

**YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ
FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ**

**NONLİNEER YÜKLÜ SİSTEMDE FİLTRELEME VE GÜÇ
KOMPANZASYONU**

Elk-Elektronik Müh. F. Gülşen ÖZER

**FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı Elektrik Tesisleri Programında
Hazırlanan**

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez danışmanı : Prof. Dr. Celal KOCATEPE

İSTANBUL, 2011

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	v
KISALTMA LİSTESİ	vi
ŞEKİL LİSTESİ.....	vii
ÇİZELGE LİSTESİ....	viii
ÖNSÖZ.....	ix
ÖZET	x
ABSTRACT	xi
1. HARMONİKLER.....	1
1.1 Giriş	1
1.2 Harmonik Tanımı.....	1
1.3 Harmonik Büyüklüklere Ait Kavramlar	3
1.3.1 Sinüs Biçimli Olmayan Durumda Elektrik Büyüklükleri.....	3
1.3.2 Toplam Harmonik Bozunumu (THD)	5
1.3.3 Toplam Talep Bozunumu (TTD).....	6
1.3.4 Şekil Faktörü.....	7
1.3.5 Tepe Faktörü	7
1.3.6 Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)	7
1.3.7 Transformatör K-Faktörü.....	8
1.3.8 Bozunum Güç Faktörü.....	8
1.4 Harmoniklerin Matematiksel Analizi	9
1.4.1 Fourier Analizi.....	9
1.4.1.1 Fourier Katsayılarının Analitik Yöntemle Bulunması.....	10
1.4.1.2 Fourier Katsayılarının Ölçme Yöntemi İle Bulunması.....	11
2. HARMONİK KAYNAĞI OLAN ELEMANLAR.....	15
2.1 Giriş	15
2.2 Harmonik Üreten Elemanlar.....	17
2.2.1 Doğrultucular	17
2.2.2 Transformatörler	18
2.2.3 Generatörler	18
2.2.4 Ark Fırınları	19
2.2.5 Gaz Deşarj Prensibi İle Çalışan Aydınlatma Armatürleri	20
2.2.6 Statik Var Kompanzatörler	20
2.2.7 Fotovoltaik Sistemler.....	21
2.2.8 Bilgisayarlar.....	21
2.2.9 Elektronik Balastlar	21
2.3 Harmoniklere Neden Olan Cihazların Dalga Şekilleri	22

3.	HARMONİKLERİN ENERJİ SİSTEMİNE VE ELEMANLARINA ETKİLERİ	25
3.1	Giriş	25
3.2	Harmoniklerin Elemanlar Üzerindeki Etkileri.....	26
3.2.1	Omik Direnç Üzerindeki Etkisi	26
3.2.2	Reaktanslar Üzerindeki Etkisi	27
3.2.3	Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri	27
3.2.4	Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri.....	28
3.2.5	Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkiler.....	29
3.3	Enerji Sistemi Üzerindeki Etkileri.....	29
3.3.1	Harmoniklerin Sebep Olduğu Rezonans Olayları	29
3.3.2	Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkisi.....	32
3.3.3	Harmoniklerin Omik Kayıplara Etkisi.....	32
3.3.4	İletişim Hatları Üzerindeki Etkiler	33
4.	HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE ULUSLARARASI STANDARTLAR	34
4.1	Giriş	34
4.2	Standartların Gelişmesine Etki Eden Faktörler	34
4.3	İlgili Standartlar	35
5.	HARMONİKLERİN ETKİLERİNİN AZALTILMASI	40
5.1	Giriş	40
5.2	Harmoniklerin Filtrelenmesi.....	40
5.2.1	Pasif Filtreler	41
5.2.1.1	Seri Pasif Filtre	41
5.2.1.2	Paralel Pasif Filtreler	42
5.2.2	Aktif Filtreler	42
6.	HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ FAKTÖRÜ ve DÜZELTİLMESİ	44
6.1	Giriş	44
6.2	Harmonikli Devrelerde Güç Faktörü	46
6.2.1	Sinüs Biçimli Beslemeli Lineer Olmayan Devre İçin (Shepherd, 1979).....	47
6.2.2	Sinüs Biçimli Olmayan Beslemeli Lineer Devre İçin (Shepherd, 1979)	48
6.2.3	Sinüs Biçimli Olmayan Beslemeli Lineer Olmayan Devre İçin (Shepherd, 1979).....	49
7.	SAYISAL UYGULAMA	51
7.1	Giriş	51
7.2	Ölçüm Cihazı	51
7.3	Örnek Sistem	52
7.4	Ölçüm Verilerinin Analizi	54
7.4.1	Filtresiz Kompanzasyon Durumunda Ölçüm Sonuçları	55
7.4.2	Filtreli Kompanzasyon Durumunda Ölçüm Sonuçları	60
7.5	Örnek Sistemin Modellenmesi ve Doğrulanması	64
7.6	Örnek Sistem İle İlgili Analizler.....	68
8.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	71
	KAYNAKLAR	73

EKLER	74
ÖZGEÇMİŞ.....	80

SİMGE LİSTESİ

pF	Güç faktörü
S	Görünür güç [VA]
P	Aktif güç [W]
Q	Reaktif güç (kVAr)
$v(t)$	Ani gerilim [V]
$i(t)$	Ani akım [A]
V_m	m.inci harmoniğin etkin gerilim değeri [V]
I_n	n. Harmoniğin etkin akım değeri [A]
ω	Açısal frekans [rad/s]
C_n	n. Harmoniğin genliği
X_L	Endüktif reaktans [ohm]
X_C	Kapasitif reaktans [ohm]
R_{FE}	Transformatör demir kayıplarını gösteren direnç [ohm]
X_m	Mıknatıslanma reaktansı [ohm]
f_l	Temel frekans [Hz]
f_s	Seri rezonans frekansı [Hz]
f_p	Paralel rezonans frekansı [Hz]
S_K	Kısa devre gücü [VA]
Q_c	Kondansatör günü [Var]
n	Harmonik mertebesi
i_Y	Yük akımı [A]
θ	Faz açısı

KISALTMA LİSTESİ

AC	Alternatif akım (Alternative Current)
DC	Doğru akım (Direct Current)
KGK	Kesintisiz güç kaynağı
THD	Toplam harmonik bozunumu
TTD	Toplam talep bozunumu
TEF	Telefon etkileşim faktörü
AG	Alçak gerilim
OG	Orta gerilim
TKR	Tristör kontrollü reaktör
PWM	Darbe genlik modülasyonu
IEC	Uluslararası elektroteknik komisyonu
IEEE	Elektrik ve elektronik mühendisleri enstitüsü
HVDC	Yüksek gerilimli DC
YG	Yüksek gerilim
ÇYG	Çok yüksek gerilim
PAF	Pasif aktif filtre
SAF	Seri aktif filtre

ŞEKİL LİSTESİ

Sayfa

Şekil 1.1	Lineer ve lineer olmayan yüklerin akım-gerilim dalga şekilleri	2
Şekil 1.2	Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin değişimi.....	3
Şekil 1.3	Filtre tipi analog harmonik genlik analizörü	11
Şekil 1.4	Dijital harmonik analizörü	12
Şekil 1.5	Bir tesiste harmonik ölçümünün A.G. tarafından yapılması	13
Şekil 1.6	Bir tesiste harmonik ölçümünün O.G. tarafından yapılması	14
Şekil 2.1	(a) Lineer elemanın uç karakteristiği, (b) Lineer olmayan elemanın uç karakteristiği	16
Şekil 2.2	Farklı ekipmanların harmonik içeriklerini gösteren deneysel ölçülmüş akım dalga şekilleri (Enjeti, 2001)	24
Şekil 3.1	Sinüs biçimli olmayan akım ile omik direncin frekansa bağlı olarak artması.....	27
Şekil 3.2	n. harmonik bileşen için transformatörün eşdeğer devresi	28
Şekil 3.3	Paralel rezonans durumu.....	30
Şekil 3.4	Seri rezonans devresi	31
Şekil 5.1	Seri pasif filtre	41
Şekil 5.2	Paralel pasif filtre.....	42
Şekil 6.1	Sinüs biçimli kaynak ve lineer olmayan yüke sahip devrenin şönt kompanzasyonu	47
Şekil 6.2	Sinüs biçimli olmayan kaynak ve lineer yüke sahip devrenin şönt kompanzasyonu	48
Şekil 6.3	Sinüs biçimli olmayan kaynak ve nonlinear yüke sahip devrenin şönt kompanzasyonu	49
Şekil 7.1	Ölçüm Cihazı	51
Şekil 7.2	Örnek sisteme ait şebeke ve generatör besleme şeması.....	52
Şekil 7.3	(a) Örnek sisteme ait filtreli güç kompanzasyonu şeması (1.-8. Kademe).....	53
Şekil 7.3	(b) Örnek sisteme ait filtreli güç kompanzasyonu şeması (9.-12. Kademe).....	54
Şekil 7.4	Filtresiz kompanzasyonda aktif güç grafiği.....	55
Şekil 7.5	Filtresiz kompanzasyonda reaktif güç grafiği.....	55
Şekil 7.6	Filtresiz kompanzasyonda gerilime ait toplam harmonik bozunumu grafiği	56
Şekil 7.7	Filtresiz kompanzasyonda akıma ait toplam harmonik bozunumu grafiği.....	56
Şekil 7.8	Filtresiz kompanzasyonda gerilim harmonik bileşenlerinin yüzdeleri grafiği	57
Şekil 7.9	Filtresiz kompanzasyonda akım harmonik bileşenlerinin yüzdeleri grafiği.....	58
Şekil 7.10	Filtresiz kompanzasyonda güç faktörü grafiği	59
Şekil 7.11	Filtreli kompanzasyonda aktif güç grafiği.....	60
Şekil 7.12	Filtreli kompanzasyonda reaktif güç grafiği.....	60
Şekil 7.13	Filtreli kompanzasyonda gerilime ait toplam harmonik bozunumu grafiği	61
Şekil 7.14	Filtreli kompanzasyonda akıma ait toplam harmonik bozunumu grafiği.....	61
Şekil 7.15	Filtreli kompanzasyonda gerilim harmonik bileşenlerinin yüzdeleri grafiği	62
Şekil 7.16	Filtreli kompanzasyonda akım harmonik bileşenlerinin yüzdeleri grafiği	63
Şekil 7.17	Filtreli kompanzasyonda güç faktörü grafiği.....	64
Şekil 7.18	Uygulamada ele alınan sistem için oluşturulan kompanzasyonun da dikkate alındığı simülasyon diyagramı	68
Şekil 7.19	Harmonikli durumda kompanzasyon kondansatörü-güç faktörü değişimi.....	69
Şekil 7.20	Harmonikli durumda THD _I - güç faktörü değişimi	69
Şekil 7.21	Harmonikli durumda kompanzasyon kondansatörü-THD _I değişimi.....	70

ÇİZELGE LİSTESİ

	Sayfa
Çizelge 1.1 Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin frekansı	2
Çizelge 4.1 IEEE'nin Gerilim İçin Belirlediği Harmonik Bozunum Sınırları	38
Çizelge 4.2 IEEE'nin Dağıtım Sistemleri İçin Belirlediği Akım Harmoniği Bozunum Sınırları	39
Çizelge 7.1. Filtresiz durum için akıma ait değerler.....	65
Çizelge 7.2. Filtresiz durum için gerilime ait değerler	65
Çizelge 7.3. Filtresiz durum için THD ve güç faktörü değerleri	66
Çizelge 7.4. Filtreli durum için akıma ait değerler.....	66
Çizelge 7.5. Filtreli durum için gerilime ait değerler	67
Çizelge 7.6. Filtreli durum için THD ve güç faktörü değerleri	67

ÖNSÖZ

Bu çalışmanın her aşamasında yardım ve desteğini esirgemedi bana vakit ayıran kıymetli hocam Prof. Dr. Celal KOCATEPE'ye ve beni bugünlere getirip, her zaman yanımda olan canım aileme teşekkürü bir borç bilirim.

ÖZET

Lineer ve nonlinear yüklerin bulunduğu elektrik güç sisteminde, nonlinear yüklerin günden güne artmasına bağlı olarak sisteme enjekte edilen harmonik akımları da artmaktadır. Harmonik akımlar, sadece yüklerin dalga şekillerinde bozucu etkilerde bulunmayıp aynı zamanda güç sisteminde ve güç sistemine bağlanan elemanlar üzerinde de olumsuz etkiler meydana getirmektedirler.

Teknik ve ekonomik bakımdan pek çok etkisi olan harmoniklerin bu etkilerinin bilinmesi ve işletmelerde analizlerinin yapılması, hem enerji kalitesi açısından hem de işletmenin sürekliliği açısından son derece önemlidir. Gerçekleştirilen çalışmada çeşitli nonlinear yüklerin bulunduğu bir sistemde, harmoniklerin etkileri belirtilip sistemde istenen harmonik akımının süzülmesini sağlayan harmonik filtresinin gerekliliği anlatılmaktadır. Harmonik filtreler her tesis için ayrı ayrı tasarım gerektirir, dolayısıyla filtrelemede dikkat edilmesi gereken hususlar incelenmektedir. Sinüs biçimli kaynaktan beslenen ve lineer elemanlardan meydana gelen enerji sistemlerinin güç kompanzasyonu basit bir inceleme ile yapılabilmektedir. Fakat besleme kaynağının sinüs biçimli olmaması veya elemanların nonlinear karakterde olması durumunda güç kompanzasyonunda bir takım zorluklar yaşanmaktadır. Bu yüzden harmonikli sistemlerde güç kompanzasyonu normal kompanzasyondan farklıdır. Yapılan çalışmada bu konuda dikkat edilmesi gereken hususlar belirtilmektedir.

Bu tez çalışmasında, öncelikle filtreleme ve güç kompanzasyonunun sinüs biçimli olmayan sistem için gerçekleştirilmesi irdelenmektedir ve buna ait bilgiler verilmektedir. Ayrıca çalışmada gerçek bir sistem üzerinde yapılan ölçümler ile bu sistemin filtrelenmesi ve güç kompanzasyonunun gerçekleştirilmesi de yer almaktadır.

Anahtar Kelimeler: Harmonikler; aktif güç filtresi; pasif güç filtresi; güç kompanzasyonu.

ABSTRACT

The harmonic currents injected to electric power system including of linear and nonlinear loads are increasing due to the increase in nonlinear loads. Harmonic currents not only cause deterioration in load wave forms but also provide negative effects on power system and equipments connected to power system.

The evaluation of the technical and economical effects of harmonics and providing analysis in plants about this issue are significantly important both for energy quality and plant durability. In this study, the effects of harmonics are evaluated and the need of a harmonic filter that provides the possibility of filtering the desired harmonic current. Harmonic filters requires different design approaches for each plant, thus the important issues in filtering are examined. The power compensation in energy systems fed by sinusoidal source and including linear loads can be realized easily. However, the power compensation in the case of non-sinusoidal source or nonlinear loads may cause some difficulties. Thus, the power compensation in harmonic condition is even more difficult than normal power compensation applications. In the realized study, the significant issues about this topic are presented.

In this thesis study, the realization of filtering and power compensation in non-sinusoidal load conditions is evaluated and some information is provided on this topic. Besides, the measurements on a real plant as well as the filtering and power compensation studies on the mentioned plant are presented.

Keywords: Harmonics; active filter; passive filter; power compensation.

1. HARMONİKLER

1.1 Giriş

Bilindiği gibi elektrik enerjisi kullanan tüm cihazlar, ekipmanlar sinüs biçimli alternatif akıma ihtiyaç duyarlar. Enerji sisteminin üretimi, iletimi ve dağıtımı aşamalarında alternatif akımın sinüs biçimli bir dalgaya sahip olması gereklidir. Sinüs biçimli bir dalga şeklinin sistemde sürekli olarak sağlanması giderek zorlaşmaktadır. Sinüs biçimli dalgadan uzaklaşılması sonucunda da buna göre imal edilmiş elemanlarda problemler yaşanmaktadır.

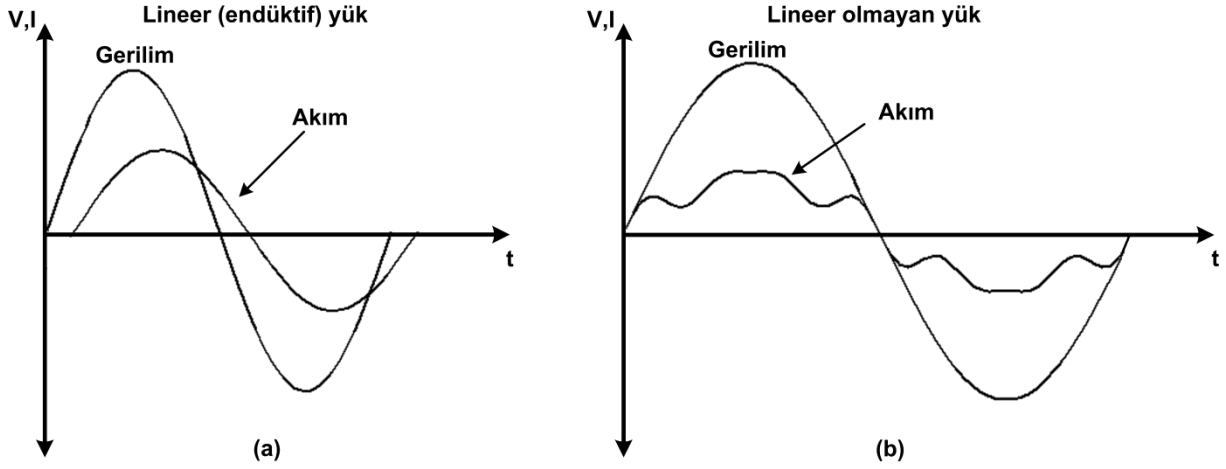
Elektrik enerjisinin yararlı kullanımı kontrol edilebilir frekans ve gerilime sahip büyüklükler ile elde edilecek güç sağlanmasına bağlıdır. Ancak üretilen ve iletilen güç daha büyük gerilimlerde bulunmaktadır. Bu uyumsuzlukların giderilmesi için güç elektroniği tabanlı bazı güç biçimlendirme ve dönüştürme şekillerine ihtiyaç duyulmaktadır. Fakat bu tür uygulamalar gerilim ve akımın dalga şekillerinin bozulmasına yol açmakta ve enerji kalitesini bozmaktadır. (Arrilaga vd., 2004)

Elektrik üretimi ülkelere göre değişkenlik göstermekle birlikte; genel itibariyle 50 ya da 60 Hz'lik frekanslarda gerçekleştirilmekte ve üretimi gerçekleştiren generatörlerin dalga biçimleri pratik olarak sinüs biçimli kabul edilmektedir. Fakat sinüs biçimli bir gerilim lineer olmayan bir cihaza ya da yüke uygulandığında, elde edilen akımın şekli tamamen sinüs biçimli olmamaktadır. Sistem empedansının mevcut olması durumunda ise bu akım sinüs biçimli olmayan bir gerilim düşümüne neden olmakta ve böylece yük uçlarında gerilim bozulmasına yol açmaktadır. Dalga şeklinin sinüs biçimli şekilden uzaklaşması sistemde harmonik bileşenlerin bulunduğunu göstermektedir. (Arrilaga vd., 2004)

1.2 Harmonik Tanımı

Elektrik enerji sistemlerinde akım, gerilim gibi elektriksel büyüklüklerin dalga şekli temel frekanslı sinüs biçimli bir değişime sahip olmalıdır. Böyle bir değişimin elde edilmesi için devredeki kaynağın ve devredeki yükün özellikleri önemli olup sistemin, sinüs biçimli kaynakla beslenmesi ve lineer yüklerle yüklenmesi gereklidir. Bir sistemdeki lineer elemanda akım, gerilimle benzerdir. Ancak güç sistemlerine bağlı olan motorlar, transformatörler, bilgisayarlar, dönüştürücüler, ark fırınları, güç elektroniği elemanları gibi lineer olmayan yükler, sistemdeki akım ve gerilim büyüklüklerinin sinüs biçimli olmamasına, yani harmonik bozunumuna neden olmaktadır. Lineer olmayan yükler akım ve gerilimin dalga şeklini

bozarlar. Lineer ve lineer olmayan yüklerin akım-gerilim dalga şekilleri Şekil 1.1’de gösterilmiştir.



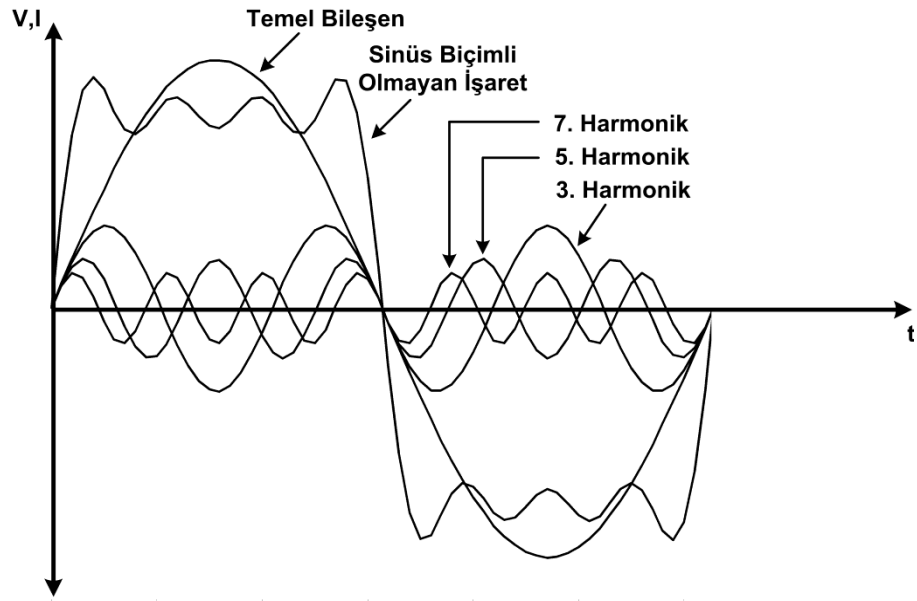
Şekil 1.1 Lineer ve lineer olmayan yüklerin akım-gerilim dalga şekilleri

Belirli bir frekanstaki tüm periyodik dalga şekilleri aynı frekanstaki katlarının sinüs dalgaları toplamına eşittir. Toplanarak periyodik dalgayı meydana getiren sinüs dalgalarının her birine “harmonik” denilmektedir. Birinci harmonik, analizi yapılan periyodik işaretle aynı frekanstadır ve “temel bileşen” olarak da adlandırılır. İkinci harmonik, temel bileşenin frekansının iki katıdır. Genel olarak ifade edilecek olursa n. harmoniğin frekansı, temel bileşenin frekansının n katıdır. Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin frekansları Çizelge 1.1’de verilmiştir. (Arrilaga vd., 2004)

Çizelge 1.1 Frekansı 50 Hz olan bir dalganın bazı harmoniklerinin frekansı

Bileşen	Frekans [Hz]
Temel/fundamental	50
2. harmonik	100
3. harmonik	150
4. harmonik	200
5. harmonik	250
6. harmonik	300

Çizelge 1.1’de frekansları verilen dalgaın harmonik değişimi şekil 1.2’de verilmiştir.



şekil 1.2 Frekansı 50 Hz olan bir dalgaın bazı harmoniklerinin değişimi

Sistemde bulunan harmonik bileşenler gç sistemini etkilemektedir. Enerji kirliliği olarak da belirtilen bu durum teknik ve ekonomik problemlere neden olmaktadır. Harmonik değerlerin artması toplam harmonik bozunum değerini arttırmakta ve sistemin istenmeyen bir şekilde çalışmasına yol açmaktadır. Harmonik bileşenler transformatörlerde ve dönen makinalarda ek kayıplara, gürültülü çalışmaya, rezonansa, g faktörü düzeltiminde problemlere ve kondansatörlerde aşırı yüklenmeye sebep olurlar.

Gerilim ve akımda meydana gelen harmonik bozunumlara lineer olmayan yükler sebep olmaktadır. Lineer olmayan yükler arasında; kesintisiz güç kaynakları (KGK), motor yol vericileri, motor sürücüleri, bilgisayarlar, elektronik aydınlatma elemanları ve kaynak makineleri bulunur. Ayrıca tüm güç elektroniği dönüştürücüleri şebekede harmonik bozunumu arttırıcı etki gösterirler.

1.3 Harmonik Büyüklüklere Ait Kavramlar

1.3.1 Sinüs Biçimli Olmayan Durumda Elektrik Büyüklükleri

Bir fazlı sistemlerde ani güç ifadesi, gerilim ve akımın ani değerlerinin çarpımına eşittir. Böyle bir sistemdeki ani güç;

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (1.1)$$

ile belirlenir.

Gerilim ve akımın ani değerleri;

$$v = \sqrt{2}V \sin(\omega t) \quad (1.2)$$

$$i = \sqrt{2}I \sin(\omega t - \varphi) \quad (1.3)$$

olarak alınırsa, ani güç ifadesi;

$$p = 2VI \sin(\omega t) \sin(\omega t - \varphi) = VI \cos \varphi - VI \cos(2\omega t - \varphi) = P - P \cos(2\omega t) - Q \sin(2\omega t) \quad (1.4)$$

olur. Aktif güç;

$$P = VI \cos \varphi \quad (1.5)$$

Reaktif güç;

$$Q = VI \sin \varphi \quad (1.6)$$

olarak tanımlanır.

Gerilimin harmonik bileşeni olması durumunda;

$$v(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sqrt{2}V_m \cos(m\omega t + \alpha_m) \quad (1.7)$$

şeklinde olduğu ve akımın da harmonik bileşeni olması durumunda;

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2}I_n \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (1.8)$$

ile ifade edilmesi halinde ani güç;

$$p(t) = \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{n=1}^{\infty} 2V_m I_n \cos(m\omega t + \alpha_m) \cos(n\omega t + \theta_n) \quad (1.9)$$

biçiminde yazılır.

Bu eşitlik düzenlendiğinde;

$$\begin{aligned}
p(t) = & \sum_{m=1}^{\infty} V_m I_m \cos \theta_m (1 + \cos(2m\omega t + 2\alpha_m)) - V_m I_m \sin \theta_m \sin(2m\omega t + 2\alpha_m) + \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ m \neq n}}^{\infty} V_m I_n \cos \theta_n \\
& \{ \cos((m-n)\omega t + (\alpha_m - \alpha_n)) + \cos((m+n)\omega t + (\alpha_m + \alpha_n)) \} - \sum_{m=1}^{\infty} \sum_{\substack{n=1 \\ m \neq n}}^{\infty} V_m I_n \sin \theta_n \{ \sin((m+n)\omega t + \\
& (\alpha_m + \alpha_n)) - \sin((m-n)\omega t + (\alpha_m - \alpha_n)) \}
\end{aligned} \tag{1.10}$$

elde edilir. Bu eşitliklerden de görüldüğü gibi gerilim ve akımın harmonik içermesi durumunda ani güçte dört bileşen ortaya çıkmaktadır.

Bileşenlerden biri doğru bileşen olup, diğerleri şebeke frekansının iki katı frekansta salınan bileşenlerden oluşmaktadır. Ani güç ifadesinin ortalama değeri alınır;

$$P = \sum_{m=1}^{\infty} V_m I_m \cos \theta_m \tag{1.11}$$

elde edilir. Ani gücün ortalaması sonucunda elde edilen değer ile her bir harmoniğin ortalama güçlerinin toplamı aynıdır. Dolayısıyla harmonikler ortalama (aktif) gücün hesabına etki etmemektedir. (Kocatepe vd, 2003)

1.3.2 Toplam Harmonik Bozunumu (THD)

Harmonik bileşen içeren dalga şekilleri ile ilgili en temel harmonik indisi, temel bileşenin bir oranı olarak ifade edilen harmonik bileşenlerinin karelerinin toplamının karekökü (rms) ile belirtilen toplam harmonik bozunumu (THD) kavramıdır. Gerilim ve akım için sırasıyla;

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{m=2}^M V_m^2}}{V_1} \quad \text{ve} \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^N I_n^2}}{I_1} \tag{1.12}$$

ifadelerinden yararlanılarak elde edilir. Burada;

V_m : m'inci gerilim harmoniğinin efektif gerilim değerini

M : Dikkate alınan en büyük gerilim harmonik derecesini

V_1 : Temel frekanstaki efektif faz-nötr gerilimini

I_n : n'inci harmoniğin efektif akım değerini

N : Dikkate alınan en büyük akım harmonik derecesini

I_1 : Temel frekanstaki efektif faz akımını

belirtmektedir.

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 sinüs biçimli bir dalga için THD sıfırdır.

Uygulamaların pek çoğunda harmonik dereceleri 2. harmonikten 25. harmoniğe kadar dikkate alınmaktadır. Fakat pek çok standartta 40. harmoniğe kadar hesaba katılmaktadır.

