

T.C.

771092

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

AKTİF VE REAKTİF ENERJİ ÖLÇEN
SAYAÇLARIN SİNÜZOİDAL OLMAYAN
ŞARTLARDA PERFORMANS ANALİZİ

Burak ELMASLAR
YÜKSEK LİSANS TEZİ
ELEKTRONİK MÜHENDİSLİĞİ
ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI
Yrd.Doç.Dr.Hakan HOCAOĞLU

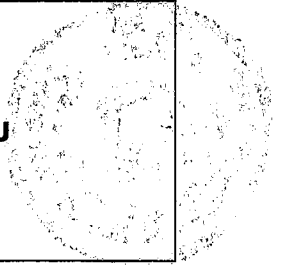
GEBZE

2006



**GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ
ENSTİTÜSÜ**

YÜKSEK LİSANS JÜRİ ONAY FORMU



Burak ELMASLAR'ın tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun 22/12/2005 Tarih ve 2005 / 43 sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS tezi olarak kabul edilmiştir.

JÜRİ

ÜYE

(TEZ DANIŞMANI) : Yrd. Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Ş. Naci ENGİN

ÜYE

: Yrd. Doç. Dr. Abdülkadir BALIKÇI

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
17.01.2006 Tarih ve 2006 / 12 sayılı kararı.

İMZA/MÜHÜR

ÖZET

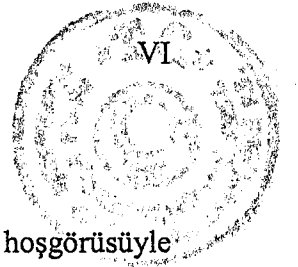
Güç sistemine bağlanan elemanların akım ve gerilim şeklinin sinüzoidal olması istenir. Bu durum sisteme sadece lineer karakterde elemanların bağlanması sonucu elde edilebilir. Hâlbuki günümüzde gittikçe artan sayıdaki lineer olmayan elemanların güç sistemine bağlanması ile sinüzoidal olmayan büyüklükler ortaya çıkmakta ve bunlar da harmonikleri doğurmaktadır. Bu çalışmada harmonikler genel olarak incelenmiş ve bunların sebep olduğu güç ölçme problemi irdelenerek mevcut sayaçların performansları deneysel olarak karşılaştırılmış muhtemel hata mekanizmaları incelenerek değerlendirilmiştir.

Bu çalışmanın ilk bölümünde; standartlarda ve literatürde yer alan değişik yaklaşımlara göre güç hesaplama yöntemleri incelenmiştir. Harmoniklerle ilgili tanımlar ve matematiksel bağıntılarla akım ve gerilimin harmonikler içermesi durumunda aktif ve reaktif güç ölçüm yöntemleri incelenerek bunların karşılaştırılması verilmiştir. Daha sonra yapılan deneysel çalışmalar ile indüktif ve elektronik sayaçların bozulmuş dalga şekilli şebekedeki performansları incelenmiş ve sayaçların ölçtüğü güç ilk bölümdeki güç ölçüm yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Sonuç olarak sayaçların harmonik içerikli akımlarda değişik güç ölçüm yöntemlerine göre hatalı ölçümlerinin sebepleri araştırılmıştır.

SUMMARY

In recent years, harmonic distortion and its influence on the measurement of electrical power quantities have received great attention in parallel with the increasing number of power electronic loads. Distortion of voltage and current waveforms in power systems has become more prevalent due to the greater usage of high efficiency solid-state controls and increasing number of nonlinear loads. It is known that this phenomena causes an increase in detrimental influences on various power system operations, system protection, and particularly metering accuracy. The study presented in this thesis is about the measurement errors, which is due by the non-linear loads, of the induction and electronic watt-hour/varhour meters randomly sampled from Turkish market. All of the tested meters are complied to European Norms and show good performance on the tests defined in the standards. However, when they are experimentally analyzed under extreme non-sinusoidal conditions, the measurement errors exceeds the allowable level.

In the first part of this study, a through literature survey on harmonics is presented, consequently, power definitions for nonsinusoidal conditions in existing literature are analysed. Then performances of commercially available energy meters under the distorted waveform are experimentally checked. The results are evaluated against power measurement methods detailed in the first part. Discrepancies between results are methodically examined and accordingly an error mechanism is put forward.



TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Eğitime başladığımdan bu yana, anlayış ve hoşgörüsüyle yardımlarını benden esirgemeyen, hocam sayın Yrd.Doç.Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na

Verdikleri manevi destekle bu tezin hazırlanmasında büyük emeği olan değerli arkadaşlarım Arş. Görevlisi Murat Erhan BALCI ve Özgür KARACASU 'ya

Yüksek Lisans yapmam için beni teşvik eden, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve destekleyen babam Sedat ELMASLAR, annem Nilgün ELMASLAR ve sevgili kardeşim Berhan ELMASLAR'a teşekkürlerimi sunarım.

Sundukları imkanlarla bu çalışmanın gerçekleşmesine katkıda bulunan TSE-Elektronik laboratuvarı personeline teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ



ÖZET	IV
SUMMARY	V
TEŞEKKÜR	VI
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	VII
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	IX
ŞEKİLLER DİZİNİ	XII
TABLolar DÜZENİ	XIII
1 GİRİŞ	1
1.1 Tezin Amacı	1
1.2 Tezin Sınırları	2
1.3 Tezin İçeriği	2
2 ALTERNATİF AKIMDA GÜÇ VE GÜÇ ÖLÇÜMÜ	4
2.1 Giriş	4
2.2 Sinüzoidal Durum	4
2.3 Sinüzoidal Durumda Güç	5
2.4 Kompanzasyon	7
2.5 Non-Sinüzoidal Durum	8
2.6 Standartlardaki Harmonik İndisleri	10
2.7 İndüksiyon ve Elektronik Tip Sayaçların Enerji Ölçüm Yöntemleri	11
2.8 Sayaç Standartları	13
2.9 Özet	20
3 SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA GÜÇ	21
3.1 Giriş	21
3.2 Sinüzoidal Olmayan Şartlar	21

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

f	Frekans
φ	Faz açısı
t	Saniye olarak zaman
ω_n	n.harmoniğin açısal frekansı
ω_f	f frekansı için açısal frekans
φ_n	n.harmonik faz açısı
A_1	Gerilim veya akımın temel harmonik etkin değeri
A_n	Gerilim veya akımın n. harmonik etkin değeri
A_t	Toplam rms değer
A_{maks}	Gerilim veya akımın azami değeri
A_{etkin}	Gerilim veya akımın etkin değeri
B_n	n.harmonik suseptansı
CF	Krest faktör
D_K	Kimbark distorsiyon gücü
D_S	Kaydırılmış güç
D_H	Üretilen harmonik gücü
D_B	Budeanu distorsiyon gücü
F_{HL}	Harmonik kayıp faktörü
G_n	n.harmonik admitansı
G_e	Eşdeğer admitans
I_{da}	Akımın doğru akım bileşeni
I_n	Akımın n.harmoniğinin etkin değeri
$I_{m,n}$	Akımın n.harmoniğinin azami değeri
I_b	Doğrudan bağlı sayaçlar temel akım
$I_{en\ büyük}$	Sayacın bu değerdeki akıma kadar, bu standartların yüksek doğruluk kurallarına uygun düştüğü anlamındaki akım değeridir
I_n	Transformatör üzerinden bağlı sayaçlar için nominal akım
i_{ga}	Depenbrock güç tanımında aktif akım bileşeni
i_{ka}	Depenbrock güç tanımında kaynak geriliminin diğer kısmından kalan aktif akım bileşeni

i_Q	Depenbrock güç tanımında temel kaynak gerilimi tarafından meydana gelen reaktif akım
$\dot{I}_N$	Depenbrock güç tanımında kaynak geriliminin kalan kısmından oluşan aktif olmayan akım
I_{Aktif}	Fryze güç tanımında akımın aktif bileşeninin etkin değeri
I_{Reaktif}	Fryze güç tanımında akımın reaktif bileşeninin etkin değeri
I_R	Shepherd ve Zand ile Czarnecki güç tanımında akımın aktif bileşeni
I_X	Shepherd ve Zand güç tanımında akımın reaktif bileşeni
I_D	Shepherd ve Zand güç tanımında akımın bozulma bileşeni
I_A	Czarnecki güç tanımında akımın aktif bileşeni
I_{Re}	Czarnecki güç tanımında akımın reaktif bileşeni
I_S	Czarnecki güç tanımında kayma akımı
I_H	Czarnecki güç tanımında üretilen harmonik akımı
I_m	Akımın azami değeri
$i(t)$	Akımın zamana bağlı ifadesi
I	Akımın etkin değeri
K-faktör	k faktörü
N	Depenbrock güç tanımında geriye kalan güç
P	Aktif güç
P_1	Temel harmonik aktif gücü
Q_B	Budenau reaktif gücü
Q_l	Temel harmonik reaktif gücü
Q_C	Kusters ve Moore' un reaktif güç tanımı
Q_D	Depenbrock reaktif güç tanımı
Q_F	Fryze reaktif gücü
Q_K	Kimbark reaktif gücü
Q_R	Czarnecki reaktif gücü
S	Görünür güç
S_R	Shepherd ve Zand aktif görünür gücü
S_X	Shepherd ve Zand reaktif görünür gücü
S_D	Shepherd ve Zand distorsiyon görünür gücü
S_Q	Sharon reaktif görünür gücü
S_C	Sharon tamamlayıcı görünür gücü

THD_v	Gerilim toplam harmonik bozulması
THD_i	Akım toplam harmonik bozulması
TIF	Telefon etkileşim faktörü
U	Depenbrock güç tanımında yük direncinin lineer olmayan kısmı tarafından yok edilen aktif güç
v_g	Depenbrock güç tanımında temel gerilim
v_k	Depenbrock güç tanımında geriye kalan gerilim
V	Gerilimin etkin değeri
V_{da}	Gerilimin doğru akım bileşeni
V_n	Gerilimin n.harmoniğinin etkin değeri
V_m	Gerilimin azami değeri
$V_{m,n}$	Gerilimin n.harmoniğinin azami değeri
$v(t)$	Gerilimin zamana bağlı ifadesi
WTHD	Ağırlık toplam harmonik bozulması

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

3.1: Saf sinüs dalga şekli	4
3.2: Ani aktif, ani reaktif ve ani gücün zamana göre değişimi	6
3.3: Sinüzoidal olmayan dalga şeklinin farklı frekanslardaki sinüzoidal dalga şekillerinin toplamı biçiminde ifadesi	8
3.4: Yarım dalga doğrultma için deney devresi diyagramı	15
3.5: Yarım-dalga doğrultulmuş dalga biçimi	16
3.6: Yarım-dalga harmonik bileşenin dağılım bilgisi	16
3.7: Deney devresi diyagramı	17
3.8: Faz tetiklemeli dalga biçimi	17
3.9: Faz tetiklemeli dalga biçiminin harmonik bileşenine ilişkin dağılım bilgisi	18
5.1: Test sisteminin blok diyagram ile gösterimi	38
5.2: Test Sistemi	38
5.3: Test akım dalga şekli	40
5.4: Frekans - hata karakteristiği	41
5.5: Sayaçların ölçüm hatalarının k faktörüne göre değişimi	42
5.6: k faktörüne bağlı olarak lineer olmayan yükün çektiği P+ ve P- güçlerinin değişimi	43
5.7: k faktörü ile sayaç hatalarının değişimi.	44
5.8: İki farklı güç değeri için akım oranının k faktör ile değişimi	45
5.9: İki farklı güç değeri için sayaç hatalarının değişimi	45
6.1: Test sistemi	48
6.2: Test akımının a,b,c,d dalga şekilleri ve harmonik spektrumları	49
6.3: Test akımının e,f dalga şekilleri ve harmonik spektrumları	50
6.4: Farklı Güç Tanımlarına Göre Reaktif Sayaçların Hataları	52
6.5: Uygulanan Dalga Şekilleri	53

TABLolar DİZİNİ

Tablo**sayfa**

2.1: Standartlarda belirtilmiş harmoniklere ait indisler	11
2.2: Sınıf 1 ve Sınıf 2 için Hata (%) Sınır Değerleri	14
2.3: Sınıf 1 ve Sınıf 2 için ilave Hata (%) Sınır Değerleri	14
2.4: Sınıf 0,2 ve Sınıf 0,5 için (%) Hata Sınırları	18
2.5: Sınıf 0,2 ve Sınıf 0,5 için ilave Hata (%) Sınır Değerleri	19
2.6: Reaktif Enerji Sınıf 2 ve Sınıf 3 için Hata (%) Sınır Değerleri	19
3.1: Güç Tanımlarına ait bileşenler	32
5.1: k faktör ve harmonik faz açılarının farklı durumlarına göre ölçüm sonuçları	54

1 GİRİŞ

Alternatif akım güç sisteminde ideal koşullar altında elektrik enerjisi sinüzoidal formda, daha önceden belirlenmiş frekans ve genlik değerlerinde üretilir ve dağıtılır. Bununla beraber pratikte bu tür enerjinin elde edilmesinde bir takım zorluklarla karşılaşılabilir. Sinüzoidal dalga şeklinden sapma genellikle harmonik bileşenlerin ortaya çıkması ile ifade edilir. Şebekenin manyetik ve elektrik devrelerindeki lineer olmayan durumlar bunun en önemli etkenleridir. Bu lineersizlikler şebekenin akım ve gerilim dalga şeklinin bozulmasına sebep olur.

Harmoniklerin meydana çıkması enerji sistemleri için istenen bir durum değildir, fakat çoğu işletmelerde harmoniklerin ortaya çıkması kaçınılmazdır. Lineer olmayan elemanlar veya yükler tarafından üretilen harmonikler şebeke ve alıcılar için ciddi problemlere sebep olurlar. Bu problemlere örnek olarak anahtarlama elemanları ve motorlarda aşırı ısınmalar, elektronik cihazların sistemlerinde bozulmalar ve cihaz veya sistem ölçümlerinde hatalar sayılabilir. Örneğin lineer olmayan yüklerin şebekeden çektiği akımlardaki harmonik bileşenleri aktif ve reaktif güç sayaçlarının doğruluklarına etki etmektedir. İndüksiyon prensibine dayalı aktif güç sayaçlarındaki manyetik disk dönme hızı 50 Hz için kalibre edildiğinden harmoniklerin bulunduğu durumlarda ölçüm hataları ortaya çıkmaktadır. Bu yüzden elektrik şebekelerinde harmoniklerin meydana gelmemesi için ilk aşama olarak cihaz veya sistemler için koruma tedbirleri düşünülüp ona göre tasarım yapılmalıdır. Literatürde sinüzoidal olmayan koşullarda elektrik sayaçlarının performansı hakkında yapılmış bir çok çalışma ve standart olmasına rağmen [1, 2, 3] sinüzoidal olmayan şartlarda özellikle reaktif güç tanımı üzerinde bir fikir birliğinin olmaması, incelenen sayaç tiplerinin az olması gibi eksikliklerden dolayı sayaç performansı üzerinde önemle durulması gereken önemli bir inceleme konusudur.

1.1 Tezin Amacı

Tek fazlı veya dengeli üç fazlı bir sistemde sinüzoidal olmayan durumlarda literatürde verilen güç tanımlarının enerjinin ölçümünde geçerliliğini incelemek ve

bu güç tariflerine göre, ideal çalışma koşullarında ilgili standartlara uygun sonuçlar veren piyasadaki mevcut aktif ve reaktif sayaçlar kullanılarak; indüksiyon ve elektronik tip sayaçların frekans karakteristiği elde edildikten sonra akımın farklı bozulma oranlarında bu sayaçların yapmış olduğu hataları analiz etmektir.

1.2 Tezin Sınırları

Tez içerisinde incelenilen konular ve bu konularla alakalı analizlerde:

- dengesiz sistemler incelenmeyecektir,
- literatürde mevcut olan Budeanu, Fryze, Sharon, Emanuel, Shepherd, Depenbrock ve Kusters ve Moore'un önerdiği güç ölçüm yöntemleri incelenecektir.

1.3 Tezin İçeriği

Tezin ikinci bölümünde; sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan durumlar için aktif ve reaktif güç ölçümünden, daha iyi bir güç kalitesi düzeyine ulaşmak ve güç sistem elemanlarının harmoniklerden nasıl etkilendiklerini belirlemek açısından önemli olan harmoniklere ait oluşturulmuş tanım ve indislerden bahsedilmektedir. Ayrıca güç ölçümünde kullanılan indüksiyon ve elektronik tip sayaçların çalışma prensibi anlatılarak sinüzoidal olmayan şartlardaki zaaflarından söz edilecektir.

Üçüncü bölümde; sinüzoidal olmayan şartlarda yapılan aktif ve reaktif güç tanımları ve bunların ölçülmesi ile ilgili yapılan çalışmalar kısaca özetlenecek ve sayaç performansları ile ilgili yapılan çalışmaların genel bir değerlendirmesi yapılacaktır.

Dördüncü bölümde aktif güç için bozulmuş dalga şekilli şebekede elektronik ve indüksiyon tipi sayaçların performansı incelenecektir.

Beşinci bölümde ise reaktif güç ölçümü ile ilgili yapılan deneysel çalışmalara yer verilecektir. Deneysel çalışmada piyasada mevcut olan sayaçların harmonik içerikli şebekede performansı incelenecek ve üçüncü bölümde ele alınan değişik

reaktif enerji ölçüm yöntemleri ile sayaçların ölçtüğü güçler karşılaştırılacak ve sayaçların bozulmuş dalga şekilli şebekede hatalı ölçüm yapmalarının sebebi araştırılacaktır.

Altıncı bölümde ise ilk beş bölümdeki bilgilerin ışığında ulaşılan sonuçlar özetlenecek ve gelecek çalışmalar için önerilerde bulunulacaktır.



2 ALTERNATİF AKIMDA GÜÇ VE GÜÇ ÖLÇÜMÜ

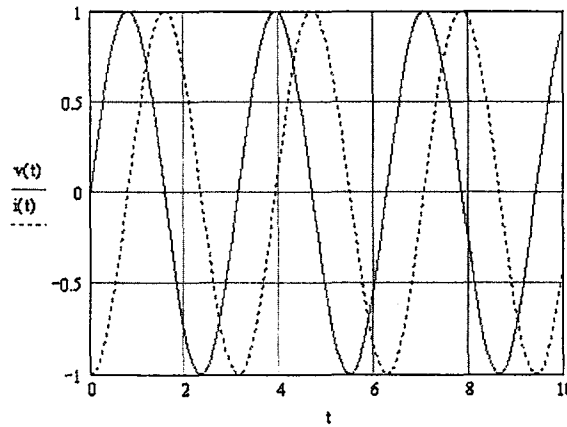
2.1 Giriş

Bu bölümde sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan durumlar tarif edilerek bir fazlı sistemler için aktif ve reaktif güç hesaplamalarının nasıl yapıldığı konuları ele alınacaktır. Günümüzde elektrik enerjisini verimli kullanmak üzere her işletme şebekeden çektiği reaktif gücü kontrol etmeli, güç faktörünü belirli sınırlar içinde tutmalıdır. Bu amaçla reaktif güç kompanzasyonundan bahsedilecektir. Sinüzoidal olmayan dalga şekline sahip akım ve gerilimlerin *Fourier* serileri ile analizi anlatıldıktan sonra sinüzoidal olmayan şartlar ile ilgili standartlar hakkında bilgi verilecektir.

Güç ölçümünde kullanılan indüksiyon ve elektronik tip sayaçların çalışma prensibi anlatılarak standartlardaki harmonik indislerinden bahsedilecektir.

2.2 Sinüzoidal Durum

Akım veya gerilim dalga şeklinin sinüzoidal olması, işaretle temel harmonik olan 50 Hz'ten başka herhangi bir sinyal bulunmaması olarak tarif edilebilir. Bu tip dalga şekline örnek Şekil 2.1' de görülmektedir.



