

İSTANBUL TEKNİK ÜNİVERSİTESİ ★ FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

**ELEKTRİK SİSTEM TASARIMINDA
HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ İÇİN
BİR ANALİZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Müh. Murat YILMAZ**

Anabilim Dalı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

Programı : ELEKTRİK MÜHENDİSLİĞİ

KASIM 2006

**ELEKTRİK SİSTEM TASARIMINDA
HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ İÇİN
BİR ANALİZ**

**YÜKSEK LİSANS TEZİ
Elektrik Müh. Murat YILMAZ
504971313**

**Tezin Enstitüye Verildiği Tarih : 22 Eylül 2006
Tezin Savunulduğu Tarih : 12 Ekim 2006**

**Tez Danışmanı : Prof.Dr. M.Emin TACER
Diğer Jüri Üyeleri: Prof.Dr. Faik MERGEN
Prof.Dr. Celal KOCATEPE (Y.T.Ü.)**

KASIM 2006

ÖNSÖZ

Bu yüksek lisans tezini erken yaşta aramızdan ayrılan babam Sait Yılmaz'a adanmak istiyorum. Tezin hazırlanması aşamasında bana rehberlik eden, yardımını ve mesaisini esirgemeyen danışmanım Prof.Dr. M.Emin Tacer'e teşekkürü bir borç bilirim. Ayrıca tez konumun seçilmesinde bana yol gösteren, destekleyen ve maalesef sonucunu göremeden aramızdan ayrılan Elk.Müh. Kamer Akkaş'a minnettarım. Tezi hazırlamam esnasında şekillerin çizimi için yardımcı olan Yalçın Sevinç'e ve yardımlarından dolayı değerli mesai arkadaşlarıma da teşekkür etmek isterim.

Son olarak, aileme de tüm hayatım boyunca yanımda oldukları için minnettarım, verdikleri manevi destek ve gösterdikleri anlayıştan ötürü teşekkür ederim.

Kasım 2006

Murat YILMAZ

İÇİNDEKİLER

KISALTMALAR	v
TABLO LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ	vii
SEMBOL LİSTESİ	ix
ÖZET	x
SUMMARY	xi
1. ENERJİ KALİTESİ, HARMONİK TANIMI VE GENEL İFADELER	1
1.1. Giriş	1
1.2. Enerji Kalite Problemi değerlendirmesi	1
1.3. Enerji sistemi ve Harmonikler	2
1.4. Harmonik Kavramı ile ilgili büyüklükler	2
2. HARMONİK KAYNAKLARI	9
2.1. Giriş	9
2.2. Ticari Müesseselerde oluşan Harmonikler	10
2.2.1. Güç kaynakları	11
2.2.2. Floresan Aydınlatma Cihazları	12
2.2.3. Ayarlı motor hız kontrol üniteleri ve asansörler	14
2.3. Endüstriyel yüklerde oluşan harmonikler	15
2.3.1. Üçfazlı çeviriciler	15
2.3.2. Ark cihazları	20
2.3.3. Doymalı cihazlar	21
3. HARMONİKLERİN ELEKTRİK SİSTEMİNE ETKİLERİ	26
3.1. Giriş	26
3.2. Harmoniklerin iletkenler üzerindeki etkisi	27
3.3. Harmoniklerin direnç üzerindeki etkisi	28
3.4. Harmoniklerin endüktans ve kapasitans üzerindeki etkisi	29
3.5. Harmoniklerin kondansatör üzerindeki etkisi	30
3.6. Harmoniklerin motorlar ve generatörler üzerindeki etkisi	31
3.7. Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkisi	33
3.8. Harmoniklerin enerji iletim sistemleri üzerindeki etkisi	34
3.9. Harmoniklerin devre kesiciler ve sigortalar üzerindeki etkisi	35
3.10. Harmoniklerin aydınlatma elemanları üzerindeki etkisi	35
3.11. Harmoniklerin güç faktörü üzerindeki etkisi	36
3.12. Harmoniklerin röleler üzerindeki etkisi	37
3.13. Harmoniklerin ölçü aletleri üzerindeki etkisi	38
3.14. Harmoniklerin elektronik elemanlar üzerindeki etkisi	39

4. HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE ULUSLARARASI STANDARTLAR, İZİN VERİLEN DEĞERLER	40
4.1. Giriş	40
4.2. Harmonikle bozulmanın ölçütü	41
4.3. Harmonikleri sınırlandırma çalışmaları	43
4.3.1. Yaklaşık inceleme	43
4.4. Harmonik standartları	45
4.5. Türkiye'de harmonik standartları	50
4.6. Diğer bazı standartlar	51
5. ELEKTRİK SİSTEM TASARIMINDA HARMONİKLERİNİN GİDERİLMESİ İÇİN BİR ANALİZ	52
5.1. Filtreler	52
5.2. Filtrelerin işlevleri	52
5.3. Filtrelerin çeşitleri	52
5.3.1. Pasif filtreler	53
5.3.2. Aktif filtreler	60
5.3.3. Hibrit filtreler	62
5.4. Filtre tasarımı	65
5.4.1. Tek ayarlı filtre tasarım eşitlikleri	66
5.4.2. Sönümlü filtre tasarım eşitlikleri	68
5.5. Proje aşamasında dikkat edilecek hususlar	70
5.6. Analiz uygulama örneği	72
6. SONUÇLAR VE TARTIŞMA	86
KAYNAKLAR	89
EK-A	92
EK-B	95
ÖZGEÇMİŞ	98

KISALTMALAR

THD	: Toplam Harmonik Distorsiyonu
TTD	: Toplam Talep Distorsiyonu
TEF	: Telefon Etkileşim Faktörü
HD	: Harmonik Distorsiyonu
HVDC	: Yüksek Gerilim DC Enerji İletimi
PWM	: Darbe Genişlik Modulasyonu(Pulse Width Modulated)
GKE	: Gerilim Kaynaklı Evirici
AKE	: Akım Kaynaklı Evirici
GTO	: Gate Turn Off
IEC	: International Electrotechnic Committee
IEEE	: International Electrical and Electronic Engineers
GF	: Güç Faktörü
AF	: Aktif Filtre
PF	: Pasif Filtre
AC	: Alternatif akım(Alternating Current)
DC	: Doğru akım(Direct Current)
MMK	: Manyeto Motor Kuvvet

TABLO LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Tablo 3.1.	Darbeli bir konverterin döner makine üzerindeki etkinliği..... 32
Tablo 4.1.	Harmonik sınırlarına uygunluğun yaklaşık incelemesinde kullanılan ağırlık faktörleri..... 44
Tablo 4.2.	Çeşitli ülkelerin harmonik standartları 46
Tablo 4.3.	Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC-61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri 47
Tablo 4.4.	Endüstriyel santraller için IEC-61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri(2.sınıf elemanlar)..... 47
Tablo 4.5.	Endüstriyel santraller için IEC-61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri(3.sınıf elemanlar)..... 48
Tablo 4.6.	Konutlarla ilgili alçak ve orta gerilim şebekelerinde EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri 49
Tablo 4.7.	D Sınıfı donanım için IEC 61000-3-2'e göre izin verilen maksimum harmonik akımları..... 49
Tablo 4.8.	IEEE'nin gerilim için harmonik distorsiyon sınırları 50
Tablo 4.9.	IEEE'nin genel dağıtım sistemlerine ait akım için harmonik distorsiyon sınırları 50
Tablo 4.10	NORSOK E-001/2 harmonik distorsiyon limitleri..... 51
Tablo 4.11	Müsaade edilen çevirici yükleri..... 51
Tablo 5.1	Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması..... 62
Tablo 5.2	Uygulama alanına göre filtre seçim tablosu 71
Tablo 5.3	Herhangi bir transformatör tipine göre uygulanabilecek genel kural 72
Tablo 5.4	Transformatör gücü $\leq 2\text{MVA}$ için basitleştirilmiş kural..... 72
Tablo 5.5	Analizi yapılacak sistem özeti..... 74
Tablo 5.6	Analizi yapılan sistemde elde edilen değerler..... 85

ŞEKİL LİSTESİ

	<u>Sayfa No</u>
Şekil 1.1 : Sinusoidal akım ve gerilim fonksiyonlarının zamanla değişimi....	3
Şekil 1.2 : Görünür gücün bileşenleri arasındaki ilişki.....	3
Şekil 2.1 : Lineer eleman,nonlineer eleman uç karakteristiği.....	10
Şekil 2.2 : Anahtarlama gücü kaynağı	11
Şekil 2.3 : Anahtarlama gücü kaynağı akım ve harmonik spektrumu.....	12
Şekil 2.4 : Floresan lamba(manyetik balast için) eğrileri	13
Şekil 2.5 : Floresan lamba(elektronik balast için)eğrileri.....	14
Şekil 2.6 : Sabit akım kaynaklı ayarlı hız kontrol ünitesi akımı ve harmonik spektrumu.....	16
Şekil 2.7 : Darbe genişlik modülasyonlu ayarlı hız kontrol ünitesi akımı ve harmonik spektrumu	16
Şekil 2.8 : 6 darbeli dc ayarlı hız kontrol ünitesi	17
Şekil 2.9 : Darbe genişlik modülasyonlu ayarlı hız kontrol ünitesi	18
Şekil 2.10 : Büyük güçlü ayarlı hız kontrol ünitesi	19
Şekil 2.11 : Darbe genişlik modülasyonlu ayarlı hız kontrol ünitesi ac akım harmonikleri.....	19
Şekil 2.12 : Ark cihazı eşdeğer devresi.....	20
Şekil 2.13 : Transformator mıknatıslanma karakteristiği.....	21
Şekil 2.14 : Transformator mıknatıslanma karakteristiği ve harmonik spektrumu.....	22
Şekil 2.15 : HVDC hattı	23
Şekil 2.16 : Harmonik spektrumu	24
Şekil 3.1 : Nötr hattının 3.harmonik bileşenlerle yüklenmesi.....	28
Şekil 3.2 : Omik direncin frekansla değişimi yüklenmesi.....	29
Şekil 3.3 : Bir kondansatör elemanının hali.....	30
Şekil 3.4 : Manyetik çekirdekli bir elemanın demir kayıpları.....	33
Şekil 3.5 : Sinüsoidal şebekeye bağlanan yük ile güç faktörünün değişimi....	36
Şekil 4.1 : Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi.....	42
Şekil 4.2 : Sistemdeki kayıp gücün toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi.....	42
Şekil 4.3 : Harmonik distorsiyonu yaklaşık incelenen örnek sistem.....	44
Şekil 5.1 : Tek ayarlı filtre devresi.....	53
Şekil 5.2 : İkinci mertebe sönümlü filtre devresi.....	53
Şekil 5.3 : Devrede seri filtrenin kullanımı.....	55
Şekil 5.4 : Devrede şönt filtrenin kullanımı.....	56
Şekil 5.5 : Tek ayarlı filtre devresi.....	56
Şekil 5.6 : Çift ayarlı filtrenin empedans değişimi.....	58
Şekil 5.7 : Çift ayarlı filtre devresi.....	58
Şekil 5.8 : Sönümlü filtreler.....	59
Şekil 5.9 : Sönümlü filtre empedans değişimi.....	59

Şekil 5.10	: Aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi.....	61
Şekil 5.11	: Aktif filtrenin şematik gösterimi.....	62
Şekil 5.12	: Hibrit filtre.....	63
Şekil 5.13	: Akagi' nin hibrit filtresi.....	63
Şekil 5.14	: Devan' ın hibrit filtresi.....	64
Şekil 5.15	: Akagi ve Divan' ın tasarımlarından oluşan kombine hibrit filtre...	64
Şekil 5.16	: Üç fazlı filtre bağlantıları ve tek faz eşdeğeri.....	67
Şekil 5.17	: İkinci dereceden sönümlü filtre.....	69
Şekil 5.18	: İncelenen sistem tekhat şeması.....	73
Şekil 5.19	: Durum-1 660/400V transformatörlerin primer ve sekonderleri yıldız-yıldız bağlı.....	75
Şekil 5.20	: Durum-1 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	
Şekil 5.21	: Durum-2 660/400V transformatörlerin primer ve sekonderleri üçgen-yıldız bağlı.....	76
Şekil 5.22	: Durum-2 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	76
Şekil 5.23	: Durum-3 Yük-0006 ucuna 7kVAr gücünde $f=4.8 f_0=240\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren FLTR-0001 filtre konulması	77
Şekil 5.24	: Durum-3 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	77
Şekil 5.25	: Durum-4 Yük-0002 ucuna 10kVAr gücünde $f=4.4 f_0=220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0002 konulması.....	78
Şekil 5.26	: Durum-4 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	78
Şekil 5.27	: Durum-5 Yük-0002'yi besleyen TR-0002' nin 660V primer ucuna 10kVAr gücünde $f=4.4 f_0=220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0003 konulması.....	79
Şekil 5.28	: Durum-5 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	79
Şekil 5.29	: Durum-6 10kVAr gücünde $f=4.4 f_0=220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0003 ve FLTR-0002 nin sırasıyla Yük-0002'yi besleyen TR-0002' nin 660V primer ve sekonder uçlarına konulması	80
Şekil 5.30	: Durum-6 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	80
Şekil 5.31	: Durum-7 Ana baraya 300kVAr gücünde $f=4.8 f_0=240\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0004 konulması.....	81
Şekil 5.32	: Durum-7 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	81
Şekil 5.33	: Durum-8 Filtreler FLTR-0001, FLTR-0002, FLTR-0003 ve FLTR-0004'ün aynı anda devrede olması	82
Şekil 5.34	: Durum-8 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	82
Şekil 5.35	: Durum-9 Filtreler devrede iken $THD_{V_{\text{şebeke}}} = \%4.80$ olması	83
Şekil 5.36	: Durum-9 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	84
Şekil 5.37	: Durum-10 Filtreler devrede iken TR-0001 in kısa devre empedansı Z' in değişmesi	84
Şekil 5.38	: Durum-10 için BARA-0004 harmonik spektrumu.....	85

SEMBOL LİSTESİ

C	: Kondansatör
D	: Distorsiyon gücü
f	: Frekans
I	: Akım
L	: Bobin
P	: Aktif güç
P_{Fe}	: Demir kayıp gücü
R	: Direnç
Q	: Reaktif güç
S	: Görünür güç
S_{K''}	: Kısa devre gücü
V	: Gerilim
X_L	: Endüktans
X_C	: Kapasitans
W_i	: Ağırlık faktörü
Z	: Empedans
Φ	: Faz açısı
ω	: Açısal frekans
δ	: Filtre ayar sapma faktörü

ELEKTRİK SİSTEM TASARIMINDA HARMONİKLERİNİN GİDERİLMESİ İÇİN BİR ANALİZ

ÖZET

Elektrik sistemlerinde enerji kalitesi, son yıllarda önemi gittikçe artmakta olan bir kavram olarak karşımıza çıkmaktadır. Enerji kalitesi faktörüne olumsuz yönde etkileri olan harmoniklerin incelenmesi , bu yüksek lisans tezinin konusu olarak ele alınmıştır.

Birinci bölümde enerji kalitesinin tarifinden yola çıkılarak, elektrik sistem harmoniklerinin tanımı,enerji kalitesi ile bağıntısı irdelenmiş, elektrik sistem harmoniklere dair temel büyüklüklerin tanımları ve formülleri üzerinde kısaca durulmuştur.

İkinci bölümde harmoniklerin oluşmasına sebep olan harmonik kaynakları üzerinde durulmuş, bu kaynakların eşdeğer devreleri ve gerilim ile akımın zamanla değişim eğrileri ile harmonik spektrumları şekiller halinde verilmiştir.

Üçüncü bölümde harmoniklerin elektrik güç sistemi üzerindeki etkileri listelenmiş, bunlar detaylı olarak incelenerek sistem eşdeğer devreleri ve formülleri verilmiştir.

Dördüncü bölümde harmonikleri sınırlandırmak için yapılan çalışmalardan bahsedilmiş, yaklaşık bir inceleme üzerinde durulmuştur. Dünyada kullanılan farklı standartlar ile ülkemizde geçerli olan normlar tablolar halinde sıralanmıştır ve yorumlanmıştır.

Beşinci bölümde harmoniklerin yok edilebilmesi için kullanılacak filtrelerin tanımı, işlevleri ve türleri üzerinde durularak her bir türün detaylı incelemesi yapılmış, birbirlerine göre eksiklik ve üstünlükleri karşılaştırılmıştır. Filtre tasarım eşitlikleri verilerek elektrik sistem tasarımında harmonikleri yok edebilmek için uygulanabilecek basit bir analiz verilmiştir.

Son bölümde ise tüm bahsi geçen konulardan elde edilen sonuçlar sıralanarak yorumlanmış, proje tasarım aşamasında alınabilecek tedbirler sunulmuştur.

AN ANALYZE FOR PREVENTING HARMONICS DURING ELECTRICAL SYSTEM DESIGN

SUMMARY

In electrical power systems the term "power quality" is becoming an important factor during the last few years and the adversely effecting phenomenon to this fact, called power system harmonics have been investigated as a master thesis in here.

In section one from the power quality point of view, electrical system harmonics have been defined , its relationship with power quality has been examined and other major definitions and formulas have been given..

In section two harmonic sources that result in the power system harmonics have been investigated , the equivalent circuits and their current and voltage graphs with respect to time has been given together with harmonic spectrum tables.

In section three the effects of harmonics on the electrical systems have been listed, these have been detailed together with equivalent circuits and formulas.

In section four the studies in order to minimize the harmonics have been summarized, an approach was investigated. The standards that are commonly used worldwide and in our country as well were examined and tables have been given.

In section five the filters that are used to eliminate harmonics have been taken into account, their functions, advantages and disadvantages with respect to each other have been examined. Filter design equations have been tabulated and an analyze that can be used at design stage to eliminate harmonics have been given.

In last section from the above explanations the results have been listed, precautions that can be utilized during design were given.

1. ENERJİ KALİTESİ,HARMONİK TANIMI VE GENEL İFADELER

1.1Giriş

Gerek kullanıcılar gerekse üreticiler açısından enerji kalitesi gün geçtikçe önem kazanmaya başlamıştır.”Enerji kalitesi” terimi özellikle 1980 lerin ikinci yarısından itibaren endüstride sıkça kullanılmaktadır.

”Enerji kalitesi”, referans alınan noktaya bağlı olarak değişik tanımlamalara sahip olabilir. IEEE 1100 standardına göre enerji kalitesi, kullanılan ekipman(lar)a uygun olarak hassas cihazların topraklanması ve enerjilendirilmesi kavramı olarak tarif edilmektedir. [1]

Bu incelemede ise tüketici tarafından, başka bir deyişle son kullanıcı temel alınarak açıklanacaktır. Bu prensip ile “enerji kalitesi” , bir ekipmanın kullanım amacına uygun olarak davranışından ve de ömründen herhangi bir kayba uğramaksızın çalışması için öngörülen elektriksel sınırlamalar olarak açıklanabilir. [2]

Enerji kalitesi ile ilgili terimler, konunun daha iyi anlaşılabilmesi amacı ile Ek-A’da kısa açıklamalar ile verilmiştir. [1,2]

Elektrik tesislerinde enerji kalitesi, enerjinin sürekliliği,gerilim ve frekansın sabitliği,güç faktörünün bire yakınlığı,faz gerilimlerinin dengeli olması ve gerilimdeki harmonik miktarlarının belirli değerlerde kalması gibi bir takım kriterlerden oluşacaktır. [3]

1.2 Enerji Kalite Problem Değerlendirmesi

Bu tez çalışmasında enerji kalitesine doğrudan etkisi olan ve günümüzde gün geçtikçe önem kazanmakta olan güç sistemi harmonikleri ve bunların yok edilmesi/asgariye indirilebilmesi için tasarım aşamasında alınabilecek tedbirler üzerinde durulacaktır. Farklı sektörlere ait enerji kalite problemleri, konunun daha iyi anlaşılabilmesi açısından Ek-B’de tablolanmıştır. [4]

1.3 Enerji Sistemi ve Harmonikler

Enerji sistemlerinde harmonikler en basit olarak temel frekansın ya da üretilen frekansın tam katları olan sinusoidal akım ve gerilimlerdir. Bunlar ana gerilimde ve yük akım dalga şekillerinde en büyük bozulmayı oluşturan etmenler olarak öne çıkmaktadır. Ayrıca temel frekansın tam katları olmayan sinusoidal akım ve gerilimlerden meydana gelen ara harmonikler de gün geçtikçe daha fazla önem kazanmakta olan bir konu olarak ortaya çıkmaktadır.

Geçmişte birçok ülke bölgesel çözüm olarak kendilerine has harmonik standartlarını oluşturmakla beraber , dünyadaki küreselleşme süreci ile birlikte üretilen cihazların farklı ülkelerde kullanılması, harmonik ve ara harmoniklerde uluslararası standartizasyonu beraberinde getirmiştir. [5] (Bkz Bölüm 4)

1.4 Harmonik Kavramı ile ilgili Büyüklükler

Sinusoidal gerilim ve akımın gücün t süresindeki denklemleri sırasıyla

$$v(t) = V \sin(\omega t) \quad (1.1)$$

$$i(t) = I \sin(\omega t \pm \phi) \quad (1.2)$$

$$s(t) = v(t).i(t) \quad (1.3)$$

şeklindedir.

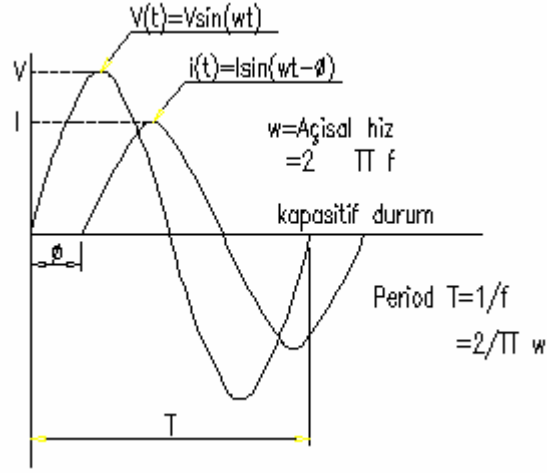
$\omega = 2\pi f$ olarak periyodik dalga şeklinin açısal hızını,

V- gerilimin tepe değerini,

I - akımın tepe değerini,

f - temel frekansı göstermektedir.

Φ - orijine göre akım ve gerilim dalga şekilleri arasındaki faz açısı farkıdır. Akımın açı olarak gerilimin önünde olması durumunda pozitif, tersi durumda ise negatif değerdedir. Şekil 1.1’de sinusoidal akım ve gerilim fonksiyonlarının zamana göre değişimi gösterilmektedir.



Şekil 1-1 de sinüsoidal akım ve gerilim fonksiyonlarının zamana göre değişimi

$$\text{Reaktif güç ; } q(t) = v(t).i(t).\sin \phi \quad (1.4)$$

$$\text{Aktif güç ; } p(t) = v(t).i(t).\cos \phi \quad (1.5)$$

Görünür gücün yaygın bir şekilde kabul edilen tanımı şu biçimdedir.

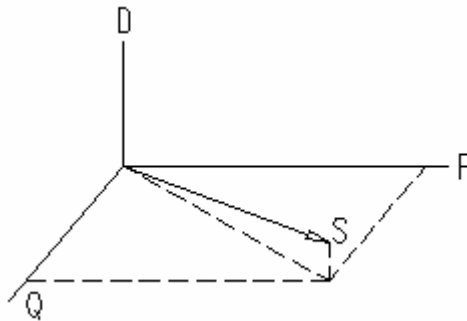
$$S^2 = P^2 + Q^2 + D^2 \quad (1.6)$$

Burada D-distorsiyon gücü olup

$$D = (S^2 - P^2 - Q^2)^{1/2} \quad (1.7)$$

eşitliği ile ifade edilir. Distorsiyon gücü aktif olmayan bir güç olup sinüsoidal işaretli doğrusal devrelerde sıfırdır.

Araştırmacılar ve bilimadamları arasında distorsiyon gücü ve reaktif gücün fiziksel anlamlarında ve tanımlamalarında hala bir birliktelik söz konusu değildir. Şekil 1.2 bu büyüklükler arasındaki ilişkiyi göstermektedir.



Şekil 1-2 Görünür gücün bileşenleri arasındaki ilişki

Güç faktörü kavramı, alternatif akım(AC) güç sisteminden çekilen akımın bir yük tarafından ne kadar verimlilikle kullanıldığını ölçmek için gerekir. Sinüsoidal veya sinüsoidal olmayan durumlarla ayırt etmeksizin güç faktörü,

$$GF = \cos \phi = \frac{P}{S} \quad (1.8)$$

olarak tanımlanır.

Harmonik sayısı(n)

Harmonik sayısı(n), karmaşık dalga şekline sahip tekil frekansı ifade etmektedir.

Örneğin n=5, frekansı temel frekansın 5 katına eşdeğer harmonik bileşeni ifade etmektedir. Temel frekansın f=50Hz olması durumunda 5.harmonik 5x50=250Hz e karşılık gelecektir. Harmonik sayılarının kullanılması harmoniklerin daha basit ifade edilebilmeleri içindir. Bir diğer sebep de harmonik içeren matematiksel işlemlerin basite indirgenmesi olarak açıklanabilir

Tek ve çift harmonikler

İsimlendirmeden de anlaşılacağı üzere tek harmonikler 3,5,7,9,11,... ve çift harmonikler de 2,4,6,8,... olarak uzayıp giden harmonik sayılarını ifade eder.

1 nolu harmonik periyodik dalga şeklinin temel frekanstaki bileşeni olup

0 nolu harmonik ise sabiti ya da dalga şeklinin doğru akım(DC) bileşenini tanımlar.

Bu DC bileşen özellikle transformatörlerde doyum üzerinde ciddi ve arzu edilmeyen sonuçlara sebebiyet verebilmektedir. Genellikle oluşan harmonikler tek harmoniklerden ileri gelmektedir. [1]

Toplam Harmonik Distorsiyonu(THD)

Harmonik büyüklüklerin sınırlamasını amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu gerilim ve akım için sırasıyla,

$$THD_v = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2} / V_1 \quad THD_i = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} / I_1 \quad (1.9)$$

ifadelerinden yararlanılarak bulunur. Görüldüğü gibi THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır.

Benzer şekilde n. harmonik mertebesindeki gerilim ve akım için tekil harmonik distorsiyonları sırasıyla,

$$HD_V = \frac{V_n}{V_1} \quad HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (1.10)$$

olarak hesaplanır.

Toplam Talep Distorsiyonu(TTD)

Toplam talep distorsiyonu, bir yüke ait değer olup toplam harmonik akım distorsiyonu olarak aşağıdaki gibi tanımlanır:

$$TTD = \sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2} / I_L \quad (1.11)$$

Burada I_L yük tarafından, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından çekilen, temel frekanslı maksimum akımdır. On iki ay öncesinden başlanarak hesaplamının yapılacağı ana kadar olan süre zarfında yük tarafından talep edilen maksimum akımların ortalaması olarak hesaplanır. TTD kavramı IEEE ‘Standart 519’ uygulamasında özellikle belirtilmiştir.(Bkz Bölüm 4)

Şekil(Form) Faktörü

Şekil faktörü nonsinüsoidal bir dalga için

$k_f = \text{Efektif değer} / \text{Ortalama değer}$

olarak tanımlanır. Bozulmuş bir sinüsoidal dalganın bozulma ölçütünü verecek olan bu faktör sinüsoidal bir dalga için , 1.11 değerine eşittir.

Tepe(Crest) Faktörü

Bu faktör, nonsinüsoidal akım ve gerilimin tepe değeri ile temel bileşenin efektif değeri arasında tanımlanır. Harmonik bileşenlerin en basit bir biçimde ortaya konmasını sağlayan bu faktör ,

Tepe faktörü = Tepe değer / Temel bileşenin efektif değeri

eşitliği ile hesaplanır. Sinüsoidal bir dalga için bu değer, $\sqrt{2}$ 'dir.

Telefon Etkileşim Faktörü(TEF)

Telefon etkileşim faktörü, elektrik enerji sistemindeki harmonik akım ve gerilimlerinden kaynaklanan telefon gürültü değerinin tayin edilmesine yarayan bir büyüklüktür. TEF değeri telefon sisteminin ve insan kulağının değişik frekanslardaki gürültüye olan duyarlılığına dayalı olarak ayarlanır.

Sözkonusu bu büyüklük gerilim ve akım için matematiksel olarak ;

$$TEF_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n \cdot V_n)^2}}{V_{ef}} \quad TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (w_n \cdot I_n)^2}}{I_{ef}} \quad (1.12)$$

bağıntısı ile hesaplanır. Burada w_n , n ' inci mertebeden harmonik frekansı için işitsel ve endüktif kuplaj etkisini hesaplara dahil eden bir katsayıdır.

Transformatör K-Faktörü

Transformatörlerin doğrusal olmayan yükleri beslemesi sonucu transformatör üzerinden akan yük akımı, harmonik bileşenleri içerir. Son yıllarda yapılan bazı çalışmalarda kuru tip transformatörlerin nonsinüsoidal akımlar çeken yükleri besleyebilmesinin bir ölçütü olarak kabul edilen ve standart transformatörlerin harmonik akımlarına bağlı olarak nominal gerilim ve akım değerlerinde meydana gelen düşüşlerin tayinine yarayan bir büyüklüktür. K-faktörü, anma gerilimi ya da anma gücü gibi transformatörler için imalatçı tarafından belirlenmiş bir anma büyüklüğü olup anma gücü 500KVA'nın altındaki transformatörler için tasarlanmıştır.

Transformatör K-faktörü diğer bir deyişle, harmonik akımlar mevcut olduğu zaman standart transformatörlerin yüklenme kapasitesindeki azalma miktarlarını hesaplamak için kullanılan bir kavramdır.

Doğrusal olmayan yükleri besleyen bir transformatör için K-faktörü,

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} \left(n \cdot \frac{I_n}{I_1} \right)^2 \quad (1.13)$$

olarak tanımlanır.

Standart transformatörün anma değerindeki düşümünün hesaplanmasında IEEE C57.110-1986’ da

$$D = \frac{1,15}{1 + 0,15.K} \quad (1.14)$$

eşitliği verilmiştir.Burada D, transformatör gücündeki azalmayı belirtmektedir.Başka bir deyişle harmonikli akımla yüklenen transformatörün verebileceği en büyük güç değeri,

$$S_H = D.S_N \quad (1.15)$$

olarak hesaplanmaktadır.Burada S_N , transformatörün nominal gücüdür.

Distorsiyon Güç Faktörü

Gerilim ve akım, harmonikler içerdiğinden efektif değerleri şu şekilde de ifade edilebilir:

$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \quad I = I_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2} \quad (1.16)$$

Aynı biçimde toplam güç faktörü, gerilim ve akımın toplam harmonik distorsiyonları değerleriyle

$$GF_{toplam} = \frac{P}{V_1 \cdot I_1 \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_V}{100} \right)^2} \cdot \sqrt{1 + \left(\frac{THD_I}{100} \right)^2}} \quad (1.17)$$

olarak ifade edilir.Bu eşitlik aynı zamanda,

$$GF_{toplam} = \cos(\phi_1 - \delta_1) \cdot GF_{dist} \quad (1.18)$$

ile de verilir. $\cos(\phi_1 - \delta_1)$ kayma güç faktörü ve GF_{dist} distorsiyon güç faktörüdür.

Kayma güç faktörü 1 ‘den büyük olamayacağından her zaman

$$GF_{toplam} \leq GF_{dist} \quad (1.19)$$

olacaktır. Görüldüğü gibi , yüksek akım distorsiyonlu tek faz doğrusal olmayan yükler için, toplam güç faktörü daha da düşmektedir. Rezonansa neden olma ihtimalinden dolayı bu gibi yükler için güç faktörü düzeltici kondansatörler gereklidir. Distorsiyon güç faktörünü iyileştirmenin bir başka yolu ise , doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonikleri yok etmek için pasif ve aktif filtreler kullanmaktır. [3] (Bkz Bölüm 5)

2.HARMONİK KAYNAKLARI

2.1.Giriş

Harmonikleri yaratan kaynaklara değinmeden önce harmoniklerin oluşumunu sağlayan yükleri tanımlamak, konunun özümseilmesi açısından daha yararlı olacaktır.

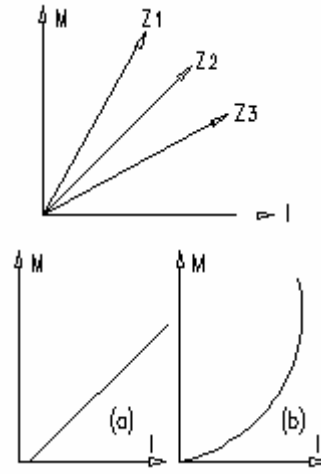
Uç karakteristiği, başka bir deyişle akım-gerilim arasındaki ilişkisi doğrusal olan elemana “doğrusal eleman” denir. Şekil 2.1.a’da böyle elemanların uç karakteristiği verilmiştir. [3] Bunlara örnek olarak direnç, reosta gösterilebilir.