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

$$HD_V = \frac{V_m}{V_1} \quad (1.13)$$

$$HD_I = \frac{I_n}{I_1} \quad (1.14)$$

olarak tanımlanır. (Arrilaga vd., 2004)

1.3.3 Toplam Talep Bozunumu (TTD)

Akım bozunum seviyeleri de bir THD değeri ile gösterilebilir, fakat bu durum temel yük akımı düşük olduğunda yanıltıcı olabilir. Giriş akımındaki yüksek bir THD değeri, yük akımı düşük olduğunda aynı oranda bir olumsuzluk oluşturmayabilir. Bu yanlış değerlendirme riskini ortadan kaldırmak için toplam talep bozunumu (total demand distortion - TTD) kavramı ortaya çıkartılmıştır:

$$TTD = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_L} \quad (1.15)$$

Burada;

I_L : Yük tarafından, besleme sisteminin ortak bağlantı noktasından temel frekans bileşeni için çekilen maksimum akım değeridir.

Bu ifade gerilimdeki THD ifadesine benzemektedir. Ancak TTD ifadesinde bozunum temel

akımın değil nominal veya azami yük akımının genliğinin bir oranı olarak gösterilmektedir. Elektrik güç sistemleri nominal veya azami yük akımına dayanacak şekilde tasarlandıklarından dolayı, akım bozunumunun bu tasarım değerlerine göre belirlenmesi daha gerçekçi bir analiz elde edilmesini sağlamaktadır. (Arrilaga vd., 2004)

1.3.4 Şekil Faktörü

Sinüs biçimli olmayan bir dalga için bozulma ölçütünü verecek olan şekil faktörü;

$$k_f = \text{Efektif Değer} / \text{Ortalama Değer} \quad (1.16)$$

olarak tanımlanır.

1.3.5 Tepe Faktörü

Harmonik bileşenlerin en basit biçimde anlaşılmasını sağlayan bu faktör, sinüs biçimli olmayan akım veya gerilimin tepe değeri ile temel bileşenin efektif değerinin birbirine oranı olarak tanımlanır.

$$\text{Tepe Faktörü} = \text{Tepe Değer} / \text{Temel Bileşenin Efektif Değeri} \quad (1.17)$$

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

1.3.6 Telefon Etkileşim Faktörü (TEF)

Bu faktör, harmonik bileşenlere sahip akım ve gerilimlerden kaynaklanan telefon gürültü değerinin belirlenmesine yarayan bir büyüklüktür. TEF değeri, telefon sisteminin ve insan kulağının değişik frekanslardaki gürültüye olan duyarlılığına dayalı olarak ayarlanır. Bu büyüklük gerilim için;

$$TEF_V = \frac{\sqrt{\sum_{m=1}^{\infty} (\omega_m V_m)^2}}{V_{ef}} \quad (1.18)$$

ve akım için

$$TEF_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} (\omega_n I_n)^2}}{I_{ef}} \quad (1.19)$$

şeklinde bulunur.

Burada ω_n / ω_m ; m ve n'inci mertebeden harmonik frekansı için iştisel ve endüktif kuplaj etkisini, yapılan hesaba katan bir katsayıdır. (Kocatepe vd, 2003)

1.3.7 Transformatör K-Faktörü

Transformatörlerin sekonderlerinde lineer olmayan yüklerin bulunması halinde transformatör üzerinden sinüs biçimli olmayan akımlar akar. Bu durumda sinüs biçimli işaret için verilen çalışma değerleri mümkün olmaz. “Transformatör K-faktörü”, standart transformatörlerin harmonik akımlarına bağlı olarak nominal gerilim ve akım değerlerinde meydana gelen düşüşlerin belirlenmesinde kullanılan bir büyüklüktür.

Lineer olmayan yükleri besleyen bir transformatör için K-Faktörü;

$$K = \sum_{n=1}^{\infty} (n \cdot \frac{I_n}{I_1})^2 \quad (1.20)$$

olarak tanımlanır. Transformatörün efektif akımına göre normlaştırıldığında, K-Faktörü;

$$K = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n \cdot I_n)^2}{\sum_{n=1}^{\infty} I_n^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n \cdot I_n)^2}{I^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n \cdot \frac{I_n}{I_1})^2}{(I/I_1)^2} = \frac{\sum_{n=1}^{\infty} (n \cdot \frac{I_n}{I_1})^2}{1 + THD_I^2} \quad (1.21)$$

şeklini alır. Burada,

I : Efektif akımı

I_n : n. harmonik bileşen akımını belirtmektedir. (Kocatepe vd, 2003)

1.3.8 Bozunum Güç Faktörü

Toplam güç faktörü, gerilim ve akımın toplam harmonik bozunumu değerleriyle;

$$pf_{toplam} = \frac{P}{V_1 I_1 \sqrt{1 + (\frac{THD_V}{100})^2} \sqrt{1 + (\frac{THD_I}{100})^2}} \quad (1.22)$$

olarak ifade edilir. Bu eşitlik aynı zamanda;

$$pf_{toplam} = \cos(\theta_1 - \delta_1) pf_{dist} \quad (1.23)$$

ifadesi ile de verilebilir. Burada;

$(\cos(\theta_1 - \delta_1))$: Kayma güç faktörü

(pf_{dist}) : Distorsiyon güç faktörü olarak ifade edilmiştir.

Kayma güç faktörü 1'den büyük olamaz. Bu sebeple;

$$pf_{toplama} \leq pf_{dist} \quad (1.24)$$

olacaktır. (Kocatepe vd, 2003)

1.4 Harmoniklerin Matematiksel Analizi

1.4.1 Fourier Analizi

Lineer olmayan elemanların bağlantı noktalarındaki akım ve gerilim dalga şekilleri uygun çeviricilerle elde edilebilir ya da cihazların lineer olmayan karakteristikleri üzerine mevcut bilgi kullanılarak verilen bir işletim durumu için hesaplanabilir. 1822'de J. B. J. Fourier bir T aralığında tekrar eden herhangi bir sürekli fonksiyonun bir DC bileşen, sinüs biçimli bir temel bileşen ve temel frekansın tam katları olan yüksek dereceli bileşenler (harmonikler) ile temsil edilebileceğini öne sürmüştür. Bu şekilde elde edilen seriye "Fourier serisi", bu seri elemanlarına da "Fourier bileşenleri" adı verilir. (Arrilaga vd., 2004)

Fourier serileri, verilen fonksiyonu sinüs biçimli hale getirir. Fourier serisinin elde edilme işlemi dalga analizi veya harmonik analizi olarak da tanımlanır. Periyodik fonksiyonlar Fourier serisine açıldıklarında birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının sinüs ve cosinüslerinde oluşan bir seri halinde yazılabilir. (Arrilaga vd., 2004)

Bu tanımdan hareketle T periyot boyunca sinüsten farklı bir biçimde değişen $f(t)$ dalgası Fourier'e göre;

$$f(t) = A_0 + A_1 \cos t + A_2 \cos 2t + A_3 \cos 3t + \dots + A_n \cos nt + B_1 \sin t + B_2 \sin 2t + B_3 \sin 3t + \dots + B_n \sin nt \quad (1.25)$$

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \cos nt + B_n \sin nt) \quad (1.26)$$

veya

$$f(t) = C_0 + C_1 \sin(\omega t + \varphi_1) + C_2 \sin(2\omega t + \varphi_2) + C_3 \sin(3\omega t + \varphi_3) + \dots + C_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1.27)$$

$$f(t) = C_0 + \sum_{n=1}^{\infty} C_n \sin(n\omega t + \varphi_n) \quad (1.28)$$

şeklinde yazılabilir.

Bu denklemlerde;

t : Bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde $t = \omega t$ olmaktadır.)

A_0 : “0” indisi ile gösterilen sabit terim

“1” indisi ile gösterilen birinci terime, “temel bileşen” adı verilir.

Temel bileşen aynı zamanda tam sinüs biçimli dalgaya karşılık düşen dalgayı belirler. 2, 3, 4, ..., n indisi ile gösterilen bileşenlere ise “harmonik” adı verilmektedir. (Kocatepe, 1994)

1.4.1.1 Fourier Katsayılarının Analitik Yöntemle Bulunması

Fourier katsayıları (A_0, A_n, B_n) analitik yöntemle aşağıdaki formüllerle bulunabilir;

$$A_0 = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) dt \quad (1.29)$$

$$A_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \cos n\omega t dt \quad (1.30)$$

$$B_n = \frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} f(t) \sin n\omega t dt \quad (1.31)$$

Periyodik fonksiyonun değişimini gösteren eğrinin şekline göre açılımda bazı harmonikler bulunmayabileceği gibi bazen de yalnız cosinüslü veya sinüslü terimlerin bir kısmı bulunabilir. Bu nedenle açılımda bir takım kısaltmalar yapılabileceğini önceden kestirmek mümkündür.

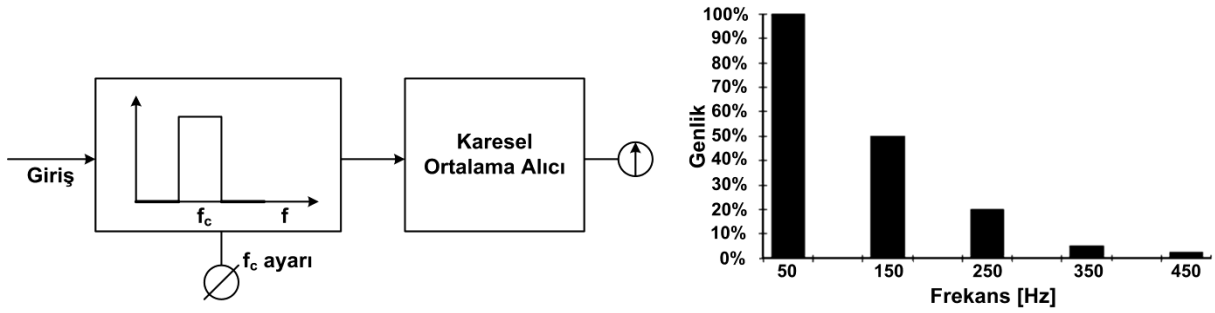
Fourier analizi günümüzde harmonik analizi açısından hala en çok kullanılan sinyal işleme yöntemidir. Daha etkin ve hızlı bir bilgisayar hesaplaması sağlamak için bu yaklaşımın kullanımı “Hızlı-Fourier” adı altında birçok algoritmanın geliştirilmesi ile zenginleştirilmiştir. Durağan olmayan sinyallerin ve iç-harmoniklerin analizinde gerekli olan efektif pencerelerin geliştirilmesi, Fourier yaklaşımına getirilen önemli bir eklemedir.

Bilgisayar sistemlerindeki gelişme ile birlikte güç sistemlerindeki sinyallerin işlenmesinde yapay sinir ağları ve bulanık mantık gibi bilgisayar tabanlı sezgisel yöntemlerin kullanımı da artmıştır.

1.4.1.2 Fourier Katsayılarının Ölçme Yöntemi İle Bulunması

Elektrik devrelerinde $f(t)$ fonksiyonu bir devrenin herhangi bir yerindeki gerilim değişimi olabilir. Zamana göre periyodik olarak değişen böyle bir gerilimde harmoniklerin ölçülmesi için çok çeşitli ölçme düzenekleri geliştirilmiştir.

Bu ölçme düzeneklerinin çoğunun kullandığı yol, çok dar bantlı ve orta frekansı değiştirilebilen bir filtre ile harmoniklerin süzülüp, voltmetre ile ölçülmesi temeline dayanır. Böyle bir düzenin basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 1.3.'te gösterilmiştir.



Şekil 1.3 Filtre tipi analog harmonik genlik analizörü

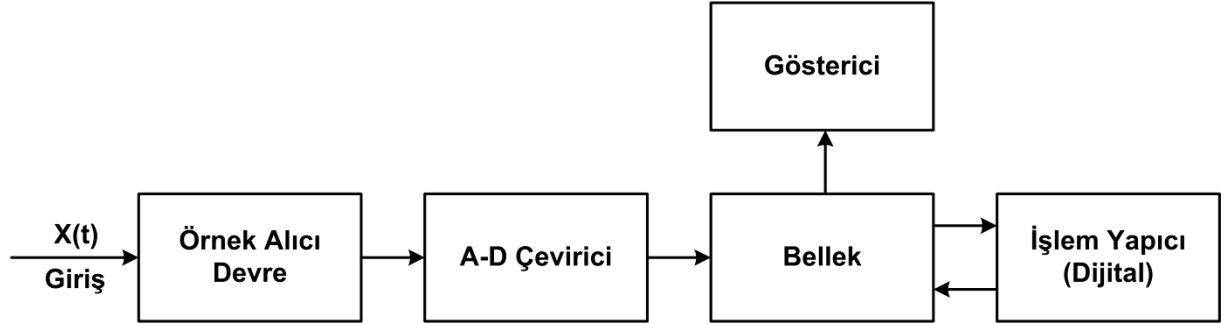
Bu tür düzenler “harmonik genlik analizörü” ya da “dalga analizörü” olarak isimlendirilir. Bunlara harmonik genlik analizörü demek daha doğrudur. Çünkü bu tür analizörlerle harmoniklerin faz açıları ile ilgili hiçbir bilgi elde edilememektedir.

Harmoniklerin ölçülmesi için kullanılan ölçme düzenlerinin bir diğeri de dijital harmonik analizörleridir. Bir dijital harmonik analizörünün basitleştirilmiş blok diyagramı Şekil 1.4'te verilmiştir. Bu analizörün belirgin bir üstünlüğü, incelenecek işaretin sadece bir periyodunun ele alınmasının yeterli oluşudur.

Yöntemin başarılı olabilmesi için işaret/gürültü oranının çok büyük olması gerekir. Başka bir deyişle bir periyotta alınan örneklerin diğer periyotlardakilerle aynı olup olmadığı ya da örnek alma sırasında geçici bir bozulma olup olmadığı problemi vardır. Bu problemi gidermek için sadece bir periyot değil de birkaç periyot incelenerek ortalama alınır. Bunun sonucu olarak da sistemde yazma ve tekrarlama için ayrı bir bölüm gerekliliği ortaya çıkar.

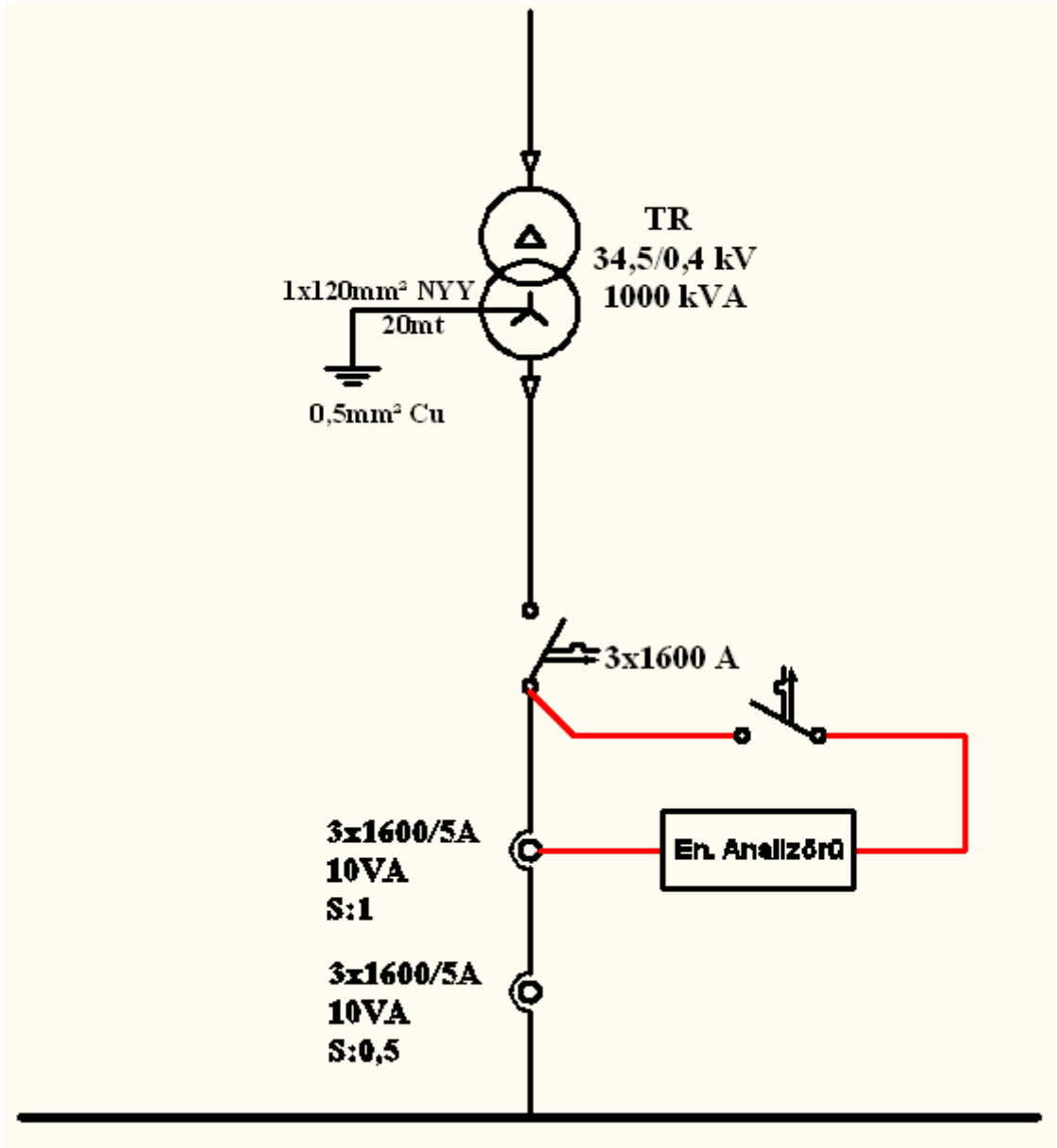
Görülüyor ki örnek alma ve dijital hesaplama ile harmonikler faz açılarıyla birlikte

ölçülebilmektedir. Üstelik hassasiyet de arttırılmış olur. Harmonikleri faz açıları ile birlikte ölçebilecek analog türde ölçü düzenleri henüz pek geliştirilememiştir. Bunun nedeni, elektroniğin pek çok dalında olduğu gibi harmonik analizinin en çok uygulandığı yerlerde bile harmoniklerin faz açılarının bulunmasına çok fazla ihtiyaç duyulmayışdır.



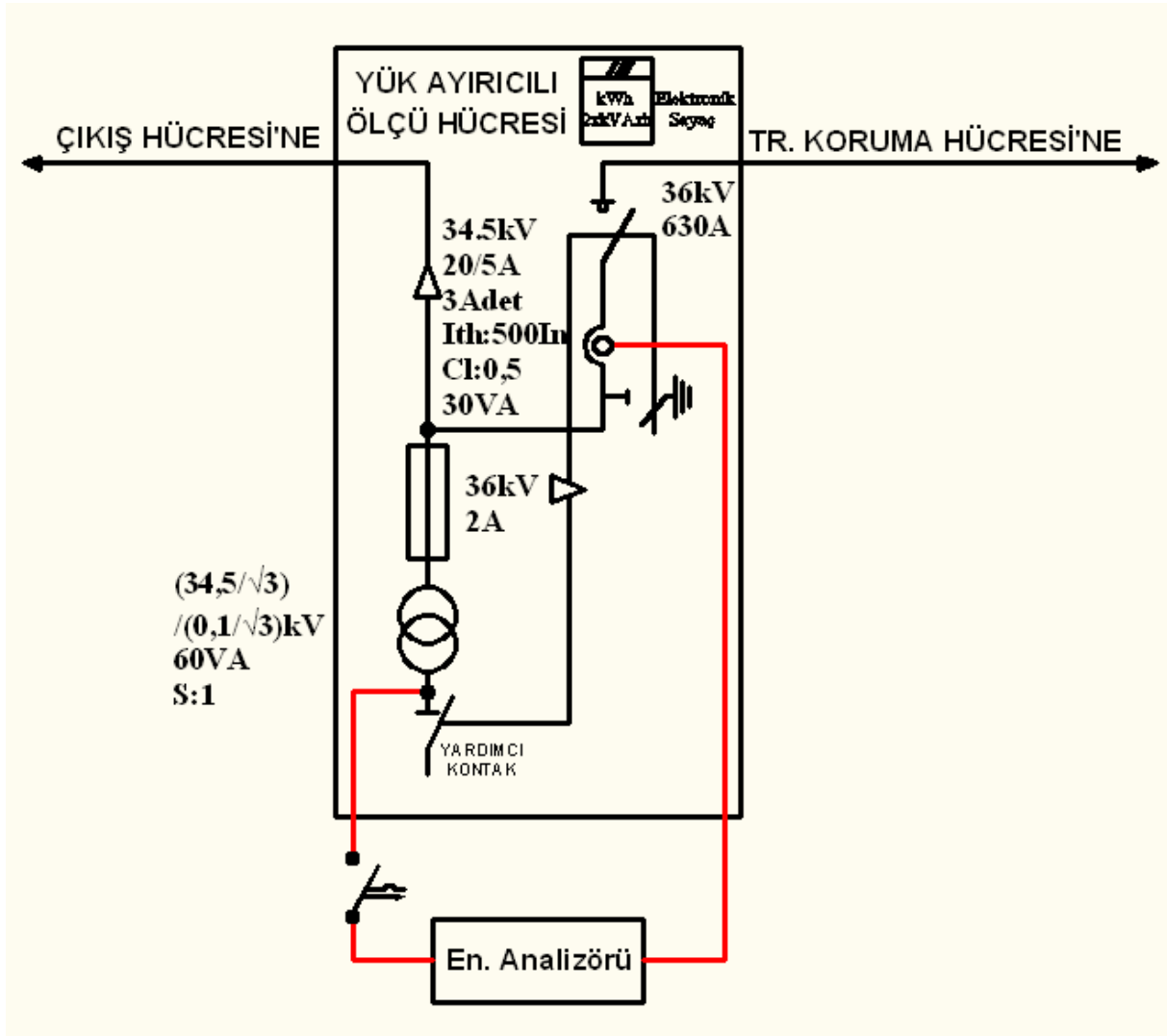
Şekil 1.4 Dijital harmonik analizörü

Harmonik ölçümü, enerji analizörü olarak adlandırılan ölçü cihazları ile yapılmaktadır. Bir fazlı ve üç fazlı olarak imal edilen bu cihazlarla hem alçak gerilimde hem de yüksek gerilimde ölçüm yapmak mümkündür. Alçak gerilim tesisinde ölçüme ait bağlantı şeması Şekil 1.5’de verilmiştir. Şekilde de görüldüğü gibi enerji analizörüne gerilim ve akım değerleri girmektedir. Gerilim ucu direkt bağlanırken, akım bilgisi akım transformatörü üzerinden sağlanmaktadır.



Şekil 1.5 Bir tesiste harmonik ölçümünün A.G. tarafından yapılması

Yüksek gerilimdeki ölçümlere ait bağlantı şeması Şekil 1.6'da verilmiştir. Yüksek gerilim ölçü hücresinde yapılan bu ölçümde gerilim ve akım değerleri ölçü transformatörleri üzerinden elde edilmektedir.



Şekil 1.6 Bir tesiste harmonik ölçümünün O.G. tarafından yapılması

2. HARMONİK KAYNAĞI OLAN ELEMANLAR

2.1 Giriş

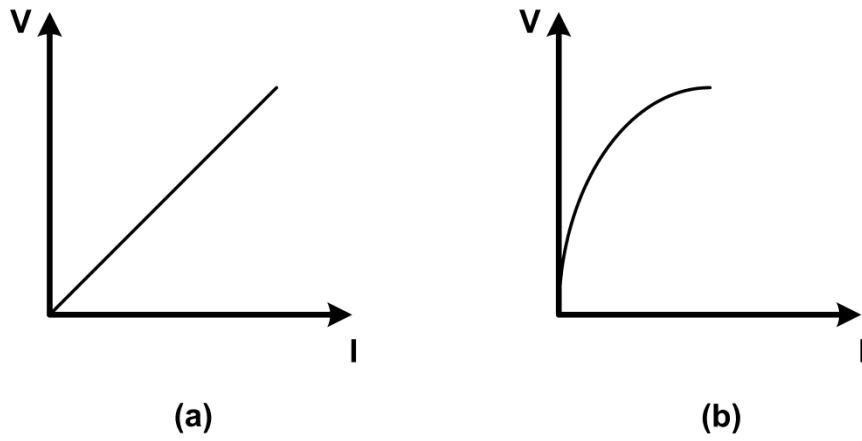
Günümüzde giderek yaygınlaşan harmonik bozunumu, sisteme bağlanan elemanlar ve yüklerden kaynaklanmaktadır. Harmonik üreten elemanların artışı hem harmonik bozunumu hem de harmoniklerin etkilerini artırmaktadır. Harmonik bileşenlere kaynaklık yapan elemanlar genel olarak uç karakteristiği doğrusal olmayan elemanlardır.

Uç karakteristiği, başka bir deyişle akım-gerilim arasındaki ilişkisi doğrusal olan elemana “doğrusal-lineer eleman” denir. Şekil 2.1(a)’da böyle elemanların uç karakteristiği verilmiştir. Bunlara örnek olarak direnç, reosta gösterilebilir. Halbuki uygulamada karşılaşılan pek çok yük uç karakteristiği doğrusal olmayan yük veya elemanlardan oluşmaktadır ve bunlar da “lineer olmayan yük veya eleman” olarak adlandırılırlar. Şekil 2.1(b)’de doğrusal olmayan eleman uç karakteristikleri verilmiştir. Harmonikleri meydana getiren doğrusal olmayan elemanlara örnek olarak şunlar verilebilir; (Kocatepe vd.,2003)

- Transformatörler
- Motorlar ve generatörler
- KGK’ları
- TV, bilgisayarlar
- AC’yi DC’ye, DC’yi AC’ye çeviren elemanlar
- Diyot, transistör, tristör v.b içeren elemanlar
- Elektrikli trenler
- Ark ocakları
- Kaynak makineleri
- Senkron makinaların uyarımında kullanılan diyot ve tristörlü dönüştürücüler
- Demir çekirdeği bulunan bobinler
- Var kompanzatörleri
- Kontrollü güç kaynakları (yarı iletken)

- Motor hız ayarı yapan devreler
- Işık şiddetinin ayarını yapan elemanlar
- Balastlar (bobinli ve elektronik)
- Frekans dönüştürmeye yarayan elemanlar
- Deşarj ile aydınlatan aydınlatma elemanları
- Doğru akım ile enerji iletim sistemleri
- Güneş enerjisinden elektrik üreten sistemler

şeklinde genel olarak listelenebilir.



Şekil 2.1 (a) Lineer elemanın uç karakteristiği, (b) Lineer olmayan elemanın uç karakteristiği

Lineer olmayan yükler, harmonik akımlarına neden olmalarının yanı sıra bağlı oldukları şebeke sistemi empedansı ile birlikte harmonik gerilimlerine de neden olurlar. Enerji sisteminde harmoniklerin etkinliğinin belirlenmesi ve olumsuzluklarının giderilmesi için tüm harmonik üreten elemanların harmonik kaynağı olarak ayrı ayrı incelenmesi gerekmektedir. (Kocatepe vd.,2003)

Uç karakteristiği doğrusal olmayan elemanlar, bu özelliklerini elektrik veya magnetik davranışlarından almaktadır. Herhangi bir elektrik devresindeki doğrusal olmayan özellik çeşitli elemanlarda görülebilir. Örneğin direnç, endüktans ve kapasite elemanı doğrusal olmayabilir. Magnetik olarak doğrusal olmayan elemanlar ise magnetik doyuma giren elemanlardır. Bunlardaki akım artışı aynı oranda magnetik akı artışı meydana getirememektedir ve doğrusallık bozulmaktadır. Bunlara örnek olarak transformatörler, motorlar ve bobinler verilebilir.

Bir güç sisteminin harmonik bileşenlerinin ortaya konması ve harmonik simülasyonunun gerçekleştirilmesi bakımından sistemdeki harmonik kaynakları üç gruba ayrılabilir. Bu gruplar şunlardır; (Kocatepe vd.,2003)

- 1) Çok sayıdaki küçük güçlü lineer olmayan elemanların sistem içerisine dağılmış olması.

Bu gruptaki harmonik kaynaklarının gücü düşüktür, ancak sistemde çok sayıda kullanılan elemanlardır. Bunlara örnek olarak; alçak gerilim cihazının (TV, bilgisayar vb.) besleme kaynağı durumundaki bir fazlı köprü diyotlu doğrultucuları verilebilir. Gaz deşarjı prensibine göre çalışan lambalar da bir fazlı alçak gerilim ile çalışmaları ve düşük güçlü olmaları sebebiyle bu gruba girerler. Tek tek ele alındığı zaman her birinin gücünün düşük olmasına rağmen bu tip elemanların bir fazlı olması ve sayı olarak fazla olmaları göz önüne alındığında tümünün harmonik etkisi önemli olabilmekte ve harmonik bozunumunun artmasına neden olmaktadır.

