

YILDIZ TEKNİK ÜNİVERSİTESİ

HARMONİKLİ DEVRELERDE ENERJİ ÖLÇÜMÜ

Elk. Müh. Banu ÇIRPAN

FBE Elektrik Mühendisliği Anabilim Dalı

Elektrik Tesisleri Programında Hazırlanan

YÜKSEK LİSANS TEZİ

Tez Danışmanı: Prof. Dr. Celal KOCATEPE

İstanbul, 2009

İÇİNDEKİLER

	Sayfa
SİMGE LİSTESİ	iv
KISALTMA LİSTESİ	v
ŞEKİL LİSTESİ	vi
ÇİZELGE LİSTESİ	vii
ÖNSÖZ	viii
ÖZET	ix
ABSTRACT	x
1. GİRİŞ	1
1.1 Harmonik Tanımı	1
1.2 Lineer-Nonlineer Yük Tanımı	2
1.3 Harmoniklerin Etkileri	5
1.3.1 Akım Artış Etkisi	5
1.3.2 Transformatörlere Etkileri	6
1.3.3 Motorlara Etkileri	7
1.3.4 Kondansatörler Üzerine Etkisi	7
1.3.5 Ölçü Aletleri Üzerine Etkisi	9
1.4 Harmonikli Durumlarda İfadeler	11
2. DİSTORSİYONLU DALGA FORMLARINDA GÜÇ TANIMLARININ İRDELENMESİ	14
2.1 Giriş	14
2.2 Bir Fazlı Sistemlerde Güç Tanımları	14
2.3 Üç Fazlı Sistemlerde Güç Tanımları	24
2.4 Ölçüm Cihazlarında Harmoniklerin Etkileri	25
3. DENEY DEVRESİNİN TANITIMI	26
3.1 Giriş	26
3.2 Deney Devresi	26
3.3 Deneyde Ölçülen Durumlar	26
3.4 Deneyde Kullanılan Aletler	29
3.5 Deneye Ait Ölçümler	30
3.5.1 Lineer Yük İçin Yapılan Ölçümler	30
3.5.1.1 Lineer Yük İçin Aktif Enerji Ölçümü İle İlgili Değerlendirmeler	32
3.5.1.2 Lineer Yük İçin Reaktif Enerji Ölçümü İle İlgili Değerlendirmeler	32
3.5.2 THD ₁ $\cong$ %15 İçin Ölçüm Sonuçları	33

3.5.2.1	THD _I $\cong$ %15 İçin Reaktif Enerji Ölçümü İle İlgili Değerlendirmeler.....	35
3.5.3	THD _I $\cong$ %30 İçin Ölçüm Sonuçları	35
3.5.4	THD _I $\cong$ %60 İçin Ölçüm Sonuçları	37
3.5.5	Literatürde Verilen Güç Tanımları Ve Ölçüm Sonuçları	39
3.5.5.1	Aktif Güç (P_{watt}).....	40
3.5.5.2	Reaktif Güç (Q_{VAr}).....	40
3.5.5.3	Budeanu'ya Göre Reaktif Güç Tanımı (VAr)	40
3.5.5.4	IEEE Std 1459-2000'de Verilen Nonaktif Güç Tanımı (N (VAr))	40
3.5.6	Ölçüm Sonuçlarının Toplu Olarak Gösterilmesi	41
4.	SONUÇLAR VE ÖNERİLER.....	44
KAYNAKLAR.....		46
EKLER		48
Ek 1 FLUKE 434 Harmonik Analizörü Ekran Çıktıları.....		48
Ek 2 Matlab/Simulink Uygulamasına Ait Deney Devreleri.....		53
ÖZGEÇMİŞ.....		57

SİMGE LİSTESİ

φ	Faz açısı
φ_n	n.harmonik faz açısı
ω	Açısal frekans
δ	Akım ifadesinde faz kayma açısı
θ	Gerilim ifadesinde faz kayma açısı
t	Zaman ifadesi (saniye)

KISALTMA LİSTESİ

IEC	International Electrotechnical Commission
TSE	Türk Standartları Enstitüsü
IEEE	Elektrik Elektronik Mühendisleri Enstitüsü
i_a	Aktif akım
i_r	Reaktif akım
Q_B	Budeanu ifadesi ile reaktif güç
P_C	Budeanu ifadesi ile tamamlayıcı sanal güç
Q_F	Fryze ifadesi ile reaktif güç
S_R	Shephard ve Zakikhani ifadesi ile aktif görünen güç
S_X	Shephard ve Zakikhani ifadesi ile reaktif görünen güç
S_D	Shephard ve Zakikhani ifadesi ile distorsiyonu görünen güç
S_Q	Sharon ifadesi ile yaklaşık olarak reaktif güç
S_C	Sharon ifadesi ile yaklaşık olarak tamamlayıcı reaktif güç
i_p	İdeal direnç üzerinden tüketilen güç ile eşdeğer olan aktif bileşen
Q_R	Endüktif reaktif güç
Q_C	Kapasitif reaktif güç
S_N	Nonsinüsoidal temel görünen güç
P	Aktif güç
Q	Reaktif güç
Q_S	Karesel görünen güç
Q_1	Ana bileşen reaktif güç
D	Distorsiyon gücü
S	Görünen güç
PF	Güç faktörü
THD_V	Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu
THD_I	Akım için toplam harmonik distorsiyonu
k.o.k.	Karesel ortalamanın karekökü

ŞEKİL LİSTESİ

Şekil 1.1 Temel bileşen ve harmonikler	2
Şekil 1.2 Harmonikli toplam dalga şekli	2
Şekil 1.3 Lineer yüke ait çeşitli akım-gerilim dalga şekilleri.....	3
Şekil 1.4 Nonlineer yüke ait akım-gerilim dalga şekilleri.....	4
Şekil 1.5 Lineer ve nonlineer yüke ait akım ve gerilimlerin karşılaştırılması.....	5
Şekil 1.6 Temel bileşen ve çeşitli harmonik bileşenlerin dalga şekilleri	6
Şekil 1.7 Kondansatörlerin kapasitif direncinin frekansa bağlı değişimi.....	8
Şekil 1.8 Tepe değer ve efektif değer sinüsoidal dalga şekli üzerinde gösterimi.....	10
Şekil 2.1 A çalışma durumuna ait akım dalga şekli	18
Şekil 2.2 A çalışma durumuna ait gerilim dalga şekli.....	18
Şekil 2.3 B çalışma durumuna ait akım dalga şekli.....	19
Şekil 2.4 B çalışma durumuna ait gerilim dalga şekli	19
Şekil 2.5 C çalışma durumuna ait akım dalga şekli.....	20
Şekil 2.6 C çalışma durumuna ait gerilim dalga şekli	20
Şekil 2.7 D çalışma durumuna ait akım dalga şekli	21
Şekil 2.8 D çalışma durumuna ait gerilim dalga şekli.....	21
Şekil 3.1 Deney devresi	28

ÇİZELGE LİSTESİ

Çizelge 1.1 Ortalama ve efektif değerin karşılaştırılması	11
Çizelge 2.1 Matlab / Simulink uygulamasında kullanılan çalışma durumları.....	17
Çizelge 2.2 Matlab/Simulink uygulamasında kullanılan çalışma durumlarına ait akım ve gerilim değerleri	22
Çizelge 2.3 Matlab / Simulink uygulamasından alınan ölçüm sonuçları	23
Çizelge 3.2 Deneyde incelenen elektrik sayaçlarının özellikleri.....	29
Çizelge 3.3 Lineer yük için akıma ait toplam harmonik distorsiyon değerleri	30
Çizelge 3.4 Lineer yük için gerilime ait toplam harmonik distorsiyon değerleri.....	30
Çizelge 3.5 Sayaçlar ve enerji analizörleri ile alınan ölçüm sonuçları.....	31
Çizelge 3.6 Sayaç ve analizörlerden alınan aktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları	31
Çizelge 3.7 Sayaç ve analizörlerden alınan reaktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları ...	31
Çizelge 3.8 $THD_I = \%15$ için akıma ait toplam harmonik distorsiyon değerleri	33
Çizelge 3.9 $THD_I = \%15$ için gerilime ait toplam harmonik distorsiyon değerleri	33
Çizelge 3.10 Sayaçlar ve enerji analizörleri ile alınan ölçüm sonuçları.....	34
Çizelge 3.11 Sayaç ve analizörlerden alınan aktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları	34
Çizelge 3.12 Sayaç ve analizörlerden alınan reaktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları .	35
Çizelge 3.13 $THD_I = \%30$ için akıma ait toplam harmonik distorsiyon değerleri	35
Çizelge 3.14 $THD_I = \%30$ için gerilime ait toplam harmonik distorsiyon değerleri	36
Çizelge 3.15 Sayaçlar ve enerji analizörleri ile alınan ölçüm sonuçları.....	36
Çizelge 3.16 Sayaç ve analizörlerden alınan aktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları	36
Çizelge 3.17 Sayaç ve analizörlerden alınan reaktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları .	37
Çizelge 3.18 $THD_I = \%60$ için akıma ait toplam harmonik distorsiyon değerleri	38
Çizelge 3.19 $THD_I = \%60$ için gerilime ait toplam harmonik distorsiyon değerleri	38
Çizelge 3.20 Sayaçlar ve enerji analizörleri ile alınan ölçüm sonuçları.....	38
Çizelge 3.21 Sayaç ve analizörlerden alınan aktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları	39
Çizelge 3.22 Sayaç ve analizörlerden alınan reaktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları .	39
Çizelge 3.23 $THD_I \cong \%60$ için reaktif enerji ölçüm sonuçları	41
Çizelge 3.24 Lineer yük için ölçüm sonuçları.....	41
Çizelge 3.25 $THD_I \cong \%15$ için ölçüm sonuçları.....	42
Çizelge 3.26 $THD_I \cong \%30$ için ölçüm sonuçları.....	42
Çizelge 3.27 $THD_I \cong \%60$ için ölçüm sonuçları.....	42
Çizelge 3.28 SAYAÇ A'nın aktif enerji ölçüm hataları.....	43
Çizelge 3.29 SAYAÇ B'nin aktif enerji ölçüm hataları.....	43

ÖNSÖZ

Bu tez çalışmasında öncelikle distorsiyonlu durumda güç tanımları irdelenmiş olup daha sonra endüstride kullanılan sayaçların harmonikli durumlardaki aktif ve reaktif enerji ölçme hataları uygulamalı olarak incelenmiştir. Bu ölçüm hatalarının tüketiciye ve şebekeye olan etkileri irdelenmiş ve alınması gereken önlemler belirtilmiştir.

Bu tez çalışması, TÜBİTAK tarafından desteklenen 105G129 nolu “Türkiye Elektrik Sisteminde Güç Kalitesine Etki Eden Değişkenleri ve Güç Kalitesini İzleme, Problemlerin Tespiti, Değerlendirilmesi ve Karşı Önlemlerin Hayata Geçirilmesi” konulu proje tarafından desteklenmektedir.

Bu tez çalışmasında yardımları ve destekleri için eşim Selim COŞKUNER’e, arkadaşım Bedri KEKEZOĞLU’na, Bülent VURAL’a ,manevi desteğini ve değerli fikirlerini esirgemeyen hocalarım Yrd. Doç. Dr. Recep Yumurtacı’ya ve Prof. Dr. Celal KOCATEPE’ye teşekkürü bir borç bilirim.

Ağustos, 2009

Banu ÇIRPAN

ÖZET

Elektrik enerji sisteminin kaliteli ve etkin olabilmesi için sistemin akım ve gerilim bileşenlerinin dalga şekli, temel frekanslı sinüsoidal bir değişime sahip olmalı ve izin verilebilen bozulma seviyesinin sınıflandırılması gerekmektedir. Ancak günümüzde artan enerji ihtiyacı ve yarı iletken teknolojisinin özellikle sanayide yaygın kullanımı ile birlikte şebekeye her geçen gün değişik nonlineer yükler de bağlanmaktadır. Yapılan bu çalışmada, TEDAŞ onaylı ve kullanımı yaygın olan elektrik sayaçlarının çeşitli harmonikli gerilim ve akımlar altındaki ölçme hataları incelenip değerlendirilmiştir.

Literatürde yer alan güç hesaplama yöntemleri incelenmiş ve aralarındaki farklar MATLAB/Simulink simülasyonlu örnek bir uygulama ile çalışmanın ilk bölümünde anlatılmıştır. İkinci bölümde ise, piyasada yaygın olarak kullanılan farklı markalarda iki adet sayaç seçilerek çeşitli harmonikli durumlardaki aktif ve reaktif enerji ölçüm sonuçları irdelenmiştir.

ABSTRACT

In order to maintain efficient and quality electricity supply, it is necessary to define the levels of distortions that can be permitted on power system and also voltage and current components of electricity system must have sinusoidal wave shape. In recent years, concurrently with increasing energy needs, several nonlinear consumers connect to the electricity network. In this study, measurement error of two counters which have different manufacturer and approved by TEDAŞ are analyzed in different case within harmonic.

Power calculation methods in the literature were examined and differences between these calculation methods is described in the first section with MATLAB/Simulink simulation study with a sample application. In the second section, commonly used in the market counters by selecting four different brands in different current and voltage measurement within harmonic results were compared in the case.

1. GİRİŞ

Günümüzde gelişen teknoloji ile birlikte elektrik enerjisinin tüketiciye ulaşma kalitesi giderek daha da önem kazanmaktadır. Şebekeye bağlanan çeşitli yüklerin enerji tüketim miktarlarını bilmek kadar şebekeye ne şekilde etkide bulunduklarını belirlemek de önemlidir.

Elektrik enerjisi şebekesine bağlanan lineer olmayan bir yük diğer yükler gibi, hem reaktif güç hem de aktif güç çeker. Türkiye’de ilgili kurumunun onayladığı çeşitli sayaçlarla aktif ve reaktif ölçüm yapılabilmektedir. Sayaçların ölçme metodu ve bağıl hata değerleri standartlarca belirtilmiştir. TSE 62052-11 standardına göre reaktif güce ilişkin standartlar, sadece temel frekansı içeren sinüs biçimli akımlar ve gerilimler için uygulanır. Şebekeden kaynaklı veya yükten kaynaklı harmoniklerin oluşturduğu distorsiyon gücü ölçülmemekte ve böylece harmonikler göz ardı edilmektedir. Bu çalışmada, sistemin veya yükün harmonikli olması durumunda, TEDAŞ tarafından onaylı, piyasada yaygın olarak kullanılan, güç hesaplama yöntemi TSE ile belirtilen ve kabul edilen güç hesaplama yöntemine uygun olan sayaçların bağıl güç ölçüm hataları incelenmiştir.

1.1 Harmonik Tanımı

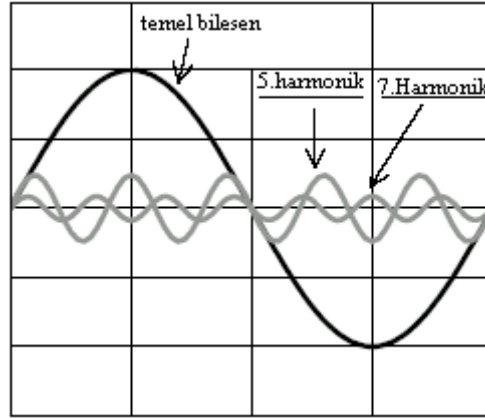
Alternatif akım tesislerinde elektrik enerjisinin üretilmesi, iletilmesi ve tüketilmesi esnasında gerilimin ve akımın tam sinüs şeklinde olması arzu edilir. Fakat bazı elemanlar, yan etkiler ve bozucu olaylar yüzünden gerilimin ve akımın şekli bozulur ve dalga formu sinüs şeklinden ayrılır. Bozulan dalgalar “nonsinüsoidal dalga” olarak adlandırılır. Bozulmuş dalga şekli, temel frekansındaki bileşenin ve tüm harmonik bileşenlerin toplamı olarak ifade edilir. Gerilimin ve akımın sinüs şeklinde olmaması güç sistemlerinde ek kayıplara, ek gerilim düşümlerine, rezonans olaylarına, güç faktörünün değişmesine vb. gibi pek çok teknik ve ekonomik problemlere yol açar.

Sistemdeki, temel çalışma frekansının tam katı frekanslardaki sinüsoidal akım ve gerilimlere “Harmonik” denir. Harmonikler enerji kalitesini ortaya koyan önemli etkenlerin başında gelmektedir. Bu yönüyle, elektrik güç sistemlerinde enerji kalitesinin tanımı, şebekenin gerilim ve frekansındaki değişmeler ile çekilen akım dalga şeklinin bozulması ve bunların neden olduğu gerilim dalga şekli bozulmaları için kullanılır. Şekil 1.1’de temel bileşen ve harmonikler ayrı dalga şekilleri olarak Şekil 1.2’de ise harmonik toplam dalga şekli görülmektedir.

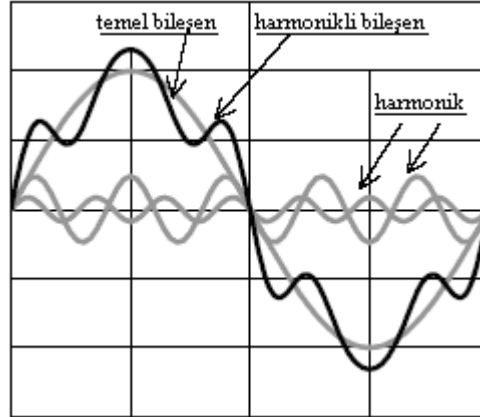
Simetrik üç fazlı güç sistemleri genellikle tek sıralı harmoniklerden oluşur; 3, 5, 7, 9...n. Bu

sayılar harmoniklerin sıralamasını belirler. Harmonik sıralama (n), bir harmonik dalganın frekansını belirleyen çarpandır. Harmonik bileşenlerin frekansları, temel harmonik frekansının katları şeklindedir. Örneğin 3. harmonik bileşenin frekansı, temel dalganın 3 katına eşittir.

Harmoniklerin genlikleri harmoniklerin etkinliği bakımından önem taşır. Yarı iletken elemanlarının olduğu devrelerde harmonik sırası yükseldikçe genlik değeri düşmektedir.



Şekil 1.1 Temel bileşen ve harmonikler



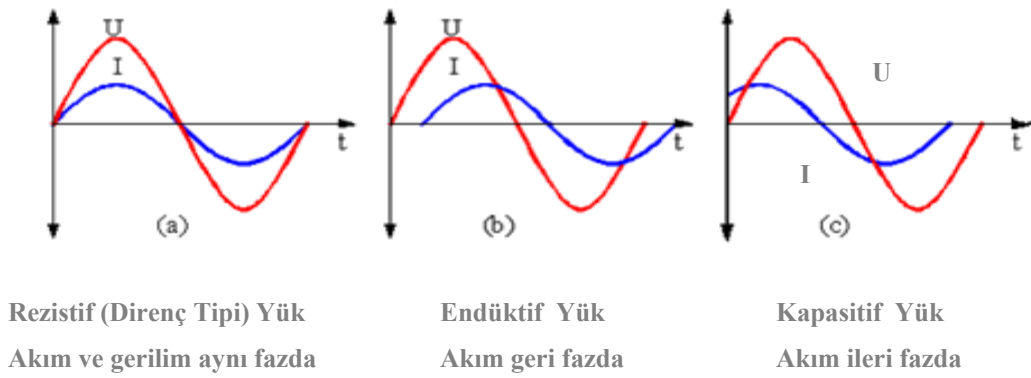
Şekil 1.2 Harmonikli toplam dalga şekli

1.2 Lineer-Nonlinear Yük Tanımı

Akımı ile gerilimi arasındaki ilişkisi doğrusal olan elemanlar lineer elemanlardır. Bu ilişki doğrusal değilse elemanın nonlinear olduğu söylenir. Lineer elemanlarda dalga şekli

sinüsoidal olurken nonlinear elemanlarda bu durum sağlanamamaktadır.