Şekil 2.1: Saf sinüs dalga şekli

Ancak generatör, motor ve transformatör gibi lineer olmayan elemanlardan dolayı daima sinüzoidal olmayan akım ve gerilimler güç sistemlerinde var olmuştur. Örneğin transformatörlerin mıknatıslanma özelliğinden kaynaklanan dalga şekli bozulmaları, transformatörün bağlantı grubuna, yıldız noktasının topraklanıp topraklanmamasına bağlı olarak değişmektedir. En doğal harmonik üreticileri olan generatörlerden senkron generatörlerin harmonik üretme özelliği çıkık kutbun alan şeklinden, magnetik direncin oluk şekline bağlı olmasından ve simetrik olmayan boşluklara yerleştirilen sönüm sargılarından kaynaklanmaktadır [4].

2.3 Sinüzoidal Durumda Güç

Alternatif akım güç sistemindeki elemanların hepsinin lineer olduğu kabul edilirse, hesaplamalarda akım ve gerilimler sinüzoidal olacaktır. Kullanıcı hakkına saygılı bir enterkonnekte sistemde frekans sabit, gerilim ve akım dalga şekli ise sinüzoidal formda olmalıdır [4].

Sinüzoidal dalga formundaki akım ve gerilim;

$$i(t) = \sqrt{2} \cdot I \cdot \sin(\omega \cdot t - \varphi) \quad (2.1)$$

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin(\omega \cdot t) \quad (2.2)$$

ise bu değerlerin çarpımından ani güç.

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = 2 \cdot V \cdot I \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.3)$$

biçiminde elde edilir.

Ani güç yarım açı formülleri kullanılarak

$$p(t) = V \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \cos 2\omega t) - V \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (2.4)$$

biçimine dönüştürülebilir. Bu ifadede;

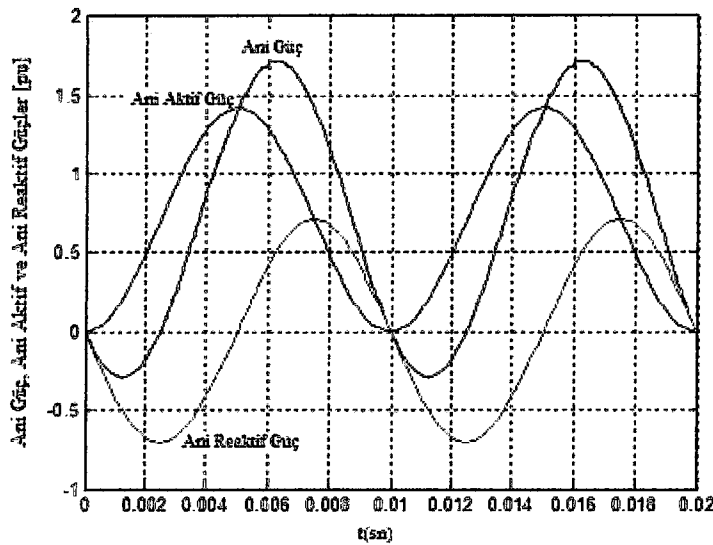
$$p_a(t) = V \cdot I \cdot \cos \varphi \cdot (1 - \cos 2\omega t) \quad (2.5)$$

terimi ani aktif güç,

$$p_r(t) = V \cdot I \cdot \sin \varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (2.6)$$

terimi ise ani reaktif güçtür.

Denklem (2.4), (2.5) ve (2.6)'da belirtilmiş olan ani güç, ani aktif ve ani reaktif güçlerin zamana göre değişimleri Şekil 2.2' de verilmiştir.



Şekil 2.2: Ani aktif, ani reaktif ve ani gücün zamana göre değişimi

Şekil 2.2'den görüldüğü gibi ani aktif gücün bir periyot boyunca işareti değişmez. Bu anlık aktif gücün ortalama değerinin sıfırdan farklı olduğunu gösterir. Ani aktif gücün ortalama değeri aktif güç olarak tanımlanmıştır ve bu değer ani gücünde ortalama değerine eşittir. Ani reaktif gücün bir yarı periyottaki akış yönü diğer yarı periyottakinin tersi yönde olduğu için ortalama değeri sıfırdır. Ani reaktif gücün azami değeri reaktif güç olarak tanımlanmıştır.

Aktif güç (2.5)' de verilen ani aktif gücün ortalama değeri;

$$P = V.I.\cos\phi \quad (2.7)$$

ifadesi ile hesaplanabilir [5].

(2.6)'da verilen anlık reaktif gücün azami değeri;

$$Q = V.I.\sin\phi \quad (2.8)$$

ifadesi ise reaktif güç olarak tanımlanmıştır [5].

Sinüzoidal şartlarda aktif ve reaktif güçlerin vektör toplamı, görünür güç olarak isimlendirilmiştir. Görünür güç

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (2.9)$$

biçiminde ifade edilmiştir [5].

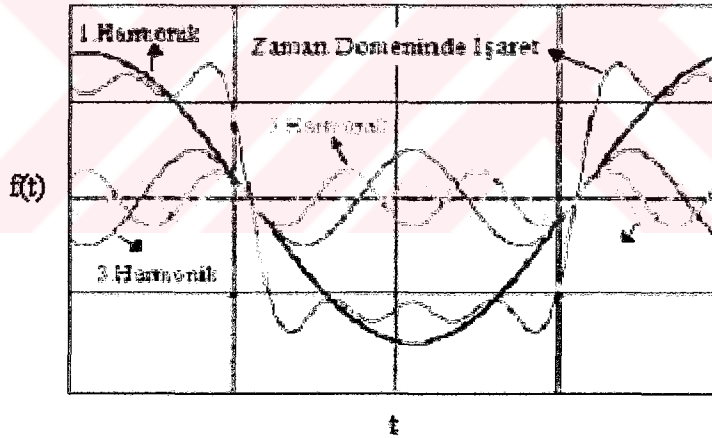
2.4 Kompanzasyon

Güç sistemlerinde işletmeyi kolaylaştırmak, verimliliği arttırmak ve enerji tutumluluğunu sağlamanın en etkin önlemlerinden birini “Reaktif Güç Kompanzasyonu” oluşturmaktadır. Reaktif Güç Kompanzasyonunun etkin bir şekilde uygulanması ile şebekeden çekilen reaktif enerji önemli oranda azalacağından hat kayıpları ve gerilim düşümleri azalacak ve iletim hattı daha çok aktif enerjinin taşınması için kullanılacağından iletim hattının kapasitesi artacaktır. Ülkemizdeki mevcut uygulamada sanayi, ticaret ve resmi daire abonelerini reaktif güç kompanzasyonuna zorlamak için aktif enerji bedelinin yanı sıra reaktif enerji bedeli de tahsil edilmektedir. Bu aboneler tükettikleri aktif enerjinin 1/3’ünden fazla endüktif enerji veya 1/5’inden fazla kapasitif enerji tüketmeleri halinde reaktif enerji bedeli ödemek durumundadırlar. Tarifeye göre aktif ve reaktif sayaçların oranı alınıyor dolayısıyla sayaçların doğru ölçmesi $\cos \phi$ ’nin ölçülmesi bakımından önemlidir. Yani bu aboneler güç katsayılarını ($\cos \phi$) 0.95 ve üzerine çıkarmadıkları takdirde birim Reaktif enerji tüketimi için birim kW fiyatının yarısı tutarında ücret ödeyeceklerdir [6].

Sanayi, resmi daireler ve ticarethanelerden Reaktif Güç Kompanzasyonu’na zorlamak için reaktif enerji bedeli alınmasına rağmen Türkiye genelinde tüketilen net elektrik enerjisinin yaklaşık %30 luk bölümünü tüketen konutlarda böyle bir çalışma yapılmamaktadır. Son yıllarda konutların elektrik enerjisi tüketim profilinin değişmesi ile güç faktörleri önemli ölçüde düşmüştür. Konutları güç faktörünü düzeltmeye özendirmek güç sistemlerinin verimliliğini artırmak bakımından oldukça faydalı olacaktır.

2.5 Non-Sinüsoidal Durum

Alternatif akım enerji sistemlerinde daha önceden de anlatıldığı gibi sinüzoidal olmayan dalgalar ortaya çıkmaktadır. Sinüzoidal olmayan durum dalga şeklinin sinüs biçiminden farklı olmasıdır. Bu dalgalar genellikle devreye sinüzoidal olmayan besleme gerilimi uygulamasıyla veya yükün karakteristiğinden dolayı oluşur. Dalga şekilleri üzerinde fazör konseptini kullanabilmek için sinüs olarak ifade etmek gerekliliği vardır. Sinüzoidal olmayan dalga şekillerinin ifadesi ve analizleri için genellikle Fourier serileri kullanılır. Fransız matematikçisi J. Fourier sinüzoidal olmayan periyodik işaretlerin, genlik ve frekansları farklı birçok sinüzoidal işaretlerin toplamından oluştuğunu ve bu tür işaretlerin genlik ve frekansları farklı (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüzoidal dalgalara ayrılabilirliğini göstermiştir [4]. Bu şekilde elde edilen seriye “*Fourier Serileri*”, bu serinin elemanlarına da “*Fourier Bileşenleri*” adı verilir. Şekil 2.3’de sinüzoidal olmayan periyodik bir dalgayı oluşturan 1., 3., 5. ve 7. harmonikler gösterilmiştir.



Şekil 2.3: Sinüzoidal olmayan dalga şeklinin farklı frekanslardaki sinüzoidal dalga şekillerinin toplamı biçiminde ifadesi

Herhangi periyodik bir dalganın Fourier serisine açılabilmesi için Dirichlet koşulları olarak bilinen koşulların sağlanması gerekir. Bu koşullar, bir periyot içinde sonlu sayıda süreksizlik bulunması, azami ve asgari değerleri ile ortalamasının sonlu değer olmasıdır. Elektrik enerji sistemlerindeki dalga şekilleri her zaman bu koşulları sağladığından Fourier bileşenlerinin elde edilmesi mümkündür. Fourier serisinin elde edilme işlemi dalga analizi veya harmonik analizi olarak da tanımlanır. Sinüzoidal

olmayan bir işaretin Fourier analizi sonrasında zaman domeninde denklemi (2.10) formülüyle gösterilebilir [7].

$$f(t) = A_0 + \sum_{n=1}^{\infty} (A_n \sin nt + B_n \cos nt) \quad (2.10)$$

Bu formülde;

$n=1,2,3,\dots$ (pozitif tamsayı) harmonik mertebesi

t = Bağımsız değişken (elektrik enerji sistemlerinde $t= wt$ olmaktadır)

A_0 = Sabit terim (doğru bileşen veya ortalama değer) olup literatürde A_0 yerine $A_0/2$ de kullanılmaktadır. Diğer katsayılara ($A_1, A_2, A_3,\dots A_n,\dots, B_1, B_2, B_3,\dots B_n,\dots$) $f(t)$ fonksiyonunun ' harmonik katsayıları ' denir.

Uygulamalarda serinin uygun sayıda terimi ele alınır. Elde edilecek efektif değerler ile ideale çok az hata ile yaklaşılmış olur ve hesaplar kolaylaşır.

Harmonik analizi sırasında ve sonrasında bazı kolaylıklar sağlamak için harmonik içeren veya Fourier bileşenleri olarak bilinen akım $i(t)$ ve gerilim $v(t)$ için aşağıdaki tanımlamalar yapılabilir.

$$i(t) = I_{da} + \sum_{n=1}^n \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t - \varphi_n) \quad (2.11)$$

$$v(t) = V_{da} + \sum_{n=1}^n \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t) \quad (2.12)$$

olarak ifade edilebilir. Sinüzoidal olmayan akım ve gerilimlerin etkin değeri ise

$$V = \sqrt{\sum_{n=1}^n V_n^2} \quad (2.13)$$

$$I = \sqrt{\sum_{n=1}^n I_n^2} \quad (2.14)$$

eşitlikleri yardımı ile hesaplanabilir [8].

Bir dalga şeklindeki harmonik içeriği tanımlamak için genellikle iki ayrı katsayı kullanılır. Bunlar harmonik bileşenlerin temel bileşene oranı olan THD

(Toplam Harmonik Distorsiyon) ve harmoniklerin frekanslarına göre ağırlıklı olarak temel bileşene oranlanması sonucu hesaplanan k faktörüdür. Harmoniklerin seviyesinin belirlenmesinde yaygın bir ölçüt olarak kullanılan toplam harmonik distorsiyonu gerilim ve akımdaki durumları aşağıdaki formül ile hesaplanır [7].

$$\%THD_V = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^m V_h^2}}{V_1} \cdot 100 \quad (2.15)$$

$$\%THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^m I_h^2}}{I_1} \cdot 100 \quad (2.16)$$

Burada THD, tam bir sinüs dalga şeklinden, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin uzaklaşmasını belirlemek için kullanılır. Sinüzoidal bir dalga şekli için THD sıfırdır.

Harmoniklerin frekanslarına göre ağırlıklı olarak yer aldığı k faktörü ise akım ve gerilim için aşağıdaki gibi hesaplanır [9].

$$k = \sum_{h=1}^n h^2 \cdot \frac{I_h^2}{I_{rms}^2} \quad (2.17)$$

$$k = \sum_{h=1}^n h^2 \cdot \frac{V_h^2}{V_{rms}^2} \quad (2.18)$$

THD, harmoniklerin oluşturduğu frekansa bağlı olmayan toplam bozulma olup harmoniklerin oluşturduğu bozulmanın temel bileşene oranıdır. k faktörü ise üreticilerin oluşturduğu harmoniklerin transformatörler üzerinde meydana getirdiği ısı kayıpları belirlemek için oluşturulan bir indistir ve harmoniklerin oluşturduğu bozulmanın frekanslarına göre ağırlıklı olarak temel bileşene değil rms değere oranı olarak hesaplanır.

2.6 Standartlardaki Harmonik İndisleri

Harmoniklere ait oluşturulmuş tanım ve indisler, daha iyi bir güç kalitesi düzeyine ulaşmak ve güç sistem elemanlarının harmoniklerden nasıl etkilendiklerini

belirlemek açısından önemlidir. Bu sebeple standartlarda belirtilmiş harmoniklere ait yaygın olarak kullanılan indisler:

Tablo 2.1: Standartlarda belirtilmiş harmoniklere ait indisler

İndis	Tanımı	İfadesi
THD	Gerilim veya akım dalga formunda olan temel harmoniğin dışındaki harmoniklerin toplam etkin değerinin temel harmoniğin etkin değerine oranı toplam harmonik bozulması olarak tanımlanmaktadır.	$THD_A = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^n A_n^2}}{A_1}$
Krest Faktörü	Dalga formunun tepe değerinin etkin değerine oranı olarak tanımlanmıştır.	$CF = \frac{A_{maks}}{A_{etkin}}$
K Faktörü	Akım dalga formunda bulunan harmonik frekanslarının ve etkin değerlerinin dikkate alınarak transformatör gibi şebeke elemanları üzerindeki sinüzoidal olmayan akımların ısı etkilerini belirlemek amacıyla oluşturulmuş bir indistir.	$K - faktör = \sum_1^n n^2 \cdot \left(\frac{I_n}{I} \right)^2$
F _{HL} Faktörü	Harmoniklerin transformatör kayıplarına etkisini incelemek için oluşturulmuş bir indistir	$F_{HL} = \frac{\sum_1^n \left[\frac{I_n}{I_1} \right]^2 \cdot n^2}{\sum_1^n \left[\frac{I_n}{I_1} \right]^2}$
TIF Faktörü	Harmonik akım ve gerilimlerinin ürettiği magnetik ve elektrik alanları haberleşme sistemlerinin performansını olumsuz yönde etkilemektedir. TIF faktörü çeşitli frekansların ses bandındaki bağlı parazit etkisini hesaplayan bir indistir.	$TIF = \frac{\sqrt{\sum (I_r \cdot W_r)^2}}{A_t}$
WTHD Faktörü	Ağırlıklı toplam harmonik bozunma faktörü olarak tanımlanmıştır. Motor gibi uygulanan gerilimin bozulmasına göre çalışması değişebilen ve kayıpları artan elemanların yeniden boyutlandırılması için kullanılan bir faktördür.	$WTHD = \sqrt{\sum V_n^2 \cdot n^{-0.8}}$

2.7 İndüksiyon ve Elektronik Tip Sayaçların Enerji Ölçüm Yöntemleri

Elektrik sayaçları üretilen veya tüketilen elektrik enerjisi miktarını ölçen alettir. Elektrik enerjisi miktarı Watt-saat (Wh) olarak belirtilir.

Pratikte ise enerji birimi olarak daha çok Wh'in bin katı olan Kilowatt-saat (kWh) veya milyon katı olan Megawatt-saat (MWh) kullanılır.

Tüketiciler tarafından kullanılan sayaçlar ikiye ayrılabilir:

1) İndüksiyon Tipi Sayaçlar: Aktif ve reaktif olmak üzere iki tip olup her ikisinin de yapısı aynıdır. Sayaç genel olarak akım ve gerilim bobinleri, metal disk ve kaydedici mekanizmadan oluşur. Akım bobini ve gerilim bobininin arasında bulunan metal disk gerilimin oluşturduğu manyetik akı sebebiyle dönmeye başlar. Metal diskin mili bir kaydedici numaratöre bağlıdır ve disk döndükçe numaratör gücü kaydeder.

İndüksiyon tipi aktif sayaçlar fiyat açısından daha ekonomik olduğundan hala en çok kullanılan enerji ölçüm cihazlarıdır. İlk sayaç çalışmaları yapılırken yüklerin lineer ve frekansın 50 Hz olması üzerine yapılmıştı. Fakat teknolojinin gelişmesiyle non-sinüsoidal akım ve gerilim etkileri üzerine denemelere uzun yıllar önce geçildi.

İndüksiyon tipi sayaçlarda reaktif enerji ölçümü genellikle faz kaydırma yöntemi ile yapılır. Bir wattmetreye uygulanan gerilim 90 derece geciktirilirse sinüzoidal şartlarda reaktif güç Q , bu wattmetreden okunabilir. Dolayısı ile indüksiyon tipi sayaçlarda gerilimi 90 derece geri kaydırarak kWh yerine kVARh ölçerler. Kapasitif ölçümler için aynı sayaç akım yönü ters bağlanarak kullanılır.

2) Elektronik tip sayaçlar: Endüstri tesislerinde ve konutlarda kullanım için tasarlanan elektronik tip sayaçlar tek fazlı ve üç fazlı olarak sınıf 1 hassasiyetinde üretilmektedir. Elektronik sayaçlarda ölçme işlemi sayacın bünyesinde bulunan güç ölçümü için özel olarak dizayn edilmiş entegre devreye akım ve gerilimin milivolt ve miliamper seviyesinde düşürülmüş şekilde girilmesi ve entegre devrenin bu akım ve gerilim sinyallerini belirli bir sayıda örnekleyerek ve örneklenen bu değerleri kullanarak P , Q , $\cos \phi$, I ve V değerlerini hesaplaması yolu ile yapılır.

Gerilim, entegre devreye gerilim bölücü devreler ile aktarılırken akım iki türlü aktarılır. Birinci yöntem akım transformatörü aracılığı ile akımı amper seviyesinden miliamper seviyesine düşürerek, ikinci yöntem ise akım devresine çok küçük değerli direnç eklemek ve bu direnç üzerinde oluşan gerilimi devreye aktarmak yöntemidir.

İkinci yöntemde entegre devre bu gerilim değerini bir katsayı ile çarparak akıma dönüştürür. Sayacın doğruluğu tamamen çeviricinin hassaslığına bağlıdır. Eğer güç örnekleme 12 bit hassaslığında alınıyorsa doğruluk % 0.025'dir. 16 bit çeviriciler daha hassas çözümler üretir.

Elektronik sayaçlarda dönen disk yerine puls çıkışı veren bir led bulunur. Bu led ayarlanan bir oranda yanarak (mesela her 0,1 watta) sayaçtan geçen yük miktarını gösterir. 200 impuls/kwh çıkışı olan sayaçlar bulunduğu gibi 50000 impuls/kwh çıkışı olan sayaçlarda mevcuttur. Bu tamamen sayacın örnekleme sayısı ve dizaynına bağlıdır. Elbetteki hassas bir sayaç için yüksek sayıda örnekleme yapılmalıdır.