- 2) Karakteristiği sürekli ve rastgele değişen büyük güçlü lineer olmayan yükler.

Bu gruptaki harmonik kaynakları büyük güçlere sahiptir. Yüksek gerilimli iletim şebekesine doğrudan bağlanan ve MW değerlerinde güç çeken ark fırınları buna örnek gösterilebilir. Bu fırınların empedansı, fırındaki malzemenin değişken yapıda olması nedeniyle dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum, sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olmakta ve modellemenin zorluğu nedeniyle simülasyonu güçleştirmektedir.

- 3) Büyük güçlü statik konverterler ve iletim sistemlerindeki güç elektroniği elemanlarının olması.

Bu grupta büyük güçlü doğrultucular ve güç elektroniği sistemleri yer almaktadır. Bu sistemlerin kontrolünün çok karmaşık olması ve güçlerinin büyük olması nedeniyle modellenmesini ve buna bağlı analizleri zorlaştırmaktadır.

2.2 Harmonik Üreten Elemanlar

2.2.1 Doğrultucular

Enerji sistemlerindeki başlıca harmonik kaynaklarından biri de, üç ve tek fazlı hat komütasyonlu doğrultuculardır. Üç fazlı doğrultucular, doğrultucu transformatörünün primer tarafından, şebekeden çekilen alternatif akımın dalga şeklinin içerdiği darbe sayısı ile tanınır.

Genel olarak doğrultucuların ürettikleri harmonik bileşenler $n=k.p \pm 1$ ile ifade edilir. Burada $k=1,2,3,\dots$ değerlerinde olup tam sayıları, $p=6,12,\dots$ olmak üzere darbe sayılarını belirtmektedir. Darbe sayısı arttıkça düşük harmonik bileşenlerin ortaya çıkması önlenmektedir. (Kocatepe vd., 2003)

2.2.2 Transformatörler

Elektrik güç sistemlerinde transformatörler gibi demir çekirdek üzerine yerleştirilmiş bobinlerden meydana gelen elemanlar, doyma özelliğine sahip demir çekirdeğin mıknatıslanma karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonik üretirler. (Paice, 1996)

Transformatör çekirdeğinin mıknatıslanma karakteristiği belli bir bölgeden sonra lineer özelliğe sahip olmadığından, uygulanan sinüs biçimli gerilim sonucu sinüs biçimli akım ve akı oluşmamaktadır. $V(t) = V_m \sin \omega t$ biçiminde sinüs biçimli şebeke geriliminin uygulanması halinde $\Phi = \Phi_m \cos \omega t$ şeklinde yine sinüs biçimli bir akı üretilecektir. Transformatörlerin nominal değerlerinin dışında çalışması, nüvenin daha çok doymasına ve harmonik akımları seviyesinin hızla artmasına neden olabilmektedir. (Dugan vd., 2002)

Harmonik akımlarının şebekeye geçip geçmemesi şu koşullara bağlıdır:

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

2.2.3 Generatörler

En doğal harmonik üreticileri generatörlerdir. Senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, magnetik direncin oluklara bağlı olmasından, ana devrenin doyuma ulaşması ve kaçak akımlar ile sık aralıklarla ve simetrik olmayan boşluklarla yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır. Dönen makinalar, makine hızının ve endüvi oluk sayısının fonksiyonu olan harmonikleri üretir. Bunu önlemek için oluk şekli, sargı yapısı, uyarma sargısı ve kutuplar gibi kısımlarda uygun yapısal tedbirler alınarak ve generatörü amortisman sargısı ile donatarak gerilim eğrisinin sinüs biçimli olması sağlanır. Senkron generatörlerin oluşturduğu harmonikler, generatör gücü 1000kVA'dan büyük olmadığı sürece dikkate alınmazlar. (Kocatepe vd., 2003)

Generatör bağlantı şekilleri de harmonik frekansında belirleyici özellik taşırlar. (Kocatepe vd., 2003)

- 1- Eğer statorun sargısı yıldız bağlanmışsa, 3 ve 3'ün katı frekanslı harmonikler sadece faz gerilimlerinde bulunup, faz arası gerilimlerinde ise bulunmazlar.
- 2- Eğer yıldız bağlı generatöre üç fazlı dengeli bir tüketici bağlanırsa ve yıldız noktası generatörün yıldız noktasına bağlanmazsa, 3 ve 3 ün katı harmonikli akımlar geçmezler. Yıldız noktası nötre bağlı bir yükte ise, faz iletkenlerinden 3 ve 3 ün katı frekanslı I akımı, nötr üzerinden de bunların toplamı olan $3.I$ değerinde bir akım geçer. Bu akımlar, aynı şekilde 3 ve 3 ün katlarına eşit frekanslı bir gerilim düşümü meydana getirirler.
- 3- Eğer generatör sargıları üçgen bağlı ise, bu sargılarda 3 ün katları frekanslı bir sirkülasyon akımı geçer. Bu akım, yüke bağlı olmayıp sargılarda büyük kayıplara neden olur.

Bu sebeplerden dolayı, generatör sargılarının yıldız bağlanması ve yıldız noktasının yalıtılması tercih edilir, generatörün dört iletkenli bir şebekeyi beslemesi gerekiyorsa, zigzag bağlı bir bobinde oluşturulan suni yıldız noktasına bağlanır. Generatörlerin sebep olduğu 3 ve 3'ün katları harmonik akımları, generatör veya blok transformatörün birinde üçgen bağlama kullanılmak suretiyle engellenir. Kutuplar ve endüvi olukları uygun tasarlanarak 5. ve 7. harmonik gerilimlerini sınırlamak mümkündür. Burada dikkate değer en düşük harmonik 11. harmoniktir. (Kocatepe vd., 2003)

2.2.4 Ark Fırınları

Ark fırınları geniş harmonik spektrumları ile enerji sistemine bağlanan büyük güçlü harmonik kaynaklarından biridir. Bunlar, yüksek gerilim iletim şebekesine doğrudan bağlanan, anma gücü MW mertebesinde olan fırınlardır. Ark fırınları, elektrik arkının akım-gerilim karakteristiğinin lineer olmaması nedeniyle harmonik üretirler. Ark olayının başlamasının ardından ark gerilimi azalırken, sadece güç sistemi eşdeğer empedansı ile sınırlandırılan ark akımı artar. Bu anda ark olayında negatif direnç etkisi görülür. Ark fırınlarının empedansı dengesiz olup, zamana göre rastgele değişim gösterir. Bu durum sisteme enjekte edilen harmonik akımlarının da rastgele değişimine sebep olduğu için ark fırınının modellenmesi oldukça güçtür. Ayrıca ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne ve çalışma safhasına bağlı olarak değişkenlik gösterir. Buna ait değişimler osilogram ile kaydedildikten sonra harmonik analizörleri yardımıyla harmonik spektrumu elde edilebilir. (Bayram, 1991)

Zaman zaman ark tutuşması veya sönmesi de harmonik akımların oluşmasına yol açmaktadır.

Harmonikler en üst düzeye, ergitme safhasında ulaşırlar. Arıtma safhasında ise tamamen erimiş, metal karşısında her yarım dalgada tutuşan ark her seferinde bir öncekine benzer bir durum gösterir. Bu nedenle, akım harmonikleri daha düşük düzeyde ve istikrarlıdır. Ark olayında akım ile gerilim, ark ocağının gücüne, çalışma safhasına, ocaktaki malzemeye ve elektrot mesafesine bağlı olarak değişir. Bu konuda yapılan deneysel çalışmalardan çeşitli değerler elde edilmiştir. Örneğin, tipik bir ark fırının da 2,3,.....9 mertebesinde akım harmonikleri bulunmuş ve maksimum harmonik bileşeninin temel bileşeninin %30'u kadar olduğu tespit edilmiştir. Ayrıca 2,3,4 ve 5 mertebesindeki akım harmoniklerinin temel bileşen akımının yaklaşık %2'si ile %4'ü arasında ve 6,7,.....10 mertebesindeki akım harmoniklerinin ise temel bileşen akımının yaklaşık %0.4'ü ile %1.3'ü arasında dağılım gösterdiği de tespit edilmiştir. (Kocatepe vd., 2003)

2.2.5 Gaz Deşarj Prensibi İle Çalışan Aydınlatma Armatürleri

Bir tüp içerisindeki gazın deşarjı prensibine dayanarak geliştirilen aydınlatma armatürleri (civa buharlı lambalar, flüoresan lambalar, sodyum buharlı lambalar vb.) lineer olmayan akım-gerilim karakteristiğine sahip olduğu için harmonik üretirler. Bu tip lambalar iletim esnasında negatif direnç karakteristiği gösterirler. Bina ve çevre aydınlatmasında yaygın olarak kullanılan flüoresan lambalarda tek harmoniklerin seviyesi sistemi önemli oranda etkiler. Özellikle 3. harmonik ve 3'ün katları olan harmonik akım bileşenleri, üç fazlı dört iletkenli aydınlatma devrelerinde nötr iletkeninden geçtiği için nötr iletkenin ısınmasına sebep olurlar. (Ertan, 1994)

Ayrıca flüoresan lambalara bağlanan balastların da bir magnetik devresi olduğu için bu yardımcı elemanlar da harmonik üretirler. Son yıllarda magnetik balastların yerine kullanılmak üzere geliştirilen ve anahtarlama güç kaynağı prensibi ile çalışan elektronik balastlar da harmonik üretmekle beraber, balast içerisine monte edilen filtre yardımıyla elektronik balastın ürettiği harmonik bileşenlerin giderilmesi mümkündür.

2.2.6 Statik Var Kompansatörler

Hızlı değişen yük nedeniyle güç sistemlerinde yarı iletkenlerden yararlanılır. Tristör kontrollü reaktör (TKR) içeren bu sistemler güç kompanzasyonu için olumlu sonuçlar verirler. TKR içeren statik VAR kompanzatörleri, içerdikleri doğrusal olmayan elemanlar sebebiyle lineer olmayan uç karakteristiğine sahiptirler. Bu karakteristikleri nedeniyle harmoniklerin meydana gelmesine neden olurlar. Böyle bir sistemin davranışı harmonik bileşenler göz önüne alınarak

analiz edilmelidir.

Dengeli yüklenme koşulu altında TKR, tek dereceli harmonikleri üretir. Eğer TKR’de üçgen bağlantı yapılırsa 3. harmonik ile 3’ün katları olan harmonikler şebekeye verilmez ve bağlantı içinde elimine edilir.

Sinüs biçimli olmayan büyüklüklerin içerdikleri harmonik bileşenlerden herhangi biri sistemi rezonansa sokabilir ve durumda karakterize edilemeyen harmonik bileşenler meydana gelebilir. Bu durumda, TKR içeren devrelerin rezonans sonucu etkin harmonik üretimine ve süresizliğe sebep olacak çalışma noktalarında işletilmemesine çok dikkat edilmesi gerekir. (Kocatepe vd., 2003)

2.2.7 Fotovoltaik Sistemler

Fotovoltaik sistemler, harmonik üretme bakımından genel olarak konverterlerden kaynaklanan harmoniklere sahiptirler. Konverterler bilindiği gibi harmonik bakımından etkin elemanlardır. Bu sistemler elektrik enerjisini fotovoltaik yoldan elde eden sistemler olup, ürettikleri doğru akımı alternatif akıma dönüştürmek için yarı iletken elemanları kullanırlar. Dolayısıyla bu dönüştürme esnasında yarı iletken elemanlar, harmonikler meydana getirmektedir. (Kocatepe vd., 2003)

2.2.8 Bilgisayarlar

Hassas yüklerden birisi olan bilgisayar sistemleri, yalnızca bozucu etkilerden etkilenmekle kalmayıp aynı zamanda birer harmonik kaynağıdır. Bilgisayarların lineer olmayan yük karakteristikleri, güç sistemlerinde anormal gerilim düşümleri, nötr iletkenlerinin aşırı yüklenmesi ve hat gerilim bozunumları gibi negatif sonuçlar meydana getirmektedir. (Kocatepe vd., 2003)

2.2.9 Elektronik Balastlar

Flüoresan lambalar en önemli ışık kaynağı olarak kullanılmaktadır. Deşarj prensibine göre çalışan bu aydınlatma elemanlarının ateşlenmesi, klasik olarak gerçekleştirilen bobinli balastların yerine elektronik olarak da gerçekleştirilmektedir. Elektronik balastlar daha hızlı ateşleme yaparlar. Yapılarındaki yarı iletken malzemeler nedeniyle harmonik bileşenlere neden olurlar.

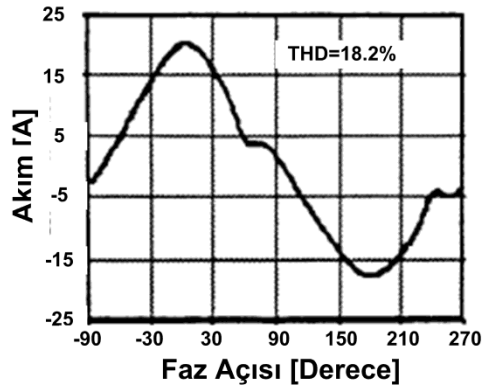
Bir tüketim barasına bağılı bulunan az sayıdaki firtresiz elektronik balastın harmonik etkinliğı ihmal edilebilir. Ancak çok sayıda elektronik balastın bulunduğı tesislerde harmonik seviyeleri sınır değerlerin üzerine çıkabilmektedir.

2.3 Harmoniklere Neden Olan Cihazların Dalga Şekilleri

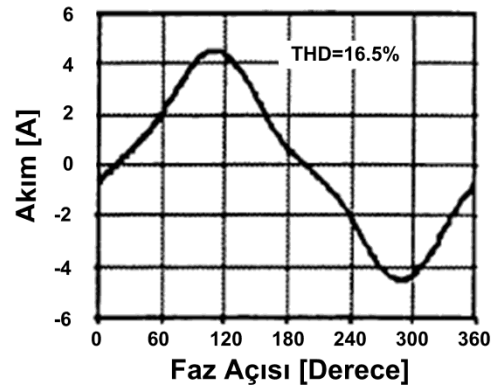
Günümüzde kullanılan ev ve ofis cihazları da lineer olmayan özellik göstermektedir. Çeşitli cihazların meydana getirdiğı harmonikler incelenmekte ve bunların etkileri de araştırılmaktadır.

Mikrodalga fırın, elektrik süpürgesi, yazıcı, flüoresan lamba, ışık ayarı yapan elemanlar, akü, şarj aleti, renkli televizyon, masaüstü bilgisayar ile lazer yazıcı, ısı pompası akım dalga şekilleri Enjeti tarafından ölçülmüş olup Şekil 2.2'de verilmiştir. Bu ölçümlerde ayrıca harmoniklerin oluşturduğu toplam harmonik bozunumları (THD: Toplam Harmonik Bozunumu) yüzde olarak ifade edilmiştir.

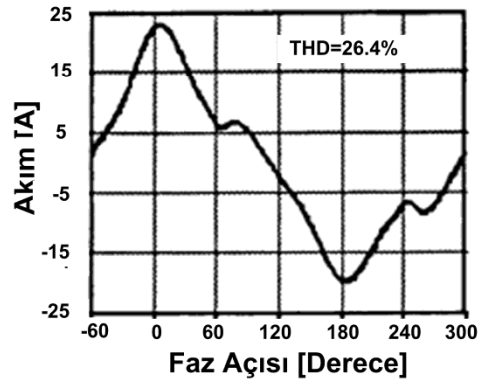
Mikrodalga Fırın Akım Dalga Şekli #1



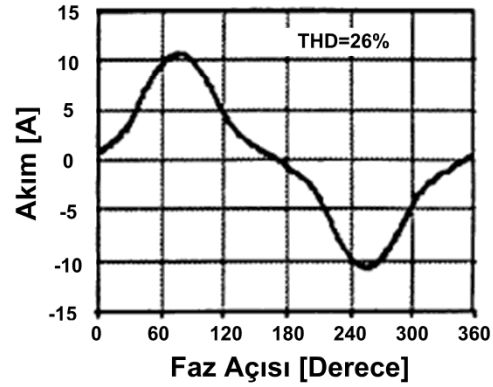
Çim Biçme Makinası Akım Dalga Şekli



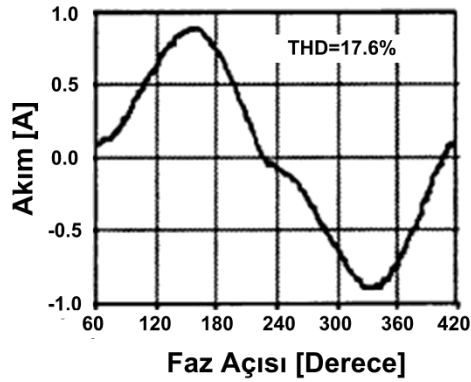
Mikrodalga Fırın Akım Dalga Şekli #2



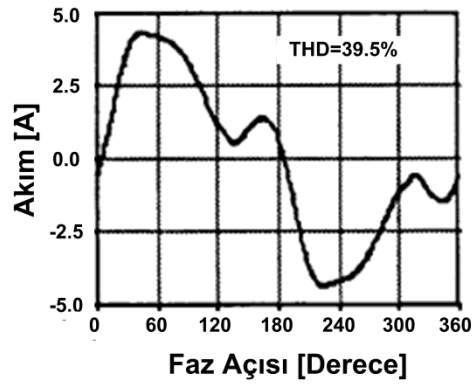
Vakumlu Temizleyici Akım Dalga Şekli



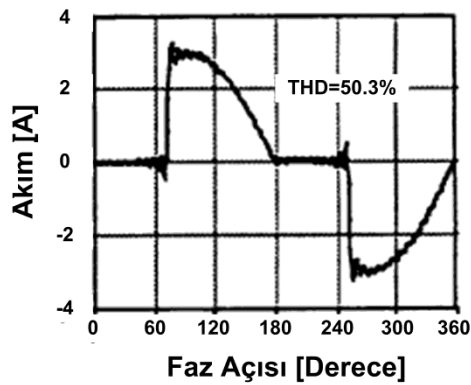
Flüoresan Tip Masa Üstü Lambası Akım Dalga Şekli



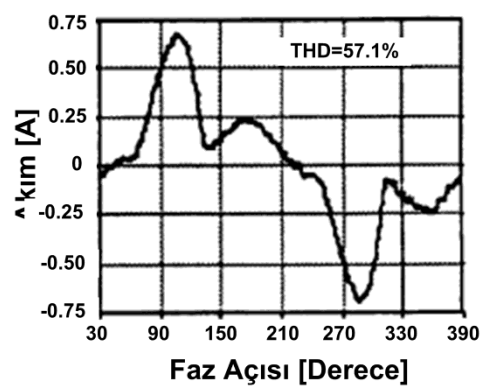
Flüoresan Tip Masa Üstü Lambası Akım Dalga Şekli



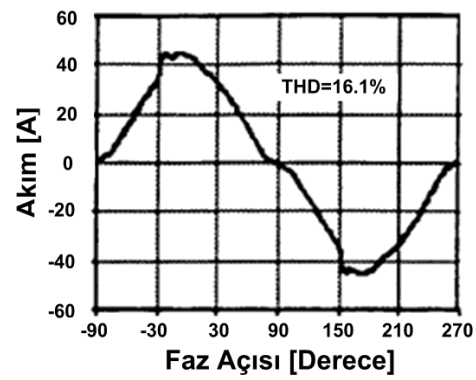
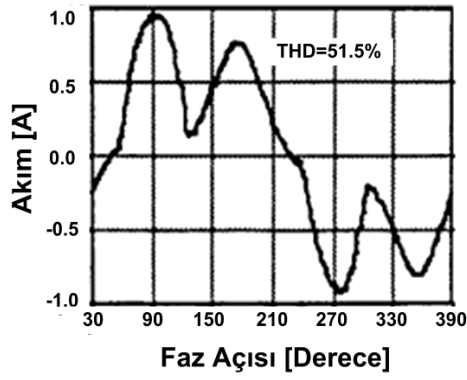
Işık Dimmeri Akım Dalga Şekli



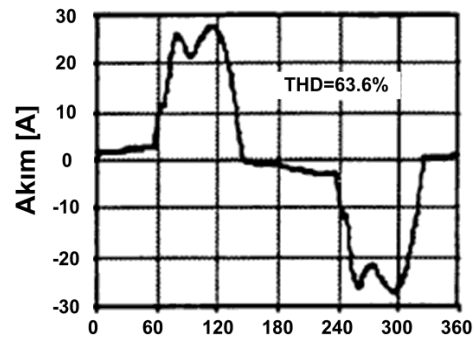
Yazıcı Akım Dalga Şekli



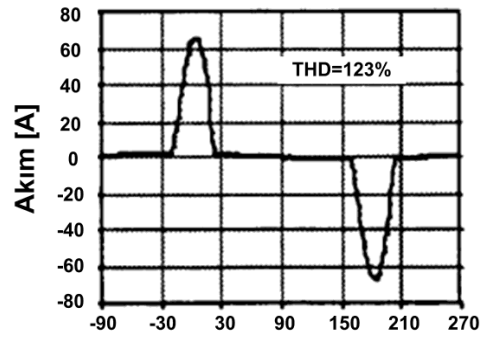
Elektrikli Araç Şarj İstasyonu Akım Dalga Şekli Isı Pompası Akım Dalga Şekli #1



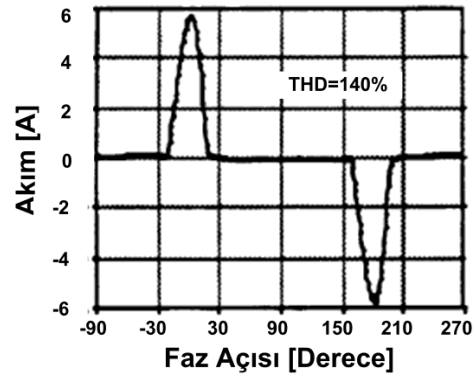
Isı Pompası Akım Dalga Şekli #2



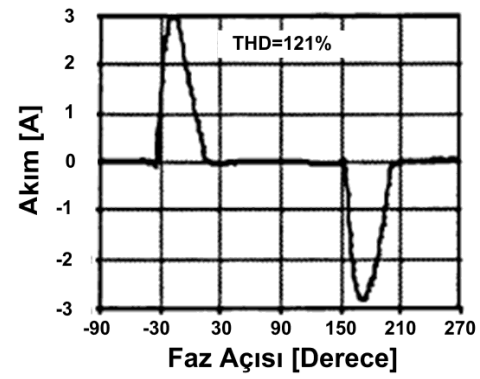
Isı Pompası Akım Dalga Şekli #3



Masaüstü Bilgisayar&Yazıcı Akım Dalga Şekli



Renkli Televizyon Akım Dalga Şekli



Şekil 2.2 Farklı ekipmanların harmonik içeriklerini gösteren deneysel ölçülmüş akım dalga şekilleri (Enjeti, 2001)

3. HARMONİKLERİN ENERJİ SİSTEMİNE VE ELEMANLARINA ETKİLERİ

3.1 Giriş

Harmonik akımların frekansları 50 Hz'in tam katları olduğundan, bu akımların generatörler, transformatörler ve hat reaktansları üzerinde meydana getirdiği gerilim düşümleri artış göstermektedir. Şebeke geriliminin temel frekansından farklı frekanstaki bu gerilim düşümleri, temel frekanstaki şebeke gerilimi ile toplanarak sinüs biçimli gerilim biçimini bozmaktadır.

Doğrusal olmayan özelliğe sahip bir tüketici tarafından üretilip şebekeye geçen harmonikler şebekede dağılarak başka bir tüketiciye de ulaşırlar. Harmonik bileşenler, doğrusal özelliğe sahip bir yüke ulaştığında bu yük üzerinden harmonik bileşenleri akıtırlar. Bu durum ise tüketici haklarına yeni bir kavram getirmiş, üretilen harmoniklerin ölçümünde kullanılmak üzere yeni elektronik sayaçlar üzerinde çalışmalar yapılmaya başlanmıştır. Bu tür sayaçlar "50 Hz'lik enerjiyi" ve "harmonik enerjiyi" ayıracak şekilde programlanacaktır. Burada; elektrik idarelerinin tüketicilere, kullandıkları harmonik enerji için mi yoksa şebekeye verdikleri harmonikler için mi fatura kesecekleri problemi ile karşı karşıya kalınmaktadır.

Harmoniklerin enerji sistemlerinde varlığı, sinüs biçimli akım ve gerilim dalga şekillerindeki bozulmalar ile anlaşılır. Harmoniklerin enerji sistemlerinde yol açtığı problemler genel olarak şöyle özetlenebilir; (Kocatepe vd. 2003)

- Generatör ve şebeke geriliminin dalga şeklinin sinüs formundan uzaklaşması nedeniyle tüketicilerin çalışma koşullarının bozulması.
- Enerji sistemi elemanlarında ve bu sisteme bağlı yüklerde harmonikler nedeniyle ek kayıpların oluşması.
- Elektrik enerjisinin üretim, iletim ve dağıtım aşamalarında verimde düşüş oluşması.
- Elektrik santrallerindeki ekipmanların izolasyonlarının tahrip olması ve bu nedenle de çalışma ömürlerinin kısılması.
- Akım harmonik bileşenleri nedeniyle gerilim düşümünün de artış göstermesi.
- Temel frekans için tesis edilmiş kompanzasyon tesislerindeki kondansatörlerin harmonik frekanslarında düşük kapasitif reaktans nedeniyle aşırı akım çekerek aşırı reaktif yüklenmeleri ve kondansatörlerin dielektrik zorlanma nedeniyle hasar görmeleri.

- Senkron ve asenkron motorlarda farklı frekanslı akım geçişi nedeniyle salınımların meydana gelmesi ve bu nedenle aşırı ısınmalar.
- Harmonikler nedeniyle koruma rölelerinin hatalı çalışmaları.
- Kontrol elemanlarının hatalı çalışmaları.
- Endüksiyon tipi sayaçlarda ölçüm hataları.
- Gerilim yükselmesi sonucu izolasyon malzemesinin delinmesi.
- Yüksek harmoniklerin bulunduğu bir şebekede toprak kısa devre akımlarının daha yüksek değerlere yükselmesi.
- Temel frekansta rezonans olayı olmadığı halde harmonik frekanslarında rezonans olaylarının meydana gelmesi ve rezonans sonucu aşırı gerilim veya akımların oluşması.
- İletişim sistemlerinde duyulabilir bir gürültü yayılması

Elektrik güç sistemlerinde harmonikler sebebiyle ortaya çıkan problemler arasında en etkili olanları, kayıpların artması ile ölçü ve koruma sistemlerinin hatalı çalışmasıdır. Harmonik akım bileşenleri omik direnç içeren tüm tesis elemanları üzerinde ek harmonik kayıplara yol açmaktadır. Harmonikler sebebiyle oluşan ek kayıpları azaltmak için harmonik kaynağı durumundaki lineer olmayan yüklerin filtreler ile donatılması, dönüştürücüler gibi güç elektroniği devrelerinin tasarımında ise darbe sayısının mümkün olduğu kadar yüksek tutulması ile büyük genlikli harmonik bileşenlerinin şebekeye geçmesi önlenebilir.

3.2 Harmoniklerin Elemanlar Üzerindeki Etkileri

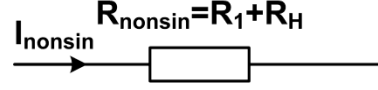
3.2.1 Omik Direnç Üzerindeki Etkisi

Harmonik bileşenlerin derecesinin artması, harmonik bileşenin frekansının artması anlamına gelir. Bilindiği gibi frekansın artması sonucu, deri etkisi (skin effect) nedeniyle iletkenin direnci artış göstermektedir. İletkenin sinüs biçimli akımdaki temel bileşen omik direnç değeri R_l olduğunda, sinüs biçimli olmayan akım akışı halinde bu direnç değerine harmonik bileşenler için toplam R_H direnci ilave edilmektedir.

Böylelikle tüm bileşenlerle birlikte sinüs biçimli olmayan akım için toplam omik direnç değeri, (Kocatepe vd.,2003)

$$R_{nonsin} = R_1 + R_H \quad (3.1)$$

olur.



Şekil 3.1 Sinüs biçimli olmayan akım ile omik direncin frekansa bağlı olarak artması

3.2.2 Reaktanslar Üzerindeki Etkisi

Temel frekans bileşen için değeri X olan endüktif reaktans, n . harmonik bileşen için;

$$X_n = n.X \quad (3.2)$$

değerini alır. Aynı şekilde, temel frekans için değeri X_C olan bir kapasitif reaktans, n . harmonik bileşen için;

$$X_{n_C} = \frac{X_C}{n} \quad (3.3)$$

değerini alır.