Lineer yüke ait akım ve gerilim dalga şekli her zaman aynıdır. Nonlinear yüke ait akım ve gerilimin dalga şekilleri ise farklıdır. Yüke ait gerilim ve akım arasındaki faz farkı yükün lineer ya da nonlinear olmasına etki etmemektedir. Diğer bir ifadeyle lineer yükün geriliminin akımına oranı her zaman sabit bir değerdir. Nonlinear yükte ise bu oran sabit değildir. Aşağıda lineer yük çeşitleri görülmektedir. Yük rezistif, endüktif ya da kapasitif olsa bile akım gerilimin tek çarpanla ifade edilen bir fonksiyonu olduğu sürece yük lineer yüküdür.



Şekil 1.3 Lineer yüke ait çeşitli akım-gerilim dalga şekilleri

Yukarıda dalga şekilleri verilen yük çeşitleri için şu özellikler geçerlidir:

Şekil 1.3 (a)'da, yük üzerindeki akım, gerilimin bir çarpanı ise ve akımla gerilim arasında bir faz farkı yoksa bu yük çeşidine rezistif (direnç tipi) yük denilmektedir.

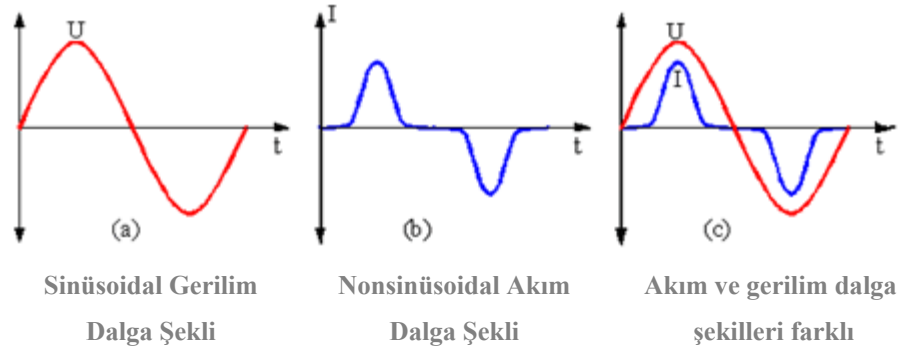
Şekil 1.3 (b)'de, yük üzerindeki akımın gerilimden geride olması durumundaki yük çeşidine endüktif yük denilmektedir.

Şekil 1.3 (c)'de, yük üzerindeki gerilimin akımdan geride olması durumundaki yük çeşidine kapasitif yük denilmektedir.

Lineer adından da anlaşılacağı gibi yükün karakteristiğinin doğrusal olduğunu ifade eder; yük akımı her bir periyotta gerilimin bir fonksiyonudur. Bir başka ifadeyle yük akımıyla gerilim

arasında faz farkı olsa bile nonlinear değil yine lineerdir çünkü akım hala gerilimin bir fonksiyonudur. Yük reaktiftir ama lineerdir.

Eğer yük akımı şebeke geriliminin bir fonksiyonu değilse aralarında bir faz farkı olmamasına rağmen yük nonlinearidir. Şekil 1.4 'de nonlinear yüke ait akım ve gerilim dalga şekilleri görülmektedir.



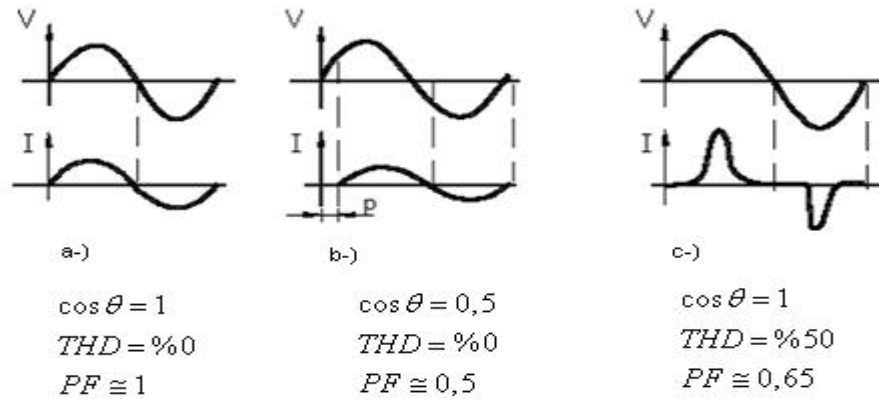
Şekil 1.4 Nonlinear yüke ait akım-gerilim dalga şekilleri

Şekil 1.5'de ise gerilim ve akım dalga şekilleri verilen yük çeşitleri için;

Şekil 1.5 (a)'da, gerilimle akım her zaman aynı yönde ve akım gerilimin bir fonksiyonu olduğu için şebekeden reaktif güç çekilmez ve yük lineerdir.

Şekil 1.5 (b)'de, gerilimle akım her zaman aynı yönde değildir. Bu nedenle gerilimle akımın yönlerinin zıt olduğu bölgelerde reaktif güç bileşeni vardır. Reaktif güç bileşeni olmasına rağmen bu yük tipi de lineerdir. Çünkü gerilimin olduğu her noktada akım da çekilmektedir.

Şekil 1.5 (c)'de, hem gerilim hem de akım her zaman aynı yönlerde olmasına rağmen yükün çektiği akım gerilimin tek çarpanla ifade edilen bir fonksiyonu değildir. Başka bir ifadeyle gerilimin olduğu her noktada şebekeden akım çekilmez. Bu nedenle bu yük çeşidi nonlinearidir.



Şekil 1.5 Lineer ve nonlinear yüke ait akım ve gerilimlerin karşılaştırılması

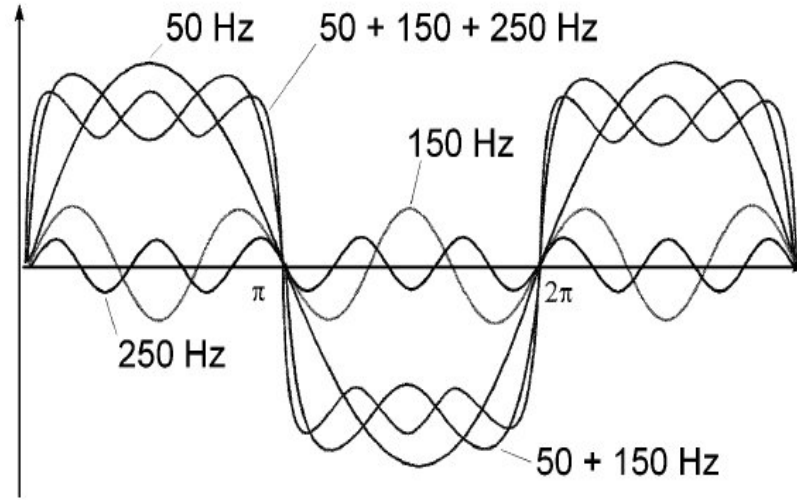
1.3 Harmoniklerin Etkileri

Harmoniklerin elektrik tesisleri ve devre elemanları üzerine çok çeşitli zararlı etkileri vardır. Bunları aşağıdaki gibi özetleyebiliriz. (Kocatepe, 2003)

- Generatör ve şebeke geriliminin bozulması
- Gerilim düşümünün artması
- Kondansatörler üzerine etkisi
- İlave kayıpların artması
- Elektrik makineleri üzerine etkisi
- Sayaçlar üzerine etkisi
- Kontrol cihazları üzerine etkisi
- Mikro bilgi işlemciler üzerine etkisi
- İzolasyonun delinmesi
- Rezonans olayları
- Telekomünikasyon tesislerine etkisi

1.3.1 Akım Artış Etkisi

Sistemde harmoniklerin oluşmasıyla birlikte efektif akım değeri de artar. Akıma ait ifade



Şekil 1.6 Temel bileşen ve çeşitli harmonik bileşenlerin dalga şekilleri

$$I_{RMS} = \sqrt{I_1^2 + I_2^2 + \dots + I_N^2} \quad (1.1)$$

eşitliği ile belirtilir. Şekil 1.6'da temel bileşen ve diğer mertebelerdeki harmonik bileşenlerin dalga şekilleri görülmektedir.

Artan akım ile birlikte sistemdeki kablolarda, transformatör sargılarında ve elektrik makineleri sargılarında ısınma gözlenir. Buna ilave olarak harmonikler nedeniyle sistemde rezonans meydana gelme olasılığı artacaktır. Rezonans sonrası oluşabilecek aşırı akım ve gerilimler işletmedeki elemanlara önemli zararlar vermektedir.

1.3.2 Transformatörlere Etkileri

Transformatörler; temel frekansta gerekli gücü, yüklerle minimum kayıp ile iletmek için tasarlanmışlardır. Bir akımın veya gerilimin harmonik bozukluğu transformatörde fazladan bir ısınma oluşturacaktır. Bu yüzden harmonikli bir devrede soğutması güçlü bir trafo kullanmak gerekir.

Yük akımında harmonik oluşması durumunda transformatörlerin ısınmasından dolayı meydana gelebilecek üç etki vardır. (Kocatepe, 2003)

- Efektif Akım: Efektif akımın değeri ile değişen bakır kayıplarında ($P_{Cu} = I_{eff}^2 \times R$) ve frekans değerine bağlı olarak değişen, Hysteresis ($P_{hysteresis} = K_1 \times f$) ve Foucault ($P_{foucault} = K_2 \times f$) kayıplarının toplamından oluşan demir kayıplarında artış görülür.

- **Girdap Akım Kayıpları:** Bu akımlar transformatörde magnetik akıdan dolayı indüklenen akımlardır ve transformatör sargılarında, çekirdeğinde ve diğer iletken bölgelerinde dolanır ve fazladan ısınmaya sebep olurlar. Harmonikli durumlarda bu akımların aşırı ısınmada verimin düşmesinde payı vardır.
- **Çekirdek Kayıpları:** Harmonik gerilimleri ve çekirdek yapısına göre çekirdek kayıpları değişmektedir. Harmonik kayıplarının artması durumunda çekirdek kayıpları artacaktır. Ancak önceki kayıplara göre daha azdır.

1.3.3 Motorlara Etkileri

Motorlar harmonik gerilimlerinden oldukça fazla etkilenir. Motor statorundaki harmonikli gerilimler, motorda harmonikli akıya dönüşür. Bu akı motor momentine doğrudan etki etmese de rotorda nominal frekanstan büyük frekanslarda harmonik akımlarının oluşmasına sebep olur. Harmonikler motorda düşük verim, aşırı ısınma titreşim, gürültü gibi etkiler doğurmaktadır. (Kocatepe, 2003) IEEE 519–1992 standardına göre gerilim bozulması THD %5’in altında, her harmoniğin temel bileşene oranı %3 değerlerinin altında ise kritik sınırların altında kalmaktadır. Gerilim bozulması %8 - %10 değerlerinde ve daha büyük değerlerde ise motorda aşırı ısınmalar meydana gelmektedir.

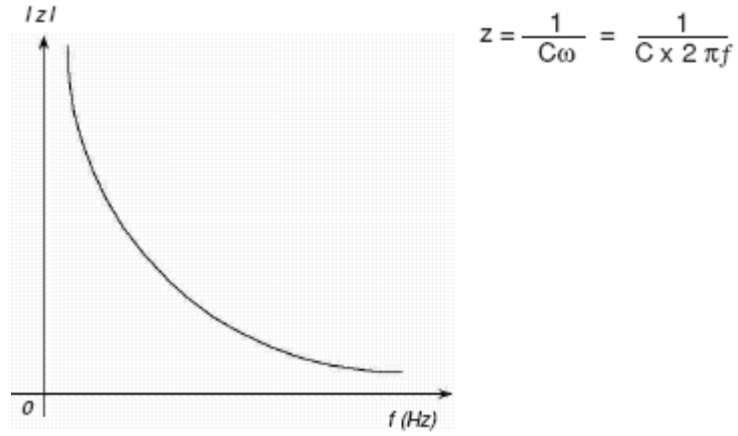
1.3.4 Kondansatörler Üzerine Etkisi

Genel olarak, eğer kondansatörler nominal şebeke gerilimine bağlı oldukları halde şebekeden aşırı akım çekiyorlarsa bunun başlıca üç sebebi vardır: ya kondansatörün kapasitesi nominal kapasiteden büyüktür ya şebeke frekansı nominal değerinden yüksektir ya da şebeke geriliminin harmonikler ihtiva etmesidir. Kondansatörlerin aşırı akım çekmesinin en çok karşılaşılan ve en önemli sebebi şebeke geriliminin harmonikler ihtiva etmesidir.

Elektrik tesislerinde reaktif güç kompanzasyonu, tüketicilerin bağlı bulundukları baralara kondansatörlerin paralel olarak bağlanmasıyla gerçekleştirilir. Eğer bu baraya harmonik üreten transformatörler veya ark ocakları veya redresör grupları paralel bağlanıyorsa, kondansatörler de harmonikli gerilim ile beslenirler. Kondansatörlerin aşırı akım çekmesinin en önemli sebebi de budur.

Kondansatörler şebekedeki harmoniklerden en çok etkilenen elemanlardır. Kondansatörlerin kapasitif dirençleri, bobinlerin reaktanslarının aksine, frekans büyüdükçe daha küçük değer alırlar ve bu yüzden kondansatör akımındaki harmoniklerin genlikleri kondansatörlere uygulanan gerilimin genliğinden büyük olur. Şekil 1.7’de kondansatörün kapasitif direncinin

frekansa bağılı değişimi görülmektedir.



Şekil 1.7 Kondansatörlerin kapasitif direncinin frekansa bağılı değişimi

Küçük bir harmonik gerilimin varlığı, kondansatörün büyük bir akım çekerek aşırı yüklenmesine ve sonucunda sistemde var olan harmoniklerin genliklerinin artmasına neden olur.

Gerilimdeki harmonikler sebebi ile kondansatörün gücü de artar. Şebeke işletmesinde sadece temel harmoniğe ait güç önem taşır. Buna karşılık kondansatörün dielektrik kayıpları, yani termik zorlanması bakımından toplam kondansatörün gücü geçerlidir.

Yalnızca kondansatörlerin kullanıldığı kompanzasyon tesislerinde, kondansatörlerin direncinin düşük olması nedeniyle harmonik akımların çoğunluğu kondansatörler üzerine yönelir.

Aşırı yüklenen kondansatörlerde ısınma, tahribat ve yaşlanma kaçınılmazdır. Kondansatörler doğrusal yük olduklarından harmonik üretmezler ancak şebekede var olan harmoniklerin genliklerini artırır. Endüktif karakteristikteki şebekeye paralel bağlanan kondansatörler, paralel rezonansa sebep olurlar. Şebeke tarafına genliği yüksek harmonik akımlarının iletilmesi söz konusudur. Böyle bir durumda kompanzasyonun yapılması kondansatörlerde tahribata yol açabileceği gibi harmoniklerin genliklerinde de artışa sebep olacağı için sisteme oldukça zarar veren durumlar ortaya çıkabilir. (Bayram, 2000)

Harmonikli sistemlerde kondansatör seçimi oldukça önemlidir. ANSI / IEEE 18–1980 Standardı, harmonikli devrelerde kondansatör seçimi için aşağıdaki değerleri tayin etmiştir.

- % 135 Etiket gücüne (kVAr) dayanabilirlik
- % 110 Etiket geriliminde dayanabilirlik
- % 180 Etiket akımına dayanabilirlik (Temel ve harmonik akım bileşenleri dahil)
- % 120 Tepe gerilime dayanabilirlik.

1.3.5 Ölçü Aletleri Üzerine Etkisi

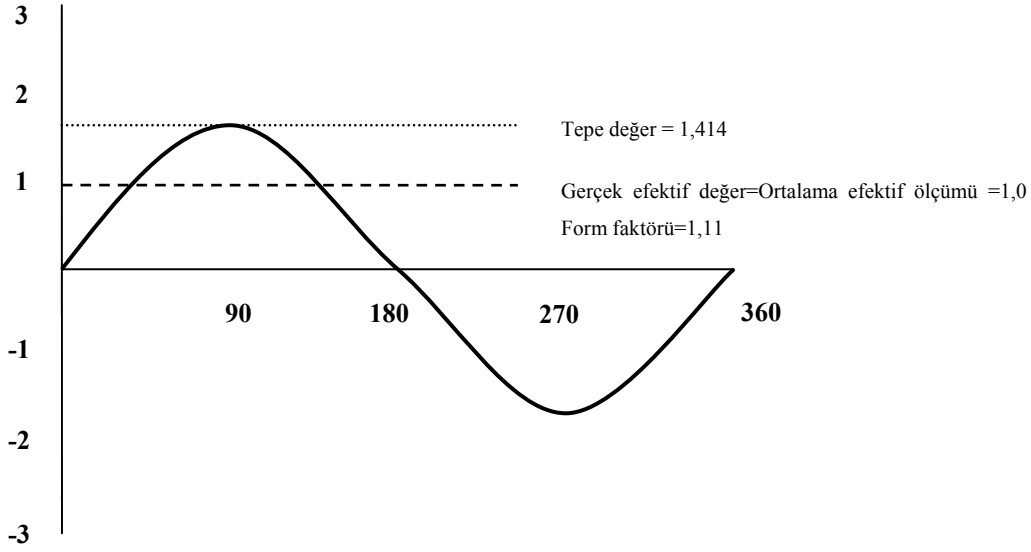
Harmonik bileşenlerin sistemi rezonansa sokması durumu ölçü aletlerini olumsuz yönde etkilemektedir. Endüksiyon diskli sayaçlar, normalde sadece temel akım bileşenini ölçerler. Buna ilave olarak harmonik distorsiyonunun sebep olduğu faz dengesizliği, sayaçların hatalı işletimine neden olabilir. Çalışmalar bu hataların, sayaç türüne ve harmoniklerin durumuna bağlı olarak hem pozitif hem de negatif yönde hatalar olabileceğini göstermiştir. Endüksiyon diskli sayaçlar en çok kullanılan sayaç türleridir. Akım ve gerilimin her ikisinin de dalga şekli değişmiş olduğu bir testte, bu sayaçlar %20'lere varan hatalara sebep olmuşlardır. (Kocatepe, 2003)

Bir alternatif akımın karesel ortalama değeri, belli bir rezisif yükte aynı miktarda ısı meydana getiren doğru akımın değeridir. Alternatif akımın bir dirençte meydana getirdiği ısı miktarı, dalga şeklinin tam bir devrindeki akım ortalamasının karesi ile orantılıdır. Diğer bir ifade ile; oluşan ısı, karesel ortalama ile orantılıdır, dolayısıyla akım değeri karesel ortalamanın karekökü ile orantılı olmaktadır. Kare alındığı için sonuç daima pozitifdir, bu nedenle polarite söz konusu olmaz.

