdir. Aktif filtre ya da pasif filtre gibi herhangi bir çözüm düşünülmemiş olan Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde yüksek akım harmonikleri görülmektedir. Yapılan ölçüm de bunu teyit eder niteliktedir.

Saat 14:33 ile 14:43 arasında tesis normal çalışma koşullarında iken yapılan kayıtlar, akımın beşinci ve yedinci harmoniklerinin oldukça yüksek olduğunu gösteriyor. Bu mertebeler dışında diğer birçok mertebede de belirlenen tekil harmonik sınırı aşılmış durumdadır. Üçüncü harmonik %5 civarında seyretmekte iken; yedinci harmonik %10 – 15 arasında dalgalanmakta ve beşinci harmonik %25'i bulmaktadır.

Saat 14:43'ten sonraki kayıtlarda, kompanzasyon devre dışı kaldığı için bu değerler ufak bir miktar azalıyor fakat herhangi bir filtre tasarımında ilk şartlar göz önüne alınacaktır.

Şekil 4.13'de görüldüğü üzere toplam harmonik bozulma akımda %35 seviyesinden %25'e oturmuş. Bu değerler IEEE STD 519-19922 standardında belirlenen değerlerin üzerinde olup, kayıplara ve arızalara sebebiyet vereceği aşikârdır.



Şekil 4.13. TR-2 akımdaki toplam ve tekil harmonik bozulmalar

Yukarıdaki grafikte en üstteki çizgi toplam bozulmayı gösterirken, altındaki diğer çizgiler tekil harmoniklerdeki bozulmalardır. Toplam harmonik bozulma diğerlerinin bileşkesi durumundadır.

Trafo-2'nin dağıtım panosunda yapılan ölçümler de ilki ile benzer sonuçları vermektedir. Her iki pano için de birer harmonik filtresi tasarlamanın gerekliliği ortaya çıkmaktadır. TR-2 panosuna bağlı olan MCC-2B panosunda ayrı bağlantılar yapılarak

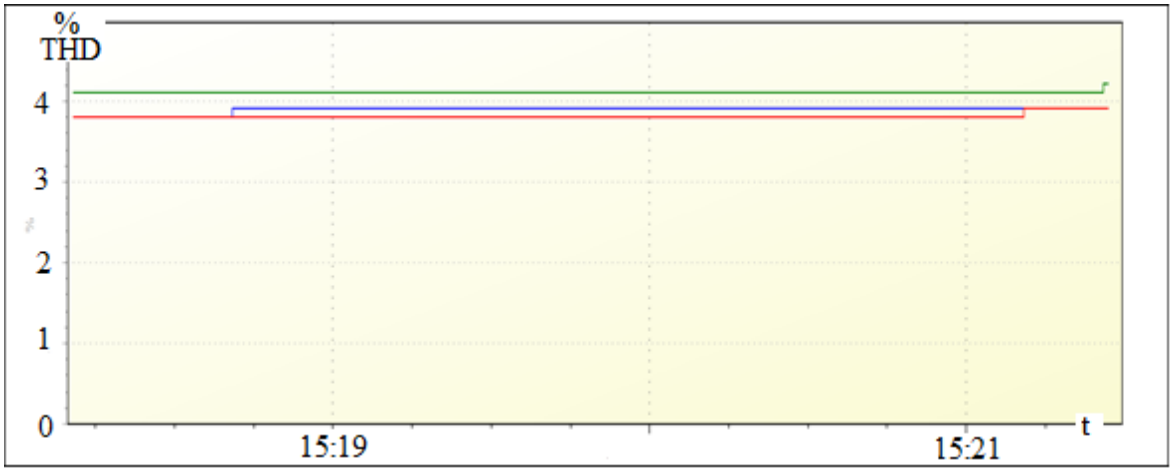
başlı başına bir ölçüm yapılmıştır. Bu ihtiyacın duyulma sebebi, bu panonun beslediği yükün harmonikler açısından hassas bir yük olmasıdır.

4.2.3. MCC-2B panosu harmonik ölçümü

MCC-2B panosu, 3 adet her biri 315 kW güce sahip bloweri enerjilendiriyor. Ölçümün yapıldığı esnada bu blowerlerden biri bakımda bir diğeri ise yedek konumda beklemede idi. Kayıtlar sadece bir blower çalışırken tutulmuştur. Sistemde blowere bir adet frekans evirici ile yol verilmektedir. Daha önce de bahsedildiği gibi, frekans eviriciler başlı başına birer harmonik kaynağıdır.

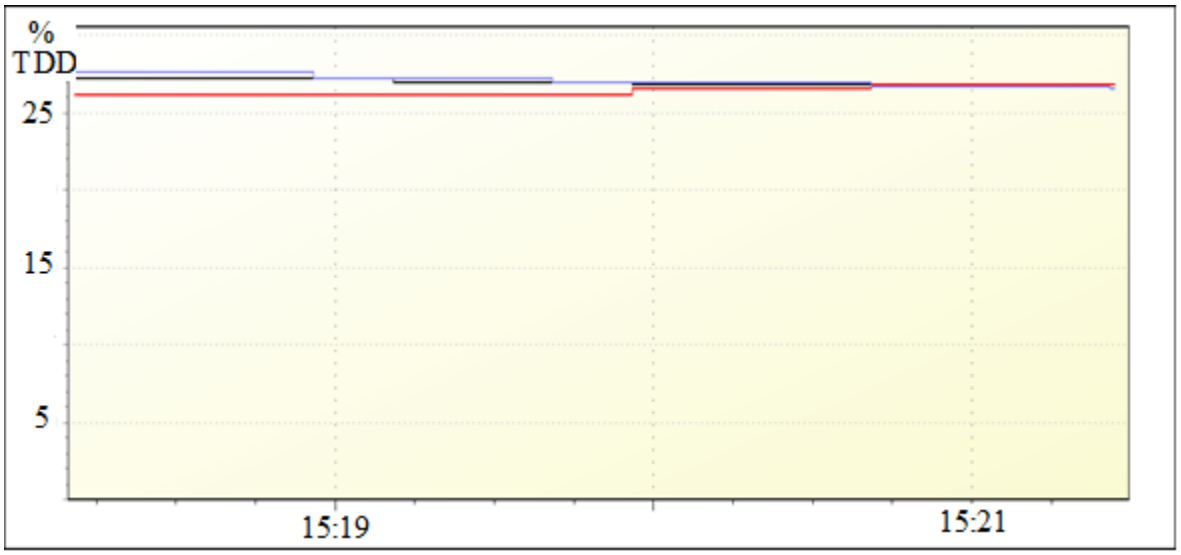
Resim 4.5. Ölçüm esnasında MCC-2B analizörü (Yazar tarafından fotoğraflanmıştır)

Tesisin bu kısmında saat 15:18 ile 15:22 arasında kısa süren bir ölçüm yapılarak, sistemde dolaşan harmonikler göz önüne serilmek istenmiştir. Bu ölçüm de akım ölçer kabloları, çıplak baradan atlatmak gereği olmadığı için, akım bağlantıları kolayca yapılarak, üç fazdan da akım bilgisi alınabilmiştir.