3.2.3 Harmoniklerin Kondansatörler Üzerindeki Etkileri

Harmonikler içeren bir gerilim kondansatöre uygulandığında, hem akım hem reaktif güç değerinde artış olur.

n . harmonik için kondansatör gücü,

$$Q_n = \omega_n . c . V_n^2 \quad (3.4)$$

olacaktır.

Genellikle tüm harmonik problemleri öncelikle paralel bağlı kondansatör gruplarında ortaya çıkar. Rezonans olayları sonucu oluşan aşırı gerilim ve akımlar, kondansatörlerde ısınmayı ve gerilim zorlanmalarını arttırarak ömürlerini kısaltırlar. (Freud, 1988)

3.2.4 Harmoniklerin Transformatörler Üzerindeki Etkileri

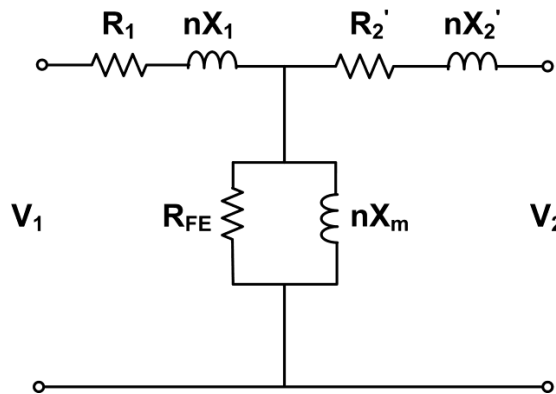
Güç sistemindeki harmoniklerin transformatörler üzerindeki ilave etkisi, yük akımındaki harmonik içeriğinden kaynaklanan kayıplar nedeni ile oluşan ekstra ısıdır. Diğer problemler transformatör endüktansı ve sistem kapasitörü arasında oluşabilecek rezonans, sıcaklık çevriminden ötürü mekanik izolasyondaki zorlanma (sargı ve çekirdek) ve olası küçük çekirdek titreşimleri şeklindedir.

Harmonik gerilimlerinin varlığı çekirdekteki histerizis ve eddy akım kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Harmoniklerden kaynaklanan çekirdek kayıplarındaki artış harmoniklerin besleme gerilimi üzerindeki etkisine ve transformatör çekirdeğinin tasarımına bağlıdır.

Harmonik akımları bakır kayıplarının artmasına neden olmaktadır. Bu durum dönüştürücü transformatörlerinde, genellikle AC sistem tarafına bağlanan filtrelerin varlığından yararlanmadıkları için daha önemlidir. Ekstra güç gereksiniminin yanı sıra dönüştürücü transformatörleri tank içerisinde beklenmeyen sıcak noktalar oluşturmaktadır.

Üçgen bağlı transformatörlerde, ekstra akımlar tasarım aşamasında dikkate alınmamış ise 3'ün katları olan frekansların dolaşımında aşırı yüklenebilmektedirler. Bu durumda 3 bacaklı transformatör tasarımı sıfır andan kaynaklanan harmonik akıları nedeni ile etkili bir şekilde aşırı yüklenebilmektedir. Bu akılar tankta, çekirdek klamplarında, vb. ısı artışına neden olmaktadır. (Arrilaga vd., 2004)

Eğer yük akımı bir DC bileşen içeriyor ise transformatör manyetik devresinin bundan kaynaklı sınırlaması uyartım akımlarındaki harmonik içeriğinin önemli oranda artmasına neden olmaktadır. (Arrilaga vd., 2004)



Şekil 3.2 n. harmonik bileşen için transformatörün eşdeğer devresi

R_1 : Primer sargı direncini

X_1 : Primer sargı kaçak reaktansını

R_2' : Primere indirgenmiş sekonder omik direncini

X_2' : Primere indirgenmiş sekonder kaçak reaktansını

R_{FE} : Demir kaybını sembolize eden omik direnci

X_m : Mıknatıslanma reaktansını

göstermektedir.

3.2.5 Ölçme Aygıtları Üzerindeki Etkiler

Ölçü aletleri, tam sinüs biçimli işaretlere göre kalibre edilirler. Gerilimin karesiyle orantılı dönme momentine göre ölçüm yapan sayaçlarda, gerilim harmoniklerinin oluşması bazı kayıt hatalarına sebebiyet verecektir. Elektrik sayaçları gibi endüksiyon disk aygıtları sadece temel bileşenlere göre çalışırlar. Diskte oluşan moment, akımın ve diskte endüklenen eddy akımının çarpımına eşittir. Her ikisi de yüksek frekanslarda orantısız olarak azalırlar. Bu da elektrik sayacının temel frekanstan daha yüksek frekanslarda hatalı ölçme yapmasına neden olur. Harmonik bozunmanın oluşturduğu faz dengesizlikleri de bu elemanların hatalı çalışmalarına neden olur. Şebeke frekansından baska frekanslardaki enerjileri okumak için tasarlanmayan klasik sayaçların (kWh sayaçlarda) harmoniklerin varlığında daha yüksek değerler okuyabildikleri görülmüştür. (Arrilaga vd, 1997)

3.3 Enerji Sistemi Üzerindeki Etkileri

3.3.1 Harmoniklerin Sebep Olduğu Rezonans Olayları

Elektrik enerji sistemlerine bağlanan bir endüktif reaktansın değeri, frekans ile doğru orantılı olarak artarken, kapasitif reaktansın değeri frekans ile azalmaktadır. Herhangi bir frekansta endüktif reaktansın kapasitif reaktansa eşit olduğu durum rezonans durumudur. Bu frekansa “rezonans frekansı” denmektedir. Sistem rezonansı, harmonik frekanslardan birine yakın bir değerde oluşursa, aşırı derecede harmonik akım ve gerilimleri ortaya çıkacaktır. Harmonik seviyelerini etkileyen en önemli etkenlerden birisi de rezonans durumudur. Bilindiği gibi elektrik devrelerinde, seri rezonans ve paralel rezonans olmak üzere iki çeşit rezonans

oluşabilir. Seri rezonans harmonik akımının dolaşmasına düşük bir empedans gösterirken, paralel rezonans yüksek empedans göstermektedir.

Paralel rezonans, harmonik kaynağına aktarılan rezonans frekansında yüksek empedansa yol açmaktadır. Harmonik kaynaklarının çoğu akım kaynağı olarak dikkate alındığı için, bu durum yüksek harmonik gerilimlerine ve paralel empedansın her bir ayağında yüksek harmonik akımlarına neden olmaktadır.

Paralel rezonans pek çok şekilde oluşabilmektedir. Bunlardan en basiti, bir kondansatörün bir harmonik kaynağı ile aynı baraya bağlanmasıdır. Bu durumda sistem empedansı ile kapasitör arasında bir paralel rezonans oluşmaktadır.

Sistem empedansının tamamen endüktif olduğu farz edilirse, rezonans frekansı;

$$f_p = f_1 \sqrt{\frac{S_k}{Q_c}} \quad (3.5)$$

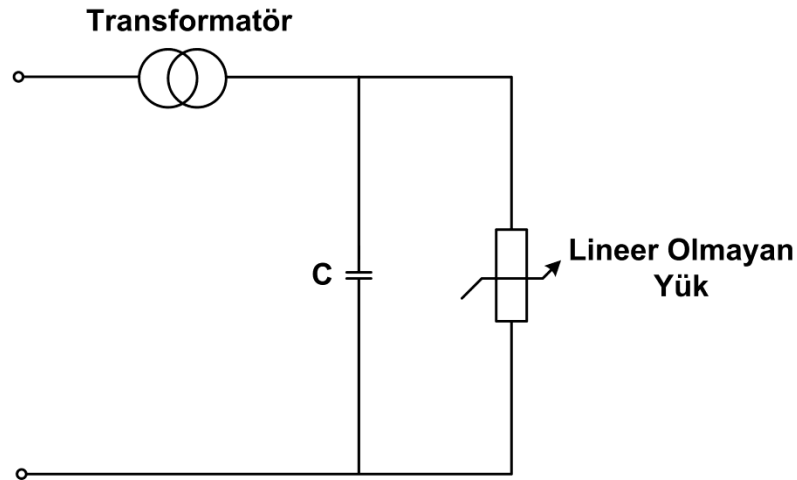
şeklinde yazılabilir. Burada,

f_p : Paralel rezonans frekansı

f_1 : Temel frekans

S_k : Kaynağın kısa devre gücü

Q_c : Kondansatör gücünü temsil etmektedir.



Şekil 3.3 Paralel rezonans durumu

Hangi rezonans durumunun oluştuğunu tespit etmek için baradaki harmonik gerilimi ile birlikte tüketici yükünde ve her bir beslemedeki harmonik akımlarının ölçülmesi gereklidir. Genel olarak, harmonik geriliminin değeri yüksek iken baradan güç sistemine akan akımın değeri küçük ise, güç sisteminde rezonansın var olduğu anlaşılmaktadır. Bunun yerine tüketicinin yüküne yüksek değerli bir harmonik akımı akıyor ve bu durum barada harmonikli gerilim oluşturuyor ise, sistem endüktansı ve yük kapasitörü arasında bir rezonansın var olduğu anlaşılmaktadır.

Yüksek frekanslarda kapasitif empedans azaldığı için yük ihmal edilebilmektedir. Bu koşullar altında seri rezonans aşağıdaki durum mevcut ise söz konusudur:

$$f_s = f_1 \sqrt{\frac{S_t}{S_C \cdot Z_t} - \frac{S_L^2}{S_C^2}} \quad (3.6)$$

şeklindedir. Burada,

f_1 : Temel frekansı

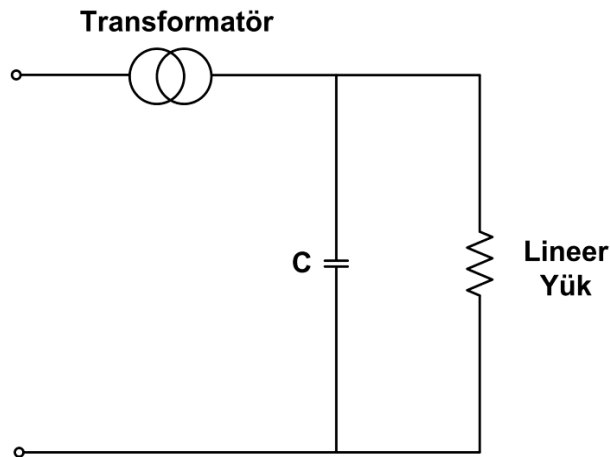
f_s : Seri rezonans frekansını

S_t : Transformatörün nominal gücünü

S_C : Kondansatör gücünü

Z_t : Transformatörün per-unit (pu) empedansını

S_L : Omik yükü temsil etmektedir.



Şekil 3.4 Seri rezonans devresi

Rezonans halinde kondansatör uçlarındaki gerilim devre geriliminin X_C/R katına çıkar. Bu nedenle, rezonans durumunda sistemde arıza ve hasarlar meydana getirebilir.

Seri rezonanstaki en önemli sorun düşük harmonik gerilimlerinde yüksek kapasitör akımlarının akabilmesidir. Akacak olan akım değeri devrenin Q kalite faktörüne bağlıdır. Bu faktör tipik olarak 500 Hz'de 5'tir.

Rezonansın oluşacağı harmonik bileşeni,

$$n = \frac{1}{2\pi f_1 \sqrt{LC}} = \sqrt{\frac{X_{C1}}{X_{L1}}} \text{ ile belirlenir.} \quad (3.7)$$

3.3.2 Harmoniklerin Güç Faktörüne Etkisi

Bilindiği gibi güç faktörü ($\cos \varphi$) çalışan bir sistemden sürekli enerji çalmakta ve sistemi sürekli büyümeye zorlamaktadır. Harmonik akımlara ihtiyaç duyan yeni cihazlar devreye alındığında güç faktörü 0.88'lerden 0.70'lere düşmektedir. Bu da istenen bir durum değildir. (Wagner, 1993)

Lineer olmayan yükleri içeren tesislerde kapasite değeri ne kadar büyük olursa olsun güç faktörü belli bir değere kadar yükselmekte ve daha sonra düşüş göstermektedir. Bu durum pratikte ne kadar gereksiz kapasite kullanımı olduğunu işaret eder. Bu bakımdan, güç faktörünü istenen değere çıkartmak için harmoniklerin mutlaka filtre edilmesi zorunluluğu vardır.

3.3.3 Harmoniklerin Omik Kayıplara Etkisi

Bilindiği gibi bir iletkenin direnci R ve iletkeniden geçen akımın efektif değeri I ise, bu iletkenindeki güç kaybı,

$$P_k = RI^2 \quad (3.8)$$

olarak tanımlanır. Efektif değeri I olan bir akım lineer olmayan bir yükten geçtiğinde iletkenindeki güç kaybı;

$$P_k = P_{k1} + P_{kEK} = R_1 I_1^2 + R_n \sum_{n=2}^N I_n^2 \quad (3.9)$$

P_k : Kayıp güç

$P_{k_{EK}}$: Harmonik akım bileşenin oluşturduğu ek kayıp güç olarak tanımlanır.

Bu eşitlikte görüldüğü gibi harmonik akımların genliği arttıkça akımın harmonik bileşenleri nedeniyle oluşan ek kayıplar da artmaktadır.

3.3.4 İletişim Hatları Üzerindeki Etkiler

İletişim ve telefon hatlarının yan yana bulunması, telefon haberleşmesi ile parazit oluşturur. Güç devresindeki akım akışı, yakınındaki iletişim devresi iletkenlerinde akım/gerilim endükleyecek bir manyetik/elektrostatik alan oluşturabilir. Harmonik bileşenlerin derecesi arttıkça bunlara ait frekansın da değeri artmaktadır. Yüksek dereceli harmonikler yüksek frekanslı işaretler demektir. Bu frekansa bağlı olarak gürültü (parazit) oluşumuna yol açarlar. Parazitlerin miktarı akım/gerilim genliğine ve frekansa bağlıdır. Haberleşme devrelerindeki gürültü, iletim kalitesini azaltır; iletilen sinyalle girişim yapabilir veya gönderilen bilgide kayba neden olabilir.

4. HARMONİKLERİN SINIRLANDIRILMASI VE ULUSLARARASI STANDARTLAR

4.1 Giriş

Harmoniklerin genlik olarak belirli değerlerin üzerinde olması, güç sisteminde bulunan diğer sistemlerin de etkilenmesine sebep olarak istenmeyen durumlar meydana getirmektedir. Bu sebeplerden dolayı pek çok kuruluş, bir yükün şebekeye enjekte edebileceği harmonik akım büyüklüğünü standart limitler içine alma yoluna yönelmiştir.

IEC ve IEEE tarafından konvansiyonel sistemler için daha yeni standartlar getirilmiştir. Bir diğer uygulama olarak da telefon ve enerji sistemleri iletiminin ortak direklerde yapıldığı durumlarda ortaya çıkan “telefon girişim (parazit) faktörü” olarak karşımıza çıkmaktadır. (Wakileh, 2001)

Harmonik bozunumu olarak adlandırılan ve enerji sistemindeki harmonik bileşenler sonucu meydana gelen harmonik kirlilik, özellikle güç elektroniği elemanlarının yaygın kullanımı ile giderek artış göstermektedir. Bu bozunum sonucu meydana gelen olumsuzlukların giderilmesi bakımından harmonik sınırlamanın yapılması giderek zorunlu hale gelmektedir. Bu nedenle elektrik enerjisindeki harmonik kirlilik, bazı ülkelere sınırlandırılarak güç kalitesinin artması hedeflenmiştir.

Gelecekte enerji sistemlerinde harmonik problemlerinin daha da artacağı göz önüne alınarak, lineer olmayan yükler içeren tesislerin daha kuruluş ve tasarım aşamasında düşük seviyede harmonik üretmesi için önlemler alınmalıdır. Bu amaçla, üç fazlı lineer olmayan bir yük, bir transformatör üzerinden şebekeye bağlanıyor ise teknik bir zorunluluk olmadıkça transformatörün şebeke tarafındaki sargıları üçgen bağlı olmalıdır. Böylece 3 ve 3'ün katı harmonikler şebekeyi etkilemeyecek, ek kayıplar ve THD değerleri azalacaktır. Ayrıca tüketicilerin; çevirici kullanımında ekonomik kriterleri de dikkate alınarak, daha az sayıda ve daha düşük genlikli harmonik akım bileşenleri içeren yüksek darbe sayılı çeviriciler tercih etmesi teşvik edilmelidir. (Kocatepe vd, 2003)

4.2 Standartların Gelişmesine Etki Eden Faktörler

Harmonik standartlarının gelişimi şu hususlar etrafında yoğunlaşmaktadır: (Arrilaga vd, 2004)

- Durumun tanımlanması ve karakterize edilmesi

- Harmonik probleminin temel kaynaklarının irdelenmesi
- Güç sistemine ve diğer ekipmanlara etkileri
- Durumun öneminin sayısal analizinin yapılması amacıyla indisler ve istatistiksel analizler kullanılarak durumun matematiksel olarak tanımlanması
- Ölçüm teknikleri ve yönetmeliklerin geliştirilmesi
- Farklı tip ve sınıflardaki cihazların harmonik oluşturma limitlerinin değerlendirilmesi
- Farklı tip cihazların harmoniklere karşı hassaslığının değerlendirilmesi
- Harmonik sınırların uyumluluk için test yöntemlerinin ve prosedürlerinin değerlendirilmesi
- Harmonik azaltımı yollarının değerlendirilmesi

Oluşturulan standartlar sistem standartları, bağlantı standartları veya daha sıklıkla bu iki standardın kombinasyonu şeklindedirler. Sistem standartlarında konu sistem tarafından tolere edilebilecek harmonik oranları ile ilgilidir. Harmonik kaynaklarının detayları ve sistemdeki harmonik içeriğine katkıları bu standartların eklerinde ilgili maddeler olarak verilmektedir.

4.3 İlgili Standartlar

IEC 61000 standart serisi: Güç sistemlerindeki harmonik ve iç-harmonik tabanlı bozulmaların kontrolü ile ilgili uluslararası boyutta kabul edilmiş bilgiler sağlayan IEC standart serilerindeki dökümanların kısa bir tanımı verilmektedir.

IEC 61000 1-4: Bu standart 9 kHz'e kadarki frekans aralığındaki harmonik ve iç-harmonik akımlarının sınırlandırılmasındaki gerekçeleri ortaya koymaktadır.

IEC 61000 2-1: Bu standart temel harmonik kaynaklarını üç kategoride özetlemektedir: Güç sistemi ekipmanları, endüstriyel yükler ve evsel yükler.

Yüksek Gerilimli DC (HVDC) çeviriciler ve Esnek AC İletim Sistemi (FACTS) ekipmanlarının artan kullanımı, iletim sisteminde oluşan harmonik bozunumunun temel kaynağı olmuştur. Statik güç dönüştürücüleri ve elektrikli ark fırınları endüstriyel alandaki temel harmonik kaynaklarıdır. Daha çok bilgisayarlarda ve televizyonlarda kullanılan süzme kapasiteli doğrultucular ise evsel alandaki en önemli harmonik kaynaklarıdır.

IEC 61000 2-2: Bu standart, düşük gerilimli endüstriyel güç sistemlerindeki harmonik ve iç-harmonik tabanlı gerilim şekli bozunumunun uyumluluk seviyesi üzerinedir.

IEC 61000 2-4: Bu standart, endüstriyel sistemlerdeki harmonik ve iç-harmonik uyumluluk seviyelerini göstermektedir. Bu standart ayrıca iç-harmoniklerin temel etkilerini de açıklamaktadır.

IEC 61000 2-12: Bu standart *IEC 61000 2-4* standardına benzer olarak orta gerilim seviyesindeki güç sistemlerindeki düşük frekanslı bozucu etkilerin uyumluluk seviyeleri ile ilgili kısımlar içermektedir. Ayrıca bu standart, kırpışma (ripple) kontrolünde kullanılan sinyal enjektesi konusunu da içermektedir.

IEC 61000 3-2 ve 3-4: Bu standart faz başına 16 A ve daha aşağı seviyedeki giriş akımına sahip ekipmanların akım harmoniği oluşturma sınırlarını içermektedir. Bu standart ayrıca ölçüm devresini ile gereksinimlerini, üretim kaynağını ve test koşullarını tanımlamaktadır.

IEC 61000 3-6: Bu standart öncelikle alçak ve orta gerilimli hatlardaki harmonik gerilimlerinin uyumluluk seviyelerini ve OG, YG ve ÇYG güç sistemlerinin planlama hususlarını tanımlamaktadır. Ayrıca OG ve YG güç sistemlerindeki bozucu yüklerin harmonik oluşturma oranlarının bir değerlendirmesi gerçekleştirilmektedir.

IEC 61000 3-12: Bu standart giriş akımı faz başına 75 A ve altında olan ile kısıtlı bağlantıya maruz kalan alçak gerilimli sistemlere bağlı olan cihazların ürettiği harmonik akımları ile ilgili sınırları ortaya koymaktadır.

IEC 61000 4-7: Bu standart, bahsi geçen dökümanlar arasında belki de en önemli olanıdır ve test etme ve ölçüm metotlarını içermektedir. Bu standart, güç sistemleri ve cihazlar için harmonik ve iç-harmonik ölçümü açısından genel bir kılavuz konumundadır.

IEC 61000 4-13: Bu standart da harmonik ve iç-harmonikleri açısından test ve ölçüm yöntemleri için ortaya konulmuştur.

IEEE 519-1992: IEEE 519-1992 güç sistemlerindeki ana harmonik kaynaklarını tanımlamaktadır. Bu standartta tanımlanan harmonik kaynakları; güç dönüştürücülerini, ark fırınlarını, statik VAR kompanzatörleri, gücün, siklokonverterlerin, anahtar modlu güç kaynaklarının ve darbe genişlik modülasyonlu sürücülerin elektronik faz kontrolü şeklindedir. Doküman temel olarak bozulmuş dalga şekillerini, harmonik sırasını ve bu cihazlardan kaynaklanan bozunumunun içerisinde her bir harmonik bileşenin derecesini göstermektedir. Ayrıca harmoniklerin mevcut olması durumunda sistemin nasıl cevap vereceği de açıklanmaktadır. Bu cevaplardaki açıklamalar paralel rezonans, seri rezonans ve sistem yüklenmesinin bu rezonansların genliği üzerine etkisini içermektedir. Alçak gerilimli dağıtım

sistemleri, endüstriyel sistemler ve iletim sistemlerinin tipik karakteristikleri baz alınarak, bu sistemlerin harmonik bozunumuna cevapları açıklanmaktadır.

Çeşitli cihazlar ve yükler üzerine harmonik bozunumunun etkileri de ayrıca bu standartta belirtilmiştir. Bahsi geçen cihazlar motorlar ve generatörler, transformatörler, güç kabloları, kapasitörler, elektronik ekipmanlar, ölçüm cihazları, şalt tesisleri, röleler ve statik güç dönüştürücüleridir. Güç sistemlerindeki harmonik bozunumunun sonucu olarak telefon ağlarına girişim hususu da Bell Telefon Sistemleri ve Edison Elektrik Enstitüsü tarafından ortak olarak oluşturulan C-mesaj ağırlıklandırma sistemi referans alınarak bu standartta belirtilmiştir. Standart, güç sistemlerindeki harmonik bozunumundan kaynaklanan telefon girişiminin oranını azaltmanın olası farklı yöntemlerini de göstermektedir.

Bu standartta ayrıca güç sistemlerindeki harmonik bozunumu oranının belirlenmesi için analiz yöntemleri ve ölçüm gereksinimlerini de açıklanmaktadır. Harmonik akımları ve sistemin frekans cevabının hesaplanması ve harmonik yayılımının analizi için çeşitli güç sistem bileşenlerinin modellenmesi için yöntemler özetlenmektedir. Standarttaki ölçüm ile ilgili olan bölüm ölçüm işleminin önemini belirtmekte ve mevcut olan çeşitli harmonik görüntüleme yöntemlerini listelemektedir. Bu görüntüleme yöntemlerinin kesinliği ve seçiciliği (bir harmonik kaynağını diğer harmonik kaynağından ayırabilme yeteneği) için olan gereksinimlerini bu standart açıklamaktadır. Ayrıca, hızlıca değişen harmonik bileşenlerini yumuşatmak ve bu sayede genel verinin bant genişliğini ve veri depolama gereksinimlerini azaltmak için kullanılabilecek ortalama alma ve anlık görüntüleme teknikleri de açıklanmaktadır.

Standart harmonik bozunumlu sistemler için reaktif kompanzasyon tasarımı yöntemlerini açıklamaktadır. TCR ve TSC gibi kendileri de harmonik kaynağı olan bazı ekipmanları da içeren farklı reaktif güç kompanzasyonu şekilleri ele alınmıştır. AC sisteme aktarılan harmonik akım oranının azaltımı ile ilgili farklı yöntemler de ortaya konulmuştur. Hem bireysel kullanıcılara hem de kamuya harmonik derecesini kabul edilebilir oranda kontrol edebilmek için bazı pratik yöntemler önerilmektedir. Bu standart, ölçümler ve detaylı modelleme ve simülasyon çalışmaları ile yeni harmonik kaynaklarının değerlendirilmesi hususu ile ilgili önerileri de içermektedir.

Hat geriliminin dalga şeklinin bazı güç elektroniği elemanlarının valfleri arasındaki iletişimden dolayı bozulması durumu olarak tanımlanan çentikleme olayı da bu standartta detaylı bir şekilde ele alınmıştır. Standart, dönüştürücüler arası iletişim hususunu irdelemekte

ve çentik derinliği ve sistem empedansı ve yük akımına bağlı olarak duraksama olaylarını açıklamaktadır. Farklı besleme sistemleri için çentik derinliği, kaynak geriliminin THD değeri ve çentik alanı ile ilgili sınırlar da bu standartta ele alınmıştır.

IEEE tarafından sınırlandırılan toplam harmonik bozunum değerleri Çizelge 4.1’de belirtilmiştir.

Çizelge 4.1 IEEE’nin Gerilim İçin Belirlediği Harmonik Bozunum Sınırları

Bara Gerilimi (V_n)	Tekil Harmonik Büyüklüğü (%)	THD_{V_n}
$V_n \leq 69kV$	3.0	5.0
$69 < V_n \leq 161kV$	1.5	2.5
$V_n > 161kV$	1.0	1.5

IEEE tarafından sınırlandırılan maksimum toplam harmonik bozunum değerleri Çizelge 4.2’de belirtilmiştir.

Burada;

I_k : Sistemin kısa devre akımını

I_L : Yüke ait maksimum talep akımını

TTD : Toplam talep bozunumunun değerini

ifade etmektedir.

Çizelge 4.2 IEEE'nin Dağıtım Sistemleri İçin Belirlediği Akım Harmoniği Bozunum Sınırları

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

5. HARMONİKLERİN ETKİLERİNİN AZALTILMASI

5.1 Giriş

Harmoniklerin olumsuz etkileri öncelikle tasarım yaparken daha sonra da devreye bağlanan elemanlarla giderilmeye çalışılır.

Daha başlangıçta harmonik bileşenleri gidermek amacıyla, bazı önlemler alınabilir. Bu önlemler devre elemanlarının imali veya bunların bağlanması esnasında alınır. Bunlardan bazılarını sıralayacak olursak;

- Senkron generatörlerde hava aralığındaki manyetik alanın şekli indüklenen elektromotor kuvvetini belirler. Eğer manyetik alan sinüs biçimli ise indüklenen elektromotor kuvveti de sinüs biçimli olacaktır. Yuvarlak rotorlu senkron makinelerde sinüs biçimli olmayan alan eğrisinin sinüs eğrisine yaklaştırmak için kutup oluklarının 2 / 3 ‘u sarılır ya da sarım adımları birbirlerinden farklı olan sarım tipi kullanılır.
- Büyük transformatörlerde manyetik endüksiyon değerinin büyük tutulması ile demir çekirdekten en büyük yarar sağlanır. Ancak büyük endüksiyon değerinde, doyma nedeni ile mıknatıslanma akımında harmonikli bileşenler artar. Mıknatıslanma akımının harmonik bileşenlerini azaltmak için alınabilecek en iyi tedbir, manyetik endüksiyonu düşük tutmaktır.

5.2 Harmoniklerin Filtrelenmesi

Harmonik bileşenlerin filtrelenmesi onların yok edilmesi anlamını taşımamaktadır. Harmonik filtreleme işlemi harmonik bileşenlerin istenilmediği devreden geçişini zorlaştırmak, istenildiği noktadan da geçişini kolaylaştırmak olarak gerçekleştirilir.

İstenmeyen harmonik bileşenlerin geçişini kolaylaştırmak için ilgili frekanstaki empedansın minimum değere çekilmesi, geçişini zorlaştırmak için ise yine o frekanstaki empedans değerinin maximum değere çekilmesi gerekir. Empedans değerlerinin minimum veya maximumunun elde edilmesi için rezonans devrelerinden yararlanılır. Belirlenen frekans değeri için seri veya paralel rezonans şartı gerçekleştirilerek harmonik bileşenlerin etkileri azaltılır.