İdeal bir sinüs eğrisi için efektif değer, tepe değerin 0,707 katıdır. Diğer bir ifade ile efektif değeri 1 Amper olan ideal sinüs eğrisi akımının tepe değeri 1,414 Amper olacaktır. Bir dalga formunun bütününün ortalaması alındığında ortalama değer, tepe değerin 0,636 katı veya efektif değerin 0,9 katı olur. Şekil 1,8'de tepe ve efektif değer sinüsoidal dalga şekli üzerinde gösterilmiştir. Aşağıda ise iki önemli oranın tarifi yapılmıştır.

$$\text{Tepe Faktörü} = \frac{\text{Tepe Değer}}{\text{Efektif Değer}} = 1,414 \quad (1.2)$$

$$\text{Form Faktörü} = \frac{\text{Efektif Değer}}{\text{Ortalama Değer}} = 1,111 \quad (1.3)$$



Şekil 1.8 Tepe değeri ve efektif değeri sinüsoidal dalga şekli üzerinde gösterimi

İdeal sinüs eğrisinin ölçülmesinde basit bir ölçüm yapılarak ortalama değeri ($0,636 \times$ tepe) bulunur ve form faktörü (1,111) ile çarpılarak (tepe değeri 0,707 ile çarpımı demektir) efektif değeri elde edilir. Tüm analog ölçü aletlerinde, eski ve yeni dijital multimetrelerin çoğunda bu yaklaşım esas alınır. Bu teknik, 'Efektif değeri kalibreli ortalama ölçüm' tekniği olarak tanımlanmaktadır. (Copper Development Association, Harmonics 3.2.2, 2001)

Gerçek efektif değeri ölçen bir ölçü aleti, ölçüm anındaki akım değerinin karesini ve zamana göre ortalamasını alır. Bu ortalamanın karekökünü ekranda gösterir. Güvenilirliği tam olmak kaydıyla, dalga şekli ne olursa olsun güç aletinin gösterdiği sonuç kesinlikle doğrudur. Güvenilirlik hiçbir zaman mükemmel olmayacağından iki faktörün göz önünde tutulması gerekir; bunlardan biri frekans, diğeri de tepe faktörüdür. (Copper Development Association, Harmonics 3.2.2, 2001)

İki tip ölçü aleti bozuk dalga şekillerinin ölçümünde farklı sonuçlar vermelerine karşın, ideal sinüs şekli ölçümlerinde aynı sonucu verirler. Aslında ölçü aletleri bu şekilde kalibre edilmektedir ve her ölçü aletinin kalibrasyon onaylı ve sadece sinüs şekilleri için kullanılmak üzere üretilmesi gerekir. Çizelge 1.1'de çeşitli dalga şekilleri için farklı multimetre tiplerinden alınan ölçüm sonuçlarının aralarındaki farklar gösterilmiştir. (Copper Development Association, Harmonics 3.2.2, 2001)

Çizelge 1.1 Ortalama ve efektif değerin karşılaştırılması

Multimetre tipi	Sinüs eğrisine cevap	Kare dalgaya cevap	Tek faz diyot redresöre cevap	3 fazlı diyot redresöre cevap
				
Ortalama cevaplı	Doğru	%10 yüksek	%40 düşük	%5-30 düşük
Efektif cevaplı	Doğru	Doğru	Doğru	Doğru

Gerçek efektif değer ölçüm aletleri yaklaşık 30 yıldır kullanılmaktadır. Başlangıçta özel ve pahalı olan bu aletler elektronikteki gelişmeler paralelinde, gerçek efektif değerini sağlıklı ölçebilen, taşınabilir multimetreler olarak geliştirilmiştir.

Önemli sayıda doğrusal olmayan yüklerin (PC'ler, elektronik balastlar, kompakt flüoresan lambalar, vs) bulunduğu bir tesisatta gerçek efektif değer ölçümü yapmak şarttır. Ortalama değeri gösteren aletler %40'a varan bir oranda daha düşük değerler verir. Kabloların, devre kesicilerin yanlış seçimine, dolayısıyla da riskli sonuçların ve devre açılmalarının meydana gelmesine neden olur. (Copper Development Association, Harmonics 3.2.2, 2001)

1.4 Harmonikli Durumlarda İfadeler

Güç sistemlerinde harmonik bileşenleri, gerilimin ve akımın ani değerleri Fourier serileri ile ifade edilebilir:

$$v(t) = \sum_{n=1}^{\infty} v_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_n \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (1.4)$$

$$i(t) = \sum_{n=1}^{\infty} i_n(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_n \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (1.5)$$

Yukarıdaki (1.4) ve (1.5) ifadelerinde v_n ve i_n sırasıyla n.harmonik geriliminin ve akımının ani değerleridir. V_n ve I_n ise sırasıyla n.harmonik mertebesi için gerilim ve akımın efektif değerleridir. ω_1 temel frekansa ait açısal frekanstır ve açılar ise n.harmonik için gerilim ve

akıma ait faz açılarıdır. (Kocatepe, 2003)

Harmonikli durumlardaki güç tanımları ise aşağıdaki gibi yapılabilir.

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

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (1.7)$$

$$Q = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \sin(\theta_n - \delta_n) \quad (1.8)$$

$$D^2 = S^2 - P^2 - Q^2 \quad (1.9)$$

Yukarıdaki (1.7) ifadesinde de görüldüğü gibi farklı frekanslardaki akım ve gerilimleri aktif güce katkısı yoktur. Distorsiyon gücü aktif olmayan bir güç olup sinüsoidal işaretli lineer devrelerde değeri sıfırdır.

Güç faktörü değeri, güç sisteminden çekilen akımın bir yük tarafından ne kadar verimlilikle kullanıldığını ölçmek için gereklidir. Sinüsoidal veya sinüsoidal olmayan durumlarda güç faktörü

$$GF = \frac{P}{S} \quad (1.10)$$

şeklinde tanımlanır. Burada P (aktif güç), temel frekans bileşeni ve diğer harmonik bileşenlere ait güçlerin toplanması ile bulunur.

Toplam harmonik distorsiyonu (THD) harmonik büyüklüklerin sınırlandırılması amacı ile yapılan incelemelerde yaygın olarak kullanılır. THD harmonik bileşenlerin efektif değerlerinin, temel bileşen efektif değerine oranıdır. Genellikle yüzde olarak ifade edilir ve formülleri aşağıdaki gibidir.

Gerilim için toplam harmonik distorsiyonu,

$$THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} V_n^2}}{V_1} \quad (1.11)$$

akım için toplam harmonik distorsiyon,

$$THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} I_n^2}}{I_1} \quad (1.12)$$

ifadesi ile belirlenir.

2. DİSTORSİYONLU DALGA FORMLARINDA GÜÇ TANIMLARININ İRDELENMESİ

2.1 Giriş

Bu bölümde literatürde yer alan harmonikli ve dengeli sistemlerdeki aktif ve reaktif güç tanımları karşılaştırmalı olarak incelenecektir. Ayrıca IEC ve TSE standartları tarafından kabul edilen reaktif ve aktif güç tanımları ile literatürde yer alan aktif ve reaktif güç tanımları arasındaki fark örneklerle incelenecektir.

2.2 Bir Fazlı Sistemlerde Güç Tanımları

Distorsiyon gücünü güç tanımı içine dâhil eden son çalışmalar Budeanu ve Fryze tarafından yapılmıştır. (Antoniu, 1984) (Fryze, 1932)

Budeanu görünen gücü ortogonal üç kısıma ayırmıştır, Görünen gücü

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D^2 \quad (2.1)$$

olarak tanımlamıştır. Reaktif gücü ise IEC ve IEEE tarafından kabul gördüğü şekilde aşağıdaki gibi tanımlamıştır.

$$Q_B = \sum_{l=1}^n V_l I_l \sin(\varphi_l) \quad (2.2)$$

Tamamlayıcı güç (Budeanu ifadesiyle sanal güç) de aşağıdaki gibi formüle edilmiştir.

$$P_c = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.3)$$

Fryze ise akımı,

$$i = i_a + i_r \quad (2.4)$$

şeklinde iki ortogonal parçaya ayırmış olup burada; i_a aktif bileşeni ve i_r reaktif bileşeni ifade etmektedir.

Reaktif güç için aşağıdaki tanımlamayı önermiştir:

$$Q_F = V \cdot I_b = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.5)$$

Bu formüllere daha fazla fiziksel anlam katmak için Shephard ve Zakikhani aşağıdaki gibi

parçalanmış bir formülasyon önermiştir (Shepherd, 1972):

$$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2 \quad (2.6)$$

$$S_R^2 = \sum_1^n V_n^2 \sum_1^n I_n^2 \cdot \cos^2(\varphi_n) \quad (2.7)$$

$$S_X^2 = \sum_1^n V_n^2 \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2(\varphi_n) \quad (2.8)$$

$$S_D^2 = \sum_1^n V_n^2 \sum_1^p I_p^2 + \sum_1^m V_m^2 \left(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^p I_p^2 \right) \quad (2.9)$$

Bu tanımlamalarda S_R aktif görünen güç, S_X reaktif görünen güç, S_D distorsiyon görünen güç olarak kullanılmıştır.

Üç adet bileşen güç içeren alternatif bir model Sharon tarafından geliştirilmiştir. (Sharon, 1973)

$$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2 \quad (2.10)$$

Bu formülde P yaklaşık olarak aktif güç, S_Q yaklaşık olarak reaktif güç ve S_C yaklaşık olarak tamamlayıcı reaktif güçtür.

Shephard ve Zakikhani modellerine benzer olarak maksimum güç faktörü lineer pasif elemanlarla ilişkilendirilmiştir. Ayrıca, Sharon şüpheli terim olan S_R 'yi daha kabul edilebilir olan güç P ile değiştirmiştir.

Dikkat edilmesi gereken bir diğer husus ise genelde reaktif gücün ana katkı değeri gerilimin ana bileşeninden gelmektedir. Emanuel reaktif güç için aşağıdaki tanımı önermiştir. (Emanuel, 1955)

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin(\varphi_1) \quad (2.11)$$

Tamamlayıcı güç için ise aşağıdaki tanımı yapmıştır.

$$P_C^2 = S^2 - P^2 - Q_1^2 \quad (2.12)$$

Fryze teorisine göre, Kusters ve Moore zaman domeninde akımı üç gruba ayırarak güç tanımlaması yapmıştır. (Kusters, 1980) Bunlara göre

$$i_{qr} = i - i_p - i_q \quad (2.13)$$

olup, bu ifadedeki terimler şunları belirtmektedir.

i_p İdeal direnç üzerinden tüketilen güç ile eşdeğer olan aktif bileşen

i_q bobin veya kondansatör üzerinden harcanan güce denk olan reaktif bileşen

i_{qr} aktif ve reaktif bileşeni çıkardıktan sonra kalan kaçak reaktif bileşen

Bunun yanında, Kusters ve Moore görünen gücü aşağıdaki gibi bileşenlere ayırarak formüle etmiştir.

$$S^2 = P^2 + Q_l^2 + Q_r^2 = P^2 + Q_c^2 + Q_{cr}^2 \quad (2.14)$$

Bu formülde $P=VI_p$ aktif güç, $Q_l=VI_{ql}$ endüktif reaktif güç, $Q_c=VI_{qc}$ kapasitif reaktif güç ve Q_{lr}/Q_{cr} kalan reaktif güç değeridir.

Ayrıca Fryze tanımına göre Emanuel, ana frekansa ait güç bileşenleri ile harmoniklere ait güç bileşenleri arasındaki farkı ayırmak için iki alternatif ayrıştırılmış tanım kullanmıştır.

$$S^2 = (P_1 + P_H)^2 + Q_F^2 \quad (2.15)$$

$$Q_F^2 = D^2 + Q_B^2 \quad (2.16)$$

$$S^2 = (P_1 + P_H)^2 + Q_l^2 + Q_H^2 \quad (2.17)$$

$$Q_H^2 = Q_F^2 - Q_l^2 \quad (2.18)$$

Gücün sinüsoidal olmayan durumlar için bileşenlerine ayrılmış şekilde formüle edilmesi üzerine Czarnecki, Slonin ve Van Wyk tarafından da çeşitli makaleler yayınlanmıştır.(Czarnecki, 1987) (Slonin ve Van Wyk, 1988)

Emanuel bu durumu aşağıdaki gibi açıklamıştır (Emanuel, 1998) :

- Görünen enerji bileşenlerinde ortaya çıkan aktif olmayan gücün bütün formları farklı kaynaklar,kaynak ve yük veya kaynak yük arasında salınır.Transfer olan net enerjinin aktif olmayan güç bileşeni yoktur.
- Gücü tanımlayan S_1, P_1 ve Q_1 'in ana anlamları enerjinin üretildiğini, iletildiğini ve tüketildiğini belirtmektir. Bu sebeple görünen güç S 'yi, sinüsoidal temel görünen güç S_1 ve nonsinüsoidal temel görünen güç S_N olarak iki kısma ayırmak faydalı olur.

$$S^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (2.19)$$

- Ayrıca, S_N harmonik aktif güçler içerir; P_H . Harmonik aktif güçler P_1 'in yaklaşık olarak 0,005 katı olarak karşımıza çıkar. Böylece ilk yaklaşım olarak söyleyebiliriz ki; endüstriyel lineer olmayan yükler P_1 , Q_1 ve S_N değerlerinin ölçümlerinden çıkarılabilirler.
- S_N alt bileşenleri ihtiyaç duyulan dinamik kompanzasyon gücü ya da statik filtre gücü ve gerilim ve akım distorsiyon seviyesi hakkında bilgi verir.

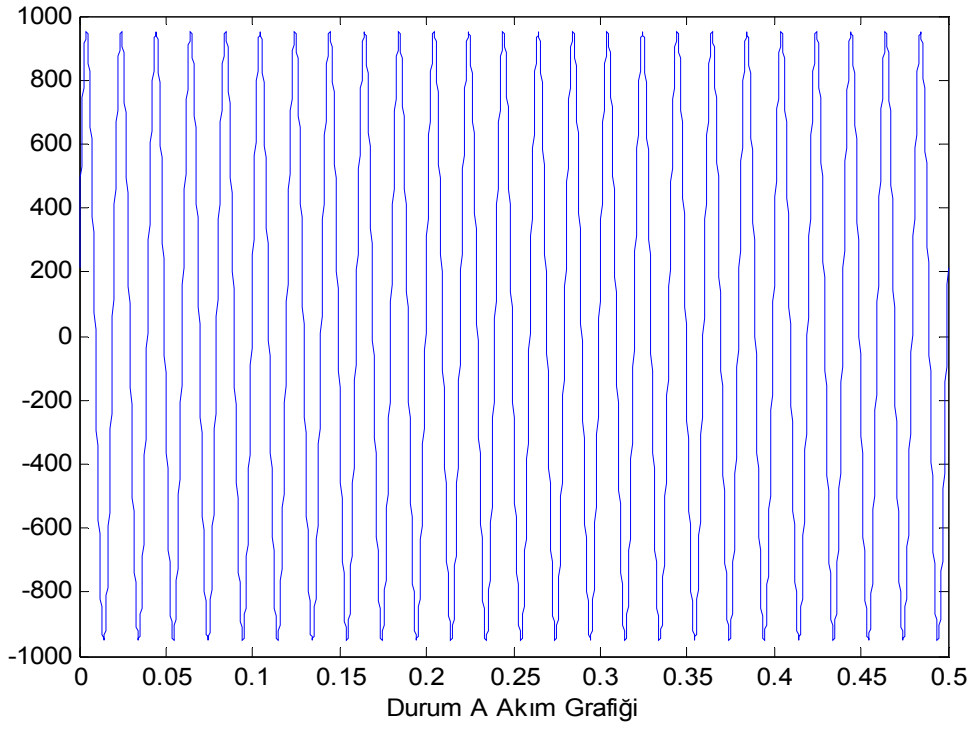
IEC ile tamamen uyumlu olan TSE sayaç standartlarında ise reaktif güç tanımı aşağıdaki gibi yapılmıştır.

Tek fazlı bir devredeki herhangi tek bir frekansın sinüs dalga biçimleri için reaktif güç, akım ve gerilimin k.o.k. değerlerinin ve aralarındaki faz açısının sinüsünün çarpımı olarak tanımlanır. (Reaktif güce ilişkin standartlar, sadece temel frekansı içeren sinüs biçimli akımlar ve gerilimler için uygulanır.)

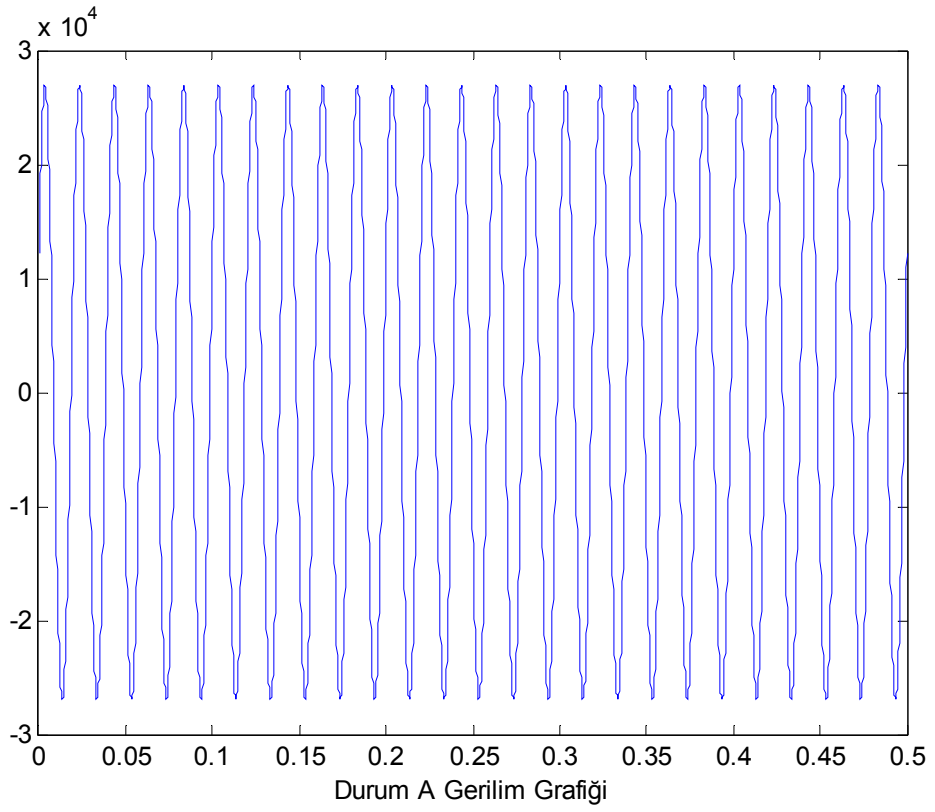
Yukarıda kullanılan her bir tanımın uygulamadaki sonuçlarını görmek için sayısal değerlerle örnek bir uygulama yapılmıştır. Örnekte gerilimin 26,95 kV değeri için oluşturulan çalışma durumları Çizelge 2.1'de ve her bir duruma ait dalga şekilleri aşağıdaki şekillerde verilmiştir.

Çizelge 2.1 Matlab / Simulink uygulamasında kullanılan çalışma durumları

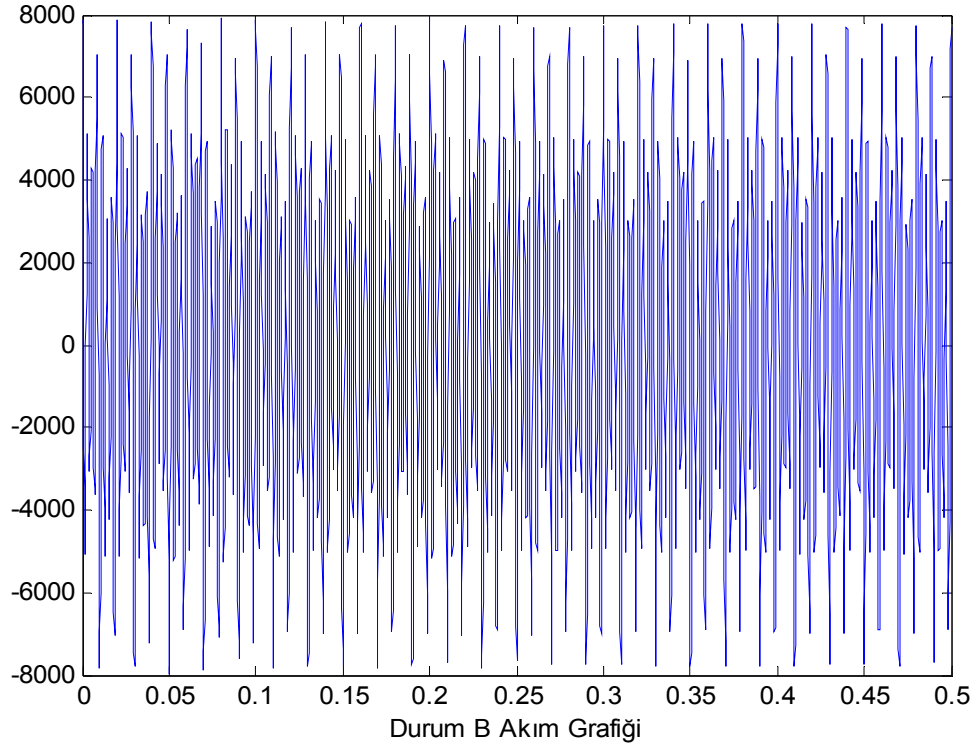
Çalışma Kodu	Gerilim	Akım	Yük	Açıklama
A	Sinüsoidal	Sinüsoidal	Lineer	Faz açıları aynı
B	Nonsinüsoidal	Nonsinüsoidal	Lineer	Faz açıları farklı
C	Sinüsoidal	Nonsinüsoidal	Nonlineer	Faz açıları farklı
D	Nonsinüsoidal	Nonsinüsoidal	Nonlineer	Faz açıları farklı



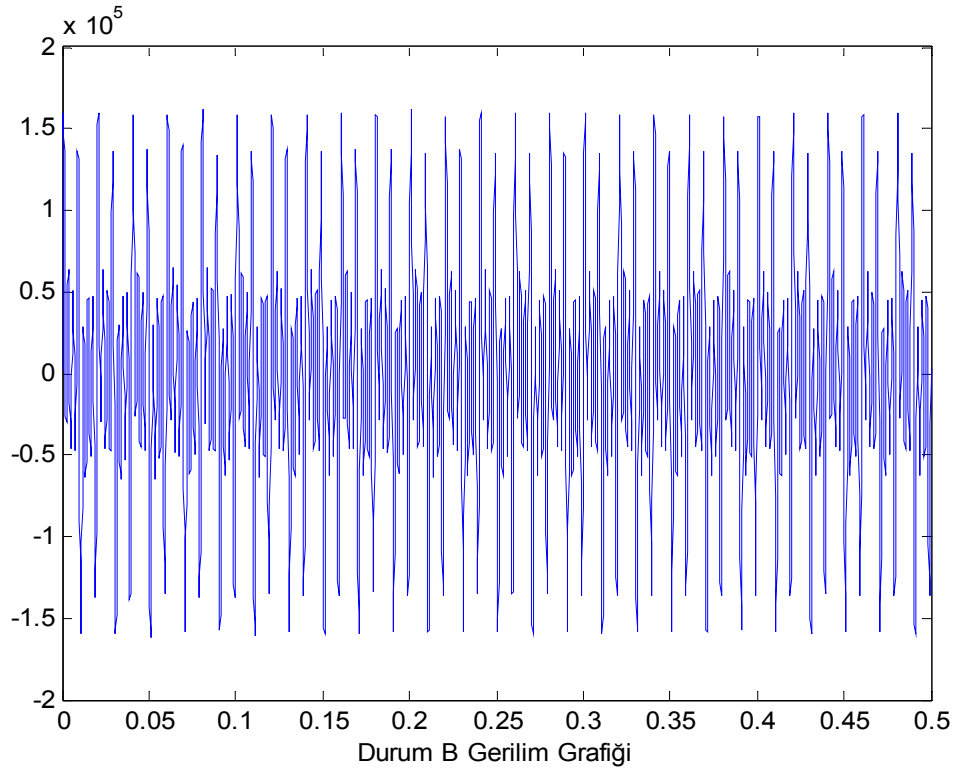
Şekil 2.1 A çalışma durumuna ait akım dalga şekli



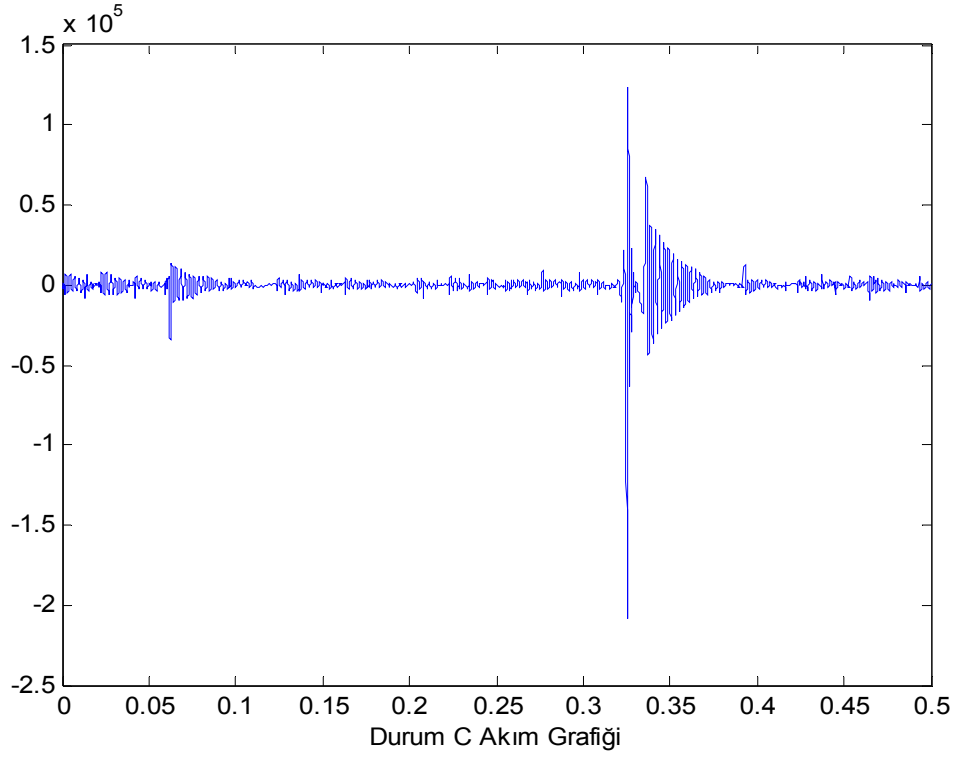
Şekil 2.2 A çalışma durumuna ait gerilim dalga şekli



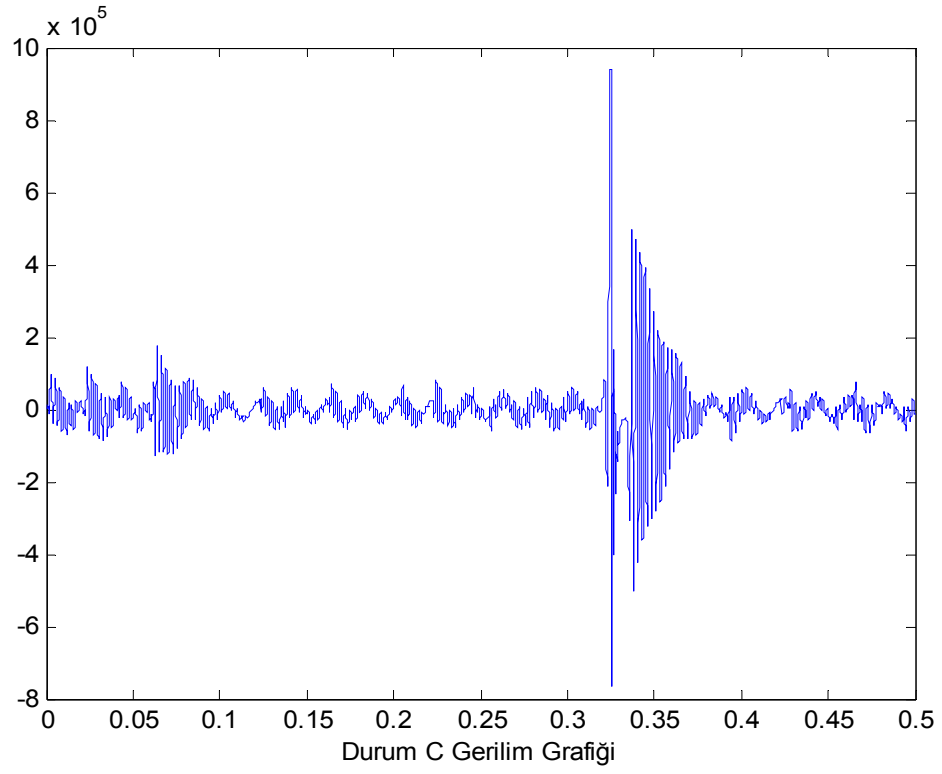
Şekil 2.3 B çalışma durumuna ait akım dalga şekli



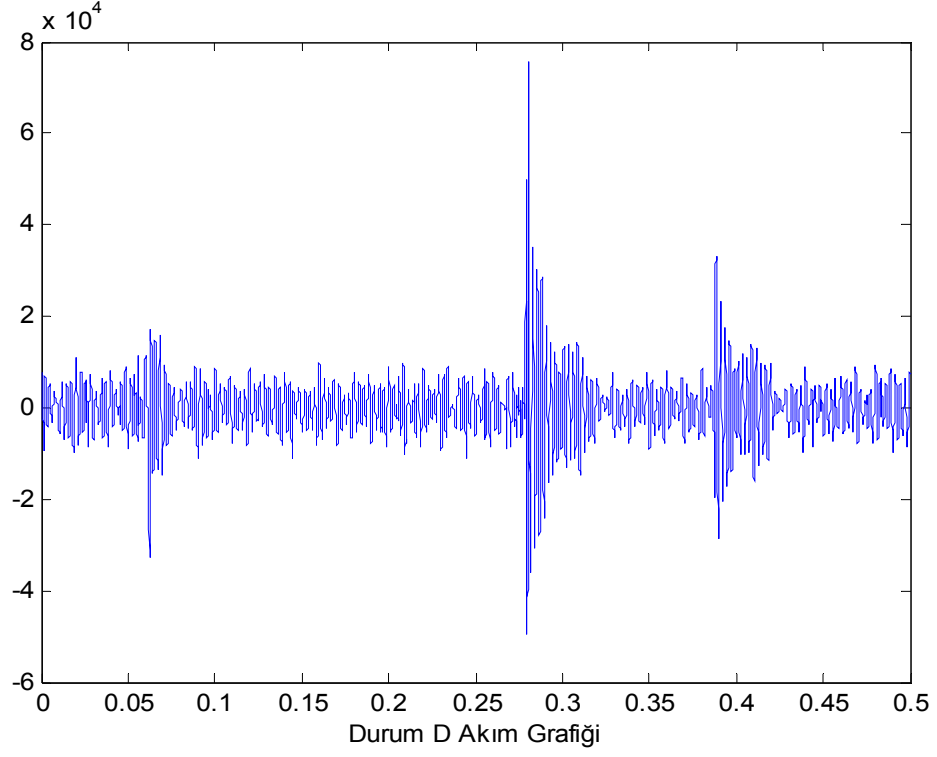
Şekil 2.4 B çalışma durumuna ait gerilim dalga şekli



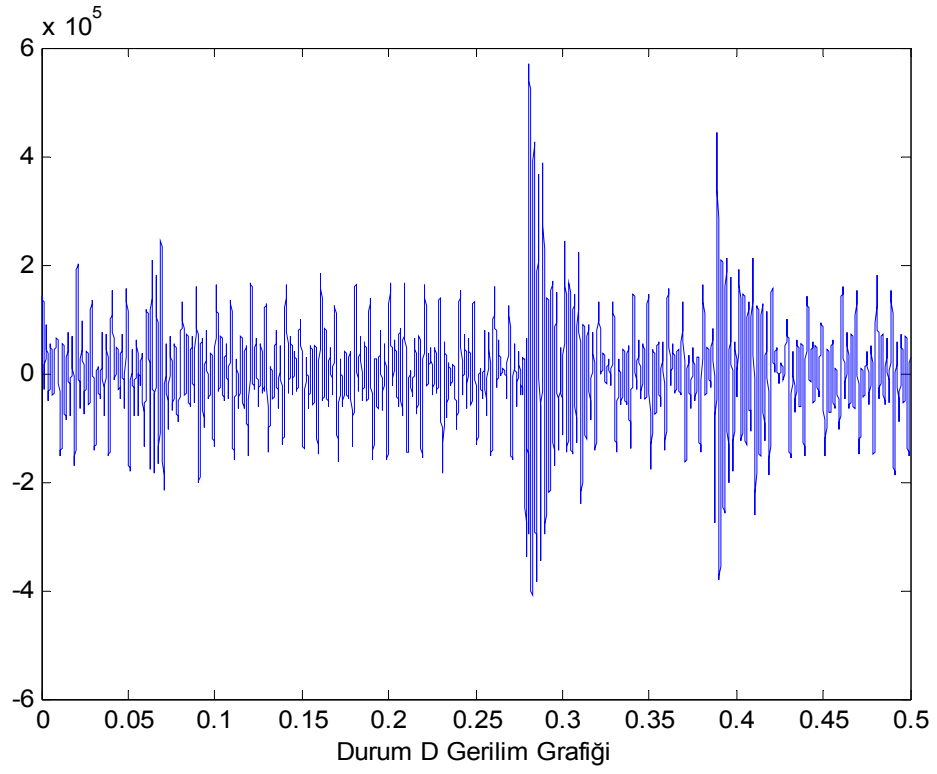
Şekil 2.5 C çalışma durumuna ait akım dalga şekli



Şekil 2.6 C çalışma durumuna ait gerilim dalga şekli



Şekil 2.7 D çalışma durumuna ait akım dalga şekli



Şekil 2.8 D çalışma durumuna ait gerilim dalga şekli

Bu dört duruma göre bulunan sayısal sonuçlar aşağıdaki tablodaki (Çizelge 2.2) gibi özetlenmiştir ve zaman domeninde uygulanan gerilim ve akım dalga şekilleri her bir durum için sırasıyla yukarıdaki Şekil 2.1, Şekil 2.2, Şekil 2.3, Şekil 2.4, Şekil 2.5, Şekil 2.6, Şekil 2.7, Şekil 2.8’de ki grafiklerde görülebilir.

Çizelge 2.3 ise bundan önce açıklaması yapılan güç tanımlara göre çıkan sayısal sonuçları özetlemektedir.

Aktif Güç P ; reaktif güç Q , görünen güç S_x , karesel reaktif Güç Q_s , ana bileşen reaktif gücü Q_1 , Fryze tarafından tanımlanan reaktif güç Q_F , distorsiyon gücü D , görünen güç S ve güç faktörü PF olarak sembolize edilmiştir.

Çizelge 2.2 Matlab/Simulink uygulamasında kullanılan çalışma durumlarına ait akım ve gerilim değerleri

Çalışma Kodu	Parametre	$V_1 \angle \alpha_1$	$V_3 \angle \alpha_3$	$V_5 \angle \alpha_5$	$V_7 \angle \alpha_7$
A	v_A (kV)	$26,95 \angle 26,92^\circ$			
	i_A (A)	$949,71 \angle 12,86^\circ$			
B	v_B (kV)	$26,91 \angle 26,75^\circ$	$42,09 \angle -2,94^\circ$	$44,18 \angle -2,87^\circ$	$71,61 \angle -4,37^\circ$
	i_B (A)	$948,86 \angle 12,83^\circ$	$779,46 \angle 50,13^\circ$	$1931,71 \angle 81,06^\circ$	$4999,12 \angle 83,71^\circ$
C	v_C (kV)	$25,82 \angle 23,34^\circ$	$2,14 \angle -149,31^\circ$	$2,12 \angle -128,89^\circ$	$9,88 \angle -129,24^\circ$
	i_C (kA)	$931,68 \angle 6,42^\circ$	$114,85 \angle -80,44^\circ$	$168,76 \angle -58,30^\circ$	$815,55 \angle -48,96^\circ$
D	v_D (kV)	$25,39 \angle 20,90^\circ$	$44,61 \angle -8,20^\circ$	$47,44 \angle -6,55^\circ$	$82,33 \angle -14,36^\circ$
	i_D (A)	$976,31 \angle 19,08^\circ$	$1001,13 \angle 50,61^\circ$	$2249,13 \angle 77,13^\circ$	$5972,95 \angle 73,19^\circ$

Çizelge 2.3 Matlab / Simulink uygulamasından alınan ölçüm sonuçları

Büyüklik		A	B	C	D
Aktif Güç	P(W)	24.828,69	65.869,35	24.589,58	81.150,42
Budeanu	$Q_B(VAr)$	6.214,83	474.989,88	15.505,27	636.309,20
Shepherd	$S_X(VAr)$	6.214,83	527.791,12	24.183,77	694.375,98
Sharon	$Q_S(VAr)$	6.214,83	145.142,04	22.453,77	163.246,24
Emanuel	$Q_I(VAr)$	6.214,83	6.139,54	6.997,71	786,88
Fryze	$Q_F(VAr)$	6.214,83	497.328,11	21.581,60	662.953,20
Budeanu	D(VAr)	0,00	147.376,58	15.011,73	186.057,93
IEC/TSE	Q_{TSE}	6.214,83	474.989,88	15.505,27	636.309,20
Görünen Güç	S(VA)	25594,6845	501671,225	32717,1618	667901,4442

Aşağıdaki bölümde, A, B,C ve D durumları arasında yapılan karşılaştırma sonuçları üzerinde durulmuştur.

Yukarıdaki tablodaki karşılaştırmalardan doğan sonuçlar aşağıdaki gibidir.

- Gerilim sinüsoidal, yük lineer ise (Durum A) bütün reaktif güç formülleri Fryze'ın distorsiyon güç bileşenini de içeren tanımı dahil olmak üzere aynı sonuçları verir.
- Gerilim nonsinüsoidal, yük lineer ise (Durum B) devrede harmonikli bileşenler bulunduğu için distorsiyon gücünü reaktif güç tanımı içerisinde kabul eden güç tanımlarında sonuç daha fazla çıkmaktadır.
- Reaktif güç hesabı içerisine distorsiyon gücünü dahil etmeyen Budeanu'ya göre reaktif güç sadece kapasitör ile kompanze edilebilir. Distorsiyon gücünü reaktif güç tanımına ilave eden Fryze'a göre ise reaktif güç basit bir kapasitör ile kompanze edilemez.
- Gerilim çeşitli mertebelerde harmoniklere sahip ve yük ise nonlineer olduğunda distorsiyon gücü arttığı için literatürdeki çeşitli güç tanımlarına göre hesaplanan güç değerleri artmaktadır.

2.3 Üç Fazlı Sistemlerde Güç Tanımları

Görünen güç dengesiz üç fazlı sistemlerde şu anda farklı güç faktörü seviyelerine yönlendiren çeşitli tanımlar kullanılarak hesaplanır. Sonuç olarak elektrik faturaları da, reaktif güç tarifelerinden dolayı ve maksimum görünen gücün kayıt edilmesinden dolayı bazı ülkelerde farklı olacaktır.