2.8 Sayaç Standartları

Türkiyede aktif sayaçlar IEC 61036 [10] ve TS 461 EN 60521 [11] standartlarına göre test edilmektedir. Fakat 29.04.2005 tarihinden itibaren bu standartlar iptal edilmiş olup yerine TS EN 62052 [12] ve TS EN 62053 [13] standartları geçmiştir. TS EN 62052, 50 Hz'lik veya 60 Hz'lik şebekelerdeki alternatif akım elektrik aktif enerjisinin ölçülmesi için Doğruluk Sınıfı 0,5, Doğruluk Sınıfı 1 ve Doğruluk Sınıfı 2 olan yeni üretilmiş elektromekanik watt/saat sayaçlarını ve bu sayaçların sadece tip deneylerini kapsar. TS EN 62053 ise Doğruluk Sınıfı 1 ve Doğruluk Sınıfı 2 olan yeni üretilmiş statik watt/saat sayaçlarını ve bu sayaçların, sadece tip deneylerini kapsar. Türkiye'de indüksiyon tipi reaktif enerji sayaçları EN 60145 standardına [14] göre test edilmektedir. Elektronik reaktif enerji sayaçları ise 29.04.2005'e kadar EN 61268 [15] standardına göre test edilmiştir. Bu tarih itibarıyla EN 61268 standardı iptal edilmiştir. Bu standardın yerine elektronik reaktif enerji sayaçlarının testlerinde EN 62053 [13] standardı kullanılmaya başlanmıştır. EN 60145 yalnızca frekans aralığı, 40 Hz ile 60 Hz arasında A.A. elektrik reaktif enerjinin ölçülmesi için yeni olarak imal edilmiş 3 sınıfı doğrulukta indüksiyon tipi reaktif enerji ölçerlere uygulanan bir standarttır. EN 60145 standardına göre reaktif sayaçlara harmonik akım ve gerilim uygulanmaz. EN 62053 ise A.A. elektrik reaktif enerjisini 45 Hz ile 65 Hz arasında ölçmek için doğruluk sınıfları 2 ve 3 olan statik (elektronik) reaktif enerji ölçerleri kapsar. Bu standartta yarım dalga doğrultulmuş biçimde D.A. uygulandığında sayaç hatasının % 6 değerini geçmemesi gerektiği belirtilmiştir. Standartlara göre doğruluk tabloları aşağıdaki gibidir:

Tablo 2.2: Sınıf 1 ve Sınıf 2 için Hata (%) Sınır Değerleri

Akımın değeri		Güç faktörü	Sayaç sınıfları için hata sınır değerleri (%)	
Doğrudan bağlanan sayaçlar için	Transformatör ile çalışan sayaçlar için		Sınıf 1	Sınıf 2
$0,05 I_b \leq I < 0,1 I_b$	$0,02 I_n \leq I < 0,05 I_n$	1	$\pm 1,5$	$\pm 2,5$
$0,1 I_b \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	$0,05 I_n \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	1	$\pm 1,0$	$\pm 2,0$
$0,1 I_b \leq I < 0,2 I_b$	$0,05 I_n \leq I < 0,1 I_n$	0,5 indüktif 0,8 kapasitif	$\pm 1,5$ $\pm 1,5$	$\pm 2,5$ -
$0,2 I_b \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	$0,1 I_n \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	0,5 indüktif 0,8 kapasitif	$\pm 1,0$ $\pm 1,0$	$\pm 2,0$ -
Kullanıcı tarafından özellikle talep edildiğinde:		0,25 indüktif 0,5 kapasitif	$\pm 3,5$ $\pm 2,5$	- -
$0,2 I_b \leq I \leq I_b$	$0,1 I_n \leq I \leq I_n$			

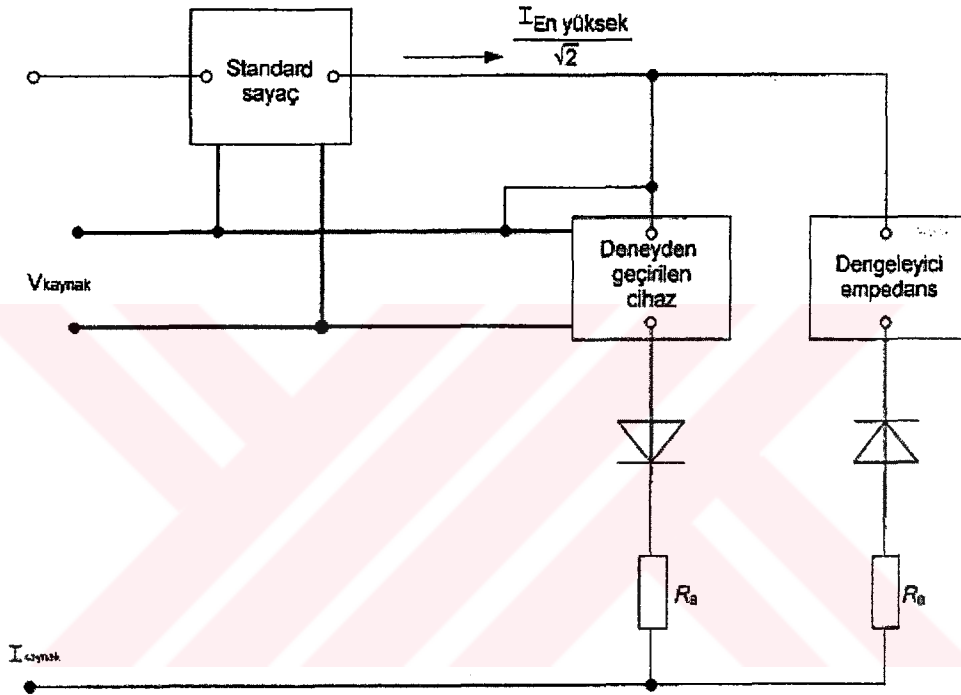
Tablo 2.3: Sınıf 1 ve Sınıf 2 için ilave Hata (%) Sınır Değerleri

Etki eden büyüklükler	Akım değeri (aksi belirtilmedikçe dengelidir)		Güç faktörü	Sayaç sınıfları için ortalama sıcaklık kat sayısı (%/K)	
	Doğrudan bağlanan sayaçlar için	Transformatör ile çalışan sayaçlar için		Sınıf 1	Sınıf 2
Çevre sıcaklık değişimi	$0,1 I_b \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$ $0,2 I_b \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	$0,05 I_n \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$ $0,1 I_n \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	1 0,5 indüktif	0,05 0,07	0,10 0,15
				Sayaç sınıfları için hatadaki değişime ilişkin sınır değerleri (%)	
				Sınıf 1	Sınıf 2
Gerilim değişimi $\pm \% 10$	$0,05 I_b \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$ $0,1 I_b \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	$0,02 I_n \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$ $0,05 I_n \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	1 0,5 indüktif	0,7 1,0	1,0 1,5
Frekans değişimi $\pm \% 2$	$0,05 I_b \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$ $0,1 I_b \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	$0,02 I_n \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$ $0,05 I_n \leq I \leq I_{en \text{ yüksek}}$	1 0,5 indüktif	0,5 0,7	0,8 1,0
Ters faz sırası	$0,1 I_b$	$0,1 I_n$	1	1,5	1,5
Gerilim dengesizliği	I_b	I_n	1	2,0	4,0
Akım ve gerilim devrelerindeki harmonik bileşenler	$0,5 I_{en \text{ yüksek}}$	$0,5 I_{en \text{ yüksek}}$	1	0,8	1,0
a.a. akım devresindeki d.a. ve çift harmonikler	$\frac{I_{en \text{ yüksek}}}{\sqrt{2}}$	-	1	3,0	6,0

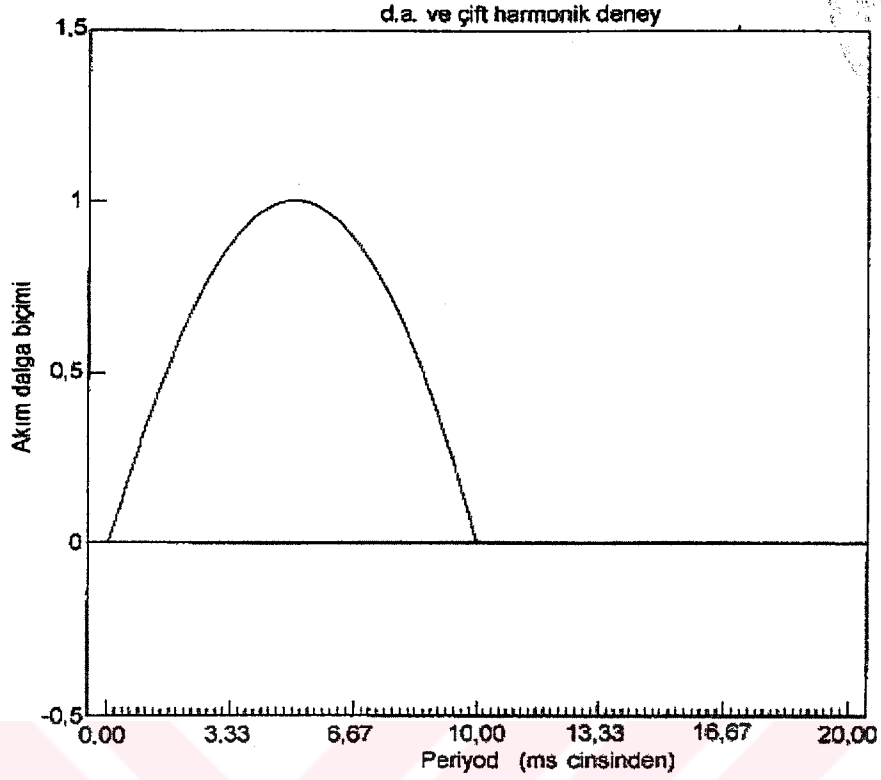
Etki eden büyüklükler	Akım değeri (aksi belirtilmedikçe dengelidir)		Güç faktörü	Sayaç sınıfları için ortalama sıcaklık kat sayısı (%/K)	
	Doğrudan bağlanan sayaçlar için	Transformatör ile çalışan sayaçlar için		Sınıf 1	Sınıf 2
a.a. akım devresindeki tek harmonikler ⁴⁾	$0,5 I_b^{23}$	$0,5 I_n^{23}$	1	3,0	6,0
a.a. akım devresindeki alt harmonikler ⁵⁾	$0,5 I_b^{23}$	$0,5 I_n^{23}$	1	3,0	6,0

d.a ve çift harmoniklerin etkilerine ilişkin deneylerde:

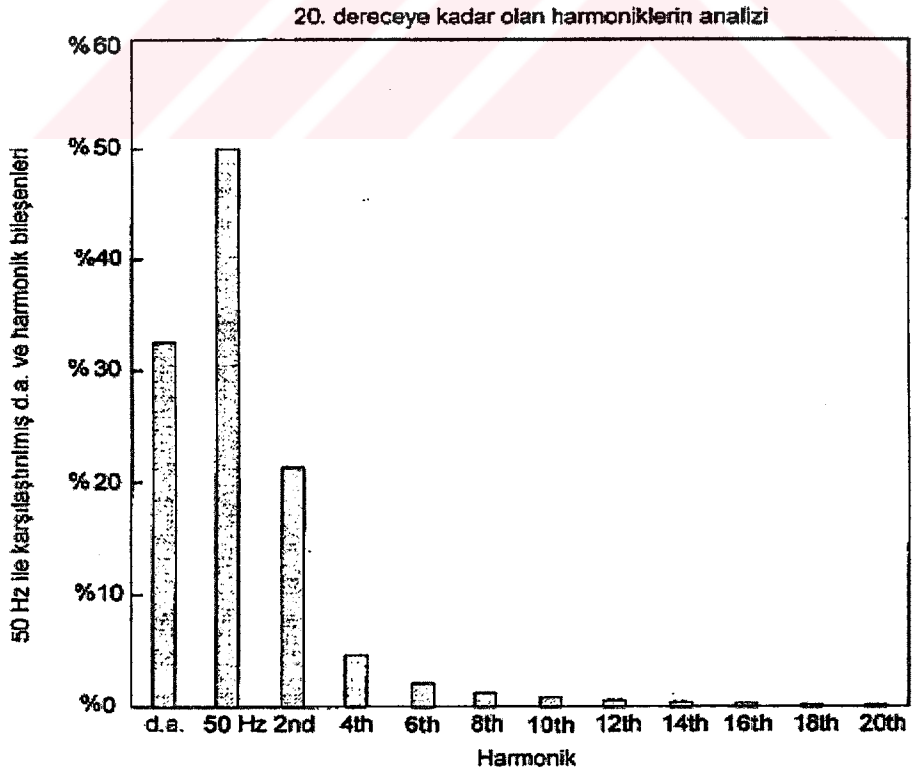
Doğru akımın ve çift harmoniklerin etkilerine ilişkin deneyler, Şekil 2.4'de gösterilen devreyle ya da gerekli dalga biçimlerini ve Şekil 2.5'de gösterilen akım dalga biçimlerini üretebilen diğer cihazlarla gerçekleştirilmelidir.



Şekil 2.4:Yarım dalga doğrultma için deney devresi diyagramı

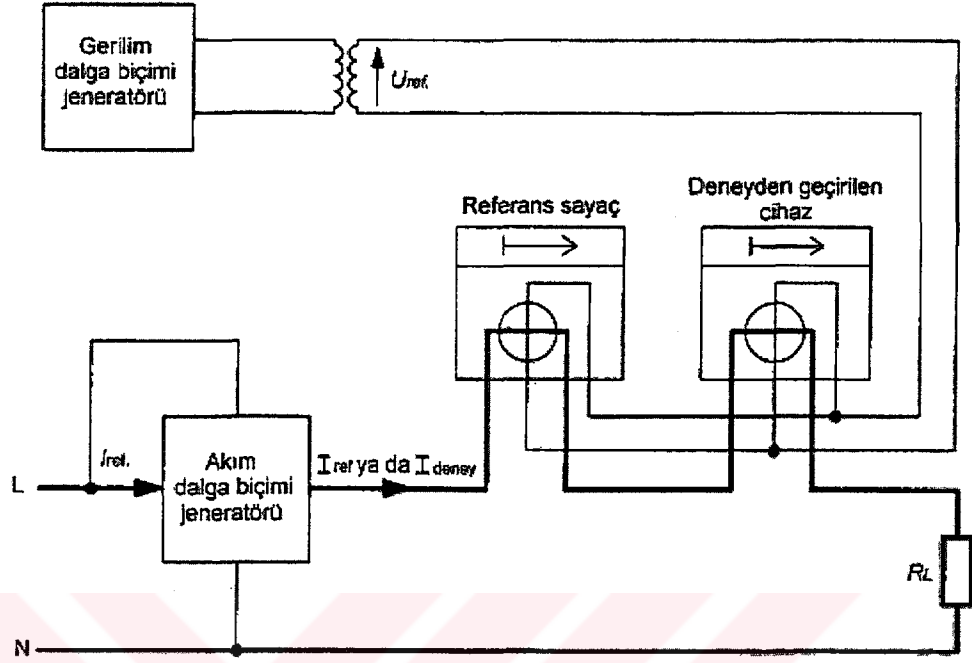


Şekil 2.5:Yarım-dalga doğrultulmuş dalga biçimi

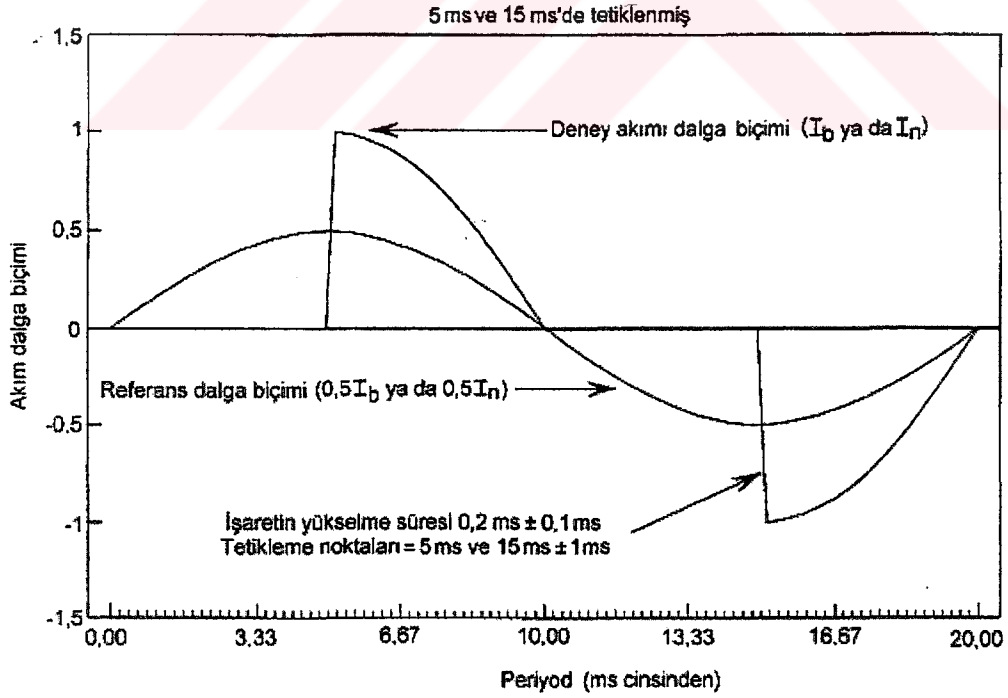


Şekil 2.6: Yarım-dalga harmonik bileşenin dağılım bilgisi

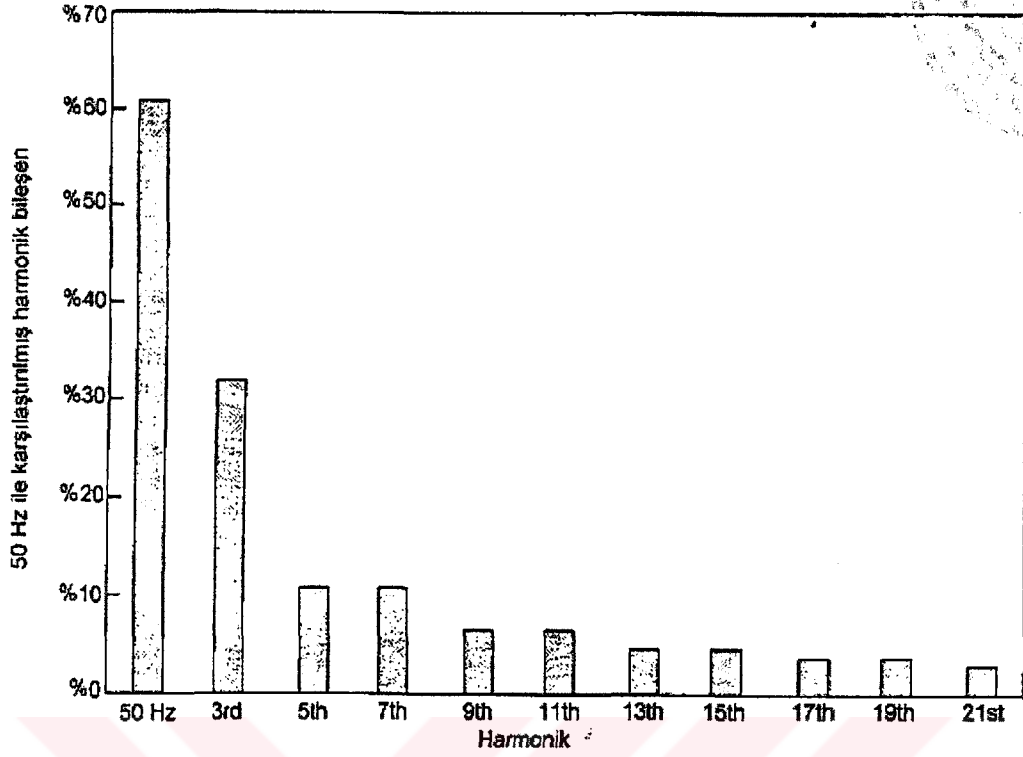
Tek harmonikler için deney devresi:



Şekil 2.7:Deney devresi diyagramı



Şekil 2.8:Faz tetiklemeli dalga biçimi



Şekil 2.9:Faz tetiklemeli dalga biçiminin harmonik bileşenine ilişkin dağılım bilgisi

Tablo 2.4:Sınıf 0,2 ve Sınıf 0,5 için (%) Hata Sınırları

Akım değeri	Güç faktörü	Sayaç sınıfları için yüzde hata sınırları	
		0,2 S	0,5 S
$0,01 I_n \leq I < 0,05 I_n$	1	$\pm 0,4$	$\pm 1,0$
$0,05 I_n \leq I < I_{enbüyük}$	1	$\pm 0,2$	$\pm 0,5$
$0,02 I_n \leq I < 0,1 I_n$	0,5 endüktif	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
	0,8 kapasitif	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
	0,5 endüktif	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$
	0,8 kapasitif	$\pm 0,3$	$\pm 0,6$
Kullanıcı tarafından özellikle istendiğinde	0,25 endüktif	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$
$0,1 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$ den itibaren	0,5 kapasitif	$\pm 0,5$	$\pm 1,0$

Tablo 2.5:Sınıf 0,2 ve Sınıf 0,5 için ilave Hata (%) Sınır Değerleri

Etkileyici büyüklük	Akım değeri (başkaca belirtilmedikçe dengeli)	Güç faktörü	Sayaç sınıfları için ortalama sıcaklık katsayısı %/ K	
			0,2 S	0,5 S
Ortam sıcaklığı değişimi	$0,05 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$ $0,1 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$	1 0,5 endüktif	0,01 0,02	0,03 0,05
			Sayaç sınıfları için yüzde hatadaki değişim sınırları	
			0,2 S	0,5 S
Gerilim değişimi $\pm \% 10$	$0,05 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$ $0,1 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$	1 0,5 endüktif	0,1 0,2	0,2 0,4
Frekans değişimi $\pm \% 2$	$0,05 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$ $0,01 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$	1 0,5 endüktif	0,1 0,1	0,2 0,2
Ters çevrilmiş faz sırası	$0,1 I_n$	1	0,05	0,1
Gerilim dengesizliği	I_n	1	0,5	1,0
Yardımcı gerilim $\pm \% 15$	$0,01 I_n$	1	0,05	0,1
Akım ve gerilim devrelerindeki harmonik bileşenler ⁵⁾	$0,5 I_{enbüyük}$	1	0,4	0,5
a.a. akım devresindeki alt harmonikler ⁵⁾	$0,5 I_n$	1	0,6	1,5
Harici kaynaklı sürekli manyetik endüksiyon	I_n	1	2,0	2,0
0,5 mT harici kaynaklı manyetik endüksiyonu	I_n	1	0,5	1,0

Tablo 2.6:Reaktif Enerji Sınıf 2 ve Sınıf 3 için Hata (%) Sınır Değerleri

Akım değeri		Sınır (endüktif veya kapasitif)	Sayaç sınıfları için yüzde hata sınırları	
Doğrudan bağlı sayaçlar için	Transformatör üzerinden bağlı sayaçlar için		2	3
$0,05 I_b \leq I < 0,1 I_b$	$0,02 I_n \leq I < 0,05 I_n$	1	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$
$0,1 I_b \leq I \leq I_{enbüyük}$	$0,05 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$	1	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$
$0,1 I_b \leq I < 0,2 I_b$	$0,05 I_n \leq I < 0,1 I_n$	0,5	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$
$0,2 I_b \leq I \leq I_{enbüyük}$	$0,1 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$	0,5	$\pm 2,0$	$\pm 3,0$
$0,2 I_b \leq I \leq I_{enbüyük}$	$0,1 I_n \leq I \leq I_{enbüyük}$	0,25	$\pm 2,5$	$\pm 4,0$

Elektronik sayaçlarda genel olarak reaktif gücü faz kaydırma metodu ile ölçerler. 08 Aralık 2000 tarih ve 24254 sayılı Resmi Gazetede yayınlanan Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği gereği 08 Aralık 2001 tarihinden itibaren tüm yeni abonelerde elektronik sayaç uygulaması zorunlu hale getirilmiştir.

Elektronik sayaçların indüksiyon tipi sayaçlara göre pek çok üstünlüğü vardır. Bunlar elektronik sayaçların hata sınırlarının daha düşük olması, aynı anda aktif ve reaktif gücü ölçebilmesi, sayacın kaydettiği tüketim değerinin el terminali aracılığı ile otomatik olarak okunabilmesi gibi avantajlardır. Ayrıca sayaç üzerinde IEC

61107 standardına [1] uyumlu optik port bulunmakta ve bu yolla sayaca ait tüm bilgiler bir bilgisayarla okunabilmekte ve sayaç programlanabilmektedir.

2.9 Özet

Bu bölümde sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan durumlarda dalga şekilleri tarif edilerek bir fazlı sistemler için aktif ve reaktif güç hesaplamalarının nasıl yapıldığı konuları ele alınarak harmoniklere ait oluşturulmuş tanım indislerden bahsedilmiştir. Enerji ölçüm yöntemlerine göre sayaçların çalışma koşullarına göre standartlardaki değerlerine bakılmıştır. Sinüzoidal olmayan şartlarda aktif sayaçlar için standart testler mevcut olmakla beraber reaktif sayaçlar için bunlar eksiktir. Ayrıca reaktif güç tanımları ile ilgili bir konsensüs mevcut değildir. Üçüncü bölümde literatürde bulunan reaktif güç tanımları incelenmektedir.



3 SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA GÜÇ

3.1 Giriş

Bu bölümde Sinüzoidal olmayan şartlarda güç tarifleri ele alınacaktır. Güç faktörü ve reaktif güç konusunda 1888'den sonra (Steinmetz ile başlayan) çalışmalardan bu yana sinüzoidal olmayan şartlarda güç hesaplama ihtiyacına cevap vermek amacıyla farklı güç tanımları oluşturulmuştur [16, 17, 18] Bu konuda hazırlanmış sinüzoidal, sinüzoidal olmayan, dengeli ve dengesiz durumlarda güç tanımlamalarını anlatan, örnek analizlerle bu tanımlamaları açıklayan IEEE 1459 Standardına göre [7] güç tarifleri verildikten sonra literatüre geçen değişik yöntemlere değinilecektir.

3.2 Sinüzoidal Olmayan Şartlar

Non sinüsoidal koşullarda reaktif güç hesabı konusunda değişik yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlar reaktif gücün daha doğru ölçülmesi ve güç faktörünün hesaplanması amacıyla ortaya çıkmıştır. Akım veya gerilime ait sinüzoidal olmayan bir periyodik dalga; Fourier teoreminden yararlanarak;

$$v(t) = \sum_1^h \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \sin(\omega_h \cdot t) \quad (3.1)$$

$$i(t) = \sum_1^h \sqrt{2} \cdot I_h \cdot \sin(\omega_h \cdot t - \varphi_h) \quad (3.2)$$

biçiminde ifade edilebilir. Sinüzoidal olmayan şartlarda ani güç ise akım ve gerilimin ani değerlerinin çarpımından;

$$p(t) = \sum_1^h \sqrt{2} \cdot V_h \cdot \sin(\omega_h t) \cdot \sum_1^h \sqrt{2} \cdot I_h \cdot \sin(\omega_h t - \varphi_h) \quad (3.3)$$

biçiminde elde edilebilir.

Sinüzoidal olmayan şartlarda görünür güç bileşenlerinin tanımlanmasında karşılaşılan zorluğun sebebi ani gücün içeriğinde bulunan farklı harmoniklere ait akım ve gerilim değerleri arasındaki çapraz çarpımlardır. Kompanzasyon, iletim verimi ve hat gerilim düşümü gibi elektrik tesislerine ait özellikler hakkında bilgi

veren reaktif güç tanımı sinüzoidal şartlar halinde var olmasına rağmen, sinüzoidal olmayan şartlarda bunların hepsi hakkında bilgi veren bir reaktif güç tanımı yoktur. Bu sebeple sinüzoidal olmayan şartlarda güç hesabı için belirlenmiş yöntemlerden hangisinin enerji ölçümü bakımından doğru bilgi verdiği konusunda karar vermek, hem sinüzoidal olmayan şartlarda faturalandırmanın optimum şekilde yapılması, hem de reaktif gücün fiyatlandırılması açısından gereklidir.

3.2.1 Budeanu Reaktif Güç Tanımı

Budeanu görünür gücü aktif ve aktif olmayan güç olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [19, 20]. Aktif güç; her bir harmonik bileşeni için ani güçlerin ortalama değerleri alınarak hesaplandığında;

$$P = \sum_1^h V_h \cdot I_h \cdot \cos \varphi_h \quad (3.4)$$

eşitliği yardımı ile hesaplanabilir.

Budeanu aktif gücü işe dönüşen gerçek güç hakkında bilgi vermesi sebebiyle seçmiştir. Bu yaklaşımda aktif olmayan güç ise; Budeanu reaktif ve bozulma gücü olarak iki dik bileşene ayrılmıştır. Budeanu reaktif gücü denklem (3.5)'de verildiği gibi tüm harmoniklere ait reaktif güçlerin toplamından oluşmaktadır.

$$Q_B = \sum_1^h V_h \cdot I_h \cdot \sin \varphi_h \quad (3.5)$$

Budeanu yönteminde bozulma gücü farklı harmoniklerin akım ve gerilim bileşenlerinin çapraz çarpımları arasındaki ilişkiden elde edilmiştir. (3.6)'de bozulma güç değeri görülmektedir.

$$D_B^2 = S^2 - P^2 - Q_B^2 = \sum_1^{n \neq m} V_n^2 \cdot I_m^2 + V_m^2 \cdot I_n^2 - 2 \cdot V_n \cdot I_m \cdot I_n \cdot V_m \cdot \cos(\varphi_n - \varphi_m) \quad (3.6)$$

Budeanu reaktif güç bileşenini basit bir kapasite ile tamamen kompanze edilebilecek reaktif gücü olarak belirlemiştir. Bozulma gücü için ise $n \neq m$ şartıyla (3.6)'deki $V_m \cdot I_n$ ile $V_n \cdot I_m$ çapraz çarpımları basit bir kapasite ile sıfır yapılamayacağından basit bir kapasite ile tamamen kompanze edilebilme durumu yoktur.

3.2.2 Fryze Güç Tanımı

Budeanu reaktif güç ifadesi basit bir kapasite ile kompanze edilebilen reaktif güç hakkında bilgi vermesine rağmen güç tanımındaki aktif ve reaktif güç ifadeleri kaynak verimi hakkında yeterli bilgi vermemektedir. Ayrıca Budeanu güç tanımı harmonik domeninde ölçümler ve karmaşık ölçüm aletleri gerektirmektedir. Fryze akımı aktif ve reaktif olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [20, 21]. Aktif bileşen

$$I_{\text{Aktif}} = \frac{P}{V} \quad (3.7)$$

reaktif bileşeni ise,

$$I_{\text{Reaktif}} = \sqrt{I^2 - I_{\text{Aktif}}^2} \quad (3.8)$$

olarak ifade edilir.

Gerilimin etkin değeri ile akımın reaktif bileşeninin etkin değerlerinin çarpımı Fryze'nin tanımlamış olduğu reaktif güçtür. Buna göre Fryze'nin reaktif güç tanımı

$$Q_F = V \cdot I_{\text{Reaktif}} \quad (3.9)$$

olarak ifade edilir.

Bu yöntemde aktif güç ile reaktif gücün vektör toplamı olan

$$S^2 = P^2 + Q_F^2 \quad (3.10)$$

ifadesi görünür güç olarak belirlenmiştir.

Bu ifadelerdeki akımın reaktif bileşeni fiziksel olarak iş yapmayan akım bileşenidir. Fryze yönteminin akımı böyle aktif ve reaktif olarak iki bileşene ayırması sonucunda elde edilen aktif ve reaktif güç tanımları kaynağın verimliliği hakkında bilgi verir.

3.2.3 Shepherd ve Zand Güç Tanımı

(3.4)'de tüm harmoniklere ait aktif güçler toplamı verilmiştir. İşareti negatif olan harmonik güçleri yükten kaynağa doğru akmaktadır. Ana harmonik gücü ise pozitif değerde olduğu için denklem (3.4) ile verilen toplam aktif güç ana harmonik

aktif gücünden küçük olabilmektedir. Bu duruma Shepherd ve Zand tarafından dikkat çekilmiştir [22]. Shepherd ve Zand akımı aktif, reaktif ve bozulma akımı olmak üzere üç dik bileşene ayrılmıştır. Bu akım bileşenleri

aktif akım;

$$I_R = \sqrt{\sum_1^h I_h^2 \cdot \cos^2 \varphi_h} \quad (3.11)$$

reaktif akım;

$$I_X = \sqrt{\sum_1^h I_h^2 \cdot \sin^2 \varphi_h} \quad (3.12)$$

ve bozulma akımları;

$$I_D = \sqrt{I^2 - I_R^2 - I_X^2} \quad (3.13)$$

şeklinde ifade edilirler.

Shepherd ve Zand' ın oluşturduğu güç tanımı

$$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2 \quad (3.14)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Buradaki güç bileşenleri :

aktif görünür güç, S_R ;

$$P \neq S_R = \sqrt{\sum_1^h V_h^2 \cdot \sum_1^h I_h^2 \cdot \cos^2 \varphi_h} \quad (3.15)$$

reaktif görünür güç, S_X ;

$$Q_B \neq S_X = \sqrt{\sum_1^h V_h^2 \cdot \sum_1^h I_h^2 \cdot \sin^2 \varphi_h} \quad (3.16)$$

ve bozulma görünür gücü, S_D ;

$$D_B \neq S_D = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^r I_k^2 + \sum_1^s V_u^2 \cdot \left(\sum_1^n I_n^2 + \sum_1^r I_k^2 \right)} \quad (3.17)$$

k : Akımın içerdiği gerilimin içerdiğinden farklı harmonik numaraları,

u : Gerilimin içerdiği akımın içerdiğinden farklı harmonik numaraları,

n : Hem akım hem de gerilimin içerdiği ortak harmonik numaraları,
olarak tanımlanmıştır.

Sonuç olarak; bu güç tanımının aktif ve reaktif bileşenleri kaynak ve hattan meydana gelen sistemin yüklenme şartları hakkında anlamlı bir bilgi sağlamaktadır.

3.2.4 Sharon Güç Tanımı

Shepherd ve Zand güç tanımı hattın yüklenme şartları hakkında anlamlı bir bilgi sağlamasına rağmen bu güç tanımı güç faktörünün hesaplanmasında kullanılamamaktadır. Sharon güç ifadesi, Shepherd ve Zand'ın güç ifadesi içinde yer almayan P aktif gücünü içermektedir [23]. Sharon güç tanımına göre reaktif görünür güç

$$S_Q^2 = V \cdot \sum_1^h I_h^2 \cdot \sin^2 \varphi_h \quad (3.18)$$

olarak ifade edilmiştir. Sharon güç tanımında görünür güç; ortalama güç, reaktif görünür güç ile tamamlayıcı görünür gücün vektör toplamı olan

$$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2 \quad (3.19)$$

ifadesiyle tanımlanmıştır.

Sharon güç tanımı hem hatlardaki reaktif güce bağlı yüklenme şartları hem de güç faktörü hakkında bilgi veren bir güç tanımıdır.

3.2.5 Kimbark Güç Tanımı

Kimbark görünür gücü aktif ve aktif olmayan güç olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [24]. Bu güç tanımında aktif güç ani gücün ortalama değeri olarak ifade edilmiştir. Aktif olmayan güç ise iki dik bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar ilki (3.20) ile verilen reaktif güç;

$$Q_K = Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \phi_1 \quad (3.20)$$

diğeri ise denklem ile verilen bozulma gücüdür.

$$D_K = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_K^2} \quad (3.21)$$

Kimbark'a göre devre parametreleriyle en kolay şekilde ilişkilendirilebilecek reaktif güç, temel dalganın akım ve gerilim bileşenleriyle hesaplanabilen reaktif güç tanımıdır.

3.2.6 Czarnecki Güç Tanımı

Czarnecki sinüzoidal olmayan dalga formundan dolayı kaynak verimindeki azalmanın tanımlanma ihtiyacı doğrultusunda bir güç ifadesi meydana getirmiştir. Czarnecki'nin kaynak ve yükün lineer olmama durumuna yönelik akım ifadesi

$$I^2 = I_A^2 + I_{Re}^2 + I_S^2 + I_H^2 \quad (3.22)$$

biçiminde oluşturulmuştur [25]. Bu ifadede akım bileşenleri;

reaktif akım;

$$I_{Re} = \sqrt{\sum_{h \in N} B_h^2 \cdot V_h^2} \quad (3.23)$$

kaydırılmış akım;

$$I_S = \sqrt{\sum_{h \in N} (G_h - G_e)^2 \cdot V_h^2} \quad (3.24)$$

üretilen harmonik akımı;

$$I_H = \sqrt{\sum_{h \in k} I_h^2}$$

olarak tanımlanmıştır.

(3.24)'de yer alan eşdeğer admitans G_e ise;

$$G_e = \frac{P}{V^2} \quad (3.26)$$

biçiminde elde edilir. G_n ise harmonik numarasına bağlı olarak yükün admitans değeridir.

Czarnecki'nin güç tanımı

$$S^2 = P^2 + D_S^2 + Q_R^2 + D_H^2 \quad (3.27)$$

biçiminde oluşturulmuştur. Burada güç bileşenleri :

reaktif güç;

$$Q_R = V \cdot I_{Re} \quad (3.28)$$

kaydırılmış güç;

$$D_S = V \cdot I_S \quad (3.29)$$

üretilen harmonik güç;

$$D_H = V \cdot I_H \quad (3.30)$$

biçiminde tanımlanmıştır.

Bu güç tanımının en önemli avantajı kaynak akımındaki lineer olmama durumundan kaynaklanan artışı belirlemesidir [26].

3.2.7 Depenbrock Güç Tanımı

Depenbrock tarafından tavsiye edilen akım ayırtırmaya dayalı [27] Fryze ve Shepherd' in güç tanımlarına benzemektedir. Kaynak geriliminin sinüzoidal olmayan kısmı ve lineer olmayan yükler Depenbrock'un bu tanımı çıkarmasında etkili olmuştur. Depenbrock öncelikle kaynak gerilimini iki parçaya ayırmıştır. Buna göre temel gerilim;

$$v_g(t) = \sqrt{2} \cdot V_1 \cdot \sin(\omega_1 t + \phi_1) \quad (3.31)$$

geriye kalan gerilim ise

$$v_k(t) = v(t) - v_g(t) \quad (3.32)$$

daha sonra akımı beş bileşene ayırmıştır.

temel kaynak gerilimi tarafından meydana gelen aktif akım bileşeni

$$i_{ga}(t) = G_{eq} \cdot V_g(t) \quad (3.33)$$

temel kaynak gerilimi ve yük direncinin lineer olmayan kısmı tarafından meydana gelen aktif akım bileşeni

$$i_{gv}(t) = (G_g - G_{eq}) \cdot V_g(t) \quad (3.34)$$

kaynak geriliminin diğer kısmından kalan aktif akım bileşeni ise

$$i_{ka}(t) = G_{eq} \cdot V_k(t) \quad (3.35)$$

temel kaynak gerilimi ve yük direncinin lineer olmayan kısmı tarafından meydana gelen aktif akım bileşeni ise

$$i_{kv}(t) = (G_k - G_{eq}) \cdot V_k(t) \quad (3.36)$$

Temel kaynak gerilimi tarafından meydana gelen reaktif akım

$$i_Q(t) = \frac{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T i(t) \cdot v_g(t) dt}{V_g^2} \cdot v_g(t - T/4) \quad (3.37)$$

ve kaynak geriliminin kalan kısmından oluşan aktif olmayan akım

$$i_N(t) = i(t) - i_{ga}(t) - i_{ka}(t) - i_{gv}(t) - i_{kv}(t) \quad (3.38)$$

buna göre

$$P = P_g + P_k \quad (3.39)$$

$$G_{eq} = \frac{P}{V^2} \quad (3.40)$$

$$G_g = \frac{P_g}{V_g^2} \quad (3.41)$$

$$G_k = \frac{P_k}{V_k^2}$$

(3.42)

Deppenbrock oluşturduğu güç tanımını şuna göre açıklar:

$$S^2 = P^2 + Q_D^2 + U^2 + N^2 \quad (3.43)$$

ve bununla beraber reaktif güç

$$Q_D = V \cdot I_Q \quad (3.44)$$

Yük direncinin lineer olmayan kısmı tarafından yok edilen aktif güç rms değeri olarak ise:

$$U = V \cdot \sqrt{I_{gv}^2 + I_{kv}^2} \quad (3.45)$$

ve geriye kalan güç

$$N = V \cdot I_N \quad (3.46)$$

buna rağmen N gücü ve U gerilimi için tam bir tanımlama yapmamıştır.