Filtreler işlevleri bakımından ikiye ayrılır:

1. Pasif Filtreler
2. Aktif Filtreler

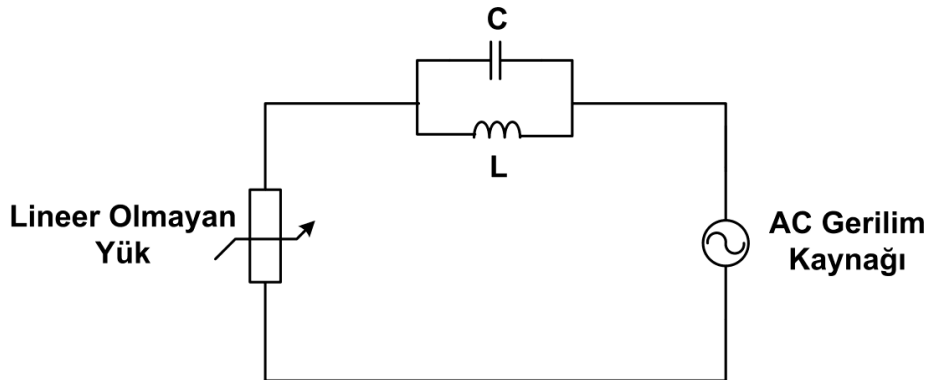
5.2.1 Pasif Filtreler

Pasif filtreler, kaynak ile alıcı arasına yerleştirilen ve temel frekans dışındaki harmonikleri yok eden direnç, endüktans ve kapasite gibi pasif elemanlardan oluşmuş filtrelerdir. Pasif filtrelerde amaç, yok edilmek istenen harmonik bileşen frekansında rezonansa gelecek L ve C değerlerini belirlemektir. Her bir harmonik için onu rezonansa getirecek ayrı bir filtre uygulanması gerekmektedir.

Bir filtrenin kalitesi (Q) ayarlanmanın keskinliğini belirler ve bu bağlamda filtreler yüksek veya düşük kaliteli olabilirler. Geçmişteki filtreler düşük harmonik frekanslarının birine (örneğin beşinci harmonik frekansı) keskince ayarlanmaktaydılar ve tipik bir değer 30 ile 60 arasında idi. 0,5-5 aralığındaki düşük kaliteli filtreler büyük bir frekans aralığında düşük bir empedansa sahiptirler. Yüksek dereceli harmonikleri (örneğin on yedinci harmonik) elimine etmek için kullanıldıklarında bu filtreler “yüksek geçiren filtre” adı da verilmektedir. (Arrilaga vd., 2004)

5.2.1.1 Seri Pasif Filtre

İstenmeyen harmonik bileşen akımlarını bloke etmek için yüksek bir seri empedansın kullanımı ile sistemde harmonik akımların akması engellenebilir. Sadece belli frekanstaki bileşenin telafi edilmesi için bu yöntem kullanılır. Seri filtreler ayarlandıkları frekansa yüksek empedans, temel harmoniğe ise düşük empedans gösterir. Seri pasif filtrelerde rezonans durumu gözlemlenmemesine rağmen, tam yük akımını taşıma ve hat gerilimine göre yalıtılma zorunlulukları vardır. (Kocatepe vd., 2003)

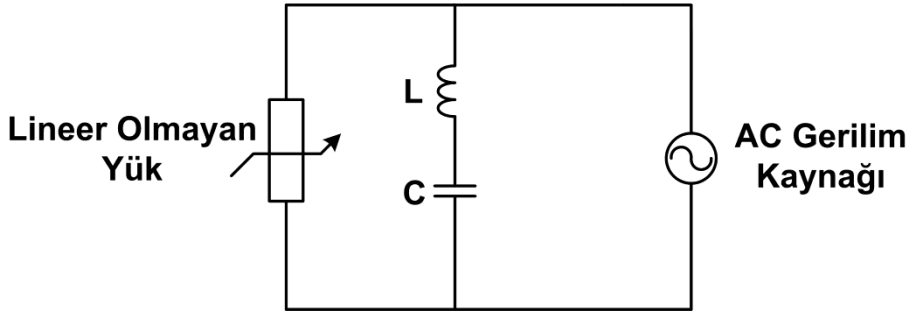


Şekil 5.1 Seri pasif filtre

5.2.1.2 Paralel Pasif Filtreler

İstenmeyen harmonik bileşen akımları, düşük empedanslı bir paralel devre üzerinden toprağa aktarılarak, sistem içinde dolaşımı paralel pasif filtrelerle önlenir.

Maliyet olarak bakıldığında, paralel filtreler seri filtrelerle nazaran daha ucuzdur. Paralel filtreler harmonik akımlarına düşük empedans gösterirler. Temel frekansta ise reaktif güç üretebildiklerinden yaygın kullanım alanı bulmuşlardır. (Kocatepe vd., 2003)



Şekil 5.2 Paralel pasif filtre

Fakat bunun yanında paralel filtreler güç sistemiyle rezonansa geçebilirler. Filtre bileşenleri, şebeke empedansı ile etkileşime girerek, işletme için çok zararlı olan seri-paralel rezonans durumunun ortaya çıkmasına neden olabilir. Bu nedenle paralel pasif filtrenin dizaynından önce ayrıntılı bir teknik analiz yapma zorunluluğu vardır. Ayrıca işletmede yapılacak her değişim çok iyi kontrol edilmelidir. Her yeni eklemede rezonans frekansı tekrar hesaplanmalı ve filtre elemanı değerleri güncellenmelidir.

5.2.2 Aktif Filtreler

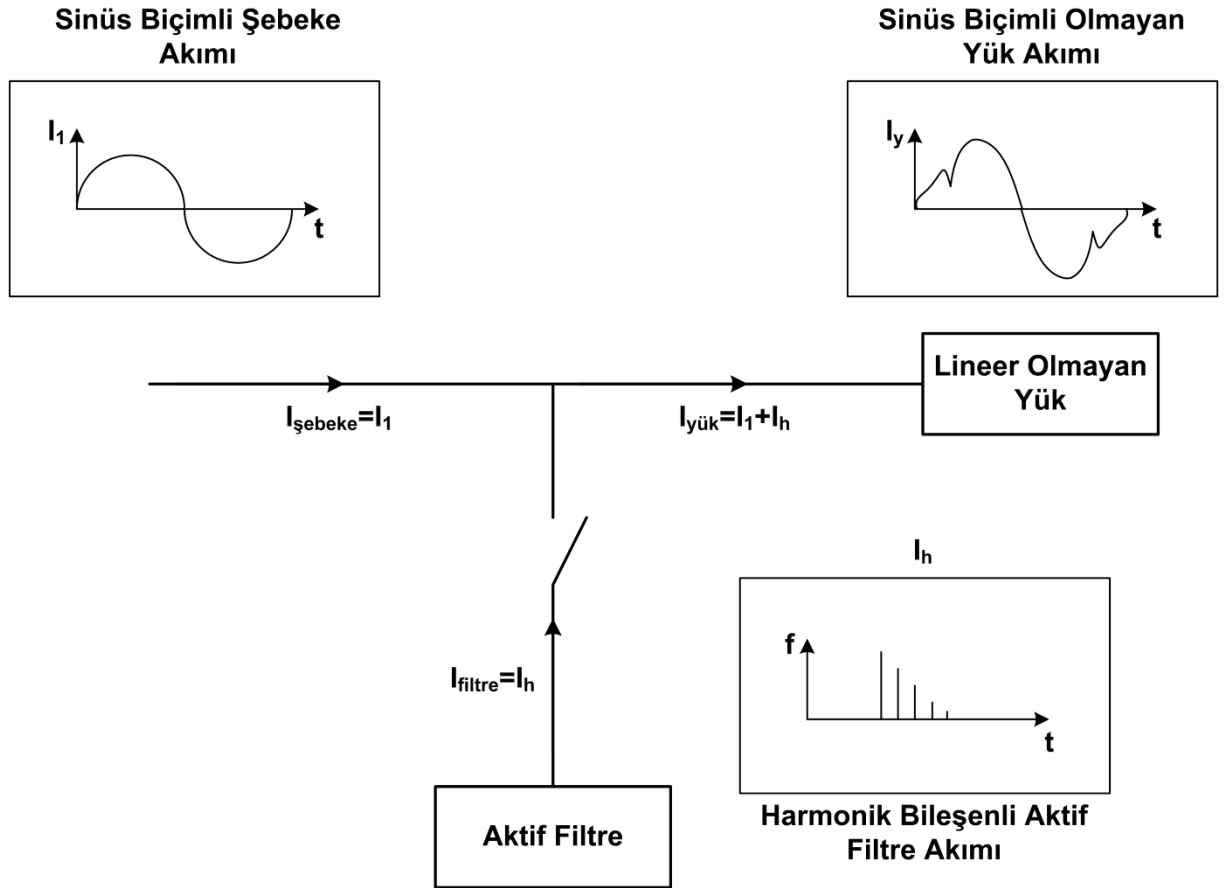
Aktif filtreler harmoniklerin etkilerinin tümünden kaldırılması için gerçekleştirilen devrelerdir. 1980 yılından beri, pratik olarak uygulanan aktif filtreler, ileri güç elektroniği temellerine dayalıdır. Pasif filtrelerle nazaran çok daha pahalı olan aktif filtreler, detaylı düşünüldüğünde tüketiciye pek çok yarar sağlar. Filtre kullanımına karar verirken, geniş bir istatistik hesap yapılarak, ona göre filtre yöntemi belirlenmelidir. (Van, 1993)

PF'lerle yapılan harmonik telafisi için filtre tasarımı, işletmenin konfigürasyonu değiştiğinde geçersiz olur ve yeni tasarım gerektirir. Aktif filtrede ise bu durum yoktur ve oluşan her harmonik için filtreleme işlemi yapılır. Ayrıca PF'lerin şebekeye uyumlu hale getirilmesi çok zordur. Aktif filtreler ise sisteme kolayca entegre edilebilirler.

Aktif filtreler paralel aktif filtre (PAF) ve seri aktif filtre (SAF) olarak iki gruba ayrılır. PAF şebekeden çekilen akım harmoniklerinin telafisi için sisteme paralel bağlanır. SAF ise şebeke geriliminin telafisi için sisteme faz trafolarıyla seri bağlanır. Alçak ve orta gerilim sistemlerinde, akım harmoniklerinin etkileri, gerilim harmoniklerine nazaran daha tehlikeli olduğu için yapılan araştırmalar PAF üzerinde yoğunlaşmıştır. PAF ve SAF'lerin beraber kullanıldığı uygulamalar ise, maliyet ve karmaşık kontrol sistemleri nedeniyle tercih edilmezler. (Van, 1993)

Yükün ihtiyacı olan harmonikli akım bileşenlerini oluşturan PAF'ler, yükün ihtiyacı olan temel harmonik bileşen dışındaki harmonik akım bileşenlerini karşılayarak, şebekeden harmoniksiz akımların çekilmesini sağlar.

Şekil 5.3'te PAF'nin işlevinin gerçekleştirilmesi bulunmaktadır.



Şekil 5.3 Aktif filtre kullanılarak harmonik akımlarının etkisinin giderilmesi

6. HARMONİKLİ DEVRELERDE GÜÇ FAKTÖRÜ ve DÜZELTİLMESİ

6.1 Giriş

Günümüzde elektrik enerjisinin neredeyse tamamı alternatif enerji olarak üretilip dağıtılır. Tüketicilerin şebekeden çektiği I akımının aktif ve reaktif olmak üzere 2 bileşeni bulunur. Aktif akımın oluşturduğu aktif güç, tüketiciler tarafından faydalı hale getirilebilir; örneğin motorlarda mekanik güce, ısı tüketicilerinde termik güce ve aydınlatma tüketicilerinde aydınlatma gücüne dönüşür. Reaktif akımın meydana getirdiği reaktif güç ise faydalı hale getirilemediği gibi, elektrik tesislerinde istenmeyen durumlara sebep olabilir. Generatörleri, transformatörleri, hatları lüzumsuz yere işgal eder, ayrıca ilave ısı kayıplarına ve gerilim düşümlerine sebep olur. Aktif güç enerjisi normal sayaçlarla tespit edilebildiği halde, reaktif güç enerjisi tesbitinde ayrı bir reaktif güç sayacına ihtiyaç duyulur.

Reaktif güç ihtiyacını karşılamak için reaktif gücün bir yerde üretilmesi gerekir. Bunun için en eski ve en klasik yol, aktif güç gibi reaktif gücün de senkron generatörler tarafından üretilmesidir. Bu da generatör uyarımının artırılması ile generatörün endüktif reaktif güç verecek duruma getirilmesi ile gerçekleştirilir.

Tüketicilerin şebekeden çektikleri endüktif gücün, kapasitif yük çekmek suretiyle özel bir reaktif güç üreticisi tarafından dengelenmesine “kompanzasyon” denir. Böylece tüketicinin şebekeden çektiği reaktif güç çok azalır.

Reaktif güç üretimi için iki işletme aracından faydalanılabilir: Dinamik faz kaydırıcılar ve kondansatörler. Dinamik faz kaydırıcıların başında aşırı uyarılmış senkron makineler gelir. Genel olarak santrallerden gelen enerji nakil hatlarının sonunda ve tüketim merkezlerinin başında şebekeye bir senkron makine paralel bağlanır ve bölgenin reaktif güç ihtiyacı bu makine ile sağlanır. Reaktif güç üretiminde statik faz kaydırıcı olarak adlandırılan kondansatörlerin üstünlükleri ise azımsanamayacak kadar çoktur. Kondansatörlerin kayıpları ve bakım masrafları yok denecek kadar azdır. Ayrıca kondansatörler ile istenen her güçte reaktif güç kaynağı oluşturulabildiği gibi bunları tüketicilerin yanlarına kadar götürüp hemen uçlarına bağlamak mümkündür. Bu nedenlerden ötürü kondansatörler kompanzasyon için en uygun araçtır.

Kondansatörler kuvvetli akım tesislerinde gittikçe artan bir önem kazanmaktadır. Kondansatörlerin fiyatta büyük bir artış olmadan her güçte imali mümkündür, tesisi oldukça kolaydır ve gerektiğinde kolaylıkla genişletilerek güçleri artırılabilir. Ayrıca bunlarda tüketici

ihtiyacına göre, rahat bir şekilde güç ayarı yapılabilir. Kondansatörlerin işletme emniyeti çok büyüktür, ömürleri uzundur, bakımları kolaydır, yerleştirilecekleri yerde hemen hemen hiçbir özellik aranmadığından yer temini de bir sorun yaratmaz. Gerekli kapasiteyi temin maksadı ile birçok kondansatör elemanı bir araya getirilerek istenen değerde bir grup oluşturulabilir.

Kondansatörler ile kompanzasyon seri ve şönt olmak üzere iki şekilde yapılmaktadır. Seri kompanzasyon, X_L endüktif reaktansı dengeleyebilecek X_C kapasitif reaktansı değerini sağlayacak bir kompanzasyon tesisinin temin edilmesi esasına dayanmaktadır. Sabit paralel bir kondansatör ünitesinin tesisi esasına dayanan şönt kompanzasyon ise en basit, en ucuz ve en kullanışlı kompanzasyon tesisidir.

Lineer olmayan yüklerin bağlı olduğu sistemlerde görülen harmonik bileşenler, kompanzasyon kondansatörleri üzerinde önemli etkilere sahiptir. Bu bakımdan kondansatörlerin bağlanacağı sistemler için şunlar söylenebilir:

- Harmonik bileşenler, kondansatörün nominal şartların dışında çalışmasına (akım, gerilim ve reaktif güç değerlerinin değişmesine) neden olmaktadır.
- Harmonik bileşenler içeren gerilimler, kondansatörün dielektrik malzemesinin zorlanmasına ve dielektrik kayıplarının artmasına yol açmaktadır.
- Sinüs biçimli besleme ile aynı efektif değerli sinüs biçimli olmayan besleme durumunda kondansatörün akım değeri ve reaktif güç değeri artış göstermektedir; yani kondansatör aşırı akım ve aşırı reaktif yüklerle yüklenmektedir. Bu ise kondansatörün ömrü bakımından son derece önemlidir.
- Harmonik derecesi arttıkça kondansatörde olumsuz etkiler artış göstermektedir. Büyük dereceli harmonik bileşenlerin küçük dereceli harmonik bileşenlere göre oluşturacağı aşırı akım ve aşırı reaktif güç değeri daha fazla olacaktır.
- Kondansatörler bağlı olduğu sistemde gerilim yükselmesine neden olacaklarından kondansatörler sisteme bağlanmadan önce harmonik analizi yapılmalı ve gerilim bozunumu belirlenmelidir.

Elektrik tesislerinde bahsi geçen kondansatör sistemleri ile yapılan reaktif güç kompanzasyonunun temel amacı sistemdeki güç faktörünü yasal düzenlemeler ile belirlenen

bir seviyeye çıkarmaktır. Bir devreye ait güç faktörü şu şekilde tanımlanmaktadır:

$$GF = \frac{P_k}{S_k} = \frac{P_k}{\sqrt{P_k^2 + Q_k^2}} \quad (6.1.)$$

6.2 Harmonikli Devrelerde Güç Faktörü

Sinüs biçimli besleme ve lineer elemanlardan oluşan güç sistemlerinde güç faktörünün düzeltilmesi basit bir ölçme ile yapılabilir iken sinüs biçimli olmayan kaynaktan beslenen veya lineer olmayan elemanlara sahip bir devrede güç kompanzasyonunda farklılıklar meydana gelmektedir. Sinüs biçimli olmayan büyüklükleri içeren bir sistemde güç faktörü düzeltimi yapmak için harmonik bileşenlerin de hesaba katılması gerekmektedir.

Harmoniklerin mevcut olduğu bir sistemde devreye ilave edilen kapasite değerinin artırılması ile her zaman güç faktörünü arttırmak mümkün değildir. Yapılan incelemelerden ve analizlerden lineer olmayan devrelerde elde edilen sonuçlar şu şekilde verilebilir:

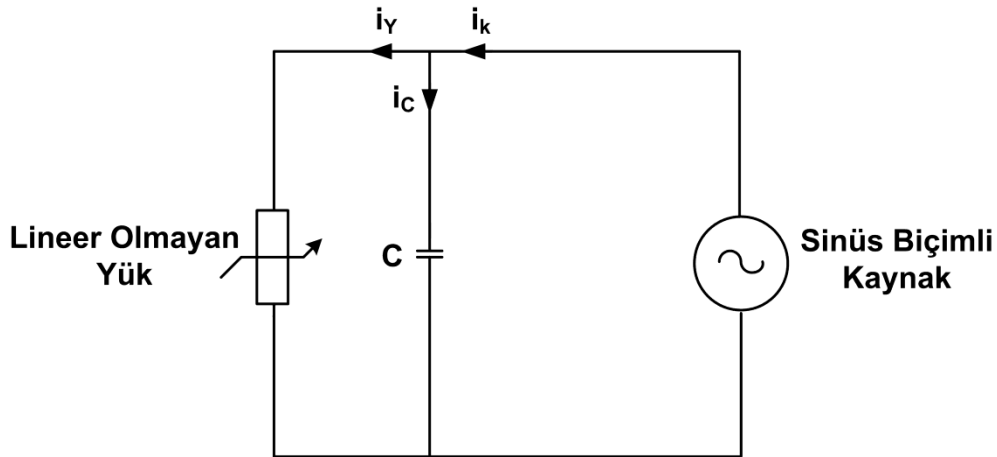
- Sinüs biçimli olmayan beslemeli lineer devrelerde güç faktörü tam olarak 1 değerine çıkarılamamaktadır. Bunun nedeni besleme gerilimindeki harmoniklerin varlığıdır. Eğer harmonik bileşenler, temel bileşene yakın değerler alıyorsa güç faktörünün değişim aralığı sınırlı olmaktadır.
- Sinüs biçimli beslemeli lineer olmayan devrelerde güç faktörünü tam olarak 1 değerine çıkarmak sadece kompanzasyonun yapılması ile mümkün olmamaktadır. Bunun nedeni akım harmoniklerinin meydana getirdiği distorsiyon gücünün değerinin büyük olmasıdır. Böyle bir durumda filtre kullanmak yararlı olacaktır.
- Sinüs biçimli olmayan beslemeli lineer olmayan yükler içeren devreler, lineer olmayan sistemlerin en genel durumudur. Böyle bir devrede gerilimdeki harmonikler ve akımdaki harmonikler yüzünden sadece kapasite bağlamak sureti ile güç faktörünün 1 değerine çıkarılması zordur, mümkün olmadığı da söylenebilir.
- Yapılacak güç kompanzasyonu için mutlaka optimum kapasite değeri belirlenmelidir. Çünkü belli bir kapasite değerinden sonra güç faktörü artmayacaktır. Bu yüzden gereksiz yere kapasite kullanılacaktır, bu da ekonomik değildir.
- Güç faktörü düzeltiminde sistemdeki aktif güç kaybının, reaktif güç kaybının minimize edilmesi mutlaka düşünülmesi gereken hususlardandır.

- Güç faktörü için istenen değerlerin üstüne çıkılmadığında filtre devreleri kullanılmalıdır.
- Güç faktörünün düzeltiminde mümkün olabilecek en büyük değeri elde ederken toplam harmonik bozunumundaki değişimlerin de göz önüne alınması gereklidir. Harmonik bileşenlerin analizi yapılarak belirlenecek toplam harmonik bozunumu değerinin mutlaka incelenmesi ve güç faktörü ile bozunum değeri arasında optimum çalışma şartlarının bulunması gerekmektedir.

Lineer elemanlardan ve sinüs biçimli besleme kaynağından oluşan devrelerin güç faktörü düzeltimi bilindiği gibi reaktif gücün sıfır veya sıfıra yakın bir değere getirilmesi ile mümkündür. Bunun için genellikle endüktif yüklü devreler için kapasite elemanının kullanımı gerekmektedir. Temel bileşenin bulunduğu bu tür devrelerde işlem çok basit olmasına rağmen temel bileşen dışında bileşenlerin (3. harmonik, 5. harmonik, ..., n. harmonik) bulunması halinde güç faktörü düzeltimi biraz daha zorlaşmaktadır. (Bayram,2000)

6.2.1 Sinüs Biçimli Beslemeli Lineer Olmayan Devre İçin (Shepherd, 1979)

Sinüs biçimli besleme kaynağına sahip bir devrede lineer olmayan karakteristiğe sahip bir yük elemanı bulunması durumunda (Şekil 6.1) güç faktörünün düzeltimi aşağıdaki gibidir. Şekilden de görüldüğü gibi endüktif karaktere sahip olduğunu kabul edeceğimiz yükün kompanzasyonunu sağlamak için bir C kapasitesi lineer olmayan yükün uçlarına paralel olarak bağlanmıştır.



Şekil 6.1 Sinüs biçimli kaynak ve lineer olmayan yüke sahip devrenin şönt kompanzasyonu

Kaynak geriliminin ani değeri

$$v = V_m \sin \omega t \quad (6.2)$$

olarak uygulandığında, bu devrede güç faktörünü maksimum yapacak şönt kapasite değeri şu şekildedir;

$$C_k = \frac{I_{Y1} \cdot \sin \varphi_{Y1}}{\omega V} \quad (6.3)$$

Elde edilen bu değer yerine konulursa güç faktörünün maksimum değeri;

$$\cos \varphi = \frac{I_{Y1} \cdot \cos \varphi_{Y1}}{\sqrt{I_{Y1}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{Y1} + \sum_2^n I_{Yn}^2}} \quad (6.4)$$

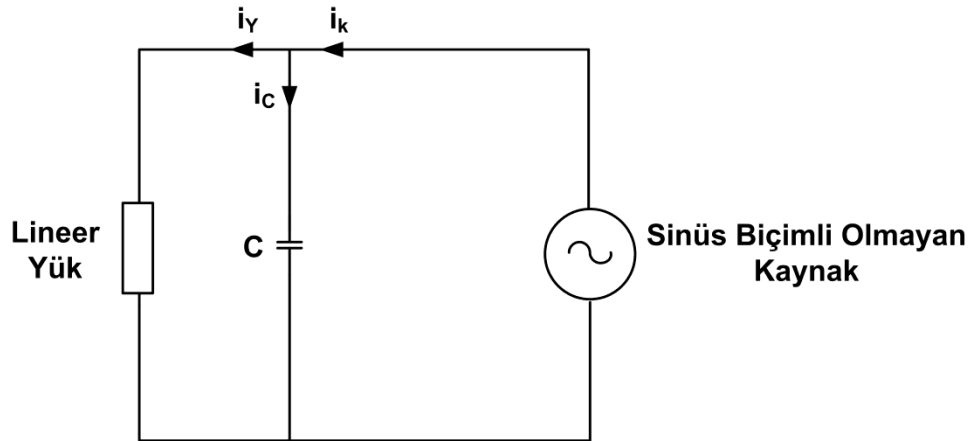
olarak bulunmuş olur.

6.2.2 Sinüs Biçimli Olmayan Beslemeli Lineer Devre İçin (Shepherd, 1979)

Herhangi bir devrede besleme kaynağının sinüs biçimli olmaması ve bu kaynaktan beslenen endüktif yükün lineer karakteristiğe sahip olması durumunda güç faktörü düzeltimi Şekil 6.2’de yapılmaktadır.

Şekil 6.2’de bir C kapasitesi periyodik sinüs biçimli olmayan besleme kaynağına paralel bağlanmıştır ve yükün de direnç ile endüktanstan oluştuğu kabul edilmiştir.

Bu devredeki sinüs biçimli olmayan kaynak geriliminin ani değerinin ifadesi;



Şekil 6.2 Sinüs biçimli olmayan kaynak ve lineer yüke sahip devrenin şönt kompanzasyonu

Uygulanan gerilim;

$$v = \sqrt{2} \sum_1^n V_n \cdot \sin(n \cdot \omega t + \alpha_n) \quad (6.5)$$

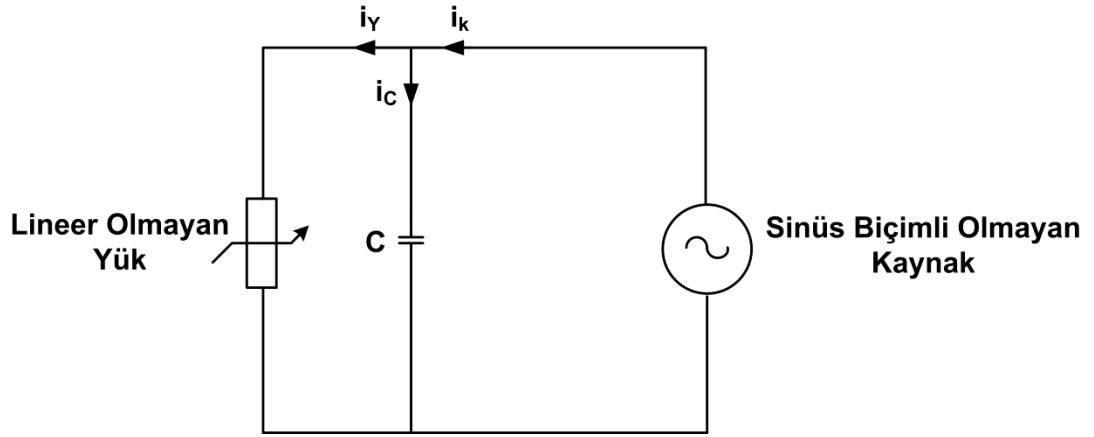
olmak üzere,

bu devrede maksimum güç faktörü aşağıdaki gibi elde edilir;

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{P}{S_{\min}} = \frac{\sum_1^n V_n \cdot I_{Yn} \cdot \cos \varphi_{Yn}}{\left(\sum_1^n V_n^2 \right) \cdot \left[\sum_1^n \left[\left(\frac{V_n \cdot n \cdot \sum_1^n V_n \cdot I_{Yn} \cdot n \cdot \sin \varphi_{Yn}}{\sum_1^n V_n^2 \cdot n^2} - I_{Yn} \cdot \sin \varphi_{Yn} \right)^2 + I_{Yn}^2 \cdot \cos^2 \varphi_{Yn} \right] \right]} \quad (6.6)$$

6.2.3 Sinüs Biçimli Olmayan Beslemeli Lineer Olmayan Devre İçin (Shepherd, 1979)

Besleme kaynağı sinüs biçimli olmayan devrede lineer olmayan karakteristiğe sahip bir endüktif yük olması durumunda Şekil 6.3'teki gibidir. Endüktif karaktere sahip yükün kompanzasyonunu sağlamak için bir C kapasitesi sinüs biçimli olmayan gerilim kaynağına paralel olarak bağlanmıştır.