Görünen reaktif güç için dört adet farklı tanımlama yapılmıştır. Bu tanımlamalardan iki tanesi Budeanu'a aittir diğer ikisi ise Fryze tarafından geliştirilmiştir.

$$S_v = \sqrt{(\sum_k P_k)^2 + (\sum_k Q_{bk})^2 + (\sum_k D_k)^2} \quad (2.20)$$

$$S_a = \sum_k \sqrt{P_k^2 + Q_{bk}^2 + D_k^2} \quad (2.21)$$

Yukarıdaki tanımlamalarda k fazında P_k aktif gücü, Q_{bk} Budeanu reaktif gücü ve D_k distorsiyon gücü ifade etmektedir. Bu terimler ana uluslararası organizasyonlar olan IEEE ve IEC tarafından genel olarak kabul görmüştür.

$$S_e = \sum_k \sqrt{P_k^2 + Q_{fk}^2} = \sum_k V_k \cdot I_k \quad (2.22)$$

Görünen efektif güç, her fazda bağımsız olarak tüketilen güç olarak kabul edilir.

$$S_s = \sqrt{P^2 + Q_f^2} = \sqrt{\sum_k V_k^2 \cdot \sum_k I_k^2} \quad (2.23)$$

Sistem görünen gücü üç fazlı şebekenin ünite bazındaki gücü olarak kabul edilir.

Son iki ifadede kullanılan reaktif güçler Q_f ve Q_{fk} , Fryze'ın tanımladığı gibi, sadece reaktif gücü değil aynı zamanda da distorsiyon gücü içerir şekilde kullanılmıştır.

Diğer ifadeler hariç vektörel görünen güçte faz reaktif güçleri birbirlerini kompanze ederler. Sistem görünen gücü ifadesi her fazdaki akım ve gerilimi hesaplar ve bu nedenle en yüksek değerde görünen güç değerini verir.

Genelde aşağıdaki ifade uygulanır:

$$S_v \leq S_a \leq S_e \leq S_s \quad (2.24)$$

Bir yükün veya bir sistemin güç faktör değeri genel olarak güç transfer etkinliğinin bir ölçütü olarak kabul edilir ve değişik enerji formlarına dönüştürülen elektriksel güç ile görünen güç arasındaki oran olarak tanımlanır.

$$PF=P/S \quad (2.25)$$

Buna ilişkin olarak, güç faktörünün ilgili büyüklükleri farklı tanımlardan hesaplanabilir.

$$PF_v \leq PF_a \leq PF_e \leq PF_s \quad (2.26)$$

Nötr hatlı üç fazlı şebekelerde güç faktörünün sistem etkinliğini yansıtması için nötr akımı da hesaplamalara dahil edilmelidir.

$$I_k^2 = I_a^2 + I_b^2 + I_c^2 + I_n^2 \quad (2.27)$$

$$V_k^2 = V_a^2 + V_b^2 + V_c^2 + V_n^2 \quad (2.28)$$

Bu formüllerde a,b,c fazları, n alt indisi ise nötr hattını belirtmektedir.

2.4 Ölçüm Cihazlarında Harmoniklerin Etkileri

Ölçüm cihazları öncelikle sinüsoidal alternatif akımda çalışmak üzere kalibre edilirler ancak bozulmuş elektrik şebekesinde kullanılabirler ve bu sebeple de hatalı ölçme eğilimindedirler. Harmonik güç akışının yönü ve büyüklüğü, sayaçların hata analizinin güç akış yönüne göre yapıldığı durumlarda ve enerji satışından bedel alınan noktalarda önemlidir.

Çalışmalar göstermiştir ki harmonik bazlı hatalar, sayaçların çeşitlerine göre değişmektedir. Bu durumda, fazla veya eksik yazma yönünde ölçüm hatalarının meydana gelmesi muhtemeldir.

3. DENEY DEVRESİNİN TANITIMI

3.1 Giriş

Bu çalışmada, enerji ölçümü yapan sayaçların harmonikli durumdaki hatalarını araştırmak üzere gerçek bir sistem üzerinde ölçümler yapılmıştır. Harmonikli durumda aktif ve reaktif enerji ölçümü esnasında hataları belirlemek üzere Şekil 3.1’de verile deney devresi kurularak üzerinde ölçümler gerçekleştirilmiştir.

3.2 Deney Devresi

Deney devresinde lineer olmayan yük (harmonik kaynağı) olarak, triyakla kontrol edilen paralel bağlı 40 Ω ’luk direnç ile 415 mH’lik endüktanstan oluşan üç fazlı yıldız bağlı dimmer devresi kullanılmıştır. Üç fazlı yük nominal gerilimi 380 V olan şebekeden beslenmiştir. Deneyde kullanılan dijital elektrik sayaçları, sekonder akımı 5A olan akım transformatörleri ve sekonder faz-nötr gerilimi 57,7 V (faz-faz gerilimi 100 V) olan gerilim transformatörleri üzerinden devreye bağlanan üç fazlı sayaçlar olduğu için sayaç bağlantıları 5/5 A’lık akım transformatörleri ve deney için özel olarak sardırılan 220/60 V’luk gerilim transformatörleri üzerinden yapılmıştır.

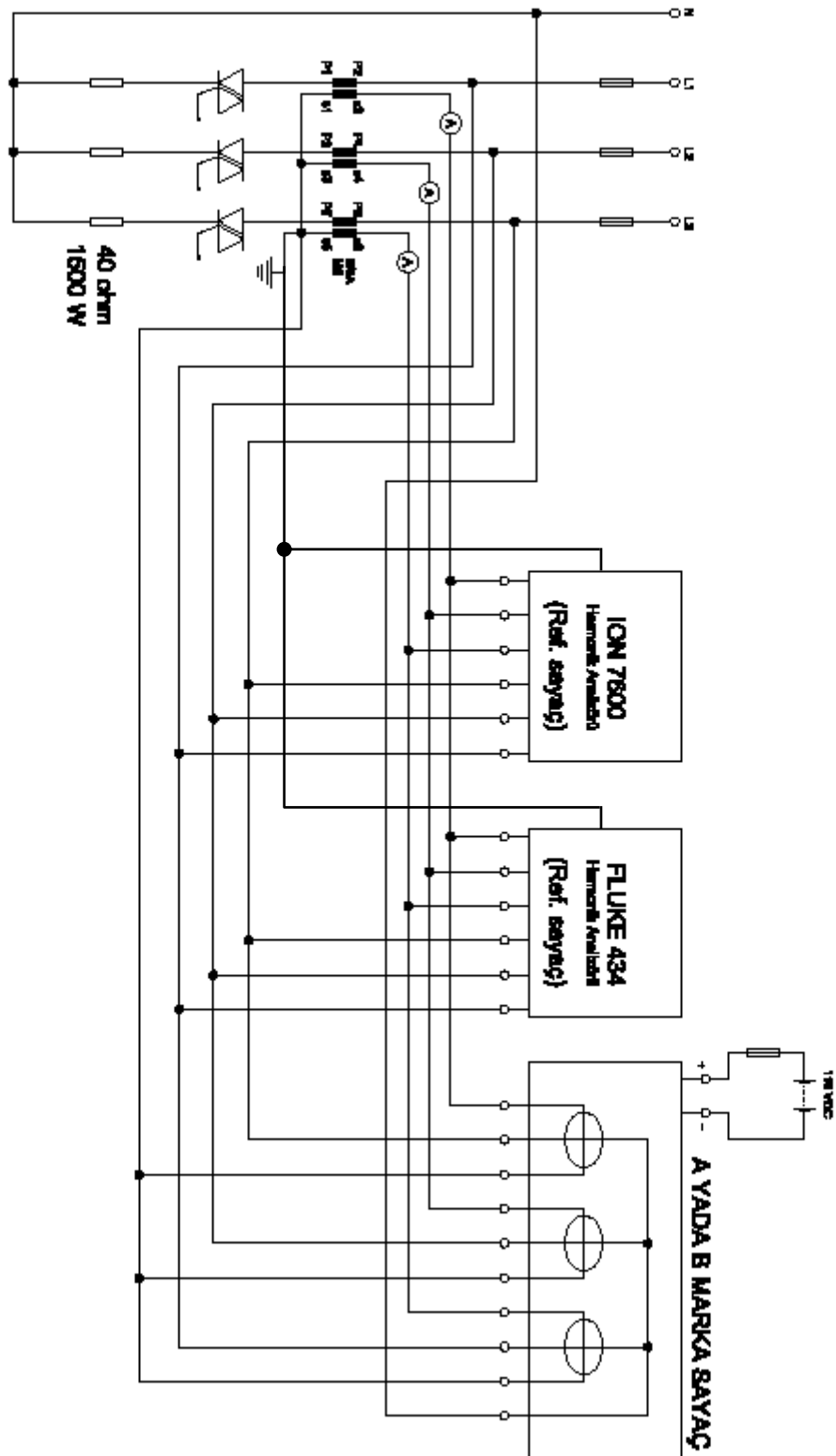
3.3 Deneyde Ölçülen Durumlar

Deneyde 1 adet lineer yüklenme ve 3 adet nonlinear yüklenme koşullarında ölçümler gerçekleştirilmiştir. (Çizelge 3.1) Her iki sayaç için hem lineer yük halindeki hatası ile 3 farklı akım distorsiyonunun bulunduğu durumdaki hatası hedeflenmiştir.

Deneyde triyak tetikleme açısı değiştirilerek yük akımının toplam harmonik bozulması (THD_I) değiştirilmiş, dört farklı durum (lineer yük, $THD_I = \%15$, $THD_I = \%30$ ve $THD_I = \%60$) için sayaçların hataları incelenmiştir. Deney süresince şebeke geriliminin toplam harmonik bozulması (THD_V) $\%5$ ile $\%7$ arasında değişmiştir. Bu nedenle lineer yük için yapılan ölçümlerde triyak tetikleme açısı 0° ’ye ayarlanmasına rağmen şebeke gerilimindeki harmonik bozulmadan dolayı $THD_I = \%5$ civarında kalmıştır.

Çizelge 3.1. Ölçümlerin yapıldığı durumlar

ÖLÇÜLEN SAYAÇ	ÖLÇÜLEN DURUM			
SAYAÇ A	Lineer Yük	THD _I = %15	THD _I = %30	THD _I = %60
SAYAÇ B	Lineer Yük	THD _I = %15	THD _I = %30	THD _I = %60



Şekil 3.1 Deney devresi

3.4 Deneyde Kullanılan Aletler

Deneylerde aşağıdaki sayaç ve harmonik analizörleri kullanılmıştır. (Kullanılan harmonik analizörlerinin enerji kayıt özelliği de bulunmaktadır.)

- SAYAÇ A dijital üç fazlı çok fonksiyonlu elektrik sayacı,
- SAYAÇ B dijital üç fazlı çok fonksiyonlu elektrik sayacı,
- Power Measurement marka ION 7600 tipi üç fazlı güç kalitesi ve enerji analizörü,
- Fluke marka Fluke 434 tipi üç fazlı güç kalitesi ve enerji analizörü (Bu cihaz 105G129 nolu “Güç Kalitesi Milli Projesi” tarafından sağlanmıştır.)

Aşağıda, Çizelge 3.2’de deneyde incelenen elektrik sayaçlarının özellikleri verilmiştir.

Çizelge 3.2 Deneyde incelenen elektrik sayaçlarının özellikleri

Elektrik Sayacının Özellikleri		
Markası	SAYAÇ A	SAYAÇ B
Etiketindeki Tanımı	3 Fazlı Çok fonksiyonlu Enerji Sayacı	Ticari ve Endüstriyel Sayaç
Nominal Gerilimi	57,7/100 V	3x57,7/100V – 3x220/380 V
Nominal Akımı	5(10) A	1(10) A
Sınıfı (Aktif (kWh))	Cl. 0,5 S	Cl. 0,5 S
Sınıfı (Reaktif (kVArh))	Cl. 1	Cl. 2
Üretim Yılı	2005	2003

Deneyde referans sayaç olarak FLUKE 434 ve ION 7600 güç kalitesi ve enerji analizörleri kullanılmıştır. Bu nedenle test edilen sayaçlarla ilgili verilen bağıl hata değerlerinin doğruluğu bu analizörlerin doğruluğuna bağlıdır. Ölçülerin sonuçların bağıl farkları

$$\frac{u_2 - u_1}{u_1} \quad (3.1)$$

formülü ile hesaplanmıştır.

3.5 Deneye Ait Ölçümler

Yukarıda da belirtildiği üzere deneyler Çizelge 3.1'e uygun olarak önce lineer yük durumu için daha sonra 3 farklı harmonikli durum için yapılmıştır. Böylece harmonik distorsiyonun artışı ile ölçme hatalarının değişiminin incelenmesi hedeflenmiştir.

3.5.1 Lineer Yük İçin Yapılan Ölçümler

Lineer yüklenme durumu için, akıma ait toplam harmonik distorsiyon, gerilime ait toplam harmonik distorsiyon, sayaç ve enerji analizörlerinden alınan ölçüm sonuçları, aktif ve reaktif enerji ölçümündeki bağıl fark değerleri aşağıda sırasıyla Çizelge 3.3, Çizelge 3.4, Çizelge 3.5, Çizelge 3.6 ve Çizelge 3.7'de verilmiştir.

Çizelge 3.3 Lineer yük için akıma ait toplam harmonik distorsiyon değerleri

Faz	THD _i (%)	
	ION 7600	FLUKE 434
A	5,24	5,30
B	5,29	5,30
C	5,61	5,60

Çizelge 3.4 Lineer yük için gerilime ait toplam harmonik distorsiyon değerleri

Faz	THD _v (%)	
	ION 7600	FLUKE 434
A	6,32	6,4
B	7,23	5,6
C	6,00	6,0

Çizelge 3.5 Sayaçlar ve enerji analizörleri ile alınan ölçüm sonuçları

	ION 7600	FLUKE 434	SAYAÇ A	SAYAÇ B
P_{top} (kW)	0,95	0,952	0,956	0,95
Q_{top} (kVAr)	0,26	0,298	0,297	0,29
S_{top} (kVA)	0,986	0,997	1,002	-
PF	0,965	0,95	0,956	0,95
I_a (A)	5,448	5,551	5,53	5,5
I_b (A)	5,586	5,625	5,62	5,6
I_c (A)	5,598	5,633	5,68	5,6
V_a (V)	59,18	59,2	59,3	59,3
V_b (V)	59,58	59,6	59,7	59,6
V_c (V)	59,09	59,1	59,0	59,0

Çizelge 3.6 Sayaç ve analizörlerden alınan aktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları

	Aktif Enerji (kWh)	ION 7600'e göre bağıl fark	FLUKE 434'e göre bağıl fark
ION 7600	10,83	-	-%0,542
FLUKE 434	10,889	+%0,545	-
SAYAÇ A	10,89	+%0,554	+%0,009
SAYAÇ B	10,87	+%0,368	-%0,174

Çizelge 3.7 Sayaç ve analizörlerden alınan reaktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları

	Reaktif Enerji (kVArh)	ION 7600'e göre bağıl fark	FLUKE 434'e göre bağıl fark
ION 7600	3,00	-	-%12,613
FLUKE 434	3,433	+%14,433	-
SAYAÇ A	3,41	+%13,666	-%0,670
SAYAÇ B	3,41	+%13,666	-%0,670

Ölçüm sonuçları incelendiğinde, lineer yük için yapılan ölçümlerde şebeke geriliminin saf sinüsoidal olmaması sebebiyle yük akımında yaklaşık %6 civarında toplam harmonik bozulmanın olduğu görülmektedir.

3.5.1.1 Lineer Yük İçin Aktif Enerji Ölçümü İle İlgili Değerlendirmeler

Her iki elektrik sayacının da aktif enerji için hata sınıfının 0,5 olduğu göz önüne alındığında; aktif enerji ölçümünde SAYAÇ B'nin bağıl hatasının her iki analizöre göre %0,5 değerinin altında olduğu, SAYAÇ A'nın bağıl hatasının ise ION 7600'e göre %0,5 değerinin üzerinde olduğu, FLUKE 434'e göre ise %0,009 bağıl hata ile %0,5 sınırının çok altında kaldığı görülmektedir. Dolayısıyla çalışmamızda, aktif enerji ölçümü için iki analizör arasında FLUKE 434'ün daha uygun bir referans analizör olacağı görülmektedir.

3.5.1.2 Lineer Yük İçin Reaktif Enerji Ölçümü İle İlgili Değerlendirmeler

Reaktif enerji ölçümü için SAYAÇ B'nin hata sınıfının 1 ve SAYAÇ A'nın reaktif enerji ölçüm hata sınıfının 2 olduğu dikkate alındığında, FLUKE 434'e göre reaktif enerji ölçümünde her iki sayacın ölçme hatasının hata sınırları içinde kaldığı, ION 7600'e göre ise her iki sayacın reaktif enerji ölçme hatasının %13,7 civarında olduğu, hata sınırının çok üzerinde olduğu görülmektedir. SAYAÇ B'nin bağıl hatasının her iki analizöre göre %0,5 değerinin altında olduğu, SAYAÇ A'nın bağıl hatasının ise ION 7600'e göre %0,5 değerinin üzerinde olduğu, FLUKE 434'e göre ise %0,009 bağıl hata ile %0,5 sınırının çok altında kaldığı ve büyük bir doğrulukla aktif enerji ölçümü yaptığı görülmektedir.

Burada verilen reaktif enerji ölçme hataları, analizörler ile elektrik sayaçlarının reaktif güç hesaplama bağıntılarına göre değişim göstermektedir. Elektrik sayaçlarının yaklaşık olarak temel bileşen reaktif gücüne göre reaktif enerji ölçümleri yaptıkları, analizörlerin ise daha farklı tanımlar kullandıkları görülmektedir. FLUKE 434'ün kataloğunda reaktif güç yerine $Q = \sqrt{S^2 - P^2}$ ile tanımlanan ve “nonaktif güç” olarak tanımlanan güç ifadesinin verildiği görülmüştür. (ION 7600'ün kataloğunda bu konuda bilgi verilmemiş olup firma ile yapılan yazışmada da bu konuda cevap alınamamıştır.) Ölçüm sonuçlarına bakıldığında harmonik bozulma arttıkça FLUKE 434'e göre ION 7600'ün ölçtüğü reaktif enerji değerinin çok düşük kaldığı görülmektedir. Statik reaktif sayaçlarla (2 ve 3 sınıfı) ilgili TS EN 62053-23 nolu standartta sistemde harmonik bileşenlerin bulunması halinde reaktif güç ve reaktif enerji

tanımının ne olacağı ile ilgili herhangi bir formül ve tarif verilmemiştir. Bu standardın 2. sayfasında “Kapsam” başlığı altında “Pratik amaçlar için bu standart sadece temel frekansı ihtiva eden sinüs biçimli akımlar ve gerilimler için reaktif enerjinin geleneksel tanımına dayanır” açıklaması yapılmıştır. Buradan statik reaktif sayaçların reaktif enerjiyi sadece temel bileşen reaktif gücüne göre ölçmesinin gerektiği anlaşılmaktadır. Bu nedenle reaktif enerji ölçümleri için her iki analizörün de referans sayaç olarak kullanılması mümkün görülmemektedir. Bundan dolayı bu raporda sadece aktif enerji hataları ile ilgili değerlendirmeler yapılmış, reaktif enerji ölçümleri verilmiş, hatalar hesaplanmış olup reaktif enerji hataları ile ilgili değerlendirme yapılamamıştır.

3.5.2 $THD_I \cong \%15$ İçin Ölçüm Sonuçları

$THD_I \cong \%15$ yüklenme durumu için, önce akıma ait toplam harmonik distorsiyon, gerilime ait toplam harmonik distorsiyon, sayaç ve enerji analizörlerinden alınan ölçüm sonuçları, aktif ve reaktif enerji ölçümündeki bağıl fark değerleri aşağıda Çizelge 3.8, Çizelge 3.9, Çizelge 3.10, Çizelge 3.11 ve Çizelge 3.12’de verilmiştir.

Çizelge 3.8 $THD_I = \%15$ için akıma ait toplam harmonik distorsiyon değerleri

Faz	THD _I (%)	
	ION 7600	FLUKE 434
A	15,21	14,50
B	16,68	16,40
C	17,23	16,90

Çizelge 3.9 $THD_I = \%15$ için gerilime ait toplam harmonik distorsiyon değerleri

Faz	THD _V (%)	
	ION 7600	FLUKE 434
A	5,80	5,70
B	7,35	5,60
C	6,10	5,90

Çizelge 3.10 Sayaçlar ve enerji analizörleri ile alınan ölçüm sonuçları

	ION 7600	FLUKE 434	SAYAÇ A	SAYAÇ B
P_{top} (kW)	0,86	0,862	0,862	0,85
Q_{top} (kVAr)	0,326	0,399	0,361	0,35
S_{top} (kVA)	0,914	0,948	0,948	-
PF	0,9345	0,91	0,909	0,92
I_a (A)	5,192	5,268	5,27	5,1
I_b (A)	5,285	5,312	5,29	5,2
I_c (A)	5,271	5,295	5,33	5,2
V_a (V)	59,2	59,2	59,6	58,5
V_b (V)	59,3	60	60	60
V_c (V)	59	59,1	59,1	59,4

Çizelge 3.11 Sayaç ve analizörlerden alınan aktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları

	Aktif Enerji (kWh)	ION 7600'e göre bağıl fark	FLUKE 434'e göre bağıl fark
ION 7600	12,24	-	+%0,049
FLUKE 434	12,234	-%0,049	-
SAYAÇ A	12,24	0	+%0,049
SAYAÇ B	12,21	-%0,245	-%0,196

Çizelge 3.12 Sayaç ve analizörlerden alınan reaktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları

	Reaktif Enerji (kVArh)	ION 7600'e göre bağıl fark	FLUKE 434'e göre bağıl fark
ION 7600	4,71	-	-%16,872
FLUKE 434	5,666	+%20,297	-
SAYAÇ A	5,14	+%9,129	-%9,283
SAYAÇ B	5,12	+%8,008	-%9,636

3.5.2.1 $THD_I \cong \%15$ İçin Reaktif Enerji Ölçümü İle İlgili Değerlendirmeler

TS EN 62053–23 nolu standartta tanımlandığı gibi sadece 50 Hz frekanslı temel bileşene göre reaktif enerji ölçen referans sayaç (analizör) olmadığı için Çizelge 3.12’de sadece farklar verilmiş, incelenen sayaçların reaktif enerji ölçme hataları ile ilgili bir değerlendirme yapılamamıştır.

3.5.3 $THD_I \cong \%30$ İçin Ölçüm Sonuçları

$THD_I \cong \%30$ yüklenme durumu için, önce akıma ait toplam harmonik distorsiyon, gerilime ait toplam harmonik distorsiyon, sayaç ve enerji analizörlerinden alınan ölçüm sonuçları, aktif ve reaktif enerji ölçümündeki bağıl fark değerleri aşağıda Çizelge 3.13, Çizelge 3.14, Çizelge 3.15, Çizelge 3.16 ve Çizelge 3.17’de verilmiştir.

Çizelge 3.13 $THD_I=\%30$ için akıma ait toplam harmonik distorsiyon değerleri

Faz	THD _i (%)	
	ION 7600	FLUKE 434
a	29,76	28,5
b	30,86	29,9
c	28,48	27,8

Çizelge 3.14 THD_i=%30 için gerilime ait toplam harmonik distorsiyon değerleri

Faz	THD _v (%)	
	ION 7600	FLUKE 434
a	5,56	5,5
b	6,41	5,4
c	5,43	5,3

Çizelge 3.15 Sayaçlar ve enerji analizörleri ile alınan ölçüm sonuçları

	ION 7600	FLUKE 434	SAYAÇ A	SAYAÇ B
P_{top} (kW)	0,764	0,762	0,776	0,75
Q_{top} (kVAr)	0,391	0,5001	0,422	0,42
S_{top} (kVA)	0,856	0,910	0,906	-
PF	0,892	0,84	0,836	0,87
I_a (A)	4,841	4,916	4,877	4,6
I_b (A)	4,902	4,947	4,92	4,6
I_c (A)	5,001	5,06	5,02	4,8
V_a (V)	60,61	60,7	60,7	60,4
V_b (V)	60,92	61,3	61,4	61,2
V_c (V)	60,61	60,6	60,5	60,6

Çizelge 3.16 Sayaç ve analizörlerden alınan aktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları

	Aktif Enerji (kWh)	ION 7600'e göre bağıl fark	FLUKE 434'e göre bağıl fark
ION 7600	11,18	-	+%0,323
FLUKE 434	11,144	-%0,322	-
SAYAÇ A	11,13	-%0,447	-%0,125
SAYAÇ B	11,12	-%0,536	-%0,215

Çizelge 3.17 Sayaç ve analizörlerden alınan reaktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları

	Reaktif Enerji (kVARh)	ION 7600'e göre bağıl fark	FLUKE 434'e göre bağıl fark
ION 7600	5,72	-	-%22,06
FLUKE 434	7,339	+%28,304	-
SAYAÇ A	6,21	%8,566	-%15,383
SAYAÇ B	6,14	%7,342	-%16,337

$THD_1 \cong \%30$ durumunda her iki elektrik sayacının da aktif enerji için hata sınıfının 0,5 olduğu göz önüne alındığında aktif enerji ölçümünde SAYAÇ A'nın bağıl hatasının her iki analizöre göre %0,5 değerinin altında olduğu, SAYAÇ B'nin bağıl hatasının ise ION 7600'e göre %0,5 değerinin üzerinde olduğu, FLUKE 434'e göre ise %0,125 bağıl hata ile %0,5 sınırının altında kaldığı iyi bir doğrulukla aktif enerji ölçümü yaptığı görülmektedir. Ancak yukarıdaki tablolardaki aktif güç değerleri incelendiğinde FLUKE 434'ün ION 7600'e göre daha tutarlı ölçüm yaptığı kanaatine ulaşılmaktadır. Dolayısıyla FLUKE 434'e göre her iki elektrik sayacının da aktif enerji ölçme hatası %0,5 sınırının altında kalmaktadır.

TS EN 62053–23 nolu standartta tanımlandığı gibi sadece 50 Hz frekanslı temel bileşene göre reaktif enerji ölçen referans sayaç (analizör) olmadığı için Çizelge 3.17'da sadece farklar verilmiş, incelenen sayaçların reaktif enerji ölçme hataları ile ilgili bir değerlendirme yapılamamıştır.

3.5.4 $THD_1 \cong \%60$ İçin Ölçüm Sonuçları

$THD_1 \cong \%15$ yüklenme durumu için, önce akıma ait toplam harmonik distorsiyon, gerilime ait toplam harmonik distorsiyon, sayaç ve enerji analizörlerinden alınan ölçüm sonuçları, aktif ve reaktif enerji ölçümündeki bağıl fark değerleri aşağıda Çizelge 3.18, Çizelge 3.19, Çizelge 3.20, Çizelge 3.21 ve Çizelge 3.22'de verilmiştir.

Çizelge 3.18 $THD_I = \%60$ için akıma ait toplam harmonik distorsiyon değerleri

Faz	THD _i (%)	
	ION 7600	FLUKE 434
a	58,86	58,7
b	59,94	58,4
c	56,50	55,4

Çizelge 3.19 $THD_V = \%60$ için gerilime ait toplam harmonik distorsiyon değerleri

Faz	THD _v (%)	
	ION 7600	FLUKE 434
a	5,56	5,5
b	6,41	5,4
c	5,43	5,3

Çizelge 3.20 Sayaçlar ve enerji analizörleri ile alınan ölçüm sonuçları

	ION 7600	FLUKE 434	SAYAÇ A	SAYAÇ B
P_{top} (kW)	0,448	0,443	0,437	0,43
Q_{top} (kVAr)	0,360	0,508	0,38	0,38
S_{top} (kVA)	0,574	0,675	0,663	-
PF	0,770	0,66	0,67	0,757
I_a (A)	3,642	3,663	3,63	3,1
I_b (A)	3,711	3,733	3,68	3,2
I_c (A)	3,872	3,880	3,84	3,3
V_a (V)	59,47	59,5	59,5	59,4
V_b (V)	59,61	60,3	60,2	60,3
V_c (V)	59,29	59,3	59,2	59,4

Çizelge 3.21 Sayaç ve analizörlerden alınan aktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları

	Aktif Enerji (kWh)	ION 7600'e göre bağıl fark	FLUKE 434'e göre bağıl fark
ION 7600	9,41	-	+%2,127
FLUKE 434	9,214	-%2,083	-
SAYAÇ A	9,23	-%1,912	+%0,173
SAYAÇ B	9,18	-%2,444	-%0,369

Çizelge 3.22 Sayaç ve analizörlerden alınan reaktif enerji ölçüm sonuçları ve bağıl farkları

	Reaktif Enerji (kVArh)	ION 7600'e göre bağıl fark	FLUKE 434'e göre bağıl fark
ION 7600	7,64	-	-%27,979
FLUKE 434	10,608	+%38,848	-
SAYAÇ A	8,00	+%4,712	-%24,585
SAYAÇ B	8,02	+%4,974	-%24,397

THD₁ $\cong$ %60 durumunda her iki elektrik sayacının da aktif enerji için hata sınıfının 0,5 olduğu göz önüne alındığında aktif enerji ölçümünde ION 7600'e göre her iki sayacın aktif enerji ölçme hatasının %0,5 sınırının çok üzerinde olduğu, FLUKE 434'e göre ise %0,5 sınırının altında kaldığı görülmektedir. Ancak yukarıdaki tablolardaki aktif güç değerleri incelendiğinde FLUKE 434'ün ION 7600'e göre daha tutarlı ölçüm yaptığı kanaatine ulaşılmaktadır. Dolayısıyla FLUKE 434'e göre her iki elektrik sayacının da aktif enerji ölçme hatası %0,5 sınırının altında kalmaktadır.

TS EN 62053–23 nolu standartta tanımlandığı gibi sadece 50 Hz frekanslı temel bileşene göre reaktif enerji ölçen referans sayaç (analizör) olmadığı için Çizelge 3.22'de sadece farklar verilmiş, incelenen sayaçların reaktif enerji ölçme hataları ile ilgili bir değerlendirme yapılamamıştır.

3.5.5 Literatürde Verilen Güç Tanımları Ve Ölçüm Sonuçları

Bir fazlı sistem için literatürdeki güç tanımları ile ölçü aletlerinin ölçtüğü değerler

irdelenmiştir. Güç tanımlarına uyan ölçü aletleri bu bölümde belirlenmiş ve buna ait değerlendirmeler yapılmıştır.

3.5.5.1 Aktif Güç (P_{watt})

$$P_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \cos \theta_1 \quad : \text{ Temel bileşen aktif gücü} \quad (3.1)$$

$$P_H = \sum_{h \neq 1} V_h \cdot I_h \cdot \cos \theta_h = P - P_1 \quad : \text{ Harmonik aktif gücü} \quad (3.2)$$

$$P = P_1 + P_H \quad (3.3)$$

Yukarıda verilen aktif güç tanımı aktif sayaçlarla ilgili TS EN 62053-21 standardındaki tanımlara uygundur.

3.5.5.2 Reaktif Güç (Q_{Var})

$$Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \theta_1 \quad : \text{ Temel bileşen reaktif gücü} \quad (3.4)$$

3.5.5.3 Budeanu'ya Göre Reaktif Güç Tanımı (V_{Ar})

$$Q_{BH} = \sum_{h \neq 1} V_h \cdot I_h \cdot \sin \theta_h \quad : \text{ Budeanu'ya göre harmonik reaktif gücü} \quad (3.5)$$

$$Q_B = \sum_h V_h \cdot I_h \cdot \sin \theta_h = Q_1 + Q_{BH} \quad : \text{ Budeanu'ya göre toplam reaktif güç} \quad (3.6)$$

Bu reaktif güç tanımı literatürde çok tartışılmaktadır. Birçok yayında ölçümler ve simülasyonlarla genellikle $Q_{BH} < 0$ olduğu ve bu nedenle $Q_B < Q_1$ olduğu ispatlanmıştır. Deneyde yapılan ölçümlere göre ION 7600'ün reaktif gücü Budeanu tanımına göre ölçtüğü görülmektedir.

3.5.5.4 IEEE Std 1459-2000'de Verilen Nonaktif Güç Tanımı (N (V_{Ar}))

$$N = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (V_{\text{Ar}}) \quad (3.7)$$

Bu eşitliğe göre “nonaktif güç” olarak tanımlanan N , reaktif güç (Q) ve distorsiyon gücünün (D) bileşkesinden oluşmaktadır. Ancak reaktif sayaçlarla ilgili standartlarda reaktif güç tanımı sadece temel bileşen için verilmiş bu tanım dışında harmonikli durum için gerek Budeanu'ya göre reaktif güç tanımı ve gerekse nonaktif güç tanımı sayaç standartlarında kabul görmemiştir.

Aşağıda, Çizelge 3.23’de $THD_I \cong \%60$ için ölçülen reaktif güç değerleri incelendiğinde elektrik sayaçlarının TS EN 62053-23 standardına uygun olarak sadece temel bileşen reaktif enerjisini 8 kVArh olarak ölçtükleri, ION 7600’ün reaktif enerjiyi Budeanu tanımına göre ölçmesi sebebiyle ($Q_B < Q_I$ olduğu için) daha düşük bir değer olarak 7,64 kVArh değerini ölçtüğü, FLUKE 434’ün ise reaktif enerji olarak nonaktif enerjiyi ölçmesi sebebiyle ölçümler içinde en yüksek değeri (10,608 kVArh) ölçtüğü görülmektedir.

Çizelge 3.23 $THD_I \cong \%60$ için reaktif enerji ölçüm sonuçları

	Reaktif Enerji (kVArh)
ION 7600	7,64
FLUKE 434	10,608
SAYAÇ A	8,00
SAYAÇ B	8,02

3.5.6 Ölçüm Sonuçlarının Toplu Olarak Gösterilmesi

Aşağıdaki tablolarda sırasıyla lineer, $THD_I \cong \%15$, $THD_I \cong \%30$, $THD_I \cong \%60$ yük durumları ölçüm sonuçları Çizelge 3.24, Çizelge 3.25, Çizelge 3.26 ve Çizelge 3.27’de verilmiştir. Çizelge 3.28 ve 3.29’da ise sırasıyla Sayaç A ve B’nin aktif enerji ölçüm hataları verilmiştir.

Çizelge 3.24 Lineer yük için ölçüm sonuçları

	Aktif Enerji(kWh)	ION 7600’e göre fark	FLUKE 434’e göre fark	Reaktif Enerji (kVArh)	ION 7600’e göre fark	FLUKE 434’e göre fark
ION 7600	10,83	-	-%0,542	3,00	-	-%12,613
FLUKE 434	10,889	+%0,545	-	3,433	+%14,433	-
SAYAÇ A	10,89	+%0,554	+%0,009	3,41	+%13,666	-%0,670
SAYAÇ B	10,87	+%0,368	-%0,174	3,41	+%13,666	-%0,670

Çizelge 3.25 $THD_1 \cong \%15$ için ölçüm sonuçları

	Aktif Enerji(kWh)	ION 7600'e göre fark	FLUKE 434'e göre fark	Reaktif Enerji (kVArh)	ION 7600'e göre fark	FLUKE 434'e göre fark
ION 7600	12,24	-	+%0,049	4,71	-	-%16,872
FLUKE 434	12,234	-%0,049	-	5,666	+%20,297	-
SAYAÇ A	12,24	0	+%0,049	5,14	+%9,129	-%9,283
SAYAÇ B	12,21	-%0,245	-%0,196	5,12	+%8,008	-%9,636

Çizelge 3.26 $THD_1 \cong \%30$ için ölçüm sonuçları

	Aktif Enerji(kWh)	ION 7600'e göre fark	FLUKE 434'e göre fark	Reaktif Enerji (kVArh)	ION 7600'e göre fark	FLUKE 434'e göre fark
ION 7600	11,18	-	+%0,323	5,72	-	-%22,06
FLUKE 434	11,144	-%0,322	-	7,339	+%28,304	-
SAYAÇ A	11,13	-%0,447	-%0,125	6,21	%8,566	-%15,383
SAYAÇ B	11,12	-%0,536	-%0,215	6,14	%7,342	-%16,337

Çizelge 3.27 $THD_1 \cong \%60$ için ölçüm sonuçları

	Aktif Enerji(kWh)	ION 7600'e göre fark	FLUKE 434'e göre fark	Reaktif Enerji (kVArh)	ION 7600'e göre fark	FLUKE 434'e göre fark
ION 7600	9,41	-	+%2,127	7,64	-	-%27,979
FLUKE 434	9,214	-%2,083	-	10,608	+%38,848	-
SAYAÇ A	9,23	-%1,912	+%0,173	8,00	+%4,712	-%24,585
SAYAÇ B	9,18	-%2,444	-%0,369	8,02	+%4,974	-%24,397

Çizelge 3.28 SAYAÇ A'nın aktif enerji ölçüm hataları

SAYAÇ A	Sayacın Aktif enerji için hata sınıfına göre İzin verilen max. hatası	FLUKE 434'e göre fark	SONUÇ
Lineer Yük	$\pm \% 0,5$	+% 0,009	İzin verilen hata sınırları içinde
$THD_1 \cong \% 15$	$\pm \% 0,5$	+% 0,049	İzin verilen hata sınırları içinde
$THD_1 \cong \% 30$	$\pm \% 0,5$	-% 0,125	İzin verilen hata sınırları içinde
$THD_1 \cong \% 60$	$\pm \% 0,5$	+% 0,173	İzin verilen hata sınırları içinde

Çizelge 3.29 SAYAÇ B'nin aktif enerji ölçüm hataları

SAYAÇ B	Sayacın Aktif enerji için hata sınıfına göre İzin verilen max. hatası	FLUKE 434'e göre fark	SONUÇ
Lineer Yük	$\pm \% 0,5$	-% 0,174	İzin verilen hata sınırları içinde
$THD_1 \cong \% 15$	$\pm \% 0,5$	-% 0,196	İzin verilen hata sınırları içinde
$THD_1 \cong \% 30$	$\pm \% 0,5$	-% 0,215	İzin verilen hata sınırları içinde
$THD_1 \cong \% 60$	$\pm \% 0,5$	-% 0,369	İzin verilen hata sınırları içinde

4. SONUÇLAR VE ÖNERİLER

Güç sistemlerinde enerji ölçümü ve ölçmenin doğruluğunun hem üretici hem de tüketici yönünde oldukça büyük önemi vardır. Tüketilen enerjinin doğru olarak ölçülebilmesi ile tüketicinin gerçekte tükettiği enerjiye karşılık olan aktif veya reaktif enerji bedeli ortaya çıkarılabilir. Ancak günümüzde güç sistemlerinde her geçen gün artan nonlinear yükler sebebi ile tam sinüsoidal gerilim ve akımdan sapmalar meydana gelmekte ve harmonikler oluşmaktadır. Bunun doğal sonucu olarak da şebekeye bağlı lineer yüke sahip tüketiciler de zarar görmektedir.

Yukarıdaki tablolarda görüldüğü gibi FLUKE 434 güç kalitesi ve enerji analizörü referans alındığında, tüm ölçümlerde sistemde harmonik bileşenlerin olması halinde incelenen her iki sayacın da aktif enerji ölçme hatası sayaçların aktif enerji hata sınıfına uygun olarak %0,5 sınır değerinin altında kalmaktadır. Uygulamada sürekli olarak karşılaşılmaması mümkün olmayan oldukça yüksek bir değer olan $THD_1 \cong \% 60$ durumunda bile sayaçların aktif enerji ölçme hatalarının %0,5 sınır değerinin altında kalmış olması dikkat çekicidir. Ancak son iki tabloda (Çizelge 3.28 ve Çizelge 3.29) görüldüğü gibi her iki sayacın da aktif enerji ölçme hatası akımdaki toplam harmonik bozulma arttıkça artmaktadır.

Aktif gücün formülü harmonikli durumlar için de geçerlidir ve harmoniksiz duruma göre farklılık teşkil etmemektedir.

$$P = \sum_{n=1}^{\infty} V_n I_n \cos(\theta_n - \delta_n) = \sum_{n=1}^{\infty} P_n \quad (4.1)$$

Dolayısıyla aktif enerji ölçümleri arasındaki fark sadece multimetrenin kalitesi ve kalibrasyonu ile doğru orantılı olarak değişmektedir. Ölçüm sonuçlarından da bu sonuç açıkça görünmektedir. Tüm ölçüm sonuçları sayaç standartlarına uygun olarak %0,5 sınır değerinin altında kalmaktadır.

Reaktif enerji ölçümleri incelendiğinde, reaktif enerji ölçme hatalarının, analizörler ile elektrik sayaçlarının reaktif güç hesaplama bağıntılarına (sayaçların yazılımlarına) göre değişim gösterdiği görülmektedir. Elektrik sayaçlarının yaklaşık olarak temel bileşen reaktif gücüne göre reaktif enerji ölçümleri yaptıkları, analizörlerin ise daha farklı tanımlar kullandıkları görülmektedir. Deneyde referans alınan FLUKE 434, sistemde harmonik

bileşenlerin olması durumunda reaktif gücü $N = \sqrt{S^2 - P^2}$ ile eşitliğine göre hesaplamaktadır. (Bu eşitlik ve tanım IEEE Std 1459-2000’de verilmiştir.) Bu eşitliğe göre “non-aktif güç” olarak tanımlanan N, reaktif güç (Q) ve distorsiyon gücünün (D) bileşkesinden oluşmaktadır. İncelenen sayaçlar, sistemde harmonik bileşenlerin olması durumunda, harmonikleri dikkate almadan TS EN 62053-23 nolu standartta ve IEC 62053-23 nolu standartta tanımlandığı gibi sadece 50 Hz frekanslı temel bileşene göre reaktif enerji ölçmektedirler. Bu tanım farkından dolayı FLUKE 434 referans alındığında sayaçların reaktif enerji ölçme hatası yaklaşık -%25 değerine kadar yükselmektedir. Sadece temel bileşene göre reaktif enerji ölçen referans sayaç laboratuvarımızda olmadığı için incelenen sayaçların reaktif enerji ölçme hataları konusunda bir değerlendirme yapılamamıştır.

Gelecekte hazırlanacak sayaç standartlarında, harmonik üreterek şebekeyi kirleten tüketicilerin reaktif enerji ölçümünde harmoniklerin de dikkate alınarak reaktif güç ölçümünün $\sqrt{S^2 - P^2}$ eşitliğine uygun olarak, nonaktif güce göre yapılması uygun görülebilir. Ancak bu durumda harmonik üretmeyen, aksine şebekedeki harmoniklerden olumsuz etkilenen lineer yüklere sahip tüketicinin mağdur olması söz konusu olacaktır. Bu mağduriyeti önlemek için sayacın harmonik güç akış yönünü tespit etmesinin, harmoniklerden kaynaklanan reaktif enerji bedelinin sadece şebekeye harmonik enjekte eden tüketicilerden tahsil edilmesinin uygun olacaktır. Bu durum demir-çelik tesisleri gibi sisteme harmonik akımları enjekte eden büyük güçlü tüketicilerde özellikle dikkate alınması gereken bir husustur. Bu değerlendirmelere bağlı olarak diğer bir alternatif enerji ölçüm şekli de görünen güç “S” e bağlı olarak enerji bedeli ödenmesini sağlamaktır. Ancak bu konularda mevcut ulusal ve uluslararası sayaç standartlarında herhangi bir düzenleme bulunmamaktadır.

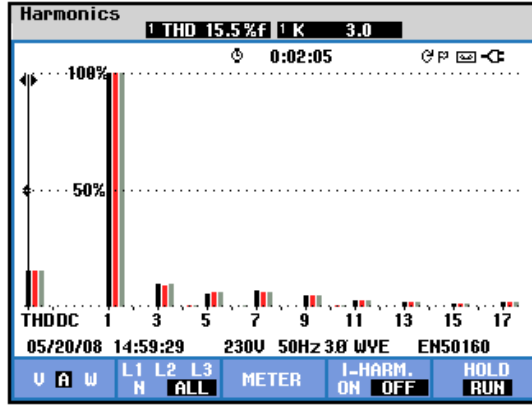
KAYNAKLAR

- [1] Antoniu, S. (1984) Le régime 'energ'etique d'eformant. Une question de priorité, RGE.
- [2] Fryze, S. (1932) Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit nichtsinusförmigen Verlauf von Strom und Spannung, Elektrotechnische Zeitschrift, June.
- [3] Shepherd, W. and Zakikhani, P. (1972) Suggested Definition Of Reactive Power for Nonsinusoidal Systems, Proc. IEE.
- [4] Sharon, D. (1973) Reactive Power Definition and power factor improvement in nonlinear Systems, Proc. IEE.
- [5] Emanuel, A.E. (1977) Energetical Factors In Power Systems With Nonlinear Loads.
- [6] Kusters, N.L. and Moore, W.J.M. (1980) On Definition Of Reactive Power Under Nonsinusoidal.
- [7] Czarnecki, L.S. (1987) What Is Wrong With The Budeanu Concept Of Reactive And Distortion Power And Why It Should Be Abandoned, IEEE Trans. Instr. Meas.
- [8] Slonin, M.A. and Van Wyk, J.D. (1988) Power Components In A System With Sinusoidal And Nonsinusoidal Voltages And/or Currents, Proc.
- [9] Emanuel, A.E. (1998) Apparent Power: Components and physical interpretation, International Conference On Harmonics And Quality Of Power (ICHQP'98), Athens, pp. 1–13. conditions, IEEE Trans. Power App. Systems.
- [10] Filipski, P.S. (1991) Polyphase Apparent Power and Power Factor Under Distorted Waveform Conditions, IEEE Trans. Power Delivery.
- [11] Türk Standardı TSE-EN 62052 – 11 Nisan 2005(11)
- [12] Kocatepe C., Uzunoğlu M., Yumurtacı R., Karakaş A., Arıkan O., “Elektrik Tesislerinde Harmonikler”, Birsen Yayınevi, İstanbul, 2003.
- [13] Arrillaga, J., Bradley, D.A., Bodger, P.S., “Power System Harmonics”, John Wiley & Sons, Norwich, 1985.

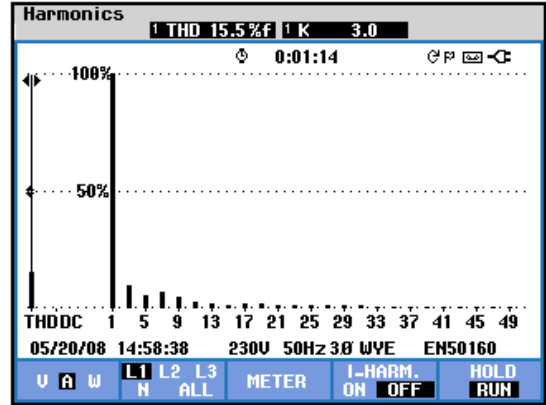
- [14] Kocatepe C. ve Demir A., “Güç Sistemlerinde Harmonik Üreten Elemanlara Genel Bakış”, Kaynak Elektrik Dergisi, 113, 99-106, 1998
- [15] Enerji Piyasası Düzenleme Kurumu, “ Elektrik Piyasası Dağıtım Yönetmeliği”, 25025 Sayılı Resmi Gazete, 19 Şubat 2003.
- [16] KOCATEPE, Celal, UZUNOĞLU, Mehmet, “Harmoniklerin Sınırlanması ve Harmonik Standartları”, Kaynak Elektrik Dergisi, Sayı:150, Ekim, 2001.
- [17] BAYRAM, Mustafa “Kuvvetli Akım Tesislerinde Reaktif Güç Kompanzasyonu” Birsan Yayınevi, İstanbul, 2000.
- [18] WEST, Ken ,Copper Development Association ,Harmonics 3.2.2. , Mart, 2001

EKLER

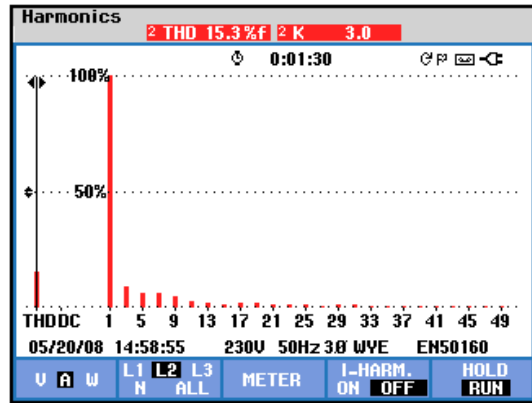
Ek 1 FLUKE 434 Harmonik Analizörü Ekran Çıktıları

E-1. $THD_I \cong \%15$ için FLUKE 434 Harmonik Analizörü Ekran Çıktıları

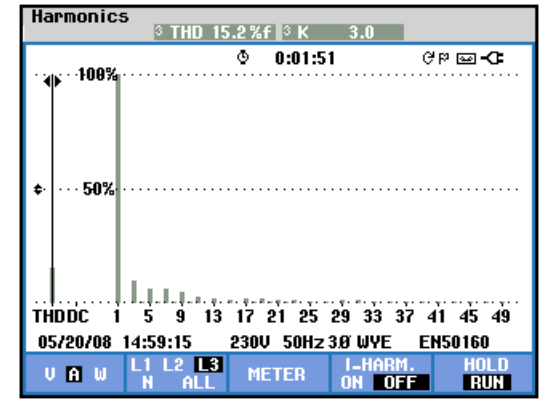
Tüm Akım Harmonikleri



Faz 1



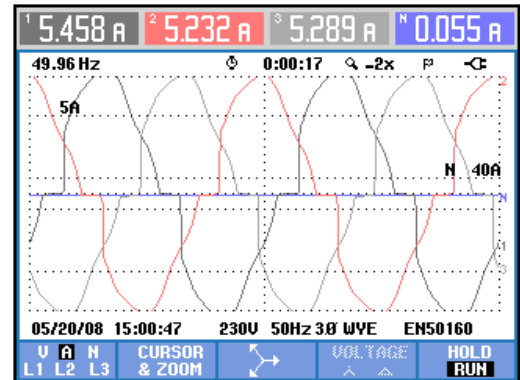
Faz 2



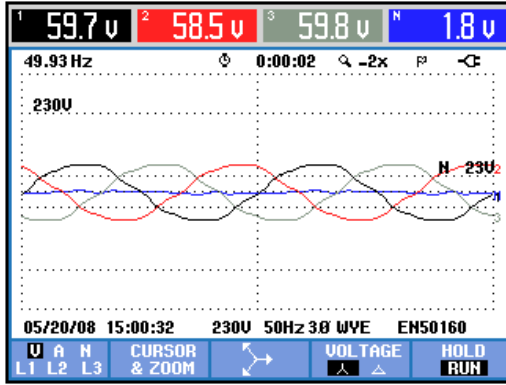
Faz 3

HARMONICS TABLE				
	L1	L2	L3	N
THD%f	6.0	5.7	6.2	68.9
H3%f	2.1	1.7	2.4	48.3
H5%f	4.4	4.3	4.3	30.6
H7%f	3.3	3.1	3.5	22.5
H9%f	0.7	0.9	0.8	28.2
H11%f	0.2	0.3	0.3	5.1
H13%f	0.1	0.1	0.1	1.8
H15%f	0.4	0.4	0.4	7.9
05/20/08 14:59:43 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160				
V A W	HARMONIC GRAPH TREND HOLD RUN			

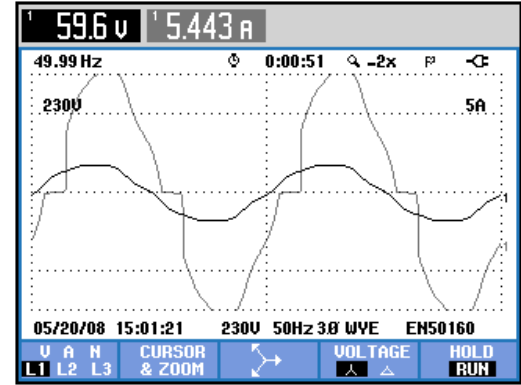
Harmonik Tablo



Akım Dalga Şekli



Gerilim Dalga Şekli

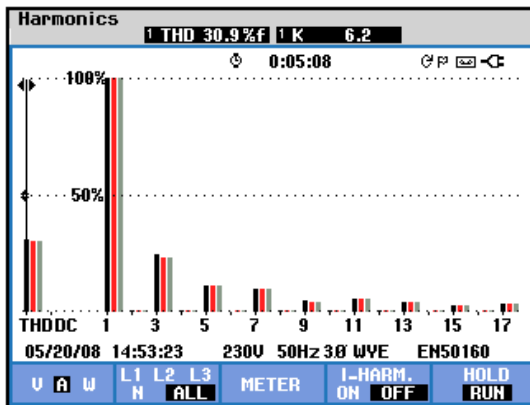


Faz 1 Akım-Gerilim

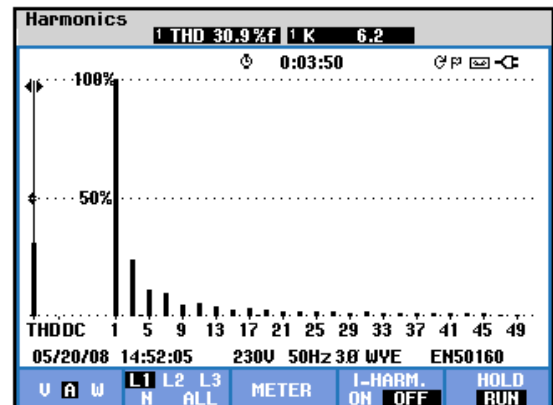
Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	59.4	59.9	59.8	2.2
Vpk	82.0	82.4	81.2	4.0
CF	1.38	1.38	1.36	1.86
Hz	49.97			
	L1	L2	L3	N
Arms	5.423	5.363	5.292	0.054
Apk	8.083	7.917	7.884	0.076
CF	1.49	1.48	1.49	OL
05/20/08 15:01:44 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE			TREND	HOLD RUN

Akım-Gerilim

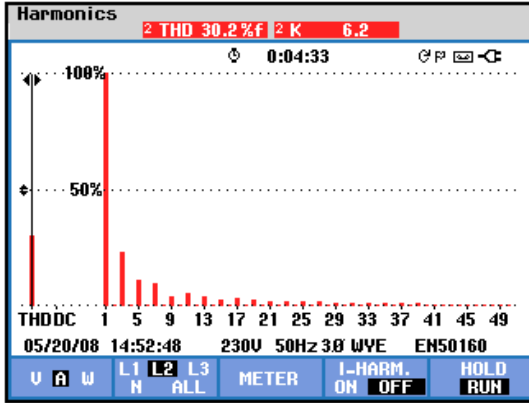
E-2. $THD_I \cong \%30$ için FLUKE 434 Harmonik Analizörü Ekran Çıktıları



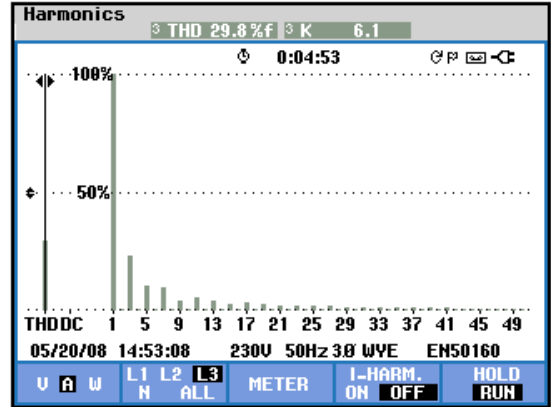
Tüm Akım Harmonikleri



Faz 1



Faz 2



Faz 3

HARMONICS TABLE

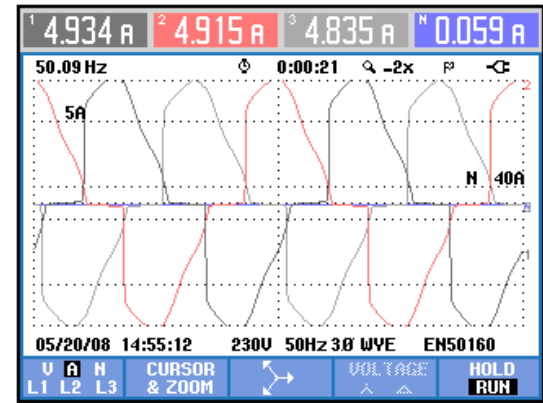
0:05:44

Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	5.8	5.4	6.0	51.8
H3%f	1.8	1.4	2.1	36.8
H5%f	4.4	4.2	4.5	27.8
H7%f	3.1	2.9	3.3	17.8
H9%f	0.8	0.8	0.8	9.3
H11%f	0.3	0.1	0.3	7.0
H13%f	0.0	0.1	0.1	0.3
H15%f	0.4	0.3	0.3	2.9

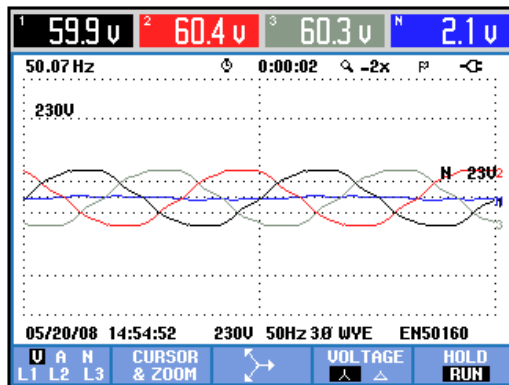
05/20/08 14:53:59 230V 50Hz 3Ø WYE ENS0160

V A W U&A HARMONIC GRAPH TREND HOLD RUN

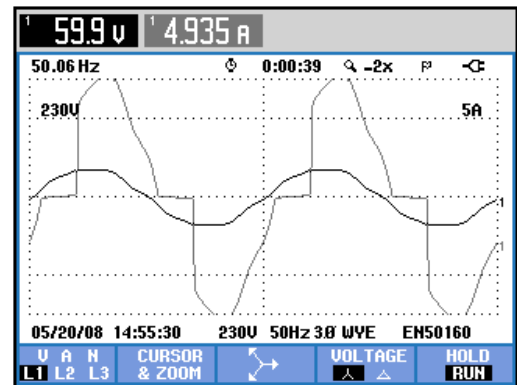
Harmonik Tablo



Akım Dalga Şekli



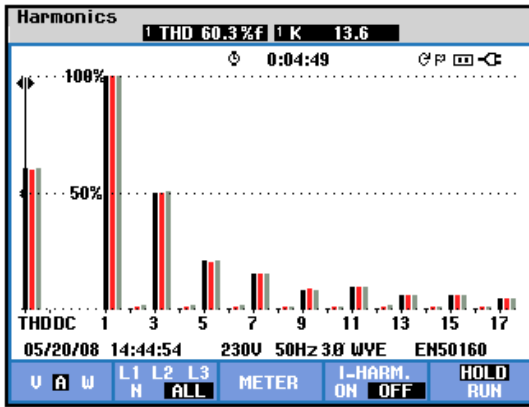
Gerilim Dalga Şekli



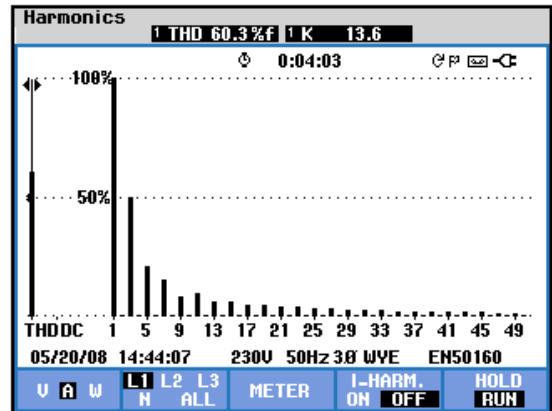
Faz 1 Akım-Gerilim

Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N
V _{rms}	59.9	60.4	59.7	2.1
V _{pk}	81.7	82.4	80.7	4.0
CF	1.36	1.36	1.35	OL
Hz	50.00			
	L1	L2	L3	N
A _{rms}	4.930	4.901	4.824	0.059
A _{pk}	7.827	7.685	7.598	0.095
CF	1.59	1.57	1.57	OL
05/20/08 14:56:04 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE		TREND		HOLD
▲ ▲				RUN

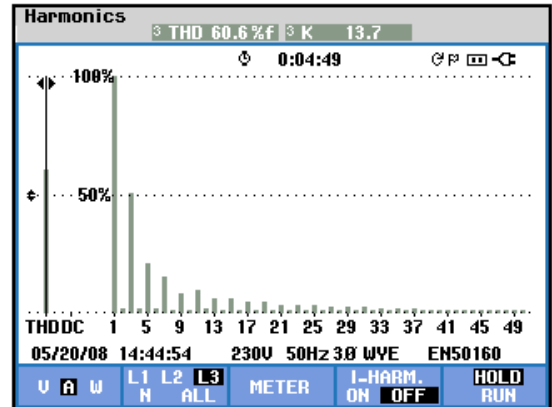
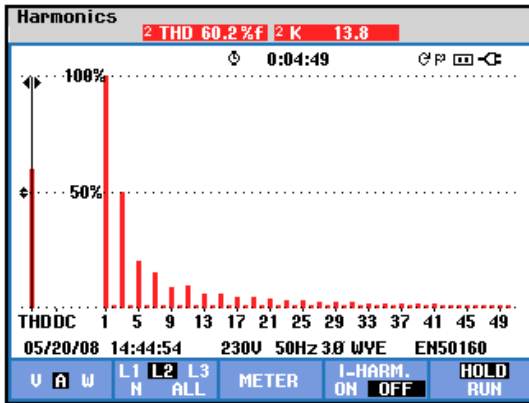
Akım-Gerilim

E-3. $THD_I \cong \%60$ için FLUKE 434 Harmonik Analizörü Ekran Çıktıları

Tüm Akım Harmonikleri



Faz 1

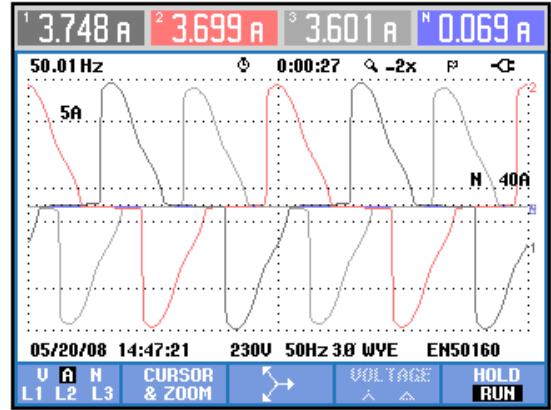


Faz 2

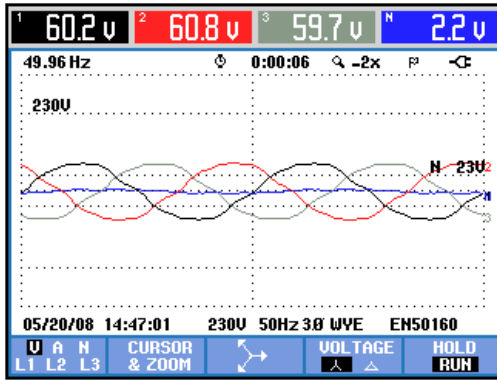
HARMONICS TABLE				
Volt	L1	L2	L3	N
THD%f	5.4	4.8	5.5	41.4
H3%f	1.1	0.6	1.4	13.0
H5%f	4.1	3.7	4.2	24.2
H7%f	3.2	2.8	3.1	20.1
H9%f	0.5	0.6	0.7	17.0
H11%f	0.3	0.1	0.3	7.4
H13%f	0.1	0.2	0.1	1.2
H15%f	0.5	0.5	0.5	10.2
05/20/08 14:44:54 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
U A W	HARMONIC GRAPH TREND HOLD RUN			
U&A				

Harmonik Tablo

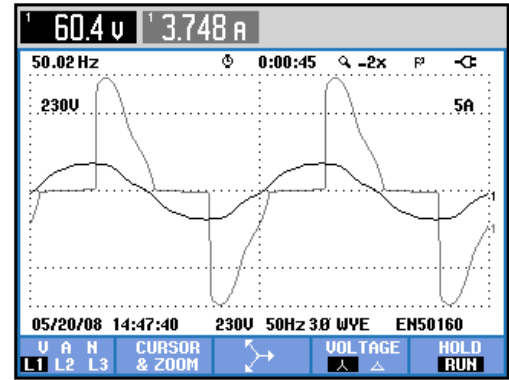
Faz 3



Akım Dalga Şekli



Gerilim Dalga Şekli

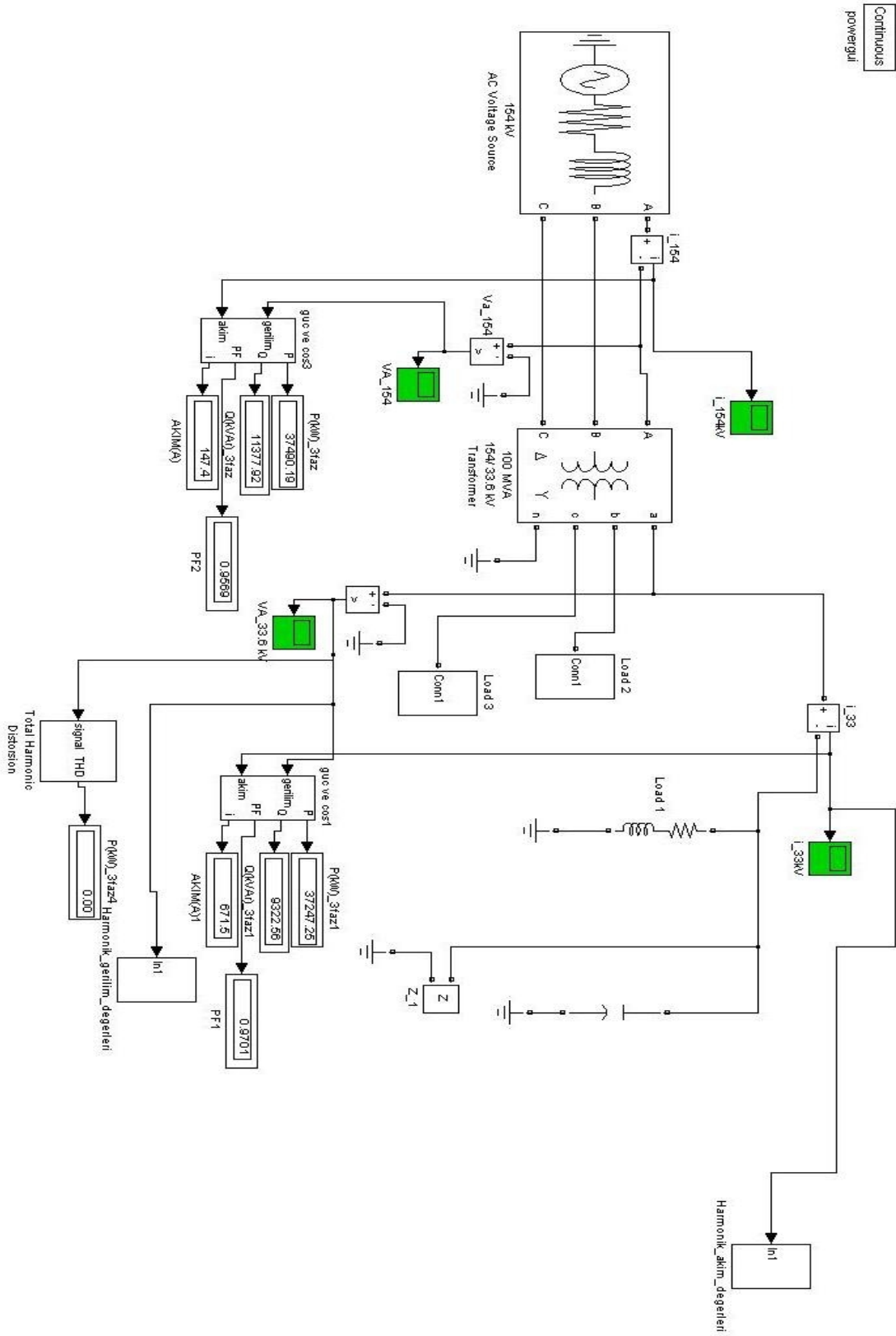


Faz 1 Akım-Gerilim

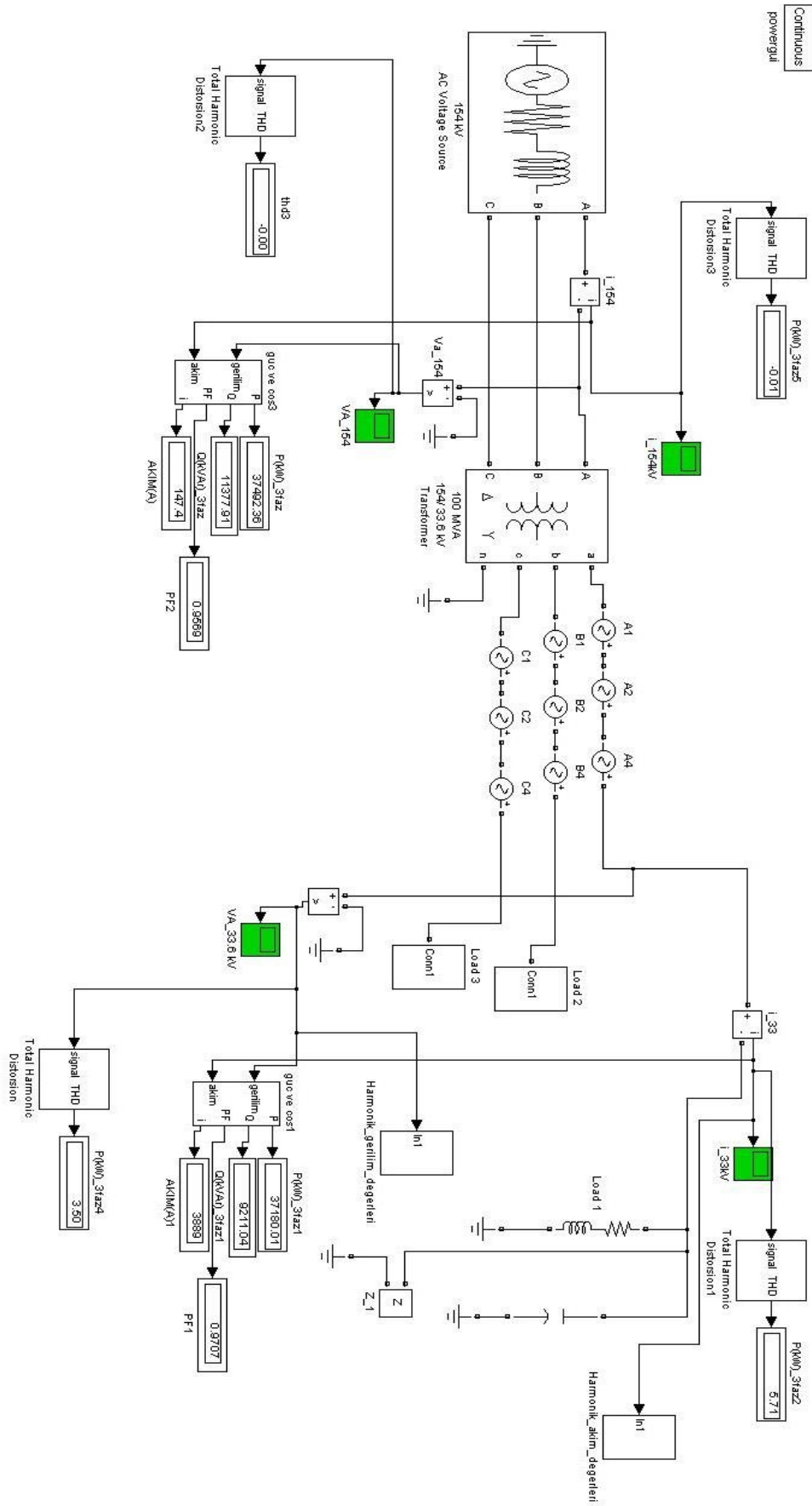
Volts/Amps/Hertz				
	L1	L2	L3	N
Vrms	60.3	61.0	59.8	2.2
Vpk	83.4	84.5	81.8	4.1
CF	1.38	1.39	1.37	1.86
Hz	49.98			
	L1	L2	L3	N
Arms	3.748	3.710	3.605	0.072
Apk	7.394	7.267	7.107	0.095
CF	1.97	1.96	1.97	0L
05/20/08 14:46:40 230V 50Hz 3Ø WYE EN50160				
VOLTAGE	TREND HOLD RUN			

Akım-Gerilim

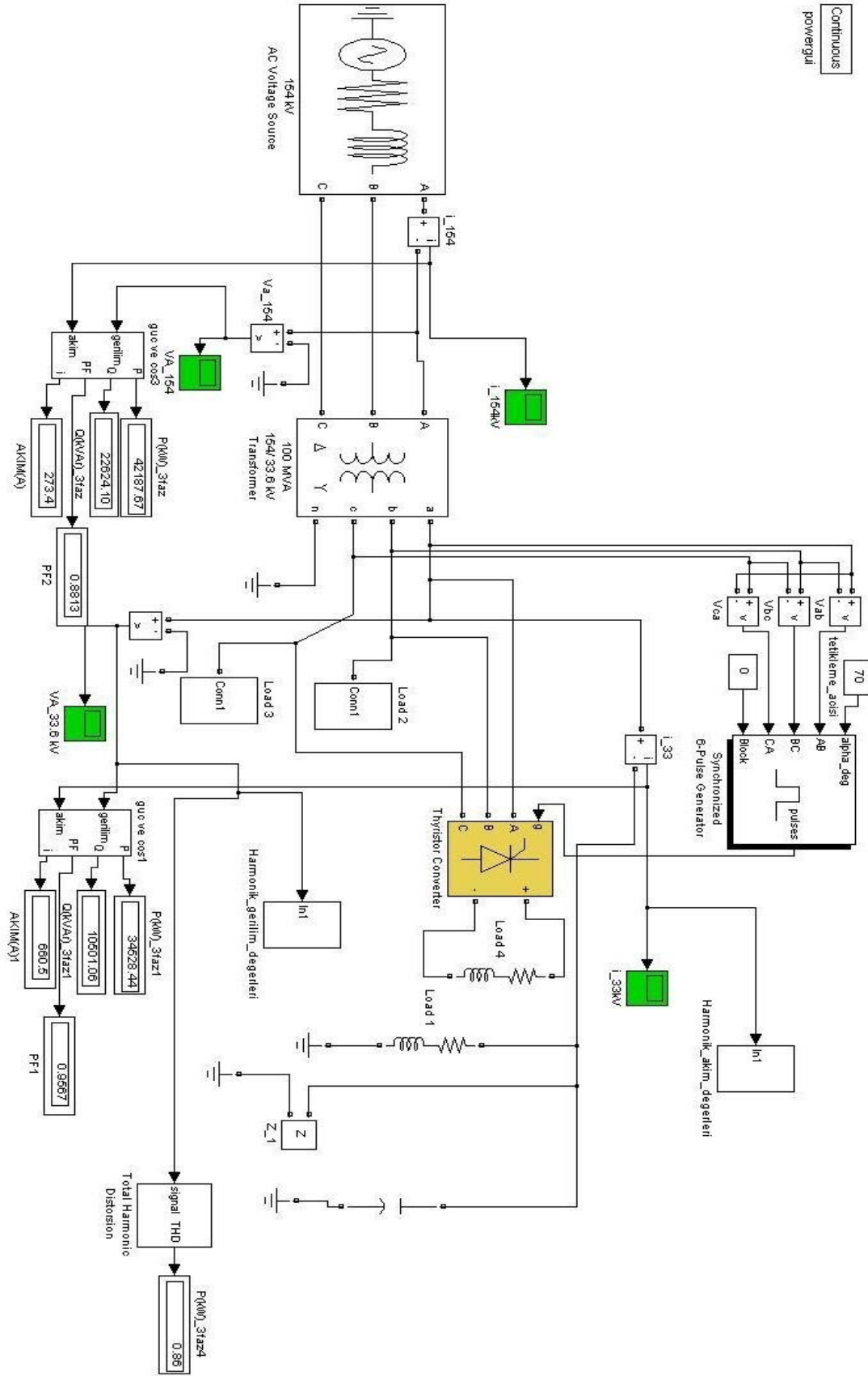
Ek 2 Matlab/Simulink Uygulamasına Ait Deney Devreleri



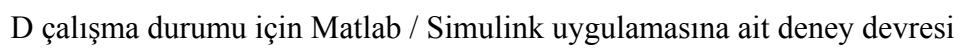
A çalışma durumu için Matlab / Simulink uygulamasına ait deney devresi



B çalışma durumu için Matlab / Simulink uygulamasına ait deney devresi



C çalışma durumu için Matlab / Simulink uygulamasına ait deney devresi



ÖZGEÇMİŞ

Doğum tarihi	08.09.1982	
Doğum yeri	İstanbul	
Lise	1996–2000	Kabataş Erkek Anadolu Lisesi
Lisans	2000–2005	Yıldız Üniversitesi Elektrik-Elektronik Fak. Elektrik Mühendisliği Bölümü
Yüksek Lisans	2006–2009	Yıldız Teknik Üniversitesi Fen Bilimleri Enstitüsü Elektrik Tesisleri Anabilim Dalı

Çalıştığı kurum(lar)

2004–2009	Sistemyapı İnşaat A.Ş.-Teknik Takım Mühendisi
2009-Devam	Siemens – Yüksek Gerilim Sekonder Dizayn Mühendisi