Halbuki uygulamada karşılaşılan birçok yük uç karakteristiği doğrusal olmayan yük veya elemanlardan oluşmaktadır ve bunlar da “doğrusal olmayan yük veya eleman” olarak adlandırılırlar. Şekil 2.1.b ve şekil 2.1.c’de doğrusal olmayan eleman uç karakteristikleri verilmiştir. Harmonikleri meydana getiren doğrusal olmayan elemanlar;

- Çeviriciler
- Demir çekirdekli bobinler
- Yarı-iletken malzemeler içeren elemanlar(diyot,transistör,tristör v.b)
- Generatörler
- Motorlar
- Senkron makinelerin uyarılmasında kullanılan diyot,tristörlü dönüştürücüler
- Elektronik ve endüktif balastlar
- Transformatörler
- TV, bilgisayar
- Statik Var kompanzatörleri
- Tristör anahtarlamalı güç kaynakları
- Kontrollü motor hız ayar devreleri,
- Işık dimmerleri
- Kesintisiz güç kaynakları
- Frekans dönüştürücüler

- Gaz desanj prensibi ile çalışan aydınlatma elemanları
- Yüksek gerilim ile enerji iletim(HVDC) sistemleri
- Elektrikli ulaşım sistemleri
- Akü şarj devreleri
- Fotovoltaik sistemler
- Kaynak makineleri
- Ark fırınları

şeklinde genel olarak listelenebilir. [3] [6] [7]



şekil 2.1 (a) doğrusal eleman , (b)(c) doğrusal olmayan eleman uç karakteristiği

Doğrusal olmayan yükler,harmonik akımları üretmelerinin yanı sıra bağlı oldukları şebeke sistemi empedansı ile birlikte harmonik gerilimleri de endüklerler. [1]

şüphesiz enerji sisteminde harmoniklerin etkinliğinin belirlenmesi ve olumsuzluklarının giderilmesi bakımından tüm harmonik üreten elemanların harmonik kaynağı olarak ayrı ayrı incelenmesi gerekir.

Bu açıklamalardan sonra harmonik kaynaklarına kısaca değinmeye yarar vardır. Bu tez çalışmasında , harmonik kaynakları sıkça kullanıldıkları alanlara göre sınıflandırılarak ticari müesseselerdeki ve endüstriyel tesislerdeki harmonik kaynakları olarak ele alınmaktadır.

2.2 Ticari müesseselerde oluşun harmonikler

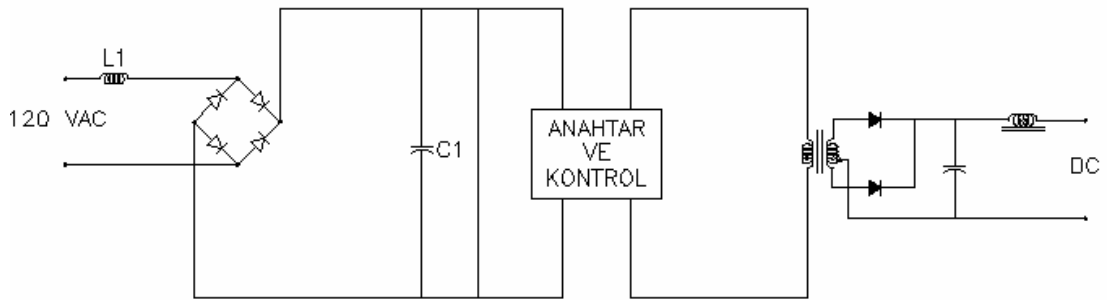
Ofis, hastane, depo, internet merkezi gibi mekanlarda kullanılan elektronik balastlı yüksek verimli floresan aydınlatma,bina iklimlendirmede (HVAC-heating,ventilation

and air conditioning) kullanılan hız ayar cihazları ile donatılmış motorlar, asansörler, hassas elektronik cihazları beslemek için tasarlanan tek fazlı anahtarlamalı güç kaynakları harmoniklere sebebiyet verirler. Görüldüğü gibi ticari uygulamalarda harmonikler birçok harmonik üreten kaynağın toplamından oluşur. Sistemin eşzamanlılık faktörüne bağlı olarak bunlar birbiri üzerine binerek yüksek mertebede harmonik üretebilecekleri gibi birbirlerini yok da edebilirler.

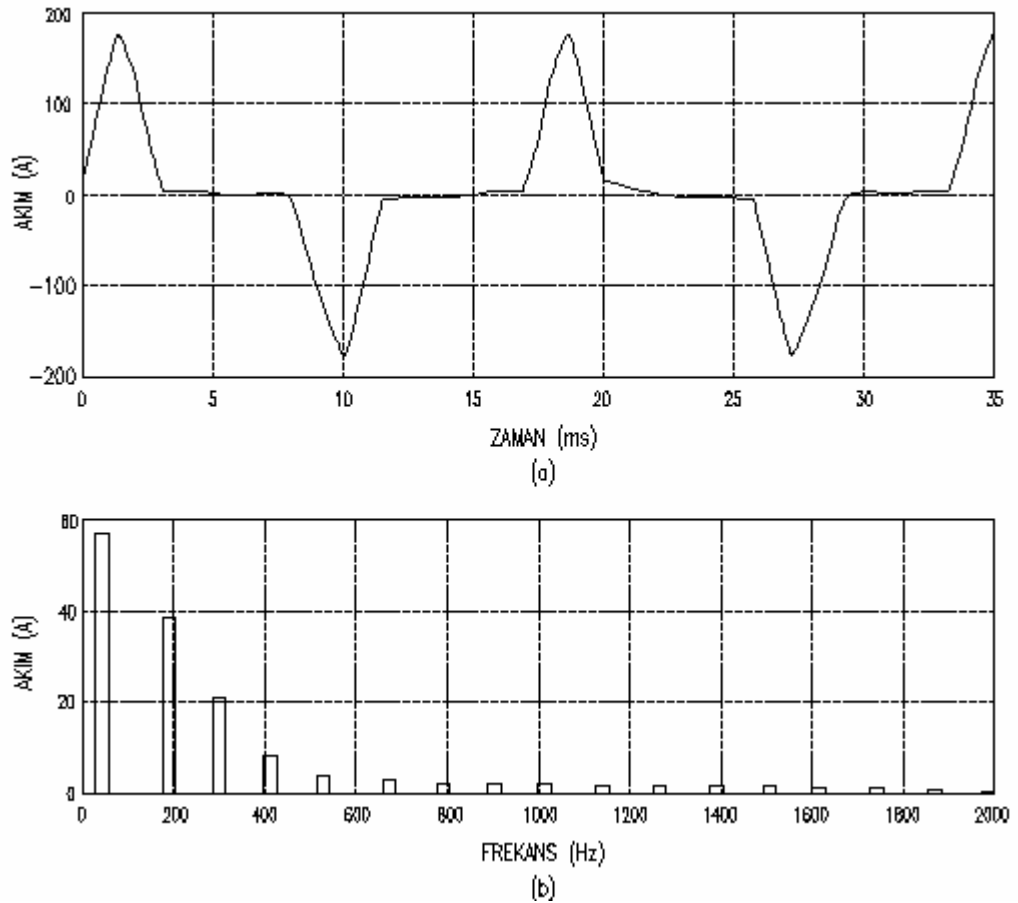
Bu tür tesislerde reaktif güç kompanzasyonu kullanımı az olduğundan devrenin eşdeğer empedansı, baskın(dominant) olan dağıtım transformatör empedansı ile iletken kablo empedansına bağlıdır. [2]

2.2.1 Güç kaynakları

Ticari uygulamalarda kullanılan bilgisayar, yazıcı, fotokopi tipi tek fazlı elektronik cihazlarda kompakt yapıları, efektif işletimleri ve transformatörden bağımsız çalışmaları sebebi ile son zamanlarda genellikle anahtarlamalı güç kaynakları kullanılmaktadır. Bu cihazların en büyük eksikliği 3. harmonik akımları üretmeleridir. Bu harmoniklerin üç fazlı sistemde nötr noktasında birbine eklenmesi ile nötr hattında aşırı yüklenmeye ve de transformatörde aşırı ısınmaya sebebiyet verebilmektedirler. Şekil 2.2’de anahtarlamalı güç kaynağı tipik şeması, şekil 2.3’de ise akım dalga şekli ve harmonik spektrumu verilmiştir. [2]



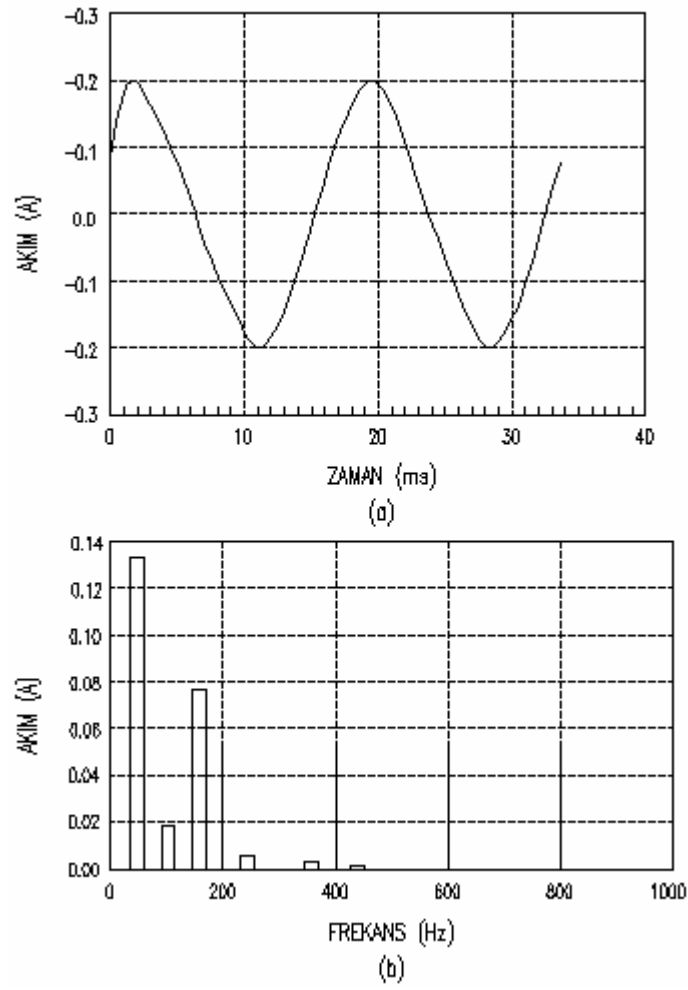
Şekil 2.2 Anahtarlamalı güç kaynağı



Şekil 2.3 Anahtarlama güç kaynağı akım ve harmonik spektrumu

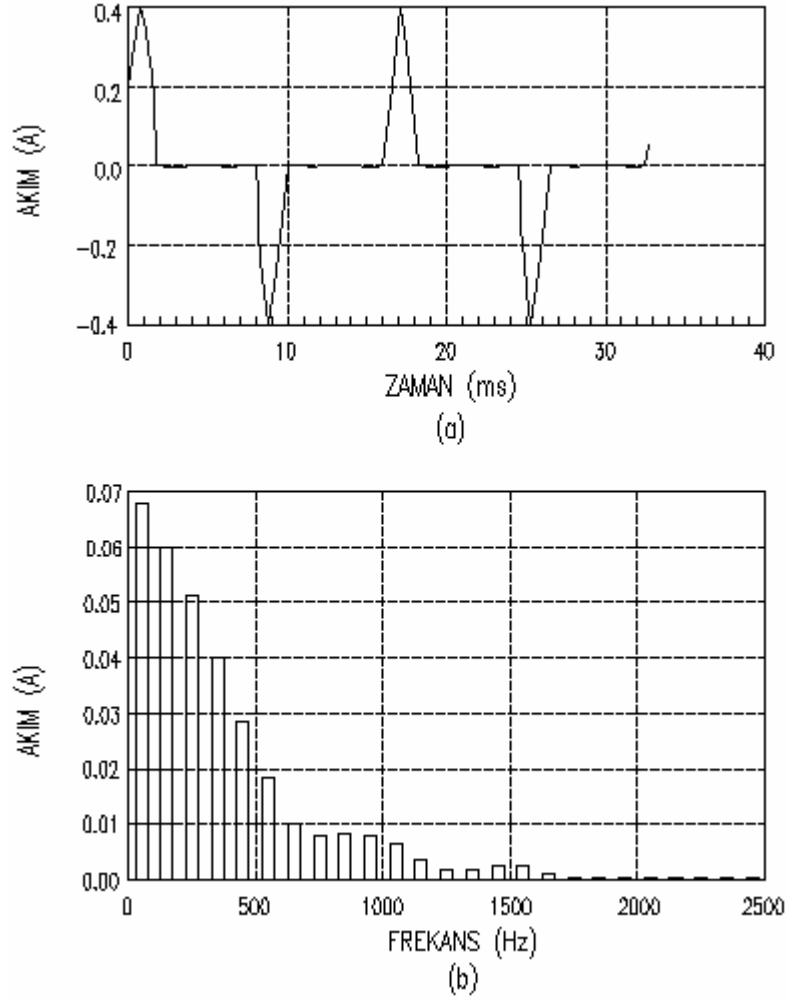
2.2.2. Floresan aydınlatma cihazları

Ticari uygulamalarda kullanılan floresan aydınlatmalar yapılan araştırmalarda enerji sarfiyatlarındaki avantajları sebebi ile genel aydınlatmanın yüzde 77'si gibi oldukça yüksek bir oranını kapsamaktadır. Bu lambalar deşarj prensibi ile çalışan cihazlardır. Konvansiyonel balastlar demir gövdeli bir transformatör ve kondansatörden oluşur ve temel frekansta çalıştığı için ısı kayıpları ile verimleri düşüktür. Harmonik, ateşleme için gerekli ark sebebi ile oluşur ve THD kabaca %15 mertebesinde. Şekil 2.4 manyetik balastlı floresan lamba akım dalga şeklini ve harmonik spektrumunu göstermektedir.



Şekil 2.4 Floresan lamba a)manyetik balast akım dalga şekli b)harmonik spektrumu

Elektronik balastlar ise anahtarlama güç kaynağı düzeneği içererek yüksek frekansta ateşleme sağlarlar. Böylece ark akımı için küçük bir nüve yeterli olup aynı zamanda 100-120Hz de oluşan kırıışmayı de önlerler. Güç kaynağı çalışma prensibi ile (Bkz. 2.3) çift ve üçüncül harmonikler üretirler.Şekil 2.5 elektronik balastlı floresan lamba akım dalga şekli ve harmonik spektrumunu göstermektedir. [2]



Şekil 2.5 Floresan lamba a)elektronik balast akım dalga şekli b)harmonik spektrumu

Şekil 2.5’deki akımın THD’u, %144 mertebesinde olup genelde bu tip balastlarda THD %10-32 arasındadır.ANSI C82.11-1993 e göre %32 üzeri THD yüksek kabul edilir. Uygulamada akım THD düşürmek için elektronik balast çıkışına pasif filtre (bkz bölüm 5) kullanılır. [8]

Floresan lambaların yarattığı harmonikleri yok edebilmek için yük fazlara eşit olarak dağıtılır. İndirici transformatörünün şebeke tarafı üçgen bağlı seçilerek şebeke kirletilmemiş olur. Sıkça kullanılan yıldız-yıldız bağlı transformatörlerde yük her ne kadar dengeli de dağıtılsa şebekeye harmonik akışı engellenemez.

2.2.3. Ayarlı motor hız kontrol üniteleri ve asansörler

Ticari binalarda ayarlı hız kontrol üniteleri asansörlerde, iklimlendirme fan ve motorlarında kullanılır. Bu üniteler, asenkron motor hızının gerilim ve frekansa bağlı

olarak kontrol edilebilmesi prensibi ile giriş gerilim ve akımını doğrultup tekrar evirici ile kontrol ederek motor-fan hız kontrolü sağlarlar.

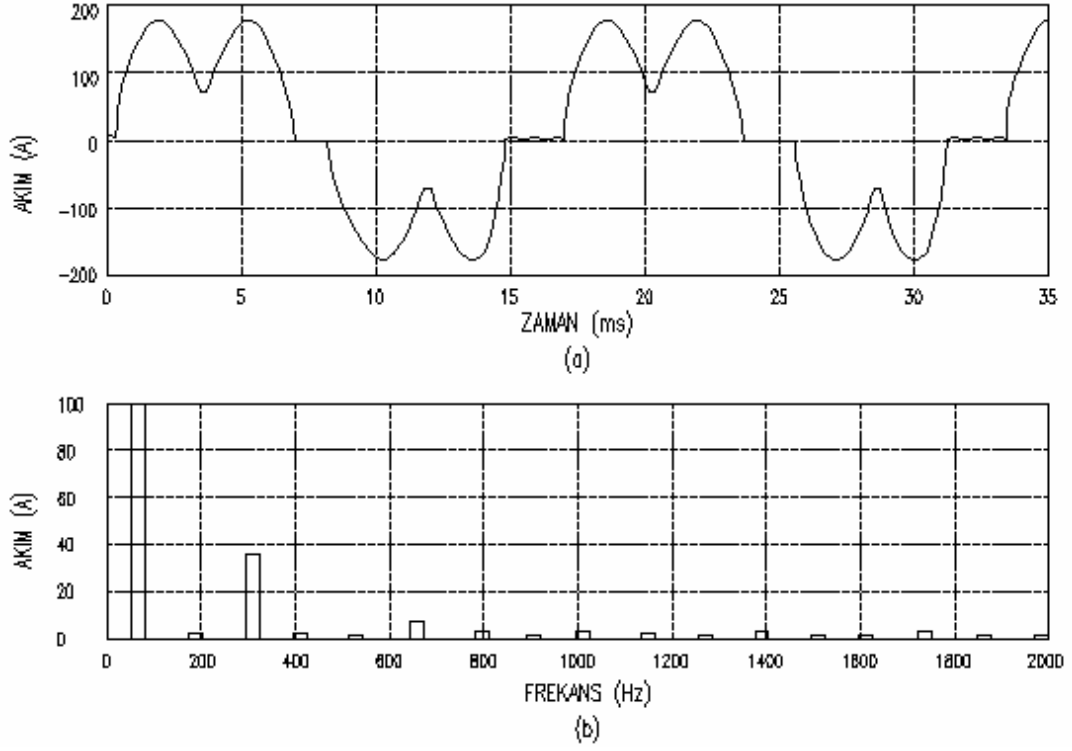
2.3. Endüstriyel yüklerden oluşan harmonikler

Modern endüstriyel tesisler birçok nonlineer yükün birarada bulunduğu sistemlerden meydana gelirler. Bu yükler kurulu tesis yükünün yüzdesel olarak büyük bir oranını da teşkil edebilirler ve dolayısıyla sisteme harmonik iletirler. Bu problem yüklerin düşük güç faktörlerinin etkisi ile daha da büyük bir boyut kazanır. Endüstriyel uygulamalarda cezai tedbirlere maruz kalmamak için genellikle güç faktörünü yükseltmek için kapasitör grupları kullanılır. Güç faktörünü düzeltmek için kullanılan bu kapasitörler , doğrusal olmayan yüklerin harmoniklerini arttırarak sistemin rezonansa girme olasılığını da kuvvetlendirebilirler. Genellikle gerilim bozulmasının en sık görüldüğü yer, sistemde kapasitör gruplarının bağlandığı baradır. Rezonanslar, motor ve transformatörlerin aşırı ısınmasına ve de hassas cihazların istenmeyen çalışmalarına yol açabilirler.

Doğrusal olmayan endüstriyel yükler üç kategoride incelenebilir.

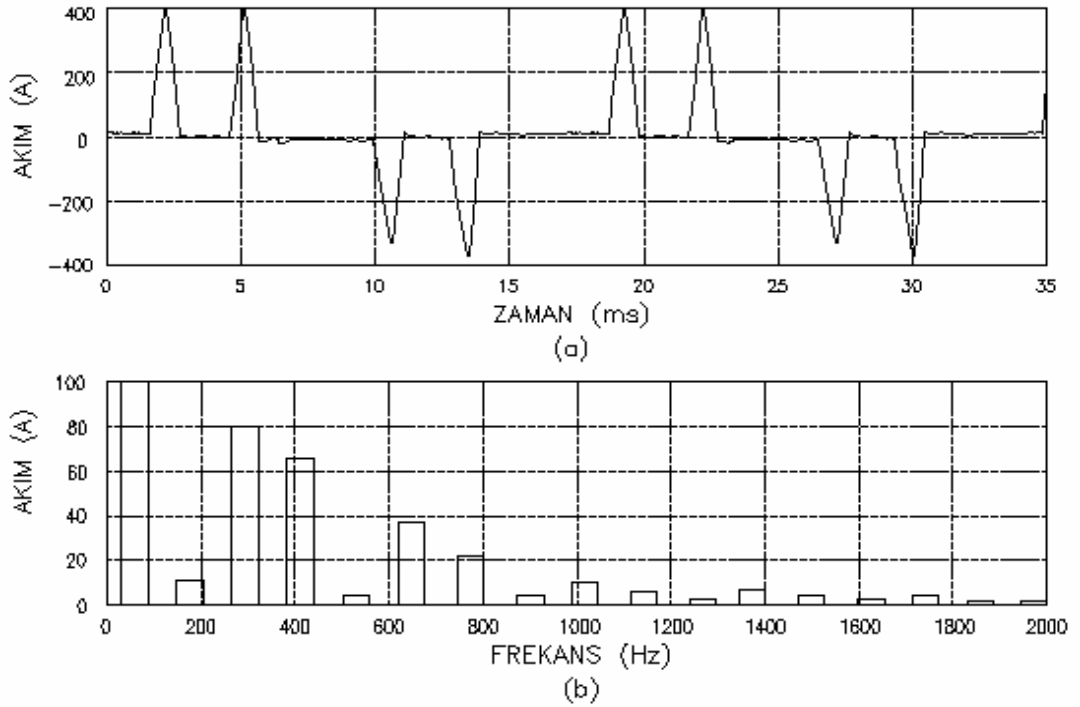
2.3.1 Üç fazlı çeviriciler

Bu cihazların tek fazlı anahtarlamalı güç kaynaklarına göre avantajları en baskın ve karşılaşılan harmonik olan 3.harmonik üretmemeleridir. Fakat şekil 2.6’da görüldüğü gibi bu cihazların da ürettiği harmonikler mevcuttur. [2]



Şekil 2.6 Sabit akım kaynaklı ayarlı hız kontrol ünitesi akımı ve harmonik spektrumu

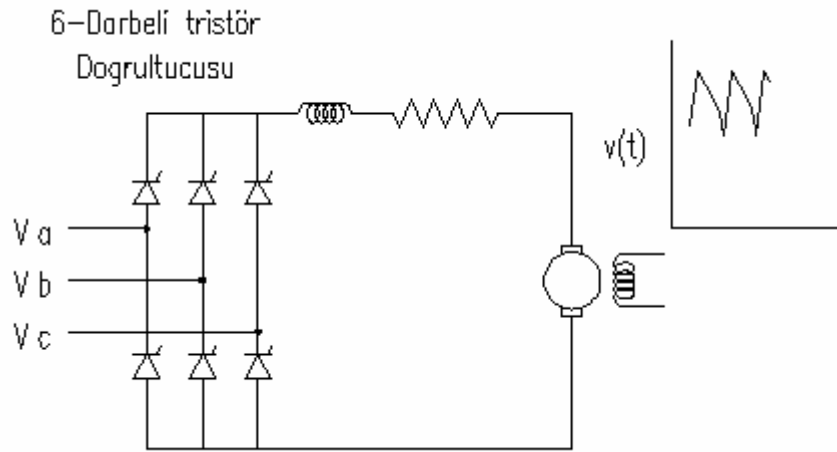
Şekil 2.6 de ayarlı motor hız kontrol ünitesi akım-zaman grafiği ile harmonik spektrumu ile Şekil 2.7 de tipik bir PWM(Pulse Width Modulated)-darbe genişlik modülasyonlu evirici akım dalga şekli ve harmonik spektrumu görülmektedir.



Şekil 2.7 Darbe genişlik modülasyonlu ayarlı hız kontrol ünitesi akımı ve harmonik spektrumu

Darbe genişlik modülasyonlu sürücü genellikle tek fazlı anahtarlama güç kaynağı prensibi ile tasarlanır. AC girişten beslenen doğrultucu DC barasında büyük değerli kondansatörü besler ve küçük değerli empedans yardımı ile kapasitör kısa darbelerle şarj edilerek şekildeki tavşan kulağı biçimli giriş akımı elde edilir. Görüldüğü gibi akımdaki bozulma oldukça yüksektir. Günümüzde anahtarlama güç kaynakları küçük güçlü uygulamalarda kullanılmakta iken, darbe genişlik modülasyonlu üniteler 300KW güçlere kadar uygulama alanı bulmaktadır.

DC sürücülerde sadece doğrultma işlemi gerektiği için daha basit bir kontrol düzeneği gerekliliği AC sürücülere göre avantaj teşkil eder. Daha geniş hız ayar aralığı ve kalkış torku elde edilebilir. Her ne kadar kontrol üniteleri maliyetleri gün geçtikçe ucuzlasa da, DC motorların kurulum ve işletme maliyetlerinin yüksekliği, bu seçeneğin nadir uygulama alanı bulmasına yol açmaktadır.

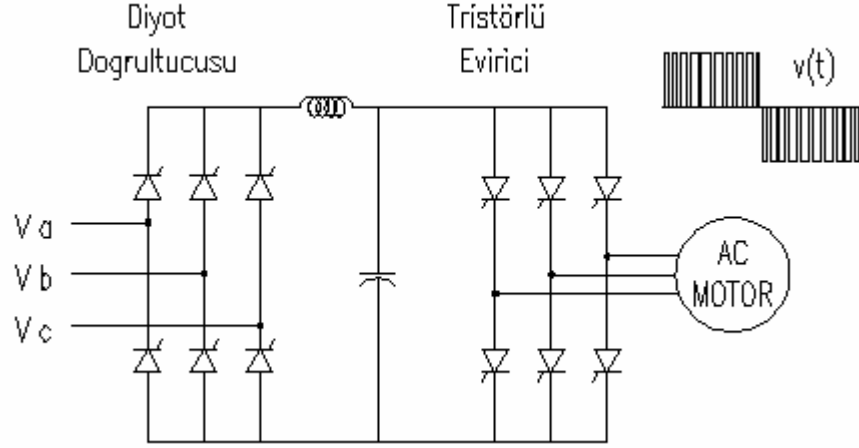


Şekil 2.8 6 darbeli dc ayarlı hız kontrol ünitesi

Şekil 2.8'deki 6 darbeli doğrultucu ile kontrol edilen dc motor düzeneğinde 5. ve 7. harmonikler baskın durumdadır. Bunlar da sistem cevabı açısından en sorunlu olanlardır. Çözüm olarak kullanılabilecek 12 darbeli bir uygulamada sistemin dengesizliğine bağlı olarak 5. ve 7. harmonikler yüzde 90 mertebesinde yok edilebilir. Fakat bu durum daha fazla güç elektroniği elemanı ve ilave transformatör kullanılması sebebi ile ilave maddi yükü de beraberinde getirir.

AC sürücülerde ise doğrultulmuş olan çıkış motor kontrolü için değişken frekanslı ac gerilime evrilir. Eviriciler gerilim kaynaklı evirici-GKE ya da akım kaynaklı evirici-AKE olarak ayrılırlar. GKE için evirici girişine az salınımlı sabit gerilim gerekir. Bu da kapasitans ya da LC filtre ile mümkün olur. AKE de ise sabit akım gerekir ki bu

da devreye seri endüktans bağlanarak elde edilir. AC sürücü uygulamalarında genellikle kurulum ve işletim maliyeti düşük, zor şartlarda kullanılabilen sincap kafesli asenkron motorlar tercih sebebidir. Ancak çok hassas hız gerekli uygulamalarda senkron motorlar kullanılır. [2]

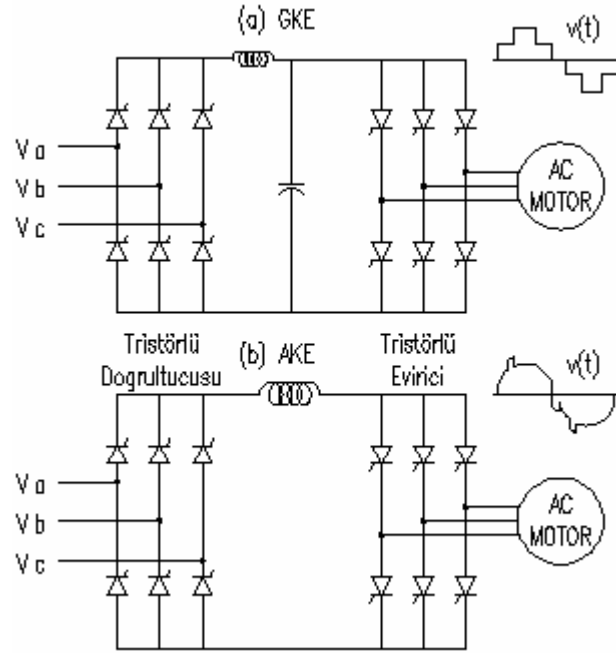


Şekil 2.9 Darbe genişlik modulasyonlu ayarlı hız kontrol ünitesi

Şekil 2.9’da sıkça kullanılan darbe genişlik modulasyonlu ve gerilim kaynaklı evirici ile hız kontrolü yapılan bir motor kontrol düzeneği ve gerilimin zamanla değişimi gösterilmektedir. Evirici devresinde güç transistörü, GTO-Gate Turn-off tristörler v.b. kontrol elemanları kullanılabilir. Günümüzde 300KW a kadar uygulamalarda darbe genişlik modulasyonlu ve gerilim kaynaklı eviricili sürücüler en verimli olanlardır. Burada diğer avantaj da doğrultucu çıkış geriliminin evirici çıkışını etkilememesi sebebi ile doğrultucu devresinde diyotlar kullanılarak kontrol düzeneği kullanmayarak sistemi basitleştirmek ve maliyeti azaltmaktır.

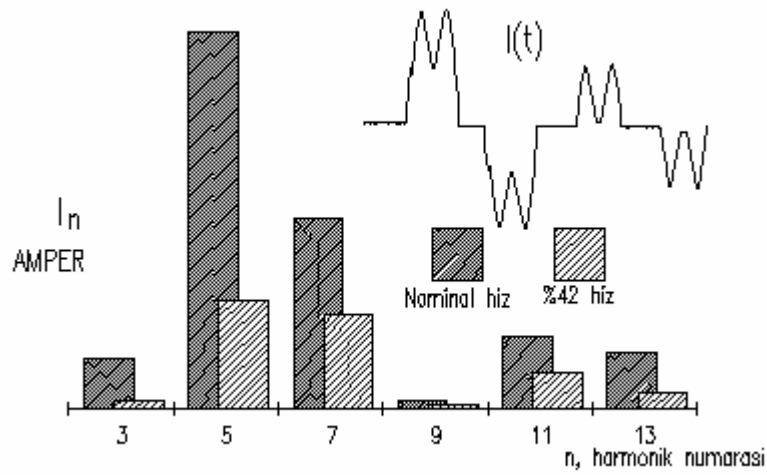
GKE düzenekleri ani hız değişimi gerekmeyen uygulamalar için kullanılmaktadırlar. AKE iyi hızlanma-yavaşlama kontrolü karakteristiğine sahip olup kapasitif güç faktörlü motor gerektirirler ya da devreye tristörleri tetikletecek kontrol devresi eklenmesi ihtiyacını ortaya çıkarırlar. AKE ler özel tip motor kontrollerinde kullanılmalı ve tristörler endüktif gerilim dalgalanmalarına karşı korunmalıdır.

Şekil 2.10’da büyük güçlü ayarlı hız kontrol ünitesi için eşdeğer devreler ve gerilim zamanla değişen dalga şekilleri verilmiştir.



Şekil 2-10 Büyük güçlü ayarlı hız kontrol ünitesi

Ayarlı hız kontrol sürücülerinde akım harmonik bozulması sabit değildir. Değişik hız ve tork değerleri için dalga şekli ciddi farklılıklar gösterir.



Şekil 2.11 Darbe genişlik modülasyonlu ayarlı hız kontrol ünitesi akım harmonikleri

Şekil 2.11'de darbe genişlik modülasyonlu hız sürücüsü için iki farklı işletme durumuna ait harmonik spektrum ve şebekeye iletilen akımın zamanla değişimi

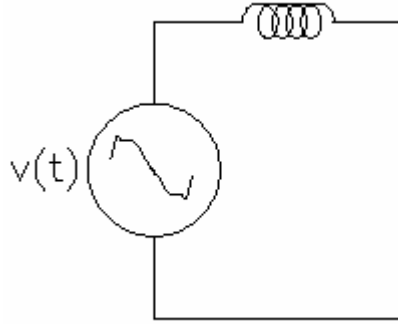
gösterilmektedir. Nominal hızın %42 mertebesinde dalga şekli orantısal olarak daha bozulmakta iken nominal akımda şebekeye daha yüksek genlikte harmonik akımları iletilmektedir. Dizayn aşamasında dikkat edilmesi gereken önemli husus da, böyle bir uygulamada en yüksek THD yerine bu özelliğin dizayna esas teşkil eden etmen olmasıdır. [9]

Elektrik tesislerinde sıkça kullanılmakta olan bahsi geçen çeviricilerin ürettiği harmonik problemlerine karşı, yüksek güç faktöründe çalışan, yüksek verimlilikli, azaltılmış harmonik üreten “yüksek kaliteli çeviriciler” terimi artık birçok uluslararası standartlara da girmeye başlamıştır. [10]

Fotovoltaik sistemler harmonik üretme bakımından genel olarak çeviricilerden kaynaklanan harmonik etkinliğe sahiptirler. Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup(enerji iletiminin zor ve masraflı olduğu yerler; örneğin boru hatları vana istasyonları gibi), ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için çeviricileri kullanırlar. Dolayısıyla dönüşüm esnasında yariiletken elemanların sebep olduğu harmonikler sözkonusu olmaktadır.

2.3.2.Arak cihazları

Bu kategoriye ark fırınları,ark kaynak makineleri,manyetik balast kullanılan desarj tip aydınlatma(floresan,sodyum buharlı,civa buharlı)elemanları girmektedir.



Şekil 2.12 Ark cihazı eşdeğer devresi

Şekil 2.12’deki eşdeğer devrede görüldüğü gibi ark kaynağı, temel olarak akımı makul bir değerde limitte tutabilmek için bir reaktans ile seri bağlı gerilim kısılacı olarak da tarif edilebilir.

Elektrik ark cihazlarının akım-gerilim karakteristikleri doğrusal değildir. Ark ateşlemesinden sonra şebeke empedansına bağlı olarak gerilim düşerken akım

yükselir. Bu da floresan aydınlatma uygulamalarında olduğu gibi arka işletme sürecinin belirli kısmında negatif direnç özelliği göstermesi olanağını verir.

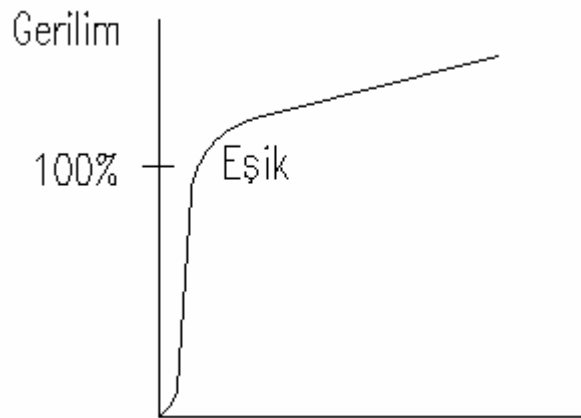
Elektrik ark fırın uygulamalarında sınırlamayı sağlayan empedans öncelikli olarak fırın kablosudur ve buna şebeke empedansı ile fırın transformatör empedansı da katkı sağlarlar. Genel uygulamalarda akımın 60 000A mertebeleri ve üzerine ulaştığı görülür.

Elektrik ark uygulamaları en iyi tarif ile birer gerilim harmonik kaynağı olarak algılanabilir. Ark hücresine bağlanacak bir prob vasıtası ile gerilimin trapezoidal olduğu görülebilir. Genliği ark boyunun bir fonksiyonudur. Fırın kabloları (ya da balast empedansları) birer tampon vazifesi ile gerilim kaynağının kısmi bozulmasına sebebiyet verirler. Bircok analiz sonucu görüldüğü üzere ark yükü bağıl olarak bir harmonik akım kaynağıdır. Bu durum sadece sistem rezonans durumunda iken geçerli değildir.

Ark fırın harmonik eğrileri floresan aydınlatma cihazları için verilen Şekil 2.4 ile özdeştir. Üç fazlı ark cihazları uygun düzenekler ile transformatör üzerindeki üçüncül harmonikleri yok edebilecek şekilde tasarlanabilirler. Fakat ark fırınlarında erime safhasında dengesiz yük sebebi ile bu sağlanamayabilir. Arkın sabit olduğu arıtma safhasında bu harmonik giderilmesi daha iyi uygulanabilir. [2]

2.3.3 Doymalı cihazlar

Bu kategoriye transformatörler, generatörler ile demir çekirdek içeren diğer elektromekanik cihazlar girmektedir.



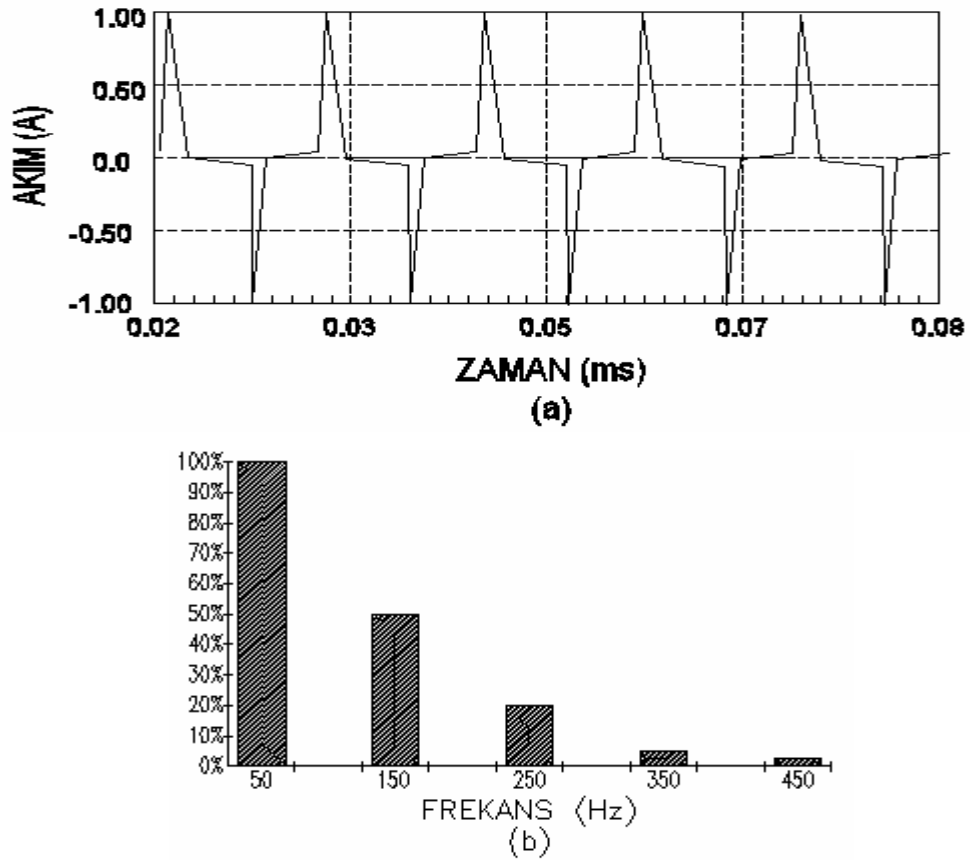
Şekil 2.13 Transformatör mıknatıslanma karakteristiği

Şekil 2.13'deki eğriden de anlaşılacağı gibi, harmonikler demirin doğrusal olmayan mıknatıslanma karakteristiğinden dolayı ortaya çıkar.

Güç transformatörleri genellikle doyma mıknatıslanma karakteristiği değerinin hemen altında eşik değerde işletilecek şekilde tasarlanırlar. Transformatör işletme akı yoğunluğu demir maliyeti optimizasyonu, yüksüz kayıplar, ses diğer birçok yan etmenlere göre seçilir.

Günümüzde birçok elektrik idaresi, transformatör üreticilerini yüksüz kayıplar ve yük altındaki kayıplardan dolayı ceza uygulamasına zorlarken üreticiler de en aza indirgenmiş maliyetli transformatör üreterek şartnamelere uymaya çalışırlar. Yüksüz kayıplardaki ya da ses limiti aşılmasındaki ceza uygulaması çekirdekta daha fazla demir kullanımına ve daha yüksek doyma eğrisi elde edilmesine sebep olarak daha düşük harmonik akımları elde edilmesi avantajını da beraberinde getirir.

Normal işletme geriliminde transformatör uyarma akımı harmonik içerenler açısından zengin olmakla birlikte toplam yük akımının %1 inden daha düşük bir değere sahiptir. Şekil 2.14'de transformatöre ait şekiller verilmiştir.



Şekil 2.14 Transformatör mıknatıslanma akımı ve harmonik spektrumu

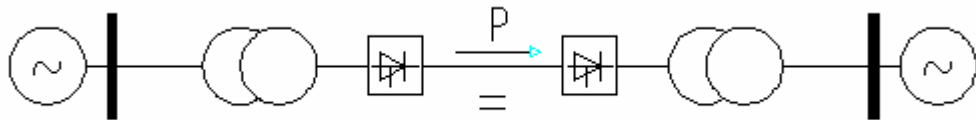
Transformatörler, nominal değerleri bazında %20 mertebelerinde harmonik akımı üreten ve daha önce bahsi geçen elektronik güç çeviricileri ve ark cihazları kadar yüksek mertebelerde harmonik üretmedikleri için fazla sorun teşkil etmezler. Fakat yüzlerce transformatörün bağlı olduğu dağıtım şebekelerinde etkileri dikkate değer seviyelere ulaşabilir. Yükün düşük ve gerilimin yüksek olduğu sabah saatlerinde üçüncül harmonik akımlarındaki yükselme dikkate değer olabilir. Transformatör uyarma akımı daha görünür seviyededir çünkü onu gizleyebilecek kadar yeterli yük akımı yoktur ve yüksek gerilim daha fazla akımın üretilmesine yol açar. Transformatörlerin aşırı uyarılması ile oluşan harmonik gerilim distorsiyonu ancak tarif edilen az yüklü durumlarda ortaya çıkmaktadır.

Bazı transformatörler özellikle doyma bölgesinde işletilecek şekilde tasarlanırlar. Bir örnek endüksiyon fırınları için gerekli 180Hz üreten transformatörlerdir.

Motorlar da aşırı uyarılma ile akımda bozulma gösterirler. Bazende ciddi mertebede 3.harmonik akımlı üçgen dalga şekline sahip tek fazlı motorlar da uygulama alanı bulmaktadır.

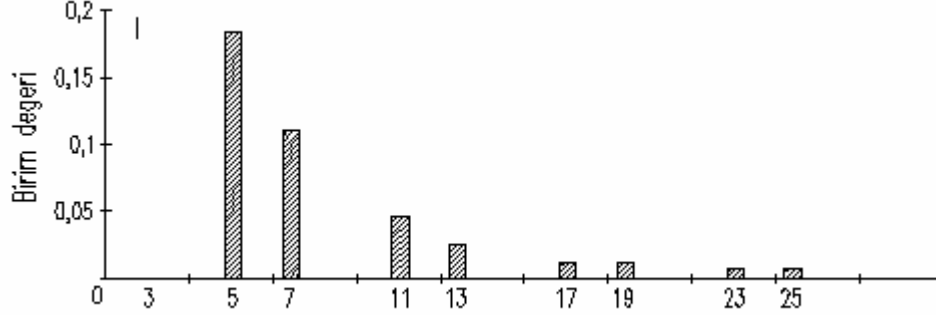
Şekil 2.14'deki dalga şekli tek fazlı ya da yıldız noktası topraklı üç fazlı bir transformatöre aittir. Akım ciddi mertebede 3. harmonikler içermektedir. Üçgen bağlantı ya da topraklanmamış yıldız noktası üçüncül harmoniklerin tersine sıfır mertebedeki harmoniklerin akışını engeller. Bu durumda sistemde dengesizlik olmadıkça hat akımı bu harmoniklerden yoksun olacaktır.

HVDC(High Voltage Direct Current) olarak adlandırılan doğru akımla yüksek gerilim iletimi uygulamaları, ekonomik ve teknik olarak avantajlı olmaları sebebi ile özellikle çok uzun havai hatlarla enerji nakli gereken yerlerde ya da deniz altından daldırma kablolar ile enerji iletiminin zorunlu olduğu uygulamalarda kullanılırlar. Tipik bir HVDC şebekesinin tekhat şeması şekildeki gibidir.



Şekil 2.15 HVDC hattı

Transformatör çıkışında dc gerilimi elde etmek için 6 darbeli tristörlü doğrultucu kullanılması durumunda birim değerlere indirgenmiş harmonik akımları şekil 2.16'daki gibi olmaktadır. [1]



Şekil 2.16 HVDC sistemi harmonik akım spektrumu

IEC60076-1 güç transformatörleri Bölüm 1 de THD değerinin %5 ya da tek harmoniklerin, çift harmoniklerin sınırını %1 olarak tarif etmektedir(Bkz Bölüm 4)

Generatörler en doğal harmonik üreticilerindendir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, manyetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makineler, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir. Bunu önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda uygun tedbirler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sinüsoidal olması sağlanır. Senkron generatörlerin oluşturduğu harmonikler generatör gücü 1000KVA dan büyük olmadığı sürece dikkate alınmaz.

Generatörlerin bağlantı şekilleri de harmonik frekansında belirleyici özellik taşırlar.

- Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmış ise, 3 ve 3 ün katı frekanslı harmonikler sadece faz geriliminde bulunmakta olup fazlararası gerilimlerde bulunmazlar.
- Eğer yıldız bağlı generatöre üç fazlı dengeli bir tüketici bağlanır ise ve yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmaz ise, 3 ve 3 ün katı frekanslı harmonikler geçmezler. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3 ün katı frekanslı I_o akımı, nötr üzerinden de bunların

toplamı olan 3.Io değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3 ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.

- Eğer generatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılardan 3 ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur.

Bu sebeplerden dolayı, generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir, generatörün dört telli bir şebekeyi beslemesi gerekiyor ise, zigzag bağlı bir bobinde oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Generatörlerin sebep olduğu 3 ve 3 ün katları harmonik akımları, generatör veya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanılmak sureti ile bloke edilir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun tasarlanarak 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür. Burada dikkate değer en düşük harmonik 11. harmoniktir. [3]

3-HARMONİKLERİN ELEKTRİK SİSTEMİNE ETKİLERİ

3.1 Giriş

Sistemde arıza olana kadarki durumda harmoniklerin etkisinin bilinmemesi, harmoniklerin en sinsi özelliği olarak ortaya çıkmaktadır. Dolayısıyla arızaların önlenmesi için harmoniklerin güç sistemi içerisinde nasıl davranış gösterdikleri ve güç sistem elemanları üzerine nasıl etki ettiklerinin iyi kavranabilmesi gerekmektedir. [1]

Harmonik kaynaklarının tanımlaması (Bkz Bölüm 2) temellerinden yola çıkılarak, bunların etkilerinin sistem üzerinde olduğu kadar sistemin birer bileşeni olan diğer ekipman ve elbette insan üzerindeki etkileri de problemlerin çözüm yolunun bulunmasında belirleyici unsurlar olacaktır. [5]

İzin verilen ve tavsiye edilen değerler baz alınarak her bir elamanın harmoniklere karşı hassasiyeti etüt edilmelidir. Güç sistemlerinde harmoniklerin en önemli etkileri;

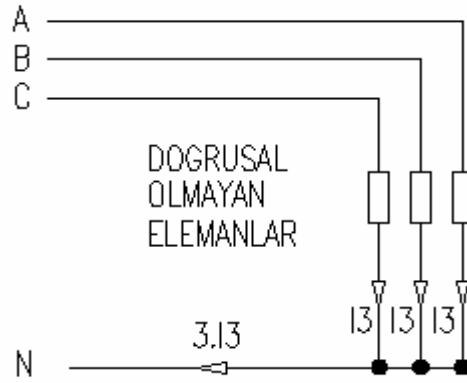
- Generatör ve şebeke gerilimin dalga şeklinin bozulması
- Harmonik seviyelerindeki yükselme olasılığı ile sistemde ortaya çıkabilecek paralel ve seri rezonanslar
- Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım gibi tüm kademelerinde ek kayıpların ortaya çıkması ve dolayısıyla sistem verimliliğinin azalması
- Elektriksel ekipmanların yalıtımsal özelliklerinde yaşlanmaya sebebiyet vermeleri ve kullanım ömürlerinin kısalması ve delinme
- Sistem bileşen ya da ekipmanlarının arızaya uğraması
- Gerilim düşümünün artması
- Toprak kısa devre akımlarının daha büyük değerlere yükselmesi
- Temel frekans için tasarlanmış kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans göstermeleri sebebiyle aşırı yüklenmeleri ve yalıtım zorlanması nedeniyle hasar görmeleri

- Koruma sistemlerinin hatalı çalışması
- Kesintisiz güç kaynaklarının veriminin düşmesi
- Aydınlatma elemanlarında, monitörlerde görüntü titreşimi meydana getirmesi
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında şebekede rezonans olaylarının meydana gelmesi, aşırı gerilim-akımların oluşması
- Sesli ve görüntülü iletişim araçlarının parazitli ve anormal çalışması
- Mikroişlemcilerin hatalı çalışması
- Harmoniklerden kaynaklanan gürültü nedeniyle kontrol sistemlerinin hatalı işletimi
- Başta motor olmak üzere diğer cihazlarda ek gürültülere neden olması
- Harmoniklerden dolayı dalga seklindeki değişikliklerin elektrik sayaçlarının hatalı okumalarına sebebiyet vermeleri olarak özetlenebilir. [3,12-15]

3.2 Harmoniklerin iletkenler üzerindeki etkisi

Harmonik akımlar iletkenlerde kayıpların artmasına dolayısıyla da ısınmanın artmasına neden olurlar. Harmonik akımlar iletkenlerde iki temel etki sonucunda ek ısınma meydana getirirler. Birincisi literatürde “skin effect” olarak bilinen deri etkisidir. Harmonik frekansının artmasına bağlı olarak akımın, iletkenin dış yüzeyine doğru yoğunlaşması sonucu etkin direncin artması ile meydana gelen ek artıştır.

İkinci etki ise tek fazlı yükleri besleyen 3-fazlı 4 telli sistemlerin nötr iletkenlerinin büyük akımlarla yüklenmesi ile karşımıza çıkar. Bazı doğrusal olmayan elemanlar büyük değerde 3 ve 3 ün katları harmonik bileşenleri üretirler. Temel frekanstaki dengeli 3-fazlı akımların toplamı sıfır olduğundan nötr iletkeninden akım geçmemesine neden olurlar. Ancak 3 fazlı sistemlerde 3.mertebeden harmonikler nötr iletkeninde birbirini zayıflatmaz, tam tersine güçlendirirler. Harmonik mertebesi n için fazlar arasında $n.120$ lik faz farkı olduğundan 3 ve 3' ün katı harmoniklerin herbiri 360 derecelik faz farkına yani birbirine eklenmesine neden olur.



Şekil 3.1 Nötr hattının 3.harmonik bileşenlerle yüklenmesi

Şekil 3.1’de sadece 3.harmonik bileşenlerin nötrde toplanması ile bu hattın aşırı yüklemesi gösterilmiştir. Bu nedenle nötr akımının değeri faz akımının değerinin 1.7 katına kadar çıkabilir. Nötr iletkenleri faz iletkenleri ile aynı kesitte olsa bile bu durumda nötr iletkeni aşırı yüklenebilir. Bu sorun en çok, 3 fazlı dağıtım sisteminin tek fazlı büyük yükleri beslediği ticari binalarda rastlanmaktadır. Söz konusu soruna karşı en yaygın önlem, nötr iletkeninin faz iletkeninin iki katı büyüklüğünde kesitlerde yapmaktır. [3]

3.3 Harmoniklerin direnç üzerindeki etkisi

Bilindiği gibi harmonik bileşenlerin mertebesi arttıkça frekans değeri de aynı oranda artmaktadır. Harmoniklerin frekansının artması ile oluşan deri etkisi sonucu (skin effect), iletkenin etkin kullanılan kesiti azalmaktadır. İletkenin doğru akımdaki direncinden daha büyük olan alternatif akımdaki direnci harmoniklerle daha da artış göstermektedir. İletkenin sinüoidal akımdaki temel bileşen omik direnç değerine (R_1) nonsinüoidal akım akış halinde harmonik bileşenlerin herbiri için şekil3.2’deki gibi (R_n) direnci ilave edilmektedir. Böylelikle, tüm bileşenlerle birlikte harmonikli akıma gösterilen omik direnç değeri $R = R_1 + R_H$ olur. Analizlerin çoğunda harmonik bileşenlerden ilave olan direnç ihmal edilmekle birlikte, daha detaylı analizlerde bunun etkisi de dahil edilmektedir. Deri etkisi ile oluşan direnç değeri literatürde yaygın olarak kabul gören Arnold un verdiği ampirik bir formülle ifade edilir.

$$x = 1,585 \cdot 10^{-4} \sqrt{\frac{f}{R_0}} \text{ olmak üzere,}$$

$0 \leq x \leq 3$ için $R = R_0.K_1$

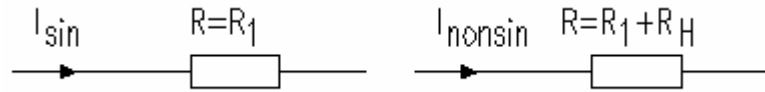
$x > 3$ için $R = R_0.K_2$ 'dir.Burada,

$$K_1 = \frac{1}{2} \left[\left(1 + \frac{x^4}{48} \right)^{1/2} + 1 \right] \quad (3.1)$$

$$K_2 = \left[\frac{x}{2.828} + 0.26 \right] \quad (3.2)$$

ile ifade edilir. Burada R_0 , doğru akım direnci ve R , deri etkisi dahil direnç olarak tanımlanmaktadır.

Şekil 3.2’de farklı akım durumlarında direncin frekansla değişimi görülmektedir. [3]



Şekil 3.2 Omik direncin frekansla artması

a) Sinüsoidal akımlı durum b) Nonsinüsoidal akımlı durum

3.4 Harmoniklerin endüktans ve kapasitans üzerindeki etkisi

Elektrik şebekelerinin ve elemanlarının (hatların, motorların, generatörlerin, transformatörlerin v.b.) modellenmesinde reaktanslar oldukça geniş bir yer tutmaktadır. Temel bileşendeki değeri X_L olan bir endüktif reaktans , n. harmonikte

$$X_{L_n} = n.X_L \quad (3.3)$$

değerini alır. Benzer şekilde, temel harmonikteki değeri X_C olan bir kapasitif reaktans n. harmonikte

$$X_{C_n} = \frac{X_C}{n} \quad (3.4)$$

değerini alır. Her iki durum için de, reaktansın doğrusal bir eleman olduğu kabul edilmektedir.

3.5 Harmoniklerin kondansatörler üzerindeki etkisi

Güç katsayısının düzeltilmesi için kullanılan kondansatörlerin kendileri harmonik üretmezler ancak sistemdeki harmonik seviyesi üzerinde önemli etkileri bulunmaktadır. Bir kondansatör grubunun reaktansı, artan frekans ile birlikte azalmaktadır. Bir kondansatörün n. harmonik için akım değeri,

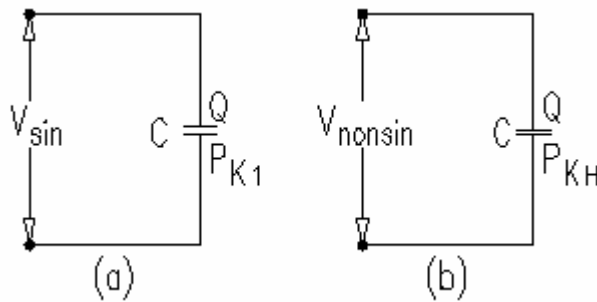
$$I_n = 2\pi f_n C V = n \omega_1 C V_n \quad (3.5)$$

ile belirlenir. Eşitlikte de görüldüğü gibi herhangi bir harmoniğin, akımdaki oranı gerilimdeki oranından büyük olmaktadır. Harmonik bileşenler, kondansatörlerin ve bobinlerin birlikte kullanıldığı sistemlerde rezonansa sebep olabilirler. Q_s sistemin kondansatör grubunun bağlı bulunduğu noktadaki kısa devre gücünü, Q_c ise kondansatörlerin toplam gücünü göstermek üzere, bir alçak gerilim güç sisteminin rezonans frekansına ait harmonik mertebesi,

$$n = \sqrt{\frac{Q_s}{Q_c}} \quad (3.6)$$

bağlantısı ile bulunur.

Bir kondansatördeki reaktif güç ve kayıp güç, uygulanan gerilime bağlı olarak değişir. Şekil 3.3’de kondansatör elemanı eşdeğer devreleri verilmiştir.



Şekil 3.3 Bir kondansatör elemanın
a) Sinüsoidal beslemeli hali b) Nonsinüsoidal beslemeli hali

Harmonikler kondansatörlerde hem aşırı reaktif yüklenmeye hem de dielektrik kayıplardaki artış sonucunda ısı artışına neden olurlar. Harmoniklerin yol açtığı ısı artışı ve aşırı yüklenme sonucu, kondansatörlerin ömrü kısalır. Nominal olarak, Q

reaktif gücündeki bir kondansatöre uygulanan bir harmonikli gerilim durumunda reaktif güç,

$$Q_T = Q + \sum_{n=2}^N w_n \cdot C \cdot V_n^2 \quad (3.7)$$

olarak belirlenir. Kondansatörün ideal olmadığını, kayıp gücünün olduğunu ve eşdeğer devresinde paralel R omik direncinin bulunduğunu kabul edersek bu durumda kondansatörün aktif güç kaybı,

$$P_K = \sum_{n=1}^N C \cdot (\tan \delta) \cdot w_n \cdot V_n^2 \quad (3.8)$$

şeklinde hesaplanabilir. Burada

$$\tan \delta = R \left(\frac{1}{\omega \cdot C} \right) \quad (3.9)$$

ile ifade edilen kayıp faktörüdür. $\omega_n = 2 \cdot \Pi \cdot f_n$, n. harmonik için açısal frekans olup V_n , n. harmonik gerilimin efektif değeridir. IEEE Std 18-1992 standartları, kondansatör grupları için gerilim, akım ve reaktif güç ile ilgili sınırlamalar getirmektedir. Bu standartlar kullanılarak müsaade edilebilir maksimum harmonik seviyeleri belirlenebilir. [3]

3.6 Harmoniklerin motorlar ve generatörler üzerindeki etkisi

Harmonik gerilim ve akımların en büyük etkisi, harmonik frekansındaki demir ve bakır kayıplarının artışı ile döner makinelerin ısısının artmasıdır. Harmonik bileşenler, bu yüzden döner makinelerin verimi ile momentinin düşmesine ve sinüsoidal beslemeli bir motorla karşılaştırıldığında daha gürültülü çalışmasına neden olurlar. Aynı zamanda harmoniklerin, endüksiyon motorlarındaki hava aralığında bir bileşke akı üretmesinden dolayı, motorun kalkış yapamaması ve senkronlanma sağlayamaması gibi durumlar da görülebilir.

Elektrik makinelerinde rotorun aşırı ısınması, harmoniklerden kaynaklanan gerilim distorsiyonlarının neden olduğu başlıca sorunlardan biridir. Elektrik makinelerindeki kayıplar, uygulanan gerilimin frekansına bağlıdır. Harmonikler sebebi ile motor

sıcaklığının artması motor ömrünü kısaltmakta, bu durumdan en fazla tek fazlı motorlar etkilenmektedir. Harmonik bileşenler, motor performansını %5 ile %10 arasında azaltmaktadır.

Tablo 3.1 Darbeli bir konverterin döner makine üzerindeki harmonik etkinliği

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

Tablo 3.1’de 6-darbeli bir çeviricinin oluşturduğu karakteristik harmonik mertebeleri ve döner bir makineye etkileri gösterilmiştir. Bu harmoniklerin her biri, toplam akımın pozitif ya da negatif dizi simetrik bileşenidir. Her bir harmonik gerilimi (5.,7.,11,...), makinenin statorunda bir harmonik akım endükleyecek ve stator sargılarında ilave ısı meydana getireceklerdir. Böylece temel akım bileşeninin neden olduğu ısı seviyesine gelecek ilavelerle makinenin ısısı yükselecektir.

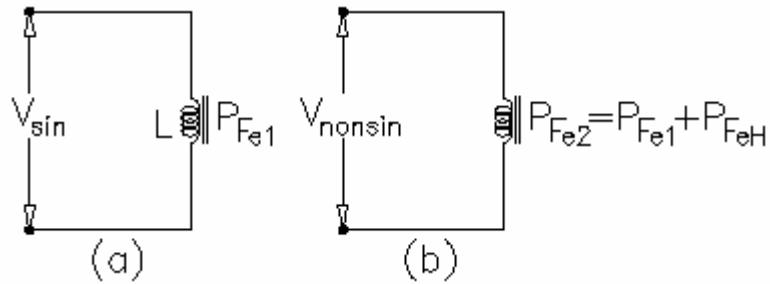
Genellikle rotordaki harmonik akımlarının akışı daha da önemlidir. Statordaki her bir harmonik akım, makinenin rotorundan akım endükleyecek biçimde hava aralığında bir manyetomotor kuvvet (MMK) üretecektir. Her bir karakteristik harmonik, pozitif ya da negatif dizi bileşen olarak tanımlanabilirken, harmoniklerin dönüş yönüne göre ya ileri ya da geri olacaktır. 5.harmonik geri yönde (negatif dizi bileşeni) dönecektir, bundan dolayı temel hava aralığı frekansı ve 5.harmonik bileşeni arasındaki net dönme farkına karşılık gelen frekansla (5.harmonik frekansına 1 ilave edilerek yani 6.harmonik frekansıyla) rotorda bir harmonik akımı endüklenecektir. 7.harmonik ileri yönde (pozitif dizi bileşeni) döndüğü için, temel hava aralığı frekansı ve 7.harmonik frekansı arasında net dönme frekansına karşılık gelen bir frekansla (7.harmonik frekansından 1 çıkarılarak yani 6.harmonik frekansıyla) rotorda bir harmonik akım endüklenecektir. Böylece rotor ısındığından, statordaki 5. ve 7. harmonikler, rotorda bir 6.harmonik akım bileşeni üretmek için birleşirler. 11. ve

13.harmonikler, rotorda 12.harmonik akımı üretmek için aynı biçimde etkili olurlar, daha yüksek mertebeden harmonikler için de aynı durum söz konusu olacaktır. [3]

3.7 Harmoniklerin transformatörler üzerindeki etkisi

Aynı zamanda harmonik üreticisi de olan transformatörler harmoniklerden iki şekilde etkilenir. Birincisi, akım harmonikleri sonucunda, bakır kayıpları ve kaçak akı kayıplarındaki artışlardır. İkincisi ise, gerilim harmonikleri sonucunda, demir kayıplarındaki artıştır. Bu kayıp artışları transformatörde ek ısınma olarak görülecektir. Ayrıca harmonikler, transformatörlerde gürültü artışı da meydana getirirler.

Harmonik gerilim ve akımlarının her ikisinin de sebep olduğu transformatör kayıpları frekansa bağlıdır. Frekansın artması ile kayıplar artmaktadır ve bu nedenle yüksek mertebeli harmonik bileşenleri, düşük mertebeli harmonik bileşenlerinden daha etkin olabilmektedirler. Şekil 3.4’de manyetik çekirdekli bir elemanın demir kayıpları sinüsoidal ve nonsinüsoidal gerili durumları için gösterilmiştir.



Şekil 3.4 Manyetik çekirdekli bir elemanın demir kayıpları
a) Sinüsoidal gerilimde b) Nonsinüsoidal gerilimde

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

$$v(t) = \sum_{n=1}^N v_n(t) \quad (3.10)$$

ve efektif değeri,

$$V = \left(\sum_{n=1}^N V_n^2 \right)^{1/2} \quad (3.11)$$

olmak üzere elemanda oluşacak demir kayıpları,

$$P_{Fe} \cong K_m \cdot V^2 = K_m \sum_{n=1}^N V_n^2 \quad (3.12)$$

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

$$\beta_n = V_n / V_1 \quad (n=2,3,\dots,N) \quad (3.13)$$

kullanılarak

$$P_{Fe} \cong K_m \cdot V_1^2 \left(1 + \sum_{n=2}^N \beta_n^2 \right) = P_{Fe_1} + P_{FeH} \quad (3.14)$$

şeklinde yazılabilir. Bu ifadeden de görüldüğü gibi sinüsoidal gerilimin meydana getirdiği demir kaybına P_{Fe_1} ilave kayıplar P_{FeH} gerilim harmoniklerine bağlı olarak sözkonusu olmaktadır. [3]

3.8 Harmoniklerin enerji iletim sistemi üzerindeki etkisi

Bir şebekedeki harmonik akımların akışı, iki temel etkiyi meydana getirmektedir. Birincisi, akım dalga şeklinin artan efektif değerinin sebep olduğu,

$$P_H = \sum_{n=2}^{\infty} I_n^2 R_n \quad (3.15)$$

ile hesaplanan ek kayıplardır. Burada I_n , n.harmonik bileşenin akımı ve R_n n. harmonik frekansındaki iletim sistemi omik direncidir. Harmonik akımların ikinci etkisi ise , iletim hattı boyunca çeşitli devre elemanları üzerinde gerilim düşümleri oluşturmastır. Akımın n.harmonik bileşeninin oluşturduğu gerilim düşümü

$$|\Delta V_n| = |I_n| |Z_n| \quad (3.16)$$

olarak ifade edilir.

3.9 Harmoniklerin devre kesiciler ve sigortalar üzerindeki etkisi

Akımda meydana gelen harmonik distorsiyon, devre kesicilerin akım kesme yeteneklerini etkilemektedir. Devre kesicilerin çalışmasındaki aksaklık, elektromanyetik endüksiyon bobininin, harmoniklerin bulunduğu durumlarda doğru çalışmamasından kaynaklanmaktadır. Bilindiği gibi, açma esnasında oluşan ark, bobin tarafından oluşturulan manyetik alan ile ark hücrelerine sürülmektedir. Bobinin çalışmasındaki anormallikler arkın yeniden tutuşmasına ve kesicinin yeniden kapanmasına yol açmaktadır.

Harmonik akımları ayrıca ilave ısınmalara neden olduklarından, sigortaların çalışma karakteristiklerinin değişmesi ile akımı zamansız kesmeler söz konusu olur.

Harmonik akımlar, anahtarlama elemanlarında ısınmayı ve kayıpları artırır. Böylece, sürekli hal akım taşıma kapasitesi azalır ve bazı izolasyon malzemelerinin ömrü kısalmır. Ayrıca, harmonik bileşenler, anahtarlama elemanlarının akım sıfır geçişinden temel frekanstaki normal sinüs dalgasına göre daha yüksek bir değişim hızına yol açabilmekte ve bu da sonuçta akım kesme işlevini zorlaştırabilmektedir. [3]

3.10 Harmoniklerin aydınlatma elemanları üzerindeki etkisi

Harmonikli bileşenleri bulunan gerilimlerin, floresan lambalar üzerinde kulağın duyabileceği gürültülerle birlikte demir kayıplarının da artışında etkin bir rolü vardır. Floresan aydınlatmada tek dereceli harmoniklerin seviyesi önemli oranda devreyi etkiler.

Akkor telli lambaların ömrü, distorsiyona maruz kalmış gerilimle çalıştırıldıklarında kısalmaktadır. Bu durum lambaların içerisindeki flamanın aşırı ısınmasından kaynaklanmaktadır. Harmonikler nedeniyle oluşan gerilim artışının küçük değerde olması durumunda dahi akkor flamanlı lambanın ömrü büyük değerde

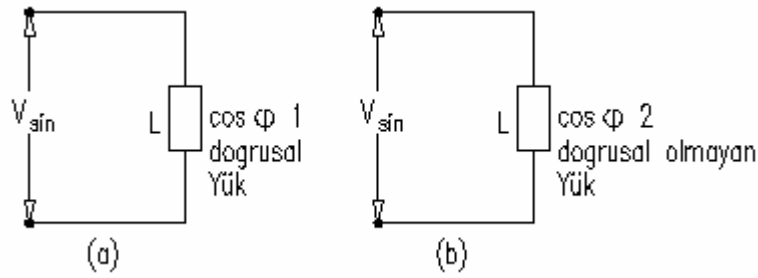
azalmaktadır, örneğin normal gerilimin %5 üstünde bir gerilimle kullanıldıklarında akkor lambaların ömürlerinin ortalama olarak %50 oranında kısalabilmektedir.

3.11 Harmoniklerin Güç Faktörü üzerindeki etkisi

Güç faktörü genel anlamda gücü kullanabilme mertebesi olarak tarif edilebilir. Bilindiği gibi güç faktörü devredeki aktif güç (P) ile görünür güç (S) arasında,

$$GF=P/S \quad (3.17)$$

ile ifade edilen değerdir. Güç faktörü düzeltilmesinde amaç, devreden çekilen aktif gücün devredeki elemanların yüklenmesine esas olan görünür güç değerine yaklaştırmaktır. Hatta birbirine eşit olması durumunda her iki güç aynı olacak ve güç faktörü de 1 değerini alacaktır. Şekil 3.5’de sinüsoidal şebekeye bağlı doğrusal ve doğrusal olmayan eşdeğer devreler gösterilmektedir.



Şekil 3.5 Sinüsoidal şebekeye bağlanan yük ile güç faktörünün değişimi
a)Doğrusal yük durumu b)Doğrusal olmayan yük durumu.

Genel olarak harmonikli akım ve gerilimlerin devrede dolaşması durumunda güç faktörü harmoniksiz duruma göre değişecektir. Güç faktörü değişimi ile ilgili pratik uygulama bakımından en çok karşılaşılan durum olan sinüsoidal bir şebekeye doğrusal olmayan eleman bağlanması durumudur. Sinüsoidal bir şebekeye doğrusal olmayan eleman bağlanması durumunda çekilecek harmonik akımlar sebebiyle güç faktörü,

$$GF = \frac{V \cdot I_1 \cdot \cos \phi}{V \cdot \left[\sum_{n=1}^N I_n^2 \right]^{1/2}} = \frac{I_1}{I} \cdot \cos \phi \quad (3.18)$$

olarak elde edilir. Burada birinci terim akımın distorsiyon faktörü , ikinci terim ise kayma faktörü olarak adlandırılır. Birinci terimin daima 1’den küçük olması

sebebiyle güç faktörü sinüsoidal durumundaki $\cos\Phi$ değerinden daha düşük bir değer alacaktır. Görüldüğü gibi harmoniklerin güç faktörünü düşürücü özelliği bulunmaktadır.

Harmonikli bir devrenin güç faktörü kompanzasyonu belirli sınırlar içinde mümkün olabilmektedir. Devreye bağlanacak kondansatör kapasitelerinin artırılması ile güç faktörü belli bir değere kadar artacak, daha sonra ise artış değil azalma görülecektir. Bu durumda yeterli kompanzasyon için filtre devreleri kullanılması gerekecektir. [3]

3.12 Harmoniklerin Röleler üzerindeki etkisi

Güç sistemlerinin korunmasında, koruma sisteminin temel elemanı ya da "beyni" olarak kabul edilen "koruma röleleri" üzerinde nonsinüsoidal büyüklüklerin etkileri, literatürde teorik ve deneysel olarak incelenmiştir. Bu konu ile ilgili yayınlanmış bazı çalışmalar vardır fakat bunların yeterli olduğu söylenemez. Güç sisteminde dalga bozulması (harmonikli akım veya gerilimin bulunması) durumunda koruma elemanları ile ilgili ortaya çıkan sorunlar tam olarak tanımlanamamıştır. Bu yönde tüm koruma elemanları için kesin bir biçimde sonuçlar verebilecek yeterince çalışma yoktur. Bütün bunların yanında literatürde bulunan teorik çalışmalardan elde edilen sonuçlar çok kısa olarak şöyle özetleyebiliriz:

Akım ve gerilimin sıfır geçişlerine göre çalışan röleler, harmonik distorsiyonundan etkilenebilmektedir. Akım ve gerilim dalga formlarının bozulması, rölelerin performansını etkilemektedir. Her bir röle harmoniklerin sistemde bulunması karşısında farklı davranış biçimleri göstermektedir. Aynı tipte rölelerin farklı modelleri bile aynı distorsiyona değişik biçimde cevap verdiği gibi, bu durum aynı modellerde bile söz konusu olabilmektedir. Harmonikler, rölelerin arıza koşullarında çalışmamasına ya da sistemin normal çalışma koşullarında gereksiz yere açma kumandası vermesine neden olabilir. Bununla birlikte, röleler üzerinde yapılan incelemelerde, harmonik distorsiyonun %10-20 seviyelerine kadar bir işletme problemi oluşturmadığını gözleyen çalışmalar vardır. Fakat farklı bir çalışmada indüksiyon diski aşırı akım rölesinin frekansı 3. harmonikten 9. harmoniğe kadar artırıldığında çalışma değeri artış göstermiştir.

Harmoniklerin koruma rölelerine etkisi konusunda tam bir analitik yaklaşım ortaya konulamamış, elde edilen deneysel sonuçlar üzerine yorumlar yapılarak harmoniklerin etkisinin; rölenin tipine, imalatçısına ve röle girişindeki ölçü

transformatörünün manyetik doyma karakteristiğine göre değişim gösterdiği ifade edilmiştir.

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

3.13 Harmoniklerin Ölçü Aletleri üzerindeki etkisi

Harmonik bileşenlerin (özellikle yüksek mertebeli harmonik akım ve gerilimleri sonucu) sistemi rezonansa sokması durumunda, ölçü aletlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Sayaç gibi endüksiyon disk aletleri, normalde sadece temel akım bileşenlerini ölçer. Bununla birlikte, harmonik distorsiyonun sebep olduğu faz dengesizliği, sayaçların hatalı işletimine neden olabilir. Çalışmalar bu hataların, sayaç türüne ve harmoniklerin durumuna bağlı olarak hem pozitif hem de negatif yönde hatalar olabileceğini göstermiştir. Endüksiyon diskli elektrik sayaçları en yaygın kullanılan enerji ölçen aletlerdir. Bu aletler frekans karakteristiklerinden ve doğrusal olmayan davranışlarından ötürü hatalı çalışmaktadır. Akım ve gerilimin her ikisinin de dalga şekli değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlar %20'lere varan hatalara sebep olmuşlardır.

Etkin değer ölçümü için kalibre edilmiş olan voltmetre ve amperetreler harmoniklerin var olması durumunda hatalı sonuçlar vermektedir. Örneğin, 45°'lik bir ateşleme açısıyla kıyılmış bir sinüs işaretinin etkin değerini bu tip aletler %13 oranında düşük ölçmektedir. Eğer söz konusu alet amperetre ise, aşırı yüklenmiş bir iletkenin fark edilmemesi gibi bir takım sakıncalı durumların ortaya çıkması söz konusu olabilir. Akım ve gerilimin elektronik olarak çarpıldığı modern wattmetreler, mükemmel bir performans göstermektedir. Yapılan testler sonucunda bu aletlerin sinüs biçimli olmayan akım ve gerilimlerden kaynaklanan hatalarının %0.1'den daha az olduğu tespit edilmiştir. [3]

3.14 Harmoniklerin Elektronik Elemanlar üzerindeki etkisi

Bir güç elektroniği elemanı, harmonik bileşenlerin bulunduğu bir sisteme bağlı olabilir. Bu elemanların doğru çalışması, gerilimin sıfır geçişlerinin doğru belirlenmesine bağlıdır. Harmonik distorsiyon, gerilimin sıfır geçişlerini kaydırabilir veya bir noktadaki fazlararası gerilim, diğer noktadaki fazlararası gerilimden daha büyük olması sonucunu doğurabilir. Elektronik kontrol devrelerinin pek çok çeşidi için bu iki durum kritik noktalar oluştururlar ve bu kayma nedeniyle oluşan komutasyon hatalarıyla yanlış işlemlere yol açarlar. Örneğin, tristör kontrollü devrelerde harmonik distorsiyon, tristörlerin ateşleme anlarının değişmesine de neden olabilir. [3]

4-HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE ULUSLARARASI STANDARTLAR, İZİN VERİLEN DEĞERLER

4.1 Giriş

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

IEC ve IEEE tarafından konvansiyonel sistemler için daha yeni standartlar getirilmiştir. Bir diğer uygulama olarak da telefon ve enerji sistemlerinin ortak direklerde iletiminin yapıldığı durumlarda ortaya çıkan “telefon girişim(parazit) faktörü” olarak karşımıza çıkmaktadır. [16]

Harmonik distorsiyonu olarak anılan ve enerji sistemindeki harmonik bileşenler sonucu meydana gelen harmonik kirliliği, özellikle güç elektroniği elemanlarının yaygın kullanımı ile giderek artış göstermektedir. Bu distorsiyon sonucu oluşan olumsuzlukların giderilmesi bakımından harmonik sınırlamanın yapılması gereği ortaya çıkmaktadır. Bu nedenle elektrik enerjisindeki harmonik kirliliği bazı ülkelerce sınırlandırılmış ve güç kalitesinin artması hedeflenmiştir.

Son yıllarda ülkemizde yarı-iletken kontrol elemanlarının hızla yaygınlaşması, ark fırınlarının kullanıldığı demir-çelik tesislerindeki kapasite artırımları vb. dikkate alındığında, gelişmiş ülkelerde olduğu gibi, gerek akımlar ve gerekse gerilimler için THD, TTD ve HD değerlerine ilişkin izin verilen maksimum değerleri standartlaştırmak önemli yararlar sağlar. Harmonik bileşenlerin sınırlandırılması,

sistemde harmoniklerin oluşturdukları ek kayıpların azaltılması, sistemdeki elemanların tam kapasite ile kullanılması ve meydana getirdikleri zorlanma ve arızaların giderilmesi bakımından son derece gereklidir.

Gelecekte enerji sistemlerinde harmonik problemlerinin daha da artacağı göz önüne alınarak, nonlinear yükler içeren tesislerin daha kuruluş ve tasarım aşamasında düşük seviyede harmonik üretmesi için önlemler alınmalıdır. Bu amaçla, üç fazlı nonlinear yük, bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanıyor ise teknik bir zorunluluk olmadıkça transformatörün şebeke tarafındaki sargıları üçgen bağlı olmalıdır. Böylece üç ve üçün katı harmonikler şebekeyi etkilemeyecek, ek kayıplar ve THD değerleri azalacaktır. Ayrıca mümkün olduğu kadar tüketicilerin çevirici kullanımında ekonomik kriterler de dikkate alınarak, daha az sayıda ve daha düşük genlikli harmonik akım bileşenleri içeren yüksek darbe sayılı çeviriciler tercih etmesi teşvik edilmelidir. [3]

4.2 Harmonikle Bozulmanın Ölçütü

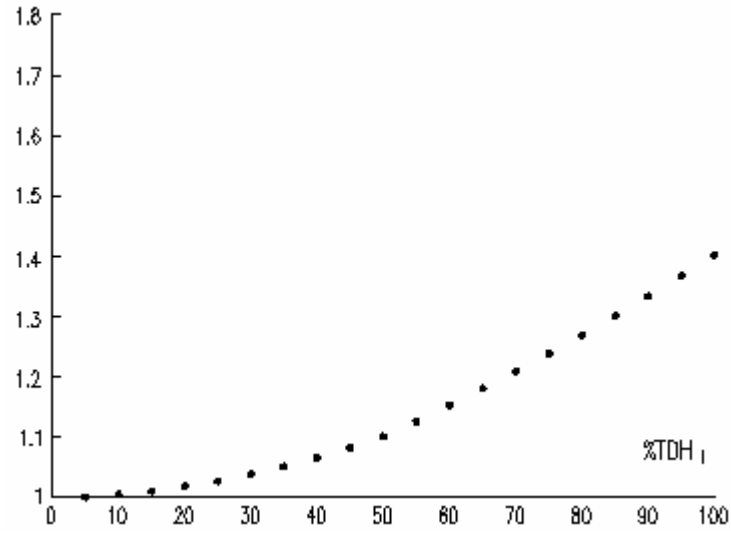
Standartlarda harmonik bozulmanın değeri için en çok kullanılan tanımlar: Toplam harmonik distorsiyonu (THD), tekil harmonik distorsiyonu (HD) ve toplam talep distorsiyonu (TTD)'dur. Bölüm 1 de ifade edildiği gibi THD, harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu büyüklük, harmonikleri içeren periyodik dalga formunun mükemmel bir sinüs dalga formundan sapmasını tespit etmek için kullanılır. Temel frekansta saf sinüs dalga formu için THD sıfırdır. Benzer şekilde, tekil harmonik distorsiyonu da bölüm 1 de tanımlanmıştır. Harmonik bozulma ile ilgili diğer bir kavram, çekilen yük akımları için tanımlanan ve "IEEE Standard 519" uygulamasında özellikle belirtilen "toplam talep distorsiyonu" kavramıdır. Buna ait ifade Bölüm 1 'de verilmiştir. Harmoniklerle ilgili kavramlar ayrıca Ek-A da detaylı olarak vurgulanmıştır.

Daha önce 1.bölümde de ifade edildiği gibi elektrik devrelerinin temel büyüklükleri olan gerilim ve akım, harmonikler içerdiğinde efektif değerleri harmonik distorsiyona bağlı olarak şu şekilde ifade edilir:

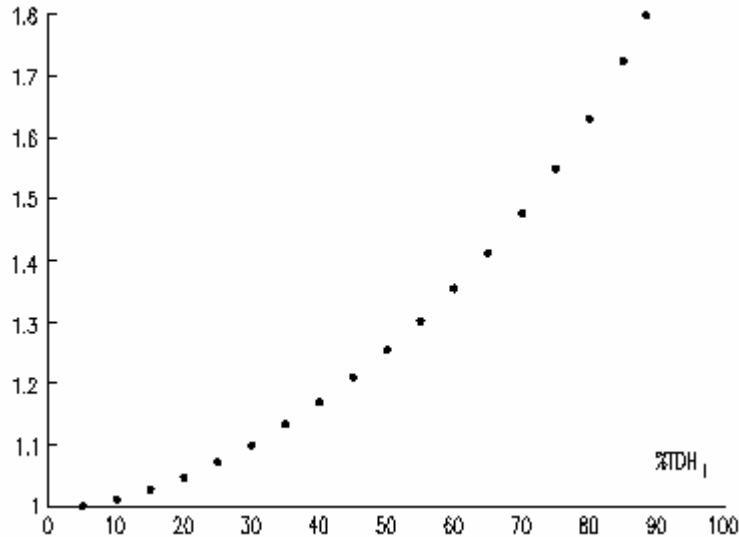
$$V = V_1 \sqrt{1 + \left(\frac{THD_v}{100} \right)^2} \quad (4.1)$$

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

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



Şekil 4.1 Akımın toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi(i =sabit)



Şekil 4.2 Sistemdeki kayıp gücün toplam harmonik distorsiyonu ile değişimi (I ,R=sabit)

4.3 Harmonikleri Sınırlandırma Çalışmaları

Elektrik enerji sistemlerinde bulunan harmoniklerin miktarını sınırlamak maksadıyla iki ayrı yöntem vardır. Bunlardan birincisi, Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (International Electrotechnic Commission, IEC) tarafından da tercih edilen herhangi bir doğrusal olmayan yükün bağlandığı noktada uygulanan yöntemdir. İkinci yöntem ise IEEE(International Electrical and Electronics Engineers) tarafından benimsenen birden fazla doğrusal olmayan yükün beslediği bir veya daha fazla merkezi noktada uygulanan bir yöntemdir.

IEC tarafından ön görülen sınırlamanın mantığında, tek tek her bir yükten kaynaklanan harmoniklerin sınırlandırılması söz konusudur. Böylece harmoniklerin toplamsal etkisinin de sınırlandırılacağı kabulüne dayanır. Bu mantık düşünsel bazda etkin olmakla birlikte uygulamada harmonik sınırlama için yapılan kabuller nedeniyle gerçekte oldukça farklı olmaktadır. IEEE tarafından ön görülen değerler, hem akım ve hem de gerilim harmoniklerine sınırlar getirmeleri bakımından daha etkin ve sınırlayıcı olarak görünmektedir. [3]

4.3.1 Yaklaşık İnceleme

Araştırmacı Halpin ve Burch harmonik sınırlandırma çalışmalarını ve harmonik seviyelerinin yaklaşık incelenmesini şu şekilde vermişlerdir:

Daha önce de açıklandığı üzere, uygulamada tam bir harmonik analizinin gerçekleştirilmesine ihtiyaç göstermeyen küçük güçlü tüketicilerin söz konusu olduğu pek çok durumla karşılaşmaktadır. Böyle bir durumda, tam ve detaylı bir harmonik analizinin gerçekleştirilmesi zorunlu değildir. Küçük tüketiciler için genel olarak ‘‘yaklaşık inceleme’’ adı verilen kriter yeterli olmakla ve daha geniş kapsamlı bir analiz yapılması ihtiyacını ortadan kaldırmaktadır. Böyle durumlarda, harmonik limitlerine uygunluk, ortak kuplaj noktasında (özel bir tüketiciyi besleyen ve bir başka tüketicinin bağlanması söz konusu olan besleme sistemindeki bir nokta) detaylı analizlerin yapılmasına gerek olmaksızın kontrol edilebilir. Bunun için gerek ve yeter koşul, kısa devre gücünün ortak kuplaj noktasından beslenen nonlineer yüklerin, görünür güçlerinin toplamından çok daha büyük olmasıdır. Aşağıda harmonik limitlerine uygunluğun yaklaşık olarak kabul edilmesi için takip edilmesi gereken dört temel adım özetlenmiştir:

1.Adım: Ortak kuplaj noktasındaki kısa devre gücünün (S_K) belirlenmesi

2.Adım: Beslenen nonlinear yükün türünün ve boyutunun belirlenmesi

3.Adım: $S_{DW} = \sum_i S_{Di} \cdot W_i$ (4.3)

değerinin hesaplanması. Burada, S_{Di} i'inci nonlinear yükün görünür gücü ve W_i ise ağırlık faktörüdür.

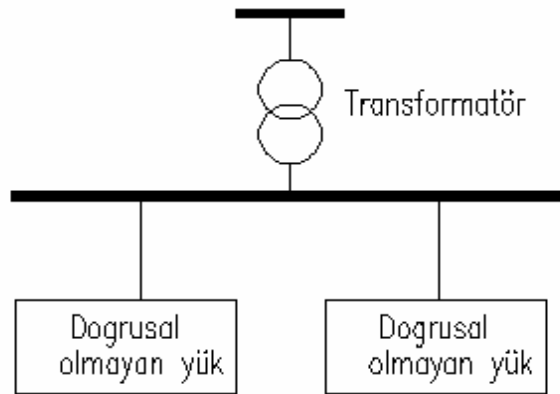
4.Adım: $N = \frac{S_{DW}}{S_K} \times 100$

eşitliği sonucunda $N < 0.1$ şartı sağlanıyorsa harmonik limitlerine uygunluk yaklaşık olarak kabul edilir.

Çeşitli nonlinear yükler için W_i ağırlık faktörleri Tablo 4.1'de verilmiştir. Genelde, daha fazla distorsiyonlu harmonik akımları üreten nonlinear yükler için ağırlık faktörünün değeri daha büyük olmaktadır.

Tablo 4.1 Harmonik sınırlarına uygunluğun yaklaşık incelemesinde kullanılan ağırlık faktörü

Yük tipi	Ağırlık faktörü
Tek fazlı güç kaynağı	2.5
Yarı kontrollü doğrultucu	2.5
6 darbeli konverter (kondansatörle filtre edilmiş ve seri endüktans yok)	2.0
6 darbeli konverter (kondansatörle filtre edilmiş ve seri endüktans $> \%3$ veya DC sürücülü)	1.0
6 darbeli konverter (akımı filtrelemek için büyük endüktans kullanılması durumunda)	0.8
12 darbeli konverter	0.5
AC gerilim regülatörü	0.7
Floresan lamba	0.5



Şekil 4.3 Harmonik distorsiyonu yaklaşık incelenen örnek sistem

Örneğin, Şekil 4.3'deki sistem için 150 kVA'lık 6 darbeli çevirici (endüktanssız) ve 300 kVA'lık 6 darbeli çevirici (%3 endüktanslı) ve $S_{K''}=28000$ kVA için N değeri hesaplanacak olursa,

$$N = \frac{S_{DW}}{S_K} \times 100 = \frac{(150 \times 2) + (300 \times 1)}{28000} = \%2.14$$

elde edilir. Hesaplanmış olan %2.14 değerinin sınır değer olan %0.1 değerinden büyük olması harmonik limitlerine uygunluğun tamamen olanaksız olduğu anlamına gelmez. Bununla birlikte, %2.14 değerinin yaklaşık uygunluk kabulü kriterinin sağlanması için yeterince küçük olmaması, harmonik limitlerinin aşılabacağı olasılığını güçlendirmektedir. Bu limitin aşılabacağını kesin olarak söylemeden önce, ortak kuplaj noktasındaki harmonik akım ve gerilimlerinin gerçek karakteristiklerinin belirlenmesi maksadıyla detaylı bir harmonik analizinin yapılması zorunludur. % 0.1 sınır değerine çok yakın değerler için bile harmonik limitlerin aşılması söz konusu olabilmektedir. Bu durumda ele alınan yük veya yükler tarafından üretilen harmonik frekanslarında , sistemde rezonans olaylarının meydana gelmesi olasıdır. [3]

4.4 Harmonik standartları

Şebekenin ve sistemdeki diğer yüklerin harmoniklerin olumsuz etkilerinden mümkün olduğu kadar az zarar görmesini sağlamak ve tüketiciye daha kaliteli enerji verebilmek için harmoniklerin belirli bir seviyenin altında tutulması gerekmektedir. Bu amaçla bazı ülkeler, doğrusal olmayan yüklerin meydana getirdiği harmonik bileşenleri bir yaptırım olarak sınırlandırmış ve harmonik standartları oluşturmuşlardır.

Harmonik standartları, harmonikler için sınırlama getirmektedir. IEEE tarafından 1992 yılında getirilen IEEE 519-1992 nolu standart ve IEC tarafından 1995 yılında IEC 1000-3-2 gibi standartlar, elektrik şirketleri için şebeke bara gerilim distorsiyonunu ve müşteriler için doğrusal olmayan yükler tarafından üretilen harmonik akımları ile ilgili sınırlamaları vurgulamaktadır.

IEEE ve VDE-0839 da endüstriyel kullanıcılarla birlikte elektrik üretim ve dağıtımı ile harmonik standartlar içermektedir. Bu standartlarda, şebeke gücünün bir fonksiyonu olarak akım ve gerilim harmonik bileşenlerinin, temel bileşenlere oranı verilmiştir.

Çeşitli ülkeler tarafından farklı gerilimler için harmoniklerin sınırlanmış değerleri toplam harmonik distorsiyonu olarak Tablo 4.2 de verilmiştir. [3]

Tablo 4.2 Çeşitli ülkelerin harmonik standartları

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

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

Uluslararası Elektroteknik Komisyonu (IEC) harmonik sınırlamasını çeşitli yükler için sınırlamış ve bunlara ait tablolarda sınır değerleri vermiştir. IEC 61000-2-2 konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerine ait gerilim harmonik sınırlamalarını içermektedir. Bunlar Tablo 4.3’de verilmiştir. Yine IEC tarafından endüstri için 2.sınıf olarak verilen IEC 61000-2-4 deki sınır değerler Tablo 4.4’de görülmektedir. [17]

Tablo 4.3 Konutlarla ilgili alçak gerilim şebekelerinde IEC-61000-2-2 gerilim harmonik distorsiyon limitleri

Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V _n	n	% V _n	n	% V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	≥21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	≥12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
≥29	k				

$$(k = 0.2 + 12.5/n)$$

Tablo 4.4 Endüstriyel santraller için IEC-61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (2. sınıf elemanlar)

Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V _n	n	% V _n	n	% V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6	0.5	15	0.3
13	3	8	0.5	≥21	0.2
17	2	10	0.5		
19	1.5	≥12	0.2		
23	1.5				
25	1.5				
≥29	k				

$$(k = 0.2 + 12.5/n)$$

IEC 61000-2-4, 3.sınıf olarak endüstriyel tesislere ait iç alan bağlantı noktasındaki harmonik gerilim yüzdelerinin sınır değerleri Tablo 4.5’de gösterildiği gibidir. [3]

Tablo 4.5 Endüstriyel santraller için IEC-61000-2-4 gerilim harmonik distorsiyon limitleri (3. sınıf elemanlar)

Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V _n	n	% V _n	n	% V _n
5	8	2	3	3	6
7	7	4	1.5	9	2.5
11	5	≥6	1	15	2
13	4.5			21	1.75
17	4			≥27	1
19	4				
23	3.5				
25	3.5				
≥29	m				

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

Avrupa standartları EN 50160'da alçak gerilim ve orta gerilime ait gerilim harmoniklerinin sınır değerleri verilmiştir, bu değerler alçak gerilim şebekesi için Tablo 4.6a'da, orta gerilim şebekesi için Tablo 4.6b'de görülmektedir.

IEC tarafından cihaz giriş akımı faz başına 16A ve altında olan alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanan özel bir dalga şekline sahip donanımlar için belirtilen D sınıfı cihazlar için kabul edilebilen en büyük harmonik akım değerleri IEC 61000-3-2'de verilmiştir. Bu değerler 220V un altındaki gerilimli sistemler için henüz uygulanmamaktadır. Ayrıca IEC/TS 61000-3-4 'deki teknik rapor, 16A'in üstündeki akım değerlerine sahip alçak gerilim dağıtım sistemine bağlanacak şu donanımlarla ilgilidir.

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

Tablo 4.6 Konutlarla ilgili (a) alçak ve (b) orta gerilim şebekeleri için EN 50160 harmonik distorsiyon limitleri

(a)

Alçak Gerilim Şebekesi ($\leq 1\text{kV}$)

Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V _n	n	% V _n	n	% V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6....24	0.5	15	0.5
13	3			21	0.5
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

(b)

Orta Gerilim Şebekesi ($1\text{kV} < V < 35\text{kV}$)

Tek harmonikler		Çift harmonikler		3 ve 3'ün katı Harmonikler	
n	% V _n	n	% V _n	n	% V _n
5	6	2	2	3	5
7	5	4	1	9	1.5
11	3.5	6....24	0.5	15	0.5
13	3			21	0.5
17	2				
19	1.5				
23	1.5				
25	1.5				

Tablo 4.7 D sınıfı donanım için IEC 61000-3-2'e göre izin verilen maksimum harmonik akımları

n	3	5	7	9	11	13	15.....39
Max I _n	2.3	1.14	0.77	0.4	0.33	0.21	0.15....15/n
Faz başına donanım giriş akımı $\leq 16\text{A}$							

IEC-1000-2-2 ise alçak gerilim şebekeleri ile ilgilidir. Gerilimde bulunan harmonik bileşenlerinin temel bileşene oranları için sınır değerler oluşturulmuştur.

IEEE'nin harmonik sınır standartları Tablo 4.8 ve 4.9'da verilmiştir. Bu tablolarda; I_K , sistemin kısa devre akımını, I_L , yüke ait maksimum talep akımını (ortalama 15 veya 30 dakikalık), TTD ise toplam talep distorsiyonunun değerini

göstermektedir. (TTD değeri, temel bileşen akımının yerine I₁ akımının kullanılmış olması hali dışında THD değeri ile aynıdır).

Tablo 4.8 IEEE'nin Gerilim için Harmonik Distorsiyon Sınırları

Bara Gerilimi (Vn)	Tekil Harmonik büyüklüğü(%)	THDv (Toplam Harmonik Distorsiyonu(%))
$V_n \leq 69\text{kV}$	3.0	5.0
$69 \leq V_n \leq 161\text{kV}$	1.5	2.5
$V_n > 161\text{kV}$	1.0	1.5

Transformatör akımındaki harmonikler IEEE C 57.1200-1987 tarafından %5 olarak sınırlandırılmıştır. [3]

Tablo 4.9 IEEE'nin dağıtım sistemlerine ait akım harmonik distorsiyon sınırları

Vn ≤ 69kV						
IK" / IL	n<11	11≤n<17	17n<23	23≤n<35	n≥35	TTD(%)
<20	4.0	2.0	1.5	0.6	0.3	5.0
20-50	7.0	3.5	2.5	1.0	0.5	8.0
50-100	10.0	4.5	4.0	1.5	0.7	12.0
100-1000	12.0	5.5	5.0	2.0	1.0	15.0
>1000	15.0	7.0	6.0	2.5	1.4	20.0
69<Vn ≤ 161kV						
<20	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
20-50	3.5	1.75	1.25	0.5	0.25	4.0
50-100	5.0	2.25	2.0	0.75	0.35	6.0
100-1000	6.0	2.75	2.5	1.0	0.5	7.5
>1000	7.5	3.5	3.0	1.25	0.7	10.0
Vn >161kV						
<50	2.0	1.0	0.75	0.3	0.15	2.5
≥50	3.0	1.5	1.15	0.5	0.22	4.0

4.5 Türkiye’de harmonik standartları

Ülkemiz açısından harmonik standart değerlerine bakıldığında bu konuda sadece küçük ev aletleri için geliştirilmiş TS9882 nolu “Ev tipi cihazlar ve benzeri elektrik donanımının elektrik besleme sistemlerinde yol açtığı bozulmalar” adlı harmonik standardı vardır. TS 9882 standardının kapsamına giren elektriksel donanımlar, pişirme ve ısıtma cihazları, motorla çalıştırılan veya manyetik olarak tahrik edilen cihazlar, taşınabilir (portatif aletler), ışık kısıcılar ile radyo ve televizyon alıcılarıdır. TS9882 standardı, ev ve benzeri yerlerdeki bu elektrik donanımının besleme

sistemlerinde yol açtığı bozulmalara karşı öngörülen şartların belirlenmesi ile bu şartların pratik olarak uygulanma kurallarına ve bozulmalarla ilgili tip deneylerin uygulanma metotları ile ilgilidir. [18-20]

4.6 Diğer bazı standartlar

Fikir vermesi ve diğer standartlarla kıyaslama açısından Norveç Teknoloji Standartları(NTS) Federasyonu tarafından yayınlanan NORSOK standartları ile ilgili gerilim bazlı değerler Tablo 4.10 da, akım bazlı değerler ise Tablo 4.11’de verilmiştir. [16]

Tablo 4.10 NORSOK E-001/2 harmonik distorsiyon limitleri

	%V _H	%THD _v	IEC 61000-2-4
YG(>1kV) baralar	6	8	2.sınıf
AG(<1kV) baralar	8	10	3.sınıf

Tablo 4.11 Müsaade edilen çevirici yükleri

I _{k''} / I _L	S _{çevirici} / S _L (%)	
	6 darbeli	12 darbeli
<20	17	36
20-50	27	57
50-100	40	86
100-1000	50	100
>1000	67	100

I_{k''} ; ortak bağlantı noktası barası kısa devre akımını

I_L ; ortak bağlantı noktası barasındaki yük akımını

S_{çevirici} ; çevirici görünür gücünü

S_L ; ortak bağlantı noktası barasındaki görünür gücü ifade etmektedir.

5-ELEKTRİK SİSTEM TASARIMINDA HARMONİKLERİN GİDERİLMESİ İÇİN BİR ANALİZ

5.1 Filtreler

Harmoniklerin zararlı etkilerini engellemek için tasarıma yönelik alınacak tedbirlere ilave olarak harmonik akımların şebekeye geçmesinin engellenmesi gerekmektedir, bunun için sisteme ilave edilmesi gereken ek devrelere ihtiyaç vardır. Devreye yerleştirilen ve istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan bu devrelere “harmonik filtresi” adı verilir.

5.2 Filtrelerin işlevleri

Harmonik filtrelerin amacı bir ya da daha fazla frekanstaki akım veya gerilimlerin etkisini yani harmonik seviyesini azaltmak veya yok etmektir. Genelde en etkin harmonik bileşenleri için tasarım yapılır. Etkisi az olan harmonik bileşenler için zayıflatılan bir filtre devresi düşünülebilir. Gerçekte filtre kullanımının nedeni hem teknik ve hem de ekonomiktir. Filtrelerle, harmoniklerin meydana getirdikleri etkiler sonucu karşımıza çıkan teknik ve ekonomik olumsuzlukların giderilmesi hedeflenir. Harmonik filtrelerin işlevleri,

- Harmonik üreten bir cihazdan(örneğin bir doğrultucudan ya da eviriciden) beslenen yükün gerilim dalgasını düzeltmek
- AC sisteme enjekte edilen istenmeyen harmonik bileşenleri önlemek
- Radyo frekans girişimlerini yoketmek

5.3 Filtrelerin çeşitleri

İşlev bakımından filtreler üçe ayrılır

1)Filtre bileşenlerinin direnç, endüktans ve kondansatör gibi pasif elemanlardan oluşturulduğu “pasif filtreler”

2)Filtrelerin kontrollü akım ya da gerilim kaynağına sahip olduğu “aktif filtreler”

3)Aktif ve pasif filtrelerin birleşmesinden oluşturulan “hibrit filtreler”

Ayrıca devreye bağlanmaları açısından da seri ya da paralel filtreler olarak ikiye ayrılırlar. [3]

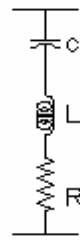
5.3.1.Pasif filtreler

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına konulan ve temel frekans dışındaki bileşenleri yok eden seri bağlı kondansatör (C) ve endüktansın(L) bileşimidir. Bazı durumlarda omik direnç (R) de ilave edilebilir.

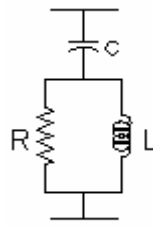
Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik bileşen için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre kolu konulması gereklidir.

Pasif filtreler endüktif ve kapasitif reaktansları birbirine eşit yapan frekansa ayarlanabilir. Kalite faktörü Q, ayar keskinliğini belirlemektedir. Q faktörüne bağlı olarak ; filtreler ya yüksek Q ya da düşük Q değerindedir. Q değeri, yüksek Q tipi filtrelerde 30 ile 60 arasında değerler alır iken, düşük Q tipi filtrelerde 0.5 ile 5 arasında değerler almaktadır.

Yüksek Q filtresi, düşük harmonik frekanslarından 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. Düşük ve yüksek Q tipi filtreler sırasıyla Şekil 5.1 ve Şekil 5.2’de gösterilmiştir.



Şekil 5.1 Tek ayarlı filtre devresi



Şekil 5.2 İkinci derece sönümlü filtre devresi

Q kalite faktörü,

$$Q = X_r / R \quad (5.1)$$

olarak tanımlanır. Bu ifadede, X_r rezonans frekansındaki reaktansı (kondansatörün ya da endüktansın) ve R filtrenin direncini göstermektedir.

Yüksek geçiren sönümlü filtrelerde ise ayar keskinliği ifadesi,

$$Q = R / X_r \quad (5.2)$$

şeklinde dir. Arrillaga tarafından bir filtrenin anma ayar frekansından uzaklaşması, ayar sapma faktörü δ ile tanımlanır ve filtrenin ayarlandığı açısal frekansı ω_n olmak üzere,

$$\delta = (\omega - \omega_n) / \omega_n \quad (5.3)$$

olarak belirlenir. Bu faktör, temel frekanstaki değişimlere, filtre ömrü ve sıcaklığının neden olduğu kondansatör kapasitesi ve endüktanstaki değişimlere, yapım toleransı ve Q için öngörülen ayar aralığının neden olduğu etkilere göre değişmektedir.

Yukarıda belirtilen ifade,

$$\delta = \frac{\Delta f}{f} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta L}{L} + \frac{1}{2} \cdot \frac{\Delta C}{C} \quad (5.4)$$

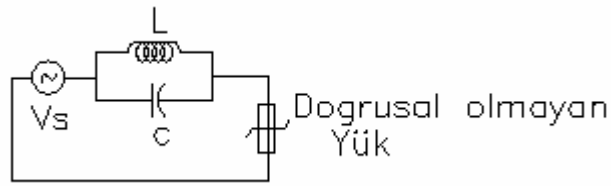
olarak da yazılabilir. Burada; Δf , AC şebeke frekansındaki sapmayı, ΔL ve ΔC ise, ayarlı filtrenin L(bobin) ve C(kondansatör) değerindeki sapmayı (örneğin çevre sıcaklığından dolayı değerlerinin değişmesi gibi) gösterir. Arrilaga tarafından bobin sıcaklık katsayısı $^{\circ}\text{C}$ başına %0.01, kondansatör sıcaklık katsayısı $^{\circ}\text{C}$ başına %0.05, frekans toleransı ± 1 ve çevre sıcaklığı $\pm 20^{\circ}\text{C}$ alınması durumunda δ , 0.016 olarak elde edilmiştir. [3,5]

a)Seri filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımlarını bloke etmek için yüksek bir seri empedansın kullanımı ile sistemde harmonik akımlarının akması engellenebilir. Amaç sadece özel bir frekanstaki işareti güç sistemine veya güç sistem elemanlarına girmesini önlemek olduğunda, seri filtre kullanılır.

Seri filtreler, Şekil 5.3'deki gibi harmonik kaynağı ile şebeke arasına seri olarak bağlanır ve harmonik akışına yüksek empedans gösterirler. Bu yüzden seri filtrelerin ayarlanmış olduğu frekansta yüksek empedans vardır. Seri filtre belirli bir frekansa ayarlandığı için sadece o ayarlı frekans bileşenine yüksek empedans gösterir.

Seri filtreler, bir fazlı sistemde 3.harmoniğin baskın olduğu 1 fazlı uygulamada yaygındır. Seri filtreler genellikle temel frekansta düşük empedans gösterir. Seri filtrelerin en büyük eksikliği,devrede seri olarak bulunduklarından tam yük akımını taşıma ve hat gerilimine göre yalıtılmak durumunda olmalarıdır. Bununla birlikte seri filtrelerin rezonans problemi yoktur. Bu da şönt filtreye nazaran olumlu yönüdür. [3]



Şekil 5.3 Devrede seri filtrenin kullanımı

b)Şönt filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımları düşük empedanslı bir paralel(şönt) yol yardımı ile toprak içine akıtılarak sistem içinde dolaşımını engellenebilir.

Seri filtrelerin maliyetinin yüksek olması ve şönt filtrelerin temel frekansta reaktif güç ihtiyacını karşılaması, şönt filtrelerin tercih edilmesine neden olur. En yaygın şönt filtreler, tek ayarlı ve yüksek geçiren filtrelerdir. Bu iki özellikli filtre tasarımı en kolay ve uygulaması en ucuz olandır.

Şönt filtreler, harmonik kaynağı ile şebeke arasına paralel olarak bağlanırlar. Bu tip filtrelerle amaç, düşük bir empedans yoluyla istenmeyen harmonik akımların filtre üzerinden geçmesini sağlamaktır. Bu nedenle şönt filtreler harmonik akımlarına çok düşük bir empedans göstermek için tasarlanır. Ayrıca şönt filtreler temel frekansta reaktif güç sağlayarak güç faktörü düzeltiminde de kullanılırlar. Bu yönüyle ekonomiklik sağlarken buna karşılık paralel filtreler, hangi anma değeri gerekiyorsa ona göre tasarlanabilirler. Ayrıca paralel filtreler, temel frekansta reaktif güç üretebilirler ve daha ekonomiktirler. En önemli özellikleri de tasarımlarının kolay olmasıdır. Bu yüzden güç sistemlerinde harmonik frekanslı akımlara düşük empedanslı bir yol sağlayan paralel filtreler kullanılır. Tek tek veya birleştirilmiş seri veya paralel filtreler, her frekans için ayrı filtre devresi gerektirmesi nedeni ile

oldukça pahalıdır. Şönt filtre de, seri filtre gibi sadece ayarlı frekansında veya ayarlı frekansı civarında etkilidir.

Şönt filtre kullanımının en büyük sakıncası güç sistemi ile rezonansa girmesidir. Filtre bileşenleri mevcut şebeke empedansı ile birbirini etkileyerek rezonansı gerçekleştirirler. Bundan dolayı ayarlı bir şönt filtrenin dizaynı ve uygulaması için bu filtrenin uygulanacağı mevcut güç sistem şebekesinin ayrıntılı bir analizi gerekmektedir. Şönt filtrelerin yerleşimi de çok önemlidir. Merkezi bir yerleşim, rezonans durumunda daha büyük bir zarara sebep olur. Her ne kadar rezonans problemi dikkate alınarak şönt filtrenin tasarımı yapılsa da, gelecekte elektrik şebekesinde olabilecek herhangi bir büyüme ve değişim sistemin değerlerini değiştirecek ve yeni bir yerleşim ve tasarımı gerektirecektir. Şekil 5.4’de şönt filtre eşdeğer devresi verilmiştir. [3]

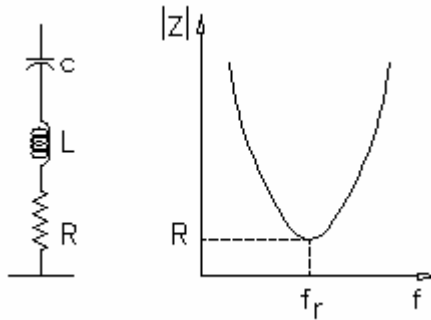


Şekil 5.4 Devrede şönt filtrenin kullanımı

Şönt filtreler örnek olarak aşağıdaki filtreler verilebilir.

Tek ayarlı filtre

Tek ayarlı filtreler, düşük empedans veya kısa devre oluşturarak ayarlanan frekanstaki harmonik akımının bastırılmasını sağlarlar. Bu işlemi genellikle tek bir frekans değeri için yaparlar. Tek ayarlı filtreler, seri RLC devresinden meydana gelmektedir.



Şekil 5-5 Tek ayarlı filtre devresi ve eşdeğer empedans-frekans grafiği

Tek ayarlı filtre için ω açısal frekansındaki filtre empedansı Z_f şekilde verilir

$$Z_f = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5.5)$$

Filtre empedansını filtre parametrelerine bağlı olarak elde etmede aşağıdaki bağıntılardan yararlanılır. Bu bağıntılarda X_r rezonans anındaki reaktans değerini göstermektedir.

$$\omega = \omega_n (1 + \delta) \quad (5.6)$$

$$\omega_n = \frac{1}{\sqrt{LC}} \quad (5.7)$$

$$C = \frac{1}{\omega_n X_r} = \frac{1}{\omega_n RQ} \quad (5.8)$$

$$L = \frac{X_r}{\omega_n} = \frac{RQ}{\omega_n} \quad (5.9)$$

kullanılarak Arrilaga tarafından empedans için

$$Z_f = R \left[1 + jQ\delta \left(\frac{2 + \delta}{1 + \delta} \right) \right] \quad (5.10)$$

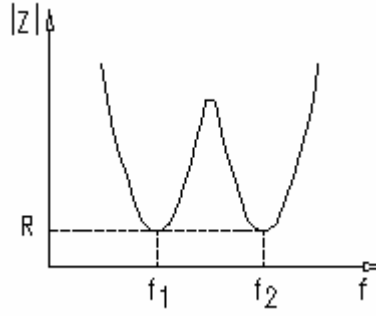
eşitliği verilmiş olup δ 'nın değerinin 1'e göre çok küçük olmasından sonuçta,

$$Z_f = R(1 + j2Q\delta) = X_r(Q^{-1} + j2\delta) \quad (5.11)$$

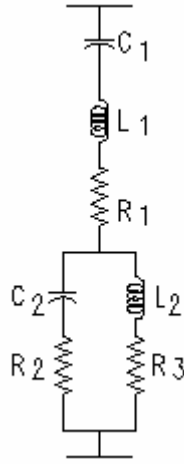
şeklinde verilmiştir. Burada X_r rezonans anındaki reaktansı göstermektedir.

Çift ayarlı filtre

Çift ayarlı filtreler adından da anlaşılacağı gibi iki ayrı frekansa ayarlı olup ayarlandıkları bu frekanslarda düşük empedans göstererek bu empedanstaki harmonik bileşenlerin süzülmesini sağlarlar. Tek ayarlı filtre ile karşılaştırıldığında temel frekanstaki güç kaybının azlığı, bu filtrelerin en önemli özelliğidir. Bundan başka endüktansların sayısının ayarlanması ile yüksek gerilimlerde bütün darbe gerilimlerini denetim altına alırlar. Şekil 5.6'da çift ayarlı filtre empedans değişimi ve şekil 5.7'de ise eşdeğer devresi gösterilmiştir. [3]



Şekil 5.6 Çift ayarlı filtrenin empedans değişimi



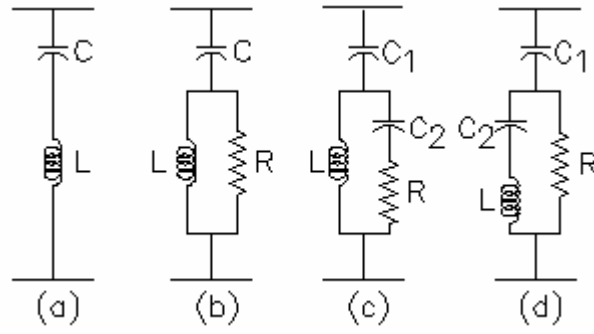
Şekil 5.7 Çift ayarlı filtre

Sönümlü filtreler

Yüksek mertebeli harmoniklerin süzülmesinde belirli frekanstan sonra empedansı düşük değerler gösteren filtrelerin kullanımı uygun olmaktadır. Bu nedenle gösterdikleri özellikler nedeni ile filtreler kendi aralarında sınıflandırılabilir.

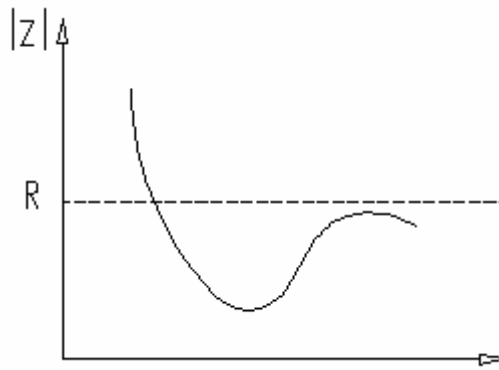
Sönümlü filtreler yüksek dereceli harmonik bileşenlerini (örneğin 17 ve üzeri) filtreleme için kullanıldığında yüksek geçiren filtre olarak anılırlar, bu durumda yüksek frekansa küçük empedans gösterirken düşük frekanslara yüksek empedans gösterirler. Sönümlü filtrelerin kalite faktörleri 0.5 ile 5 aralığında olup düşük değerdedir. Genellikle ayarlandıkları frekans, rezonans frekansından düşüktür. Örneğin 11 yerine 10.7 , 17 yerine 16.5 gibi seçilir.

Şekil 5-8 de sönümlü birinci, ikinci, üçüncü dereceden ve C tipi filtre devreleri verilmiştir.



Şekil 5.8 Sönümlü filtreler

a)birinci derece b)ikinci derece c)üçüncü derece d)C tipi



Şekil 5.9 Sönümlü filtrenin frekans-empedans değişimi

Karşılaştırıldığında her filtrenin artıları ve eksileri farklılıklar göstermektedir. Birinci dereceden sönümlü filtreler temel frekansta aşırı kayıplara sahip olup büyük bir kapasite gerektirdiklerinden yaygın olarak kullanılmazlar. İkinci dereceden filtreler iyi bir filtreleme performansı sağlar, fakat üçüncü dereceden filtrelere göre daha yüksek temel frekans kayıpları gösterirler. Üçüncü dereceden sönümlü filtrelerin ikinci dereceye göre temel üstünlüğü, C_2 kapasitesinin neden olduğu frekansta empedans artmasından dolayı, temel frekans kaybına neden olmasıdır. C tipi filtrenin filtreleme performansı, ikinci ve üçüncü dereceden filtrelerin arasında yer almakta olup, temel frekans kayıplarının azlığı önemli bir avantajdır.

Düşük mertebeli harmonikler için sönümlü filtrelerin kullanımı ekonomik olmamakla beraber bu filtrelerin başlıca üstünlükleri şu şekilde ifade edilebilir.

- Kapasite kayıpları, çalışma ve yüklenme esnasında ısı değişimine daha az duyarlıdır. Frekans sapmaları da üretim toleransları üzerinde fazlaca etkili olmamaktadır.

- Artan anahtarlama ve bakım sorunları açısından paralel kolların ek devrelere ayrılmasına gerek duyulmaksızın, geniş bir frekans aralığında düşük bir empedans sağlarlar.
- İkinci mertebeden yüksek geçiren bir filtre, yüksek frekanstaki harmonikleri zayıflatmada tek ayarlı bir filtreden daha etkilidir. [3]

5.3.2 Aktif filtreler

Aktif filtreler, harmoniklerin ortadan kaldırılması için geliştirilmiş elemanlardır. Günümüzde kullanım alanı gittikçe yaygınlaşan aktif filtre düşüncesinin temelleri Bird vd. (1969) tarafından atılmış, daha sonra Ametani (1972) tarafından geliştirilmiştir. Gelişen güç elektroniği teknolojisindeki gelişmelere paralel olarak 1980'li yılların başlarından itibaren kullanımı pratik bir değer kazanmış ve endüstriyel tesislerde kullanılmaya başlanmıştır. Bu filtreler ileri güç elektroniği teknolojilerine dayanırlar ve pasif filtrelerden çok daha pahalıdır.

Harmoniklerin filtrelenmesi için pasif filtrelerin kullanılmasında karşılaşılan en önemli iki problem, bunların mevcut dağıtım şemasına özel olması sebebi ile mevcut dağıtıma ekler gelmesi veya yüklerin artması durumunda ilk yatırımı geçersiz kılması ve sisteme montajlarının oldukça zor olmasıdır. Aktif filtreler ise pasif filtrelere oranla daha pahalı olmakla birlikte aynı anda birden fazla harmonik frekansı için adreslenebilir ve enerjinin kalitesini etkileyen problemleri ortadan kaldırabilirler. Yine aktif filtreler mevcut dağıtımda değişiklikler yapıldığı zaman bile etkili harmonik kompanzasyonuna devam ederler ki bu onların en önemli üstünlükleridir.

Aktif filtrenin çalışma prensibi doğrusal olmayan yükün çekeceği, temel bileşen dışındaki akımı karşılamaktır. Buna göre aktif filtreler yük tarafından çekilen harmonikleri analiz ederek harmonik bileşenleri uygun bir fazda yüke enjekte ederler.

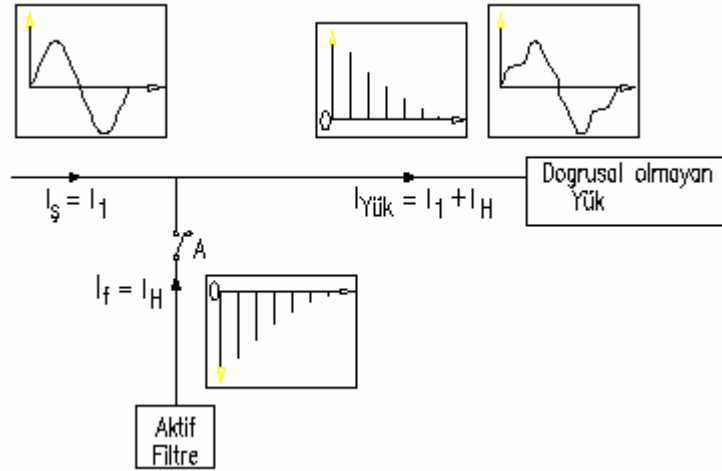
Doğrusal olmayan yük şebekeye bağlandığından I_s şebeke akımını çeker. Nonsinüsoidal olan bu akımın içerisinde temel bileşen yanında harmonik bileşen akımları da vardır.

$$I_s = I_1 + \sum_{n=2}^N I_n = I_1 + I_H \quad (5.12)$$

harmonik bileşen akımlarını sağlayan bir eleman olması durumunda şebekeden sadece temel bileşen akımı çekilir. Aktif filtreler doğrusal olmayan yükün çektiği harmonik akımları sağlarlar. Aktif filtre akımı I_f için

$$I_f = I_H \quad (5.13)$$

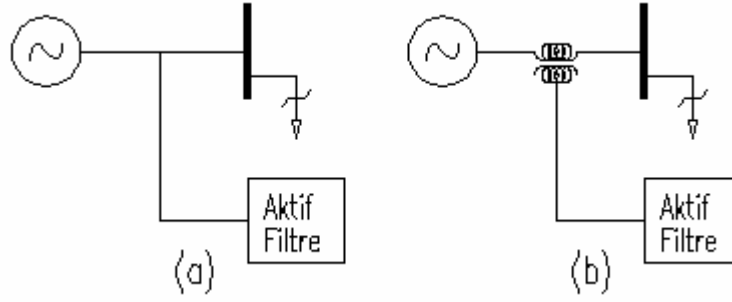
yazılabilir. Böylece şebeke akımı sinüsoidal bir akım olur. Şekil 5.10'da aktif filtre bağlı devre verilmiştir. [3]



Şekil 5.10 Aktif filtre ile harmoniklerin giderilmesi

Sonuç olarak, aktif filtreler harmonik bileşenlerin şebekeden çekilmemesine neden olurlar.

Aktif filtreler harmonik giderme işlevini devreye iki şekilde bağlanarak sağlarlar. Bu bakımdan aktif filtreler devreye şekil 5.11a'daki gibi şönt ve şekil 5.11b'deki gibi seri olarak bağlanabilir. Günümüzde yaygın olarak kullanılan, şönt tipi aktif filtredir. Şönt aktif filtre, tesiste var olan pasif filtre ile kombine olarak da çalışabilmektedir. Ancak bu durumda frekans domeninde kompanzasyon paylaşımı konusunda problem çıkabilmektedir. [3]



Şekil 5.11 Aktif filtrenin şematik gösterimi a)Şönt b)Seri

Aktif filtre ile pasif filtrenin çeşitli değişimlerdeki davranışı Tablo 5-1’de verilmiştir.

Tablo 5.1 Aktif filtre ile pasif filtrenin karşılaştırılması

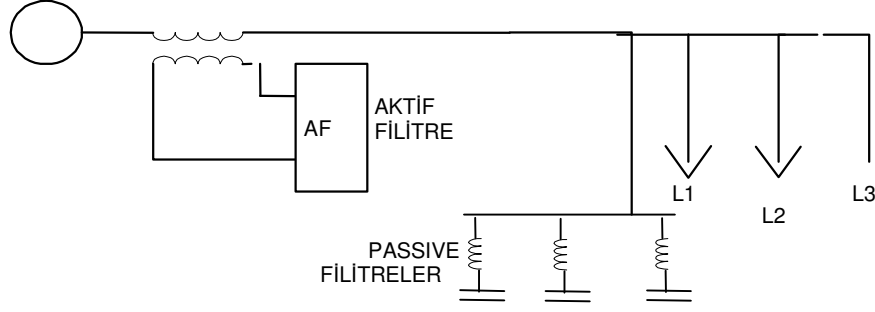
Konu	Pasif Filtre	Aktif Filtre
Filtrenin ayarlandığı frekans	Bir veya iki frekansa ayarlıdır	Birden fazla frekansa ayarlanabilir
Harmonik değerlerinde değişme	Yeni filtre gerektirir	Problem çıkarmaz
Empedansın etkisi	Rezonans meydana gelebilir	Etkilenmez
Temel frekans değişmesi	Etkinliği azalır	Etkilenmez
Akım yükselmesi	Problem çıkabilir	Aşırı yüklenme yaşanmaz
Harmonik sırasının kontrolü	Oldukça zor	Ayar ile mümkün
Maliyet	Düşük	Yüksek

5.3.3 Hibrit filtre

Üçüncü sınıf ise hibrit filtredir. Aktif ve pasif filtrenin birleşmesinden oluşur. Bu birleşme neticesinde filtreleme olayı optimum şekilde yapılmaktadır. Güç filtre tasarımcıları bu yönde de çalışmalara yoğunluk vermektedir. Filtre edilecek harmoniklerin bir kısmı pasif filtre tarafından yapılırken, geriye kalan kısmı ise aktif filtre ile yapılır. Böylece küçük boyutta “daha ucuz” bir aktif filtre ile pasif filtre hibritleşmesi sonucu sistemdeki harmoniklerin seviyesi azaltılır. Bu yönde çalışmalar halen devam etmekte olup aşağıdaki noktaya kadar gelinmiştir.

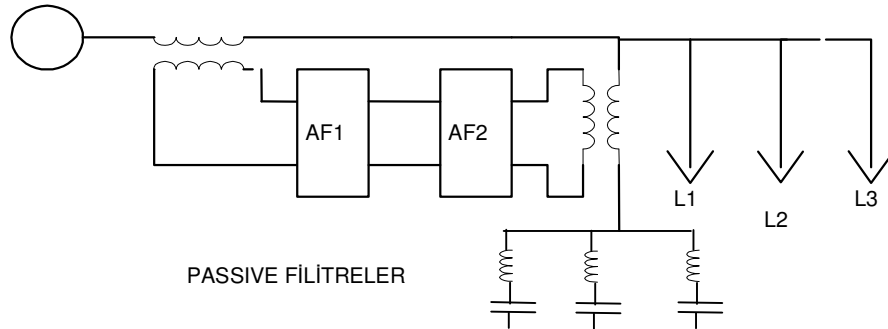
Pasif filtrelerin istenen performansı sağlamadığı durumlar için aktif filtreler ile beraber seri yada paralel birleşmeleri neticesinde çeşitli tasarımlar yapılmıştır. Aktif

filtrelerin elektrik sisteminde genel itibarı ile nasıl kullanıldığı ve bunların performansları hakkındaki bilgiler 1970 li yıllara dayanmaktadır [21]. Hifofumi Akagi ilk hibrit filtre çalışmalarında sisteme seri aktif filtreyi pasif filtreyi beraber kullanarak toplam filtreleme performansını artırmıştır [22, 23] Hibrit filtrenin tek hat elektriksel devresi şekil 5.12’de verilmiştir. Pasif ve aktif filtre fiziksel olarak bağlı olmamakla birlikte, sistemdeki harmonikleri azaltmaktadır.



Şekil 5.12 Hibrit Filtre

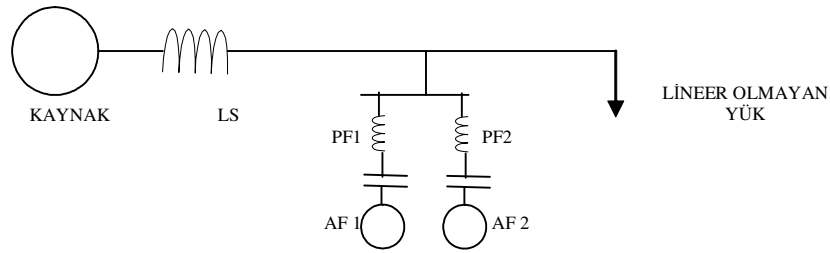
Bu çalışmaların akabinde iki aktif filtreyi pasif filtreler ile birleştirerek Şekil 5.13’deki yeni tip filtre tasarlanmıştır. [24]. Akaginın temel teşkil eden bu çalışmasında sistemde yük olarak 20 KVA lık 5., 11. ve 13. harmonik üreten yük (L3 ve L2) ile harmoniklere hassas bir yük (L1) bağlıdır. Pasif filtre olarak, 8 KVA lık 11., 13. ve yüksek frekansa ayarlanmış pasif filtre mevcuttur. Bunun yanında, seri şekilde bağlı 0.5 KVA lık aktif filtre (AF1) ile sisteme paralel olan pasif filtre ile seri bağlı 0.5KVA lık aktif filtre (AF2) filtreleri mevcuttur. Böylece aktif filtrenin gücü yüke oranla %5 ler mertebesine kadar indirilmiştir.



Şekil 5.13 Akagi'nin Hibrit Filtresi

Bu tasarımda AF1 sistemle yük arasında bir harmonik bloğu oluşturarak sistemden yüke ve yükten de sisteme harmonik akışını engellemektedir. AF2 ise pasif filtre ile

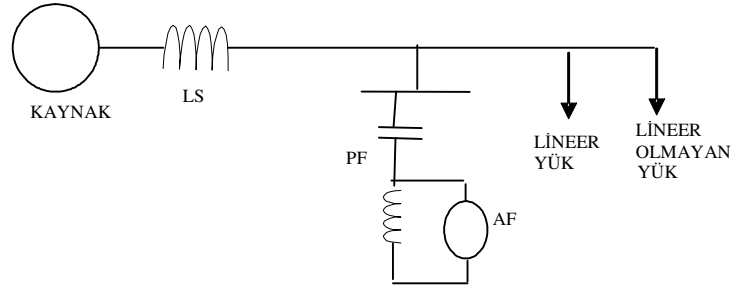
birlikte harmonikleri kısa devre yaparak L1 yüküne harmonik akışını minimuma indirmektedir. Bu tip filtrenin uygulamaları ve analizi yapılmıştır. [25-27] Akagi nin çalışmalarına paralel olarak, Deepak M. Devan da yeni hibrit filtre tasarımı yapmıştır. Devan çalışmalarında 5. ve 7. harmonik için pasif filtre ve her bir pasif filtre için ayrı bir aktif filtre kullanmıştır. Tasarım şekil5.14’de gösterilmiştir. Aktif filtreleri pasif filtreye Akagi de olduğu gibi seri bağlamıştır [28-30]. Bu tasarımı daha pratik ve basitleştirmek için aktif filtreyi, karesel 5. ve 7. harmoniği üretecek evirici olarak tasarlamış, böylece aktif filtrelerin gücünü optimize etmiştir [31-32]. Tasarım lineer olmayan yük, iki hibrit filtre modülünün paralel bağlanmasıyla tamamlamıştır.



Şekil 5.14 Devan'ın Hibrit Filtresi

Bu tasarımın temel avantajı, aktif filtre basit 5. ve 7. harmoniği üreten karesel voltaj üreten eviricidir ve bu evirici hızlı anahtarlama frekansını gerektirmez. Aktif filtre yükün sadece %1.5 u kadardır. 11. 13. ve daha yüksek harmonikler içinde ek modüllerin gerekli olması ve her bir pasif filtre için ayrı bir aktif filtre kullanılması bu tasarımın zayıf noktasıdır.

Akagi ve Devanın tasarlamış olduğu hibrit filtrelere yeni bir boyut kazandırarak, enerji sistemindeki yüklerin meydana getirdiği harmoniklerin minimize edilmesini sağlayan farklı bir model ise Şekil 5.15’de verilmiştir. Bu modelde bir pasif filtre ve bir aktif filtre vardır ve aktif filtre de bobine paralel bağlanmıştır.



Şekil 5.15 Akagi ve Devan'ın tasarımlarından oluşan kombine hibrit filtre

Bu tasarımın, uygulanabilir, karmaşık kontrol yapıya sahip olmayan, elektrik enerji sistemdeki hali hazırda kullanılan filtrelerle entegre edilerek kullanılabilirliği, ve sadece bir aktif ve bir pasif devre ile filtrelemeyi yapması cazibesini ortaya çıkarmıştır. Bu tasarımla sistemdeki harmonikler minimize edilerek standartlarda belirtilen seviyede tutulabilir.

5.4 Filtre Tasarımı

Harmonik filtreler her tesis için ayrı ayrı tasarım gerektirir. Filtre tasarımında akım kaynağı, filtre admitansı ve sistem admitansı ayrıntılı değerlendirme gerektirir. Bu amaçla tasarım yaparken aşağıdaki bilgilere ihtiyaç duyulur.

1. Harmonik üreten yükün meydana getirdiği harmonik akım spektrumu
2. İzin verilen toplam harmonik distorsiyon değeri
3. Tesiste gereksinim duyulan reaktif güç değeri
4. Diğer kaynakların sebep olduğu harmoniklerin seviyesi
5. Şebekedeki diğer yükler ile güç sisteminin eşdeğer devresinin sistemde etkili harmonikler için empedans değişimi
6. Filtrenin çalışma değerleri (frekans, sıcaklık, gerilim)

Bir filtrenin değeri, temel frekansta bu filtrenin sağladığı reaktif güç olarak tarif edilir. Bu değer, kondansatörler tarafından sağlanan temel reaktif güce eşittir.

Filtreleme yapılırken genellikle düşük harmonik dereceleri için tek ayarlı filtreler kullanılır. Harmonik derecesi büyüdükçe her harmonik bileşen için filtre yapmak ekonomik olmadığından yüksek geçiren filtre kullanımı ile belirli bir frekansın üzeri filtrelenmiş olur.