Şekil 6.3 Sinüs biçimli olmayan kaynak ve nonlinear yüke sahip devrenin şönt kompanzasyonu

Devredeki sinüs biçimli olmayan kaynak geriliminin ani değeri;

$$v = \sqrt{2} \cdot \left[\sum_1^{n1} V_{n1} \cdot \sin(n_1 \cdot \omega t + \alpha_{n1}) + \sum_1^{n2} V_{n2} \cdot \sin(n_2 \cdot \omega t + \alpha_{n2}) \right] \quad (6.7)$$

olmak üzere,

bu devrede en büyük güç faktörü;

$$\cos \varphi_{\max} = \frac{\sum_1^{n1} V_{n1} \cdot I_{Yn1} \cdot \cos \varphi_{Yn1}}{S_{k \min}} = \frac{\sum_1^{n1} V_{n1} \cdot I_{Yn1} \cdot \cos \varphi_{Yn1}}{\sqrt{\left(\sum_1^{n1} V_{n1}^2 + \sum_2^{n2} V_{n2}^2 \right) \cdot I_{k \min}^2}} \quad (6.8)$$

olarak bulunur.

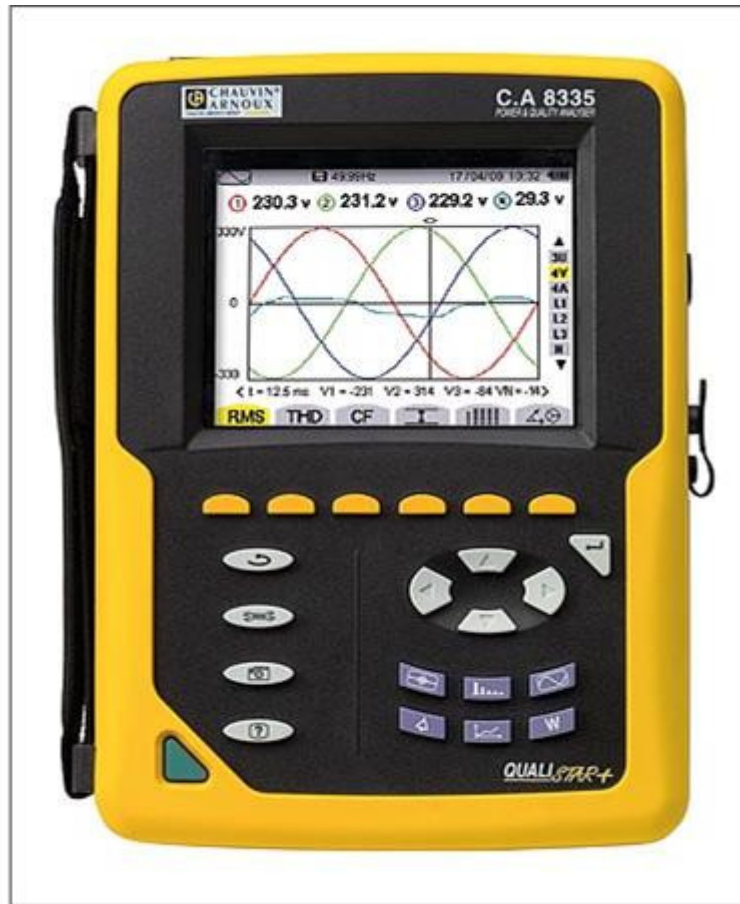
7. SAYISAL UYGULAMA

7.1 Giriş

Bu bölümde örnek olarak incelenen bir elektrik enerji sistemi tüketicisinin, filtreli kompanzasyon sistemi ile tesis edilmesi durumunda, sistemin davranışı incelenmiştir. Yapılan inceleme sonucunda; sistemin akımı, gerilimi, THD değerleri kullanılarak harmonik analizi ve hesaplamaları yapılmıştır.

7.2 Ölçüm Cihazı

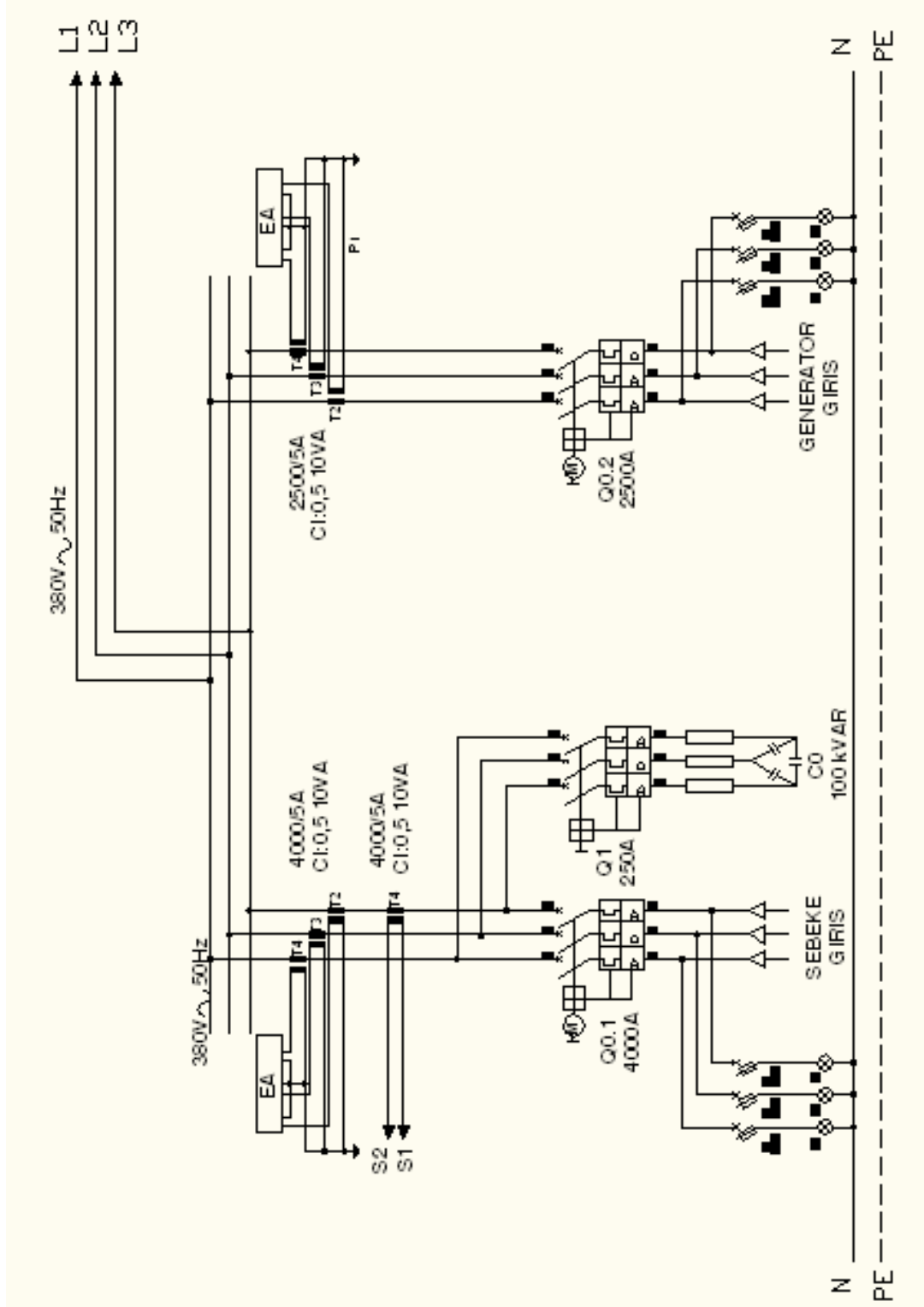
Ölçümler, Chauvin Arnoux marka CA8335 3 fazlı portatif enerji analizörü ile gerçekleştirilmiştir (Şekil 7.1). A.G. tarafından cihaza bir akım ve gerilim referansı verilerek; akım ve gerilim harmonikleri, gerilim ve akım dalga şekilleri kaydedilmiştir.



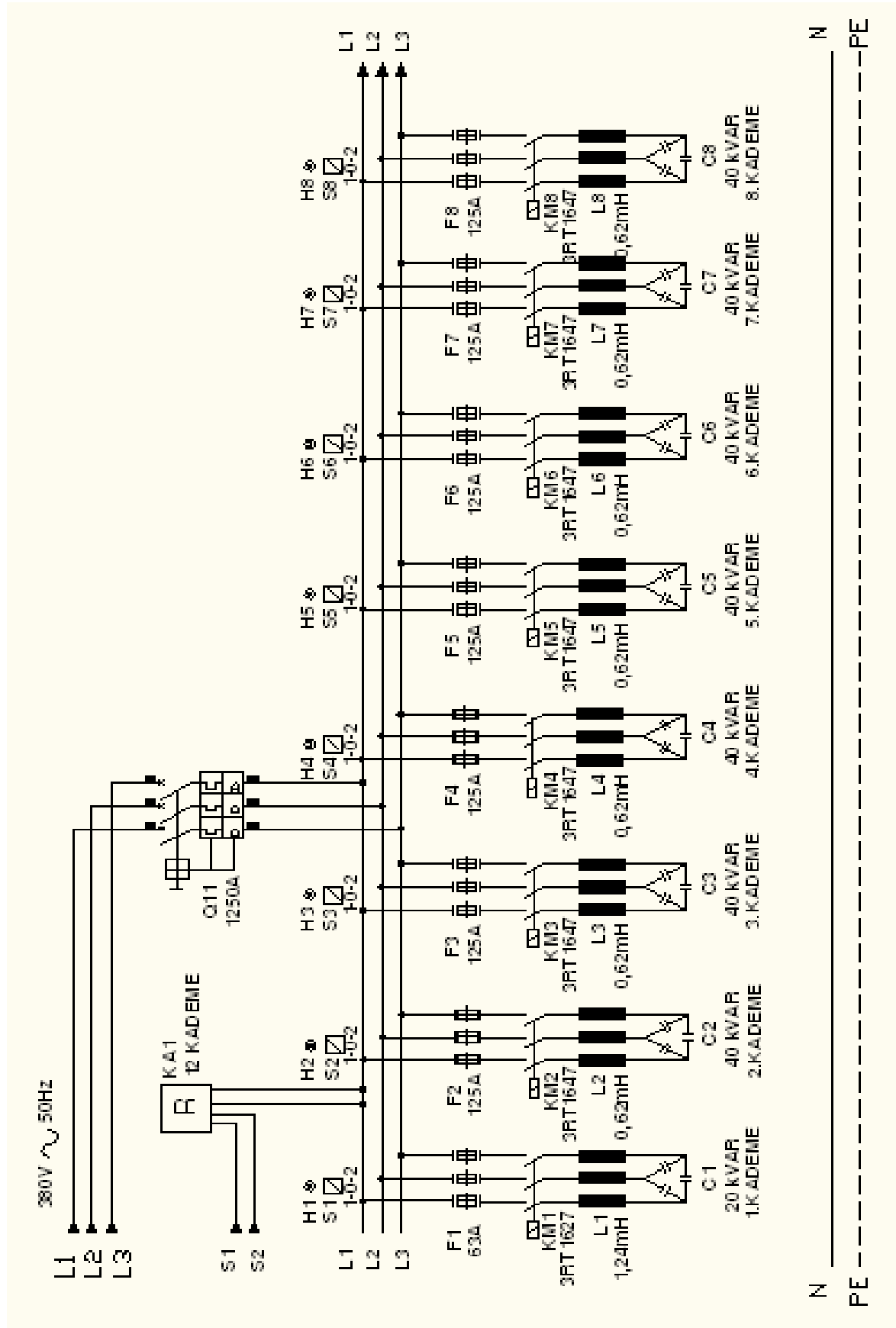
Şekil 7.1 Ölçüm Cihazı

7.3 Örnek Sistem

Örnek olarak incelenen sistem bir tekstil fabrikasıdır. Enerjisini 34,5kV'luk O.G. transformatöründen almaktadır. Transformatörün gücü 2000kVA olup yağlı bir transformatördür. Tesise ait şemalar Şekil 7.2 – 7.3 (a) – 7.3 (b)'de belirtilmiştir.

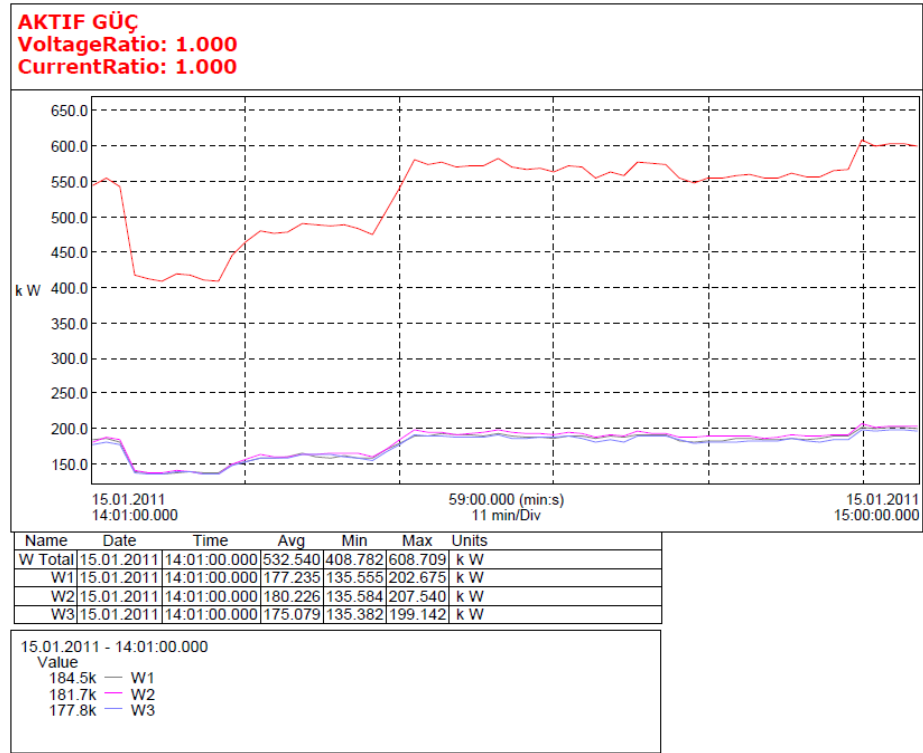


Şekil 7.2 Örnek sisteme ait şebeke ve generatör besleme şeması

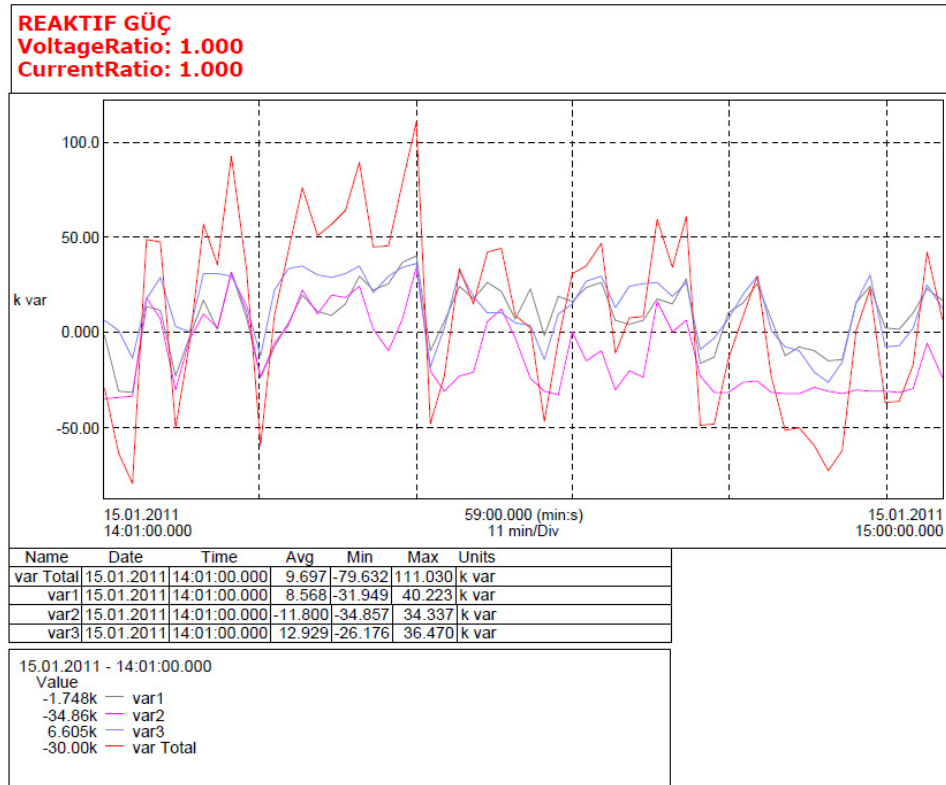


Şekil 7.3 (a) Örnek sisteme ait filtreli güç kompanzasyonu şeması (1.-8. Kademe)

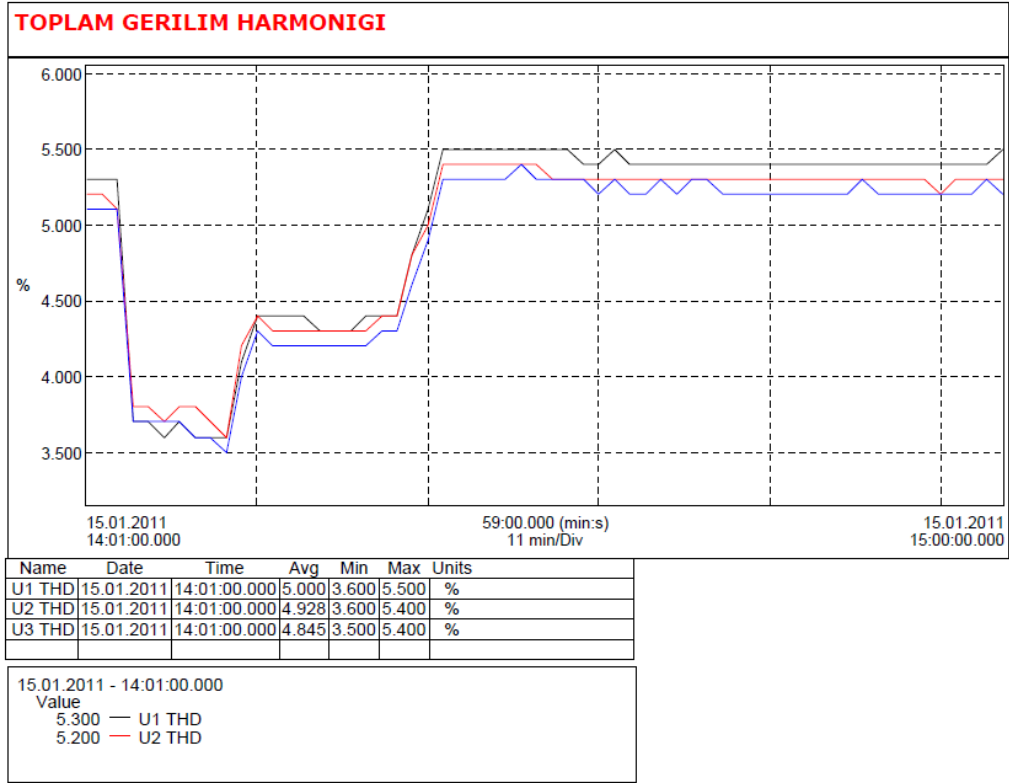
7.4.1 Filtresiz Kompanzasyon Durumunda Ölçüm Sonuçları



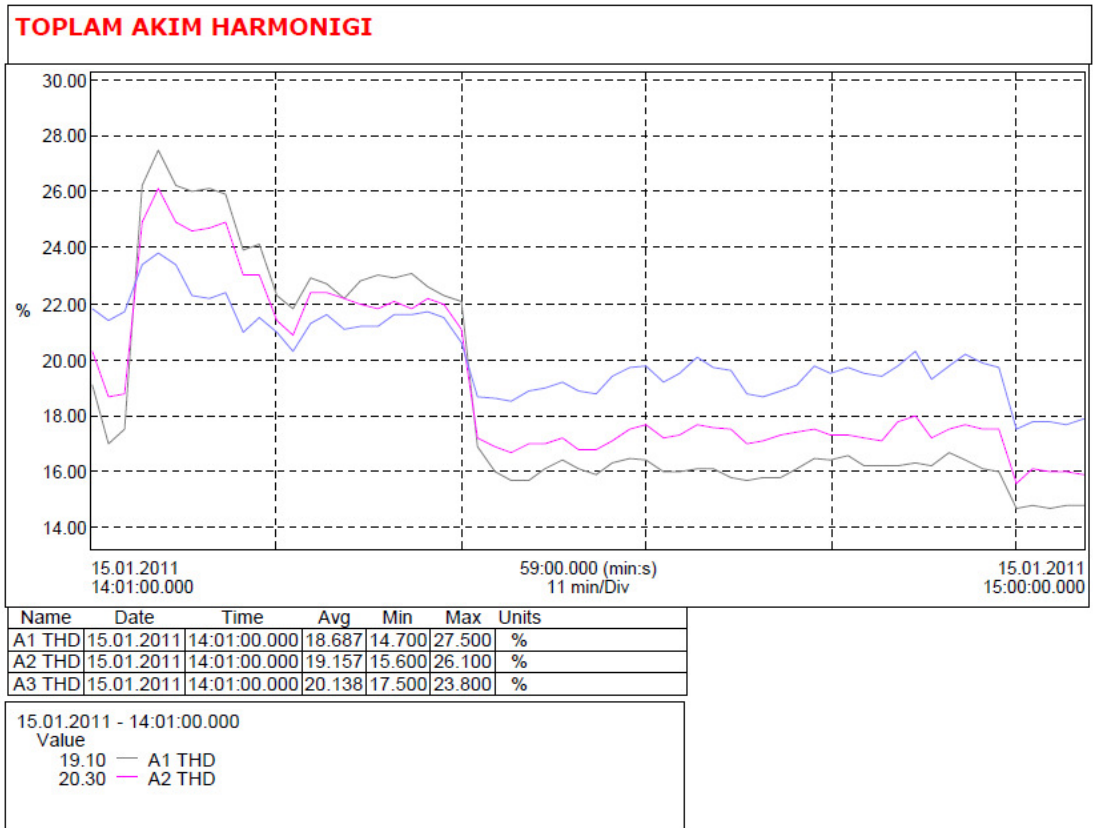
Şekil 7.4 Filtresiz kompanzasyonda aktif güç grafiği



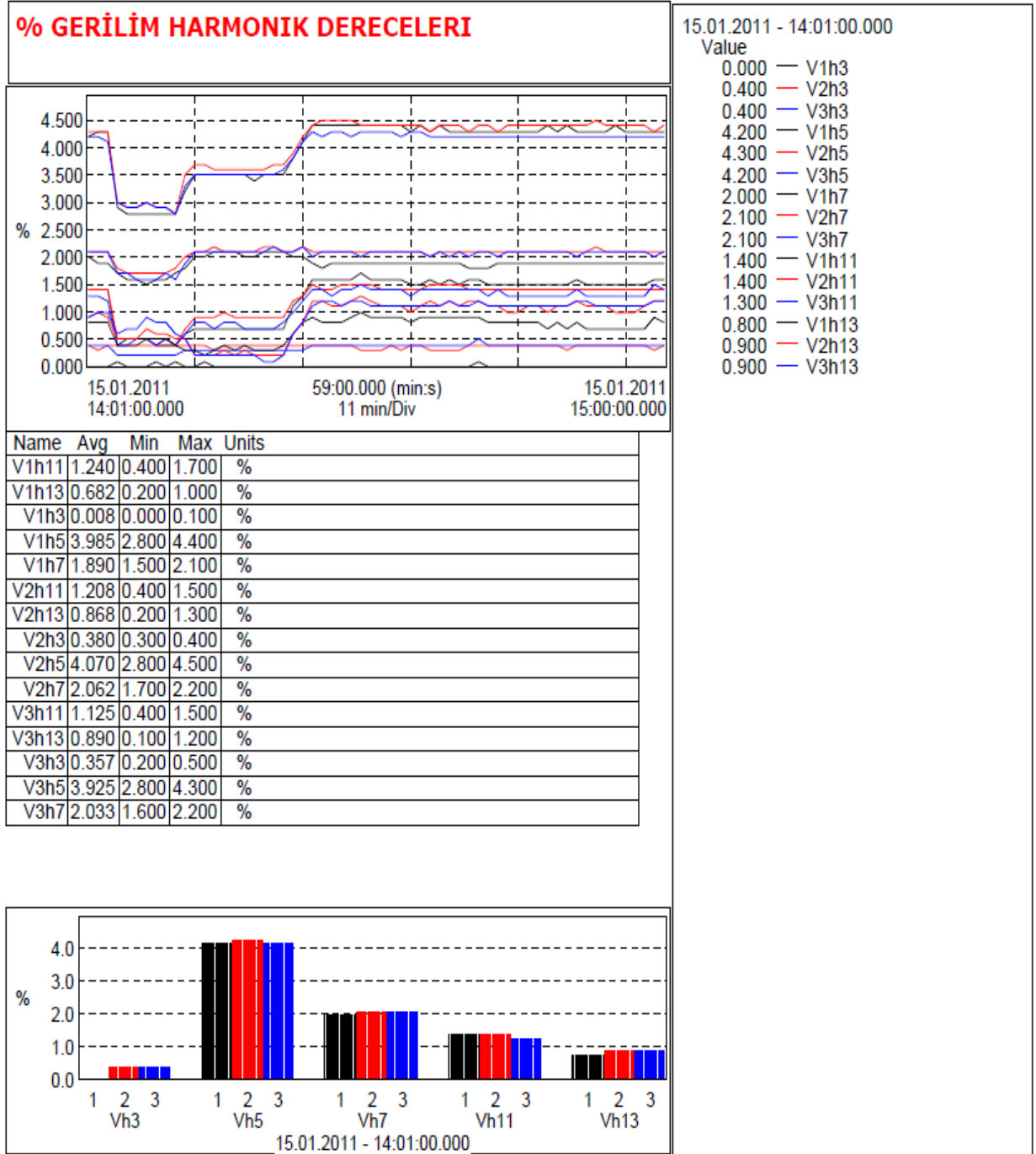
Şekil 7.5 Filtresiz kompanzasyonda reaktif güç grafiği



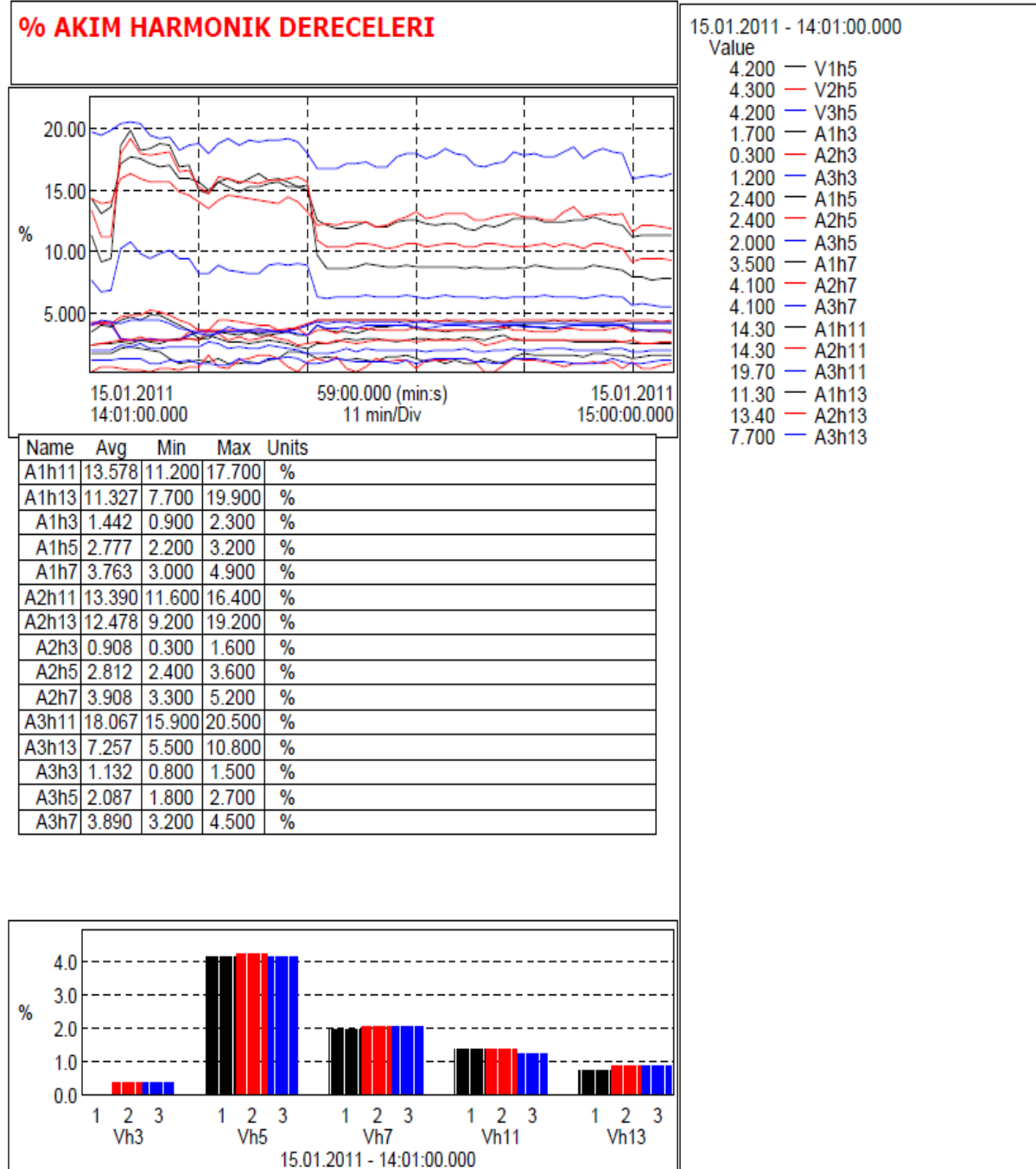
Şekil 7.6 Filtresiz kompanzasyonda gerilime ait toplam harmonik bozunumu grafiği