3.2.8 Kusters and Moore Güç Tanımı

Kusters ve Moore güç faktörünün kapasitif veya indüktif olmasına göre akımı aktif, kapasitif reaktif ve geriye kalan reaktif akımlar olmak üzere üçe ayırmaktadır.

[16] Bu akım bileşenleri aşağıdaki gibidir.

Aktif akım:

$$i_a(t) = \frac{P}{V^2} \cdot v(t) \quad (3.47)$$

kapasitif reaktif akım

$$i_{qc}(t) = \frac{\frac{1}{T} \cdot \int_0^T v'(t) \cdot i(t)}{V'^2} \cdot v'(t) \quad (3.48)$$

ve geriye kalan reaktif akım

$$i_{qcr}(t) = i(t) - i_a(t) - i_{qc}(t) \quad (3.49)$$

buna göre genel güç tanımı şöyle yazılabilir

$$S^2 = P^2 + Q_C^2 + Q_{Cr}^2 \quad (3.50)$$

buna göre Kusters ve Moore' un reaktif güç tanımı:

$$Q_C = V \cdot I_{qc} \cdot \sin(\varphi_{v'-i}) \quad (3.51)$$

geriye kalan reaktif güç ise

$$Q_{Cr} = V \cdot I_{qcr} \quad (3.52)$$

Reaktif güç Q_C R-L yükleri için negatiftir. [27]'de görüldüğü gibi reaktif güç tanımlanmasına rağmen optimal kapasitenin hesaplanmasında kapasitif reaktif güç kullanılamamaktadır. Diğer tanımlardan farklı olarak buna göre optimal C şöyle ifade edilebilir:

$$C_{opt} = \frac{-Q_C}{V \cdot V'} \quad (3.53)$$

3.3 IEEE 1459'a Göre Güç Tarifi

Kararlı durumlarda sinüzoidal olmayan ani akım ve gerilim iki ayırt edici bileşene ayrılabilir. Güç sistem frekansı bileşenleri v_1 ve i_1 ile geriye kalan tam ve tam olmayan tüm harmonikleri içeren terimler v_H ve i_H

$$v_1 = \sqrt{2} \cdot V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (3.54)$$

$$i_1 = \sqrt{2} \cdot I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (3.55)$$

$$v_H = \sqrt{2} \cdot \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (3.56)$$

$$i_H = \sqrt{2} \cdot \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (3.57)$$

tekabül eden rms değerler ise aşağıdaki gibidir.

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (3.58)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (3.59)$$

burada v_H ve i_H

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad (3.60)$$

$$I_H^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad (3.61)$$

Ani güç, akım ve gerilimin çarpımıyla bulunmakta olup bu da iki kısma ayrılabilir.

$$p(t) = v(t).i(t) \quad (3.62)$$

$$p = p_a + p_q \quad (3.63)$$

ilk terim

$$p_a = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t)] \quad (3.64)$$

olup sıfır olmayan tüm bileşenleri içerir. İkinci terim ise:

$$p_q = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t) + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} 2V_m I_n \sin(m\omega t + \alpha_m) \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (3.65)$$

olup enerjinin transferine hiç katkısı olmayan, ortalama değeri sıfır bileşenlerden oluşmaktadır.

Aktif güç temel bileşen ve harmonik aktif gücü olmak üzere ikiye ayrılır.

$$P = P_1 + P_H \quad (3.66)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (3.67)$$

$$P_H = \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (3.68)$$

Temel bileşen reaktif gücü aşağıdaki gibi olup

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (3.69)$$

şeklinde ifade edilebilir.

Budeanu reaktif gücü ise

$$Q_B = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h = Q_1 + Q_{BH} \quad (3.70)$$

şeklindedir.

Sinüzoidal, sinüzoidal olmayan, dengeli ve dengesiz sistemlerde güç sistem elemanları için geçmişte ve günümüzde kullanılan matematiksel formüllerin güç tanımlarının bahsedildiği standarttır.

3.4 Güç Tanımlarının Karşılaştırılması

Tablo 3.1’de bölümde verilen güç tanımlarına ait bileşenler sınıflandırılmıştır.

Tablo 3.1:Güç Tanımlarına ait bileşenler

	Aktif güç	Reaktif güç	Görünür güç	Bozulma gücü
Budeanu	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_B = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \sin \varphi_n$	$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D_B^2$	$D_B^2 = S^2 - P^2 - Q_B^2$
Fryze	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_F = V \cdot I_{\text{Reaktif}}$	$S^2 = P^2 + Q_F^2$	Yok
Shepherd ve Zand	$P \neq S_R = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \cos^2 \varphi_n}$	$Q_B \neq S_X = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \varphi_n}$	$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2$	$S_D^2 = \sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_k^2 + \sum_1^n V_n^2 \cdot \left(\sum_1^n I_i^2 + \sum_1^n I_k^2 \right)$
Sharon	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_B \neq S_Q^2 = V \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \varphi_n$	$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2$	$S_C^2 = S^2 - P^2 - S_Q^2$
Kimbark	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \varphi_1$	$S^2 = P^2 + Q_1^2 + D_K^2$	$D_K = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_1^2}$
Czarnecki	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_B \neq Q_R = V \cdot I_{Re}$	$S^2 = P^2 + D_S^2 + Q_R^2 + D_H^2$	$D_S = V \cdot I_S, D_H = V \cdot I_H$
Depenbrock	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_D = V \cdot I_Q$	$S^2 = P^2 + Q_D^2 + U^2 + N^2$	$U = V \cdot \sqrt{I_{gv}^2 + I_{kv}^2}$ $N = V \cdot I_N$
Kusters ve Moore	$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos \varphi_n$	$Q_C = V \cdot I_{qc} \cdot \sin(\varphi_{v-i})$	$S^2 = P^2 + Q_C^2 + Q_{Cr}^2$	Yok

Literatürde Tablo 3.1’de belirtilen güç tanımlarının geçerliliklerinin incelenmesi ve karşılaştırmalar sonucunda sinüzoidal olmayan şartlarda:

- Budeanu reaktif gücünün basit bir kapasite ile kompanse edilebildiği fakat Fryze reaktif gücünün basit bir kapasite ile kompanse edilemediği

- Shepherd ve Czarnecki reaktif güçlerinin hat empedansı ihmal edildiği analizlerde temel harmonik reaktif gücüne eşit oldukları bulunmuştur. Bu sonuç ise Shepherd ve Czarnecki reaktif güçlerinin sinüzoidal gerilim kaynağı-lineer olmayan yük durumunda basit bir kapasite ile kompanze edilebildiğini
- Shepherd bozulma gücü ile Czarnecki üretilen harmonik gücünün sıfırdan farklı değerler alabileceği
- Kusters ve Moore' un bozulma gücü tanımlayamamasına rağmen optimal kapasite için bir formül ifade ettiği

görülmüştür.

Literatürde farklı tanımlarda mevcuttur ancak sadece çalışmanın özelliğine göre bu tanımlarla ilgilenildi.

3.5 Bozulmuş Dalga Şekli Şebekede Güç Ölçümü Çalışmaları

Bu bölümde Avrupa normlarında üretilmiş, ideal çalışma koşullarında standartlara [10, 11, 12, 13, 14] uygun sonuçlar veren sayaçlar kullanılarak; indüksiyon ve elektronik sayaçların frekans karakteristiği elde edildikten sonra akımın farklı bozulma oranlarında bu sayaçların yapmış olduğu hatalar analiz edilmiştir. Muhtemel hata mekanizması belirlenmeye çalışılmıştır.

Sinüzoidal olmayan koşullarda güç ölçümü ve elektrik sayaçlarının performansı konusunda değişik araştırmalar yapılmıştır [28]. Bu araştırmalarda indüksiyon ve elektronik tip elektrik sayaçlarının non-sinüzoidal koşullardaki performansları ve ölçüm metotları incelenmiştir.

İndüksiyon tipi, tamamen elektronik, örnekleme yolu ile güç ölçen dijital sayaç ile dijital göstergeli indüksiyon tipindeki dört farklı sayaç non-sinüzoidal koşullarda test edildiğinde sayaçların çalışma prensiplerine bağlı olarak % + 68 ile % - 41 arasında farklı ölçüm yaptıkları görülmüştür [29]. Sayaçların hata değerlerinin Budenau, Sharon, Fryze ve temel harmonik reaktif güçlerinin bilgisayar tarafından hesaplanan değerleri ile karşılaştırıldığı çalışmada sayaçların Q1 temel harmonik

gücünü ölçmek üzere dizayn edilmeleri nedeni ile harmonikli yükleri hatalı ölçtükleri sonucuna varılmıştır.

Inverter, AA gerilim kontrolü ve kontrolsüz köprü doğrultucu çıkışı gibi harmonik içerikli akım çeken yüklerin induksiyon ve elektronik tip sayaçlara uygulanması durumunda sayaç hatalarının artması ile birlikte ölçülen güç değerlerine göre hesaplanan güç faktörlerinin de hatalı sonuç verdiği görülmüştür [29]. Indüksiyon ve elektronik sayaçların her ikisinin de non-sinüsoidal yükteki toplam reaktif gücü doğru olarak ölçemedikleri, sıradan elektronik ve indüksiyon tipi sayaçların sadece temel harmonik reaktif gücü ölçebildikleri bu nedenle bu sayaçların gösterdikleri güç değerine göre hesaplanan güç katsayısının da hatalı olduğu sonucuna varılmıştır.

Inverter üzerinden beslenen akım ile sayaçların test edildiği durumda her iki sayacın hatasının da yaklaşık aynı ve % -25 ile % -10 arasında değiştiği ve küçük akımlarda (altı Amper) % 25 yüksek akımlarda ise (dokuz Amper) % 10 oranında eksik kayıt yaptıkları görülmüştür. Yine aynı şekilde güç faktörünün de %10-25 arasında akıma bağlı olarak hatalı olarak hesap edildiği görülmüştür[29]

Dengesiz ve harmonik içeren şebekelerde aktif, reaktif ve güç faktörü hesabı ele alınmıştır. Dengesizlik durumunda güç tanımı bilinen tanımdan çok farklı olmaktadır. Dengeli durumda ani güç sadece doğru bileşenden oluşurken, dengesizlik durumunda şebeke frekansının iki katı frekansta salınan bileşen ortaya çıkmaktadır. Gerilim veya akımın harmonik içermesi durumunda aktif güç hesabında fark olmamaktadır. Fakat harmonikler reaktif güç hesabını çok etkilemektedir. Sayısal uygulamadan da görüldüğü gibi harmonikli durumda reaktif güç, farklı bağıntılar için çok farklı değer alabilmektedir. Buna göre Budeanu tarafından ortaya atılan reaktif güç tanımına göre sonuçlar elektronik ölçü cihazları ile elektromekanik ölçü cihazları akımın ani değeri ile gerilimin temel bileşene göre 90° kaydırılmış değerinin çarpımının ortalamasına göre ölçüm metoduna göre daha büyük sonuçlar vermiştir [30].

Sinüzoidal olmayan gerilim indüksiyon tipi sayaçlara uygulanması durumunda sayaç hatalarının % 20 THD' ye kadar standartlar içinde kaldığı bu değerden sonra pozitif yönde hatanın arttığı görülmüştür [31].

Elektronik ve indüksiyon tipi tek fazlı sayaçlar 50 Hz ile 750 Hz arasındaki frekanslarda denenmiş ve induksiyon tipi sayaçların yüksek frekanslarda % 90 oranında eksik kayıt yaptığı görülmüştür [8].

İndüksiyon tipi sayaçların 50 Hz de doğru ölçüm yaparken frekans yükseldikçe hatalarının da % -90 a kadar yükseldiği görülmüştür. Bu artış 3. harmonik için % -40 ve 7. harmonik için %-80 ve 13. harmonik için %-90 a ulaşmıştır. Burada dikkat edilmesi gereken nokta uygulanan sinyalde sadece harmoniklerin bulunduğu, 50 Hz'lik temel harmoniğin bulunmadığı yani sadece denenmek istenen frekanstaki sinyalin sayaçlara uygulandığıdır. Bu hatanın sebebinin indüksiyon tipi sayacın çalışma prensibine bağlı olduğu sayacın metal diskinden geçen manyetik akının harmonik miktarı arttıkça azalması sonucu sayacın hatasının arttığı, dalga şeklini örnekleyerek akım ve gerilimi ölçen ve örnekleme frekansı sayaca uygulanan en yüksek frekanslı harmonikten çok daha büyük olan elektronik sayacın hatasında ise bir değişim olmadığı belirtilmiştir.

3.6 Sonuç ve Tartışma

Bu bölümde sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan koşullarda standartlara ve değişik yaklaşımlara göre güç hesaplama yöntemleri incelenmiştir. Önce sinüzoidal koşullar için güç ölçüm yöntemleri incelenmiş olup bu yöntemlerde herhangi bir fikir ayrılığı olmadığı belirtilmiştir.

Daha sonra IEEE standardına göre bozulmuş dalga şekilli şebekede güç ölçüm tarifleri incelenmiştir. 1922 yılında Budenau'nun önerdiği yöntemin IEEE tarafından kabul edilerek IEEE 1459 standardına konulduğu belirtilmiştir.

Reaktif güç kompanzasyonunun Budenau'nun önerdiği yöntemle göre yapılması durumunda güç katsayısının düzeltilemeyeceğini öne süren Fryze, Sharon, Emanuel, Shepherd, Depenbrock ve Kusters ve Moore'un önerdiği güç ölçüm yöntemleri incelenerek bunların karşılaştırması verilmiştir.

Son olarak elektronik ve indüksiyon tipi sayaçların çalışma prensiplerine göre Türkiye’de bu sayaçların uygun olmak zorunda oldukları Standartlar konusunda bilgi verilmiştir.



4 AKTİF GÜÇ ÖLÇÜMÜ ve SAYAÇLAR

Bu bölümde, bozulmuş dalga şekilli şebekede elektronik ve indüksiyon tipi sayaçların performansı incelenecektir. Avrupa normlarında üretilmiş standartlara [10, 11] uygun sonuçlar veren indüksiyon ve elektronik tipi sayaçlar harmonik içerikli akım ve gerilime tabi tutulacaklar, bu dalga şekilleri harmonik analizörü ile kaydedildikten sonra bu kaydedilen dataların kullanılması ile bölüm III de anlatılan değişik aktif ve reaktif güç tanımlarına göre hesaplamalar yapılacak ve bulunan güç değerleri sayaçların gösterdiği değerler ile kıyaslanacaktır.

Sayaçlara farklı durumlarda harmonik içerikli akım ve gerilim uygulanacaktır. İlk durumda şebekeden beslenen lineer olmayan bir yük altında test uygulanacak olup diğer durumlarda ise sabit gerilim kaynağı altında analizleri yapılacaktır.

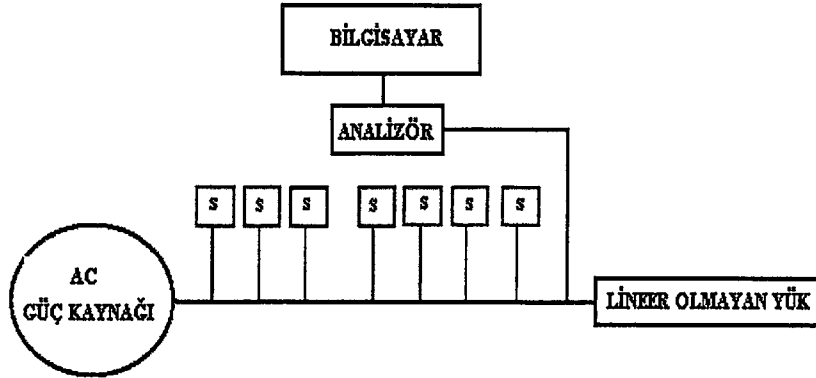
Sayaçların her iki durum için kaydettikleri değerler hesaplanan değerler ile karşılaştırılacak ve oluşan farklılıkların sebepleri irdelenecektir.

4.1 Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Deneyler esnasında sayaç test sistemi ile birlikte, uygulanan dalga şekillerini kaydetmek için harmonik analizörü ve bir kişisel bilgisayar kullanılmıştır. Kullanılan cihazlar ile ilgili ayrıntılı bilgi aşağıda verilmiştir.

Sayaç test sistemi Avrupa normlarında üretilmiş, ideal çalışma koşullarında standartlara [10, 11] uygun sonuçlar veren 3 adet indüksiyon ve 4 adet elektronik tipi minimum bakım gerektirecek dayanım, azami hassasiyetle ölçüm yapacak titizlikte imal edilmiş aktif sayaçlar, dalga şekillerini kaydetmeyi sağlayan dijital osiloskoptan oluşmaktadır. Analizörün, aldığı örnekler, RS 232 bağlantısı aracılığı ile PC ye aktarılmıştır. Deneylerde gerilim probu ve akım pens ampermetre ölçüm ekipmanı olarak kullanılmıştır. Ölçümler sırasında akımı ölçerken akım pens ampermetrenin genlik ölçümünde doğru sonuçlar vermesine karşın açısı değerinde 10° kadar farklı değer göstermesinden akım değeri şönt direnç üzerinden okunmuştur.

Şekil 4.1’de akım dalga formunun k faktöründeki değişimin sayaç ölçüm hatalarına etkisinin ve sayaçların frekans cevabının elde edilmesi için kullanılan test sisteminin şekli gösterilmektedir.



Şekil 4.1: Test sisteminin blok diyagram ile gösterimi



Şekil 4.2: Test Sistemi

Bu test sistemi sayaçların test edilmesi için gerekli bozulmuş akım-gerilim dalga formunu oluşturabilen ve farklı frekanslarda gerilim üretebilen biçimde tasarlanmış olup ölçüm datalarının elde edildiği osiloskop ve gerekli hesaplamaların yapıldığı bilgisayardan meydana gelmektedir. Elde edilen akım ve gerilim datalarından

$$P_{ref} = \frac{1}{N} \cdot \sum_{n=1}^N V[n] \cdot I[n] \quad (4.1)$$

denklemini kullanarak referans aktif güç değeri elde edilir. Bu denklemde $V[n]$ ve $I[n]$ örneklenen akım ve gerilim vektörlerinin n.elemanlarıdır. Sayaçların ölçüm hata miktarları ise

$$\%Hata = \left(\frac{P_{ref} \cdot t_{test} - W_{sayac}}{P_{ref} \cdot t_{test}} \right) \cdot 100 \quad (4.2)$$

denkleminde elde edilmiştir. Burada;

% Hata: yüzde olarak hata miktarı (ölçümdeki sapma)

P_{ref} : Referans aktif güç değeri

T_{test} : Test süresi

W_{sayac} : Sayacın ölçtüğü güç

4.2 Deneylerde Kullanılan Sayaçlar

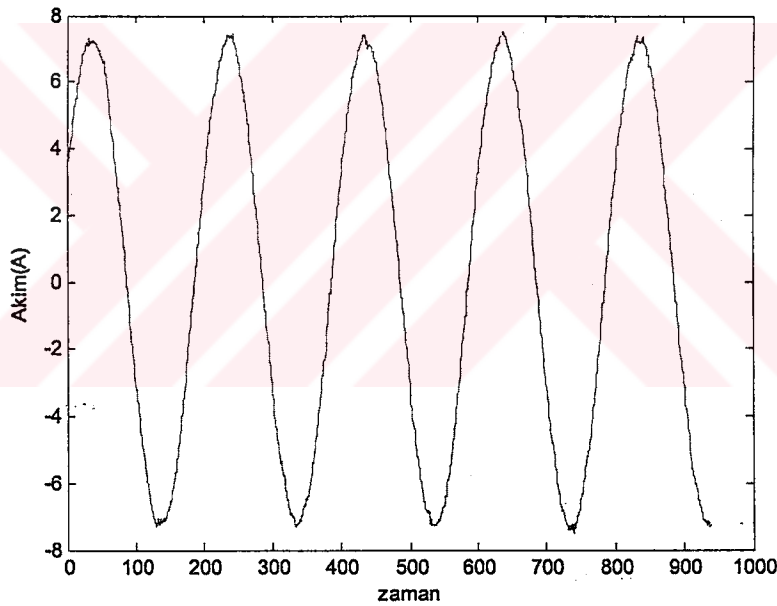
Deneylerde sırasıyla piyasada hali hazırda bulunan elektronik ve indüksiyon tipi sayaçlar kullanılmış olup bunlar;

1. A marka (me1), 220 Volt, 10(40) Amper 600d / kWh 1 fazlı aktif indüksiyon sayaç
2. B marka(di2), 220 Volt, 10(60) Amper 1000d / kWh 1 fazlı aktif elektronik sayaç
3. A marka(me3), 220/380 volt 10(30) Amper 240 d / kWh 3 fazlı aktif indüksiyon sayaç
4. A marka(me4), 220 Volt, 10(30) Amper 675d / kWh 1 fazlı aktif indüksiyon sayaç
5. C marka(di5), 220 Volt, 10(60) Amper 3200d / kWh 1 fazlı aktif elektronik sayaç
6. D marka(di6), 220 Volt, 10(60) Amper 800d / kWh 1 fazlı aktif elektronik sayaç

7. E marka(di7), 220 Volt, 10(60) Amper 3200d / kWh 1 fazlı aktif elektronik sayaç

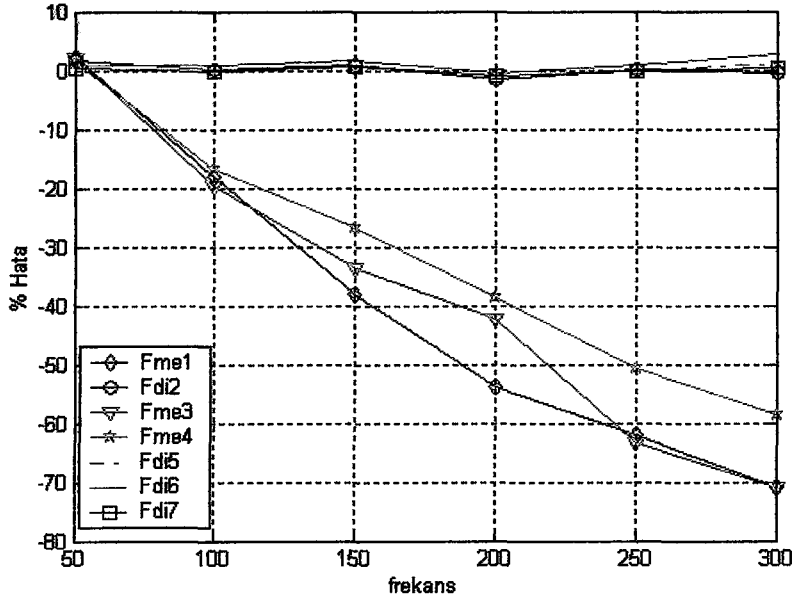
4.3 Deney Yöntemi

3 adet indüksiyon ve 4 adet elektronik aktif sayaç birbirlerine kaskat olarak bağlanmıştır. Şekil 4.1’de verilen test sistemindeki kaynak ilk testte şebeke diğer testte ise sinüzoidal gerilim verebilen bir cihazdır. Denklem (4.1)’den hesaplanan referans güç değeri ile test edilen sayaçların ölçtükleri değerler Denklem (4.2)’de yerlerine konarak; test edilen sayaçların hata miktarları elde edilmiştir. k faktörünün her durumu için bu işlem yapılarak sayaçların k faktörünün değişimine göre yaptığı hata miktarlarındaki değişim gözlenmiştir. Şekil 4.3’ de verilen sinüzoidal akım dalga şekli frekans değeri değiştirilerek testlerde kullanılmıştır.



Şekil 4.3: Test akım dalga şekli

Test edilen sayaçların farklı frekanslarda sinüzoidal yük akımı için yaptıkları hata miktarları ise sayaçların frekans karakteristiği için önemlidir. Bu sebeple elde edilen grafik Şekil 4.4’ de verilmiştir.



Şekil 4.4: Frekans - hata karakteristiği

50Hz ile 300 Hz arasında frekans artışına bağlı olarak indüksiyon tipi sayaçların hataları negatif yönde artmaktadır. Frekans arttıkça diskin aynı güç değerinde aynı hızda dönmesi için daha büyük manyetik akı gerekmektedir. Daha büyük manyetik akı sağlanamadığı için aynı güç değerinde daha büyük frekansta disk daha az dönmektedir. Böylece indüksiyon tipi sayaçlar için de görülen hata-frekans karakteristiği ortaya çıkmaktadır. Elektronik sayaçların ise bu frekans aralığında hata miktarları % 2 değerini aşmamıştır. Bu durum test edilen elektronik tip sayaçların örnekleme hızlarının bu frekans aralığında doğru ölçüm için gerekli değerler aralığında olduğu anlaşılmıştır. Test çalışmaları sırasında 300 Hz'den yüksek frekans değerlerinde; elektronik tipi sayaçların yapısında bulunan gerilim bölme amaçlı kullanılan kapasiteler akımın artmasıyla zarar görmüştür. Çalışma frekansının makul değerlerde değiştiği durumlarda ölçüm doğruluğu da incelenmesi gerekir.

Sinüzoidal olmayan koşullarda güç hesaplanmasında değişik yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlar gücün daha doğru ölçülmesi ve güç faktörünün hesaplanması amacıyla ortaya çıkmıştır. Bu konuda hazırlanmış IEEE 1459 Standardına göre literatüre geçmiş tavsiye edilen Budenau'ya göre güç tanımında görünür güç üç dik bileşene bölünmüştür. Bu bileşenler aktif güç, Budenau reaktif gücü ve Bozulma gücüdür.

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D^2 \quad (4.3)$$

Aktif güç; her bir harmonik bileşeni için ani güçlerin ortalama değerleri alınarak hesaplandığında;

$$P = \sum_1^{\infty} V_h \cdot I_h \cdot \cos\phi_h \quad (4.4)$$

eşitliği yardımı ile hesaplanabilir.

Analizler sırasında kaynaktan yüke akan harmoniklerin güçleri P_h^+ ve yükten kaynağa doğru akan harmoniklerin güçleri P_h^- ; gerilim-akım örneklerinin fft si alındıktan sonra

$$-90^\circ \leq \phi_h \leq 90^\circ \Rightarrow P_h^+ = V_h \cdot I_h \cdot \cos\phi_h \quad (4.5)$$

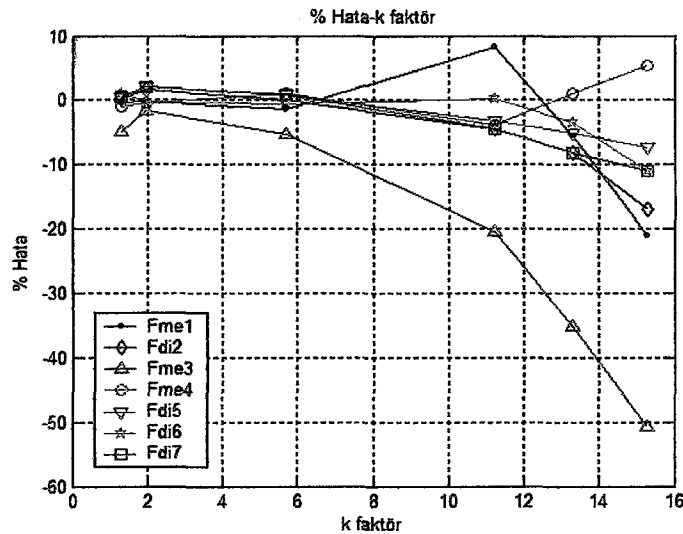
$$90^\circ \leq \phi_h \leq 270^\circ \Rightarrow P_h^- = V_h \cdot I_h \cdot \cos\phi_h \quad (4.6)$$

denklemlerinden hesaplanır. Bu ayrımın yükten kaynağa doğru olan güç akışının sayacın (-) yönde ve kaynaktan yüke doğru olan yük akışının (+) yönde hataya sebep olup olmamasına bakılmıştır. Kaynaktan yüke doğru akan harmoniklerin aktif güçleri toplamı P^+ ve yükten kaynağa doğru akan harmoniklerin aktif güçleri toplamı P^- nin pu değerleri ise

$$P^+ = \frac{1}{P_{ref}} \sum_{h=1}^{50} P_h^+ \quad (4.7)$$

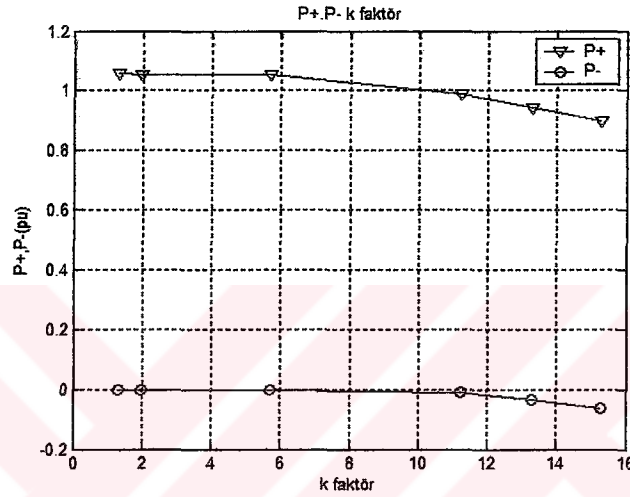
$$P^- = \frac{1}{P_{ref}} \sum_{h=1}^{50} P_h^- \quad (4.8)$$

Şekil 4.1'deki test sistemi kullanılarak sayaçların k faktörüne bağlı olarak hata miktarlarının Şekil 4.5' de değişimi verilmiştir.



Şekil 4.5: Sayaçların ölçüm hatalarının k faktörüne göre değişimi

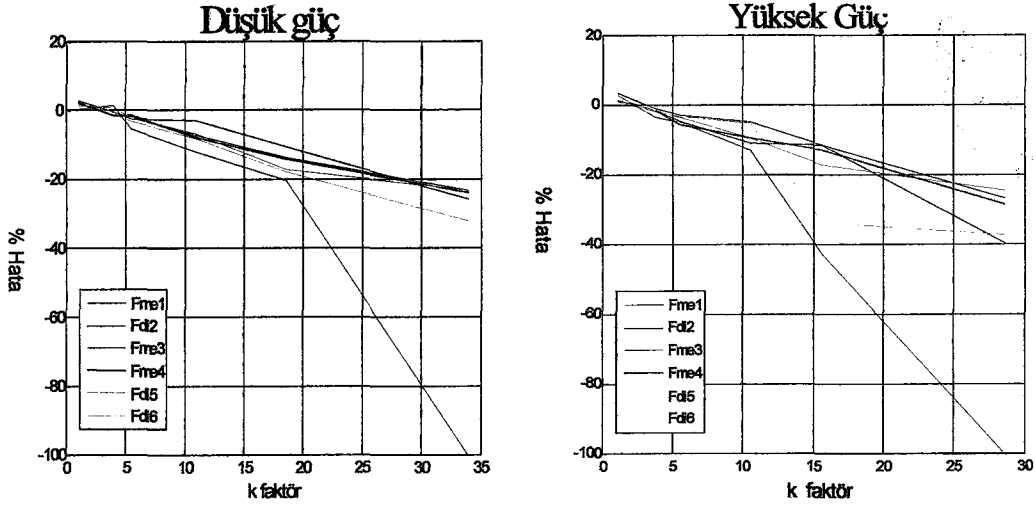
Şekil 4.5'den görüldüğü üzere sayaçlar k faktörün 6-16 değerleri arasında önemli büyüklükte değişim göstermektedir. Bu aralıkta sayaçların genel olarak k faktör artışı ile (-) yönde hatalarının arttığı görülmektedir. Bu duruma uymayan sayaçlardan F_{me1} sayacı önce k faktörün 6-10 değerleri arasında (+) yönde hata yapmış daha sonra 10-16 değerleri arasında ise hata miktarı (-) tarafa geçip bu yönde artmıştır. F_{me4} sayacı ise k faktörün 6-16 değerleri arasında her iki yönde de hatalar yapmasına rağmen bu hatalar standartta belirtilen hata sınırlarına yakın değerlerde kalmıştır. k faktörüne bağlı olarak lineer olmayan yükün çektiği P^+ ve P^- güçlerinin değişimi ise verilmiştir.



Şekil 4.6: k faktörüne bağlı olarak lineer olmayan yükün çektiği P^+ ve P^- güçlerinin değişimi

P^+ ve P^- güçlerinin her ikisinde k faktörün 6-16 değerleri arasında değişim göstermekle birlikte P^- gücü k faktörünün 10-16 değerleri arasında önemli büyüklükte değişim göstermektedir. Bu aralıkta F_{me4} hariç sayaçların (-) yönde hata yapması yükten kaynağa doğru güç akışının sayaçların daha az ölçüm yapmasına neden olduklarını göstermektedir. Bununla birlikte akımın frekansı da indüksiyon tipi sayaçlarda diskin dönme hızına etkimesi bakımından elektronik sayaçlarda ise örnekleme frekansının yeteri kadar büyük seçilmesi yönünden önemlidir.

Diğer bir test sisteminde kaynak saf sinüzoidal gerilim verebilen cihaz olduğu zaman; düşük ve yüksek güç değeri için sırasıyla 1200W ve 1800W olmak üzere iki farklı kademe için elde edilen k faktörü – sayaç hatası değişimine ait grafikler Şekil 4.7'de verilmiştir.



Şekil 4.7: k faktörü ile sayaç hatalarının değişimi.

Düşük güç kademesinde, k faktörünün 1.2 ile 30 arasındaki değişimi esnasında, F_{d6} ve F_{me3} haricindeki sayaçların hatası %2 ile %-22 arasında değişim gösterirken bu iki sayacın dışındaki sayaçlar yüksek güç kademesinde, k faktörünün 1.2 ile 24 arasındaki değişiminde %2 ile %-20 arasında hata yapmıştır. 3 numaralı 3 fazlı olan mekanik sayaç dengesiz yük durumundan ve harmonik bozulmadan dolayı en kötü performansı göstermektedir. Burada dikkat edilmesi gereken diğer durum ise 6 numaralı elektronik sayacın örnekleme yetersizliğinden dolayı k faktörünün artmasıyla hata miktarının ani olarak (-) yönde artmasıdır. Ayrıca sayaçların akım bölme yöntemlerinin de incelenmesi gerekmektedir.

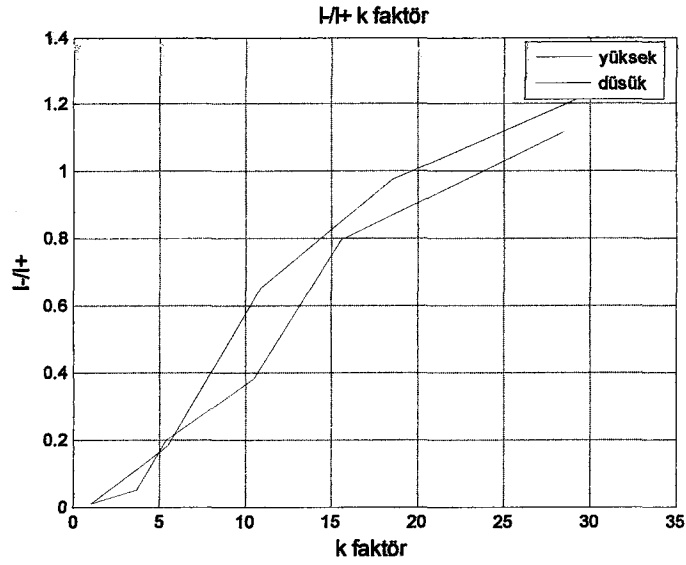
Yükten kaynağa doğru olan yük akışının sayacın (-) yönde ve kaynaktan yüke doğru olan yük akışının (+) yönde hataya sebep olup olmamasına göre akımın dönüş yönünün önemiyle beraber aşağıdaki formüller yardımıyla

$$I^- = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{maks}} (I_h^-)^2} \quad (4.9)$$

$$I^+ = \sqrt{\sum_{h=1}^{h_{maks}} (I_h^+)^2} \quad (4.10)$$

ile hesaplanır.

I^-/I^+ oranının k faktörü ile değişimi Şekil 4.8'de verilmiştir.

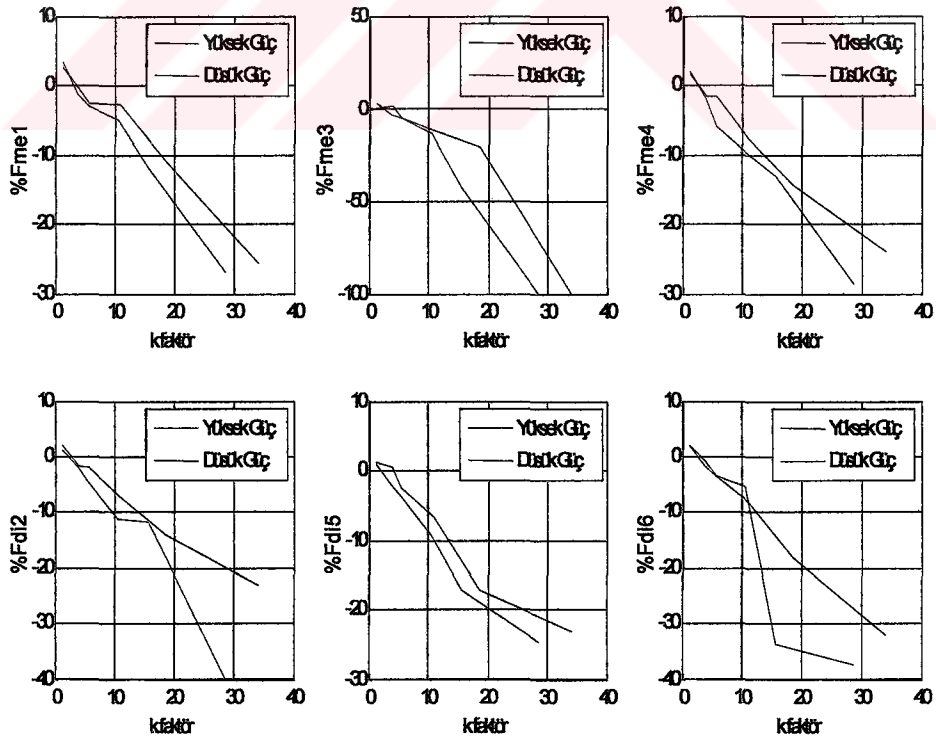


Şekil 4.8: İki farklı güç değeri için akım oranının k faktör ile değişimi

Şekil 4.7 ve Şekil 4.8'e bakıldığında I-/I+ oranının artmasıyla sayaçların hatasının arttığı görülmektedir. Bu I-/I+ oranının sayaçların ölçüm hataları için önemli bir faktör olduğunu göstermektedir.

İki güç kademesi için her bir sayacın ayrı ayrı hata grafiği Şekil 4.9'da verilmiştir.

Güç Kademesinde Sayaçların % Hata Grafiği



Şekil 4.9: İki farklı güç değeri için sayaç hatalarının değişimi

Şekil 4.9'dan her sayacın yüksek güç kademesinde daha büyük hatalar yaptığı görülmektedir. Bu durum gücün harmoniklerin meydana getirdiği sayaç hatalarında ikinci önemli faktör olduğunu göstermektedir.

4.4 Sonuçlar

Aktif güç test sonuçlarını genel olarak incelersek:

1. İndüksiyon ve elektronik tip sayaçlarda yükten kaynağa doğru akan harmonik güçlerinin toplamı (P-) olan güç artarken sayaçların (-) yönde hatalarının artmakta olduğu
2. Frekans artışına bağlı olarak indüksiyon tipi sayaçların hataları (-) yönde artmakta olduğu, bunun sebebinin frekans arttıkça aynı güç değerinde diskin aynı hızda dönebilmesi için daha büyük manyetik akı gerekmesi olduğu,
3. Elektronik sayaçların ise bu frekans aralığında hata miktarları % 2 değerini aşmadığı, bunun sebebinin ise elektronik tip sayaçların örnekleme hızlarının test akımının frekans aralığında doğru ölçüm için gerekli büyüklüğe sahip olduğu,
4. Test çalışmaları sırasında 300 Hz'den yüksek frekans değerlerinde; elektronik tipi sayaçların yapısında bulunan gerilim bölme amaçlı kullanılan kapasiteler akımın artmasıyla zarar görmüştür.
5. Yükten kaynağa doğru olan yük akışının sayacın (-) yönde ve kaynaktan yüke doğru olan yük akışının (+) yönde hataya sebep olup olmamasına göre akımın dönüş yönünün önemiyle beraber sayaçların negatif yönde hatalarının arttığı görülmüştür.

5 REAKTİF GÜÇ ÖLÇÜMÜ ve SAYAÇLAR

Güç kalitesinin en çok incelenen dallarından birisi olan harmonikler ve etkileri konusudur. Harmonik bozunması transformatör ve motor gibi elektromagnetik doyma özelliğine sahip lineer olmayan güç sistemi elemanlarından dolayı elektrik güç sistemlerinin var oluşundan beri bilinen bir olaydır. Son yıllarda güç sistemlerindeki akım ve gerilim dalga şekli sinüzoidal formdan uzaklaşmıştır. Reaktif enerji sayaçları ise daha önceden belirlenmiş frekansta ve sinüzoidal dalga formunda gerilim ve akımların bulunduğu sistemlerde ölçüm için dizayn edilir. Bu sebeple bozulmuş akım ve gerilimlerin bulunduğu sistemlerde reaktif enerji sayaçları büyük değerlerde hatalar yapmaktadır.

Bu bölümde, standartlara uygun sonuçlar veren reaktif enerji sayaçları kullanılarak; indüksiyon ve elektronik reaktif enerji sayaçlarına ait hata değerlerinin $k_{faktör}$ indisine bağlı olarak değişimi analiz edilmiştir. Sonuçlar doğrultusunda muhtemel hata mekanizması belirlenmeye çalışılmıştır.

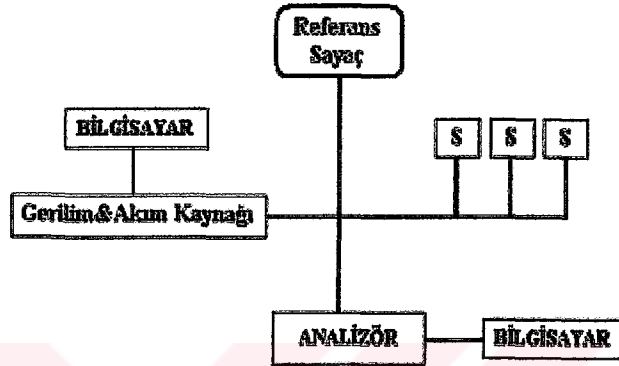
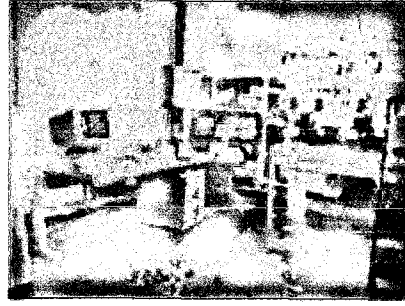
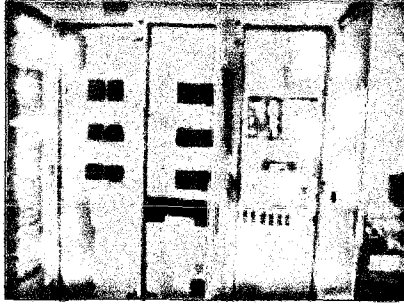
5.1 Sayaç Test Sistemi

Bu çalışmadaki reaktif enerji sayaçlarının bozulmuş akım ve gerilim dalga formlarında ölçüm hatalarının incelendiği testler TSE Gebze Kalite Kampüsü laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Test sistemi Şekil 5.1 deki gibi olup, akım-gerilim dalga formunun oluşturulduğu kısım ve Zera referans sayaçtan oluşan TSE sayaç test sistemi ile bu sisteme ek olarak harmonik analizörü ve bilgisayardan oluşmaktadır. Referans sayaç akım, gerilim, frekans, her bir faza ait aktif güç, reaktif güç değerlerini 10^{-5} doğrulukla ölçebilir. Referans sayaca ölçülecek olan akım 16 ampere kadar doğrudan 16-120 amper arasında akım transformatörü aracılığı ile girilir. Referans sayaç girilen akım ve gerilim değerlerini her periyot için 720 örnek olmak üzere örnekleyerek reaktif güç ve sayaç hatalarını

$$Q = \frac{1}{720} \sum_{i=n}^{n+719} v_i \cdot i_{i-180} \quad (5.1)$$

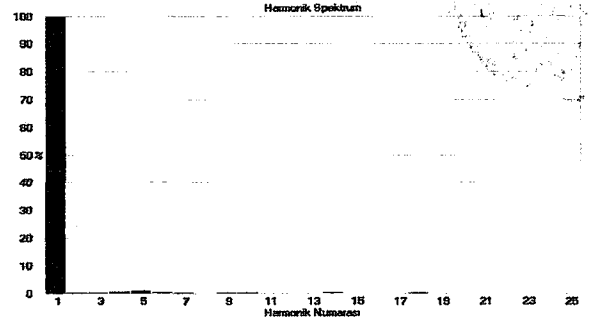
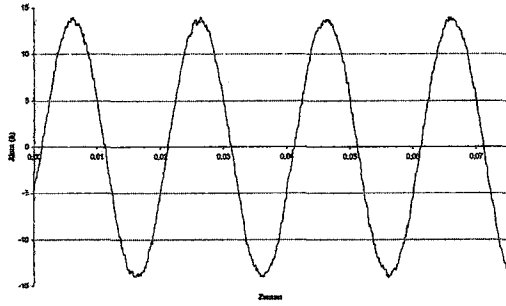
$$\%Hata = \left(\frac{Q_{ref} \cdot t_{test} - VAR_{sayaç}}{Q_{ref} \cdot t_{test}} \right) \cdot 100 \quad (5.2)$$

ifadelerinden hesaplamaktadır.

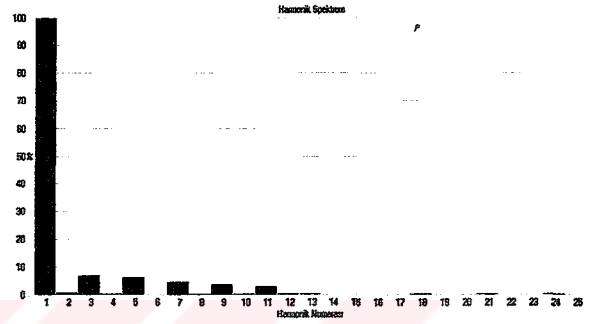
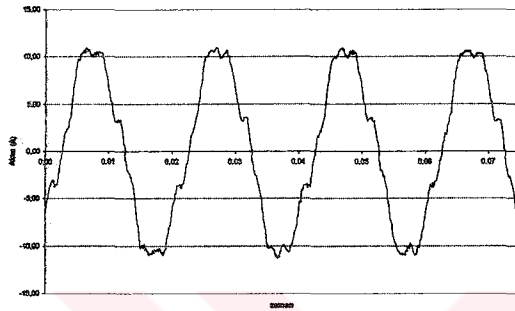


Şekil 5.1: Test sistemi

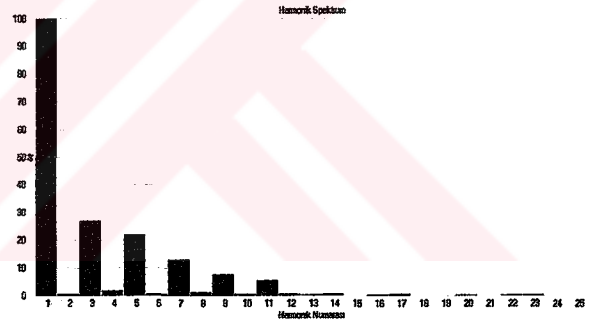
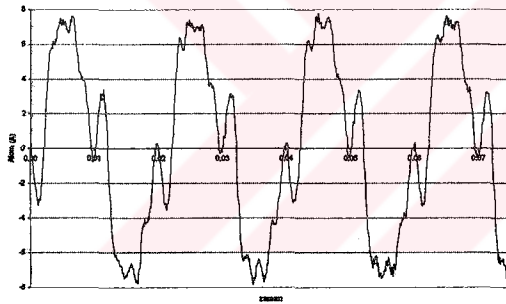
Literatürdeki THD indisinin sayaçların sinüzoidal olmayan şartlardaki hata mekanizmalarına ait bir bilgi vermemektedir. Bunun sebebi olarak THD indisinin harmoniklerin büyüklükleriyle birlikte frekanslarını da dikkate almaması olarak düşünülmüştür. Böylece frekansıda dikkate alan k faktör indisiyle hata analizi yapma gerekliliği ortaya çıkmıştır. Çalışmada sayaçların ölçme prensibine en yakın güç tanımını bulabilmek için sistemlerimizde de güç elektroniği elemanları tarafından meydana gelebilecek Şekil 5.2’de ve Şekil 5.3’de uygulanan dalga şekli ve harmonik spektrumu verilmiştir.



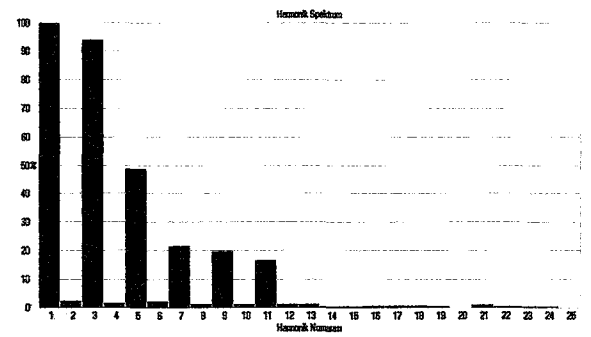
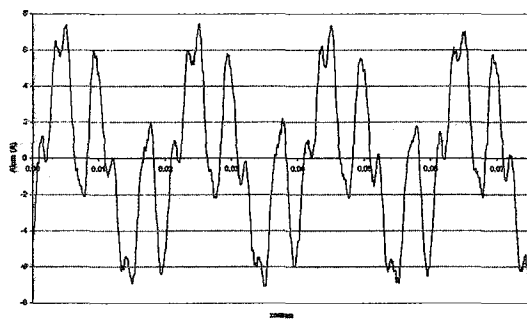
(a)



(b)

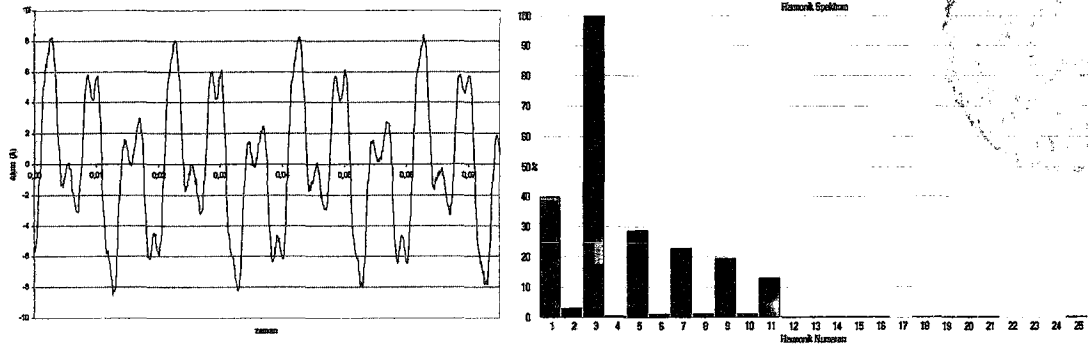


(c)

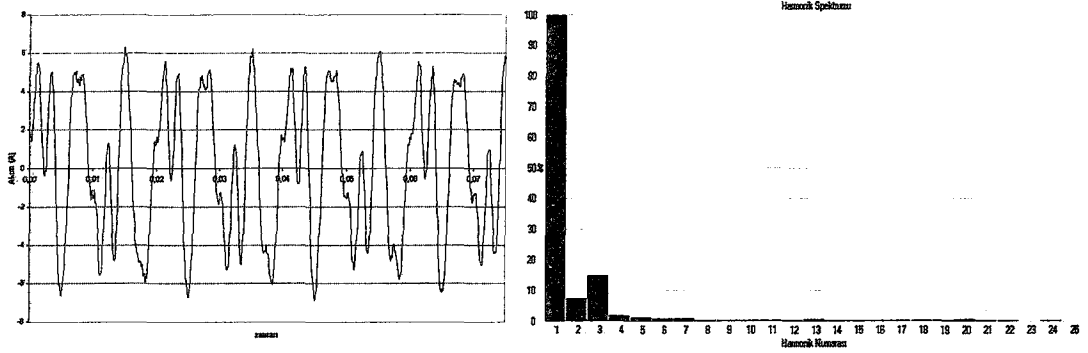


(d)

Şekil 5.2: Test akımının a,b,c,d dalga şekilleri ve harmonik spektrumları



(e)



(f)

Şekil 5.3: Test akımının e,f dalga şekilleri ve harmonik spektrumları

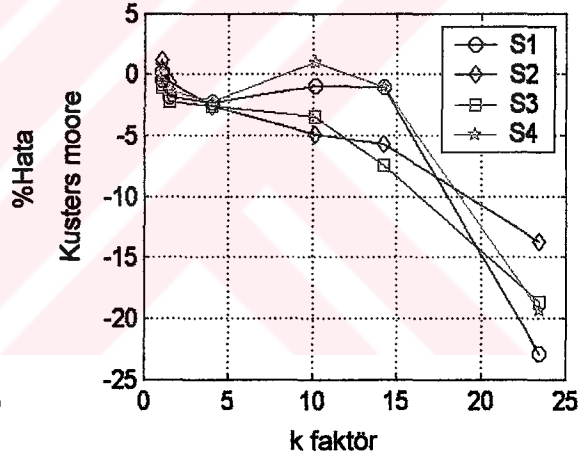
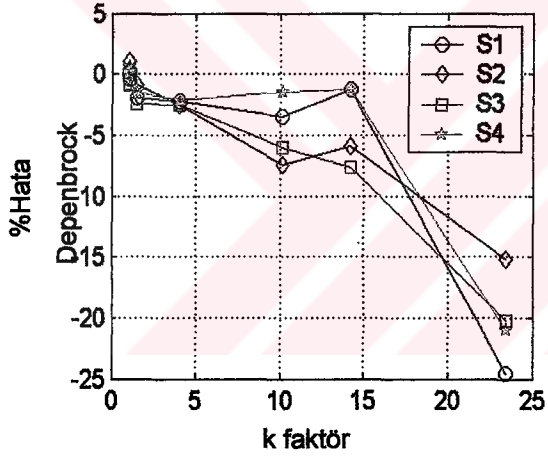
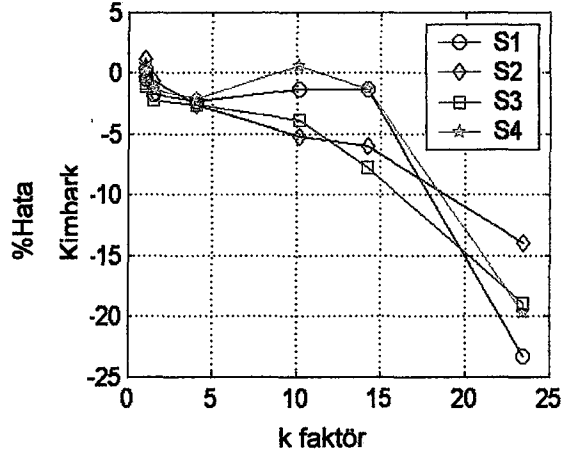
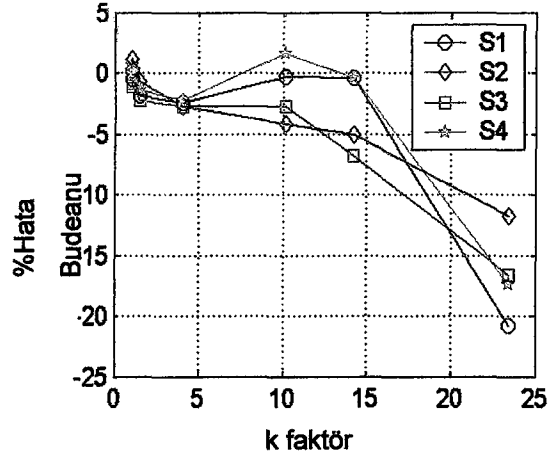
5.2 Deneylerde Kullanılan Sayaçlar

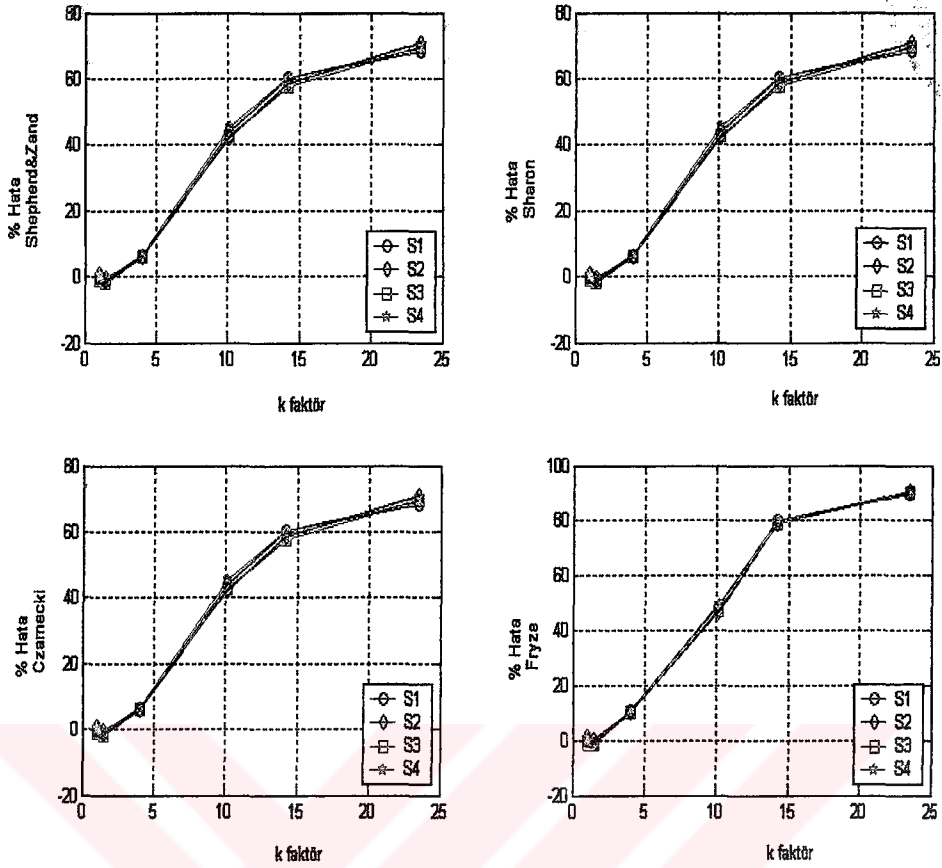
Deneylerde piyasada hali hazırda bulunan elektronik ve indüksiyon tipi reaktif sayaçlar kullanılmış olup bunlar;

1. A marka 3*220/380 Volt, 3*10(30) Amper 240d/kVarh 3 fazlı reaktif indüksiyon sayaç
2. B marka 3*220/380 Volt, 3*20(100) Amper 400imp/kVarh 3 fazlı reaktif kombi elektronik sayaç
3. C marka 3*220/380 Volt, 3*10(30) Amper 240d/kVarh 3 fazlı reaktif indüksiyon sayaç
4. Zera referans sayaç

5.3 Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Reaktif Güç

Sayaçların hangi güç tanımına göre daha yakın sonuçlar verdiğini belirlemek amacıyla her bir güç tanımı için k faktörünün artışıyla sayaç hatalarının değişimi Şekil 5.4'de toplu halde verilmiştir.



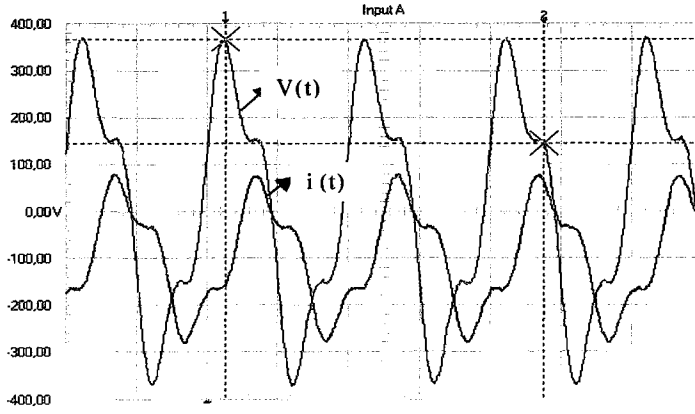


Şekil 5.4:Farklı Güç Tanımlarına Göre Reaktif Sayaçların Hataları

Sinüzoidal olmayan koşullarda reaktif güç tanımlarına göre Shepherd ve Zand, Sharon, Czarnecki ve Fryze akım ve gerilimin rms değerlerini dikkate alarak hesap yapmaktadır. Sayaçların ölçme prensibi rms güç ölçümüne uygun olmadığı için k faktörünün 1-23 değerleri arasındaki değişiminde Shepherd ve Zand, Sharon, Czarnecki ve Fryze güç tanımlarına göre reaktif sayaçların hataları %80-100'lere ulaşmaktadır. Akış yönünü dikkate alan tanımlara göre hesaplandığında sayaç hataları k faktörünün 1-25 arası değişiminde yaklaşık olarak % -25' lere varmaktadır.

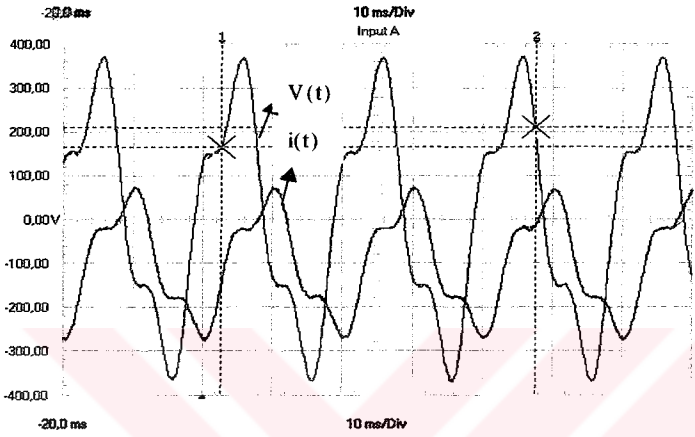
THD ve k faktör indislerinin reaktif sayaçların sinüzoidal olmayan koşullarda analizleri için yetersizdir. Bu durumu teyit etmek için sayaçlara aynı THD farklı k faktör ve aynı k faktör ters harmonik faz açıları yönlerinde akımlar uygulanmıştır. Uygulanan dalga şekilleri Şekil 5.5 de gösterilmiştir.

Aynı thd farklı k faktör



Datablock	
Name	= Input A
Date	= 06.10.2005
Time	= 12:17:07
Y Scale	= 100 V/Div
Y At 50%	= 0.00 V
X Scale	= 10 ms/Div
X At 0%	= -20.0 ms
X Size	= 900 (1011)
Maximum	= 372.13 V
Minimum	= -370.94 V

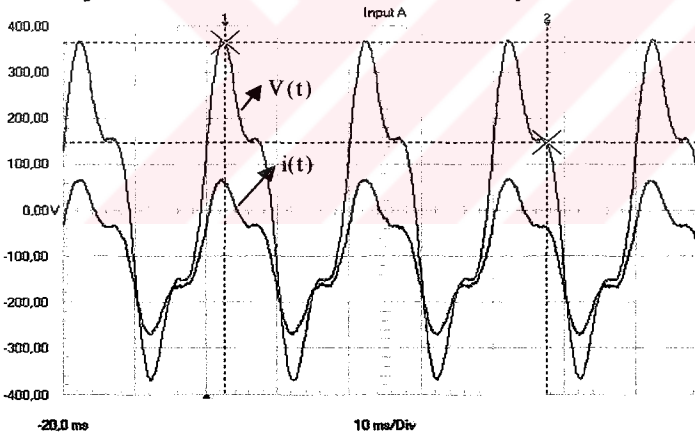
Cursor Values	
X1:	2.5 ms
X2:	47.5 ms
dX:	45.0 ms
Y1:	368.28 V
Y2:	145.94 V
dY:	-222.34 V



Datablock	
Name	= Input A
Date	= 06.10.2005
Time	= 12:24:17
Y Scale	= 100 V/Div
Y At 50%	= 0.00 V
X Scale	= 10 ms/Div
X At 0%	= -20.0 ms
X Size	= 900 (1012)
Maximum	= 372.59 V
Minimum	= -369.41 V

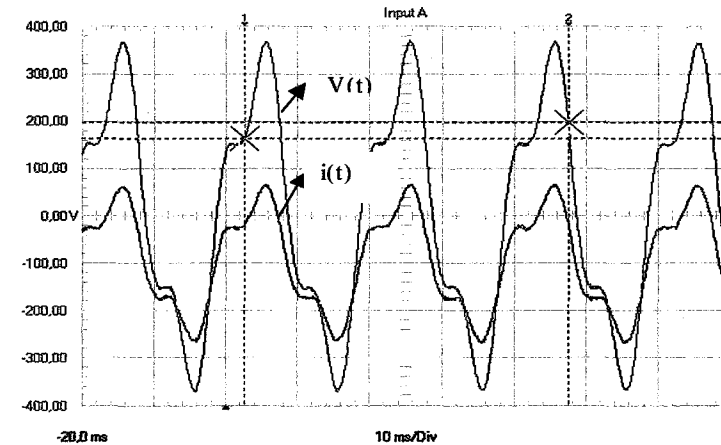
Cursor Values	
X1:	2.5 ms
X2:	47.5 ms
dX:	45.0 ms
Y1:	185.44 V
Y2:	211.00 V
dY:	45.56 V

aynı k faktör farklı harmonik faz açısı



Datablock	
Name	= Input A
Date	= 06.10.2005
Time	= 12:52:19
Y Scale	= 100 V/Div
Y At 50%	= 0.00 V
X Scale	= 10 ms/Div
X At 0%	= -20.0 ms
X Size	= 900 (1011)
Maximum	= 370.69 V
Minimum	= -370.19 V

Cursor Values	
X1:	2.5 ms
X2:	47.5 ms
dX:	45.0 ms
Y1:	364.26 V
Y2:	148.94 V
dY:	-215.31 V



Datablock	
Name	= Input A
Date	= 06.10.2005
Time	= 12:53:54
Y Scale	= 100 V/Div
Y At 50%	= 0.00 V
X Scale	= 10 ms/Div
X At 0%	= -20.0 ms
X Size	= 900 (1012)
Maximum	= 371.47 V
Minimum	= -371.13 V

Cursor Values	
X1:	2.5 ms
X2:	47.5 ms
dX:	45.0 ms
Y1:	163.84 V
Y2:	198.93 V
dY:	34.69 V

Şekil 5.5:Uygulanan Dalga Şekilleri

Denklem (5.1)'e göre hatalar hesaplanıp karşılaştırılmıştır. Ölçüm sonuçları aşağıdaki tablodaki gibidir.

Tablo 5.1: k faktör ve harmonik faz açılarının farklı durumlarına göre ölçüm sonuçları

Durum		% Hata Sayaç 1	% Hata Sayaç 2
Aynı THD ve farklı k faktör	THD=% 30 k=7.7 ve (3.harmonik)	%-7.9	%-7.3
	THD=% 30 k=21.5 ve (5. harmonik)	%-9.9	%-9.6
Aynı k faktör farklı harmonik faz açısı	k= 7.7 3.harmonik faz açısı = -90	%-8.5	%-7.2
	k= 7.7 3.harmonik faz açısı = 90	%-7.6	%-6.5

Tablodan da görüldüğü gibi aynı THD ve farklı k faktör değerinde yapılan analizde THD hatayı anlamak için yeterli bir indis olmayıp k faktör daha yeterli bir indistir. THD = % 30 ve k faktör 7.7 değerlerinde THD = %30 ve k faktör 21.5 olduğu koşula göre daha doğru sonuçlar vermiştir. Buna karşın aynı k faktör değerinde farklı harmonik faz açılarındaki analizde k faktörünün harmonik akımlarının akış yönünü dikkate almadığından tek başına yeterli bir indis olduğunu söyleyemeyiz.

Sonuç olarak şebeke geriliminin sinüzoidal ve sistemde bulunan lineer olmayan yüklerin etkisiyle reaktif güç ölçmede kullanılan güç tanımı sayaçların enerji fiyatlandırmasında önemli bir rol oynar. İndüksiyon ve elektronik reaktif sayaçlar RMS gerilim ve akım değerlerini dikkate alarak ölçüm yapan enerji tanımlarında daha büyük hatalar yapmaktadır.

THD ve k faktör indisleri sinüzoidal olmayan koşullarda reaktif sayaç hatalarının analizinde yeterli değildir. Bu tip analizler için frekans ve/veya harmoniklerin akış yönünü dikkate alan indisler tercih edilmelidir.

5.4 Sonuçlar

Reaktif güç ölçümü konusunda ilk yöntem Budeanu tarafından verilmiş olup bu yöntem IEEE tarafından kabul görmüş ve IEEE 1459 Standardında yer almıştır. Budeanu'nun tanımının yanında literatürde yer alan Fryze, Sharon, Czarnecki, Shepherd, Kimbark, Depenbrock ve Kusters ve Moore'un tarafından tanımlanan güç tanımlarına göre rms değerlerini dikkate alarak hesap yapan reaktif güç tanımlarında sayaç hataları %80 - %100'lere ulaşırken akış yönünü dikkate alan tanımlara göre sayaç hataları % -25'lere varmaktadır. Standartlarda belirtilmiş harmoniklere ait indislerden THD ve k faktör indislerinin reaktif sayaçların sinüzoidal olmayan koşullarda analizleri için yetersizdir.

6 SONUÇLAR

Tezde bozulmuş dalga şekilli şebekede güç ölçümü konusu incelenmiştir. İlk olarak sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan durumlar için aktif ve reaktif güç ölçümünden, standartlara ve değişik yaklaşımlara göre güç hesaplama yöntemlerinden bahsedilmiştir. Aktif güç ölçümü için bir fazlı sistemlerde akımın harmonik içermesi durumunda sayaç hatalarına bakılmış farklı frekanslarda indüksiyon sayacının frekansın artmasıyla (-) yönde hatanın artmasına rağmen elektronik tip sayaçlarda bu hatanın standartlar içinde kaldığı gözlenmiştir. Farklı harmoniklere sahip akım dalga şeklinde ise yükten kaynağa doğru akan akımın kaynaktan yüke doğru akan akımdan büyük olmasından hatanın (-) yönde arttığı gözlenmiştir. Reaktif güç ölçümü konusunda ilk yöntem Budeanu tarafından verilmiş olup bu yöntem IEEE tarafından kabul görmüş ve IEEE 1459 Standardında yer almıştır. Budeanu'nun tanımının yanında literatürde yer alan Fryze, Sharon, Czarnecki, Shepherd, Kimbark, Depenbrock ve Kusters ve Moore'un tarafından tanımlanan güç tanımlarına göre rms değerlerini dikkate alarak hesap yapan reaktif güç tanımlarında sayaç hataları %80-%100'lere ulaşırken akış yönünü dikkate alan tanımlara göre sayaç hataları % -25'lere varmaktadır. Standartlarda belirtilmiş harmoniklere ait indislerden THD ve k faktör indislerinin reaktif sayaçların sinüzoidal olmayan koşullarda analizleri için yetersizdir. Bu durumu teyit etmek için sayaçlara aynı THD farklı k faktör ve aynı k faktör ters harmonik faz açıları yönlerinde akımlar uygulanmıştır. Bu analizlerde ise aynı THD ve farklı k faktör değerinde yapılan analizde THD hatayı anlamak için yeterli bir indis olmayıp k faktör daha yeterli bir indis olduğu buna karşın aynı k faktör değerinde farklı harmonik faz açılarındaki analizde k faktörünün harmonik akımlarının akış yönünü dikkate almadığından tek başına yeterli bir indis olduğunu söyleyemeyiz.

İleriki çalışmalarda tez içerisinde yapılan analizlerin akım ve gerilimin harmonikler içermesi durumunda aktif ve reaktif güç ölçümü, planlanmaktadır. Ayrıca dengesiz üç fazlı sistemlerde güç ölçümü problemlerin analizi düşünülmektedir.

KAYNAKLAR

- [1] [TS EN 61107,1996] TS EN 61107, "Metre Ölçümü İçin Veri Değişimi,Tarife ve Yükleme Kontrolü- Doğrudan Yerel Veri Değişimi", Eylül 1996.
- [2] Pilipski, P. S. and Labaj, P.W.; "Evaluation of Reactive Power Meters in the presence of high harmonic distortion", IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, No: 4, pp.1793-1799, October 1992.
- [3] Cox, M.D. and Williams, T.B.; "Induction varhour and solid-state varhour meters performance on nonlinear loads", IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp.1678-1686, November 1990.
- [4] Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O.; "Elektrik Tesislerinde Harmonikler", Birsen Yayınevi, Kasım 2003.
- [5] IEEE Std. 519-1992; "Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems", The Institute of Electrical and Electronics Engineers, 1993.
- [6] [Şenol, 2000] Şenol, M. A.; "Elektrik Enerjisinin Verimli Kullanılmasına Yönelik Tasarruf Tebdirlerine Genel Bir Bakış", Kaynak Elektrik Dergisi, sayfa 102-107, şubat 2000
- [7] IEEE Std 1459; "Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions", 2000.
- [8] Driesen J., Craenenbroeck, T. and Van Dommelen, D.; "The Registration of Harmonic Powers by Analogue and Digital Power Meters", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Cnoference, Ottawa, Canada, pp 291-296, May 19-21, 1997
- [9] Schlabbach, J., Blume, D. and Stephanblame T.; "Voltage Quality in electrical power systems", IEE Publishing, 2001.
- [10] [TS EN 61036, 1998] TS EN 61036; "Sayaçlar - Alternatif Akım Statik Watt Saat Metreleri Aktif Enerji İçin (Sınıf 1 Ve Sınıf 2)" Şubat 1998.
- [11] [TS 461 EN 60521, 1998] TS 461 EN 60521; "Sayaçlar - Alternatif Akım Aktif Enerji İçin 0,5; 1 ve 2 Sınıfı", Aralık 1998.

- [12] [TS EN 62052-11, 2005] “ Elektrik ölçme donanımı(a.a.) – Genel kurallar, deneyler ve deney şartları – Bölüm 11: Sayaç” Nisan 2005
- [13] [TS EN 62053-23, 2005] “Elektrik ölçme donanımı (a.a.) – Özel kurallar Bölüm 23: Statik sayaçlar – Reaktif enerji için (sınıf 2 ve sınıf 3)” Nisan 2005
- [14] [TS 786 IEC 60145, 1999] TS 786 IEC 60145; “Sayaçlar - VAR - Saat Metre (Reaktif Enerji Sayaçları)”, Ocak 1999.
- [15] [TS EN 61268, 2003] TS EN 61268; “Elektrik Sayaçları-Alternatif Akım Statik Reaktif Sayaçlar-Reaktif Enerji İçin (Sınıf 2 ve Sınıf 3)”, Nisan 2003.
- [16] IEEE Working Group on Nonsinusoidal Situations: Effect of Meter Performance and Definitions of Power; “Practical Definitions for Powers in Systems with Nonsinusoidal Waveforms and Unbalanced Loads: A Discussion”, IEEE Trans. Power Delivery, Vol.11, pp.79-101, No.1., January, 1996.
- [17] Czarnecki, L.S.; “Comparison of Power Definitions for Circuits with Nonsinusoidal Waveforms”, IEEE Tutorial Course 90EH0327-7-PWR, pp.43-50.
- [18] Filipski, P. S., Baghzouz, Y., Cox,M. D.; “Discussion of Power Definitions Contained in the IEEE Dictionary”,. IEEE Trans. on Power. Delivery., Vol.9, No.1, pp.1237-1244, 1994.
- [19] Budeanu, C. I.; “Puissances Reactives et Fictives”, Instytut Romain de L’Energie, 1927, Bucharest.
- [20] Arrilaga, J., Watson, N. R., Chen, S.; “Power System Quality Assessment”, John Wiley & Sons, 2000.
- [21] Fryze, S.; “Active-, Reactive-, and Apparent Powers in Networks with Nonsinusoidal Waveforms of Voltage and Current”, ETZ, Bd.53, 1932 (in German).
- [22] Shepherd, W. and Zand, P.; “Energy Flow and Power Factor in Nonsinusoidal Circuits”, Cambridge University Press, 1979.
- [23] Sharon, D.; “Reactive Power Definition and Power Factor Improvement in Nonlinear Systems”, Proc. IEE, 120, pp. 704-706, 1973.
- [24] Kimbark, E. W., “Direct Current Transmission”, Wiley&Interscience, 1971.

- [25] Czarnecki, L.S.; “Comparison of Power Definitions for Circuits with Nonsinusoidal Waveforms”, IEEE Tutorial Course 90EH0327-7-PWR, pp.43-50.
- [26] Czarnecki, L. S, ‘Additional discussion to on the definition of reactive power under nonsinusoidal conditions,’ IEEE Trans. Pow. Appl. Syst, Vol. PAS-102, pp. 1023-1024, April 1983.
- [27] Depenbrock,M. ‘ Wirk-, und Blindleistung,’ (in German) ETG Fachtagung ‘Blindleistung’ Aachen, Oct. 1979
- [28] Cemek, H.; “Bozulmuş Dalga Şekilli Şebekede Enerji Ölçümü”, GYTE Elektronik Mühendisliği Bölümü, Yüksek Lisans Tezi, 2003
- [29] Oppenheim, Willsky, and Nawab, Signals and Systems,2nd Edition 1996.
- [30] Bayrak, M.,Genç,G., ‘Dengesiz ve Harmonikli Şebekelerde Güç Ölçümü’ 1. Enerji Verimliliği ve Kalite Sempozyumu, Mayıs 2005.
- [31] Cevher, B., Tabak, B. ‘Harmoniklerin İndüksiyon Esaslı Aktif Enerji Sayaçlarında Neden olduğu Hatalar’ 1. Enerji Verimliliği ve Kalite Sempozyumu, Mayıs 2005.

ÖZGEÇMİŞ



Burak ELMASLAR, 1979 yılında İstanbul'da doğdu. İlk orta ve lise öğrenimini 1986-1997 yılları arasında Özel Şişli Terakki Lisesinde tamamladı. 1997 yılında girmeye hak kazandığı Kocaeli Üniversitesi Mühendislik Fakültesi Elektrik Mühendisliği Bölümü'nden 2002 yılında mezun oldu. 2002 yılında Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü Mühendislik Fakültesi, Elektronik Mühendisliği Anabilim Dalı, Devreler ve Sistemler Bölümü'nde yüksek lisans öğrenimine başladı.