Tasarımda mali bakımdan değerlendirme yapılırken, tek ayarlı filtrelerde kullanılacak kondansatör kapasitesinin değerinin büyük olacağı göz önüne alınmalıdır. Harmonik değeri büyüdükçe, tek ayarlı filtre yerine, bu harmoniklerin tümü üzerinde etkili olan bir bant geçiren filtre kullanılması ekonomik açıdan daha uygun olacaktır. Küçük değerli harmoniklerin (örneğin 3.,5.,7.) daha etkin olması nedeniyle bu harmonik mertebeleri için harmonik süzme işleminin mutlaka tek bir filtre ile yapılması gerekir.

Tasarım yaparken özellikle şu hususlar özellikle gözardı 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
- Filtrenin, harmonik oluşturan yüklere en yakın noktada olacak şekilde konumlandırılması [3]

5.4.1 Tek ayarlı filtre tasarım eşitlikleri

Tek ayarlı filtre kullanımı en uygun filtre olup filtre kolunun empedansı şu şekildedir.

$$Z = R + j\left(\omega L - \frac{1}{\omega C}\right) \quad (5.14)$$

Filtrenin ayarlandığı frekansta empedansın imajiner kısmı sıfıra eşit olur ve rezonans meydana gelir. Rezonans anındaki empedans, R direncine eşit olur. Filtrenin ayarlı olduğu rezonans frekansı

$$f_r = \frac{1}{2\pi\sqrt{LC}} \quad (5.15)$$

ile belirlenir. Harmonik bileşenler gözönüne alındığında n. harmonikteki rezonanstaki filtredeki elemanların endüktif ve kapasitif reaktansları,

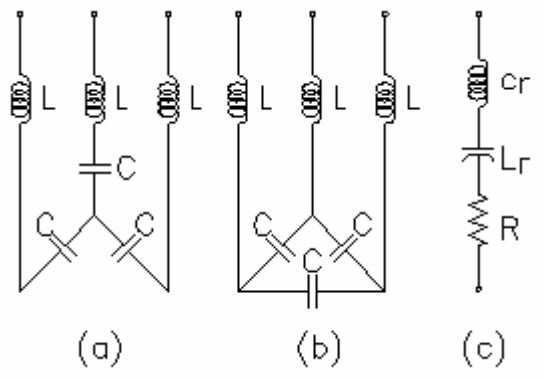
$$X_{L_n} = n\omega L \quad (5.16)$$

$$X_{C_n} = \frac{1}{n\omega C} \quad (5.17)$$

olacaktır. Rezonans durumunu r indisi ile gösterirsek rezonans halinde,

$$X_{L_r} = X_{C_r} \quad (5.18)$$

olur. Harmonik filtrelerindeki kondansatörler şekil 5.16'daki gibi yıldız veya üçgen olarak bağlıdır.



Şekik 5.16 Üç fazlı filtre bağlantıları ve tek faz eşdeğeri
a) Yıldız bağlı kondansatörlü filtre b)Üçgen bağlı kondansatörlü filtre
c) Filtrenin tek faz eşdeğeri

Rezonans olayı harmonik bileşenlerin birinde veya bu harmonik bileşenlere yakın değerlerde meydana gelirse harmonik akım ve gerilim değerleri çok büyük seviyelere ulaşır. Bu nedenle filtrelerin ayarlandığı rezonans frekansları kaydırılır. Doğrusal olmayan yükün ürettiği en düşük harmonik derecesinden daha düşük bir değerde rezonans frekansı meydana getirilerek, harmonik yük akımlarının yükselmesi engellenebilir.

Bu işlem, filtredeki kondansatör ile endüktansın ayarlandığı rezonans frekansını, en düşük harmonik derecesinden %3 ile %10 daha küçük seçilmesi ile sağlanabilir. Örneğin en düşük harmonik derecesi 5 olan bir doğrusal olmayan yük için rezonans frekansı 225 ile 242 Hz arasında olacaktır.

Filtredeki elemanların belirlenmesinde şu yol izlenir:

Daha önce belirtildiği gibi filtreler temel frekansta reaktif güç kompanzasyonunda da kullanıldıklarından gerekli kondansatör kapasitesi reaktif güç eşitliği,

$$Q_C = \omega.C.U^2 \quad (5.19)$$

ile belirlenir. Filtreler için kullanılacak kondansatör kapasitesinin değerinin belirlenmesinde kullanılacak şönt filtre adedinden yararlanılır. Şönt filtre kolu sayısı k olmak üzere her filtre için kondansatör kapasitesi değeri,

$$C_r = C/k \quad (5.20)$$

olacaktır.

Filtrelerin ayar keskinliğinin ölçüsü olarak bilinen kalite faktörü,

$$Q = \frac{\sqrt{L/C}}{R} = \frac{X_{L_r}}{R} = \frac{X_{C_r}}{R} \quad (5.21)$$

olarak verilir. Burada X_{L_r} ve X_{C_r} reaktans değerleri, rezonans frekansındaki değerlerdir.

R, sadece endüktanstaki dirençten ibaret olup küçük bir değere sahiptir. Bu durumda filtrenin Q faktörünün değeri, çok büyük olacaktır ve çok keskin bir filtreleme sağlayacaktır. Aynı zamanda R değeri filtredeki kayıplarla da ilgili olduğundan Q değeri filtreleme performansı için de bir ölçüdür. Genellikle seçilen bir değer olarak kullanılır.

Verilen bir kalite faktörü değeri için filtrenin endüktansı, kalite faktörü ifadesinden

$$L_r = \frac{X_{L_r}}{2\pi f_r} = \frac{R.Q}{2\pi f_r} \quad (5.22)$$

olarak belirlenir. Aynı şekilde kondansatör değeri,

$$C_r = \frac{1}{2\pi f_r.X_{C_r}} = \frac{1}{2\pi f_r.R.Q} \quad (5.23)$$

ile hesaplanır.

Filtrenin kaynak empedansı ile etkileşime girmesiyle rezonans meydana gelebilir. Bu frekans değeri, filtrenin ayarlandığı frekanstan daha düşük bir frekanstır. L_s kaynak özendüktansı ve L filtre endüktansı olmak üzere, rezonans frekansı;

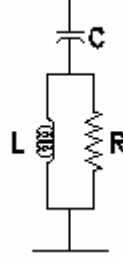
$$f = \frac{1}{2\pi} \cdot \sqrt{\frac{1}{(L_s + L).C}} \quad (5.24)$$

olarak bulunur. Filtrelerin sistemde rezonansa girdiği bu frekans değerinin kontrol edilmesi gereklidir. [3]

5.4.2 Sönümlü filtre tasarım eşitlikleri

Sönümlü filtre, belirli bir köşe frekansının üzerinde düşük empedans göstermektedir. Yüksek geçiren filtre, köşe frekansının üzerinde tüm harmoniklerin büyük bir yüzdesini şöntleyecektir. Köşe frekansı, yok edilmesi gereken en düşük harmonikte yerleştirilmiş bir yüksek geçiren filtredir ve bütün filtreleme işlemi için kullanılır.

İkinci dereceden sönümlü filtreler, yüksek geçiren filtreler arasında uygulaması en kolay filtre tipi olup iyi bir filtreleme yapar. Bu nedenle ikinci dereceden sönümlü filtre incelenecektir. Şekil 5.17’de eşdeğer devre gösterilmektedir.



Şekil 5.17 İkinci dereceden sönümlü filtre

İkinci dereceden sönümlü filtre empedansı,

$$Z = \frac{1}{j\omega C} + \left(\frac{1}{R} + \frac{1}{j\omega L} \right)^{-1} \quad (5.25)$$

olarak verilir. Filtrenin ayarlandığı frekans (köşe frekansı) eşitlik 5.15’de verilmiştir. Filtrenin kalite faktörü de aşağıdaki şekilde verilir.

$$Q = \frac{R}{(L/C)^{1/2}} = \frac{R}{X_L} = \frac{R}{X_C} \quad (5.26)$$

$r = X_C / X_L$ eşitliği de, yüksek geçiren filtre için sınırlıdır. Yüksek geçiren filtrede Q (kalite faktörü), 0.5 ile 2 arasında değişik değerler alır. Köşe frekansında Q ’nun değeri 2 iken, filtrelemeden daha çok söz edilir. Daha yüksek empedanslarda filtre empedansı durmadan yükselirken Q ’nun daha düşük değerleri için köşe frekansındaki cevabı görülemez ve frekans artarken empedans aşağı yukarı sabittir. Q ’nun seçiminde düşünülebilecek diğer faktörler şunlardır:

Arrilaga tarafından verilen Ainsworth’un kullandığı eşitliklerde ikinci dereceden sönümlü filtre için ayar frekansı ve m katsayısı tanımlanmıştır. Bu parametreler sırasıyla şu şekilde ifade edilir:

$$f_0 = \frac{1}{2\pi \cdot C \cdot R} \quad (5.27)$$

$$m = \frac{L}{R^2 \cdot C} \quad (5.28)$$

Tipik değerler için m, 0.5 ile 2 aralığındadır. 2. tip filtrenin admitansı, m değerinin azalmasıyla artış göstermekte ve köşe frekansı da aynı şekilde artmaktadır. [3]

5.5 Proje aşamasında dikkat edilecek hususlar

Harmoniklerin dağıtım devresindeki etkilerini azaltmak, yok edebilmek için elektrik sistem tasarımında takip edilebilecek yollar şu şekildedir:

1-Sistem kısa devre gücü azaldıkça harmoniklerin etkisi artacaktır. Bu sebepten ötürü, ekonomik önlemler bir yana bırakılarak doğrusal olmayan yük mümkün mertebe kaynağa yakın noktada tasarlanır.

2-Tekhat şemaları hazırlarken , doğrusal olmayan yükler mümkün mertebe diğerlerinden ayrıştırılır. Bu şekilde ayrıştırılan iki farklı yük farklı baralar üzerinden beslenir.

Harmonikli yükleri, diğer yüklerden ayrıştırarak gruplandırmadaki amaç , harmonik akımların vektörel toplamının cebirsel toplamından düşük olacağı gerçeğinden hareketle açılmalardan yararlanarak toplam harmonik akımını azaltmaktır.

3-Harmonikleri azaltmada bir başka iyileştirici yöntem ayrı bir transformatör kullanarak ilave bir kaynak yaratmak olacaktır. Bu uygulama, hassas yüklerin önem kazandığı, maliyetin ihmal edilebileceği uygulamalarda kullanılabilir.

4- Farklı transformatör bağlantıları ile belirli harmonikler yok edilebilir.

- Dyd(üçgen-yıldız-üçgen) bağlantılı transformatör ile 5. ve 7. harmonik
- Dy(üçgen-yıldız) bağlantılı transformatör ile 3. harmonik
- Dz(üçgen-zigzag) bağlantılı transformatör ile 5.harmonik

5-Değişken hız ayarlı sürücüler kullanıldığında akımı yumuşatmak için devreye endüktans eklenebilir. Devre eşdeğer empedansı artırılarak harmonik akımı sınırlandırılabilir. Kapasitör devrelerine harmonik bastırıcı reaktanslar ilave edilmesi, kapasitörleri koruyarak rezonansı engeller ve eşdeğer devre empedansını yüksek mertebeli harmoniklere karşı artırır.

6-Doğru topraklama sistemi seçilmelidir.TNC sisteminde(nötr ve koruma-topraklama iletkeni işlevi, şebekenin bir bölümünde PEN olarak tanımlanan tek bir iletken)

toplanmıştır) tek bir iletken toprak kaçak akımını veya dengesiz yük akımını üzerinden geçirerek koruma sağlar. Kalıcı hal durumunda(normal çalışma), harmonik akımları bu iletken üzerinden akar. Fakat bu iletkenin de bir empedansı olması sebebi ile, ufak da olsa birkaç volt mertebesinde gerilim endüklenir ki bu da elektronik ekipmanların hatalı çalışmasına sebep olur. Bu nedenle TNC sistemi(nötr ve toprak iletkeninin aynı olduğu topraklama sistemi) hassas olmayan cihazların kullanıldığı enerji sistemlerinde kullanılmamalıdır.

Harmoniklerin bulunduğu sistemlerde TNS sistemi(tüm şebekede nötr ve koruma-topraklama iletkeni ayrıdır) kullanılmalıdır. Bu sistemde nötr ve toprak iletkenleri tamamen birbirinden ayrıdır ve dağıtım sisteminde daha kalıcı ve sabit bir gerilim elde edilmiş olur.

7-Harmoniklerin standartlarda verilen değerleri aşması durumunda çözüm olarak uygun filtre seçimi yapılır.

Tablo 5.2 de farklı uygulama alanlarına göre kullanılabilecek filtre tipleri belirtilmiştir.

Tablo 5.2 Uygulama alanına göre filtre seçim tablosu

Konu	Pasif Filtre	Aktif Filtre	Hibrit Filtre
Uygulama	Endüstriyel	Ticari	Endüstriyel
Doğrusal olmayan yüklerin toplam gücü	>200kVA	<200kVA	>200kVA
Güç faktörü düzeltilmesi	Evet	Hayır	Evet
Hassas yükler için gerilim harmonik distorsiyonunu azaltma gerekliliği	Evet	Evet	Evet
Kablo aşırı yüklenmesini önlemek için akım harmonik distorsiyonunu azaltma gerekliliği	Evet	Evet	Evet
Harmonik limitlerini sağlama zorunluluğu	Hayır	Hayır	Evet

Harmonik yok edilmesinde uygulanacak devre, aşağıdaki parametrelere göre seçilir:

G_h – ortak baraya bağlı harmonik üreten cihazların kVA cinsinden toplam gücü (statik çevirici, evirici, hız kontrol ünitesi v.b)

$S_{K''}$ – ortak baradaki 3 fazlı kısa devre gücünün kVA cinsinden değeri

S_n – ortak barayı besleyen transformatör ya da transformatör gruplarının kVA cinsinden toplam gücü

Eğer birden fazla transformatör paralel çalışıyor ise, bir veya birden fazlasının devreden çıkarılması, $S_{K''}$ ve S_n değerlerini doğrudan etkileyecektir. Bu parametrelerden yola çıkarak, kabul edilebilir sistem harmonik akım ve gerilimlerinde kapasitör ve filtre seçimi Tablo 5.3 ve 5.4 baz alınarak yapılabilir.

Tablo 5.3 Herhangi bir transformatör tipine göre uygulanabilecek genel kural

$G_h \leq S_K / 120$	$S_K / 120 \leq G_h \leq S_K / 70$	$G_h > S_K / 70$
Standart kapasitör	Kapasitör gerilimi %10 arttırılmış (230V tipler hariç)	Kapasitör gerilimi %10 arttırılmış + harmonik reaktörü

Tablo 5.4 Transformatör gücü $\leq 2\text{MVA}$ için basitleştirilmiş kural

$G_h \leq 0.15 S_n$	$0.15 S_n < G_h \leq 0.25 S_n$	$0.25 S_n < G_h \leq 0.60 S_n$	$G_h > 0.60 S_n$
Standart kapasitör	Kapasitör gerilimi %10 arttırılmış (230V tipler hariç)	Kapasitör gerilimi %10 arttırılmış + harmonik reaktörü	Filtre

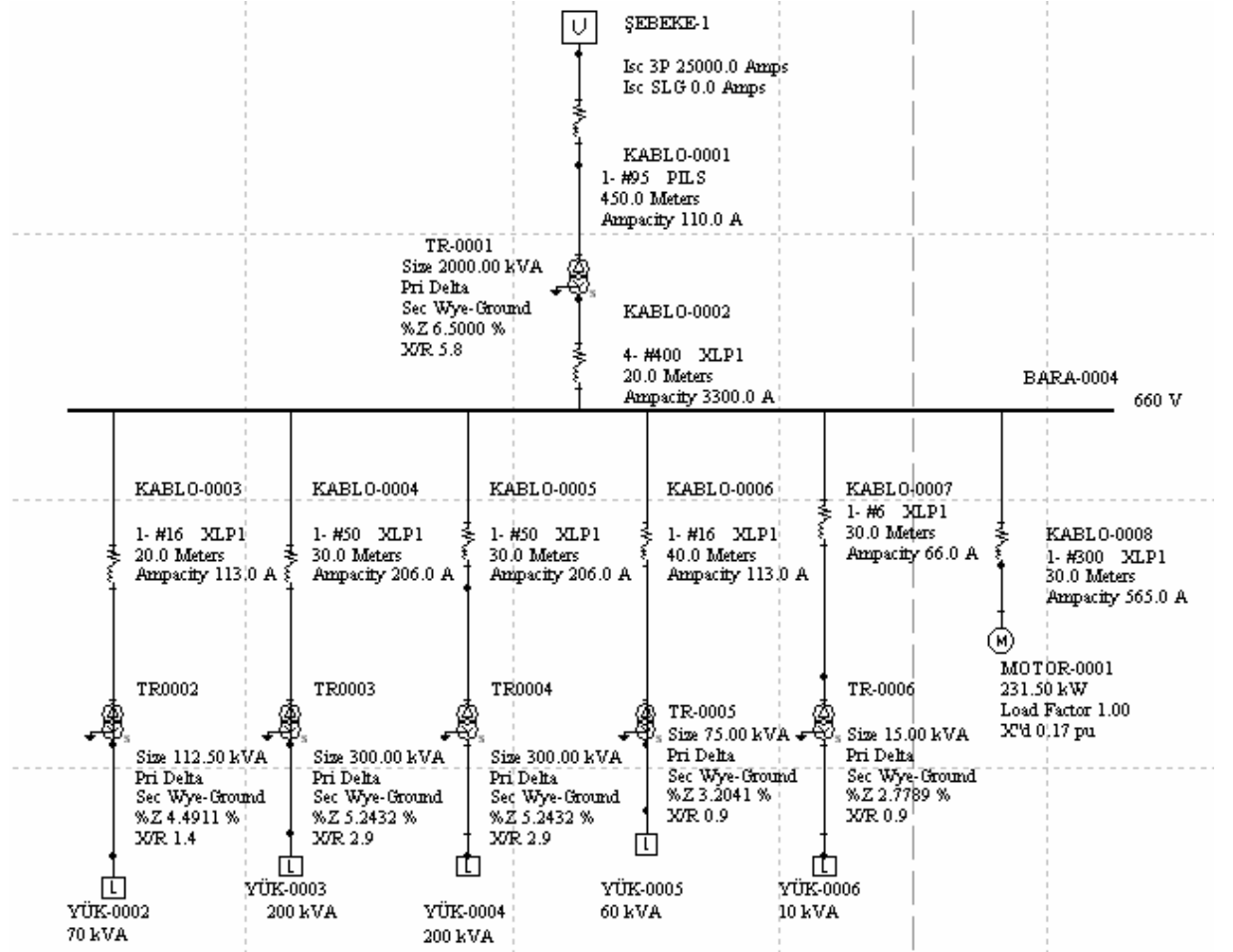
Tablo 5.4’den de anlaşılacağı üzere, tasarlanan elektrik sisteminde sistem transformatör gücü ve harmonik yüklerin toplam gücü değerlerinden yola çıkılarak, bunların arasındaki bağıntıya göre bahsedilen farklı çözümlerle, harmonik problemi kısmen ya da tamamen yok edilebilir. [33]

5.6 Analiz uygulama örneği

Şekil 5.18’deki sistem için SKM Power Tools [34] programı kullanılarak harmoniklerin tasarım aşamasında elimine edilebilmesi için bir analiz yapılmış, analiz sonucu elde edilen değerler yorumlanmıştır.

Sistem 10 KV luk bir şebekeden beslenmekte olup 2000KVA gücünde bir transformatör vasıtası ile gerilim ana bara 0004 de 660V a düşürülmektedir. Her bir yük için ayrı olarak kullanılan 660/400V transformatörler aracılığı ile sırasıyla 70kVA gücündeki Yük-0002 olarak tabir edilen floresan aydınlatma cihazları, Yük-

0003 ve Yük-0004 olarak tabir edilen ve her biri sırasıyla 200kVA($\cos\Phi=0,85$) 200kVA($\cos\Phi=0,80$) gücündeki sistem UPS beslemeleri, Yük-0005 olarak belirtilen 60kVA gücündeki acil durum floresan aydınlatma besleme UPS'ini ve Yük-0006 olarak gösterilen 10kVA gücündeki doğru akım sürücüsü beslenmektedir. Ayrıca 231.5 kW ($\cos\Phi=0,80$) gücünde 660V ile çalışan motor MOTOR-0001 de ana baradan enerjilendirilmektedir.



Şekil 5.18 İncelenen sistem tekhat şeması

Sistemdeki Yük-0003, Yük-0004 ve Yük-0005 olarak adlandırılan UPS yükleri 12 darbeli cihazlar olarak tasarlanmışlardır. Yük-0006 ise tipik bir doğru akım sürücü ile işletilmektedir. MOTOR-0001 yükü ise tipik bir AC sürücü ile çalışmaktadır.

Bu durumda; ana bara 0004 de baskın olarak 5., 7., 11.,13. harmoniklerin oluşacağı gözükmemektedir. Analizde izlenecek adımlar Tablo 5.5’de sıralandığı gibidir.

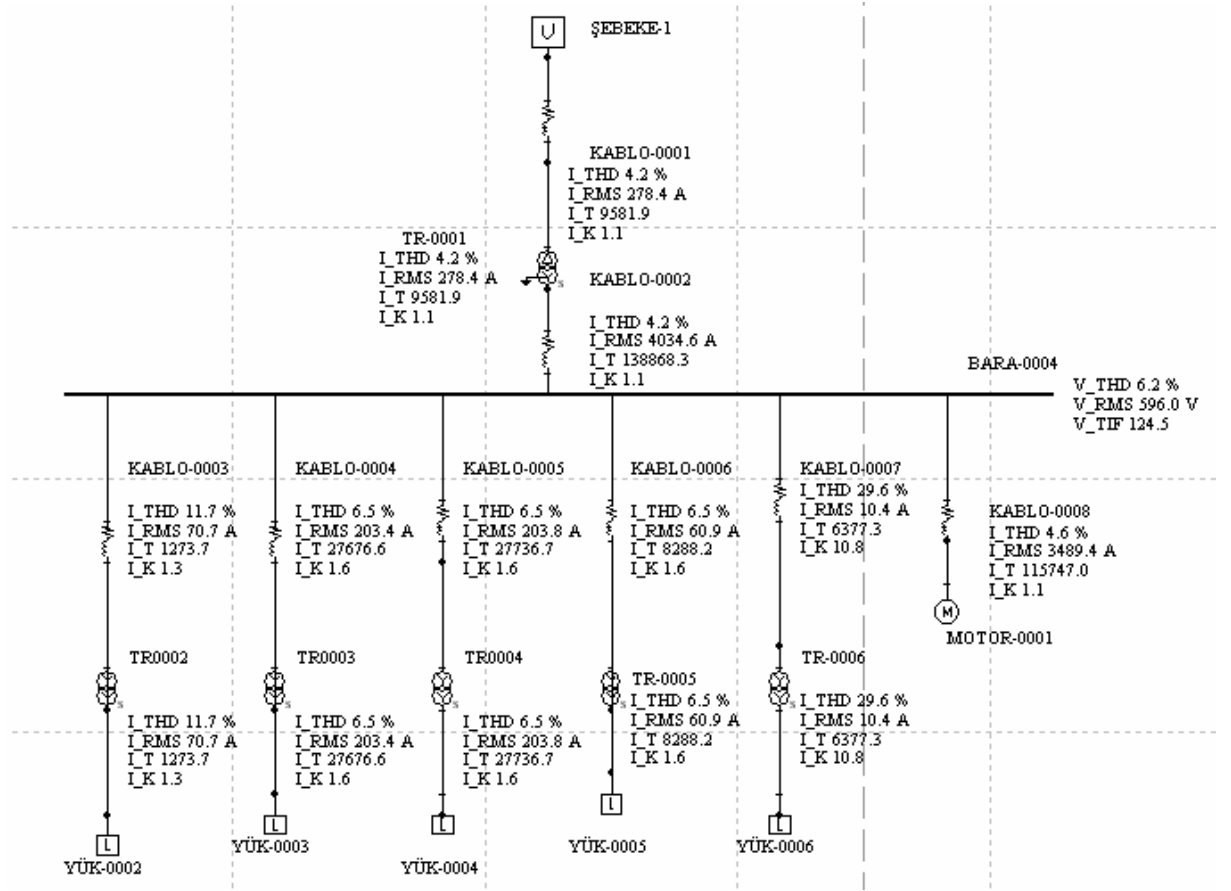
Tablo 5.5 Analizi yapılacak sistem özeti

Çalışma	Açıklamalar
Durum 1	660/400V transformatörlerin primer ve sekonderleri yıldız-yıldız bağlı
Durum 2	660/400V transformatörlerin primer ve sekonderleri üçgen-yıldız bağlı
Durum 3	Yük-0006 ucuna 7kVAr gücünde $f=4.8f=240\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0001 konulması
Durum 4	Yük-0002 ucuna 10kVAr gücünde $f=4.4f=220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0002 konulması
Durum 5	Yük-0002'yi besleyen TR-0002'nin 660V primer ucuna 10kVAr gücünde $f=4.4f=220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0003 konulması
Durum 6	10kVAr gücünde $f=4.4f=220\text{Hz}$ frekansına ayarlı filtre FLTR-0003 ve FLTR-0002 nin sırasıyla Yük-0002'yi besleyen TR-0002'nin 660V primer ve sekonder uçlarına konulması
Durum 7	Ana baraya 300kVAr gücünde $f=4.8f=240\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0004 konulması
Durum 8	Filtreler FLTR-0001, FLTR-0002, FLTR-0003 ve FLTR-0004'ün aynı anda devrede olması durumu
Durum 9	Filtreler devrede iken şebeke tarafında $\text{THD}=\%4.8$ olması durumu
Durum10	Filtreler devrede iken TR-0001 in kısa devre empedansı Z ' in değişmesi durumu

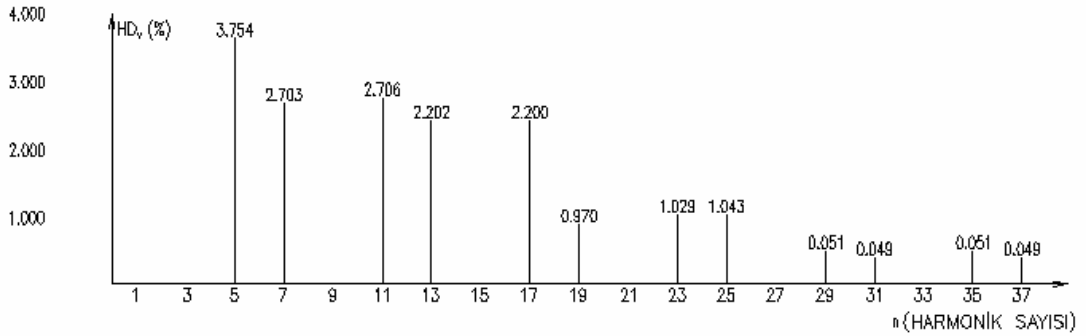
a)Şebekenin sinüsoidal olması durumu

Şebeke tarafında $\text{THD}_v = 0$ iken

Durum1 - 660/400V transformatörlerin(TR-0002, TR-0003, TR-0004 TR-0005, TR-0006) primer ve sekonderleri yıldız-yıldız bağlı seçilirse, ana bara 0004 de şekil 5.19'da görüldüğü gibi $\text{THD}_v = \%6.2$ olarak hesaplanmaktadır. Bu değer bölüm 4'de verilen tablolarda belirtilen değerleri aşmaktadır. Şekil 5.20'de ise BARA-0004 harmonik spektrumu görülmektedir.



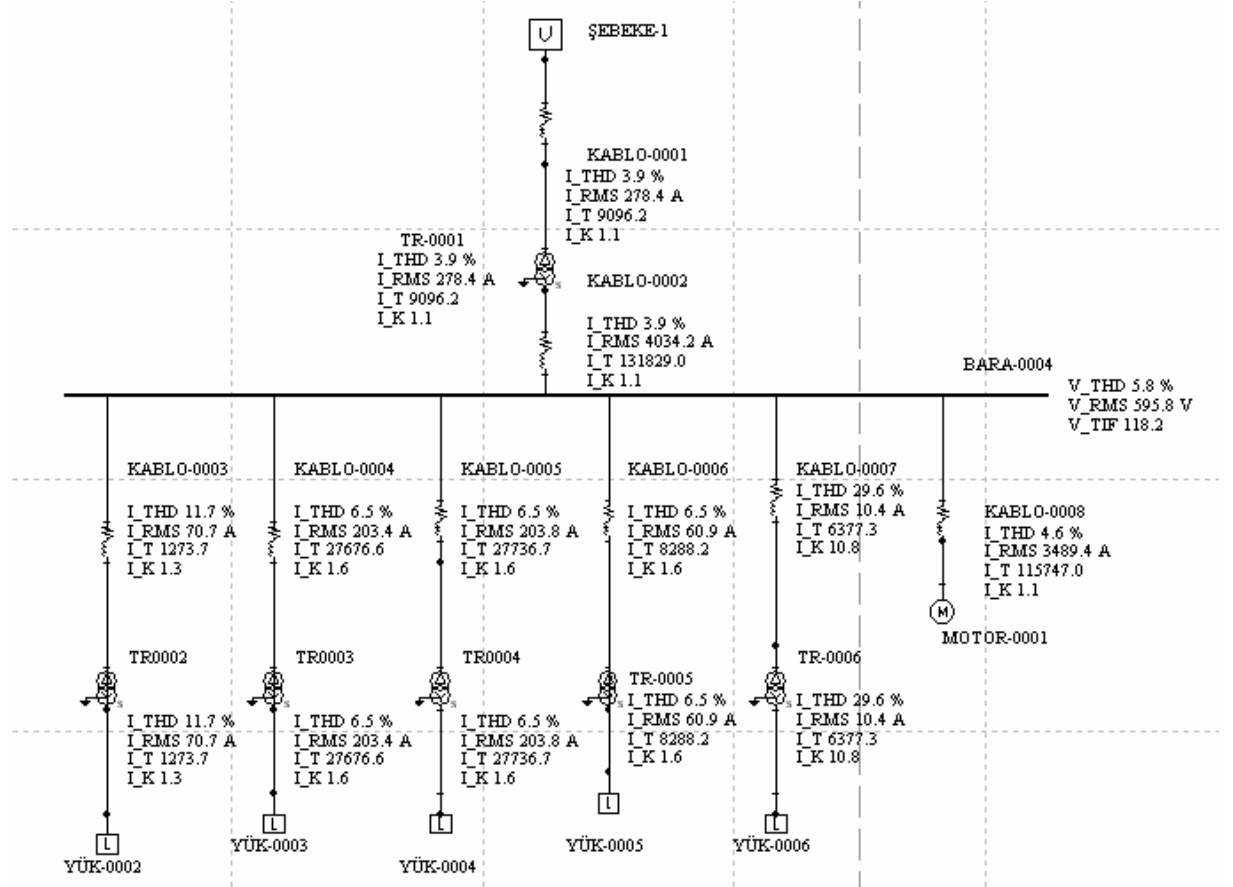
Şekil 5.19 Durum-1: 660/400V transformatörlerin primer,sekonderleri yıldız-yıldız bağlı



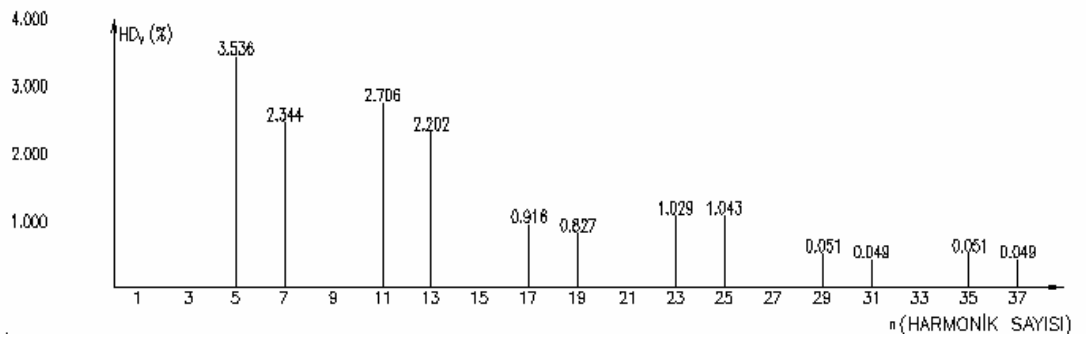
Şekil 5.20 Durum -1 için BARA-0004 harmonik spektrumu

Durum 2 - 660/400V transformatörlerin (TR-0002, TR-0003, TR-0004, TR-0005, TR-0006) primer ve sekonderleri üçgen-yıldız bağlı seçilirse, ana bara 0004'de Şekil 5.21'de görüldüğü gibi $THD_v = \%5.8$ olarak hesaplanmaktadır. Bu değer yine limit değerleri aşmakla birlikte, transformatör sargılarının uygun seçilmesi ile

harmoniklerin kısmi olarak giderilebileceğini göstermektedir. Şekil 5.22’de durum-2 için BARA-0004 harmonik spektrum değerleri verilmiştir.



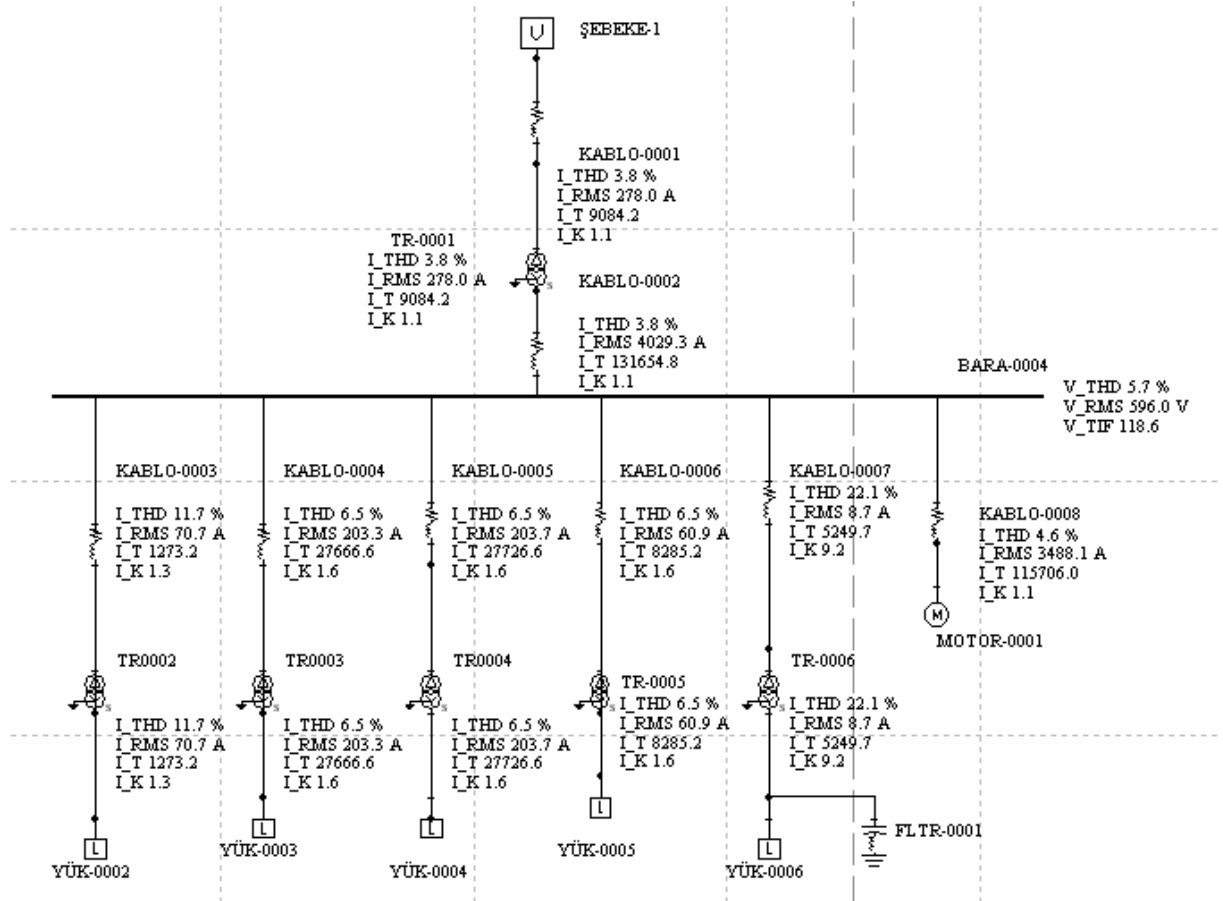
Şekil 5.21 Durum-2:660/400V transformatörlerin primer ve sekonderleri üçgen-yıldız bağlı



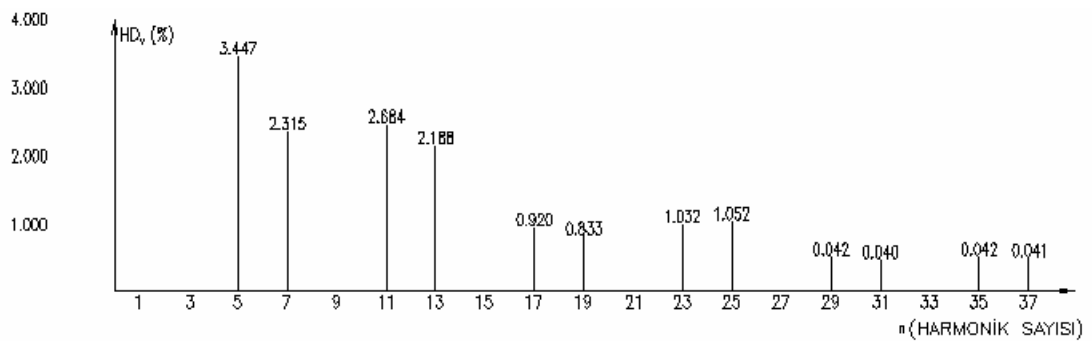
Şekil 5.22 Durum -2 için BARA-0004 harmonik spektrumu

Durum 3 - Yük-0006 ucuna 7kVAr gücünde $f=4.6 f_0 =230\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0001 konulması durumunda Şekil 5.23’de görüldüğü gibi ana bara 0004 de $THD_v = \%5.7$ olarak hesaplanmaktadır. Bu filtre ile yük akım harmonik distorsiyonu nispeten azalmakla birlikte ana bara 0004 zerindeki THD değeri de küçülmekte olup yine de arzu edilen sınır değer altına inilememektedir.

BARA-0004 harmonik spektrumları Şekil 5.24’de verilmiştir.

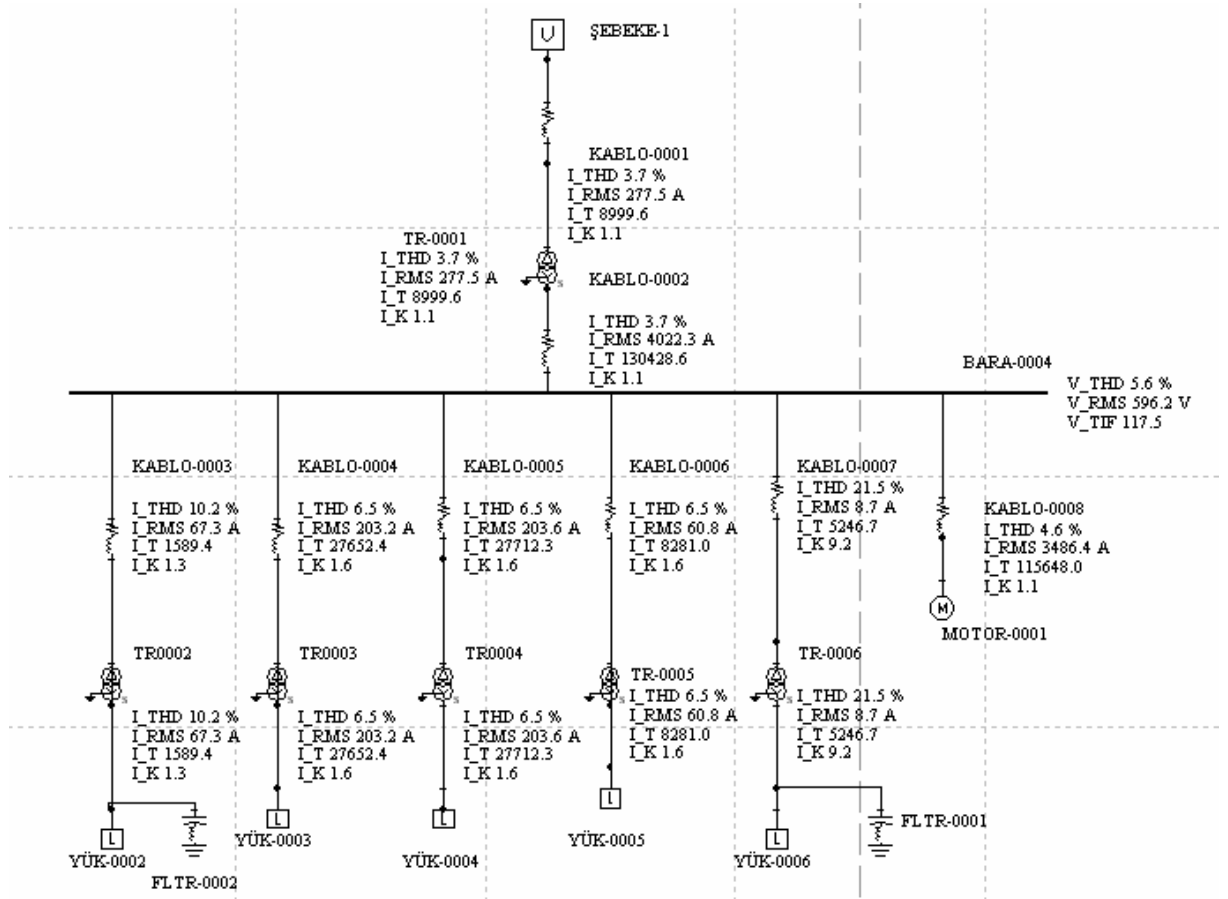


Şekil 5.23 Durum-3:Yük-0006 ucuna 7kVAr gücünde $f=4.8 f_0 =240\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre konulması

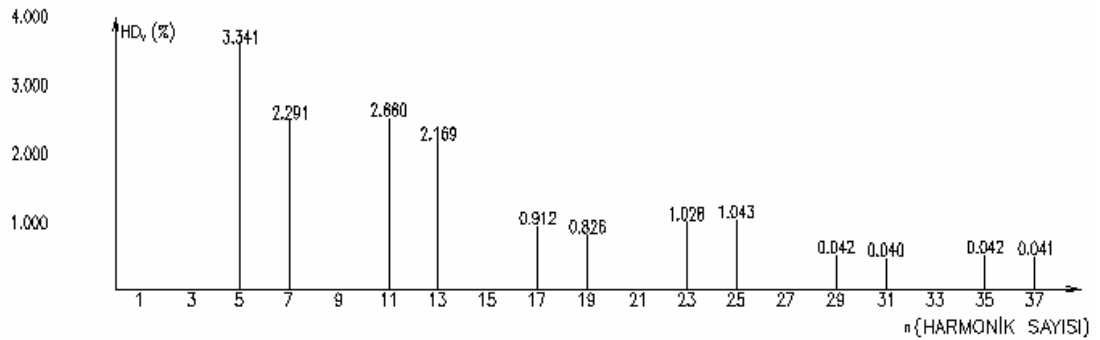


Şekil 5.24 Durum-3 için BARA-0004 harmonik spektrumu

Durum 4 - Yük-0002 ucuna 10kVAr gücünde $f=4.4 f_0 =220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0002 konulması durumunda Şekil 5.25’de görüldüğü gibi ana bara 0004 de $THD_V = \%5.6$ olarak hesaplanmaktadır. Bu filtre ile yük akım harmonik distorsiyonu az miktarda azalmakta ve ana bara 0004 zerindeki THD değeri de küçülmekte olup sınır değerlerin hala üzerinde bir sistem sözkonusudur. Şekil 5.26’de durum-4 için BARA-0004 harmonik spektrum değerleri verilmiştir.

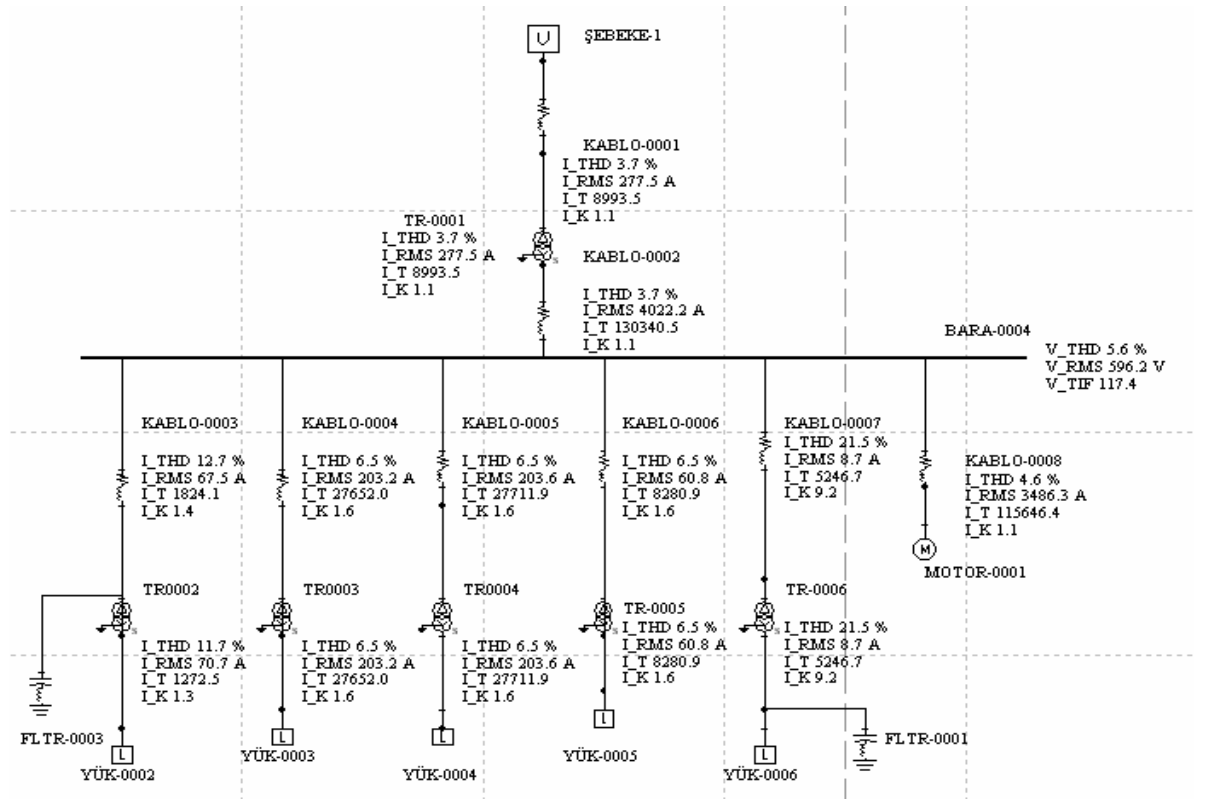


Şekil 5.25 Durum-4:Yük-0002 ucuna 10kVAr gücünde $f=4.4 f_0 =220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0002 konulması

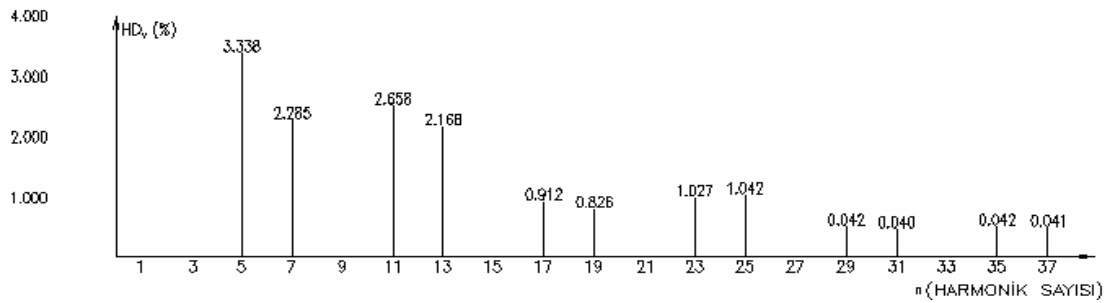


Şekil 5.26 Durum-4 için BARA-0004 harmonik spektrumu

Durum 5 - Yük-0002'yi besleyen TR-0002'nin 660V primer ucuna 10kVAr gücünde $f=4.4 f_0 =220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0003 konulması durumunda Şekil 5.27'de görüldüğü gibi ana bara 0004 de $THD_v = \%5.6$ olarak bir önceki durum ile aynı mertebede kalmaktadır. Dolayısıyla durum 4 ve durum 5 de yapılan analizde ortaya çıkan sonuç, tek bir yükü besleyen transformatörün primer ya da sekonder tarafına bağlanan eşdeğer filtrenin ciddi bir fark yaratmadığıdır. Bu durumda sekonder tarafta konulacak olan filtre maliyeti daha düşük olacağı için, bu uygulama tercih sebebi olmalıdır. Şekil 5.28'de durum-5 için BARA-0004 harmonik spektrum değerleri verilmiştir.

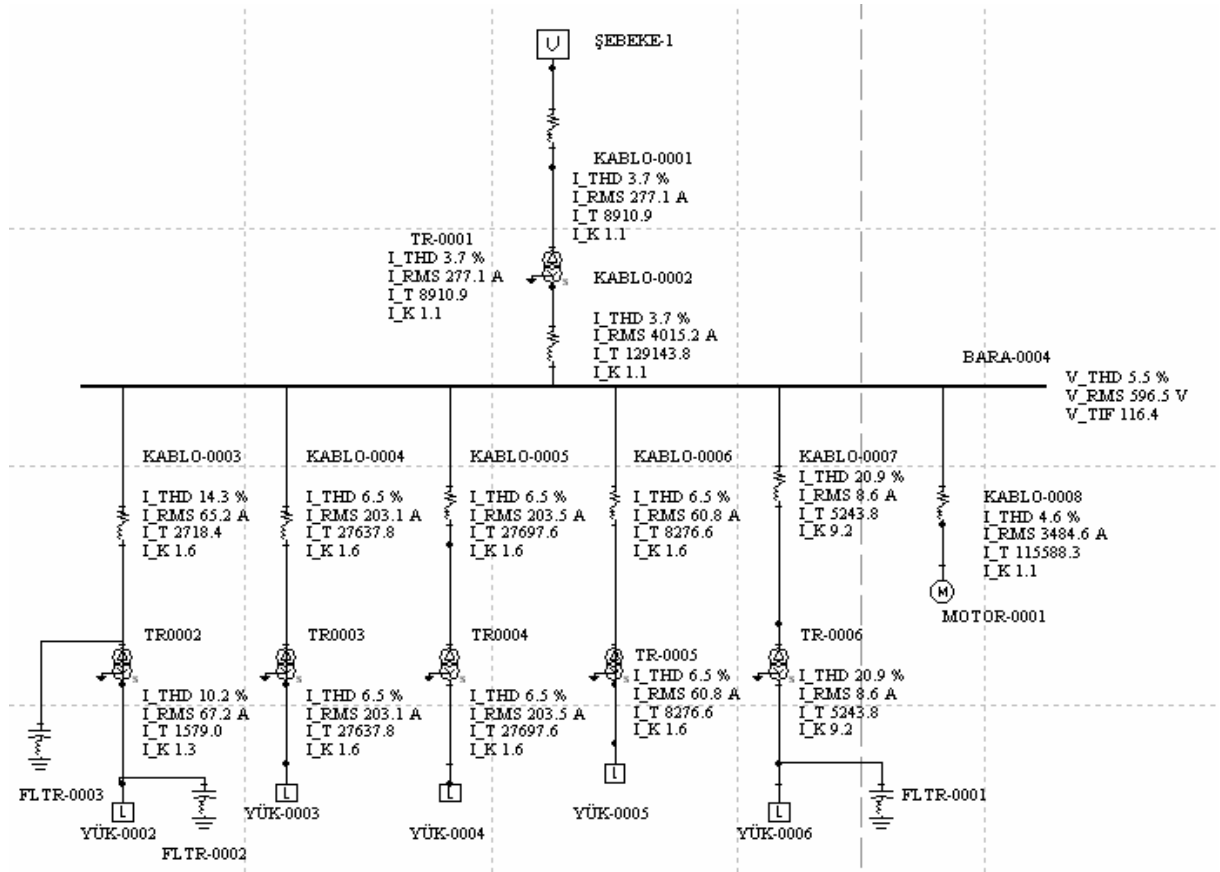


Şekil 5.27 Durum-5: Yük-0002'yi besleyen TR-0002'nin 660V ucuna 10kVAr gücünde $f=4.4 f_0 =220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0003 konulması

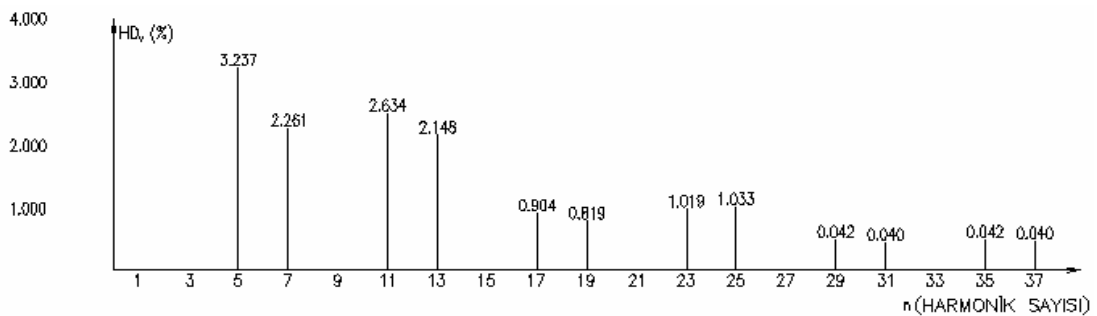


Şekil 5.28 Durum-5 için BARA-0004 harmonik spektrumu

Durum 6 - 10kVAr gücünde $f=4.4 f_0 =220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0003 ve FLTR-0002 nin sırasıyla Yük-0002'yi besleyen TR-0002'nin 660V primer ve sekonder uçlarına konulması durumunda şekil 5.29'de görüldüğü gibi ana bara 0004 de $THD_V = \%5.5$ olarak bir önceki durum ile ufak bir iyileştirme söz konusudur. Limit değeri yakın olan uygulamalarda, bu sistem kullanılarak çözüme gidilebilir. Hassas yüklerin olduğu yerlerde uygulanabilir. Fakat maliyet burada olumsuz bir tabloyu da beraberinde getirmektedir.

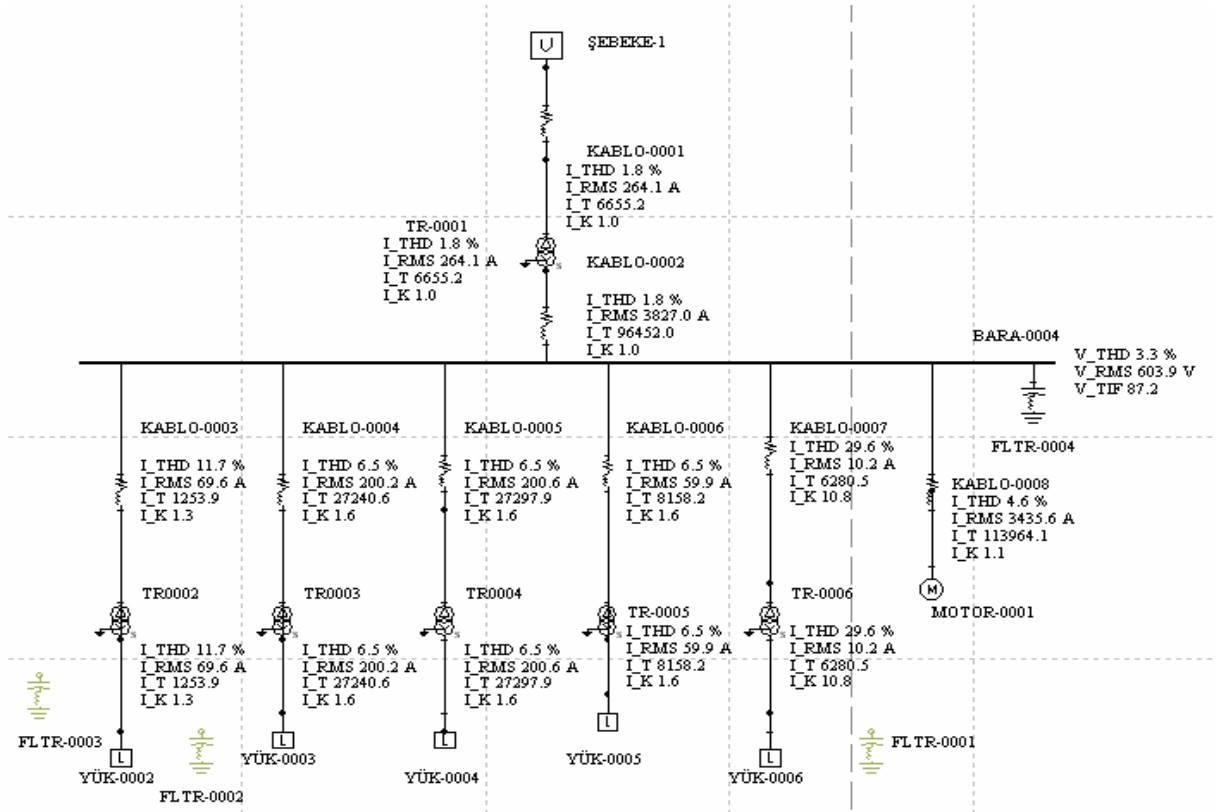


Şekil 5.29 Durum-6:10kVAr gücünde $f=4.4 f_0 =220\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0003 ve FLTR-0002 nin sırasıyla Yük-0002'yi besleyen TR-0002'nin 660V primer ve sekonder uçlarına konulması

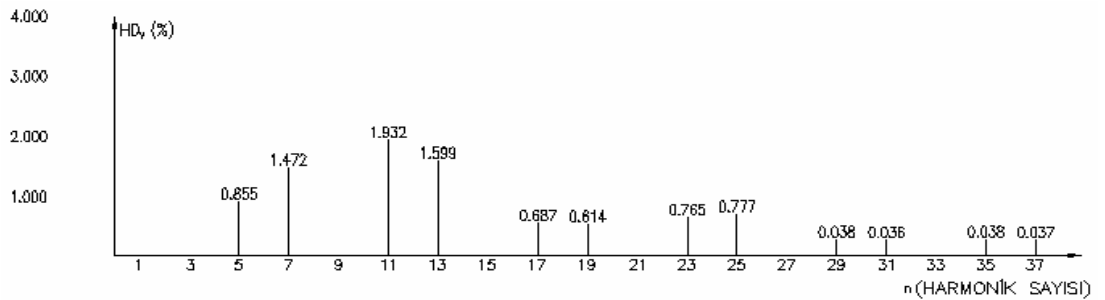


Şekil 5.30 Durum-6 için BARA-0004 harmonik spektrumu

Durum 7 - Yukarıda analizi yapılan uygulamalar ile ana bara 0004 de THD istenen seviyenin altına getirilemediği için, ana baraya 300kVAr gücünde $f=4.8 f_0 = 240\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0004 konulması ile barada $THD_v = \%3.3$ mertebesine indirilerek , sınır değer olan $\%5$ 'in altında bir değer elde edilmiştir. Bu uygulamada FLTR-0001, FLTR-0002 ve FLTR-0003 devreye bağlı değildirler. Bu durumda ayrıca 6 nolu durumda $\cos \phi_6 = 0.803$ iken 300kVAr filtre ile yeni durumda $\cos \phi_7 = 0.828$ mertebesine yükselmiş ve kompanzasyon da yapılmıştır. Şekil 5.31'de durum-7 için eşdeğer devre ve Şekil 5.32'de ise bu duruma ait BARA-0004 harmonik spektrumu verilmiştir.

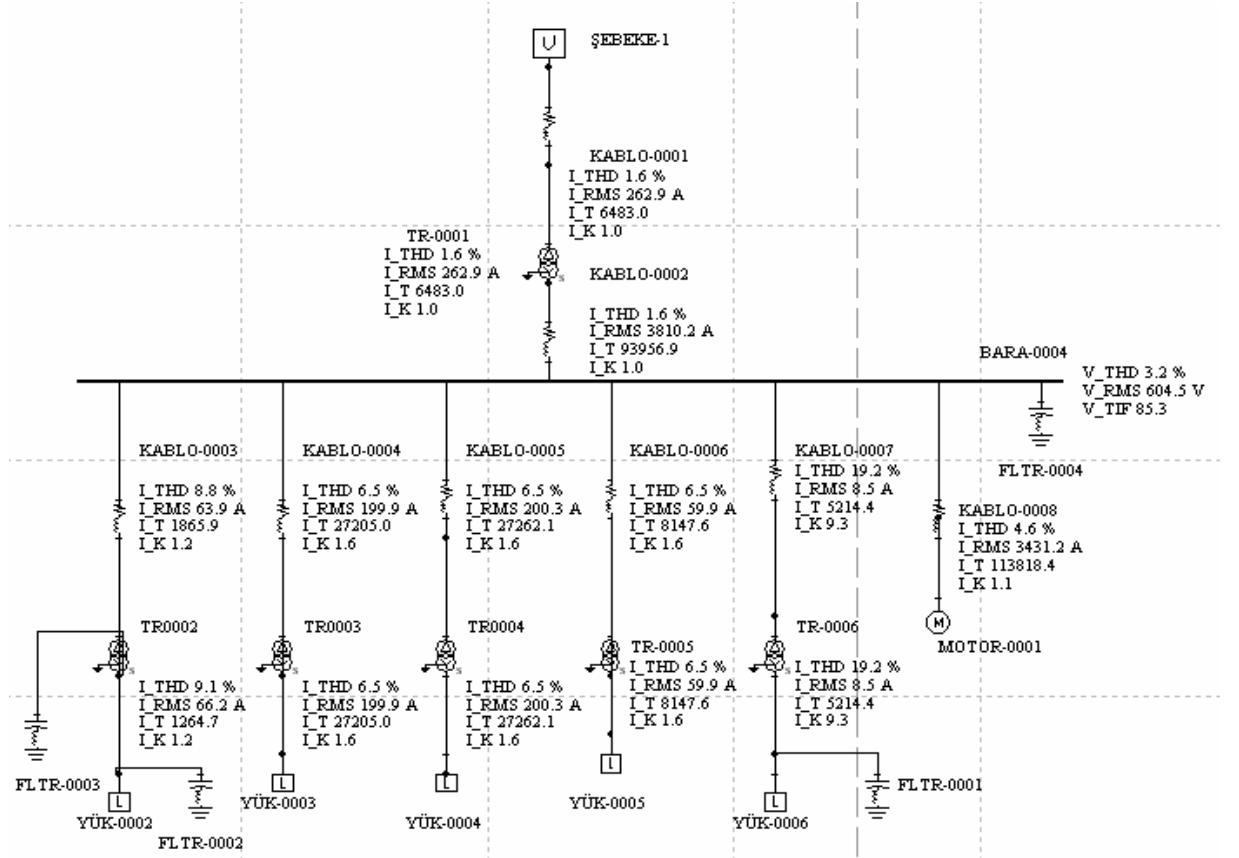


Şekil 5.31 Durum-7: Ana baraya 300kVAr gücünde $f=4.8 f_0 = 240\text{Hz}$ frekansına ayarlı tek geçiren filtre FLTR-0004 konulması

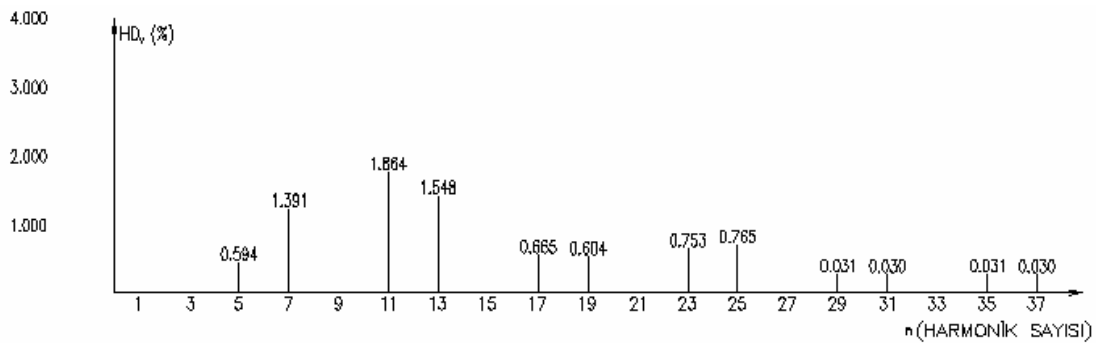


Şekil 5.32 Durum-7 için BARA-0004 harmonik spektrumu

Durum 8 - Filtreler FLTR-0001, FLTR-0002, FLTR-0003 ve FLTR-0004'ün aynı anda devrede olması durumunda şekil 5.26'da görüldüğü gibi $THD_v = \%3.2$ mertebesine düşmektedir. Bara 0004'de sınır değeri altına FLTR-0004 uygulaması ile inildiği için FLTR-0001, FLTR-0002, FLTR-0003 maliyeti düşürmek için kullanılmayabilir. Şekil 5.33'de durum-8 için eşdeğer devre ve Şekil 5.34'de ise bu duruma ait BARA-0004 harmonik spektrumu verilmiştir. Burada dikkat edilecek nokta, FLTR-0004'ün diğer filtreler karşısında ne derece baskın olduğudur.



Şekil 5.33 Durum-8: Filtreler FLTR-0001, FLTR-0002, FLTR-0003 ve FLTR-0004'ün aynı anda devrede olması durumu



Şekil 5.34 Durum-8 için BARA-0004 harmonik spektrumu

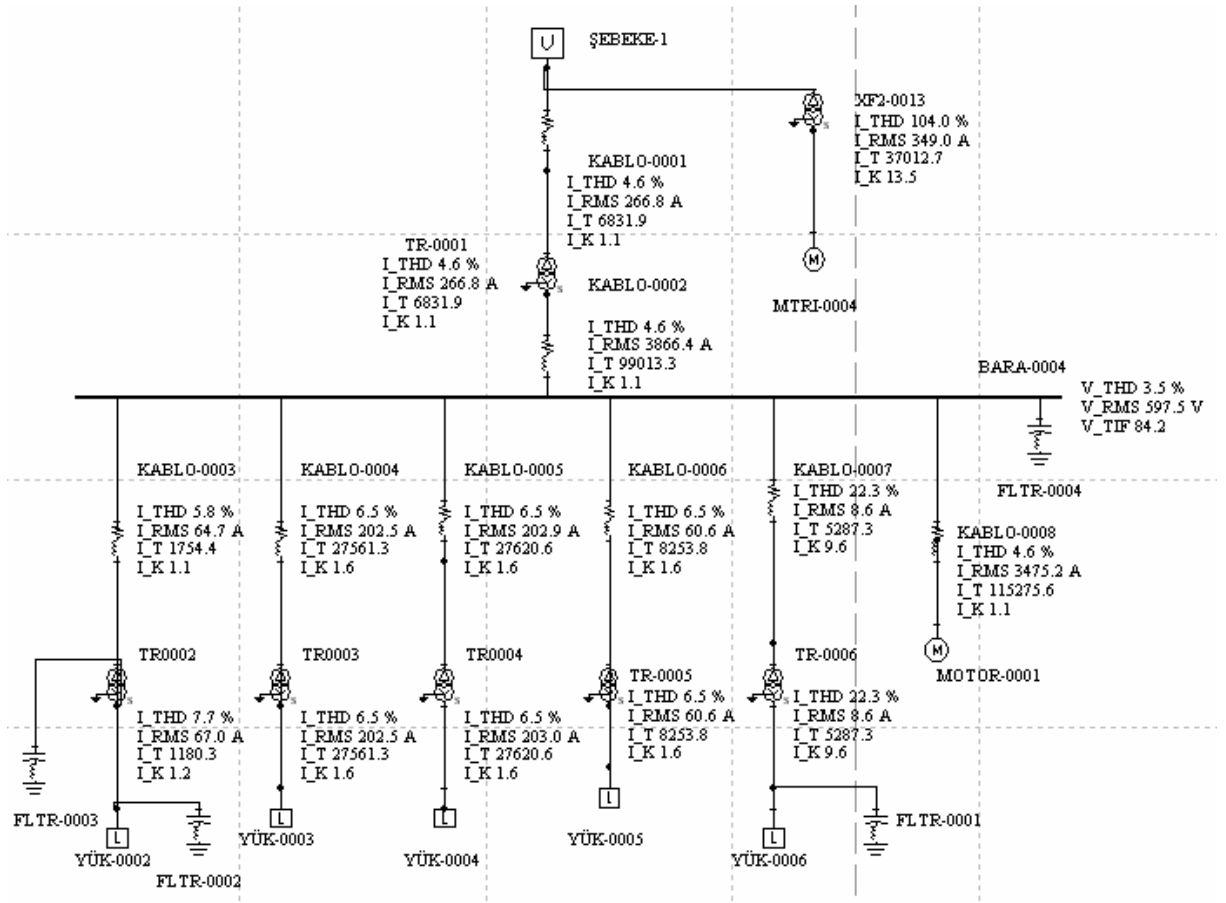
b) Şebekenin sinüsoidal olmaması durumu

Şebeke tarafında $THD_V \neq 0$ iken

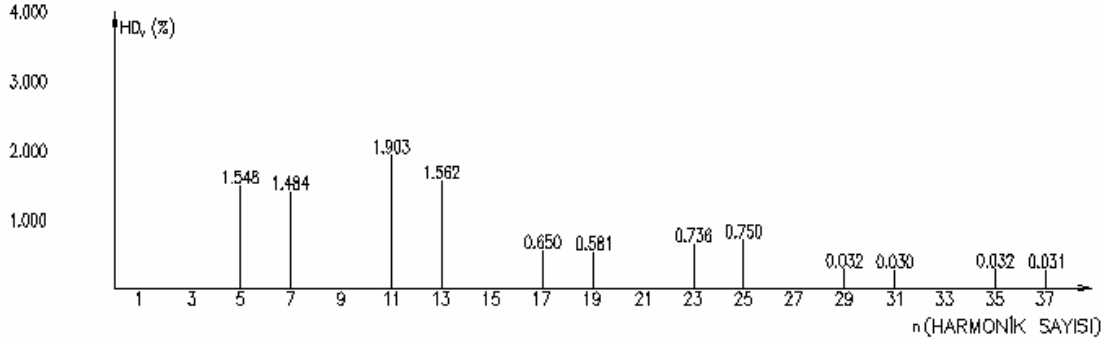
Durum 9 - Bu durumda Tablo 4.8’de verilmiş olan orta gerilim için geçerli $THD_{V_{max}} \leq \%5$ değerinin şebeke tarafında sağlandığı kabulü ile $THD_{V_{şebeke}} = \%4.80$ alınmıştır.

Bu durum şekil 5.35 ile verilmiştir ve BARA-0004 harmonik spektumu ise şekil 5.36’da olduğu gibidir. Ana bara 0004 de $THD_V = \%3.5$ olarak hesaplanmıştır. Görüldüğü gibi, tasarım aşamasında şebeke ya da kaynağın harmonik değerleri, yapılmış olan hesapları önemli derecede etkileyebilmektedir.

Bu sebepten dolayı hesaplamalara başlamadan evvel gerekli bilgilerin doğru olarak temin edilmesi önemlidir.



Şekil 5.35 Durum-9: $THD_{V_{şebeke}} = \%4.80$ olması durumu

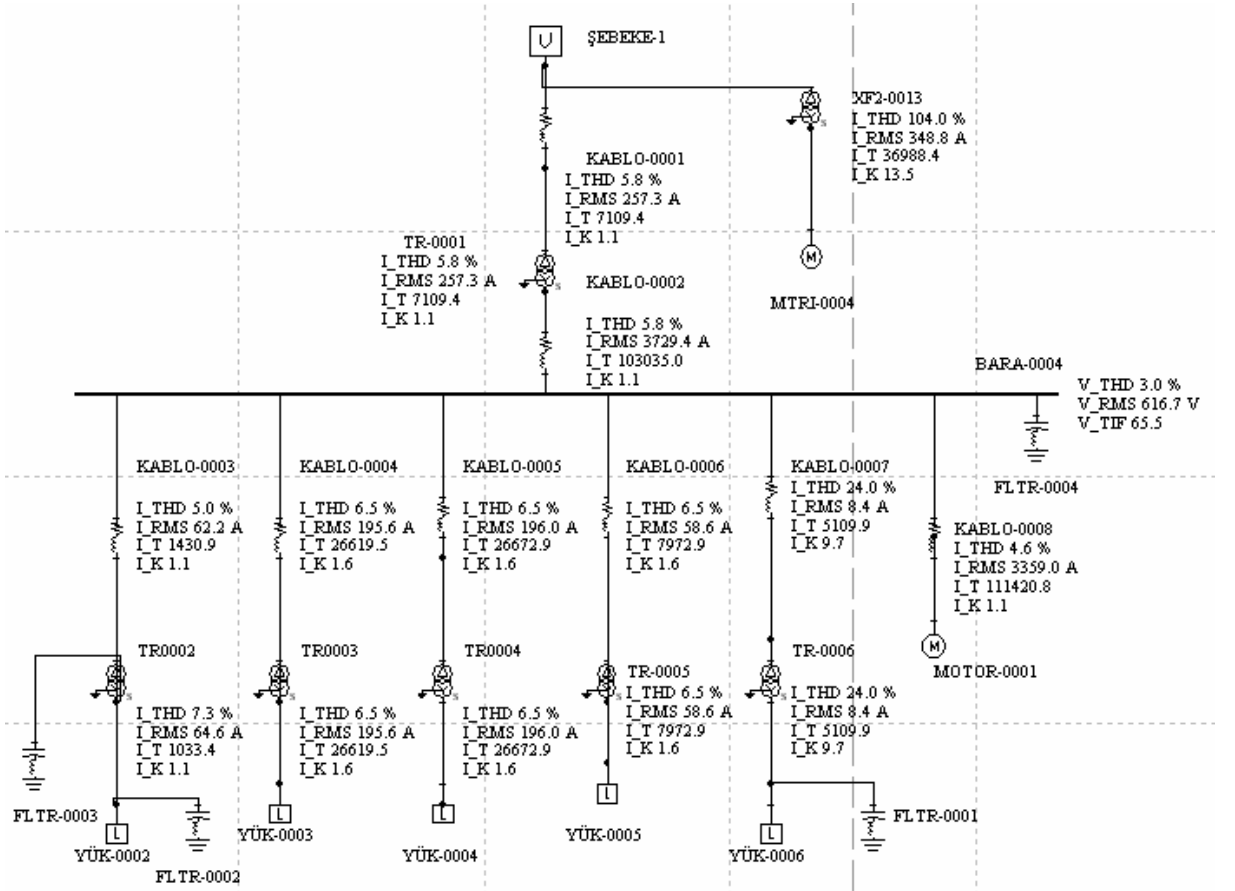


Şekil 5.36 Durum-9 için BARA-0004 harmonik spektrumu

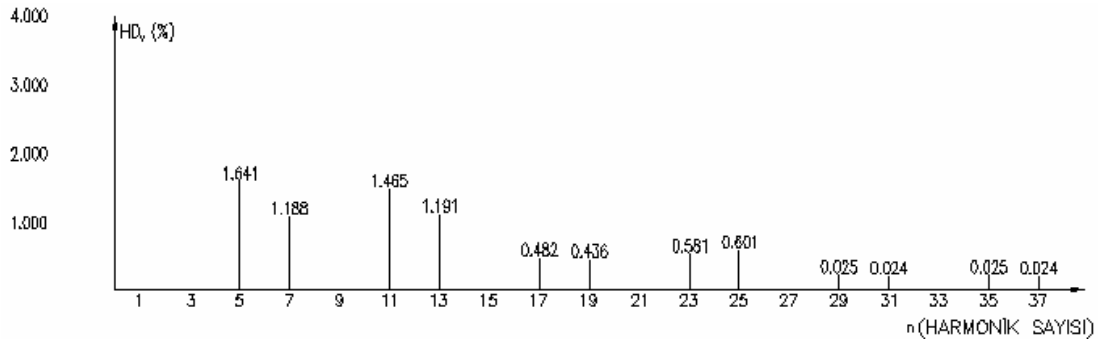
Durum 10 - Ana dağıtım trafosu TR-0001 in kısa devre empedansı Z' ' in değişmesi durumunda Şekil 5.37'de görüldüğü gibi 9 nolu durumda ana bara 0004 'de hesaplanan harmonik distorsiyonu $THD_v = \%3.0$ mertebesine düşmektedir.

Dolayısıyla, sistemde kullanılan transformatör sargı şekilleri dışında transformatör kısa devre empedansı da harmoniklerin sınırlandırılmasında etkili rol oynamaktadır.

Şekil 5.38'de BARA-0004 harmonik spektrum değerleri gösterilmiştir.



Şekil 5.37 Durum-10:TR-0001 in kısa devre empedansı Z' ' in değişmesi durumu



Şekil 5.38 Durum-10 için BARA-0004 harmonik spektrumu

Özet olarak tablo 5.6’da analizi yapılan sistemde elde edilen değerler verilmiştir.

Tablo 5.6 Analizi yapılan sistemde elde edilen değerler

Çalışma	THD _v (%)								
	Bara-0004 (Analiz noktası)	Şebeke-1	TR-0001 Primer Sargı	TR-0001 Sekonder Sargı	TR-0002 Primer Sargı	TR-0003 Primer Sargı	TR-0004 Primer Sargı	TR-0005 Primer Sargı	TR-0006 Primer Sargı
Durum 1	6.2	0.32	0.37	6.00	6.25	6.33	6.25	6.29	6.26
Durum 2	5.8	0.30	0.35	5.66	5.81	5.90	5.89	5.89	5.91
Durum 3	5.7	0.30	0.35	5.59	5.74	5.83	5.81	5.82	5.78
Durum 4	5.6	0.29	0.34	5.49	5.63	5.72	5.71	5.71	5.68
Durum 5	5.6	0.29	0.34	5.48	5.61	5.71	5.70	5.70	5.67
Durum 6	5.5	0.29	0.33	5.38	5.50	5.62	5.60	5.60	5.58
Durum 7	3.3	0.18	0.20	3.26	3.35	3.44	3.41	3.41	3.43
Durum 8	3.2	0.17	0.19	3.10	3.18	3.27	3.25	3.25	3.23
Durum 9	3.5	4.85	4.84	3.50	3.55	3.62	3.60	3.60	3.59
Durum10	3.0	2.97	4.80	4.77	2.95	3.03	3.01	3.01	3.02

6-SONUÇLAR VE TARTIŞMA

Elektrik sistem harmoniklerine, çok özel uygulamalar dışında, genellikle işletme esnasında sorun olarak ortaya çıkmaları durumunda tedbirler alınmaktadır. Bu da çoğu zaman işletmede zaman kaybına, verim düşümüne v.b. olumsuzluklara sebebiyet vermektedir. Bu tez çalışmasında gün geçtikçe önem kazanmaya başlayan elektrik sistem harmoniklerine karşı, sistemin tasarımı aşamasında yapılabilecek analiz yöntemi verilmiş, elde edilen sonuçlar yorumlanarak harmoniklere karşı alınabilecek tedbirler aşağıda sıralanmıştır.

Bu bilgiler ışığında şu sonuçlara varılabilir:

- Teknik bir sorun olmadığı müddetçe, sistemde oluşan/oluşabilecek harmoniklerin şebekeye geçerek ana sistemi ve diğer tüketicileri etkilemesini önlemek için , dağıtım transformatörlerinin primer tarafı üçgen bağlı seçilmelidir.
- Tasarlanan sistemdeki harmonik yaratacak yüklerin özelliklerinin iyi bilinmesi ile doğru sargı açılı transformatör seçilerek birçok harmonik basit bir şekilde yok edilebilir.
- Sistemde kullanılan transformatörlerin kısa devre empedansları oluşacak harmonik distorsiyona doğrudan etki edebileceğinden, harmonikli yüklerin olduğu tesislerde transformatör seçiminde bu değer de dikkate alınmalıdır.
- Sistemin dengesiz yüklenmesinin önüne geçilebilmesi için yüklerin dağıtımına tasarım aşamasında ayrıca özen gösterilmeli,mümkün mertebe harmonikli yükler diğer yüklerden ayrıştırılmalı ve elverdiği ölçülerde farklı kaynaktan beslenmelidir. Ayrıca fazların da dengeli bir şekilde yüklenmesi sağlanmalıdır

- Projelendirme aşamasında sarınamelere muhakkak müade edilen ulusal/uluslararası değeri sağlayacak kriterlere göre değeri yazılmalı, ekipman alımında mutlak surette bu husus gözönünde tutulmalıdır.
- Kompanzasyon gereken durumlarda muhakkak harmonikler de gözönüne alınarak tasarıma gidilmelidir.
- Genel sistem topraklamasına azami özen gösterilmeli, standartlara uygun topraklama yapılmalıdır.
- Güç sisteminde oluşabilecek harmoniklerin zayıf akım sistemlerine olan etkisini yok edebilmek-asgariye indirebilmek için bilhassa telefon sisteminde blendajlı kablo kullanılmalı, enstruman topraklaması muhakkak sisteme entegre edilmelidir.
- Ticari bina projelendirilmesinde çokça kullanılan bilgisayar, tek fazlı güç kaynaklarını gibi cihazların doğuracağı 3.harmoniklerin önlenmesi için , sistemde kullanılan nötr kablo kesitlerinin alışlagelmiş uygulamalar bir yana bırakılarak, en az faz kesiti kadar seçilmesi sağlanmalıdır.
- Genel olarak tasarruf sağlamak maksatlı olarak nötr iletken kesitinin faz iletkeninden düşük kesitli seçilmesi uygulamasının önüne geçilebilmesi için standartlarda bu yönde uygulamaya yönelik düzenlemeler biran önce hayata geçirilmelidir.
- Seçilen kapasitörlerin, harmonik gerilimlerine dayanımının sağlanabilmesi açısından, kapasitörlerin işletme gerilimi üzerinde yüksek gerilimli olarak seçilmesi gerekir.
- Ticari bina uygulamalarında en çok tercih edilen aydınlatma armatürü olan floresan armatürlerin seçiminde balast özellikleri incelenmeli ve teknik sarınamelerde standartlar belirtilmelidir.

- Ayarlı motor hız kontrol üniteleri kullanılan düzeneklerde dizayn kriteri olarak en yüksek THD değeri yerine, motorun işletilmek istenen hız ya da tork değerindeki harmonik bozulmaları gözönüne alınmalıdır.
- Ark fırını uygulamalarında üçüncül harmoniklerin yok edilebilmesi için tasarlanacak filtre cihazları , erime fazı yerine rafine fazında devreye girer ise daha randımanlı sonuç elde edilebilir.
- Tasarlanan projede besleme kaynağı olarak generatör kullanılması ya da acil durum generatörünün de yer alması durumunda, generatörlerin de harmonik üretici elemanlar olmaları gözönünde bulundurularak , malzeme seçiminde uluslararası normlarda belirtilen değerlerin altında harmonik üreten generatörler seçilmesine dikkat edilmelidir. Yükün genel karakteristiğine bağlı olarak generatör stator bağlantı şekli tasarlanmalıdır.
- Tüm cihazların plaka –etiket değerlerine, akım, gerilim v.b değerleri yanında THD ve/veya benzeri değerlerinin de yazılması kanunlarla zorunlu hale getirilebilir ve bu da cihaz seçiminde belirleyici bir etken olarak ortaya çıkabilir. Bu kriter cihaz üreticilerinin harmonik hususuna daha duyarlı olmalarına olanak verecektir.
- Reaktif güç tüketimindeki cezai uygulama, işletmelerde şebekeye aktarılan harmonikler için de benzer şekilde uygulamaya alınarak caydırıcılık hedeflenebilir, şebeke enerji kalitesinin yükselmesi sağlanabilir.
- Tasarımı yapılan tesise yetkili makamdan onay alınabilmesi için, prosedürlerle istenen diğer kriterlere ek olarak harmonik analiz hesabı da bir zorunluluk olarak eklenebilir.

KAYNAKLAR

- [1] **Sankaran, C.**, 2002. Power Quality, CRC Press LLC, USA.
- [2] **Dugan R.C. and others**, 2002. Electrical Power System Quality, Mc-Graw Hill, Second Edition.
- [3] **Kocatepe C. Ve diğeri**, 2003. Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [4] **Schneider Electric**, 2005. İstanbul Elektrik Sistemlerinde Harmonikler Semineri
- [5] **Arrilaga, J. and Watson, N. R.**, 2003. Power System Harmonics, John Wiley & Sons, Ltd West Sussex, England.
- [6] **Tacer M.E., Tuncay R.N.**, Güç Elektroniğı ,1997 , İ.T.Ü. Elektrik-Elektronik Fakültesi, İstanbul.
- [7] **Tuncay R.N.**, Power System Harmonics ders notları, 1997 , İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.
- [8] **Korovesis, P.N. and others**, 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, Vol 19, No 4 , 1787-1793.
- [9] **Paice, D.A.**, Power Electronics Converter Harmonics: Multiple Methods for Clean Power, 1996. Piscataway N.J.
- [10] **Erickson, R.W. and Maksimovic D.**, 2002. Fundamentals of Power Electronics, Heidelberg, University of Colorado, Second Edition
- [11] **ABB transformer Handbook**, 2004. Switzerland
- [12] **Şahin, Ö.**, 2003. Elektrik Güç Sistemlerinde Harmonik Analizi, *Yüksek Lisans Tezi*, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul.

- [13] **Yılmaz, M.**, 1998. Power System Harmonics Measurement, Yüksek Lisans semineri, İ.T.Ü. Fen Bilimleri Enstitüsü, İstanbul
- [14] **Shephard, W. & Zand, P.**, Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits, 1997. Cambridge University Press, England
- [15] **Bayram, M.**, 2000. Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsan Yayınevi, İstanbul.
- [16] **Wakileh, G.J.**, Power System Harmonics : Fundamentals, Analysis and Filter Design, 2001. Springer , New York
- [17] **IEC-61000-2-4**, 2002. Compatibility levels in industrial plants for low-frequency conducted disturbances
- [18] **TS EN 61000-3-2/A2**, 2005. Elektromagnetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 3-2: Sınır Değerler-Harmonik Akım Emisyonlar için Sınır Değerler:(Faz Başına Donanımın Giriş Akımı 16 A), *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara.
- [19] **TS EN 61000-4-7**, 2005. Elektromagnetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 4-7: Deneyler ve Ölçme Teknikleri- Güç Kaynağı Sistemlerinde ve bunlara bağlı cihazlardaki harmonik ve ara harmonik ölçmeleri ve ölçme cihazı için genel kılavuz, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [20] **TS EN 61000-4-13**, 2004. Elektromagnetik Uyumluluk (EMU)-Bölüm 4-7: Deneyler ve Ölçme Teknikleri- - A.A. Enerji Ucunda Enerji Şebeke İşaretlemesini İçeren Harmonikler ve Ara-Harmonikler- Düşük Frekans Bağışıklık Deneyleri, *Türk Standartları Enstitüsü*, Ankara
- [21] **Gyugyi L. and Strycula E. C.** “Active AC Power Filter” IAS 76 ANNUAL sayfa 529-535
- [22] **Akagi Hifofumi** “Trends in Active Power Line Conditioners” IEEE Transaction on Power Electronics, Vol. 9, No 3, May 1994
- [23] **Fujita Hideaki ve Akagi Hifofumi**, “ The Unified Power Quality Conditioner: The Integration of Series and Shunt Active Filters”, IEEE Trans. On Power Electronics, Vol. 13, No 2, March (Mart)1998, sayfa 315-322.
- [24] **Akagi Hifofumi ve Fujita Hideaki**, “A New Power Line Conditioner for Harmonic Compensation in Power System”, IEEE Trnas. On Power Delivery, Vol. 10, No 3, 1994, sayfa 1570-1575

- [25] **Fujita Hideaki ve Akagi Hifofumi** “Combined System of Series Active Filter and Shunt Passive Filter – An Optimum Design of Shunt Passive Filter” *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 113, No 2, Feb 1993, sayfa 127-135
- [26] **Srianthumrong S., Tamal Yasuhiro ve Akagi Hifofumi,**”A Proposal of a 3.3-kV/6.6kV Trnasformerless Hybrit Filter, and Experimental Verification Based on a 200 V Laboratory System”, ” *Electrical Engineering in Japan*, Vol. 146, No 2, Feb. (Şubat) 2004, sayfa 54-65.
- [27] **Srianthumrong S. ve Akagi Hifofumi,**”A Medium-Voltage Transformless AC/DC Power Conversion System Consisting of a Diode Rectifier and a Shunt Hybrid Filter”, *IEEE Trnas. On Industry Application*, Vol. 39, No 3, May/June (Mayıs/Haziran) 2003 sayfa 874-882
- [28] **Cheng Po-Tai, Bhattacharya S., ve Divan M. Deepak,** “Hybrid Solutions for Improving Passive Filter Performance In High Power Applications”, *IEEE Trnas. On Industry Applications*, Vol. 33, No 3, May/June (Mayıs/Haziran) 1997 sayfa 732-947
- [29] **Chang G.W., Chu S.Y.,** 2004. Strategic Placement and Sizing of passive filters in a Power System for Controlling Voltage Distortion, *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol 19, No 3 , 1204-1211.
- [30] **Fujita H., Yamasaki T, ve Akagi Hifofumi,**”A Hybrit Active Filter for Damping of Harmonic Resonant in Industrial Power System”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 15, No 2, March (Mart) 2000, sayfa 215-222
- [31] **Cheng Po-Tai, Bhattacharya S., ve Divan M. Deepak,** “Control of Square-Wave Inverters in High Hybrit Active Filter System”, *IEEE* 1996, sayfa 1106-1113
- [32] **Cheng Po-Tai, Bhattacharya S., ve Divan M. Deepak,** “Line Harmonics Reduction in High Power Systems Using Square-Wave Inverters-Based Dominant Harmonic Active Filter”, *IEEE Trans. on Power Electronics*, Vol. 14, No 2, March (Mart) 1999, sayfa 265-272.
- [33] **Schneider Electric,** 2005. Electrical Installation Guide
- [34] **SKM Power Tools, Electrical Engineering** Software ,2004 SKM System Analysis Inc ,USA

EK-A ENERJİ KALİTESİ TERİMLERİ

Aktif filtre- Harmonik bozulmaları yok etmek için bir yada birçok güç elektroniği düzeneği

Atlama- Akım taşıyan/taşıma riski olan iletken parçaların ortak elektrik potansiyeline getirilmesi için elektriksel ara bağlantı

Ara harmonikler- Şebeke işletme frekansının tam katı olmayan frekans bileşeni

Çentikleme- Gerilim dalga şeklinin yarım periyottan kısa süreli kesintiye uğraması

Çökme- Alternatif akım devresinde gerilimin efektif değerinin belirli bir süre azalması

Dalga- Gerilim ya da akımda geçici süreli ani olarak keskin yükselme

Darbe Genişlik Modülasyonu- Eviricilerde anahtarlama elemanının değişken genişlikte darbeler üretmesini sağlayarak altertanif akım dalga şekli elde etmek amaçlı kullanılan teknik

Distorsiyon(Bozulma)- Periyodik bir dalganın , ideal dalga şekli karakteristiğinden sapmasını ifade eden nitelik

Doğrultucu- Alternatif akımı doğru akıma çeviren güç elektroniği düzeneği

Düzelme süresi- Yük ya da hattaki değişiklikler sonrası çıkış akımı ya da gerilimin öngörülen değerlere dönmesi için gerekli süre

Form faktörü- Periyodik bir dalganın efektif değerinin ortalama değerine oranı

Endüktans- Akım geçen bir devrede oluşan akı ile akım arasındaki bağıntı

Elektriksel Gürültü- Elektrik devresinde istenmeyen etkiler doğuran sinyaller

Elektromagnetik Uyumluluk(EMU)- Bir cihaz, ekipman ya da sistemin kendi elektromagnetik çevresinde, diğer cihaz, ekipman ya da sistemlere tolere edilemeyecek elektromagnetik etki etmeden çalışabilme özelliği

Evirici(kıyıcı)- Doğru akımı alternatif akıma çeviren güç elektroniği düzeneği

Frekans- Periyodik bir dalganın birim zamandaki toplam tam devir sayısı

Geçici hal- Dalga şeklinin ani ve keskin kısa süreli ve kesintili bir dalga ile girişimi

Güç faktörü- Toplam aktif gücün görünür güce oranı

Harmonik-Periyodik bir dalganın temel frekansından farklı olarak tam katları olan sinusoidal bileşenleri

Harmonik Distorsiyonu(Bozulması)-Distorsiyonun saf sinusoidal dalga şekline olan nicel tasviri

Harmonik filtre- Bir veya daha fazla harmoniği güç sisteminden elimine eden cihaz

Harmonik sayısı-Harmonik frekansının temel frekansa olan oranı

Harmonik rezonans-Enerji sisteminin ,nonlineer yüklerin ürettiği harmonik değerine yakın rezonansa girmesi durumu

Harmonik spektrumu-Harmonik büyüklüklerin(akım ya da gerilim) genliklerinin , temel frekansın katı olan bileşenlere göre değişimini grafik olarak gösteren eğri

İzolasyon-Enerjili elektrik devrelerinin birbirinden ayrılması

Kapasitans- İki iletken parça arasında izole bir ortamın bulunduğu devre elemanı

Kuplaj-Enerjinin ya da elektriksel gürültünün, elektriksel olarak bağlı olan ya da olmayan devrelerin birinden diğerine aktarılması prosesi

Krest faktörü-Periyodik bir dalganın tepe değerinin efektif değerine oranı

Kalkış akımı-Enerjilendirilen bir devrenin ilk anda çektiği akım

Kesinti-Belirli bir zaman diliminde gerilimin ya da akımın tamamen kaybedilmesi

Lineer yük-Kalıcı hal çalışmada sabit bir empedans özelliği gösteren yük

Non-Lineer yük- Kalıcı hal çalışmada sabit bir empedans özelliği göstermeyen ya da şebekeden düzensiz akım çeken yük

Pasif filtre- Harmonik bozulma ya da bozulmaları yok etmek için bir endüktans, kapasitans ve de resistanslardan oluşan kombinasyon

Rezonans- Endüktans ve kapasitansların doğal frekanslarının uyandırılması

Şisme- Alternatif akım devresinde gerilimin efektif değerinin belirli bir süre artması

Şiltleme-Potansiyel gürültü kaynakları veya hassas devreler arası iletken ve/veya ferromanyetik kalkanlama

Titreşim- Gerilimde oluşabilecek değişikliğin nominal değere olan yüzdesel oranı

Toplam Talep Distorsiyonu-Harmonik akımının efektif değerinin ölçülen efektif ya da maksimum temel talep akımına yüzdesel oranı

Toprak elektrodu-Toprak ile teması sağlamak maksadı ile toprağa gömülen/çakılan iletken ya da iletken parçası

Topraklama şebekesi-Belirli bir bölgede,alandaki toprak seviyesi altına gömülü birbirine bağlı çıplak iletkenlerden oluşan sistem

Topraklama ringi- Bir bina ya da yapıyı çevreleyen ve direk toprakla temastaki devre

Topraklama-Elektrik devre ya da ekipmanının toprak ile bağlantısını sağlayan iletken bağlantı

Temel(bileşen)- Periyodik niceliğin Fourier serisinin 1 numaralı bileşeni

Üçüncül harmonikler-Üçüncü harmoniğin tek katlarına verilen isim

EK-B

FARKLI SEKTÖRLER İÇİN PROBLEM SENTEZLEME:ENDÜSTRİ

Problemi üreten işlem

Yüksek

Az

AKTİVİTE	İLGİLİ İŞLEM TİPİ	OLGU							
		kWh/kVArh tüketimi(OG)	kWh/kVArh tüketimi(AG)	Harmonik seviyesi	Geçici aşırı gerilimler	Gerilim dalgalanmaları	Gerilim düşümü	Enerji kesintisi(uzun süreli)	Enerji kesintisi(kısa süreli)
Endüstri									
Yiyecek ve içecek	Temiz odalar-filtreleme-yoğunluk-damıtma-elektrik fırınları								
Tekstil	Dokuma-baskı-endüksiyon								
Ahşap	Doğrama								
Kağıt	Rulolama-pompalama								
Baskı	Baskı-kayıt(CD/DVD/video)								
Kimya-eczacılık	Temiz odalar-filtreleme-yoğunluk-damıtma-elektrik fırınları								
Plastik	Kalıplama								
Cam-seramik	Tabakalama								
Çelik imalatı	Ark fırınları-rulo makinesi-tel çekme-kesme-pompalama								
Metaller	Kaynak-damgalama-fırınlama-yüzey bakımı								
Otomotiv	Kaynak-damgalama								
Çimento	Fırınlama-ezme-taşıma-kaldırma-iklimlendirme-pompalama								
Madencilik	Taşıma-ezme-kaldırma								
Rafineri	İklimlendirme-pompalama-PLC(pragramlanabilir lojik kontrolör)								
Mikro-elektronik	PLC-bilgisayarlar								

Probleme duyarlı işlem

Yüksek

Az

AKTİVİTE	İLGİLİ İŞLEM TİPİ	OLGU							
		kWh/kVArh tüketimi(OG)	kWh/kVArh tüketimi(AG)	Harmonik seviyesi	Geçici aşırı gerilimler	Gerilim dalgalanmaları	Gerilim düşümü	Enerji kesintisi(uzun süreli)	Enerji kesintisi(kısa süreli)
Endüstri									
Yiyecek ve içecek	Temiz odalar-filtreleme-yoğunluk-damıtma-elektrik fırınları								
Tekstil	Dokuma-baskı-endüksiyon								
Ahşap	Doğrama								
Kağıt	Rulolama-pompalama								
Baskı	Baskı-kayıt(CD/DVD/video)								
Kimya-eczacılık	Temiz odalar-filtreleme-yoğunluk-damıtma-elektrik fırınları								
Plastik	Kalıplama								
Cam-seramik	Tabakalama								
Çelik imalatı	Ark fırınları-rulo makinesi-tel çekme-kesme-pompalama								
Metaller	Kaynak-damgalama-fırınlama-yüzey bakımı								
Otomotiv	Kaynak-damgalama								
Çimento	Fırınlama-ezme-taşıma-kaldırma-iklimlendirme-pompalama								
Madencilik	Taşıma-ezme-kaldırma								
Rafineri	İklimlendirme-pompalama-PLC(pragramlanabilir lojik kontrolör)								
Mikro-elektronik	PLC-bilgisayarlar								

Problemi üreten işlem

■ Yüksek

 Az[illegible]

Probleme duyarlı işlem

■ Yüksek

■ Az

[illegible]

Problemi üreten işlem

■ Yüksek

 Az

Probleme duyarlı işlem

Yüksek

■ Az

[illegible]

ÖZGEÇMİŞ

Murat Yılmaz 29.04.1975’de İstanbul’da doğdu. İlkokulu 1986’da Bakırköy Hamdi Akverdi İlkokulunda tamamlayarak ortaokul ve lise öğrenimini 1986-1993 yılları arasında F.M.V.Özel Işık Lisesi’nde gördü. Lisans eğitimine 1993 yılında İstanbul Teknik Üniversitesi Elektrik Mühendisliği programında başlayarak 1997 yılında iyi derece ile mezun oldu. Aynı yıl İstanbul Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalında yüksek lisans eğitimine başladı.