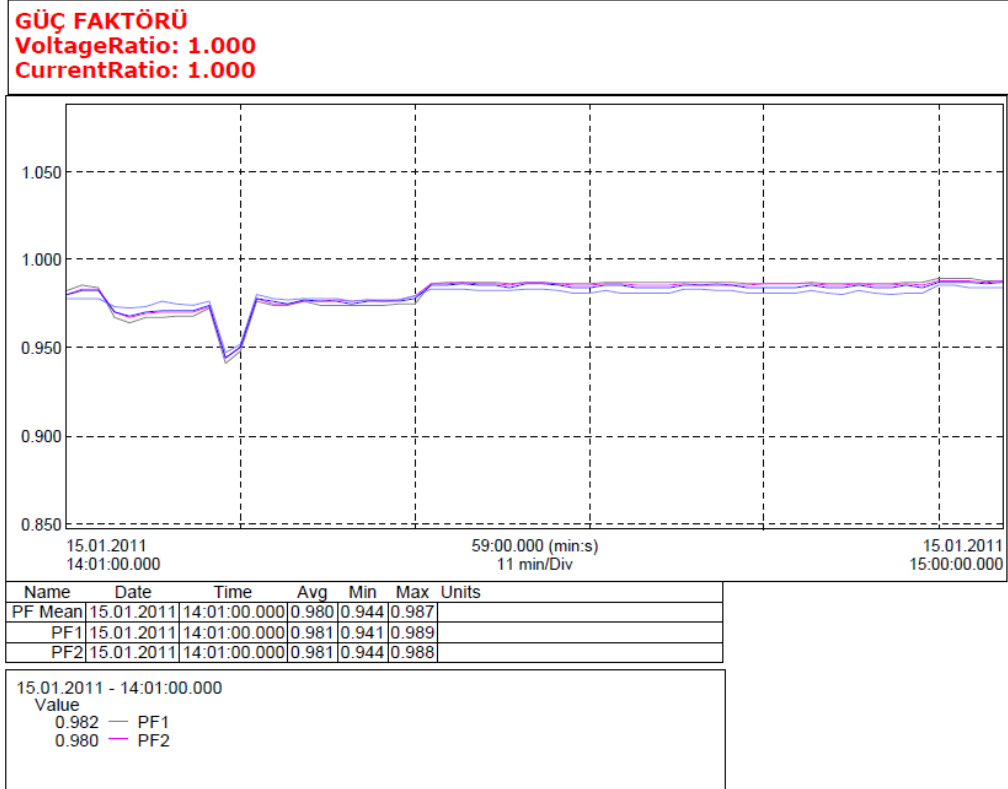
Şekil 7.7 Filtresiz kompanzasyonda akıma ait toplam harmonik bozunumu grafiği



Şekil 7.8 Filtresiz kompanzasyonda gerilim harmonik bileşenlerinin yüzdeleri grafiği

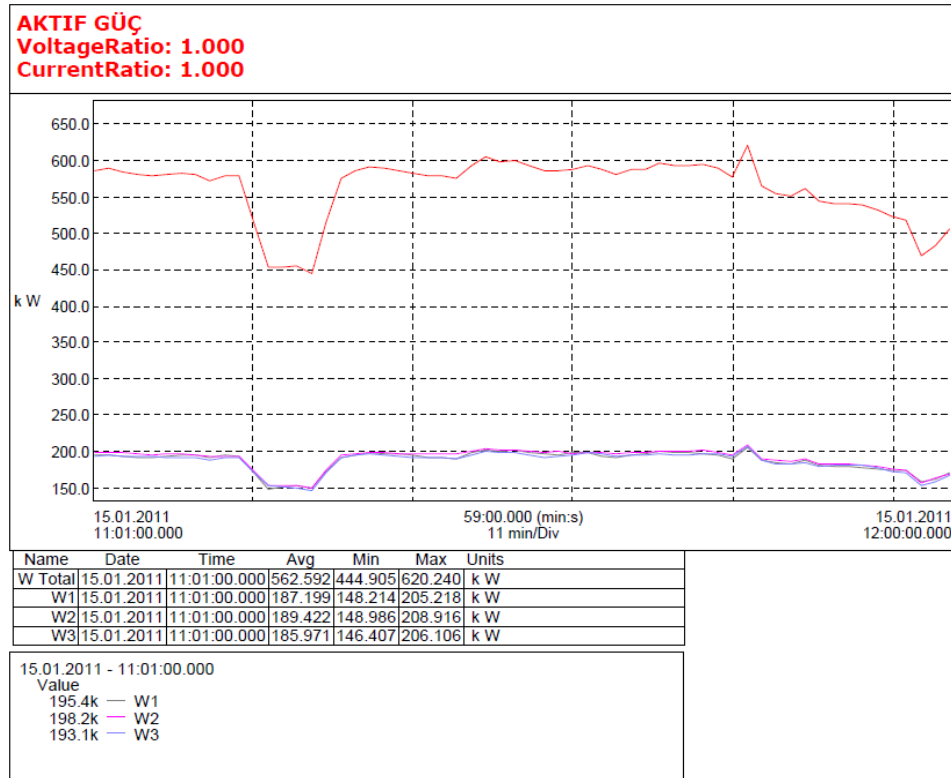


Şekil 7.9 Filtresiz kompanzasyonda akım harmonik bileşenlerinin yüzdeleri grafiği

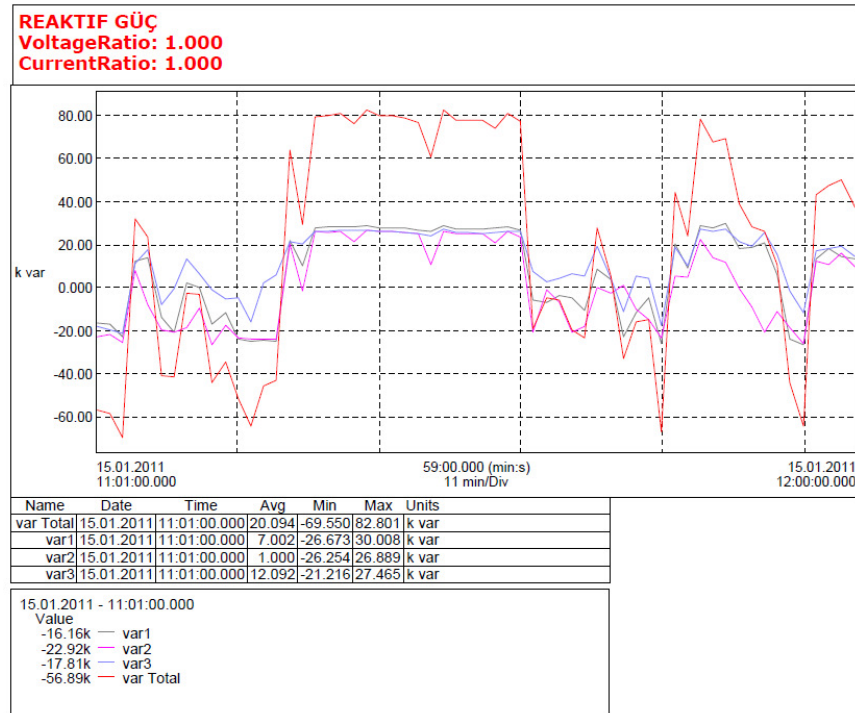


Şekil 7.10 Filtresiz kompanzasyonda güç faktörü grafiği

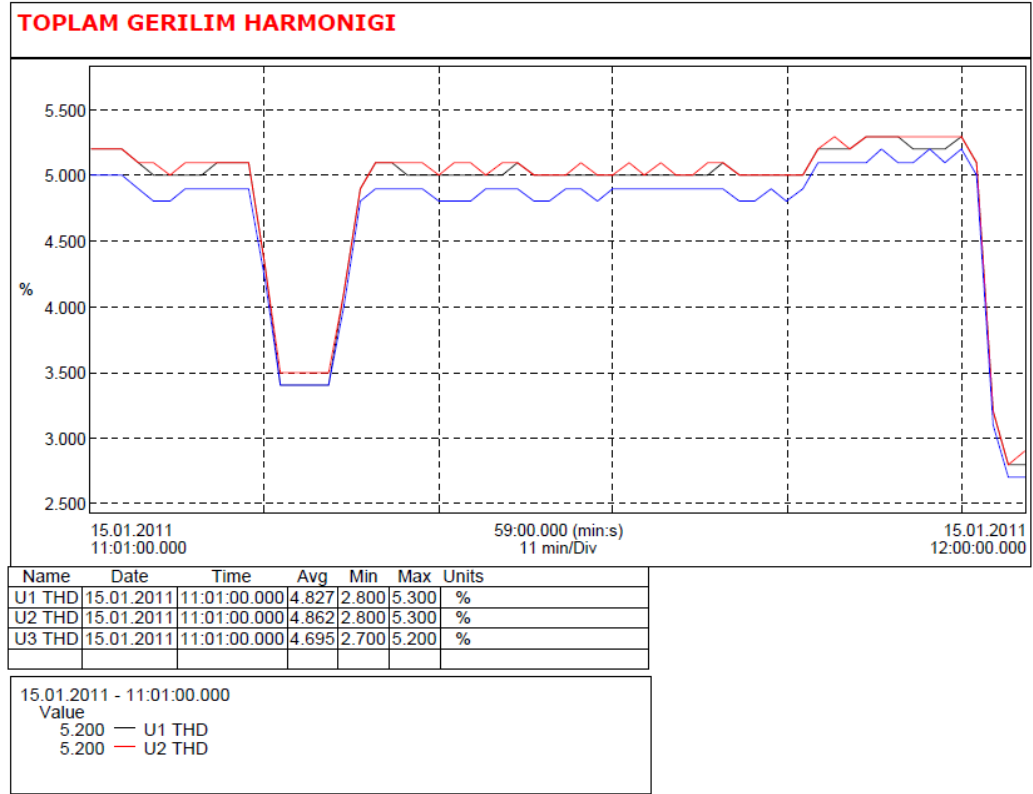
7.4.2 Filtreli Kompanzasyon Durumunda Ölçüm Sonuçları



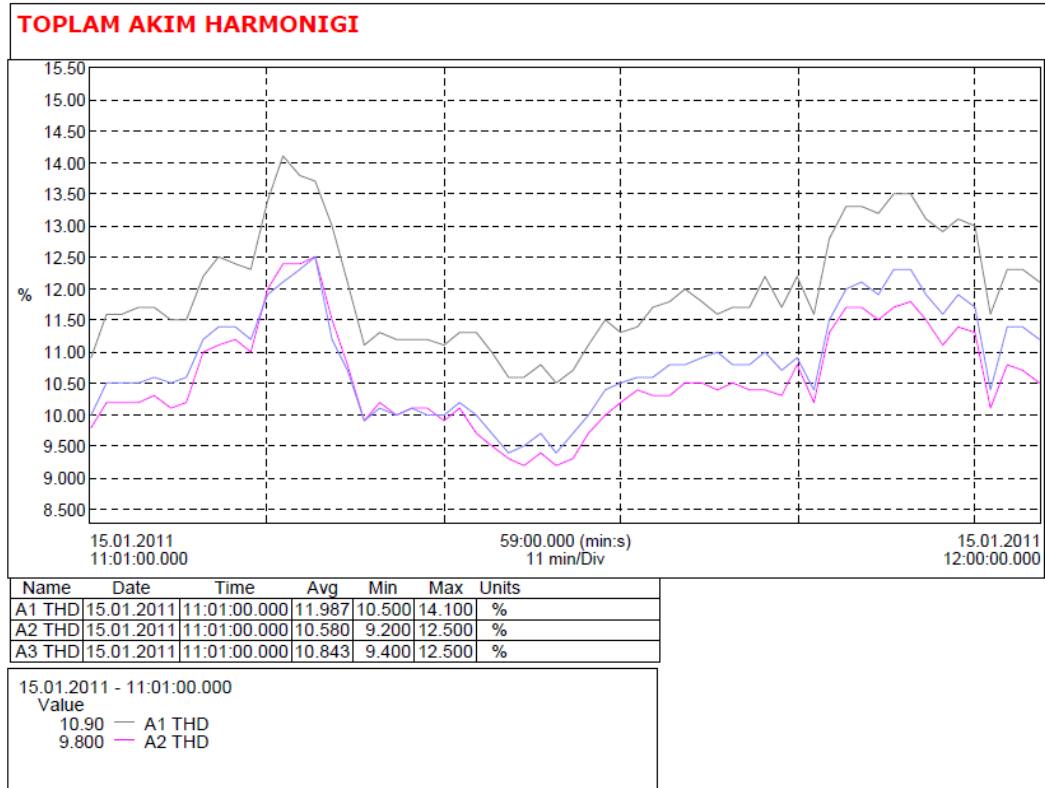
Şekil 7.11 Filtreli kompanzasyonda aktif güç grafiği



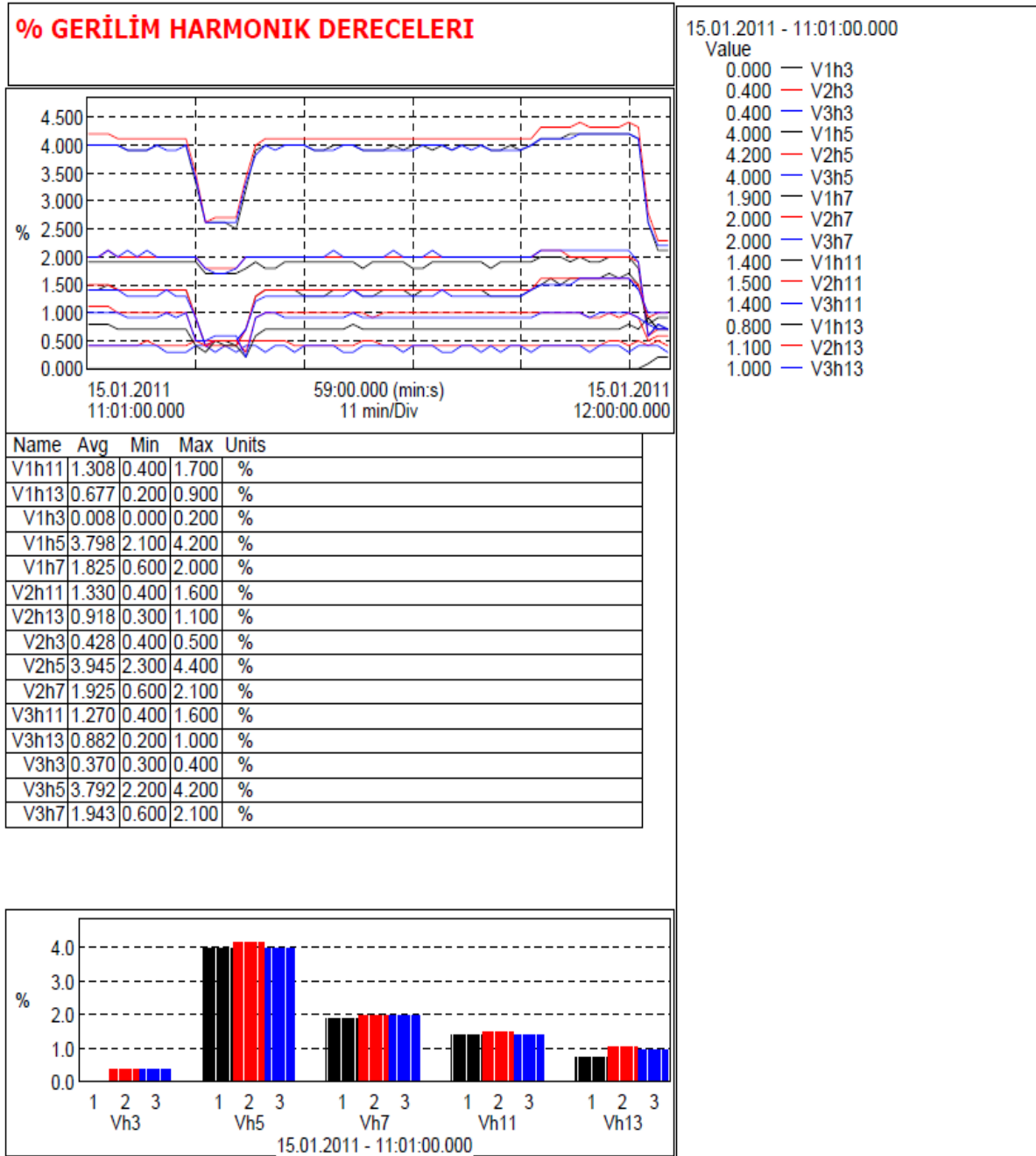
Şekil 7.12 Filtreli kompanzasyonda reaktif güç grafiği



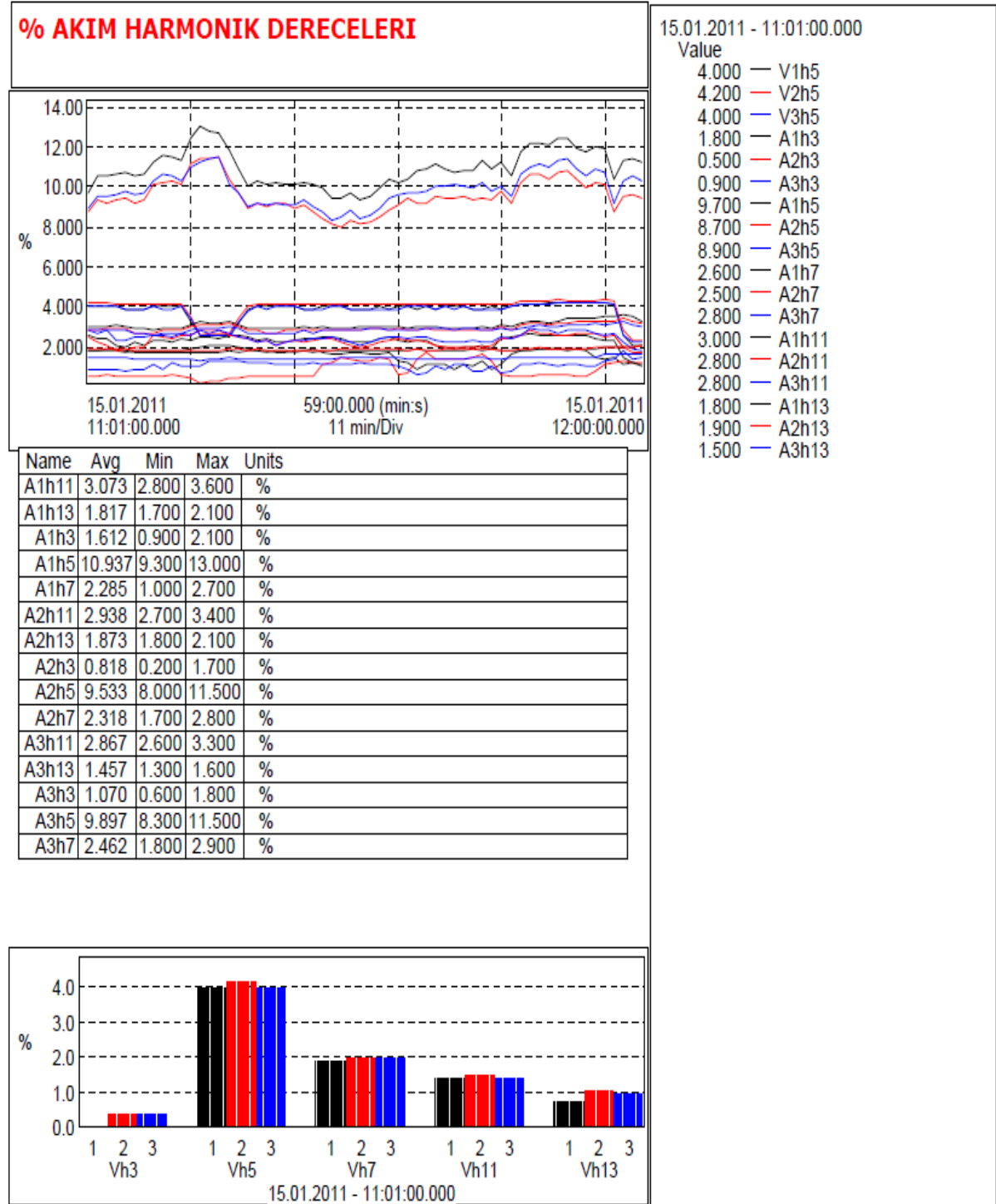
Şekil 7.13 Filtreli kompanzasyonda gerilime ait toplam harmonik bozunumu grafiği



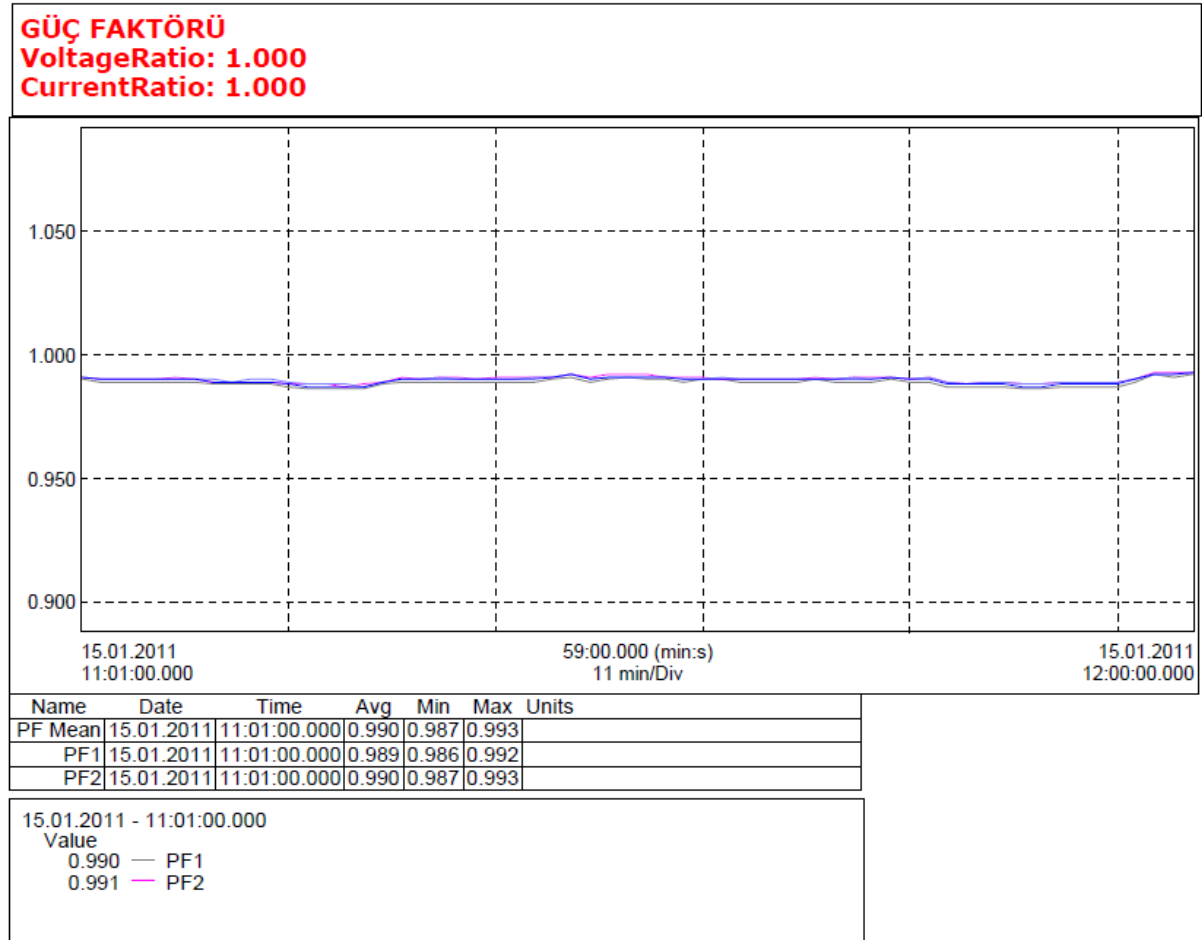
Şekil 7.14 Filtreli kompanzasyonda akıma ait toplam harmonik bozunumu grafiği



Şekil 7.15 Filtreli kompanzasyonda gerilim harmonik bileşenlerinin yüzdeleri grafiği



Şekil 7.16 Filtreli kompanzasyonda akım harmonik bileşenlerinin yüzdeleri grafiği



Şekil 7.17 Filtreli kompanzasyonda güç faktörü grafiği

7.5 Örnek Sistemin Modellenmesi ve Doğrulanması

Bir önceki bölümde ölçümü gerçekleştirilen sisteme ait modelleme gerçekleştirilerek sistem üzerinde analiz yapılmıştır. Bu analizde, harmonik ve güç faktörü değerlerinin yanı sıra 3 fazlı sisteme ait her bir fazdaki temel bileşen ve harmonik akım ve gerilimlerinin değerleri model üzerinde analitik olarak elde edilmiştir. Örnek sisteme ait elektrik büyüklüklerin elde edilmesinde, eşitlik 1.12 ve eşitlik 6.1 kullanılmıştır. Hesaplamalarda MATLAB paket programı kullanılmış olup buna ait m-file Ek-1’de verilmiştir. Gerçekleştirilen m-file ile elde edilen hesaplama sonuçları ve ölçüm sonuçları Çizelge 7.1 – Çizelge 7.6’da verilmiştir.