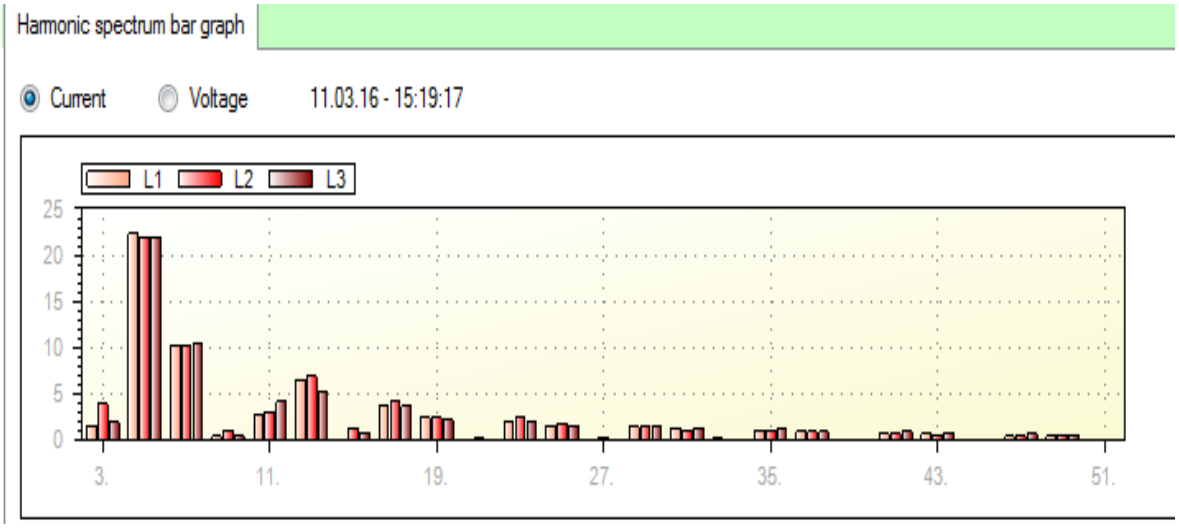
Şekil 4.14. MCC-2B'de 3 fazın gerilimindeki bozulma

Üç faz için de gerilim harmonikleri %3.8 ile %4.2 arasında seyretmiştir. Akım harmonikleri ise %26 ile %27.5 arasında salınmıştır. Buradaki ölçüm, daha önce yapılan, dengeli TR-1 ve TR-2 sistemlerinde akım harmoniklerinin de tüm fazlarda birbirine yakın olacağı varsayımını destekler niteliktedir.



Şekil 4.15. MCC-2B'de 3 fazın akımlarındaki bozulma

Ölçüm esnasında fazlar dengeli sayılabilecek bir durumda akımı paylaşmış idi. Birinci faz 400 A., ikinci faz 500 A. Ve üçüncü faz 390 A. civarı akım çekmekte iken harmoniklerin faz faz durumu Şekil 4.16'daki gibidir:



Şekil 4.16. Akım harmoniklerinin faz-faz dağılımı

Akım harmonikleri içinde beşinci harmoniğin bozulması % 25 oranında olup bu bozulma yedinci mertebede %10 civarındadır. Yapılan ölçümler sonucu %27 civarı çıkan akımdaki bozulma kabul edilebilir seviyede olmayıp, MCC-2B panosunun beslediği sistemde harmonik üretildiğine de emare olmuştur.

Ölçümler de gösteriyor ki harmonik açısından herhangi bir önlem alınmamış Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde harmonik düzeyleri kabul edilebilir değerlerin çok üzerindedir. Bu, atıksu arıtma tesislerinin, yük karakteristiği olarak harmonik üretmeye yatkın olduğunu göstermektedir. Tesisin ekipmanlarının 3. bölümde de bahsedildiği gibi harmonik bozulmalardan fazlaca etkilendiği de göz önüne alınırsa, atıksu arıtma tesisleri için harmonik filtre kullanımının kaçınılmaz olduğu ortaya çıkıyor.

4.3. Gebze Atıksu Arıtma Tesisi İçin Filtreleme Önerileri

Harmonik analizinin son aşaması tesis ya da yük için bir harmonik filtrenin tasarlanmasıdır. Yapılan ölçümler neticesinde ortaya çıkan akım harmoniklerindeki yükseklik, Gebze Atıksu Arıtma Tesisi için bir harmonik filtre tasarlanması gerekliliğini gözler önüne sermiştir. Çalışmanın önceki kısımlarında da bahsedildiği üzere çok sayıda harmonik filtre çeşidi vardır. Bunlardan herhangi biri genel manada diğerlerinden daha uygun olmadığı gibi; her elektrik sisteminin ideal filtresi, o tesise has bir irdeleme gerektirir.

4.3.1. Filtre tasarımında dikkat edilmesi gereken hususlar

Her tesisin karakteri farklı olduğundan, bir tesis için ideal olan filtre başka tesiste işe yaramayabilir. Filtre tasarımı yapılırken dikkat edilmesi gereken hususları şöyledir:

- Tesisin reaktif güce olan ihtiyacının belirlenmesi ki filtrenin değeri de 50 Hz.'de sağladığı reaktif güce eş değerdir.
- İstenilen TTD ve THD değerinin belirlenmesi.
- Tesisin ya da ilgili yükün harmonik akımlarının spektrumunun belirlenmesi.
- Harmonik akımları esas alan kapasitör değerinin belirlenmesi (Kocatepe ve diğerleri, 13-12).

Ölçüm yapılan tesiste akım harmonikleri özellikle de 5. harmonik yüksek görünmektedir. 5. harmoniğin sistemden elemine edilmesi harmonikteki toplam bozulmayı oldukça azaltacaktır. Günümüzde en yaygın olarak kullanılan tek ayarlı filtreler böyle durumlarda öne çıkmış olan harmonik mertebesinin yok edilmesi için oldukça ucuz ve pratik bir yöntemdir.

4.3.2. Tek ayarlı filtre tasarımı

Tek ayarlı filtreler en yaygın kullanılan ve en uygun filtrelerdir (Kocatepe ve diğerleri, 2003: 13-12). Tek ayarlı filtreler çalışmanın önceki kısımlarında bahsedilen paralel pasif filtrelerin bir çeşididir. Filtre kolunun endüktansı ve kapasitansının birbirine eşit olacağı rezonans frekansı 'f_r' şu şekilde bulunur:

$$\omega L = \frac{1}{\omega C} \tag{4.1}$$

$$1 = \omega LC \tag{4.2}$$

$$1 = f_r^2 Л^2 4\mathrm{LC} \tag{4.3}$$

$$\frac{1}{Л^2\ 4\ \mathrm{LC}} = f_r^2 \tag{4.4}$$

$$f_r = \frac{1}{2\Pi\sqrt{LC}} \quad (4.5)$$

n. mertebeden harmonik için tasarlanmış filtredeki L ve C reaktans değerleri Eş.4.6 ve Eş.4.7'deki gibi olacaktır:

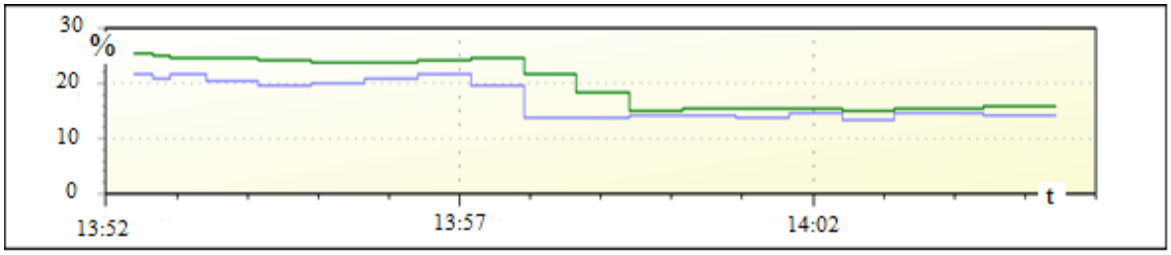
$$x_{L_n} = \text{n } \omega \text{ L} \quad (4.6)$$

$$x_{c_n} = \frac{1}{n\omega C} \quad (4.7)$$

Tek ayarlı filtre tasarlar iken dikkat edilmesi gereken en önemli husus rezonans olayının harmonik akımının frekansında meydana gelmemesi gerektiğidir; aksi taktirde o harmoniğin akım değeri istenmeyen şekilde artacaktır. Bu durumun önüne geçilmesi için filtrenin L ve C elemanlarının ayarlandığı frekans, rezonans frekansından %3 ile %10 arasında daha küçük seçilir.

Tek ayarlı filtreler 50 Hz. frekansında reaktif güç kompanzasyonunda da kullanılır. Bu sebeple evvela Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nin reaktif güç ihtiyacı belirlenmelidir. Bu çalışmada TR-1 AG panosu ölçümlerine göre TR-1'in beslediği kısım için tek ayarlı filtre tasarlanacak olunursa, harmonik ölçümler esnasında elde ettiğimiz reaktif güç sarfiyatı baz alınabilir. 3 faz için toplam reaktif güç ihtiyacı yaklaşık 420 kVAr'dır. %15-20 toleranslı bir hesap yapacak olursak 500 kVAr'lık bir filtre uygun görünmektedir. Piyasada yaygın kullanılan ve Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nin alçak gerilim dağıtım panosu (AGAT) odasındaki diğer panolara da uygunluk gösteren kompanzasyon panoları 800 mm*800 mm*2200 mm ebatlarındadır. Bu panolar 5 kata bölündüğünde her katına 50 kVAr'lık reaktör koymak mümkün olmaktadır. Bu da 250 kVAr'lık bir pano etmektedir ki TR-1 için bu panodan 2 adet yeterli olacaktır.

Ölçümlerde elde edilen verilere bakıldığında, tesisin harmonik spektrumu 5. harmoniği ön plana çıkarmaktadır.



Şekil 4.17. L2 fazında akım harmonikleri

Şekil 4.17' de yeşil çizgi akımdaki toplam bozulmayı gösterir iken, mavi çizgi 5. harmonikteki bozulma seviyesidir. Burada dikkate almamız gereken değer, tesisin normal çalışma esnasındaki yani kompanzasyon devrede iken olan bozulma değeridir. Bu değer yaklaşık %22 civarındadır. Filtrede bu harmoniği elemine edecek özelliğe sahip bobin kullanılacaktır. Piyasada 5. harmonik için sıklıkla kullanılan p= %5.67 ve f_L=210 Hz. değerlerindeki bir bobin bu filtreye uygun olacaktır.

Ölçüm esnasında eşlik eden kompanzasyon ve filtre firmasının Eylül 2016 tarihli analizi sonucu; 1 adet 250 kVAr filtreli kompanzasyon panosu için gerekli malzemeler ve adedinin yaklaşık piyasa fiyatları şu şekildedir:

- 50 kVAr Reaktör 5 adet (200 Avro),
- 80 kVAr Kondansatör (4*20 kVAr) 525 V 5 adet (40 Avro),
- 50 kVAr Kontatktör 5 adet (50 Avro),
- NH Sigorta ayırıcı 5 adet (40 Avro),
- 125 A NH Sigorta 15 adet (3 Avro),
- 800 mm * 800 mm * 2200 mm ebatlarında dikili tip pano (1600 Avro).

Bu listeyi göz önüne alırsak işçilik hariç 250 kVAr'lık bir panonun yaklaşık maliyeti vergileri dâhil 3 295 Avro olmaktadır. Bu durumda pasif filtreli kompanzasyon panosunun kVAr başına fiyatı montaj hariç yaklaşık 15 Avro olmaktadır.

Görüldüğü gibi mevcut reaktif güçte 5. harmoniğe özel tasarlanmış 2 adet 250 kVAr'lık tek ayarlı kompanzasyonlu pasif paralel filtrenin yaklaşık maliyeti 6 590 Avro'dur. TR-2 de hesaba katılırsa tüm tesisin filtreleme fiyatı yaklaşık 13 180 Avro olmaktadır. Milyonlarca liralık bir yatırım için, özellikle önemi de hesaba katılırsa, küçük bir meblağdır. Tasarlanan bu filtre 5. harmoniği elemine edip toplam harmonik bozulmayı

düşüreceği gibi seçilen frekansı sayesinde 5. harmoniğin rezonansa girmesine de mahal vermeyecektir.

Aynı ölçümlere binaen, bir başka firmadan daha tek ayarlı pasif filtreli kompanzasyon panosu teklifi istenmiştir. Tasarlanan pano ve fiyatı ölçüm yapan firmanınkilerle örtüşmektedir.

Çizelge 4.1. Özel bir firmadan alınan pasif filtre teklifi

KONTAKTÖR ANAHTARLAMALI fr:189Hz DE-TUNED HARMONİK FİLTRELİ KOMPANZASYON PANOSU
Qn = 1000kVAr / 400V - Qcap = 1320kVAr / 480V
Gruplandırma : 2x25kVAr + 19x50kVAr = 1000kVAr
Kademelendirme : 2x25kVAr + 4x50kVAr + 3x100kVAr + 3x150kVAr = 1000kVAr

Sıra No	Malzeme ve/veya Hizmet Tanımı	Marka	Miktar
01	De-Tuned Harmonik Filtre Reaktörü Qn:25,00kVAr, Un:400V, p:%7 (fr:189Hz) Ürün Kodu : B44066D7025E400	EPCOS	2 Adet
02	De-Tuned Harmonik Filtre Reaktörü Qn:50,00kVAr, Un:400V, p:%7 (fr:189Hz) Ürün Kodu : B44066D7050E400	EPCOS	19 Adet
03	Güç Kondansatörü ; Qn:33kVAr, Un:480V, PhaseCap Compact Ürün Kodu : B25673A4332A080	EPCOS	40 Adet
04	Kontaktör ; 25kVAr Ürün Kodu : B44066S3210N230	EPCOS	2 Adet
05	Kontaktör ; 50kVAr Ürün Kodu : B44066S6012N230	EPCOS	19 Adet
06	Reaktif Güç Kontrol Rölesi ; Prophi - 12 Kademeli Ürün Kodu : 52.08.003	JANITZA	1 Adet
07	Sigortalı Yük Ayırıcı ; NH00 Boy, 160A Ürün Kodu : T5922002	JEAN MULLER	21 Adet
08	NH Sigorta Buşonu ; 63A, 120kA, Çift İndikatör Ürün Kodu : N5013805	JEAN MULLER	6 Adet
09	NH Sigorta Buşonu ; 125A, 120kA, Çift İndikatör Ürün Kodu : N5014905	JEAN MULLER	57 Adet
10	Dahili Tip Sac Panel , IP31 Takribi Boyutlar : 3200 x 2200 x 800 mm (Genişlik x Yükseklik x Derinlik)	TSE	1 Set
11	Panel işçilikleri, bara, kablo, fan, sigorta ve benzeri panel içi montaja ait şalt ve sarf malzemeleri	TSE / ISO	1 Set
12	Sahada süpervizörlük ve devreye alma hizmetleri (elektriksel ve mekaniksel her türlü de-montaj ve montaj işleri ile pano dışı tüm malzemeler kapsam dışıdır)	SİSTEMA	1 Set
TOPLAM (EURO)			**16.800.-**

Teslim Süresi : 6-8 Hafta

Notlar :

- Kompanzasyon korunması için giriş besleme şalteri dahil edilmemiştir.
- Dağıtım panonuzda az 1600A 'lik bir şalterin teklif edilen bu kompanzasyon panosunun beslenmesi için kullanılacağı düşünülmüştür.
- Pano alttan kablo ile beslemeye uygun olacaktır.

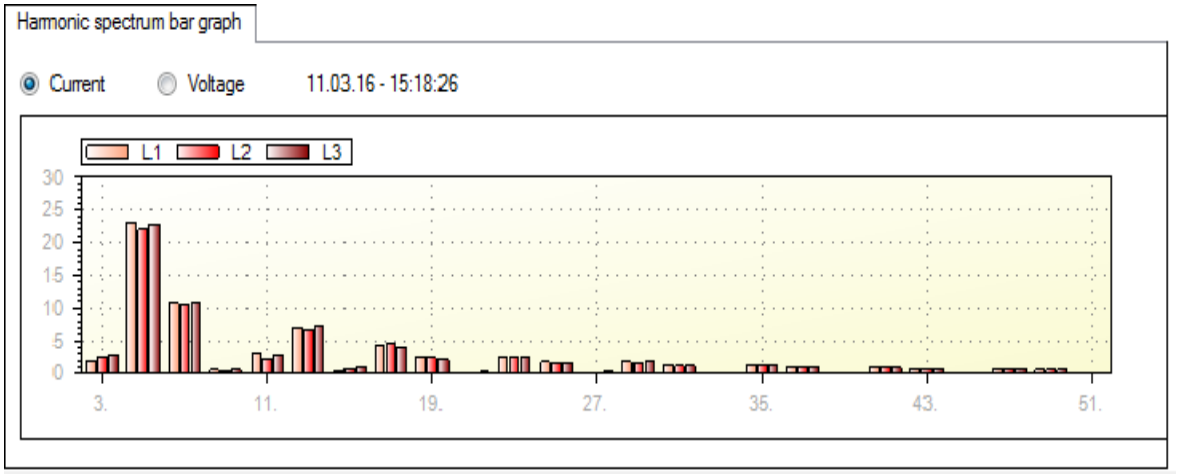
Çalışmanın önceki kısımlarında bahsedildiği gibi pasif filtrelere göre daha teknolojik olan aktif filtreler de Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nde çözüm olarak düşünülebilir. Aktif filtre tüm tesis için boyutlandırılıp AGAT odasına konumlandırılabileceği gibi, yüksek harmonik üreten yüke özel de tasarlanabilir. Tesiste yapılan ölçüm esnasında TR-2'ye bağlı büyük güçteki blower motorlarının frekans evirici ile sürüldüğü tespit edildiğinden; bu noktanın harmonik bozulmalar açısından hassas olabileceği öngörülmüştür. MCC-2B Panosu için özel harmonik ölçümü yapılıp değerlendirilmiştir. Elde ettiğimiz veriler blower motorlarını besleyen bu panoya özel münferit aktif filtre tasarımına imkân sağlamaktadır.

4.3.3. MCC-2B panosu için uygun paralel aktif filtre

Aktif filtreler tek ayarlı pasif filtrelere göre çok daha pahalı olduğundan, işletmeler genelde aktif filtre kullanımından imtina eder. Aktif filtre kullanımında genel eğilim, hassas noktalar için münferit aktif filtre kullanımıdır. Böylelikle maliyeti gücü ile doğru orantılı artan aktif filtrelerin, işletmeye olan mali yükü azaltılmış olur.

Ayrı ölçümü alınan MCC-2B panosu her biri 315 kW gücündeki 3 adet pompayı enerjilendirmektedir. Motorları sürmek içinse daha önceki kısımlarda yaygın harmonik kaynağı olarak bahsi geçen frekans konverterler kullanılmaktadır. Ölçüm esnasında blowerlerden biri arızalı, biri bakımda olduğundan sadece bir blower devrede idi. Dolayısıyla aktif filtre tasarımı sadece 1 adet blower için yapılacaktır. Ölçüm esnasında MCC-2B'nin harmonik akım spektrumuna bakılacak olursa 5., 7., ve 13. mertebeden harmonikler ön plana çıkar. Pasif filtre kullanılacak olsa idi tüm bu harmonikler için ayrı ekipmanlar gerekecek idi fakat aktif filtre hangi mertebeden olursa olsun sistemdeki tüm harmonikleri sıfırlayabilirler.

Ölçüm esnasında blower faz başına ortalama 440 A akım çekmekte iken harmonik akım spektrumu Şekil 4.18'teki gibidir:



Şekil 4.18. MCC-2B Harmonik akım spektrumu

Tesiste yapılan ölçüm dikkate alındığında, harmonik mertebelerin toplam akım değerleri; 3. harmonik 23 amper, 5. harmonik 97 amper, 7. harmonik 44 amper, 9. harmonik 5 amper, 11. harmonik 14 amper, 13. harmonik 31 amper, 15. harmonik 6 amper ve 17. harmonik 19 amper şeklinde olmaktadır. Ölçüm esnasında ekibe eşlik eden kompanzasyon ve harmonik filtre firmasının aktif filtre tasarımı için kullandığı yöntemi kullanacak olursak; bu harmonik akımlarının karelerinin toplamının kare kökünün alındığı aşağıdaki bağıntı karşımıza çıkar:

$$\sqrt[2]{23^2 + 97^2 + 44^2 + 5^2 + 14^2 + 31^2 + 6^2 + 19^2} = 114.72 \text{ amper}$$

Burada dikkate alınan son harmonik 17. harmoniktir; filtrenin uygulanacağı tesis uygun görür ise dikkate alınacak mertebe sınırı geliştirilebilir. Bu senaryoda ön plana çıkan 5. ve 7. harmonikler mevcut sorunun büyük kısmını teşkil ettiği için; çok yüksek mertebeli harmonikler dikkate alınmamıştır. Çıkan akımı, üretilebilecek bir aktif filtre değerine yuvarlayacak olursak; yaklaşık 120 amperlik aktif filtre gerekliliği ortaya çıkar. 120 amper değerindeki aktif filtrenin yaklaşık maliyeti, ölçüm yapan firmanın verilerine göre; panosu ile birlikte yaklaşık 21 000 Avro olmaktadır. Aktif filtrenin akım başına maliyeti yaklaşık 175 Avro civarıdır. Tek ayarlı pasif filtrelere göre daha pahalı olan bu çözüm, harmonik problemi olan münferit bir yük için düşünüldüğünde gayet uygun bir alternatif olabilmektedir. Aynı ölçümlere göre bir başka firmadan daha aktif filtre teklifi istenmiştir.

Çizelge 4.2. Aktif filtre teklifi

300 Amper, 3 Fazlı / 3 Telli

Sıra No	Malzeme ve/veya Hizmet Tanımı	Marka	Miktar
01	Aktif Harmonik Filtre Panosu 3 Fazlı, 3 Telli In:300A, Un:400V 5 adet 60A modül kullanılarak oluşturulacaktır. Modüllerin Menşei : Almanya Modüllerin Üretici Kodu : B44066F3060N301 7'' LCD dokunmatik kumanda ve kontrol modülü montajlı halde Modüller dahili tip sac panele Türkiye'de montajlanacaktır. Pano Takribi Boyutları : 800 x 2200 x 800 mm (Genişlik x Yükseklik x Derinlik)	EPCOS	1 Set
02	Sahada süpervizörlük ve devreye alma hizmetleri (elektriksel ve mekaniksel her türlü de-montaj ve montaj işleri ile pano dışı tüm malzemeler kapsam dışıdır)	SİSTEMA	1 Set
TOPLAM (EURO)			**38.200.-**

Teslim Süresi : 9-12 Hafta

SONUÇ VE ÖNERİLER

"Atıksu Arıtma Tesisinde Harmoniklerin Ölçülerek Toplam Harmonik Bozulmanın Tespit Edilmesi ve Çözüm Yöntemlerinin Araştırılması – Gebze Atıksu Arıtma Tesisi Örneği" isimli uzmanlık tezi çalışması kapsamında, elektrik kalitesi problemleri içerisinde en tehlikelilerden biri olan harmonikler hakkında bilgi verilmiş ve harmoniklerin günümüz dünyasında nasıl bir öneme sahip olduğu anlatılmıştır. Kompakt yapıda olduklarından ve çeşitli karakteristiğe sahip elektriksel yükü bir arada barındırdıklarından, çalışmada atıksu arıtma tesisleri temel alınmıştır. Harmoniklerin temel etkileri ile birlikte, elektrik sistemlerinde harmonik üreten elemanlar ve harmonikten etkilenen ekipmanlar bir atıksu arıtma tesisi özelinde incelenmiştir. Yapım aşamasında İlbank A.Ş.'nin de müdahil olduğu, 670 000 kişiye hizmet veren, 4000 kVA kurulu güce sahip Gebze Atıksu Arıtma Tesisi, harmonik analizine mekân olarak seçilmiştir.

11 Mart 2016 tarihinde 10:00 – 15:00 saatleri arasında AGAT-1, AGAT-2, MCC-2B panolarında profesyonel bir firma refakatinde gerekli harmonik ölçümleri yapılmış ve elde edilen veriler; firmanın kullandığı Excel tabanlı bir program ile değerlendirilerek bu çalışmaya yansıtılmıştır. Trafo-1'de gerilimdeki toplam harmonik bozulma yaklaşık %4 ve akımdaki toplam bozulma yaklaşık %25 olarak kaydedilmiştir. AGAT-2 için bu değerler gerilim için %4,2 ve akım için %35 olarak kayda geçmiştir. MCC-2B de ise harmonik bozulma durumu gerilimde %4 ve akımda %27'dir. Elde edilen değerler, ülkemizde reaktif güç sarfiyatına uygulandığı gibi harmonik bozulmaya da herhangi bir sınırlama uygulanması durumunda, tesisin özellikle akım harmoniklerinden ötürü bu sınırlamadan etkileneceğini göstermektedir. İller Bankası tarafından yapılacak olan atıksu arıtma tesislerinin, Gebze Atıksu Arıtma Tesisi'nin yük karakteristiğine yakın olacağı öngörülüp, harmonik seviyesi daha düşük olacak şekilde tesis edilmesi gerektiği düşünülmektedir.

Yüksek harmonik bozulmaya sahip bir atıksu arıtma tesisinde alınacak ilk önlem, tesise bir harmonik filtre entegre etmek olacaktır. Bu filtreler aktif olabileceği gibi pasif filtre de olabilmektedir. Tesiste yapılan harmonik ölçümleri daha detaylı irdelendiğinde hem AGAT-1'de hem de AGAT-2'de trafo sonrası yüklerden kaynaklanan akım harmoniklerinin çok yüksek olduğu görülmektedir. Tesisin harmonik akım spektrumu incelendiğinde, 5. harmonik ön plana çıkmaktadır ki ölçülen değer IEEE standardında

işaret edilen sınır değerinin yaklaşık 6,5 katıdır. Yapılan ölçümler ışığında tesisin kompanzasyon panolarının, pasif filtreli kompanzasyon panoları ile değiştirilmesinin faydalı olacağı öngörülmüştür.

Atıksu arıtma tesisi karakteristiğindeki elektrik sistemleri için uygun görülen harmonik çözüm yöntemi, 5. harmoniğe yönelik, tek ayarlı pasif paralel harmonik filtredir. Monte edilmesi uygun görülen bu filtrenin pano dâhil maliyeti; 4000 kVA'lık tesis için yaklaşık 13 180 Avro olmaktadır ki bu filtre hem 5. harmoniği elemine ederek toplam bozulmayı düşürecek hem de 5. harmoniğin rezonansa girme tehlikesini oldukça azaltacaktır. Sistemdeki 5. harmoniğin üçte birinin pasif filtre ile önlenmesi, ayda 930 Avro olarak faturaya yansımaktadır ve bu tutar, tesis için düşünülen filtrenin maliyetinin %6,7'sidir. Bu da, tesisi rezonanstan ve harmonik kaynaklı sıkıntılardan koruyacak olan filtrenin 15 ayda amorti edileceğini göstermektedir.

Bir diğer filtreleme yöntemi olan aktif filtre ise, hem yüksek maliyetli olduğundan hem de MCC-2B'nin harmonik çeşitliliği daha fazla olduğundan; bütün tesis için değil sadece MCC-2B panosu için düşünülmüştür. Çalışma kapsamındaki MCC-2B'nin harmonik spektrumuna uygun tasarlanmış aktif filtrenin panolu olarak maliyeti yaklaşık, 22 750 €'dur. kVAr başına maliyet, tek ayarlı pasif paralel filtre için 15 Avro iken paralel aktif filtre için yaklaşık 175 Avro'dur. Atıksu arıtma tesisleri için önerilen filtreleme yöntemi, 5. harmoniğe yönelik olarak AGAT binasına yerleştirilecek tek ayarlı paralel pasif filtredir. Harmonik bakımından daha sıkıntılı olan tesisler için de yine AGAT binasına yerleştirilecek 5. harmoniğe yönelik tek ayarlı bir adet paralel pasif filtre ve ek olarak blower binasının MCC panosunun yanına montajı yapılacak bir adet paralel aktif filtre düşünülebilir.

Filtreleme dışında; kullanılan ekipmanların özelliklerine, kullanım şekline, yerine ve tesisin planlanmasına, şartnameler ile İller Bankası tarafından getirilecek bazı sınırlamalar ve yaptırımların da tesisteki harmonik bozulmanın daha düşük olmasını sağlayacağı düşünülmektedir. Tesiste kullanılacak inverterlerin darbe sayısının yüksek olacak şekilde seçilmesi buna bir örnektir. İnverterlerin 12 darbeli olarak seçilmesi; 5., 7., 17. ve 19. harmoniklerin şebekeye geçişini engelleyecektir. Diğer taraftan, bir atıksu arıtma tesisinin trafosunun yıldız/üçgen bağlanması, şebekeye olan harmonik akışını en aza

indirgeyeceği için bu bağlantı şeklinin seçilmesinin uygun olacağı düşünülmektedir. Harmoniklerin trafolar üzerindeki etkisini azaltmak için, üretilirken harmonikli durumun göz önüne alındığı k-faktörlü trafolar kullanılmalıdır. Ölçümler neticesinde görülmektedir ki; k-13 faktör bir trafo, kurulacak tesisler için yeterli olacaktır. Jeneratör seçimi ve montajında dikkat edilmesi gereken husus, sargıların bağlantı şeklidir. Jeneratör kaynaklı bozulmayı en aza indirgemek için jeneratör sargılarının yıldız bağlı olması ve yıldız noktasının izole olması tercih edilmelidir. Diğer taraftan seçilen jeneratör kutuplarının ve endüvi yarıklarının harmonik bozulmaya mahal vermeyecek şekilde tasarlanmış olmasının da harmonikler açısından faydalı olacağı düşünülmektedir. Aydınlatma elemanlarında ise floresan lamba sürme devrelerinde kullanılacak olan elektronik balastların, dâhili filtreli olması gerekmektedir. Dâhili filtreli kullanılmıyor ise manyetik balast kullanılması, balasttan kaynaklanan harmonik bozulmayı yarı yarıya azaltacaktır. LED aydınlatmanın floresan aydınlatmaya oranla yaklaşık 3,5 kat daha fazla harmonik bozulmaya sebebiyet verdiği unutulmamalıdır. Ayrıca atıksu arıtma tesisleri, rezonans tehlikesi altında bulunan tesislerdir. Bu durumun yaşanmaması için de 5. harmoniği süzecek filtre kullanılması, kompanzasyonun aşırı yapılmaması, kaliteli bir reaktif güç rölesi kullanılması ve sistem rezonans frekansının 5. harmoniğin frekansında olmaması dikkat edilmesi gereken hususlardır. Atıksu arıtma tesisinin kablolamasında tek damarlı iletken yerine çok damarlı iletken kullanılması da deri etkisinden ötürü harmonikten kaynaklanan kayıpları azaltacaktır.

Bahsedilen bu önlemler dışında, işletilen tesislerde harmoniklere karşı bir farkındalık geliştirilmelidir. Tesislerde yaşanan kondansatör patlamaları, frekans konverterlerde yaşanan sıkıntılar, sık görülen kart arızaları, gürültülü çalışan ve aşırı ısınan motorlar ve monitörlerdeki titreşimler gibi emarelerin harmoniği işaret ettiği bilinmelidir.

Gelişmiş ülkelerin çoğunda olduğu gibi, Türkiye genelinde de THD oranlarına sınırlamalar getirilmesi düşünülmektedir. Ülkemiz için; bu sınırlamanın, reaktif güç sarfiyatında olduğu gibi elektrik dağıtımından sorumlu olan kurumlar tarafından bir yaptırım halinde yönetmeliklere alınması şeklinde yapılması uygun olabilir. Harmonik hususundaki sorunlara çözüm getirmek üzere, özel kuruluşların oluşturulması hususunda inisiyatif alınmalıdır. Reaktif güç kompanzasyon panosu tasarımında gelinen noktaya, harmonik filtre tasarımında da gelinmesi, ileride daha fazla görülecek harmonik bozulma

sorununun çözümüne katkı sağlayacaktır. Ülkemizde harmonik konusunun çok geç olmadan ele alınmasında ve bazı tedbirler getirilmesinde büyük fayda vardır. Sanayi tesislerinde aktif ya da pasif harmonik filtre kullanımının teşviki ve tüketicinin enterkonnekte sisteme aktardığı THD ölçüsünde yeni bir fiyat tarifesi uygulanması gibi önlemler faydalı olacaktır.

Bu tez çalışmasında, atıksu arıtma tesislerinin harmonik açısından problemli tesisler olduğu tespit edilmiştir. Sürdürülebilir şehirleşmeye katkıda bulunma misyonunu üstlenen İller Bankası'nın uyguladığı atıksu arıtma tesislerinin hem proje hem de yapım aşamalarında, harmoniklerin de göz önüne alınması ve harmonik filtrelerin kurulması önem arz etmektedir. Atıksu arıtma tesisi proje hizmet alımı özel şartnamelerine, harmonik filtrelerin kurulması ve harmoniğe karşı alınabilecek önlemlerle ilgili özel maddelerin eklenmesi uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

Akbal, B. (2011). *Fabrika Beslemelerinde Harmonik Ölçümü ve Filtre Tasarımı*, Yüksek Lisans Tezi, Selçuk Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Konya, 42.

Akmaz, D. (2012). *Güç Sistemlerinde Harmoniklerin İncelenmesi ve Akım Harmoniklerinin Azaltılması İçin Aktif Güç Filtre Tasarımları*, Yüksek Lisans Tezi, Tunceli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Tunceli, 6, 19.

Alaşahan, Y. (2014). *Güç Sistemlerinde Harmoniklerin Kritik Değerlere Etkisi*, Yüksek Lisans Tezi, Düzce Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Düzce, 42-43.

Arrillaga, J., Watson, N. R. (Eds). (2003). *Power System Harmonics*. (Second edition). New Zealand: John Wiley & Sons, Ltd, 63, 70, 82, 124, 143-145, 149, 150, 153.

Bayrak, T., Bilgin, M.Z. ve Alboyacı, B. (2012, 29 Kasım-1 Aralık). *Gaz Desarjlı Aydınlatma Armatürleri ile LED Aydınlatma Armatürlerinin Meydana Getirdikleri Harmonikler Açısından Kıyaslanması*, 2012 Elektrik - Elektronik ve Bilgisayar Mühendisliği Sempozyumunda sunuldu, Bursa, 313, 314, 318.

Çağlayan, İ. (2004). Rezonans: makinaların ve yapıların gizli düşmanı, *Mühendis ve Makina, 50 (598),* 55.

Çubukçu, Z. (2000, 8-12 Mayıs). *Elektrik Enerjisi Dağıtım Sistemlerinin Verimliliğinin Artırılması*, Dünya Enerji Konseyi Türk Milli Komitesi Türkiye 8. Enerji Kongresinde sunuldu, Ankara, 2.

Efe, B. S. (2006). *Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Analizi*, Yüksek Lisans Tezi, İnönü Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Malatya, 13-17, 36-39.

Emanuel, A.E. and Wang., X. (1985). Estimation of loss of life of power transformers supplying nonlinear loads, *IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, PAS 104(3),* 628-636.

Filiz, C. (2006). *Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Filtrelemelerin İncelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Kırıkkale Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kırıkkale, 67.

Hideaki, F., Hifofumi, A. (1998). The unified power quality conditioner: the integration of series and shunt active filters, *IEEE Trans. On Power Electronics 13(2),* 315-322.

İlaslaner, İ. (2006). *Güç Kalitesinde Harmonikler ve Filtrelenmesi*, Yüksek Lisans Tezi, Gazi Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Ankara, 5-7, 12, 46, 50.

İnternet: Akpınar, E., 2016. Kompanzasyon ve Harmonik Filtreleme. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.emo.org.tr%2Fekler%2Ff5c4b7bf58c3173_ek.pdf%3Ftipi%3D6%26sube%3D7&date=2016-11-18, Son Erişim Tarihi: 18.11.2016.

İnternet: BP, 2016. Electricity Generation (terawatt-hours). URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.bp.com%2Fen%2Fglobal%2Fcorporate%2Fenergy-economics%2Fstatistical-review-of-world-energy%2Felectricity.html&date=2016-11-16, Son Erişim Tarihi: 16.11.2016.

İnternet: Electricaleasy, 2016. Skin Effect and Proximity Effect . URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.electricaleasy.com%2F2016%2F08%2Fskin-effect-and-proximity-effect.html&date=2016-11-16, Son Erişim Tarihi: 16.11.2016.

İnternet: Electrotech Aylık Dergisi, 2016. Harmonikler İçin Neden Kaygı Duyulmalı. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.emo.org.tr%2Fekler%2F6b44f22bf01b4ba_ek.pdf%3Ftipi%3D35%26turu%3DX%26sube%3D0&date=2016-11-16, Son Erişim Tarihi: 16.11.2016.

İnternet: Elektrik İşleri Etüt İdaresi Genel Müdürlüğü [EİE], 2016. Elektrik Motor Sistemlerinde Enerji Verimliliği. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eie.gov.tr%2Fverimlilik%2Fdocument%2FElektrik_Motorlari.pdf&date=2016-11-15, Son Erişim Tarihi: 15.11.2016.

İnternet: Enerji ve Tabii Kaynaklar Bakanlığı Strateji Geliştirme Başkanlığı [ETBK], 2016. 2016 Yılı Bütçe Sunumu. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.enerji.gov.tr%2FFile%2F%3Fpath%3DROOT%252f1%252fDocuments%252fB%25C3%25BCt%25C3%25A7e%2520Konu%25C5%259Fmas%25C4%25B1%252fSay%25C4%25B1n%2520Bakan%2520B%25C3%25BCt%25C3%25A7e%2520Sunu%25C5%259F%2520Metni.pdf&date=2016-11-15, Son Erişim Tarihi: 15.11.2016.

İnternet: EMO, 2016. Güç Sistemlerinde Harmonikler ve Harmoniklerin Engellenmesi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.emo.org.tr%2Fekler%2F409ec301140ff84_ek.pdf%3Fdergi%3D&date=2016-10-31, Son Erişim Tarihi: 31.10.2016.

İnternet: Gebze Plastikçiler Organize Sanayi Bölgesi, 2016. İSU Gebze Atıksu Arıtma Tesisi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fgeposb.com.tr%2Ftr%2Fhaberler%2Fisu-gebze-atiksu-aritma-tesisine-teknik-ziyaret%2F100387&date=2016-11-15, Son Erişim Tarihi: 15.11.2016.

İnternet: Grady, Mack., 2016. Understanding Power System Harmonics . URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fweb.ecs.baylor.edu%2Ffaculty%2Fgrady%2FUnderstanding_Power_System_Harmonics_Grady_April_2012.pdf&date=2016-11-15, Son Erişim Tarihi: 15.11.2016.

İnternet: MEB, 2016. Kompanzasyon Cihazları ve Montajı. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.megep.meb.gov.tr%2Fmte_program_modul%2Fmoduller_pdf%2FKompanzasyon%2520Cihazlar%25C4%25B1%2520Ve%2520Montaj%25C4%25B1.pdf&date=2016-11-15, Son Erişim Tarihi: 15.11.2016.

İnternet: Özay N., Ermiş M., Ertaş A., Ertan H. B., 2016. Ark Ocağı İçeren Sistemlerde Kompanzasyon. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.eee.metu.edu.tr%2F

%7Eertan%2Fyayinlar2%2FArk%2520Oca%25C4%259F%25C4%25B1%2520%25C4%25B0%25C3%25A7eren%2520elektrik%2520Sistemlerinde%2520Kompanzasyon-I%2520Ocaklar%25C4%25B1n%2520Kompanzasyon%2520Gereksiniminin%2520Belirlenmesi%2520ve%2520Kompansat%25C3%25B6r%2520Tasar%25C4%25B1m%25C4%25B1_ibid_308-315.pdf&date=2016-11-15, Son Erişim Tarihi: 15.11.2016.

İnternet: Şekerci, H., 2016. K-faktörünün Transformatördeki Önemi. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2Fwww.emo.org.tr%2Fekler%2F37efdedac3a04bc_ek.pdf%3Fdergi%3D942&date=2016-11-15, Son Erişim Tarihi: 15.11.2016.

İnternet: Wikipedia, 2016. Avropean Countries By Electricity Consumption Per Person. URL: http://www.webcitation.org/query?url=https%3A%2F%2Fen.wikipedia.org%2Fwiki%2FAvropean_countries_by_electricity_consumption_per_person&date=2016-11-16, Son Erişim Tarihi: 16.11.2016.

İnternet: 320 Volt, 2016. Elektronik Balast. URL: http://www.webcitation.org/query?url=http%3A%2F%2F320volt.com%2Fwp-content%2Fuploads%2F2008%2F02%2Fbigluz-20w-fluorescent-lamp-cfl-ekonomik-lamba.png&date=2016-11-15, Son Erişim Tarihi: 15.11.2016.

Joseph, S., Subjack, J.R. and McQuilkin, J.S. (1990). Harmonics-causes, effects, measurements and analysis: an update, *IEEE Trans. On Industrial Appl., IA 26(6),* 1034-1041.

Kaşıkçı, İ. (2008). *Elektrik Tesisleri Temel El Kitabı*. (Birinci Baskı). Türkiye: Birsen Yayınevi, 171.

Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O. (2003). *Elektrik Tesislerinde Harmonikler*. (Birinci Baskı). Türkiye: Birsen Yayınevi, 3-4 – 3-6, 4-10, 6-2, 6-3, 6-11, 7-1 – 7-3, 7-8, 8-1, 8-10, 8-11, 9-9, 10-23, 12-4, 12-7, 13-4, 13-5, 13-8 – 13-10, 13-12.

Korovesis, P.N., Vokas G.A. and Gonos, J.F. (2004). Influence of large scale installation of energy saving lamps on the line voltage distortion of a weak network supplied by photovoltaic station, *IEEE Transactions on Power Delivery, 19(4),* 1787.

Linden, W.P. (1996). Transformer design and application considerations for nonsinusoidal load currents, *IEEE Transactions on Industry Applications, 12,* 633-645.

Ohja, S.K., Nadir K., Chauan, M., and Kumar, A. (2014). Identification and minimization of harmonics in power system networks, *International Journal of Emerging Technology and Advanced Engineering, 4(1),* 58, 65.

Özcan, C. İ. (2006). *Endüstriyel Tesislerde Harmonik Sorunları ve Çözümleri*, Yüksek Lisans Tezi, Kocaeli Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Kocaeli, 20.

Shipp, D. D. (1979). Harmonic analysis and suppression for electrical systems supplying static power converters and other nonlinear loads, *IEEE Trans. on Industrial Application, IA-15(5),* 453-458.

Sucu, M. (2003). *Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu*, Yüksek Lisans Tezi, Marmara Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 2, 10.

Şahin, Ö. (2003). *Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik*, Yüksek Lisans Tezi, İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul, 6.

Şenol, İ., Bekiroğlu, N. ve Aybar, O. (2005). *Elektrik Makineleri-1*. (Birinci Baskı). Türkiye: Birsen Yayınevi, 106.

Tunçalp, K., Sucu, M. (2006). Elektrik enerji sistemlerinde oluşan harmoniklerin filtrelenmesinde pasif filtre ve filtreli kompanzasyonun kullanımı ve simülasyon örnekleri, *Politeknik Dergisi, 9(4),* 264.

Uçar, F. (2012). *Paralel Aktif Güç Filtresi Kullanarak Harmonik ve Reaktif Güç Kompanzasyonu Yapılması*, Yüksek Lisans Tezi, Fırat Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü, Elazığ, 3.

Yalçın, B. (2004). Kompanzasyon ve harmonik filtre sistemleri, *Electrotech Aylık Dergisi, 2004(01),* 116.

Yaz, O., Karakulak, O., Köybaşı, E., Bıçakçı, S., Candan, C. ve Akdaş D. (2012, 29-30 Kasım). *PWM Sinyalinin Duty Cycle Süresinin %0 ile % 100 Arasında Değişimi ile DC Motorun Hassas Kontrolü,* 3. Ulusal Tasarım İmalat ve Analiz Kongresinde sunuldu, Balıkesir.

ÖZGEÇMİŞ

Kişisel Bilgiler

Soyadı, Adı	:	ÖZEL, Hasan
Doğum tarihi ve yeri	:	24.07.1984-İstanbul
Medeni hali	:	Evli
Telefon Numarası	:	0 (312) 508 77 62
Faks Numarası	:	0 (312) 508 77 99
E-mail	:	hozel@ilbank.gov.tr

Eğitim

Derece	Eğitim Birimi	Mezuniyet Tarihi
Lisans	Yıldız Teknik Üniversitesi/ Elektrik Mühendisliği	2009
Lise	İstanbul Erkek Lisesi	2004

İş Deneyimi

Yıl	Yer	Görev
2010 -2011	Acıbadem Sağlık Grubu	Management Trainee
2011 -2012	Manroland GmBH	Elektrik Bölüm Sorumlusu
2012 -2013	Doğan Printing Center	Elektrik Bölüm Sorumlusu
2013 -	İlbank A.Ş.	Teknik Uzman Yard.

Yabancı Dil

Almanca

İngilizce

Hobiler

Dağcılık, müzik.

İLBANK
TÜRKİYE'NİN YAPICI GÜCÜ