Çizelge 7.1. Filtresiz durum için akıma ait değerler

Harmonik Bileşeni	Hesaplanan değer [A]		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3
Temel bileşen	775,3238	787,2231	764,3093
3	11,1802	7,1480	8,6520
5	21,5307	22,1367	15,9511
7	29,1754	30,7647	29,7316
11	105,2735	105,4092	138,0878
13	87,8209	90,3575	55,4659

Çizelge 7.2. Filtresiz durum için gerilime ait değerler

Harmonik Bileşeni	Hesaplanan değer [V]		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3
Temel bileşen	396,3450	396,9674	395,9831
3	0,0317	1,5081	1,4137
5	15,7944	16,1525	15,5423
7	7,4909	8,1834	8,0503
11	4,9147	4,7942	4,4548
13	2,7031	3,4448	3,5242

Çizelge 7.3. Filtresiz durum için THD ve güç faktörü değerleri

Değişken	Hesaplanan değer			Ölçülen değer		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3	Faz 1	Faz 2	Faz 3
THD _I	%18,3471	%18,3041	%19,9962	%18,687	%19,157	%20,138
THD _V	%4,6320	%4,8139	%4,6609	%5	%4,928	%4,845
Güç faktörü	%99,81			%98		

Çizelge 7.4. Filtreli durum için akıma ait değerler

Harmonik Bileşeni	Hesaplanan değer [A]		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3
Temel bileşen	820,1733	828,8575	814,3636
3	13,2212	6,7801	8,7137
5	89,7024	79,0150	80,5976
7	18,7410	19,2129	20,0496
11	25,2039	24,3518	23,3478
13	14,9025	15,5245	11,8653

Çizelge 7.5. Filtreli durum için gerilime ait değerler

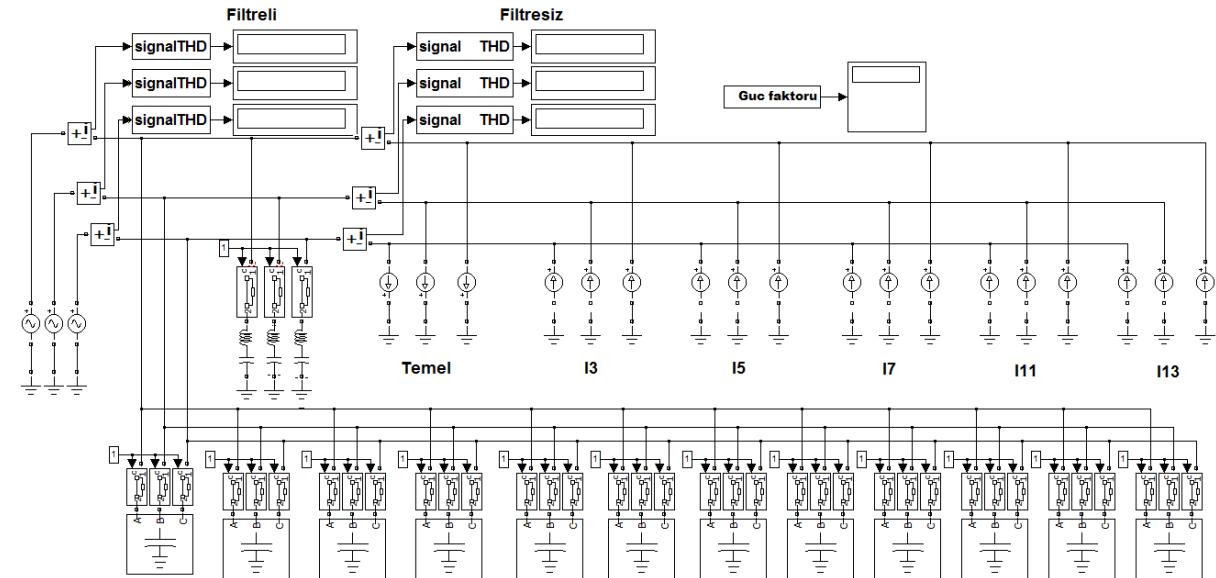
Harmonik Bileşeni	Hesaplanan değer [V]		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3
Temel bileşen	396,7679	396,9443	396,1485
3	0,0317	1,6989	1,4657
5	15,0692	15,6595	15,0220
7	7,2410	7,6412	7,6972
11	5,1897	5,2794	5,0311
13	2,6861	3,6439	3,4940

Çizelge 7.6. Filtreli durum için THD ve güç faktörü değerleri

Değişken	Hesaplanan değer			Ölçülen değer		
	Faz 1	Faz 2	Faz 3	Faz 1	Faz 2	Faz 3
THD _I	%11,8399	%10,4432	%10,7471	%11,987	%10,58	%10,843
THD _V	%4,4637	%4,6972	%4,5478	%4,827	%4,862	%4,695
Güç faktörü	%99,94			%99		

Çizelgelerde de görüldüğü üzere hesaplanan değerler ile uygulama sonucunda ölçülen değerler birbiri ile paralellik göstermektedir. MATLAB/Simulink ortamında sistemin modellenmesi gerçekleştirilmek üzere Şekil 7.18’de görülen diyagram oluşturulmuştur. Oluşturulan bu model ile ölçümü yapılan sistemin davranışı incelenmiştir. Şekil 7.18’deki simülasyon çalışmasında sinüs biçimli bir beslemenin olduğu 3 fazlı bir sisteme Çizelge 7.1’de filtresiz durum için hesaplanan harmonik akım değerleri enjekte edilmiştir. Böylece aynı harmonik bileşenler için filtreleme devresinin etkinliği araştırılmıştır. Ölçümü gerçekleştirilen devredeki filtrenin performansı, bahsi geçen harmoniklerin eliminasyonu açısından simülasyon ortamında da test edilmiştir. Şekil 7.18’de açıkça görüldüğü üzere

filtrelenmiş durumdaki THD_I değeri, filtrelenmemiş duruma göre önemli oranda azaltılabilmektedir. Bu çalışma ile birlikte de sistem performansı hem deneysel, hem de bilgisayar ortamında değerlendirilmiş olmaktadır.



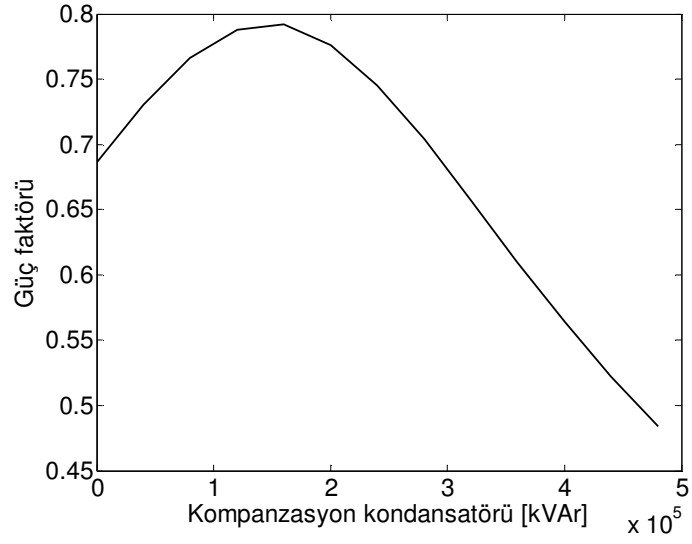
Şekil 7.18 Uygulamada ele alınan sistem için oluşturulan kompanzasyonun da dikkate alındığı simülasyon diyagramı

7.6 Örnek Sistem İle İlgili Analizler

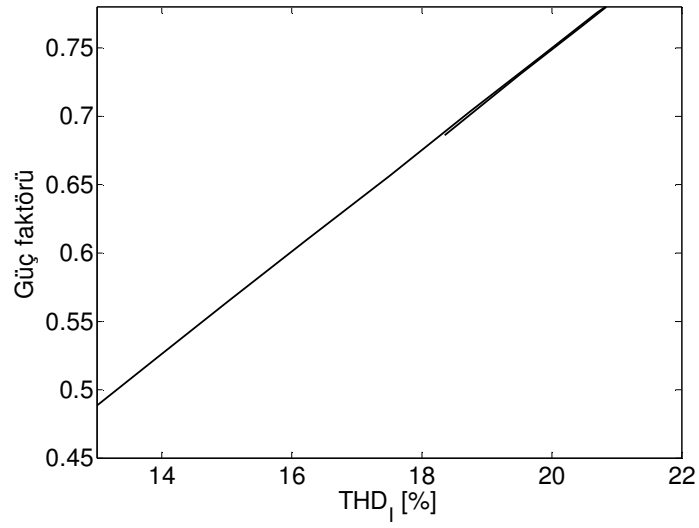
Örnek sistem üzerinde yapmış olduğumuz ölçümler ve modelleme sonucu elde edilen hesaplama değerleri büyük bir uyumluluk göstermiştir. Bu durum modelleme ile çeşitli analizlerin gerçekleştirilmesinin ve sistem davranışının ortaya konulmasının mümkün olduğunu göstermektedir.

Örnek sistemde çeşitli yüklenmeler için güç faktörünün nasıl değiştiğini ortaya koymak bakımından yapılan analizde Şekil 7.19 ile Şekil 7.20 elde edilmiştir. Bu şekillerde görüldüğü gibi sistemde filtresiz durumda yük artışı sonucu devreye alınan kompanzasyon kondansatörü gücü arttığında, güç faktörü belli bir değere kadar artış göstermektedir. Maksimum güç faktöründen sonra kondansatör güçlerinin artması ile maalesef güç faktörü artmamakta aksine azalmaktadır. Filtresiz durumda güç faktörü değerinin artması ile toplam harmonik bozunumu da artış göstermektedir.

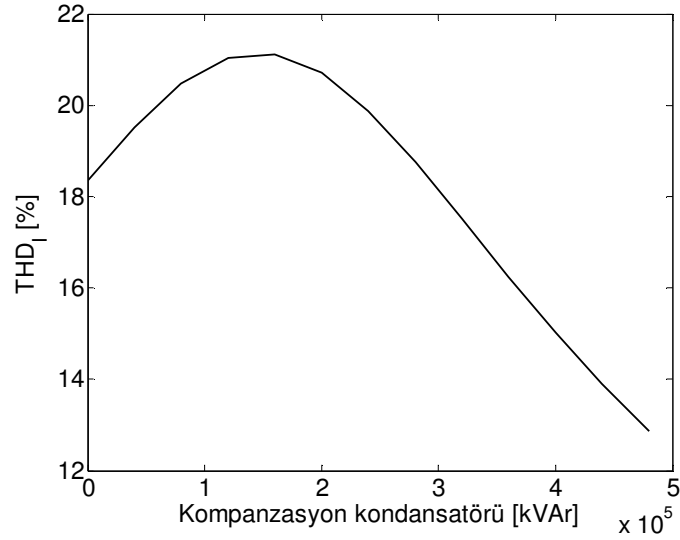
Toplam harmonik bozunumu filtresiz sistemde kompanzasyon gücü ile belirli bir değere kadar artmakta, daha sonra ise azalmaktadır. Bu değişim güç faktörü değişimi ile paralellik göstermektedir.



Şekil 7.19 Harmonikli durumda kompanzasyon kondansatörü-güç faktörü değişimi



Şekil 7.20 Harmonikli durumda THD_I - güç faktörü değişimi



Şekil 7.21 Harmonikli durumda kompanzasyon kondansatörü-THD_I değişimi

Örnek sistemde, harmonik bileşenler arttığında filtresiz sistemde güç faktörü değerleri artış göstermezken, filtreli sistemde güç faktörü değerleri istenilen sınırlar içerisinde elde edilmektedir.

Görüldüğü üzere harmonikli durumda kondansatör eklenmesi güç faktörünün arttırılmasını belirli bir düzeye kadar sağlarken, bir yerden sonra kondansatör eklenmesi güç faktörünü arttırmak bir yana azaltabilmektedir. Bu durum daha önceden de bahsedildiği üzere uygulamalarda kimi zaman gereksiz kondansatör kullanımı yapıldığını ortaya koymaktadır. Bu durum bize filtreli kompanzasyon yapmanın önemini ortaya koymaktadır.

8. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Elektrik enerji sistemlerinin; tek frekansa sahip olması ve bu frekansın sabit olması, akım ve gerilimin dalga şeklinin ise sinüs biçimli olması kaliteli bir enerji sağlanması açısından büyük önem teşkil etmektedir. Günden güne gelişen teknoloji ile birlikte, pek çok elektrikli cihaz akım ve gerilimde harmonik meydana getirmektedir.

Harmonikler, enerji sistemlerinde önemli sorunlara neden olmaktadır. Bu sorunların başlıcaları; teknik ve ekonomik sorunlardır. Harmoniklerin sistemde hiç bulunmaması tercih edilmekle birlikte yüklerin özelliklerinden dolayı bu durum önlem alınmadan mümkün değildir. Bu da filtreler kullanılarak harmoniklerin sistemde yönlendirilmesi ile mümkündür. Bu durumda harmonik bileşenlerin analizinin yapılması, hesaba katılması gerekmektedir.

Harmoniklerin bulunduğu devrelerde güç faktörünün düzeltilmesinde önemli problemlerle karşılaşmaktadır. Özellikle büyük güçlü tristör kontrollü doğrultucular, ark fırınları, kaynak generatörleri gibi harmonik üreten cihazların bulunduğu işletmelerde kompanzasyon tesisi kurmadan önce gerekli incelemelerin, analizlerin yapılması ve bir takım önlemlerin alınması gerekir. Böylece harmoniklerin etkilerinin azaltılması gerekir. Aksi halde sistemde rezonans olayları baş gösterebilir.

Yapılan incelemeler sonucu elde edilen sonuçları şu şekilde ifade edebiliriz:

- Lineer olmayan yüklerin sebep olduğu harmonik bileşenlerin güç sistemini rezonansa getirmemesine dikkat edilmelidir. Bunu sağlamak bakımından sistemin modeli üzerinde analizinin yapılması uygun olacaktır.
- Lineer olmayan yükler içeren elektrik güç sistemlerinde harmonikler sebebiyle ek kayıplar, gerilim düşümleri, rezonans olayları, dielektrik zorlanma, ölçme, koruma ve kontrol sistemlerinin hatalı çalışması vb. gibi problemler ortaya çıkmaktadır. Ortaya çıkan ek kayıpların hesaplanması, güç faktörünün düzeltilmesi, gerilimdeki harmonik bileşenlerin ve toplam harmonik bozunumu (THD) değerlerinin belirlenmesi ve harmoniklerin olumsuz etkilerinin giderilmesi için filtre devrelerinin tasarımı açısından harmonik analizi önem taşımaktadır. Bunun için mutlaka ölçüm değerlerinin çeşitli yüklenmeler için yapılması gerekmektedir.
- Standartlara göre yüksek olan harmoniklerin olumsuz etkilerinin önemli ölçüde giderilmesi için bir pasif veya aktif filtre ile süzülmesi uygun olacaktır. Harmoniklerin özelliğine göre bunun belirlenmesi gerekmektedir.

Yapılan incelemeler sonucu şu önerilerde bulunabiliriz:

- Tüm tesislerde yapılacak kompanzasyon sisteminin filtreli kompanzasyon olarak tesis edilmesi gerekmektedir.
- Gelecekte güç sistemlerinde harmonik problemlerin daha da artacağı göz önüne alınarak, lineer olmayan yükler içeren tesislerin daha kuruluş ve tasarım aşamasında düşük seviyede harmonik üretmesi için önlem alınmalıdır. Bu önlemler sistem kurulmadan önceki tasarım aşaması ile sistem kurulduktan sonraki donanım yerleştirme aşaması olarak uygulanabilir.
- Halen çalışan ve harmonik değeri yüksek olan işletmeler için harmonik filtrelerin yerleştirilmesi, kurulmuş sistemler için uygun bir çözüm olarak görölmektedir Böylece harmoniklerin etkilerinin azaltılması gerekmektedir.
- Tüketicileri dengeli gerilim ile beslemek için gerekli önlemler alınmalıdır. Faz akımların dengeli olmaması, harmonik kayıplarını daha da arttırmaktadır. Bu bakımdan sistemin dengeli yüklenmesinin sağlanması uygun olacaktır.
- Son yıllarda ölkemizde harmonik kaynaklarının hızla artması ve filtre kullanımının yaygın olmaması nedeniyle, sınır harmonik bozunum değerlerinin verildiğı harmonik standartları, ölkemizdeki ilgili kuruluş tarafından ölçölerek gerekli önlemlerin aldırılması sağlanmalıdır.
- Çok sayıda işletmenin denetlenmesi ve ölçümlerinin yapılmasının zorluğu açıktır. Bu konuya yönelik çalışmaların yapılması uygun olacaktır.

KAYNAKLAR

- Arrillaga, J., Bradley, D.A. ve Bodger, P.S., (2004), Power System Harmonics, John Wiley&Sons ,Norwich, New York.
- Arrillaga, J., Watson, N. R., ve Chen, S., (2001), Power System Quality Assessment, John Wiley & Sons, Chicester.
- Bayram, M., (2000), Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Dugan, R. C., McGranaghan, M. F. ve Beaty, H. W., (2002), Electrical Power Systems Quality, McGraw Hill, New York.
- Enjeti,P., (2001), Harmonics in Low Voltage Three Phase Four-Wire Electric Distribution Systems and Filtering Solutions [online], Texas A&M University, http://www.pserc.org/ecow/get/generalinf/presentati/psercsemin1/psercsemin0/enjeti_slides.pdf
- Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A. ve Arıkan, O., (2003), Elektrik Tesislerinde Harmonikler, Birsen Yayınevi, İstanbul.
- Shepherd, W ve Zand, P., (1979), Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits, Cambridge University Press.
- Van, W.J., (1993), Power Quality, Power Electronics and Control, The European Power Electronics Association
- Arrilaga, J.,Smith, B.C, Watson, N.R and Wood, A.R., (1997), Power System Harmonic Analysis, John Wiley&Sons, Norwich
- Wakileh, G.J., (2001), Power System Harmonics; Fundamentals, Analysis and Filter Design, Springer, New York.
- IEEE Std 519-1992 (Revision of IEEE Std 519-1981), IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems (ANSI)
- Wagner, V.E. and IEEE Task Force, (1993), Effects of Harmonics on Equipment, IEEE Trans. On Power Delivery, PWRD-8(2)
- Bayram, M., (1991), Elektrik Tesisleri ile İlgili Sorular ve Çözümleri, İstanbul.
- Ertan, U., (1994), Elektrik Şebekelerinde Harmonikler, Kaynak Dergisi:4.
- Paice, D.A, (1996), Power Electronics Converters Harmonics, First Edition.

EKLER

Ek-1 Örnek Sistemin Analizine Ait M-File

```

clear all;
clc;
warning off;
I=1; %%pu
V=1; %%pu

%%AKIM HARMONIKLERI

%%Filtresiz

%%Faz 1
I3=1.442*I/100;
I5=2.777*I/100;
I7=3.763*I/100;
I11=13.578*I/100;
I13=11.327*I/100;
THD_akim1=sqrt(I3^2+I5^2+I7^2+I11^2+I13^2)/I*100;
II=1^2+(1.442/100)^2+(2.777/100)^2+(3.763/100)^2+(13.578/100)^2+(11.327/100)^2;
I_Total=788.265;
I1_faz1_filtresiz=I_Total/sqrt(II);
I3_faz1_filtresiz=1.442*I1_faz1_filtresiz/100;
I5_faz1_filtresiz=2.777*I1_faz1_filtresiz/100;
I7_faz1_filtresiz=3.763*I1_faz1_filtresiz/100;
I11_faz1_filtresiz=13.578*I1_faz1_filtresiz/100;
I13_faz1_filtresiz=11.327*I1_faz1_filtresiz/100;

%%Faz 2
I3=0.908*I/100;
I5=2.812*I/100;
I7=3.908*I/100;
I11=13.39*I/100;
I13=11.478*I/100;
THD_akim2=sqrt(I3^2+I5^2+I7^2+I11^2+I13^2)/I*100;
II=1^2+(0.908/100)^2+(2.812/100)^2+(3.908/100)^2+(13.39/100)^2+(11.478/100)^2;
I_Total=800.302;
I1_faz2_filtresiz=I_Total/sqrt(II);
I3_faz2_filtresiz=0.908*I1_faz2_filtresiz/100;
I5_faz2_filtresiz=2.812*I1_faz2_filtresiz/100;
I7_faz2_filtresiz=3.908*I1_faz2_filtresiz/100;
I11_faz2_filtresiz=13.39*I1_faz2_filtresiz/100;
I13_faz2_filtresiz=11.478*I1_faz2_filtresiz/100;

%%Faz 3

```

```

I3=1.132*I/100;
I5=2.087*I/100;
I7=3.89*I/100;
I11=18.067*I/100;
I13=7.257*I/100;
THD_akim3=sqrt(I3^2+I5^2+I7^2+I11^2+I13^2)/I*100;
II=1^2+(1.132/100)^2+(2.087/100)^2+(3.89/100)^2+(18.067/100)^2+(7.257/100)^2;
I_Total=779.44;
I1_faz3_filtresiz=I_Total/sqrt(II);
I3_faz3_filtresiz=1.132*I1_faz3_filtresiz/100;
I5_faz3_filtresiz=2.087*I1_faz3_filtresiz/100;
I7_faz3_filtresiz=3.89*I1_faz3_filtresiz/100;
I11_faz3_filtresiz=18.067*I1_faz3_filtresiz/100;
I13_faz3_filtresiz=7.257*I1_faz3_filtresiz/100;

%%Filtreli

%%Faz 1
I3=1.612*I/100;
I5=10.937*I/100;
I7=2.285*I/100;
I11=3.073*I/100;
I13=1.817*I/100;
THD_akim1_filtreli=sqrt(I3^2+I5^2+I7^2+I11^2+I13^2)/I*100;
II=1^2+(1.612/100)^2+(10.937/100)^2+(2.285/100)^2+(3.073/100)^2+(1.817/100)^2;
I_Total=825.902;
I1_faz1_filtreli=I_Total/sqrt(II);
I3_faz1_filtreli=1.612*I1_faz1_filtreli/100;
I5_faz1_filtreli=10.937*I1_faz1_filtreli/100;
I7_faz1_filtreli=2.285*I1_faz1_filtreli/100;
I11_faz1_filtreli=3.073*I1_faz1_filtreli/100;
I13_faz1_filtreli=1.817*I1_faz1_filtreli/100;

%%Faz 2
I3=0.818*I/100;
I5=9.533*I/100;
I7=2.318*I/100;
I11=2.938*I/100;
I13=1.873*I/100;
THD_akim2_filtreli=sqrt(I3^2+I5^2+I7^2+I11^2+I13^2)/I*100;
II=1^2+(0.818/100)^2+(9.533/100)^2+(2.318/100)^2+(2.938/100)^2+(1.873/100)^2;
I_Total=833.365;
I1_faz2_filtreli=I_Total/sqrt(II);
I3_faz2_filtreli=0.818*I1_faz2_filtreli/100;
I5_faz2_filtreli=9.533*I1_faz2_filtreli/100;
I7_faz2_filtreli=2.318*I1_faz2_filtreli/100;
I11_faz2_filtreli=2.938*I1_faz2_filtreli/100;

```

```
I13_faz2_filtreli=1.873*I1_faz2_filtreli/100;
```

```
%%Faz 3
```

```
I3=1.07*I/100;
```

```
I5=9.897*I/100;
```

```
I7=2.462*I/100;
```

```
I11=2.867*I/100;
```

```
I13=1.457*I/100;
```

```
THD_akim3_filtreli=sqrt(I3^2+I5^2+I7^2+I11^2+I13^2)/I*100;
```

```
II=1^2+(1.07/100)^2+(9.897/100)^2+(2.462/100)^2+(2.867/100)^2+(1.457/100)^2;
```

```
I_Total=819.053;
```

```
I1_faz3_filtreli=I_Total/sqrt(II);
```

```
I3_faz3_filtreli=1.07*I1_faz3_filtreli/100;
```

```
I5_faz3_filtreli=9.897*I1_faz3_filtreli/100;
```

```
I7_faz3_filtreli=2.462*I1_faz3_filtreli/100;
```

```
I11_faz3_filtreli=2.867*I1_faz3_filtreli/100;
```

```
I13_faz3_filtreli=1.457*I1_faz3_filtreli/100;
```

```
%%GERILIM HARMONIKLERI
```

```
%%Filtresiz
```

```
%%Faz 1
```

```
V3=0.008*V/100;
```

```
V5=3.985*V/100;
```

```
V7=1.89*V/100;
```

```
V11=1.24*V/100;
```

```
V13=0.682*V/100;
```

```
THD_ger1=sqrt(V3^2+V5^2+V7^2+V11^2+V13^2)/V*100;
```

```
VV=1^2+(0.008/100)^2+(3.985/100)^2+(1.89/100)^2+(1.24/100)^2+(0.682/100)^2;
```

```
V_Total=396.770;
```

```
V1_faz1_filtresiz=V_Total/sqrt(VV);
```

```
V3_faz1_filtresiz=0.008*V1_faz1_filtresiz/100;
```

```
V5_faz1_filtresiz=3.985*V1_faz1_filtresiz/100;
```

```
V7_faz1_filtresiz=1.89*V1_faz1_filtresiz/100;
```

```
V11_faz1_filtresiz=1.24*V1_faz1_filtresiz/100;
```

```
V13_faz1_filtresiz=0.682*V1_faz1_filtresiz/100;
```

```
%%Faz 2
```

```
V3=0.38*V/100;
```

```
V5=4.07*V/100;
```

```
V7=2.062*V/100;
```

```
V11=1.208*V/100;
```

```
V13=0.868*V/100;
```

```
THD_ger2=sqrt(V3^2+V5^2+V7^2+V11^2+V13^2)/V*100;
```

```
VV=1^2+(0.38/100)^2+(4.07/100)^2+(2.062/100)^2+(1.208/100)^2+(0.868/100)^2;
```

```
V_Total=397.327;
```

```
V1_faz2_filtresiz=V_Total/sqrt(VV);
```

```
V3_faz2_filtresiz=0.38*V1_faz2_filtresiz/100;
V5_faz2_filtresiz=4.07*V1_faz2_filtresiz/100;
V7_faz2_filtresiz=2.062*V1_faz2_filtresiz/100;
V11_faz2_filtresiz=1.208*V1_faz2_filtresiz/100;
V13_faz2_filtresiz=0.868*V1_faz2_filtresiz/100;
```

```
%%Faz 3
```

```
V3=0.357*V/100;
V5=3.925*V/100;
V7=2.033*V/100;
V11=1.125*V/100;
V13=0.89*V/100;
THD_ger3=sqrt(V3^2+V5^2+V7^2+V11^2+V13^2)/V*100;
VV=1^2+(0.357/100)^2+(3.925/100)^2+(2.033/100)^2+(1.125/100)^2+(0.89/100)^2;
;
V_Total=396.413;
V1_faz3_filtresiz=V_Total/sqrt(VV);
V3_faz3_filtresiz=0.357*V1_faz3_filtresiz/100;
V5_faz3_filtresiz=3.925*V1_faz3_filtresiz/100;
V7_faz3_filtresiz=2.033*V1_faz3_filtresiz/100;
V11_faz3_filtresiz=1.125*V1_faz3_filtresiz/100;
V13_faz3_filtresiz=0.89*V1_faz3_filtresiz/100;
```

```
%%Filtreli
```

```
%%Faz 1
```

```
V3=0.008*V/100;
V5=3.798*V/100;
V7=1.825*V/100;
V11=1.308*V/100;
V13=0.677*V/100;
THD_ger1_filtreli=sqrt(V3^2+V5^2+V7^2+V11^2+V13^2)/V*100;
VV=1^2+(0.008/100)^2+(3.798/100)^2+(1.825/100)^2+(1.308/100)^2+(0.677/100)^2;
V_Total=397.163;
V1_faz1_filtreli=V_Total/sqrt(VV);
V3_faz1_filtreli=0.008*V1_faz1_filtreli/100;
V5_faz1_filtreli=3.798*V1_faz1_filtreli/100;
V7_faz1_filtreli=1.825*V1_faz1_filtreli/100;
V11_faz1_filtreli=1.308*V1_faz1_filtreli/100;
V13_faz1_filtreli=0.677*V1_faz1_filtreli/100;
```

```
%%Faz 2
```

```
V3=0.428*V/100;
V5=3.945*V/100;
V7=1.925*V/100;
V11=1.33*V/100;
```

```

V13=0.918*V/100;
THD_ger2_filtreli=sqrt (V3^2+V5^2+V7^2+V11^2+V13^2) /V*100;
VV=1^2+(0.428/100)^2+(3.945/100)^2+(1.925/100)^2+(1.33/100)^2+(0.918/100)^2
;
V_Total=397.382;
V1_faz2_filtreli=V_Total/sqrt (VV);
V3_faz2_filtreli=0.428*V1_faz2_filtreli/100;
V5_faz2_filtreli=3.945*V1_faz2_filtreli/100;
V7_faz2_filtreli=1.925*V1_faz2_filtreli/100;
V11_faz2_filtreli=1.33*V1_faz2_filtreli/100;
V13_faz2_filtreli=0.918*V1_faz2_filtreli/100;

```

```

%%Faz 3

```

```

V3=0.37*V/100;
V5=3.792*V/100;
V7=1.943*V/100;
V11=1.27*V/100;
V13=0.882*V/100;
THD_ger3_filtreli=sqrt (V3^2+V5^2+V7^2+V11^2+V13^2) /V*100;
VV=1^2+(0.37/100)^2+(3.792/100)^2+(1.943/100)^2+(1.27/100)^2+(0.882/100)^2;
V_Total=396.558;
V1_faz3_filtreli=V_Total/sqrt (VV);
V3_faz3_filtreli=0.37*V1_faz3_filtreli/100;
V5_faz3_filtreli=3.792*V1_faz3_filtreli/100;
V7_faz3_filtreli=1.943*V1_faz3_filtreli/100;
V11_faz3_filtreli=1.27*V1_faz3_filtreli/100;
V13_faz3_filtreli=0.882*V1_faz3_filtreli/100;

```

```

%%Guc faktoru

```

```

%%Filtresiz

```

```

%%Faz 1

```

```

P1=177.235;
Q1=8.568;

```

```

%%Faz 2

```

```

P2=180.226;
Q2=11.8;

```

```

%%Faz 3

```

```

P3=175.079;
Q3=12.929;

```

```
PF_FILTRESIZ=(P1+P2+P3)/sqrt((P1+P2+P3)^2+(Q1+Q2+Q3)^2)
```

```
%%Filtreli
```

```
%%Faz 1
```

```
P1=187.199;
```

```
Q1=7.002;
```

```
%%Faz 2
```

```
P2=189.422;
```

```
Q2=1;
```

```
%%Faz 3
```

```
P3=185.971;
```

```
Q3=12.092;
```

```
PF_FILTRELI=(P1+P2+P3)/sqrt((P1+P2+P3)^2+(Q1+Q2+Q3)^2)
```

ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	24.11.1984	
Doğum yeri	Tekirdağ	
Lise	1995-2002	Vefa Anadolu Lisesi
Lisans	2003-2008	Bahçeşehir Üniversitesi Mühendislik Fak. Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü