

T.C.

GEBZE YÜKSEK TEKNOLOJİ ENSTİTÜSÜ
MÜHENDİSLİK VE FEN BİLİMLERİ ENSTİTÜSÜ

BOZULMUŞ DALGA ŞEKLİ ŞEBEKEDEN
ENERJİ ÖLÇÜMÜ

140042

Hüseyin CEMEK

YÜKSEK LİSANS TEZİ

ENERJİ SİSTEMLERİ ANABİLİM DALI

TEZ DANIŞMANI

Yrd.Doç.Dr. M. Hakan HOCAOĞLU

GEBZE

2003



Hüseyin CEMEK'in tez çalışması, G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun **16 Temmuz 2003** tarih ve **2003/22** sayılı kararıyla oluşturulan jüri tarafından **Enerji Sistemleri Anabilim Dalında YÜKSEK LİSANS** tezi olarak kabul edilmiştir.

140042

JÜRİ

Doç. Dr. AlpEr Şevki KONUKMAN

Yrd. Doç. Dr. M. Hakan HOCAOĞLU
(Tez Danışmanı)

Yrd. Doç. Dr. Bora ALBOYACI

ONAY

G.Y.T.E. Mühendislik ve Fen Bilimleri Enstitüsü Yönetim Kurulu'nun
06.11.2003 tarih ve 2003/136 sayılı kararı.

İmza / Mühür

ÖZET

Bu tezde bozulmuş dalga şekilli şebekede güç ölçme problemi irdelenerek mevcut ölçüm sistemlerinin zaafları ve kVAh temelli fiyatlandırmanın önemi gösterilmiştir.

Bölüm II de standartlarda ve literatürde yer alan değişik yaklaşımlara göre güç hesaplama yöntemleri incelenmiştir Akım ve gerilimin harmonikler içermesi durumunda aktif ve reaktif güç ölçüm yöntemleri incelenerek bunların karşılaştırması verilmiştir.

Bölüm III de gerçekleştirilen deneysel çalışma ile mevcut sayaçların bozulmuş dalga şekilli şebekedeki performansları incelenmiş ve sayaçların ölçtüğü güç bölüm II deki güç ölçüm yöntemleri ile karşılaştırılmıştır. Sayaçların harmonik içerikli akımlarda hatalı ölçüm yapmalarının sebepleri araştırılmıştır.

Bölüm IV de bozulmuş dalga şekilli şebekede verimliliğin artırılması ve klasik güç ölçme sistemlerinin zaaflarının önüne geçebilmek için kVAh ölçen sayaç önerilmiştir. Ayrıca, kVAh ölçen sayaç kullanılması ve uygulanacak fiyat politikası ile konutların reaktif güç kompanzasyonunu özendirilecekleri gösterilmiştir.

SUMMARY

In this thesis, power-measuring problem on distorted waveform systems is studied. Inadequacy of present measuring systems and importance of kVAh base pricing are demonstrated.

Different power measuring methods according to standards and existing literature are reviewed in part II. Consequently active and reactive power measuring methods are quantitatively compared by giving particular emphasis for the distorted waveform conditions.

In part III, performances of commercially available energy meters under the distorted waveform are experimentally tested. The results are evaluated against power measurement methods detailed in part II. Discrepancies between results are methodically examined and accordingly on error mechanism is speculated.

In part IV, a new kind of meter for measurement of kVAh is proposed. It is demonstrated that the new measurement system increases the efficiency of the system. Moreover it is pointed out that by using kVAh based pricing policy, small consumer will be encouraged for compensation of their reactive power demand.

TEŞEKKÜR

Yüksek Lisans Eğitimime başladığımdan bu yana, yardımlarını ve değerli zamanını benden esirgemeyen, çalışmalarında beni yönlendiren hocam sayın Yrd.Doç.Dr. M. Hakan HOCAOĞLU'na

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

Yüksek Lisans yapmam için beni teşvik eden, hiçbir fedakarlıktan kaçınmayan ve destekleyen eşim Semra CEMEK 'e teşekkürlerimi sunarım.

İÇİNDEKİLER DİZİNİ

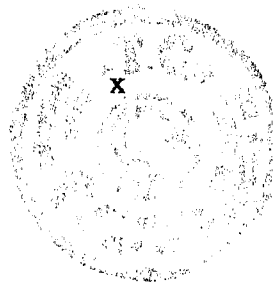
Sayfa

ÖZET	iv
SUMMARY	v
TEŞEKKÜR	vi
İÇİNDEKİLER DİZİNİ	vii
SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ	ix
ŞEKİLLER DİZİNİ	xi
TABLolar DİZİNİ	xiii
1. GİRİŞ	1
1.1. Tezin Amacı	1
1.2. Tezin İçeriği	2
2. AKTİF VE REAKTİF GÜÇ ÖLÇ	3
2.1. Giriş	3
2.2. Sinüsoidal Durum	3
2.3. Sinüsoidal Durumda Güç	4
2.4. Non-Sinüsoidal Şartlar	5
2.5. Non-Sinüsoidal Şartlarda Güç	7
2.5.1. Giriş	7
2.5.2. IEEE 1459'a Göre Güç Tarifi	8
2.5.3. Literatüre Geçen Non-Sinüsoidal Güç Tanımları	10
2.6. İndüksiyon ve Elektronik Tip Sayaçların Enerji Ölçüm Yöntemleri	13
2.7. Bozulmuş Dalga Şekilli Şebekede Güç Ölçümü Çalışmaları	15
2.8. Sonuç ve Tartışma	17
3. REAKTİF GÜÇ ÖLÇÜMÜ YAKLAŞIMLARI VE PİYASADAKİ MEVCUT SAYAÇLARIN İNCELENMESİ	19
3.1. Deneylerde Kullanılan Cihazlar	19
3.1.1. Sayaç Test Sistemi	20
3.1.2. Harmonik Analizörü ve PC	23
3.2. Deneylerde Kullanılan Sayaçlar	23
3.3. Deney Yöntemi	24

3.3.1. Tek Sayılı Harmoniklerin Uygulanması	25
3.3.2. Yarım Dalga Doğrultulmuş Akım Uygulanması	27
3.4. Ölçüm Sonuçları	28
3.4.1. Aktif Ölçüm Sonuçları	29
3.4.2. Reaktif Ölçüm Sonuçları	32
3.5. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi	36
3.6. Sonuç	39
4. kVAh ÖLÇMENİN GEREKLİLİĞİ	41
4.1. Giriş	41
4.2. Türkiye’de Mevcut Enerji Fiyatlandırması Durumu ve kVAh Ölçen Sayaç Kullanımı Gerekliliği	41
4.3. Türkiye’de Enerji Tüketimi Durumu	43
4.4. Görünür Güç ve Aktif Gücün Ölçülmesi	45
4.5. Fiyatlandırma	47
4.6. KVA Fiyatlandırması ve KVA Ölçen Sayaç Kullanımının Faydaları	50
4.7. Sonuç	51
5. SONUÇLAR VE GELECEĞE YÖNELİK ÇALIŞMALAR	52
KAYNAKLAR	55
ÖZGEÇMİŞ	57
EKLER	

SİMGELER VE KISALTMALAR DİZİNİ

P	Aktif güç
P_1	Temel harmonik aktif gücü
P_H	Harmoniklerin oluşturduğu aktif güç.
Q	Reaktif güç
Q_1	Temel harmonik reaktif gücü.
Q_H	Harmoniklerin oluşturduğu reaktif güç.
S	Görünür güç
S_N	Harmoniklerin oluşturduğu toplam görünür güç.
S_H	Harmonik akım ve gerilim çarpımının oluşturduğu görünür güç.
D_V	Voltaj harmonikleri sebebi ile oluşan görünür güç.
D_I	Akım harmonikleri sebebi ile oluşan görünür güç.
v	Gerilimin ani değeri
V	Gerilimin rms değeri
V_m	Voltajın maksimum değeri
V_H	Gerilimin harmonikli bileşeni (rms değer).
i	Akımın ani değeri.
i_a	Akımın aktif bileşeni ani değer.
I_a	Akımın aktif bileşeni rms değer.
i_b	Akımın reaktif bileşeni.
I	Akımın rms değeri
I_m	Akımın maksimum değeri.
I_H	Akımın harmonikli bileşeni (rms değer).
f	Frekans
t	Saniye olarak zaman
w	$(2\pi f)$ kısa gösterimi
W	Watt
rms	RMS değer.
VA	Volt Amper
KVAh	Kilo volt amper saat
kWh	Kilo Watt Saat



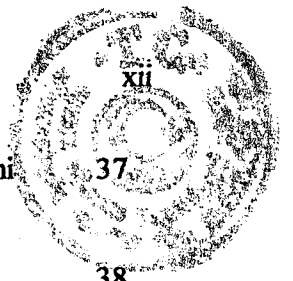
ϕ, θ	Akım ve gerilim arasındaki açı.
$\cos \phi$	Akım ve gerilim arasındaki açının kosinüsü. (güç katsayısı)
α	Gerilimin referans noktaya göre faz açısı.
β	Akımın referans noktaya göre faz açısı.
Q_B	Budenau reaktif gücü
Q_{BH}	Harmoniklerin oluşturduğu Budenau reaktif gücü.
D	Distorsiyon gücü
P_c	Budenau Fictitious gücü
Q_f	Fryze reaktif gücü
S_x	Shepherd aktif gücü
S_r	Shepherd reaktif gücü
S_d	Shepherd distorsiyon gücü
Q_s	Sharon reaktif gücü
THD	Toplam Harmonik Distorsiyon
h	harmonik numarası.
k	Frekansa göre ağırlıklı harmonik katsayısı
AA	Alternatif Akım.
a.a.	Alternatif Akım.
D.A.	Doğru Akım.
d.a.	Doğru Akım.

ŞEKİLLER DİZİNİ

Sekil

Sayfa

2.1. Saf sinüs dalga şekli	3
2.2. Non-sinüsoidal dalga şekli örneği [Ek-1 Tablo-1 FİH5]	6
2.3. Non-sinüsoidal dalga şeklinin Fourier Serisi kullanılarak elde edilen harmonik içeriği	6
3.1. Deneylerde kullanılan referans sayaç ve akım-gerilim kaynakları	20
3.2. Sayaç Test Düzenegi	22
3.3. Test sisteminin blok diyagram ile gösterimi	23
3.4. Reaktif ölçümlerde kullanılan akım ve gerilime uygulanan harmonik içerikli dalga şekli örneği	26
3.5. Akım ve gerilime uygulanan dalga şeklinin harmonikleri	27
3.6. Gerilimi saf sinüs akımı ise 30° ateşleme açısı ile yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şekli	27
3.7. Yarım dalga doğrultulmuş dalga şekline ait harmonikler	28
3.8. Akımın harmonikli olması durumunda sayaçlarda hata değişimi	29
3.9. Akımın ve gerilimin harmonikli olması durumunda sayaçlarda hata değişimi	30
3.10. Aktif ölçümler için gerilim sinüs ve akım harmonikli iken sayaçların ve aktif gücünün k ya göre değişimi.	30
3.11. Aktif ölçümler için gerilim ve akım harmonikli iken sayaçların ve Aktif gücünün k ya göre değişimi.	31
3.12. Reaktif ölçümler için değişik hesaplama yöntemlerinin k ya göre değişimi	32
3.13. Akımın harmonikli olması durumunda sayaçlarda hata değişimi açısı: 30°	33
3.14. Akımın ve gerilimin harmonikli olması durumunda sayaçlarda hata değişimi açısı: 30°	34
3.15. Reaktif ölçümler için gerilim sinüs ve akım harmonikli iken sayaçların ve aktif gücünün k ya göre değişimi açısı: 25°	34
3.16. Reaktif ölçümler için gerilim ve akım harmonikli iken sayaçların ve aktif gücünün k ya göre değişimi açısı: 25°	35
3.17. Reaktif ölçümler için gerilim sinüs ve akım yarım dalga sinüs iken sayaçların ve reaktif gücünün k ya göre değişimi	35



3.18. Örneklenme sayısı =5 için örneklenme yerine göre aktif gücün değişimi	37
3.19. Örneklenme sayısı =100 için örneklenme yerine göre aktif gücün değişimi	38
3.20. Örneklenme sayısı =5 için örneklenme yerine göre Reaktif gücün değişimi	38
3.21. Örneklenme sayısı =100 için örneklenme yerine göre Reaktif gücün değişimi	39
4.1. Kompanze edilmemiş bir sistemin çeşitli güç katsayıları için ödeyeceği bedel	47
4.2. Kompanze edilmiş bir sistemin çeşitli güç katsayıları için ödeyeceği bedel	49



TABLolar DİZİNİ

Tablo

Sayfa

2.1. Değişik güç yaklaşımlarının toplu olarak gösterimi	12
3.1. Aktif ölçümler için gerilim sinüs ve akım yarım dalga sinüs iken sayaçların ve aktif gücünün k ya göre değişimi	31
4.1. Elektrik tüketimlerinin bölgelere göre sektörel dağılımı (MWh 1997) [Selçuk, 2000]	43
4.2. 1998 yılı kaçak ve kayıp değerleri [Selçuk, 2000]	44
4.3. Bazı ev aletlerinin güç faktörleri	45
4.4. Kompanzasyon yapılması ve yapılmaması durumlarında oluşacak fiyat farkı	50

1. GİRİŞ

Ülkemizde elektrik enerjisinin fiyatlandırılmasında kWh ve kVArh kullanılmaktadır. Elektrik şebekesinin verimini arttırmak için güç katsayısının bir'e yaklaştırılmasına çalışılmakta olup bunu sağlamak için de reaktif güç tüketiminin yüksek olduğu sanayii ve ticarethane abonelerinin reaktif güç tüketimi ölçülmekte ve bu değer belirlenen orandan yüksek olduğunda reaktif tüketim için cezalı ilave ücret talep edilmektedir [Şenol, 2000].

Mevcut uygulamanın iki önemli dezavantajı vardır. Birincisi toplam tüketimin yaklaşık %30 unu oluşturan konutlarda [Selçuk, 2000] reaktif güç ölçümünün yapılmaması, ikincisi ise reaktif güç tüketiminin büyük bölümünü oluşturan sanayi kesiminin reaktif gücünün ne derece doğru ölçüldüğüdür. Dalga şeklinin saf sinüs olmadığı durumlarda reaktif güç tanımında değişik yaklaşımlar mevcut olup [IEEE Std 1459, 2000] halihazırda kullanılan sayaçlar harmonik içerikli yüklerin reaktif gücünü ölçmede sağlıklı sonuç vermemektedir [Pilipski, 1992].

Yukarıda bahsedilen iki dezavantajı gidermek için kullanılacak metotlardan biri de elektrik enerjisinin ölçülmesi ve fiyatlandırılmasında görünür güç kVAh kullanılmasıdır [Kamat, 1999].

KVAh ölçümü gelişen elektronik teknolojisi ile aktif ve reaktif güç ölçmekten daha basit duruma geldiği gibi reaktif gücün ölçülmesinde karşılaşılan problemler ile de karşılaşmaz. Bu yolla hem konutların güç faktörlerinin yükselmesi sağlanır hem de tüketilen enerjinin ölçülmesi doğru olarak yapılır. Etkin bir fiyat ve tarife politikası ile elektrik şebeke sisteminden en verimli şekilde faydalanılarak ülke ekonomisine büyük fayda sağlanabilir [Hocaoğlu, 2001].

1.1. Tezin Amacı

Bir fazlı durumlar için sinüsoidal olmayan durumlarda güç tariflerini araştırmak, bu güç tariflerine göre piyasadaki mevcut sayaçların karşılaştırmasını

yapmak ve enerji ölçümünün kVAh birimine göre yapılması durumunda uygulanması gereken fiyat tarifiesi hakkında yaklaşımlarda bulunmaktadır.

1.2. Tezin İçeriği

Tezin birinci bölümünde tezin içeriği ve amacından ikinci bölümünde de aktif ve reaktif güç ölçümünden bahsedilmektedir. Güç ölçümü sinüsoidal ve non-sinüsoidal durumlar için ele alınacak, reaktif güç ölçümü için literatüre geçen değişik yaklaşımlar verilecektir. Güç ölçümü konusunda literatüre geçen çalışmalardan örnekler verildikten sonra güç ölçümünde kullanılan induksiyon ve elektronik tip sayaçların çalışma prensibi anlatılarak non-sinüsoidal şartlardaki zaaflarından söz edilecektir.

Üçüncü bölümde bozulmuş dalga şekilli şebekede güç ölçümü ile ilgili yapılan deneysel çalışmaya yer verilecektir. Deneysel çalışmada piyasada mevcut olan sayaçların harmonik içerikli şebekede performansı incelenecek ve ikinci bölümde ele alınan değişik reaktif enerji ölçüm yöntemleri ile sayaçların ölçtüğü güçler karşılaştırılacak ve sayaçların bozulmuş dalga şekilli şebekede hatalı ölçüm yapmalarının sebebi araştırılacaktır.

Dördüncü bölümde kVAh ölçmenin gerekliliği anlatılarak Değişik tüketim gruplarının tükettiği enerji miktarları verilerek Türkiye’de enerji tüketimi durumu incelenecektir. Aktif ve görünür gücün ölçümünün karşılaştırılması verildikten sonra enerji tüketiminin kVAh ile ölçülmesi durumunda uygulanacak fiyat tarifiesinin nasıl olması gerektiği incelenecektir. Uygulanan fiyat tarifiesinin ülke çapında faturaları nasıl etkileyeceği incelendikten sonra kVAh ölçen sayacın kullanılmasının faydaları incelenecektir.

Beşinci ve son bölümde ilk dört bölümdeki bilgilerin ışığında ulaşılan sonuçlar verilerek gelecek çalışmalar için tavsiyelerde bulunulacaktır.

2. AKTİF VE REAKTİF GÜÇ ÖLÇÜMÜ

2.1. Giriş

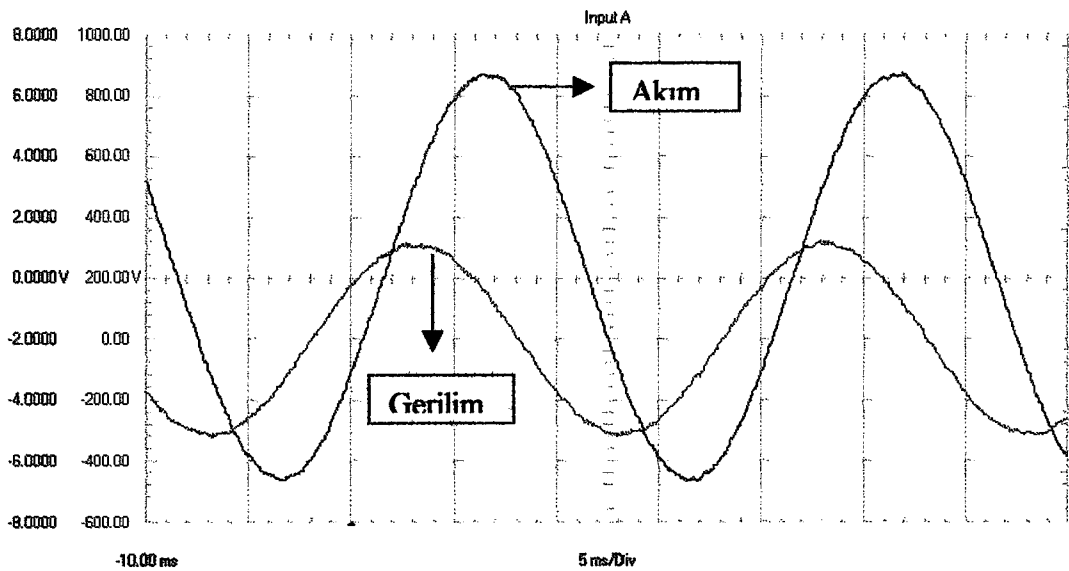
Bu bölümde bir fazlı sistemler için sinüsoidal ve non-sinüsoidal durumlarda aktif, reaktif ve görünür güç hesaplanmasının nasıl yapıldığı konuları ele alınacaktır.

Sinüsoidal ve non-sinüsoidal dalga şekillerinin tarifleri verilerek her iki durum için de güç hesaplamalarının nasıl yapıldığı verilecektir.

İndüksiyon ve Elektronik tip sayaçların çalışma prensipleri anlatıldıktan sonra dalga şeklinin saf sinüs olmadığı durumlarda reaktif güç hesaplanması konusunda literatüre geçmiş değişik yaklaşımlar incelenecektir.

2.2. Sinüsoidal Durum

Akım veya gerilim dalga şeklinin sinüsoidal olması, en basit şekilde dalga şeklinde temel harmonik olan 50 Hz lik sinyalden başka herhangi bir sinyal bulunmaması olarak tarif edilebilir. Şekil-2.1 de bu tip sinyaller görülmektedir.



Şekil.2.1. Saf sinüs dalga şekli

Ancak normal şartlarda elektrik güç sisteminde bu dalga şekli görülemez. Şebekeden beslenen yüklerin lineer olmaması nedeni ile dalga şeklinde önemli oranda bozulmalar meydana gelmekte olup bu oran konutların ağırlıklı olarak beslendiği transformatör merkezlerinde bile yüzde on ile yüzde yirmibeş arasında değişmektedir [Alboyacı, 2002].

2.3. Sinüsoidal Durumda Güç

Akım ve gerilim sinüsoidal olduğunda aktif, reaktif ve görünür güç aşağıdaki gibi hesaplanır.

Akım ve gerilim ;

$$v(t) = \sqrt{2}V \cdot \sin \omega t \quad (2.1)$$

$$i(t) = \sqrt{2}I \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (2.2)$$

şeklinde ise ani güç;

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) \quad (2.3)$$

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

$$p(t) = P(1 - \cos(2\omega t)) + Q \cdot \sin(2\omega t) \quad (2.5)$$

burada P ortalama aktif güç olup;

$$P = VI \cos \varphi \quad (2.6)$$

reaktif güç Q ise ;

$$Q = VI \sin \varphi \quad (2.7)$$

olarak tanımlanır.

Görünür güç S ise aktif ve reaktif gücün geometrik toplamı olup ;

$$S = VI \quad (2.8)$$

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

olarak verilir. Aktif ve reaktif güçler görünür güçten türetilmiş olup görünür gücün hesaplanması akım ve gerilimin rms değerlerinin çarpılması olarak basitçe hesaplanır. Güç katsayısı ise aktif gücün görünür güce bölünmesi şeklinde elde edilir.

2.4. Non-Sinüsoidal Şartlar

Non-sinüsoidal durum dalga şeklinin sinüs biçiminden farklı olmasıdır. Dalga şekilleri üzerinde fazör konseptini kullanabilmek için sinüs olarak ifade etmek gerekliliği vardır. Bunun için de fourier serilerinden faydalanılır. Fourier serileri ile dalga şekli sinüsten farklı olan sinyaller genlik ve faz açıları farklı birden fazla sinüs eğrisinin toplamı olarak ifade edilebilirler.

$f(t)$ nin bozulmuş dalga şekline sahip fonksiyon olduğunu düşünürsek fonksiyonu sinüs ve cosinüs dalga şekillerinin birleşimi olarak aşağıdaki gibi ifade edebiliriz.

$$f(t) = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t) \quad (2.10)$$

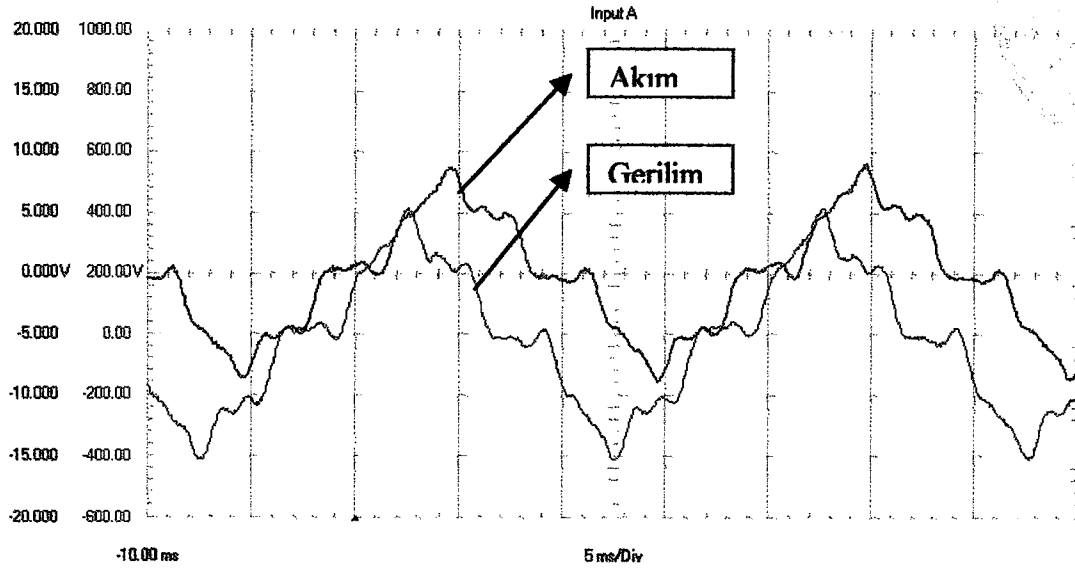
$$\omega = \frac{2\pi}{T} \quad (2.11)$$

fonksiyonu ifade etmede kullanılacak katsayılar ise şu şekilde hesap edilirler [Acha, 2001]

$$a_n = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} f(t) \cos(n\omega t) dt \quad (2.12)$$

$$b_n = \frac{2}{T} \int_t^{t+T} f(t) \sin(n\omega t) dt \quad (2.13)$$

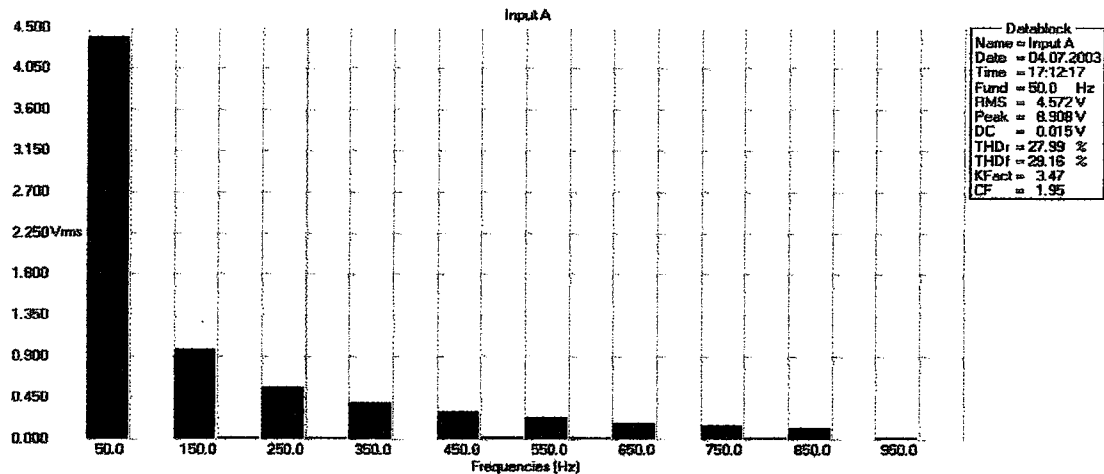
$$a_0 = \frac{1}{T} \int_t^{t+T} f(t) dt \quad (2.14)$$



Şekil.2.2. Non-sinüsoidal dalga şekli örneği [Ek-1 Tablo-1 FIH5]

Dalga şeklini bozan bu sinyaller (harmonik) genellikle lineer olmayan devre elemanı veya yüklerden kaynaklanırlar. Harmonikler sistemin çalıştığı temel frekansın tam katlarına sahip sinüsoidal akım veya gerilimlerdir. Dalga şeklinin sinüsoidal ve simetrik olması nedeni ile çift katları kaybolur şebekede tek katları kalır. Ana frekansın katlarında olmayan mesela 50 Hz lik ana frekans için 128 Hz lik harmoniklere ara harmonik ismi verilir [Dugan, 1996].

Şekil-2.1 deki bozulmuş dalga şekli Fourier Serisine açıldığında elde edilen harmonik içerik Şekil-2.2 de görülmektedir.



Şekil.2.3. Non-sinüsoidal dalga şeklinin Fourier Serisi kullanılarak elde edilen harmonik içeriği.

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.

Gerilim ve akımdaki THD aşağıdaki formül ile hesaplanır [IEEE Std. 1459, 2000]. ;

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

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

Harmoniklerin frekanslarına göre ağırlıklı olarak yer aldığı k faktörü ise akım ve gerilim için aşağıdaki gibi hesaplanır [Schlabach, 2001].

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

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

THD, harmoniklerin oluşturduğu frekansa bağlı olmayan toplam bozulma olup harmoniklerin oluşturduğu bozulmanın temel bileşene oranıdır. k faktörü ise harmoniklerin oluşturduğu bozulmanın frekanslarına göre ağırlıklı olarak temel bileşene değil rms değere oranı olarak hesaplanır.

2.5. Non-Sinüsoidal Şartlarda Güç

2.5.1. Giriş

Bu bölümde Non-Sinüsoidal şartlarda güç tarifi ele alınacaktır. Bu konuda hazırlanmış IEEE 1459 Standardına göre [IEEE Std. 1459, 2000] güç tarifleri verildikten sonra literatüre geçen değişik yöntemlere değinilecektir. Bunlar Budenau, Fryze, Sharon, Shepherd ve Emanuel' in önerdiği yöntemlerdir.



2.5.2. IEEE 1459'a Göre Güç Tarifi

Bir fazlı kararlı durumlarda ani akım ve gerilim iki bileşene ayrılabilir. Güç sistem frekansı komponentleri v_1 ve i_1 ile tüm harmonikleri içeren terimler v_H ve i_H

$$v_1 = \sqrt{2} V_1 \sin(\omega t - \alpha_1) \quad (2.19)$$

$$i_1 = \sqrt{2} I_1 \sin(\omega t - \beta_1) \quad (2.20)$$

$$v_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} V_h \sin(h\omega t - \alpha_h) \quad (2.21)$$

$$i_H = \sqrt{2} \sum_{h \neq 1} I_h \sin(h\omega t - \beta_h) \quad (2.22)$$

rms değerler ise aşağıdaki gibidir.

$$V^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} v^2 dt = V_1^2 + V_H^2 \quad (2.23)$$

$$I^2 = \frac{1}{kT} \int_{\tau}^{\tau+kT} i^2 dt = I_1^2 + I_H^2 \quad (2.24)$$

$$V_H^2 = \sum_{h \neq 1} V_h^2 = V^2 - V_1^2 \quad (2.25)$$

$$I_H^2 = \sum_{h \neq 1} I_h^2 = I^2 - I_1^2 \quad (2.26)$$

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

$$p(t) = v(t) i(t) \quad (2.27)$$

$$P = P_a + P_q \quad (2.28)$$

$$P_a = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h [1 - \cos(2h\omega t)] \quad (2.29)$$

$$P_q = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h \sin(2h\omega t) + \sum_{\substack{m \neq n \\ m, n \neq 1}} 2V_m I_n \sin(m\omega t + \alpha_m) \sin(n\omega t + \beta_n) \quad (2.30)$$

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

$$P = P_1 + P_H \quad (2.31)$$

$$P_1 = V_1 I_1 \cos \theta_1 \quad (2.32)$$

$$P_H = \sum_{h \neq 1} V_h I_h \cos \theta_h = P - P_1 \quad (2.33)$$

Temel bileşen reaktif gücü aşağıdaki gibi olup

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \theta_1 \quad (2.34)$$

Budenau reaktif gücü ise

$$Q_B = \sum_h V_h I_h \sin \theta_h = Q_1 + Q_{BH} \quad (2.35)$$

Şeklindedir.

Görünür güç S basit olarak akım ve gerilimin rms değerlerinin çarpımı olup

$$S = VI \quad (2.36)$$

temel bileşen görünür güç

$$S_1 = V_1 I_1 = P_1^2 + Q_1^2 \quad (2.37)$$

ve harmonik görünür güç olarak ikiye ayrılır. Harmonik görünür güç;

$$S^2 = (VI)^2 = (V_1^2 + V_H^2)(I_1^2 + I_H^2) \quad (2.38)$$

$$S^2 = (V_1 I_1)^2 + (V_1 I_H)^2 + (V_H I_1)^2 + (V_H I_H)^2 = S_1^2 + S_N^2 \quad (2.39)$$

$$S_N = \sqrt{S^2 - S_1^2} \quad (2.40)$$

S_N üç terime ayrılabilir. Akım distorsiyon gücü D_i , gerilim distorsiyon gücü D_v ve harmonik görünür güç S_H dir.

$$S_N^2 = D_i^2 + D_v^2 + S_H^2 \quad (2.41)$$

$$D_i = V_1 I_H = S_1 (THD_i) \quad (2.42)$$

Akım harmonik gücü akımdaki bozulmaların temel bileşen gerilimi ile çarpımlarının sonucudur.

$$D_v = V_H I_1 = S_1 (THD_v) \quad (2.43)$$

Gerilim harmonik gücü gerilimdeki bozulmaların temel bileşen akımı ile çarpımlarının sonucudur.

$$S_H = V_H I_H = S_1 (THD_I) (THD_V) \quad (2.44)$$

Harmonik görünür güç akım ve gerilimdeki bozulmaların karşılıklı olarak çarpımlarının sonucudur.

2.5.3. Literatüre Geçen Non-Sinüsoidal Güç Tanımları

Non sinüsoidal koşullarda reaktif güç hesabı konusunda değişik yaklaşımlar mevcuttur. Bu yaklaşımlar reaktif gücün daha doğru ölçülmesi ve güç faktörünün hesaplanması amacıyla ortaya çıkmıştır. En iyi reaktif güç kompanzasyonu reaktif gücün en doğru ölçülmesi durumunda yapılabileceği gerçeği bu konuda değişik yaklaşımların oluşmasına sebep olmuştur.

İlk önce ele alacağımız Budenau'ya [IEEE Std. 1459, 2000] göre güç tanımında görünür güç üç ortogonal bileşene bölünmüştür.

$$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D^2 \quad (2.45)$$

Bu üç ortogonal bileşen aktif güç, Budenau reaktif gücü ve Distorsiyon gücüdür. Budenau reaktif gücü (2.46) ya göre hesaplanır.

$$Q_B = \sum_{n=0}^m V_n I_n \sin \theta_n \quad (2.46)$$

Aktif güç, görünür güç ve Budenau reaktif gücünün hesabının ardından Distorsiyon gücü aşağıdaki gibi hesaplanır.

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2} \quad (2.47)$$

Fryze, akımı aktif ve reaktif olarak iki ortogonal bileşene ayırarak reaktif bileşenin gerilimin rms değeri ile çarpılması ile bulunan bir reaktif güç hesabı önermiştir [Fryze, 1932].

$$i = i_a + i_b \quad (2.48)$$

$$Q_f = V I_b = \sqrt{S^2 - P^2} \quad (2.49)$$

Q_f olarak adlandırılan bu reaktif güç görünür gücün aktif güç dışında kalan kısmına eşittir.

Shepherd konuya fiziksel ölçümler eklemek için görünür gücün aşağıdaki dekompozisyonlarını önermiştir [Shepherd, 1972].

$$(S^2) = (S_R^2) + (S_X^2) + (S_D^2) \quad (2.50)$$

$$(S_X^2)_i = \sum_{n=0}^m V_{i,n}^2 \sum_{n=0}^m I_{i,n}^2 \sin^2 \varphi_n \quad (2.51)$$

$$(S_R^2)_i = \sum_{n=0}^m V_{i,n}^2 \sum_{n=0}^m I_{i,n}^2 \cos^2 \varphi_n \quad (2.52)$$

$$(S_D^2) = (S^2) - (S_R^2) - (S_X^2) \quad (2.53)$$

Bu dekompozisyonda S_R aktif görünür güç, S_X reaktif görünür güç ve S_D ise distorsiyon görünür güçtür. S_R ve S_X hesaplanmasında akım, gerilim ve trigonometrik işlemlerin karelerinin kullanılması nedeni ile sinyallerin işaret bilgileri hesaba katılmaz. Dolayısı ile bulunan reaktif güç Budenau'nun hesapladığından daha büyük olur.

Bu tanımlamanın en önemli avantajı S_X in minimize edilmesi güç faktörünün olumlu yönde düzelmesine yol açmaktadır .

Üç bileşeni olan alternatif bir yaklaşım da Sharon'un [Sharon, 1973] yaklaşımıdır. Sharonda görünür gücü aktif güç P , S_Q ve S_C olarak üç bileşene ayırmıştır.

$$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2 \quad (2.54)$$

S_Q olarak adlandırılan Sharon reaktif gücü aşağıdaki gibi hesaplanır. Burada dikkati çeken bir husus reaktif güç için S sembolü kullanılmış olmasıdır. (2.55)

incelenirse S_Q nun akım ve gerilim değerlerinin çarpımı ile bulunduğu görülür. Shepherd'ın yöntemine benzer olarak S_Q nun minimize edilmesi maksimum güç faktörünün elde edilmesi ile sonuçlanır.

$$S_Q = V \sqrt{\sum_1^n I_n^2 \sin^2 \varphi_n} \quad (2.55)$$

$$S_C^2 = S^2 - P^2 - S_Q^2 \quad (2.56)$$

Tablo. 2.1. Değişik güç yaklaşımlarının toplu olarak gösterimi

	Aktif güç	Reaktif güç	Görünür güç	Distorsiyon güç
Budenau	$P = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h$	$Q_B = \sum_{n=0}^m V_n I_n \sin \theta_n$	$S^2 = P^2 + Q_B^2 + D^2$	$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_B^2}$
Fryze	$P = V I_a$	$Q_f = V I_b = \sqrt{S^2 - P^2}$	$S = V I$	Q_f içerisinde tanımlanmıştır.
Shepherd	$(S_R^2)_i = \sum_{n=0}^m V_{i,n}^2 \sum_{n=0}^m I_{i,n}^2 \cos^2 \varphi_n$	$(S_x^2)_i = \sum_{n=0}^m V_{i,n}^2 \sum_{n=0}^m I_{i,n}^2 \sin^2 \varphi_n$	$(S^2) = (S_R^2) + (S_x^2) + (S_D^2)$	$(S_D^2) = (S^2) - (S_R^2) - (S_x^2)$
Sharon	$P = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h$	$S_Q = V \sqrt{\sum_1^n I_n^2 \sin^2 \varphi_n}$	$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2$	$S_C^2 = S^2 - P^2 - S_Q^2$
Emanuel	$P = \sum_h V_h I_h \cos \theta_h$	$Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1$	$S = V I$	$P_C^2 = S^2 - P^2 - Q_1^2$

(2.56) da belirtilen S_C ise tamamlayıcı reaktif güçtür yani distorsiyon reaktif güçtür.

Fryze'ın tanımlarını temel olarak alan Emanuel [Emanuel, 1977] iki alternatif dekompozisyon önermiştir. Temel akım ve gerilim bileşeninden gelen reaktif güç ;

$$Q_1 = V_1 I_1 \sin \varphi_1 \quad (2.57)$$

ve tamamlayıcı güç olarak tanımlanan

$$P_C^2 = S^2 - P^2 - Q_1^2 \quad (2.58)$$

görünür güçten temel harmonik reaktif güç ve aktif gücün çıkarılması ile elde edilen harmoniklerin oluşturduğu distorsiyon gücünü gösterir.

2.6. İndüksiyon ve Elektronik Tip Sayaçların Enerji Ölçüm Yöntemleri

İndüksiyon tipi sayaçlar aktif ve reaktif olmak üzere iki tip olup her ikisinin de yapısı tamamen aynıdır. Sayaç genel olarak, akım ve gerilim bobinleri, metal disk ve kaydedici mekanizmadan oluşur. Akım bobini ve gerilim bobininin arasında bulunan metal disk akım ve gerilimin oluşturduğu manyetik akı sebebi ile dönmeye başlar. Metal diskin mili bir kaydedici numaratöre bağlıdır ve disk döndükçe numaratör gücü kaydeder.

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

Türkiye’de İndüksiyon tipi Reaktif enerji sayaçlar TS 786 EN 60145 Standardına [TS 786 IEC 60145, 1999], aktif sayaçlar ise TS 461 EN 60521 Standardına [TS 461 EN 60521, 1998] göre denenmekte olup bu standarda göre reaktif sayaçların maksimum hatası %3, aktif sayaçların maksimum hatası ise %2 olmak durumundadır. TS 786 EN 60145 standardına göre reaktif sayaçlara harmonik akım ve gerilim uygulanmaz yani bu sayaçların harmonikli durumlarda doğru ölçüm yapması beklenmez.

Elektronik sayaçlar da genel olarak reaktif gücü faz kaydırma metodu ile ölçerler. 8 Aralık 2000 tarih ve 24254 sayılı Resmi Gazete’de yayımlanan Elektrik İç Tesisleri Yönetmeliği gereği 08 Aralık 2001 tarihinden itibaren tüm yeni abonelerde elektronik sayaç uygulaması zorunlu hale getirilmiştir. Elektronik sayaçların induksiyon sayaçlara göre pek çok üstünlüğü vardır. Bunlar elektronik sayaçların

hata sınırlarının daha düşük olması, aynı anda aktif, reaktif gücü ölçebilmesi, sayacın kaydettiği tüketim değerinin el terminali aracılığı ile otomatik olarak okunabilmesi gibi avantajlardır.

Elektronik sayaçlarda ölçme işlemi sayacın bünyesinde bulunan güç ölçümü için özel olarak dizayn edilmiş entegre devreye akım ve gerilimin mili volt ve mili amper seviyesinde düşürülmüş şekilde girilmesi ve entegre devrenin bu akım ve gerilim sinyallerini belirli bir sayıda örnekleyerek ve örneklenen bu değerleri kullanarak P, Q, Cos ϕ , I, 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 milimamper 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.

Elektronik sayaçlarda dönen disk yerine puls çıkışı veren bir led bulunur. Bu led ayarlanan bir oranda yanarak (mesela her 0.1 watta) sayaçtan geçen güç miktarını gösterir. 200 impuls/kWh çıkışı olan sayaçlar bulunduğu gibi 50.000 impuls/kWh çıkışı olan sayaçlar da mevcuttur. Bu tamamen sayacın örnekleme sayısı ve dizaynına bağlıdır. Elbetteki hassas bir sayaç için yüksek sayıda örnekleme yapılmalıdır.

Entegre devrede hesaplanan güç puls çıkışı olarak verilmesinin yanında sayacın ekranına da belirli aralıklarda en az 0.01 kwh olmak üzere gönderilerek kayıtların gösterilmesi sağlanır.

Elektronik sayaçlarda ayrıca optik port aracılığı ile bilgisayar ile haberleşme imkanı olabilmektedir. Bu port aracılığı ile sayaca ait tüm bilgiler tüketim, seri no vs. bilgisayara aktarılabildiği gibi bu port aracılığı ile kalibrasyon da yapılabilmektedir.

Kimi elektronik sayaçlara radyo verici konularak uzaktan okuma yapılabildiği gibi enerji hattı üzerinden merkezdeki bir bilgisayar ile haberleşme yapabilmeyi sağlayan sayaçlar da mevcuttur.

Elektronik tip sayaçlar aktif güç ölçümü için TS EN 61036'ya [TS EN 61036, 1998] uygun olmak zorundadırlar. TS EN 61036'da aktif sayaçlar için hata sınırı yüzde bir olup deneyler esnasında sayaçlara üç ayrı harmonik test uygulanır.

Bunlar üçüncü harmoniğin temel harmoniğin yüzde onu oranında uygulandığı tek sayılı harmonikler deneyi, d.a. ve çift sayılı harmonikleri içeren ateşleme açısının sıfır derece olduğu yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şeklinde akım ve 50 Hz in 12,5 Hz katlarındaki ara harmoniklerini içeren alt harmonikler deneyleridir. Bu deneyler sırasında sayaçlardaki hata değişimi yüzde üçü geçmemelidir.

Reaktif güç ölçümü yapan elektronik sayaçlar TS EN 61268'e [TS EN 61268, 2003] uygun olmak zorundadırlar. TS EN 61268 Standardında reaktif sayaçlar için hata sınırı yüzde ikidir. Bu standartta sayaçlara temel harmonik ve temel harmoniğin yüzde onu oranında üçüncü harmonik uygulanır. Yine bu deney sonucunda sayaçlardaki hata değişimi yüzde üçü geçmemelidir.

2.7. Bozulmuş Dalga Şekli Şebekede Güç Ölçümü

Çalışmaları

Sinüsoidal olmayan koşullarda güç ölçümü ve elektrik sayaçlarının performansı konusunda değişik araştırmalar yapılmıştır. Bu araştırmalarda induksiyon ve elektronik tip elektrik sayaçlarının non-sinüsoidal koşullardaki performansları ve ölçüm metotları incelenmiştir.

Induksiyon tipi, tamamen elektronik, örnekleme yolu ile güç ölçen digital sayaç ile digital göstergeli induksiyon tipindeki dört farklı sayaç non-sinüsoidal koşullarda test edildiğinde sayaçların çalışma prensiplerine bağlı olarak % + 68 ile % - 41 arasında farklı ölçüm yaptıkları görülmüştür. [Pilipski, 1992]. Sayaçların hata değerlerinin Budenau, Sharon, Fryze Kusters-Moore 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 verildiği görülmüştür [Cox, 1990]. Induksiyon ve elektronik sayaçların her ikisinin de non-sinüsoidal yükteki toplam reaktif gücü doğru olarak ölçemedikleri, sıradan elektronik ve induksiyon 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.

AA gerilim kontrolü ile oluşturulan dalga şekli uygulanan ikinci durumda ateşleme açısı 60 derece ile 120 derece arasında değiştirilmiş ve sayaçların gösterdiği hataların %-45 ile %-35 arasında değişiklik gösterirken güç katsayısındaki hatanın da her iki tip sayaç için %5 ile %45 arasında değişim gösterdiği görülmüştür.

Kontrolsüz köprü doğrultucu çıkışının uygulandığı üçüncü durumda akımın değişimine bağlı olarak sayaç hatalarının %-8 ile %-2 arasında değişirken güç katsayısı hatası %25 ile %1 arasında değişim göstermiştir.

Elektronik ve induksiyon tipi tek fazlı sayaçlar 50 Hz. ile 750 Hz arasındaki frekanslarda denenmiş ve induksiyon tipi sayaçların yüksek frekanslarda %90 oranında eksik kayıt yaptığı görülmüştür [Driesen, 1997].

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 induksiyon 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.

Bu çalışmada uygulanan ikinci testte harmonik akım ve gerilim 90° ileri ve geri faz farkı ile yani kapasitif ve indüktif olarak aktif sayaçlara uygulanmış. Elektrik kanunlarına göre bu durumda transfer edilen bir aktif enerji olmadığı için sayaçların kayıt yapmaması gerekirken induksiyon sayaçların kapasitif durumda $\%+3$, indüktif durumda $\%-3$ 'e kadar ulaşan "Phantom" enerjisi adı verilen enerjiyi kaydettikleri görülmüş. Elektronik sayaçlar ise doğru olarak ölçüm yapmışlar.

2.8. Sonuç ve Tartışma

Bu bölümde sinüsoidal ve non-sinüsoidal koşullarda standartlara ve değişik yaklaşımlara göre güç hesaplama yöntemleri incelenmiştir. Önce sinüsoidal 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 yönteme göre yapılması durumunda güç katsayısının düzeltilemeyeceğini öne süren Fryze, Sharon,

Emanuel ve Shepherd'ın önerdiği güç ölçüm yöntemleri incelenerek bunların karşılaştırması verilmiştir.

Bu bölümde ayrıca literatüre geçen bozulmuş dalga şekilli şebekede güç ölçüm çalışmalarına yer verilmiş olup yapılan çalışmalarda harmonik içerikli dalga şekilli şebekede sayaçların hatalı ölçüm yaptıkları gösterilmiştir.

Son olarak elektronik ve induksiyon tipi sayaçların çalışma prensipleri anlatılarak Türkiye'de bu sayaçların uygun olmak zorunda oldukları Standartlar konusunda bilgi verilmiştir.



3. REAKTİF GÜÇ ÖLÇÜMÜ YAKLAŞIMLARI VE PİYASADAKİ MEVCUT SAYAÇLARIN İNCELENMESİ

Bu bölümde, bozulmuş dalga şekilli şebekede elektronik ve indukiyon tipi sayaçların performansı incelenecektir. Piyasada halen mevcut bulunan değişik marka ve modeldeki sayaçlar harmonik içerikli akım ve gerilime tabi tutulacaklar, uygulanan akım ve gerilim dalga şekli harmonik analizörü ile kaydedildikten sonra bu kaydedilen dataların kullanılması ile bölüm II de anlatılan değişik aktif ve reaktif güç tanımlarına göre hesaplamalar yapılacak ve bulunan güç değerleri sayaçların gösterdiği değerler ile kıyaslanacaktır.

Sayaçlara iki farklı durumda harmonik içerikli akım ve gerilim uygulanacaktır. Dalga şeklinin simetrisinden dolayı elektrik şebeke sisteminde çift harmoniklerin bulunmaması sebebi ile birinci durum için sayaçlara tek sayılı harmonikler içeren akım ve gerilim uygulanacak ikinci durum için ise yüksek oranda d.a. bileşen içeren yarım dalga doğrultulmuş akım uygulanacaktır.

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

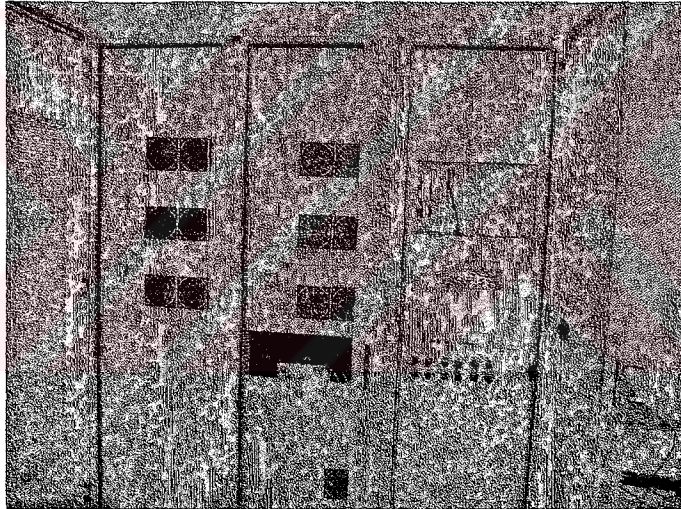
3.1. Deneylerde Kullanılan Cihazlar

Bu deneyler Türk Standardları Enstitüsü Kalite Kampüsü Elektrik Laboratuvarında bulunan sayaç test laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. 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.

3.1.1. Sayaç Test Sistemi

Almanya'dan temin edilmiş olan Zera marka sayaç test sistemi dört ana bölümden oluşmaktadır. Bunlar akım gerilim kaynakları, referans sayaç, sayaçların test edilmek üzere montajının yapıldığı ve optik okuyucu aracılığı ile hatalarının okunduğu test masası ve sisteme kumanda eden bilgisayar.

Akım ve gerilim kaynakları üç fazlı olup her faz birbirinden bağımsızdır. Akım ve gerilim kaynakları D.A. gerilim üreten bir regülatörden beslenirler ve oluşturulacak olan dalga şekli bu D.A. gerilimden elektronik devreler aracılığı ile elde edilir. Bu kaynaklara sistemin bilgisayarı ile kumanda edilir. Kaynakların uygulayacağı akım ve gerilim değerleri harmonik içerikleri sistemin bilgisayarı ile hazırlanır.



Şekil.3.1. Deneylerde kullanılan referans sayaç ve akım-gerilim kaynakları

Referans sayaç akım, gerilim, frekans, her bir faza ait aktif güç, reaktif güç, değerlerini 10^{-5} hassasiyetle 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 akım, gerilim, güç, güç katsayısı değerlerini hesaplar. Cihazın kullanma kılavuzuna göre bu hesaplama aşağıdaki formüllerde verildiği gibi yapılır.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{1}{720} \sum_{i=n}^{n+720} v_i^2} \quad (3.3)$$

$$I_{rms} = \sqrt{\frac{1}{720} \sum_{i=y}^{y+720} i_y^2} \quad (3.4)$$

$$P = \frac{1}{720} \sum_{i=y}^{y+719} u_i \cdot i_i \quad (3.5)$$

$$Q = \frac{1}{720} \sum_{i=y}^{y+719} u_i \cdot i_{i-180} \quad (3.6)$$

burada i_{i-180} = *örneklenen akım değerinin 1/4. periyod önceki değeri.*

$$S = UI \quad (3.7)$$

$$\cos \varphi = \frac{P}{S} \quad (3.8)$$

Sayaçlar test masasında sayaçların akım gerilim bağlantılarının yapılabilmesi için 20 adet askı düzeneği mevcuttur yani aynı anda aynı özellikte 20 adet sayaç test edilebilir. Bu masada akımlar seri olarak gerilimler ise paralel olarak sayaçlara bağlanır. Masaya monte durumda olan optik okuyucular induksiyon sayaçlarda metal diskin dönüş sayısını, elektronik tip sayaçlarda ise puls sayısını okuyarak bu bilgiyi bilgisayara gönderirler.

Sistem bilgisayarı akım ve gerilim kaynaklarına kumanda ettiği gibi hem test masası hem de referans sayaç ile bağlantılı durumdadır. Bilgisayara, test edilen sayaçların özelliğine göre akım ve gerilim değerleri, frekans $\cos \varphi$ ve $\sin \varphi$ bilgileri, hangi fazlara akım ve gerilim uygulanacağı, harmonik içerik uygulanacaksa daha önceden hazırlanmış harmonik içerik ve sayaçlara ait katsayı bilgileri girilir.

Sayaçlara harmonik akım ve gerilim uygulanacak ise önce bir harmonik tablosu oluşturulur. Bu tabloda 40. harmoniğe kadar, test için ayarlanan akım veya gerilim değerinin %40 ını geçemeyecek ve toplam rms değer olarak da cihazdan ayarlanan akım-gerilim değerini %30 dan fazla geçemeyecek şekilde harmoniklerin genlik ve açıları ayarlanır. Daha sonra hazırlanan sıralama tablosu ile bu harmoniklerin hangi akım veya gerilim fazına hangi sürelerde uygulanacağı

belirlenerek kaydedilir. Herhangi bir test sırasında sayaçlara harmonik uygulanacağı zaman kaydedilen bu sıralama tabloları kullanılarak sayaçlara harmonik içerikli akım-gerilim uygulanabilir.



Şekil.3.2. Sayaç Test Düzeneği

Sayaçlara akım ve gerilim uygulandıktan sonra doğruluk testi başlatılır. Masa ve referans sayaçtan gelen bilgiler bilgisayar tarafından kullanılarak test edilen sayaçların referans sayaca göre hataları hesaplanır. Sayaçların hatası aşağıdaki formüle göre hesaplanır.

$$F\% = \frac{N_{must} - N_{actual}}{N_{actual}} \cdot 100\% \quad (3.1)$$

$$N_{must} = \frac{3600 \frac{s}{h} \cdot 1000 \frac{w}{kW} \cdot n \cdot C_{PZ}}{U_B I_B 3 \cdot cons.} \quad (3.2)$$

burada ;

N_{actual} : Test süresi boyunca sayacın vermiş olduğu puls veya devir sayısı.

N_{must} : Hesaplanan puls veya devir sayısı.

n : dönüş sayısı

U_b : ayarlanan voltaj değeri

I_b : ayarlanan akım değeri

$Cons$: sayaç katsayısı. (1/kWh veya 1/kVArh)

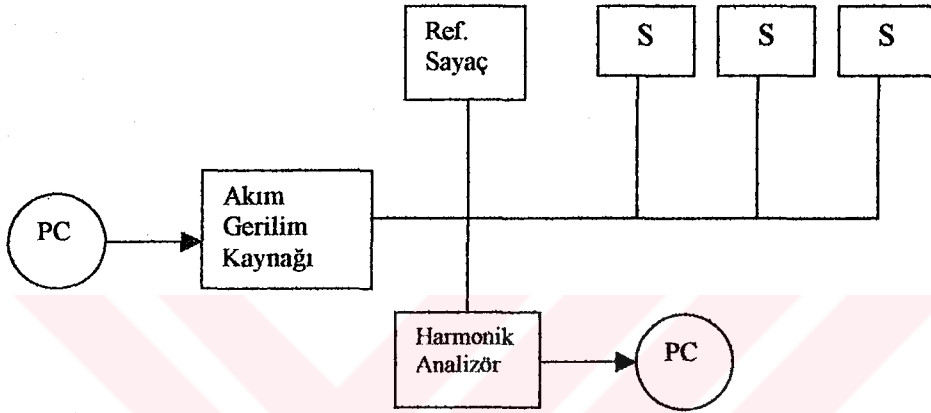
$F\%$: yüzde olarak hata. (ölçümdeki sapma)



C_{PZ} : P veya Q nun Hz olarak standard çalışma frekansı.

3.1.2. Harmonik Analizörü ve PC

Fluke marka 192 model Harmonik analizörü iki kanallıdır ve kanallara akım veya gerilim girilebilir. Analizör akım-gerilim değerlerini saniyede 1012 örnek olmak üzere sayısal olarak örnekler.



Şekil.3.3. Test sisteminin blok diyagram ile gösterimi

Örnekleme sayısı beş veya ikibuçuk periyot için 1012 datadır. Analizörün, aldığı örnekler, RS 232 bağlantısı aracılığı ile PC ye aktarılmıştır. PC ye aktarılan datalara analizörün yazılımı aracılığı ile ulaşmak ve bu dataları başka uygulamalara aktarmak veya harmonik içeriğini görmek mümkündür.

Deneyler sırasında gerilim ucu cihaza doğrudan girilmiş akım ise önce akım clamb'i ile daha sonra seri bağlanan 1.0 ohm'luk bir direncin üzerindeki gerilim olarak alınmıştır.

3.2. Deneylerde Kullanılan Sayaçlar

Deneylerde piyasada halihazırda bulunan statik (Elektronik) sayaç ve Induksiyon tipi sayaçlar kullanılmış olup bunlar;

- 1- A marka, 220/380 volt 10(30) Amper 240 devir / kWh 3 fazlı aktif induksiyon sayaç
- 2- A marka, 220 Volt, 10(30) Amper 600 d/kWh 1 fazlı aktif induksiyon sayaç
- 3- B marka, 220/380 volt 10(30) Amper 50.000 impuls/kVAr kombi (aktif ve reaktif güç ölçümü yapabilen-elektronik) sayaç.
- 4- C marka, 220/380 volt, X5 amper (akım transformatörü ile bağlanan) 480 d / kVArh, induksiyon reaktif sayaç
- 5- A marka, 220/380 volt 480 d/kVArh induksiyon reaktif sayaç.
- 6- C marka, 220/380 Volt, 10(30) Amper, 200 impuls/kVArh Statik sayaç.

3.3. Deney Yöntemi

Sayaçlara iki aşamalı test uygulanmıştır. Birinci aşamada akım ve gerilime tek sayılı harmonikler harmonik sayısı artan sırada uygulanmıştır. İkinci aşamada ise doğru akım içeriği yüksek olan yarım dalga doğrultucu çıkışı sinyali değişik ateşleme açılarında uygulanmıştır.

Referans sayaç Zera'nın gösterdiği gerçek güç değerleri ile test edilen sayaçların referans sayaca göre olan hataları kaydedilerek test edilen sayaçların okuduğu güç değerleri hesap edilmiştir.

Sayaçlara uygulanan gerilim doğrudan, akım ise önce akım pensi ile aşağıda açıklanan sebepten daha sonra direnç üzerinden okunan gerilim yöntemi ile fluke harmonik analizörüne aktarılmış ve bu dalga şekilleri kaydedilmiştir.

Akım pensi ile bilgisayara kaydedilen dalga şekilleri harmonik analizörün yazılımı ile yeniden değerlendirilerek harmonik içeriğin genlik ve faz açıları elde edilmiştir. Ancak kullanılan pensin sinyalleri analizöre aktarırken faz kaymasına sebep olduğu uygulanan harmonik içerik ile analizörün yazılımı ile elde edilen sonuçların karşılaştırması sonucu anlaşılmıştır. Kullanılan pensin (fluke i1000s) kullanma kılavuzunda beş amperlik test akımında maksimum onbeş derecelik faz kaymasına sebebiyet verebileceği belirtilmiştir. Bu faz kaymasının kalibre edilmesine çalışılmış ancak analizörün aynı test akımı için değişik faz açıları vermesi

nedeni ile kalibrasyon yapılamamıştır. Bu sebeple ölçümler akım pensi kullanılmadan tamamlanmıştır.

Ölçümlerde akım devresine 1.0 ohm'luk seri direnç bağlanmış ve direnç üzerinde düşen gerilim akım değeri olarak alınmıştır.

Analizör aracılığı ile dalga şekilleri saniyede 1012 data ile örneklenerek kaydedilmiş ve kaydedilen dataların matlab programı ile Fast Fourier Transform (fft)'leri alınarak sinyallerin harmonik bazında genlik değerleri ve açıları hesaplanmıştır.

Hesaplanan harmonik içeriğe ait genlik ve açı bilgilerinden değişik yaklaşımlara göre aktif ve reaktif güçleri, THD, k, V_{rms} , I_{rms} ve görünür güçleri mathcad programı aracılığı ile hesaplanmış ve bu değerler sayaçların ölçtüğü güç ile karşılaştırılmıştır.

3.3.1. Tek Sayılı Harmoniklerin Uygulanması

Sayaç test sistemi bilgisayarında sayaçlara uygulanacak olan tek sayılı harmonikler için Ek-1 de verilen tablo-1 ve tablo-2 deki 1. harmonikten 19. harmoniğe kadar harmonikleri içeren tablolar oluşturulmuştur.

Tablo-1 ve Tablo-2 deki harmonik içeriğin tek farkı akım ve gerilim arasındaki faz farkıdır. Tablo-1 de temel harmonik için faz farkı 30 derece iken Tablo-2 de faz farkı 25 derecedir.

Tablodaki harmoniklerin genlikleri uygulanacak test akım veya gerilim değerinin çarpılacağı yüzdelik değeri gösterir. Yani beş amperlik bir akım uygulandığında ;

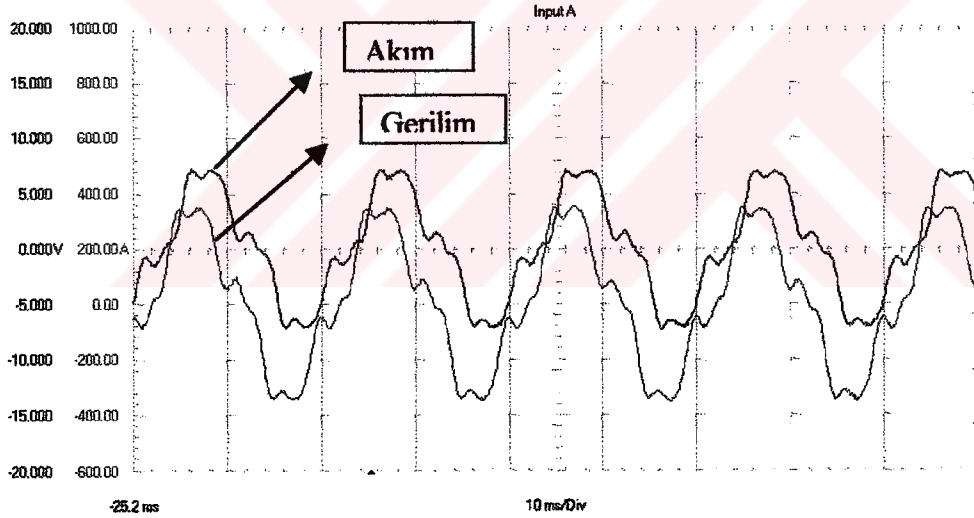
$$temelharmonik = 5 \cdot \frac{89}{100} = 4.45 \text{ Amper}$$

$$3.harmonik = 5 \cdot \frac{20}{100} = 1 \text{ Amper}$$

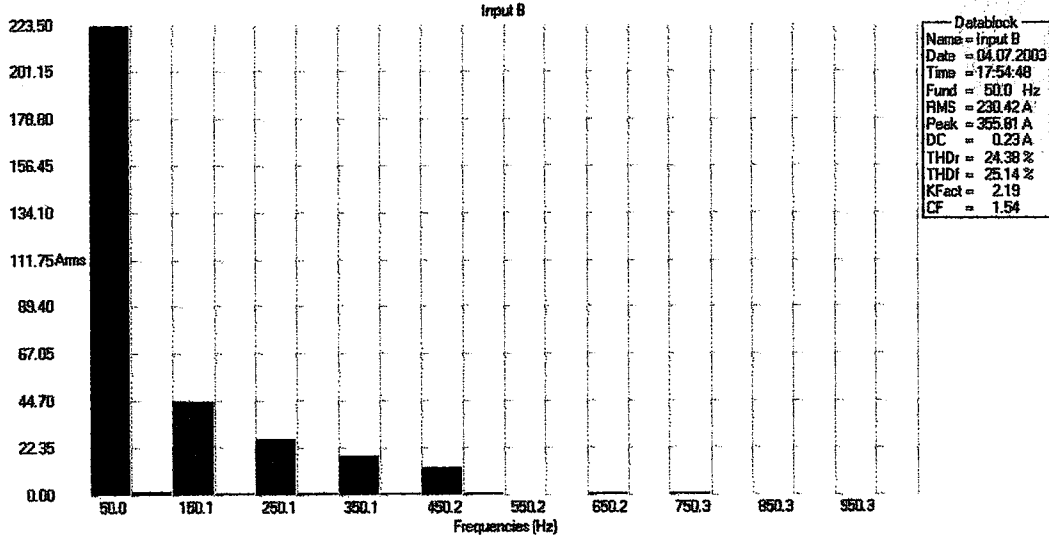
şeklinde genlik değerleri olarak uygulanırlar.

Sayaç test sisteminin harmonik bileşen uygulanmasındaki sınırlama nedeni ile uygulanan akımın %30'undan yüksek bir değerde harmonik içerikli akım verilememiştir. Deneylerde test akımı olarak 5 amper uygulanmış olup 6.5 amperin üzerine çıkacak ölçüde harmonik içerik uygulanamamıştır. Bu da THD seviyesinin % 30 lar mertebesinde sınırlı kalmasına sebep olmuştur.

Tablo-1 ve Tablo-2 de gösterilen harmonik içerik önce sadece gerilime, sonra akım ve gerilime uygulanmıştır. Bu durum aktif ve reaktif ölçümler için tekrarlanmış olup bu tablolardaki harmonik içerik ile seksen ayrı ölçüm alınmıştır. Sayaçlara uygulanan akım ve gerilimlere ait dalga şekillerinden ve bunların harmonik içeriklerinden birisi aşağıda verilmiştir. Bu dalga şeklinde akım ve harmonik birinci Harmoniğin yanı sıra üç, beş, yedi ve dokuzuncu harmonikleri içermektedir.



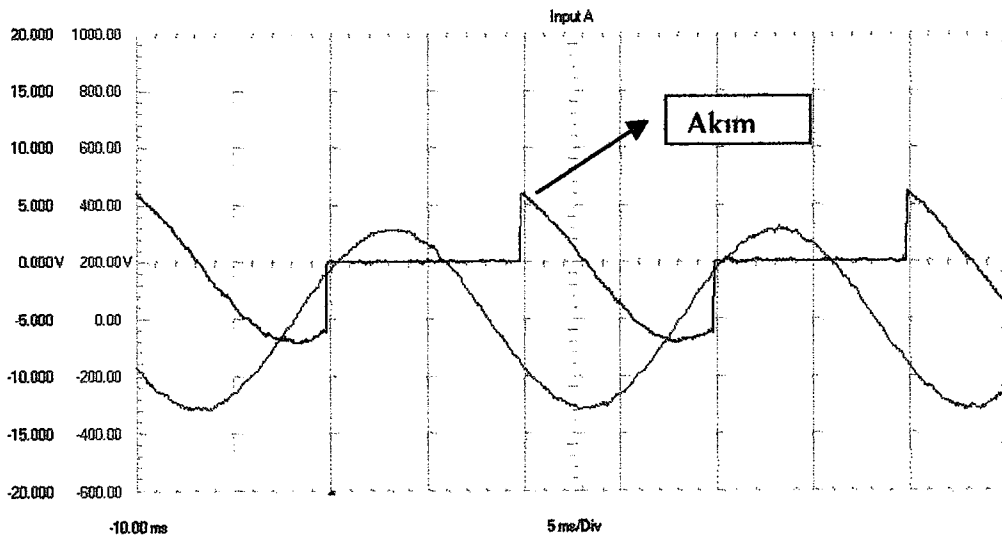
Şekil.3.4. Reaktif ölçümlerde kullanılan akım ve gerilime uygulanan harmonik içerikli dalga şekli örneği



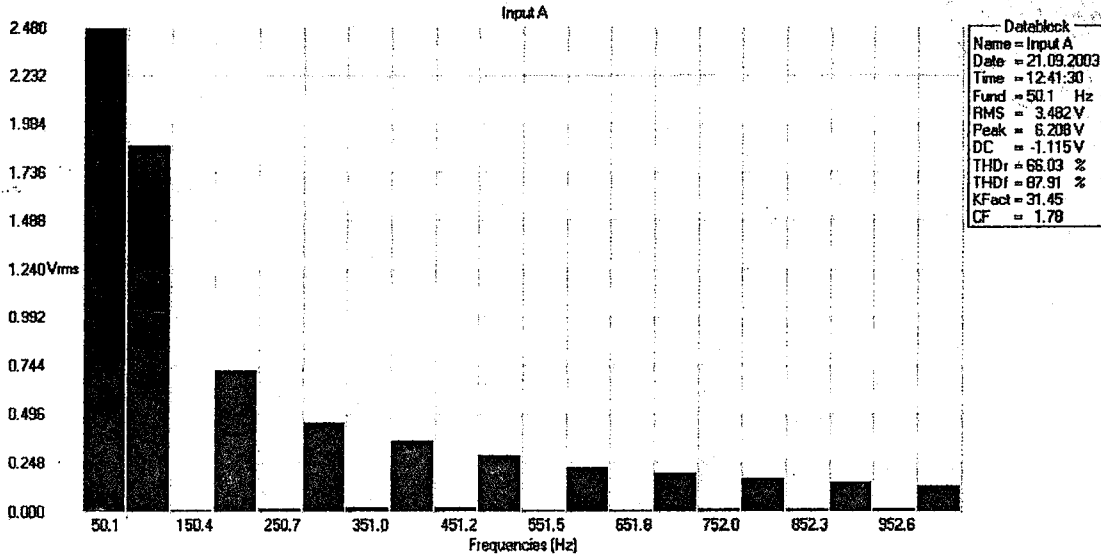
Şekil.3.5. Akım ve gerilime uygulanan dalga şeklinin harmonikleri

3.3.2. Yarım Dalga Doğrultulmuş Akım Uygulanması

Sayaçların d.a. bileşenin yüksek oranda bulunduğu yarım dalga doğrultulmuş sinüsoidal dalga durumunda performansını ölçmek için şekil-3.6 daki dalga şekli sayaçlara uygulanmıştır. Burada gerilim sinüsoidal, akım ise yarım dalga doğrultulmuş sinüs şeklindedir. Akımdaki bu dalga şekli yarım dalga doğrultulan sinüs eğrisinin 0, 30, 60, 45 ve 80 ateşleme açılarında uygulanmış olup uygulanan dalga şekli aşağıdaki gibidir.



Şekil. 3.6. Gerilimi saf sinüs akımı ise 30° ateşleme açısı ile yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şekli



Şekil.3.7. Yarım dalga doğrultulmuş dalga şekline ait harmonikler

3.4. Ölçüm Sonuçları

Sayaçlara tek sayılı harmonikler önce akım devresine sonra akım ve gerilim devrelerine birlikte uygulanmıştır. Uygulanan harmonik içerikler Ek-1 Tablo-1 ve Tablo-2 de görüleceği üzere k faktörünün lineer artacağı şekilde yani harmonik içeriğe her yeni ölçümde ilave frekanslar eklenmesi şeklinde olmuştur. Bu durumda harmonik içeriğin oluşturduğu toplam harmonik distorsiyon yüzde 25 ile yüzde 27 aralığında kalmıştır. Uygulanan harmonik içerik sebebi ile sonuçlar grafiklerde k faktörü esas alınacak şekilde verilmiştir.

Çizimlerde sayaçların ölçtüğü ve bilgisayar ile hesaplanan her bir güç değeri her ölçüm için hesaplanan görünür güce bölünmek sureti ile Per Unit hale getirilmişlerdir.

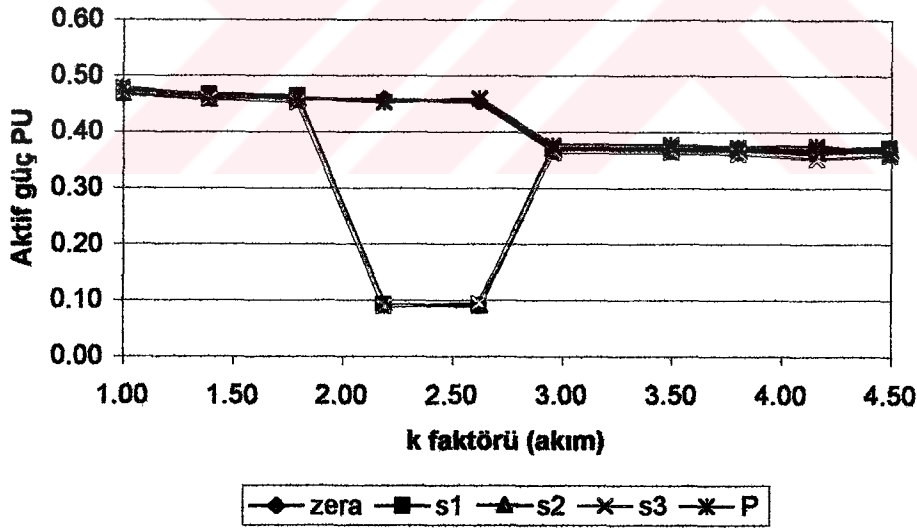
Ek-1 Tablo-1 ve Tablo-2 de verilen harmonik içerikler arasındaki fark akım ve gerilim arasındaki açı farkının 30 ve 25 derece olmasıdır. Sayaçlara önce Ek-1 Tablo-1 sonra da Tablo-2 deki harmonik içerikli dalga şekilleri uygulanmıştır.

3.4.1. Aktif Ölçüm Sonuçları

Tüm aktif ölçümler için P değeri (3.1) de verilen formüle göre hesaplanmıştır.

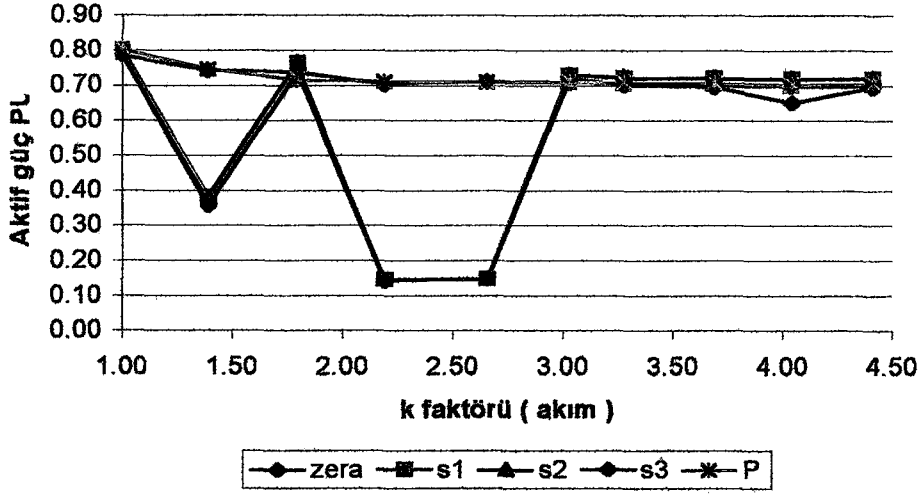
$$P = \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos \theta_h \quad (3.1)$$

Grafikte zera referans sayacı, s1 ve s2 induksiyon tipi sayaçları ve s3 ise elektronik tip sayacı göstermektedir. Sadece akımda harmonik olması durumunda sayaçların gösterdiği güç ve hesaplanan P değeri aşağıda grafikte verilmiştir. Hesaplanan ve sayaçların göstermiş olduğu aktif güç değerleri yine her bir ölçüm için bilgisayar aracılığı ile hesaplanan görünür güce bölünmek sureti ile perunitize edilmişlerdir. Bu ölçümlerde referans sayaç ve hesaplanan aktif güç değeri aynı olmasına rağmen sayaçların tümü de k faktörünün 2.2 ve 2.8 değerlerinde %80 oranında hatalı ölçüm yapmışlardır.



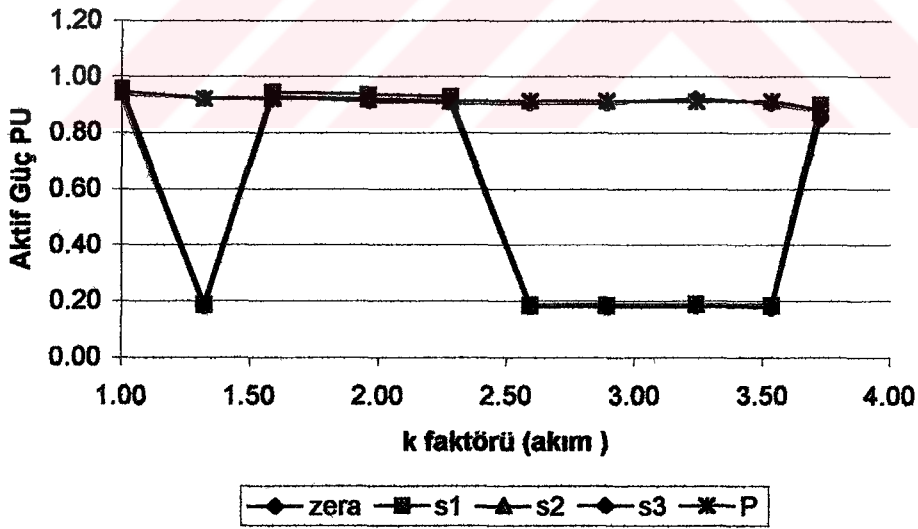
Şekil.3.8. Akımın harmonikli olması durumunda sayaçlarda hata değişimi

Hem akım hem de gerilime aynı harmonik içerikli dalga şekli uygulandığı durumdaki sonuçlar aşağıda verilmiş olup, yine referans sayacın hesaplanan aktif güç değeri ile aynı gücü ölçtüğünü, test edilen sayaçların ise k faktörünün 1.4, 2.2 ve 2.8 değerlerinde %50 ve %80 oranlarında hatalı ölçüm yaptıkları görülmüştür.



Şekil.3.9. Akımın ve gerilimin harmonikli olması durumunda sayaçlarda hata değişimi

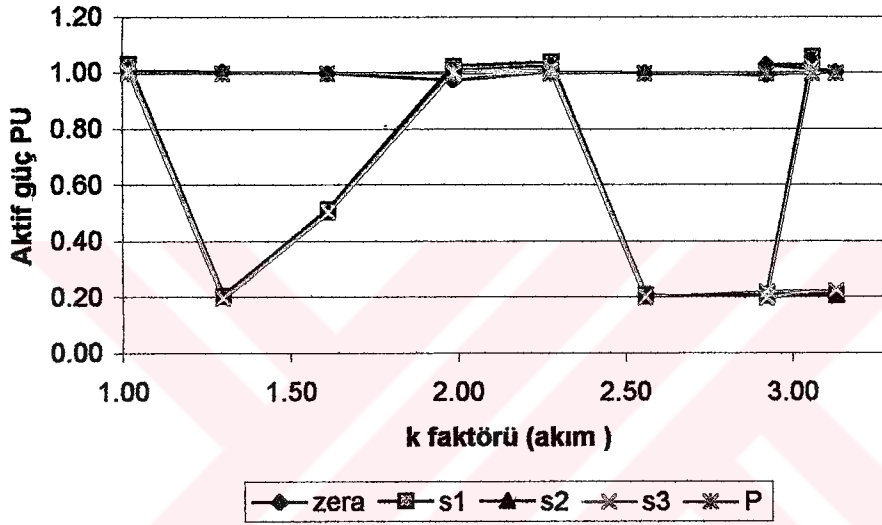
Ek-1 Tablo-2 deki harmonik içerikli dalga şeklinin yani akım gerilim arasındaki açı farkının 25 derece ve sadece akım devresinde harmonikli dalga şekli uygulandığında elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.



Şekil.3.10. Aktif ölçümler için gerilim sinüs ve akım harmonikli iken sayaçların ve aktif gücünün k ya göre değişimi.

Akım gerilim arasında 25 derece fark olması durumunda açının 30 derece uygulanmasına göre hata sayısında artma olduğu görülmüştür . Bu durumda da referans sayaç doğru ölçüm yaparken diğer üç sayaç hatalı ölçüm yapmıştır.

Akım gerilim arasındaki açı farkı 25 derece ve akım-gerilim devresinde harmonikli dalga şekli olduğunda elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiş olup bu durumda da referans sayaç doğru ölçüm yaparken her 3 sayaç ta %80 ve % 50 oranında eksik ölçüm yapmışlardır.



Şekil 3.11. Aktif ölçümler için gerilim ve akım harmonikli iken sayaçların ve Aktif gücünün k ya göre değişimi.

Sayaçlara yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şeklinin değişik ateşleme açılarında uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiş olup güç değerlerinin çok farklılık göstermesi nedeni ile sonuçlar tablo olarak verilmiştir.

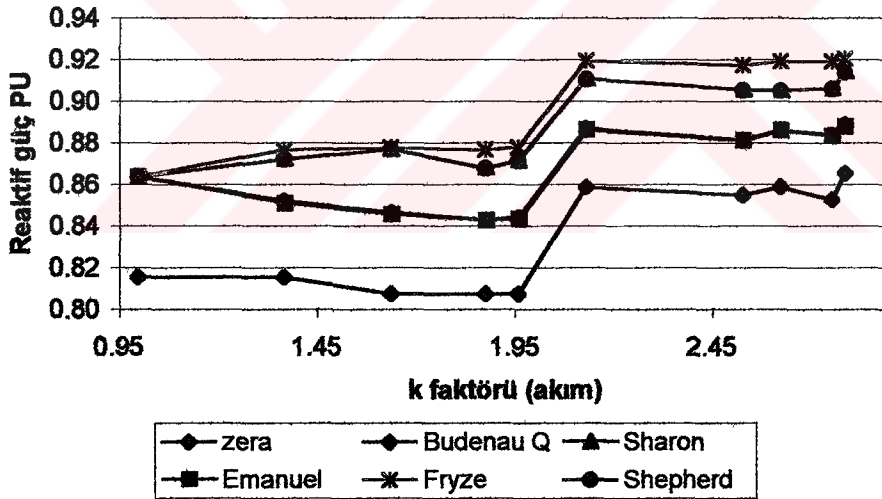
Tablo.3.1. Aktif ölçümler için gerilim sinüs ve akım yarım dalga sinüs iken sayaçların ve aktif gücünün k ya göre değişimi

P	0.43	0.38	0.72
zera	0.43	0.00	-0.25
s1	0.42	0	0
s2	0.15	0	-0.21
s3	0.43	0	0
k (akım)	3.49	4.91	5.25

Yarım dalga sinüs dalga şekli sırası ile 30, 60 ve 80 derecelik ateşleme açısı ile uygulanmıştır. Bu ölçümlerde 1 ve 3 numaralı sayaç induksiyon tipi 2 numaralı sayaç ise elektronik tip sayaçtır. Burada dikkati çeken birinci ölçümde tüm sayaçlar doğru okurken elektronik sayaç %65 oranında eksik ölçüm yapmıştır. İkinci ölçümde referans sayaç dahil sayaçların hiçbirisi kayıt yapmamıştır. Son ölçümde ise referans sayaç ve elektronik sayaç gücü negatif olarak ölçmüş, birinci induksiyon tipi sayaç ters dönüş engelleyicisi olduğu için dönmemiş, diğer induksiyon tipi sayaç ters dönmüştür. Dönüş hızı çok yavaş olduğundan referans sayaca göre hatası ölçülememiştir.

3.4.2. Reaktif Ölçüm Sonuçları

Yapılan tüm reaktif ölçümlerde kaydedilen datalar için, Budenau, Sharon, Emanuel, Fryze ve Shepherd'in reaktif güçleri hesaplanmıştır. Şekil-3.12 de harmonik akımdaki k faktörüne göre per unitize edilmiş güç değerleri verilmiştir.



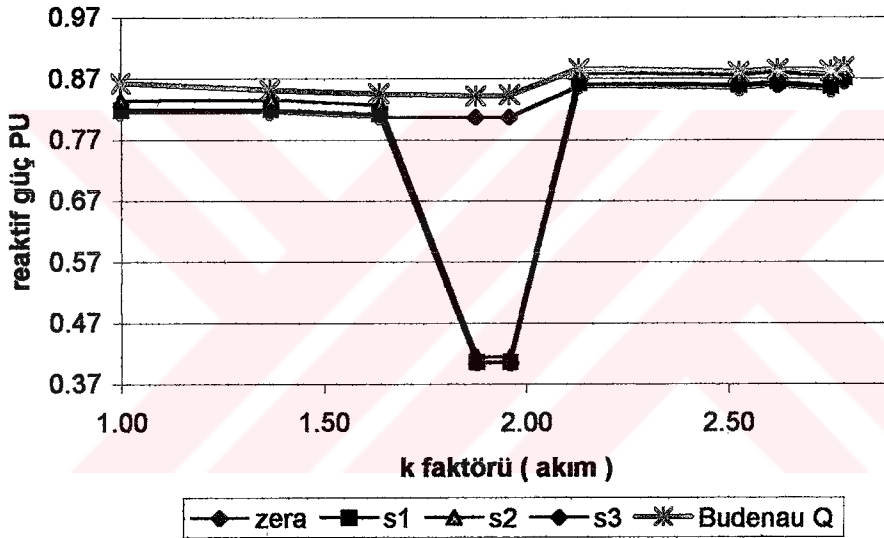
Şekil.3.12.Reaktif ölçümler için değişik hesaplama yöntemlerinin k ya göre değişimi.

Sharon ve Budenau reaktif güçleri birbirinin aynı olmasına rağmen Emanuel, Fryze ve Shepherd reaktif güçleri değişik güç hesaplama yöntemleri nedeni ile %2 oranında farklı sonuca neden olmuşlardır. Bu ölçümlerde referans sayaç zera'ya en yakın değerleri Budenau reaktif gücü sağlamaktadır. Bu sebeple ölçüm sonuçları

Budenau reaktif gücüne göre kıyaslanacak ve grafiklerde Budenau gücü ile birlikte gösterileceklerdir.

Reaktif ölçüm sonuçları ile ilgili grafiklerde s1 ve s2 induksiyon tipi sayaç s3 ise elektronik tip sayaçtır.

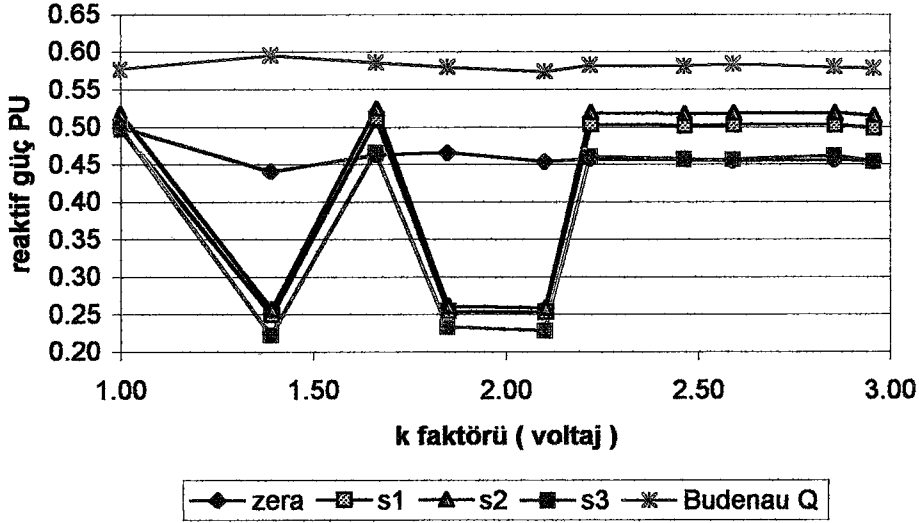
Akımda harmonik olması durumunda sayaçların gösterdiği güç ve Budenau reaktif güç değeri aşağıda grafikte verilmiş olup bu ölçümde aktif ölçümdeki gibi aynı harmonik içerikli deneylerde referans sayaç ve Budenau reaktif gücü yaklaşık aynı çıkarken k faktörünün 1,8 ve 1,95 değerlerinde her üç sayaç ta %50 oranında eksik ölçüm yapmışlardır.



Şekil.3.13. Akımın harmonikli olması durumunda sayaçlarda hata değişimi açı:30°

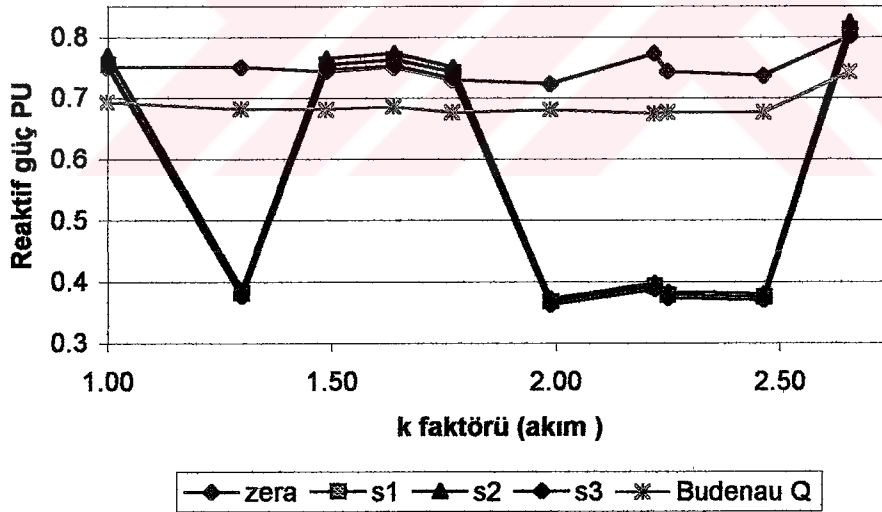
Hem akım hem de gerilime aynı harmonik içerikli dalga şekli uygulandığı durumlardaki sonuçlar şekil-3.14 de verilmiştir. Bu ölçümlerde referans sayaç Budenau gücüne göre 0,8 Per unit eksik ölçüm yaparken diğer sayaçlar k faktörünün 1.35, 1.82 ve 2.04 değerlerinde referans sayaca göre %50 oranında eksik kayıt yapmışlardır.

Budenau reaktif gücüne göre elektronik ve induksiyon tipi sayaçlar her durumda daha düşük güç ölçmüşlerdir. Bu hata %15 seviyesinde iken bazı durumlarda %50 değerini geçmektedir.



Şekil 3.14. Akımın ve gerilimin harmonikli olması durumunda sayaçlarda hata değişimi açısı: 30°

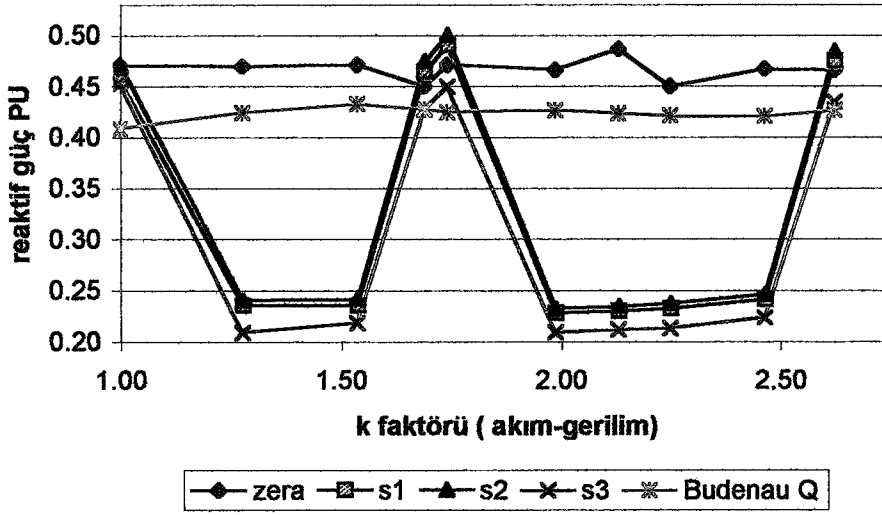
Akım gerilim arasındaki açı farkı 25 derece ve sadece akım devresinde harmonikli dalga şekli olduğunda elde edilen sonuçlar aşağıdadır.



Şekil.3.15. Reaktif ölçümler için gerilim sinüs ve akım harmonikli iken sayaçların ve aktif gücünün k ya göre değişimi açısı: 25°

Yine bu ölçümde Zera Budenau reaktif gücüne göre 0.5 pu eksik ölçüm yaparken diğer sayaçlar bazı durumlar için zera ile aynı k faktörünün 5 ayrı değerinde %50 oranında eksik kayıt yapmışlardır.

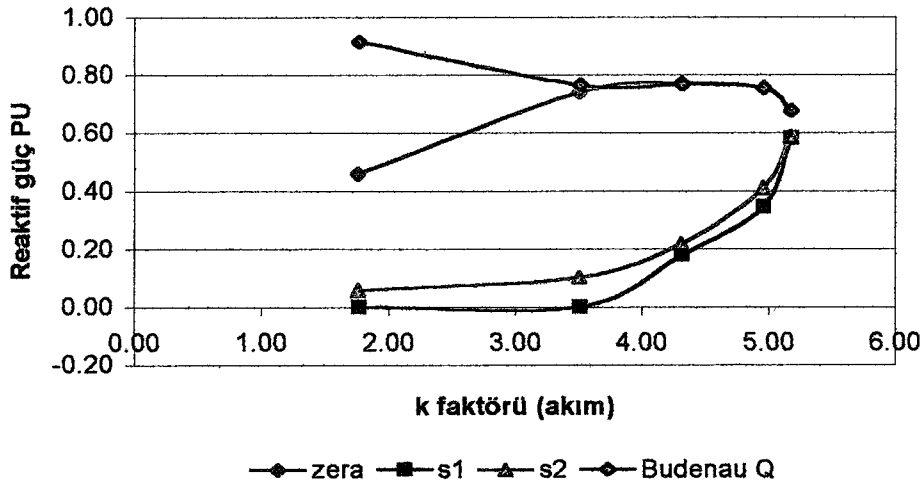
Akım-gerilim açısı farkı 25 derece ve akım-gerilim devresinde harmonikli dalga şekli olduğunda elde edilen sonuçlar bir önceki durum ile benzerdir.



Şekil.3.16. Reaktif ölçümler için gerilim ve akım harmonikli iken sayaçların ve aktif gücünün k ya göre değişimi açı:25°

Reaktif ölçümlerde yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şeklinin değişik ateşleme açılarında uygulanması sonucu elde edilen sonuçlar aşağıda verilmiştir.

Reaktif ölçümler için alınan sonuçlarda aşağıda verilmiştir. Bu ölçümde kullanılan reaktif sayaçların her ikisi de elektronik tip sayaç olup bölüm 2 de listesi verilen sayaçlardan 6 ve 3. sırada bulunan sayaçlardır.



Şekil.3.17. Reaktif ölçümler için gerilim sinüs ve akım yarım dalga sinüs iken sayaçların ve reaktif gücünün k ya göre değişimi

Yarım dalga doğrultulmuş dalga şeklinde reaktif ölçüm durumunda, referans sayaç, ateşleme açısının sıfır derece olduğu bir numaralı ölçümde %50 oranında eksik yazmasına rağmen diğer ölçümlerde Budenau gücü ile aynı değerleri göstermiştir.

İlk iki ölçümde (ateşleme açısı 0 ve 30 derece) bir numaralı sayaç ölçüm yapmazken iki numaralı sayaç %85 oranında eksik kayıt yapmış, ateşleme açısı büyüdükçe sayaçların ölçtüğü güç Budenau gücüne yaklaşmıştır.

Bu iki sayacın d.a. bileşeni yüksek olan dalga şekillerinde bu kadar yüksek (%87 ve üzeri) hata yapmalarının sebebi ölçüm devreleri nedeniyledir. Gücü hesaplayan entegre devreye akım transformatör aracılığı ile iletilmiş olup bu transformatör de d.a. bileşenleri iletemediğinden bu kadar yüksek hatalar ortaya çıkmıştır.

3.5. Ölçüm Sonuçlarının Değerlendirilmesi

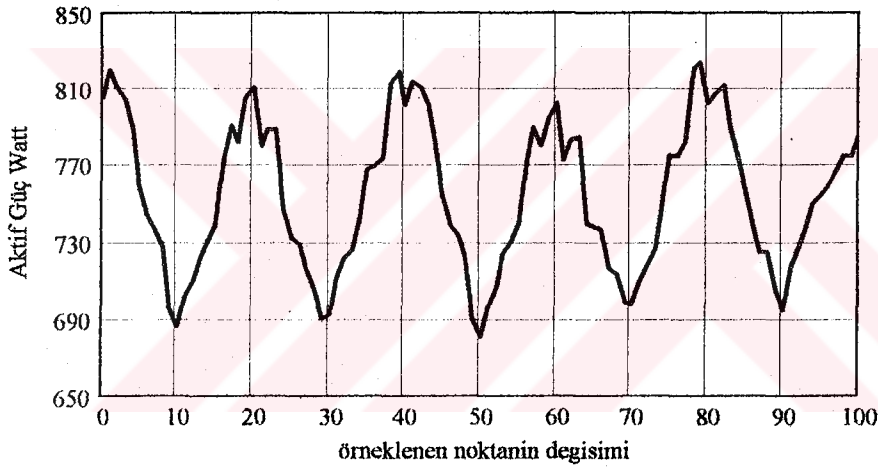
Yapılan ölçümlerde dikkati çeken en önemli husus bazı harmonik içeriklerinde sayaçlar %50 - %80 aralığında hatalı ölçme yapmaktadır. Bazı ölçümlerde ise hata aralığı % 5- %10 aralığında kalmaktadır.

Grafikler detaylı incelendiğinde bu hataların k faktörüne bağlı olmadığı görülmektedir. Çünkü k faktörünün hem küçük olduğu hem de büyük olduğu ölçümlerde hatalı ölçme olduğu gibi k faktörünün yakın değerleri için de doğru ölçümler olmaktadır. Yine aynı şekilde hemen hemen tüm harmonik içerikli deneylerde THD seviyesi %25-%30 aralığında olduğundan hatalı ölçümlerin THD seviyesine de bağlı olmadığı görülmektedir.

Sayaçların ölçme metodu incelendiğinde muhtemel hata kaynağı ortaya çıkmaktadır. Elektronik sayaçlar dalga şeklini örnekleyerek ölçüm yaparlar. Sayaca uygulanan akım ve gerilimden saniyede belirli sayıda örnek alarak dalga şeklini bu örneklerle oluştururlar. Örnek sayısı ne kadar yüksek olursa dalga şekli o kadar doğru örneklenmiş olur. Hatanın örnekleme sayısına göre nasıl değiştiğinin

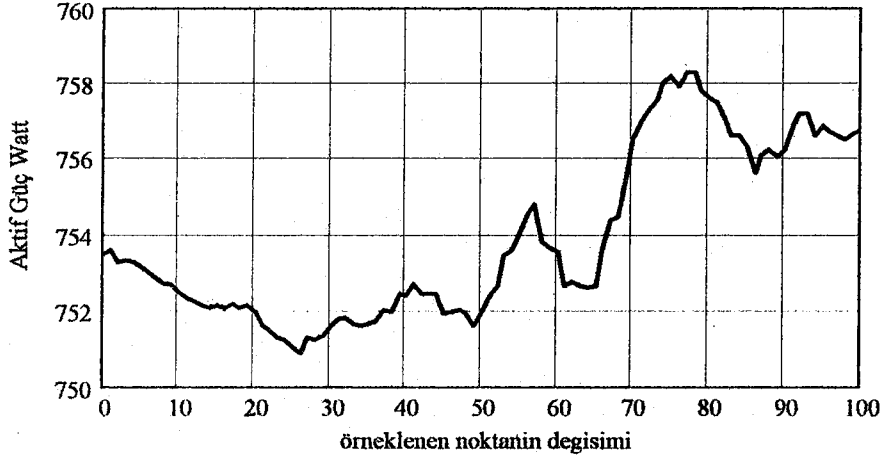
anlaşılabilmesi için harmonik analizörünün kaydettiği datalar kullanılarak değişen sayıda örnek sayısı kullanılarak aktif ve reaktif güç hesap edilmiştir. Reaktif güç için akım 90 derece ileri kaydırılarak akım ve gerilimin örneklenen değerlerinin çarpımının integrali alınmış ve sonuç örnek sayısına bölünerek güç bulunmuştur.

Aşağıda bulunan sonuçlar gösterilmiş olup, sonucun örnekleme sayısı ve örnek alınan noktanın değişimine göre büyük farklılıklar gösterdiği görülmüştür. Örnek sayısı bir periyot boyunca dalga şeklinden alınan data sayısıdır. Deneylerde kullanılan harmonik analizörü her periyot için 200 örnek almakta olup hazırlanan program ile alınan örnek sayısı sabit tutularak örneklenen ilk noktanın yerinin değişimine göre elde edilen datalardan güç hesap edilmiştir.



Şekil.3.18. Örnekleme sayısı =5 için örneklenme yerine göre aktif gücün değişimi

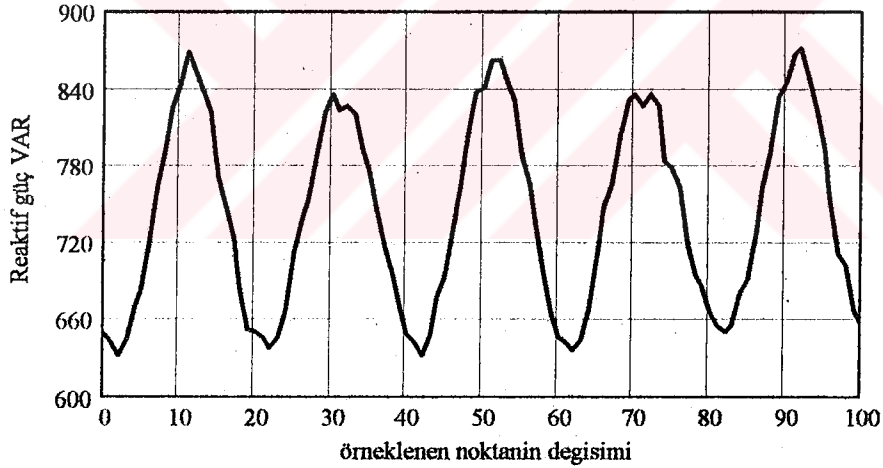
Şekil-3.18 de görüldüğü gibi örnekleme sayısı düşük olduğu zaman örnekleme noktasının yerine bağlı olarak hesaplanan güçte büyük farklılıklar ortaya çıkmaktadır. Ölçüm sonuçlarında rastlanan k faktörünün birbirine yakın değerlerinde sayaçların bazan hatalı bazan da hatasız ölçüm yapmalarının nedeni örnekleme sayısının yeteri kadar yüksek olmaması ve örnekleme noktasının yeri olabilir.



Şekil.3.19. Örnekleme sayısı =100 için örnekleme yerine göre aktif gücün değışimi

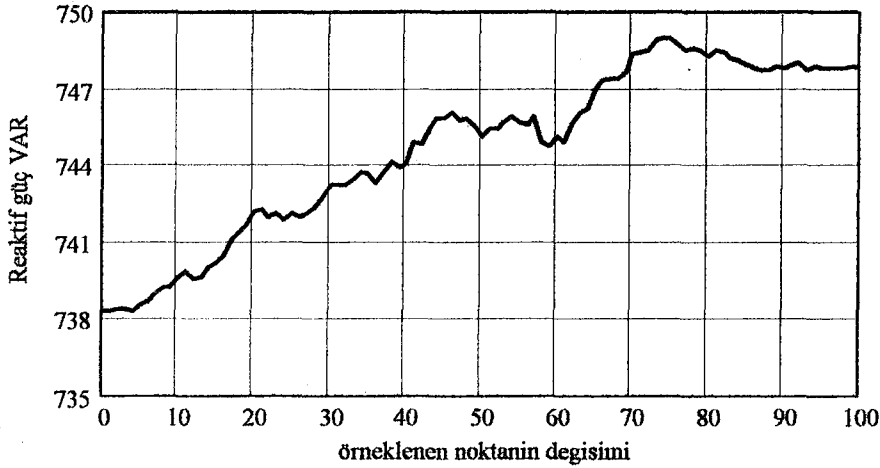
Örnekleme sayısı yükseldiği zaman yine farklılıklar olmakta ancak bu fark yüksek olmamaktadır.

Referans sayaç ile hesaplanan güç değeri arasındaki %5 civarındaki farkın bu sebeple oluştuğu söylenebilir.



Şekil. 3.20. Örnekleme sayısı =5 için örnekleme yerine göre Reaktif gücün değışimi

Örnekleme yöntemi ile aktif ve reaktif güç hesaplanmasında aynı yöntem kullanılmasına rağmen yüksek örnekleme sayısında reaktif güçteki değışimin aktif güce oranla daha fazla olduğu görülmektedir.



Şekil.3.21. Örnekleme sayısı =100 için örnekleme yerine göre Reaktif gücün değişimi

İndüksiyon tipi sayaçlar ise enerjiyi metal diskten geçen akının oranına göre ölçmektedirler. Harmonik içeriğin değişmesi ile akı miktarında büyük değişiklikler olmakta dolayısı ile hatalı ölçüme neden olmaktadır. Yapılan araştırmalarda [Driesen, 1997] da induksiyon tipi sayaçların frekansın artması ile doğru orantılı olarak hatalı ölçüm yaptıkları belirtilmiştir.

Sayaçlara yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şeklinde akım verildiğinde elektronik sayaçlardaki hatanın nedeni yine bu sayaçların ölçme yöntemi ile ilgilidir. Sayaçlar akımı entegre devreye akım transformatörü aracılığı ile iletmektedirler. Yarım dalga doğrultulmuş dalga şeklinde yüksek oranda d.a. bileşen bulunmakta olup bu d.a. bileşen transformatör ile entegre devreye iletilemediğinden elektronik sayaç enerji kaydedememiştir. Akım ölçme devresinde akım transformatörü yerine şönt direnç kullanılması d.a. bileşeni içeren akımlarda daha doğru ölçüm yapmayı sağlamaktadır.

3.6. Sonuç

Deneyisel çalışmada sayaçlara Ek-1 Tablo-1 ve Tablo-2 deki harmonik içerik ve değişik ateşleme açılarında yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şeklinde akım uygulanmış ve her iki durum için de aktif ve reaktif ölçümler yapılmıştır.

Tek sayılı harmoniklerin uygulandığı durumda elektronik sayaçlar hem aktif hem de reaktif ölçümlerde bazı harmonik içeriklerde yüzde ellinin üzerinde hatalı ölçüm yapmışlardır.

Bu hatalı ölçümlerin sebebinin toplam harmonik distorsiyon veya k faktörünün değişimine bağlı olmadığı görülmüştür.

Elektronik tip sayaçların hatalı ölçümlerinin sebebinin örnekleme sayılarının düşüklüğü (azlığı) olduğu sonucuna varılmıştır.

İndüksiyon tipi sayaçların hatalarının manyetik akının değişiminden kaynaklandığı sonucuna varılmıştır.

Sayaçlara yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şeklinin uygulanması durumunda referans sayaç ve induksiyon tipi sayaçlar doğru ölçüm yaparken elektronik tip sayacın hata yapmasının sebebinin elektronik sayacın akım örneklemesinde şönt direnç yerine akım transformatörü kullanması sebebi ile olduğu sonucuna varılmıştır.

4. kVAh ÖLÇMENİN GEREKLİLİĞİ

4.1. Giriş

Bölüm III teki deneysel çalışmadan da görüldüğü gibi bozulmuş dalga şekilli şebekede aktif ve reaktif güç ölçümünde mevcut sayaçların kullanılması durumunda yüzde ellinin üzerindeki oranlarda hatalı ölçümler yapmak söz konusudur.

Bu bölümde bozulmuş dalga şekilli şebekede ölçüm hatalarını ortadan kaldırmak için yeni bir yöntem olarak kVAh ölçen sayaç kullanılması incelenecektir. KVAh ölçen sayaç kullanılmasının ölçüm hatalarını ortadan kaldırmasının yanı sıra güç katsayısı 0.9 un altına düşen mesken enerji tüketim grubunda reaktif güç kompanzasyonu yapılmasını sağlayacağı da yine bu bölümde incelenecektir.

4.2. Türkiye’de Mevcut Enerji Fiyatlandırması Durumu ve kVAh Ölçen Sayaç Kullanımı Gerekliliği

Ülkemizin son yıllarda karşı karşıya kaldığı enerji krizi araştırmacıları bir yandan yeni enerji kaynaklarına yöneltirken diğer yandan daha verimli sistemlerin tasarlanması ve elektrik enerjisinin daha tasarruflu kullanılması yönünde çalışmalarını yoğunlaştırmalarına neden olmuştur.

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 enerji tüketmeleri halinde reaktif enerji bedeli ödemek durumundadırlar. 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 [Şenol, 2000].

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 [Selçuk, 2000] 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.

Konutlara reaktif bedeli uygulamak için hem aktif hem reaktif sayaç kullanmak yerine kilo-volt-amper-saat (kVAh) ölçen tek bir sayaç kullanmak daha ekonomik olacaktır. Halen elektrik dağıtım şirketleri, elektronik sayaç kullandırmak ve tarifeli sisteme geçişi özendirmek için cazip tarife seçenekleri sunarken bu değişikliğin kWh yerine kVAh ölçen sayaç ile yapılması ile tüketicilere ek bir külfet getirilmemiş olacaktır. Ayrıca aktif ve reaktif enerji tarifelerini hesaba katmadan, aktif ve reaktif enerji bedellerini içerisinde bulunduran tek bir kVAh bedeli alınması ile tüketiciler güç katsayılarını bire yaklaştırdıkları oranda faturalarında somut bir düşme görecektir.

Sanayi ve ticarethanelerde reaktif güç ölçümü yapılmasına rağmen Bölüm III te görüldüğü gibi bozulmuş dalga şekilli şebekede reaktif gücün ölçülmesi sağlıklı olarak yapılamadığından reaktif güç ölçümü yerine görünür güç ölçmek ve bunun için kVAh ölçen sayaç kullanmak bu problemleri çözecektir.

Görünür güç ölçümü konusunda bazı çalışmalar literatürde rapor edilmiştir. Hindistan'da Görünür Enerji Araştırma Merkezinde Görünür güç ölçme [Kamat, 1999] ve görünür güç ölçmenin enerji iletim ve dağıtım şebekelerine faydaları [Kamat, 1999], kVAh ölçen sayaca geçme konusunda uygulanacak özendirici tarife oranları konularında araştırmalar yapılmaktadır [Kamat, 1999].

Brezilya'da herhangi bir voltaj kaynağı gerektirmeyen sadece sayaç içerisindeki bir kondansatörün müşterinin çektiği akım ile şarj ve deşarj olması ilkesine göre çalışan Ah (Amper Saat) metre üzerinde bir çalışma yapılmıştır [Caldas, 1996]. Ancak radyal karakterdeki şebekelerde gerilim profili genellikle dengesiz olup hat başında ve sonunda farklılıklar göstermektedir. Dolayısıyla Ah temelli bir fiyatlandırmanın radyal dağıtım şebekelerinde sıhhatli bir sonuç vermeyeceği açıktır.

4.3. Türkiye'de Enerji Tüketimi Durumu

Tablo-4.1 de 1997 yılına ait elektrik tüketimlerinin bölgelere göre sektörel dağılımı sunulmuştur. Bu tablo incelenirse Türkiye'deki elektrik tüketiminin büyük kısmını sanayii tüketiminin oluşturduğu buna karşın meskenlerin %22.98 lik bir paya sahip olduğu görülür. Sanayi, resmi daireler ve ticarethanelerde kullanılan enerjinin fiyatlandırılmasında aktif enerjinin yanında reaktif enerji de dikkate alınmakta, güç katsayısını 0.95 ve üzerine çıkarmayan abonelerden reaktif enerji bedeli alınmaktadır.

Tablo. 4.1. Elektrik tüketimlerinin bölgelere göre sektörel dağılımı
(MWh 1997) [Selçuk, 2000]

Bölgeler	Mesken	Ticaret	Resmi D.	Sanayii	Aydınlatma	Diğer	Toplam
Akdeniz	2.045.230	1.059.662	448.094	5.030.447	451.484	604.769	9.639.686
D.Anadolu	775.202	149.679	216.845	1.074.664	242.060	284.819	2.743.269
EGE	2.563.097	1.059.554	624.888	8.174.176	553.183	862.570	13.837.468
G.D. Anadolu	906.747	197.657	275.502	1.795.172	453.251	544.632	4.172.961
İç Anadolu	2.853.200	1.095.081	643.387	4.915.293	441.977	1.049.240	10.998.178
Karadeniz	1.729.796	350.411	260.806	3.858.654	414.833	259.834	6.855.748
Marmara	6.744.763	2.940.349	1.335.936	17.344.600	753.449	2.305.250	31.424.347
Türkiye	18.514.435	6.852.493	3.805.458	42.193.006	3.310.237	5.911.114	80.568.157
	%22,98	%8,51	%4,72	%52,37	%4,11	%7,34	%100,00

Bu uygulama ile bu tüketim grubu kompanzasyon yapılmaya zorlanmış ve güç katsayısının düzeltilmesinde önemli mesafeler alınmıştır.

Tablo-4.2 de ise 1998 yılına ait kaçak ve kayıp değerleri sunulmaktadır. Görülen kayıp ve kaçakların yaklaşık 1/3'ü iletimden doğan kayıplar olup kaçak enerji yaklaşık %13 lük bir oran oluşturmaktadır.

Tablo. 4.2. 1998 yılı kaçak ve kayıp değerleri [Selçuk, 2000]

Yıl	GWh	%
1998	15.485	19,5
1999	16.726	20,4

Türkiye ortalaması olan %19,5'lik kayıp ve kaçaklar Doğu ve Güneydoğu bölgelerinde %50-60 oranlarına ulaşmaktadır. Bu bölgelerde sanayiinin gelişmediği de düşünülürse kaçak enerjinin büyük çoğunluğunun konutlarda tüketildiğini söylemek yanlış olmayacaktır.

Kaçak enerjinin yıllık net tüketim değerlerine dağıtılması ile hanelerde kullanılan enerji miktarı %25 ile %30 lar mertebesinde olacaktır. Yukarıda da görüldüğü gibi konutlar elektrik enerjisinin önemli bir kısmını tüketmelerine rağmen geçtiğimiz son birkaç on yılın uygulamasının devamı olarak sadece tükettikleri aktif enerji ile faturalandırılmaktadırlar.

Geçtiğimiz son birkaç onyıda konutların elektrik enerjisi talebinde büyük değişiklik olmuştur. Elektrik önceleri sadece aydınlatmada kullanılırken günümüzde çamaşır makinesi, buzdolabı, televizyon, klima ve benzeri cihazların kullanımı ile konutlarda güç faktörü düşük seviyelere inmiştir.

Konutların enerji tüketimleri konusunda yurtdışında da değişik araştırmalar yapılmış fakat rastlanılan araştırmalar daha çok konutların yıllık enerji tüketimleri, cihazların harcadığı enerji, hava durumunun değişimine göre konutların elektrik enerjisi tüketim değerlerinin değişimi ve hane geliri ile elektrik tüketiminin değişimi konularındadır [Florida Güneş Enerjisi Merkezi web adresi, 2001].

Konutların güç katsayıları ile ilgili değişiklikleri analiz edebilmek için bazı ev aletlerine ait güç katsayıları ölçülerek Tablo 4.3 de sunulmuştur. Ayrıca tabloda

gösterilen cihazların bulunduğu bir evin tüketimi izlenmiş ve ortalama güç faktörü 0,88 olarak bulunmuştur.

Bu konuda yapılan bir araştırmada konutların güç faktörü trafo merkezlerinde ölçülmüş olup 0,74 ile 0,94 arasında değiştiği ve ağırlıklı ortalama olarak ta 0,85 olduğu görülmüştür [Alboyacı, 2002].

Tablo. 4.3. Bazı ev aletlerinin güç faktörleri

Televizyon	0,71
Buzdolabı	0,56
Bilgisayar	0,75
Mutfak robotu	0,95
Elektrik Süpürgesi	0,73
Çamaşır makinası(ısıtıcı hariç)	0,82
Bulaşık makinası (ısıtıcı hariç)	0,82

Tablonun incelenmesinden görüleceği gibi bir çok ev aletinin güç katsayısı birden uzaktır. Ancak tipik bir Türk ailesinin enerji tüketim alışkanlığının analizi, sağlıklı bir enerji politikasının geliştirilmesi için elzemdir.

4.4. Görünür Güç ve Aktif Gücün Ölçülmesi

Geçmişte gerek görünür güç ölçmenin zorluğu gerekse konutlarda elektriğin sadece aydınlatma amacı ile kullanılması sebebi ile enerji ölçümünde kWh kullanılmıştır. Gelişen elektronik sayaç teknolojisi ile görünür güç ölçümü, halihazırda bulunan mikroişlemcilerin kullanımı ile basit bir şekilde mümkün hale gelmiştir. Görünür güç (4.1) de verilen formülle tanımlanır;

$$VA = V_{rms} I_{rms} \quad (4.1)$$

Görünür enerji ise ;

$$VAh = \int_0^t V_{rms} I_{rms} dt \quad (4.2)$$

olarak hesaplanabilir. (4.1) ve (4.2) denklemlerinden de görüldüğü gibi görünür güç ve enerji temel akım ve gerilim parametreleri ile tanımlanmaktadır. Şayet sinüs

biçimli değişen ideal bir gerilim kaynağı ($V_m \sin \omega t$) ve rezistif bir yük düşünülecek olursa; akım da sinüs biçimli değişir ($I_m \sin \omega t$), bu durumda ani güç:

$$p = v(t)i(t) = V_m I_m \sin^2 \omega t = \frac{V_m I_m}{2} (1 - \cos 2\omega t) \quad (4.3)$$

olarak elde edilir. Yükün güç faktörünün 0,5 olduğu varsayalım. Bu, akımın, gerilimin $\pi/3$ radyan gerisinde olması demektir. Bu durumda ani güç:

$$p = \frac{V_m I_m}{2} (\cos \phi - \cos(2\omega t - \phi)) \quad (4.4) \text{ veya}$$

$$p = \frac{V_m I_m}{4} \left(1 - 2 \cos(2\omega t - \frac{\pi}{3}) \right) \quad (4.5)$$

olarak elde edilir. (4.3) ve (4.5) denklemleri karşılaştırılırsa endüktif yükte tüketilen aktif gücün ideal yüke göre yarı yarıya azaldığı görülmektedir. Yani bir aktif enerji sayacı ile tüketimi ölçülen bir tüketici, aynı rms akım değeri için ideal yüktekinin yarısı kadar ücret ödeyecektir.

Oysa görünür güç, yükün durumundan bağımsız olduğu için görünür güç ölçen bir sayaç kullanıldığında güç katsayısının değişiminden bağımsız olarak her durumda aynı enerji miktarı ölçülecektir.

Akım ve gerilimin harmonik içeriği bulunması durumunda da aktif güç (4.6) da görüleceği gibi güç katsayısına bağlı olarak değişim gösterir. Şebekeden çekilen akım değişmemesine rağmen güç katsayısının değişimine bağlı olarak kWh ölçen sayacın kaydettiği güç yüksek güç katsayılı duruma göre daha düşük olacaktır.

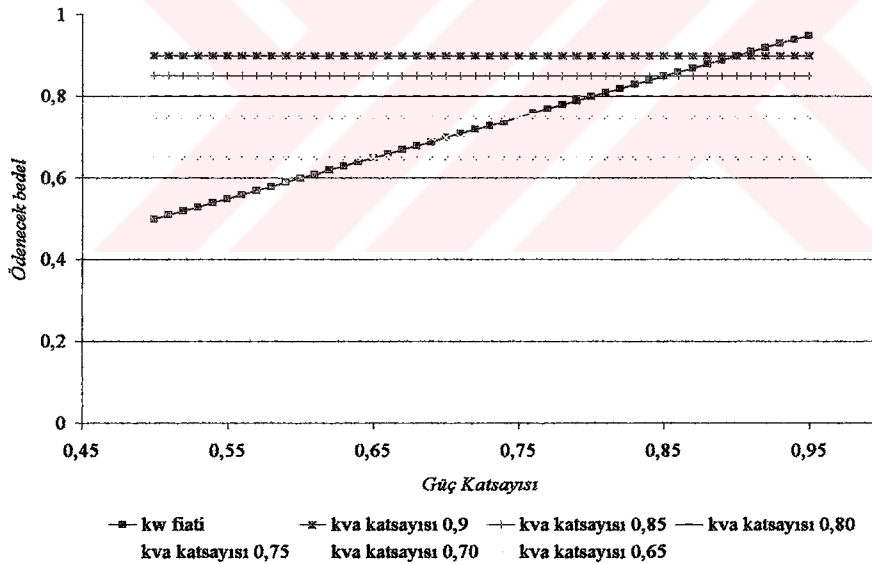
$$P = \sum_{h=1}^n V_h I_h \cos \theta_h \quad (4.6)$$

Görünür gücün temel güç birimi olması sebebi ile harmonik içerikli akım ve gerilim ölçümü durumunda da görünür güç, güç katsayısından bağımsız olarak (4.1) deki formül ile güç katsayısına bağlı olmadan ölçülebilir.



4.5. Fiyatlandırma

Bugünlerde Elektrik Dağıtım şirketleri tarafından tarifeli tüketime dolayısıyla elektronik sayaca geçme cazip tarife seçenekleri ile özendirilmeye çalışılmaktadır. Oysa sayaç değişikliği ile birlikte ölçme sistemi de değiştirilip kVAh ölçümü yapan sayaç kullanımına geçmek ve yine tarife uygulaması ile tüketimi gün içerisinde yaymak mümkündür. Uygulanacak etkili bir fiyat politikası ile hem tüketiciler kVAh sayacı kullanmaya teşvik edilmiş olacak hem de güç katsayısı düşük olan tüketiciler güç katsayılarını yükseltmeye zorlanacaklardır. Şekil 4.1 ve 4.2 de 1 kVAh elektrik enerji tüketimi esas alınmış ve 1 kWh elektrik enerjisinin fiyatı 1 birim olarak alınmıştır. Şekil 4.1 de tüketicinin kompanzasyon yapmadığı düşünülerek çeşitli güç katsayıları için yapacağı ödemeler gösterilmiştir. Burada yatay çizgiler yükten bağımsız kVAh tarifelerini, doğru ise güç faktörünün değişimi ile sabit 1 kVAh lik tüketim için değişen kWh bedelini göstermektedir.



Şekil.4.1. Kompanze edilmemiş bir sistemin çeşitli güç katsayıları için ödeyeceği bedel

Açıkça görüleceği üzere kWh ölçülmesi durumunda aynı tüketim değeri için (örneğimizde 1 kVAh) güç faktörünün değişimine göre sayacın yazacağı enerji miktarı azalıp çoğalmaktadır. Oysa kVAh ölçen sayaç kullanıldığında güç faktöründen bağımsız olarak şebekeden çekilen toplam görünür güç ölçüldüğü için ödenecek bedel sabit kalmaktadır.

kVAh ölçen sayaç kullanılması durumunda izlenilecek fiyat politikası çok önemli olacaktır. 1 kVAh tüketimin fiyatını belirlemek için 1 kWh tüketim bedelinin çarpılacağı katsayı (kva katsayısı) ile durum açıklanmaya çalışılmıştır.

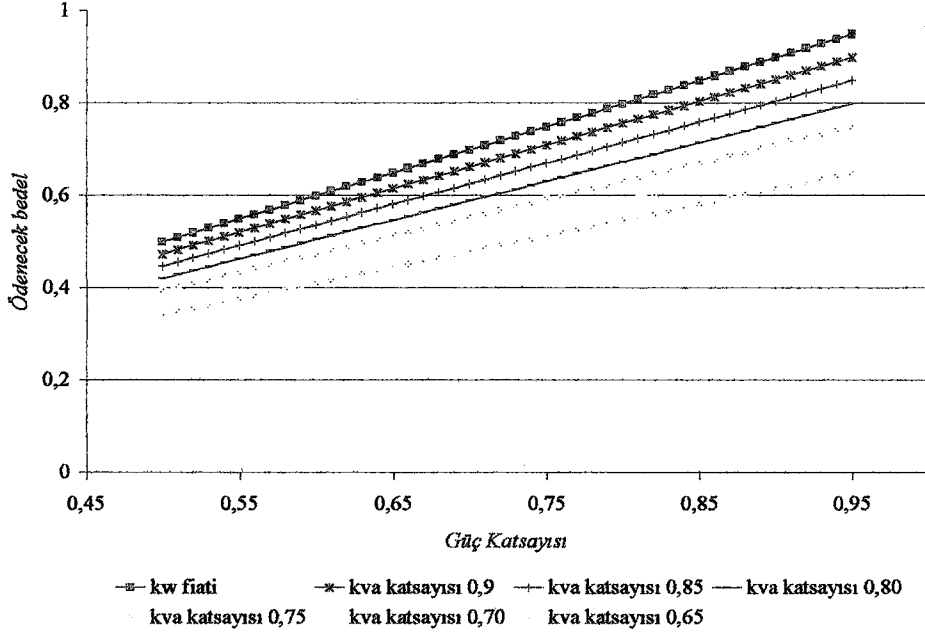
Şekil-4.2 de tüketicinin kompanzasyon yaptığı düşünülmüş ve değişik fiyat seçenekleri ile tüketicinin ödeyeceği miktar gösterilmiştir.

Şekilde en üstteki çizgi (kWh fiyatı) 1kVAh lik tüketimin aktif sayaç ile ölçülmesi durumunda değişik güç katsayılarına göre bedelini göstermektedir. Bu bedel güç faktörünün azalması durumunda azalmakta artması durumunda ise artmaktadır.

Tüketicinin güç katsayısını 0.95'e yükseltecek şekilde kompanzasyon yaptığı düşünüldüğünde Şekilden de açıkça görüldüğü gibi, tüm güç faktörleri ve kva katsayıları için kWh tarifesine göre daha az enerji bedeli ödeyecektir.

Kompanzasyon yapılmaması durumunda 1 kVAh tarifesini kWh tarifesinden daha pahalı duruma gelecektir bu da tüketicileri kompanzasyon yapmaya teşvik edecektir. Ayrıca halen yürürlükte olan uygulamaya göre tüketicilerden güç faktörlerini 0.95'e yükseltmeleri istenmekte iken kVAh ölçülmeye başlanması ile tüketiciler hedef olarak 0.95 güç katsayısı yerine faturalarında daha fazla indirim sağlayacak 1.0 değerine ulaşmaya çalışacaklardır.

Şekil-4.1 de kompanzasyon yapılamama durumu Şekil-4.2 de ise kompanzasyon yapılması halinde değişik kVAh birim fiyatları için güç faktörüne göre ödenecek fiyat gösterilmiştir. Birbirine paralel eğriler değişik katsayı seçenekleri için ödenecek olan fiyatı göstermektedir.



Şekil.4.2. Kompanze edilmiş bir sistemin çeşitli güç katsayıları için ödeyeceği bedel

Fiyat katsayısının düşük seçilmesi halinde enerji dağıtım firmalarının kWh ölçme durumuna göre bir hayli gelir kayıpları olacağı gibi, katsayının yüksek tutulması da tüketicileri kVAh ölçen sayaç kullanmaktan caydıracaktır. Bu yüzden hem tüketicileri kVAh ölçen sayaç kullanımına özendiren hem de elektrik dağıtım şirketlerinin gelirlerinde kayba yol açmayan bir katsayı belirlenmesi zorunluluğu vardır.

Tablo-4.4 de 1998 tüketim değerleri esas alınarak Türkiye genelinde konutlarda kVAh ölçüm sistemine geçilmesi halinde değişik fiyat katsayılarında kWh ve kVAh ölçümleri arasındaki fiyatlandırma farkı sunulmuştur.

Görüldüğü gibi tüketiciler kompanzasyon yapmadıkları ve güç katsayıları yüksek olduğu takdirde yine aynı faturayı ödeyecekler fakat, güç faktörü düşük olan tüketiciler kompanzasyon yapmadıkları takdirde daha fazla ücret ödeyeceklerdir. Tüm tüketicilerin kompanzasyon yaptığında elektrik dağıtım şirketlerinin fiyatlandırmada zararı oluyor gibi görünse de şebekede dolaşan reaktif akımlar önemli ölçüde azalmış olacağından iletim kayıplarının azalması, hatlarda ek kapasite yaratılması gibi faydalarla bu gelir kaybı dengelenecektir.

Tablo.4.4 Kompanzasyon yapılması ve yapılmaması durumlarında oluşacak fiyat farkı.

Toplam aktif tüketim (kWh)	20.034.000.000	Cos ϕ	0,85
Toplam kW bedeli (\$)	1.803.060.000	1 kWh ücreti	9 cent
	Kompanzasyon yapılmaması halinde	Kompanzasyon yapılması halinde (Güç Katsayısı 0.95)	
Toplam görünür tüketim kVAh	23.569.411.765	21.088.421.053	
	kVAh bedeli (\$)	kVAh-kWh (\$)	kVAh bedeli kVAh-kWh(\$)
kVA katsayısı=0.8	1.696.997.647	-106.062.353	1.518.366.316 -284.693.684
kVA katsayısı=0.85	1.803.060.000	0	1.613.264.211 -189.795.789
kVA bedeli k=0.9	1.909.122.353	106.062.353	1.718.162.105 -94.897.895
kVA bedeli k=0.93	1.972.759.765	169.699.765	1.765.100.842 -37.959.158

Yukarıdaki sayısal örnekte görünür güç 23.569.411.765 kVAh ten 21.088.421.053 kVAh e düşmüştür. Yani 2.480.990.712 kVAh lik (%10.5) bir kapasite artışı gerçekleşmiştir.

4.6. KVA Fiyatlandırması ve KVA Ölçen Sayaç Kullanımının Faydaları

Elektrik enerjisinin ölçülmesinde aktif ve reaktif gücün farklı sayaçlarla ölçülmesi yerine kVAh ölçen sayacın kullanılması tüketici açısından aşağıdaki faydaları sağlayacaktır:

- Ekonomik, aktif ve reaktif sayaç yerine tek sayaç kullanılması.
- Tek fiyat ile aktif ve reaktif enerjinin ayrı ayrı fiyatlandırılması yerine tek terim ile fatura hesaplanması.
- Tüketicileri belirli kompanzasyon değerine yönlendirmek yerine mümkün olan maksimum kompanzasyon değerine yönlendirerek mümkün olduğu kadar faturalarında düşüş sağlayacak olması.

kVAh ölçen sayacın kullanılması iletim-dağıtım firmaları için de aşağıdaki faydaları sağlayacaktır:

- Sistemin güç katsayısı yükseleceğinden iletim hatlarının kapasitesi artacaktır.
- Hatlardaki iletim kayıpları azalacaktır.
- Güç katsayısını yükseltmeyen tüketici, kullandığı reaktif enerjinin bedelini ödeyecektir.
- Faturaların tek terim ile yapılmasıyla faturalama işlemleri sadeleşecek ve hızlanacaktır.
- kVAh ölçen sayacın fiyat avantajı ile özendirilmesi, elektronik sayacın avantajlarından faydalanarak tarifeli sisteme geçmek, enerji tüketimini tarifeler yardımı ile gün içerisine yaymak, pik saatlerde enerji talebini azaltmak neticelerini de sağlayacaktır..

4.7. Sonuç

Piyasadaki mevcut sayaçlar ile sinüsoidal olmayan koşullarda yapılan reaktif güç ölçümünde hatalı ölçüm söz konusudur. Bu hata harmonik içeriğe bağlı olarak %50'ler mertebesine çıkabilmektedir. Faturalandırma işlemi de iki ayrı güç tanımına göre yapılmaktadır. Ayrıca toplam tüketimin %30'unu oluşturan konutlarda reaktif güç ölçümü yapılmadığından reaktif güç kompanzasyonu da söz konusu değildir.

Görünür güç ölçen sayaç kullanılması durumunda görünür gücün tanımı ve hesaplama yöntemi nedeni ile bu ölçüm hataları ortadan kalkacaktır. Faturalandırma işlemi tek bir terime bağlı olduğu için daha basit olacak ve konutlarda da ölçülen görünür güç ile reaktif tüketim faturalara yansiyacaktır. Ayrıca görünür güç ölçen sayaç kullanımına geçilmesi ile elektronik sayaçların pek çok avantajlarından da yararlanılabilecektir.

5. SONUÇLAR VE GELECEĞE YÖNELİK ÇALIŞMALAR

Bu tezde bozulmuş dalga şekilli şebekede güç ölçümü konusu incelenmiştir. II. Bölümde standartlara ve değişik yaklaşımlara göre güç hesaplama yöntemleri incelenmiştir. Akım ve gerilimin harmonikler içermesi durumunda reaktif güç ölçümü konusunda ilk yöntem Budenau tarafından verilmiş olup bu yöntem IEEE tarafından kabul görmüş ve IEEE 1459 Standardında yer almıştır. Budenau'nun tanımının IEEE tarafından kabul görmesi ve deneylerde kullanılan sayaçların Budenau reaktif gücüne yakın güç ölçümü yapmaları nedeni ile çalışmada sayaçlar Budenau reaktif gücüne göre kıyaslanmıştır.

III. Bölümdeki deneysel çalışmada sayaçlara tek sayılı harmonikler ile yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şekli uygulanmıştır. Deneylerde sayaçlara uygulanan akım ve gerilim harmonik analizörü aracılığı ile kaydedilerek elde edilen dataların kullanılması sonucu değişik yaklaşımlara göre aktif ve reaktif güç değerleri hesap edilmiştir. Deneyler ilk önce akım kaydetmede akım pensu kullanılarak tamamlanmıştır. Ancak akım pensinin faz kaydırması ve bu faz kaydırmasının kalibre edilerek elimine edilememesi nedeni ile akım kaydetmek için akım devresine seri direnç bağlanmış ve bu direnç üzerindeki gerilim düşümü akıma çevrilerek deneyler tamamlanmıştır.

Tek sayılı harmoniklerin uygulanması durumunda sayaçlar, belirli harmonik içeriklerde hem aktif hem reaktif ölçümlerde yüzde elli ve üzerinde ölçüm hataları yapmışlardır. Bu ölçüm hatalarının toplam harmonik distorsiyona veya frekansa göre ağırlıklı olarak harmonik miktarını gösteren k faktörüne bağlı olmadığı görülmüştür. Elektronik sayaçların hatalarının örnekleme sayılarının düşüklüğü (azlığı) nedeni ile induksiyon tipi sayaçların hatalarının ise yüksek frekanslarda ölçüm devresindeki metal diskten geçen manyetik akının azalması nedeni ile olduğu anlaşılmıştır.

Sayaçlara yarım dalga doğrultulmuş sinüs dalga şekli uygulanması durumunda elektronik tip sayaçlar hem reaktif hem aktif ölçümlerde yüzde 80 ve üzerinde hatalı

ölçümler yapmışlardır. Bu hataların sebebinin entegre devreye akımı ileten akım transformatörünün d.a. içerikli akımı iletmemesi olduğu anlaşılmıştır. Ateşleme açısının büyümesi ve buna bağlı olarak d.a. içeriğinin azalması ile sayaçların Budenau reaktif gücüne yakın ölçüm yaptıkları görülmüştür.

Örnekleme sayısı ile ölçülen gücün değişimi incelenmiş ve örnekleme sayısının düşük olması durumunda ölçülen gücün yüzde elliye varan oranlarda hatalı ölçüme sebebiyet verebileceği örnekleme sayısının 100 ve üzerinde olması durumunda ise ölçüm hatasının yüzde bir seviyesine gerilediği gösterilmiştir.

Bozulmuş dalga şekilli şebekede reaktif gücün mevcut sayaçlar ile hatalı ölçülmesi ve güç katsayısının yanlış hesaplanması sebebi ile reaktif güç kompanzasyonunun sağlıklı yapılamadığı anlaşılmıştır.

Elektronik sayaçlar için mecburi olarak yürürlükte bulunan TS EN 61036 ve TS EN 61268 Standartlarındaki harmonik içerikli deneylerin yeterli olmadığı şebekede rastlanabilecek harmonik içerikli dalga şekillerini içeren deneylerin eklenmesi gerektiği anlaşılmıştır.

Bölüm IV’de konutların elektrik tüketiminin toplam tüketimin yüzde otuzluk bölümünü oluşturduğu ve konutların enerji tüketim profilinin değişmesi nedeni ile güç katsayılarının 0.9’un altına indiği buna karşın bu tüketim grubunda reaktif güç ölçümü yapılmadığı belirtilmiştir.

Konutların reaktif güçlerinin ölçülebilmesi ve bozulmuş dalga şekilli şebekede aktif ve reaktif güç ölçümündeki hatalı ölçümlerin önüne geçilmesinin yüksek örneklemeli görünür güç ölçen elektronik sayaç kullanımı ile sağlanabileceği gösterilmiştir .

Görünür güç ölçen elektronik sayaç kullanımına geçilmesi ile elektronik sayacın induksiyon sayaçlara göre üstün olan pek çok özelliğinden faydalanılacağı gibi güç tüketimi de günün değişik saatlerine kaydırılabilecektir.

Türkiye'deki enerji tüketimi durumu incelenmiş ve görünür güç ölçen sayaç kullanılması ve etkin bir fiyat politikası izlenmesi durumunda konutların reaktif güç kompanzasyonu yapmak durumunda kalacakları ve yapılan bu kompanzasyon sonucunda elektrik şebekesinin daha etkin şekilde kullanılabileceği gösterilmiştir. Ayrıca elektronik tip görünür güç ölçen sayaç kullanımı ile elektronik sayaçların getirdiği avantajlardan faydalanılabileceği tüketimin gün içerisinde yayılarak pik saatteki enerji talebinin düşürülebileceği gösterilmiştir.

Gelecekte çalışmaya devam edilmesi arzulanan konular olarak, görünür güç ölçen sayaç tasarımı, güç katsayısının hesaplanması ve reaktif güç ölçümü için en uygun hesaplama yöntemin belirlenmesi, harmonikli yük kullanan aboneler için uygulanabilecek fiyat tarifeleri, bozulmuş dalga şekilli durumlar için standartlarda yapılması gereken revizyon çalışmaları ve konutların enerji tüketim profilinin belirlenmesi gibi çalışmalar olabilir.

KAYNAKLAR

- [1] [Şenol, 2000] Şenol, M. A.; "Elektrik Enerjisinin Verimli Kullanılmasına Yönelik Tasarruf Tebdirlerine Genel Bir Bakış", Kaynak Elektrik Dergisi, sayfa 102-107, şubat 2000.
- [2] [Selçuk, 2000] Selçuk, N. ve Arabul, H.; "Elektrik Enerjisinde Ulusal Politika", Rapor, Ankara ve İstanbul Sanayi Odaları Yayını, Ekim 2000
- [3] [Pilipski, 1992] 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.
- [4] [Kamat, 1999] Kamat, V. N.; "Can Apparent Energy be Computed as a Vector Sum of Active and Reactive Energies", Electrical India, Vol. 23, pp. 11-17. December 15, 1999.
- [5] [Hocaoğlu, 2001] Hocaoğlu, M. H.ve Cemek, H.; "Görünür Güç Ölçen Sayaç – Yeni Bir Enerji Fiyatlandırma Sistemi", TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 9. Ulusal Kongresi, cilt II, sayfa 223-227, 2001.
- [6] [Alboyacı, 2002] Alboyacı, B., Yeğin E. M. ve ark.; "Konut Bölgelerinde Dağıtım Trafolarının Güç İhtiyacı ve Trafolara Gelen Yükün Güç Kalitesine Etkileri", TMMOB Elektrik Mühendisleri Odası Elektrik-Elektronik-Bilgisayar Mühendisliği 10. Ulusal Kongresi, cilt I, sayfa 40-43, 2003.
- [7] [Acha, 2001] Acha, E. and Madrigel, M.; "Power Systems Harmonics Computer Modelling and Analysis", John Wiley, 2001.
- [8] [Dugan, 1996] Dugan, R. C., McGranagan, M. F. and Beaty, H. W.; "Electrical Power Systems Quality", Mc Graw-Hill, 1996.
- [9] [IEEE Std 1459, 2000] IEEE Std 1459, "Definitions for the Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions", 2000.
- [10] [Schlabach, 2001] Schlabach, J., Blume, D. and Stephanblame T.; "Voltage Quality in electrical power systems", IEE Publishing, 2001.
- [11] [Fryze, 1932] Fryze, S.; "Wirk-, Blind- und Scheinleistung in Elektrischen Stromkreisen mit nichtsinüs-förmigen verlauf von Strom und Spannung, Elektrotechnische Zeitschrift", pp. 596-599, 1932.

- [12] [Shepherd, 1972] Shepherd, W. and Zakikhani, P.; "Suggested definition of reactive power for nonsinusoidal systems", Proc. IEE, 119, pp. 1361-1362, 1972.
- [13] [Sharon, 1973] Sharon, D.; "Reactive power definition and power factor improvement in nonlinear systems", Proc. IEE, 120, pp. 704-706, 1973.
- [14] [Emanuel, 1977] Emanuel, A E.; "Energetical factors in power systems with nonlinear loads", Archiv für Elektrotechnik, 1977.
- [15] [TS 786 IEC 60145, 1999] TS 786 IEC 60145; "Sayaçlar - VAR - Saat Metre (Reaktif Enerji Sayaçları)", Ocak 1999.
- [16] [TS 461 EN 60521, 1998] TS 461 EN 60521; "Sayaçlar - Alternatif Akım Aktif Enerji İçin 0,5; 1 ve 2 Sınıfı", Aralık 1998.
- [17] [TS EN 61036, 1998] TS EN 61036; "Sayaçlar - Alternatif Akım Statik Watt Saat Metreleri Aktif Enerji İçin (Sınıf 1 Ve Sınıf 2)" Şubat 1998.
- [18] [TS EN 61268, 2003] TS EN 61268; "Elektrik Sayaçları-Alternatif Akım Statik Reaktif Sayaçlar-Reaktif Enerji İçin (Sınıf 2 ve Sınıf 3)", Nisan 2003.
- [19] [Cox, 1990] 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.
- [20] [Driesen, 1997] Driesen J., Craenenbroeck, T. and Van Dommelen, D.; "The Registration of Harmonic Powers by Analogue and Digital Power Meters", IEEE Instrumentation and Measurement Technology Conference, Ottawa, Canada, pp 291-296, May 19-21, 1997.
- [21] [Kamat, 1999] Kamat, V.N.; "Apparent Energy Measurement - a Solution to Inductive Load, Harmonics, and Switching Load Problems", Internal Report, Centre for Apparent Energy Research BEM Ltd., Anand-Sojitra Road, Vithal Udyognagar, Gujarat, India 1999.
- [22] [Kamat, 1999] Kamat, V. N.; "Proposal for Total (Apparent) Energy Low Tension Power Tariff Policy", Power Engineer, New Delhi, Vol 47, No 2, pp. 26-30, April 1999.
- [23] [Caldas, 1996] Caldas, R. P., Lippincott, M., et al.; "Very Low Cost Meters for Low Power Consumers", IEE Power Engineering Journal, pp 176-180, August 1996.
- [24] [Florida Güneş Enerjisi Merkezi web adresi, 2001] Florida Güneş Enerjisi Merkezi web adresi, <http://www.fsec.ucf.edu/~bdac/pubs/PF300/HHPPR.htm>, erişim tarihi 07.06.2001.

ÖZGEÇMİŞ

1967 yılında Ankara'da doğdu. Lise öğrenimini Ankara Çankaya Lisesi'nde tamamladı. 1989 Yılında Gazi Üniversitesi Mühendislik Mimarlık Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümünden Elektrik Mühendisi olarak mezun oldu. 1990-1992 yılları arasında MTA Genel Müdürlüğü'nde, 1992-1999 yılları arasında Ankara Üniversitesi'nde çalıştı. Halen 1999 yılında başladığı TSE Kalite Kampusü Bölge Müdürlüğünde Elektrik Mühendisi olarak çalışmaktadır.



EKLER



EK-1

Tablo-1 $\varphi_1 = 30^\circ$ için Sayaçlara uygulanan Harmonik Tablosu.

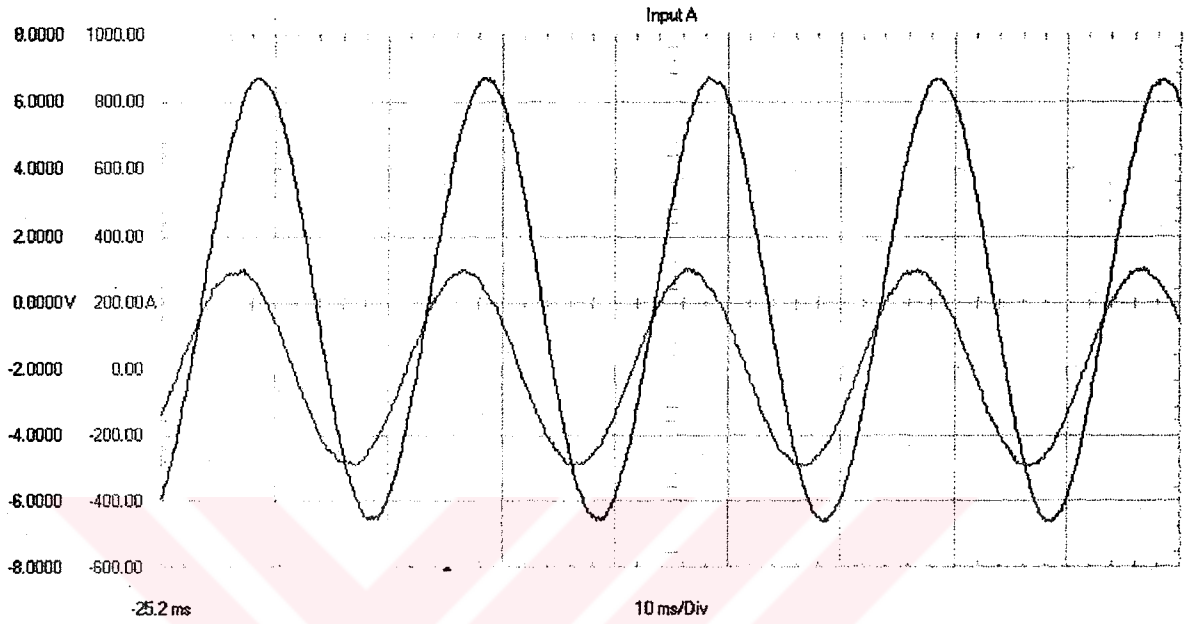
H.adı	1.harm.	3.harm.	5.harm.	7.harm.	9.harm.	11.harm.	13.harm.	15.harm.	17.harm.	19.harm.
F1H1	89< 30	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F1H2	89< 30	20 < 90	0	0	0	0	0	0	0	0
F1H3	89< 30	20 < 90	12 < 150	0	0	0	0	0	0	0
F1H4	89< 30	20 < 90	12 < 150	8,60 < 210	0	0	0	0	0	0
F1H5	89< 30	20 < 90	12 < 150	8,60 < 210	6,7 < 270	0	0	0	0	0
F1H6	89< 30	20 < 90	12 < 150	8,60 < 210	6,7 < 270	5,5< 330	0	0	0	0
F1H7	89< 30	20 < 90	12 < 150	8,60 < 210	6,7 < 270	5,5< 330	4,6 < 30	0	0	0
F1H8	89< 30	20 < 90	12 < 150	8,60 < 210	6,7 < 270	5,5< 330	4,6 < 30	4 < 90	0	0
F1H9	89< 30	20 < 90	12 < 150	8,60 < 210	6,7 < 270	5,5< 330	4,6 < 30	4 < 90	3,5 < 150	0
F1H10	89< 30	20 < 90	12 < 150	8,60 < 210	6,7 < 270	5,5< 330	4,6 < 30	4 < 90	3,5 < 150	3,2 < 210

Tablo-2 $\varphi_2 = 25^\circ$ için Sayaçlara uygulanan Harmonik Tablosu.

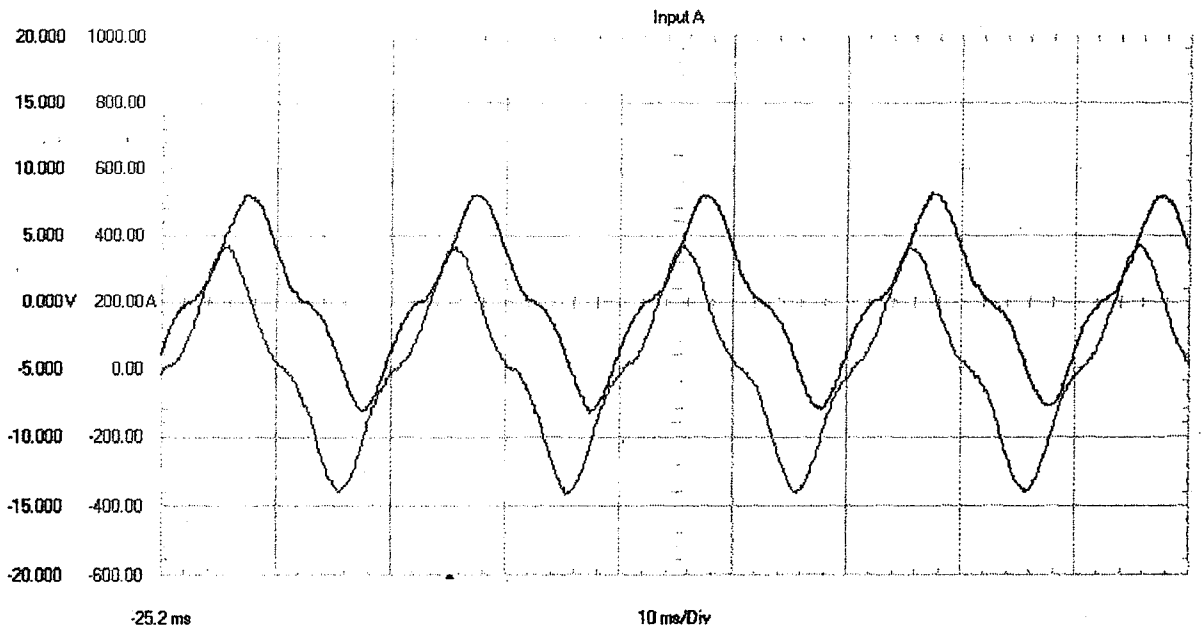
H.adı	1.harm.	3.harm.	5.harm.	7.harm.	9.harm.	11.harm.	13.harm.	15.harm.	17.harm.	19.harm.
F2H1	100<25	0	0	0	0	0	0	0	0	0
F2H2	100<25	20<75	0	0	0	0	0	0	0	0
F2H3	100<25	20<75	12 < 125	0	0	0	0	0	0	0
F2H4	100<25	20<75	12 < 125	8,6<175	0	0	0	0	0	0
F2H5	100<25	20<75	12 < 125	8,6<175	6,7 < 225	0	0	0	0	0
F2H6	100<25	20<75	12 < 125	8,6<175	6,7 < 225	5,5<275	0	0	0	0
F2H7	100<25	20<75	12 < 125	8,6<175	6,7 < 225	5,5<275	4,6<325	0	0	0
F2H8	100<25	20<75	12 < 125	8,6<175	6,7 < 225	5,5<275	4,6<325	4<15	0	0
F2H9	100<25	20<75	12 < 125	8,6<175	6,7 < 225	5,5<275	4,6<325	4<15	3,5<65	0
F2H10	100<25	20<75	12 < 125	8,6<175	6,7 < 225	5,5<275	4,6<325	4<15	3,5<65	3,2<115

EK-2

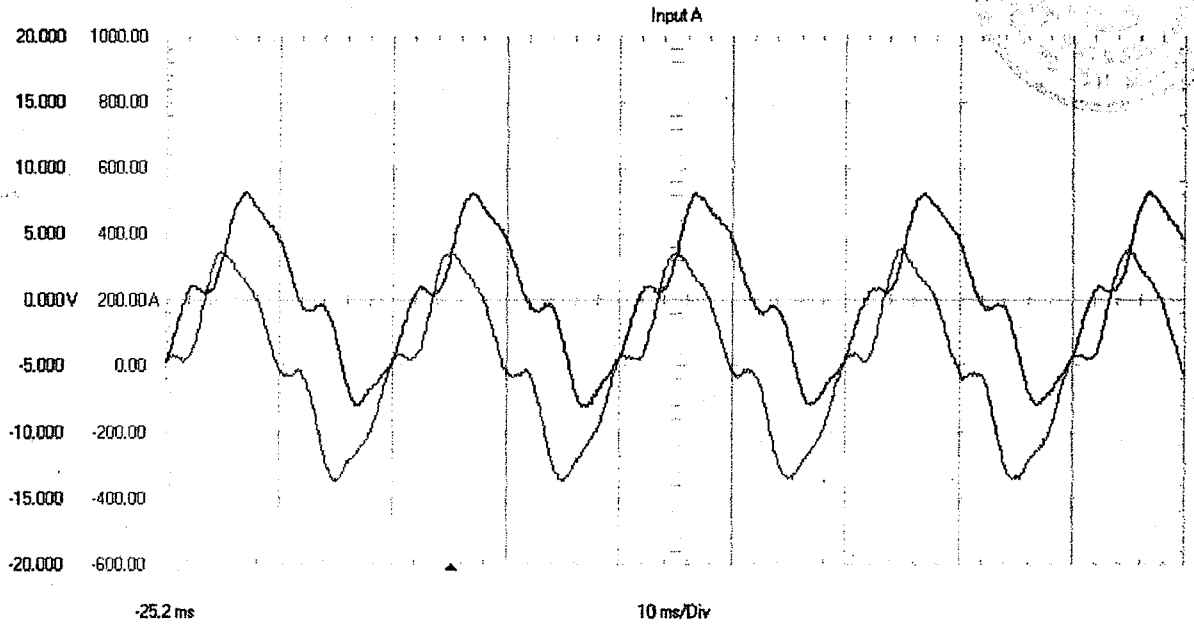
Bölüm III te sayılara uygulanan tek sayılı harmonik dalga şekilleri



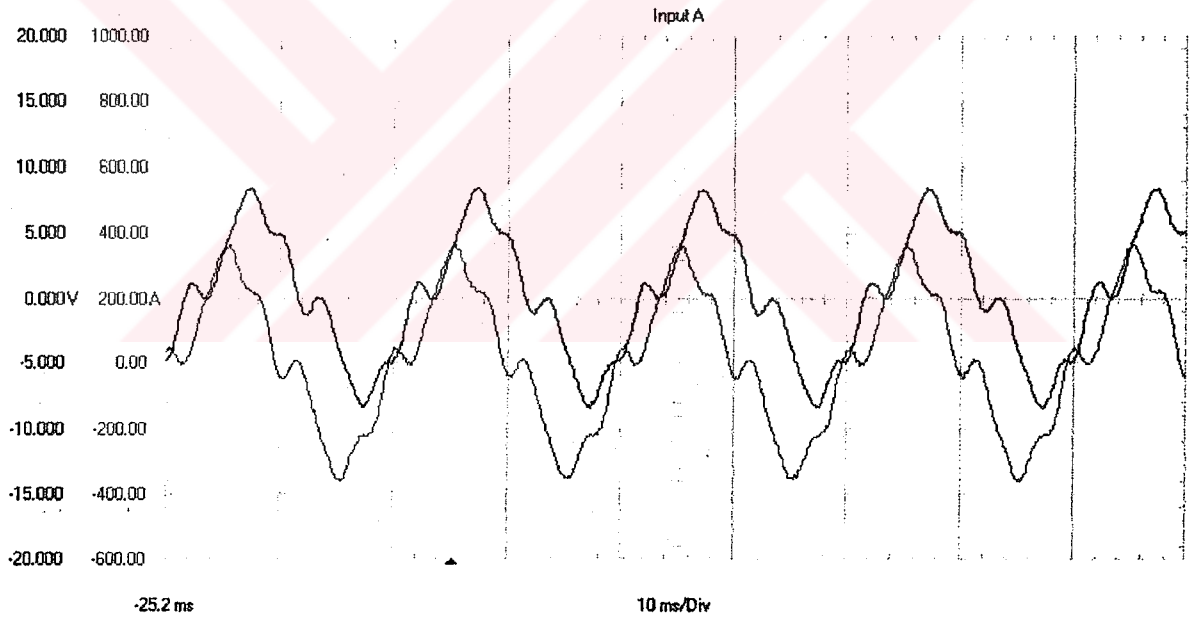
Şekil-1 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H1 Sayılı dalga şekli



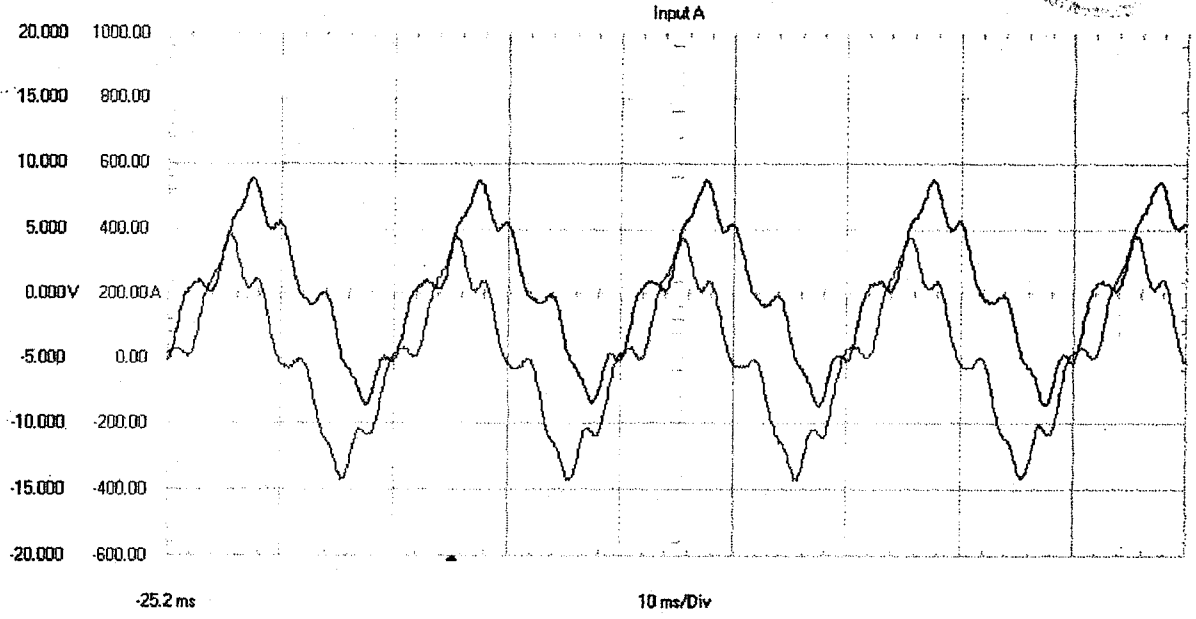
Şekil-2 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H2 Sayılı dalga şekli



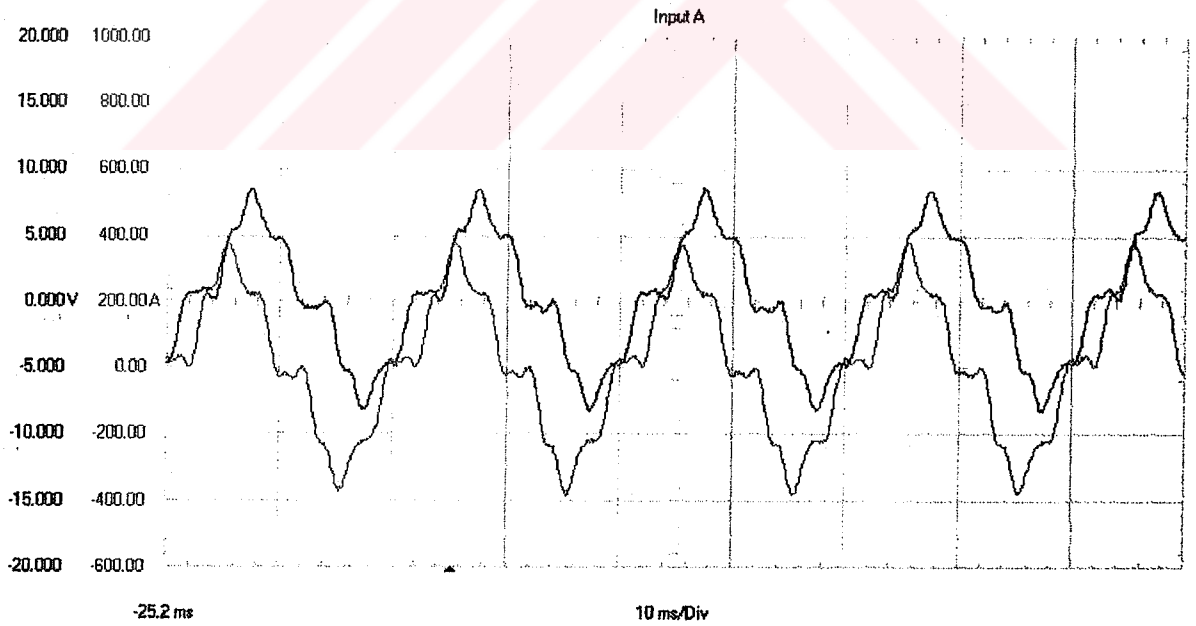
Şekil-3 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H3 Sayılı dalga şekli



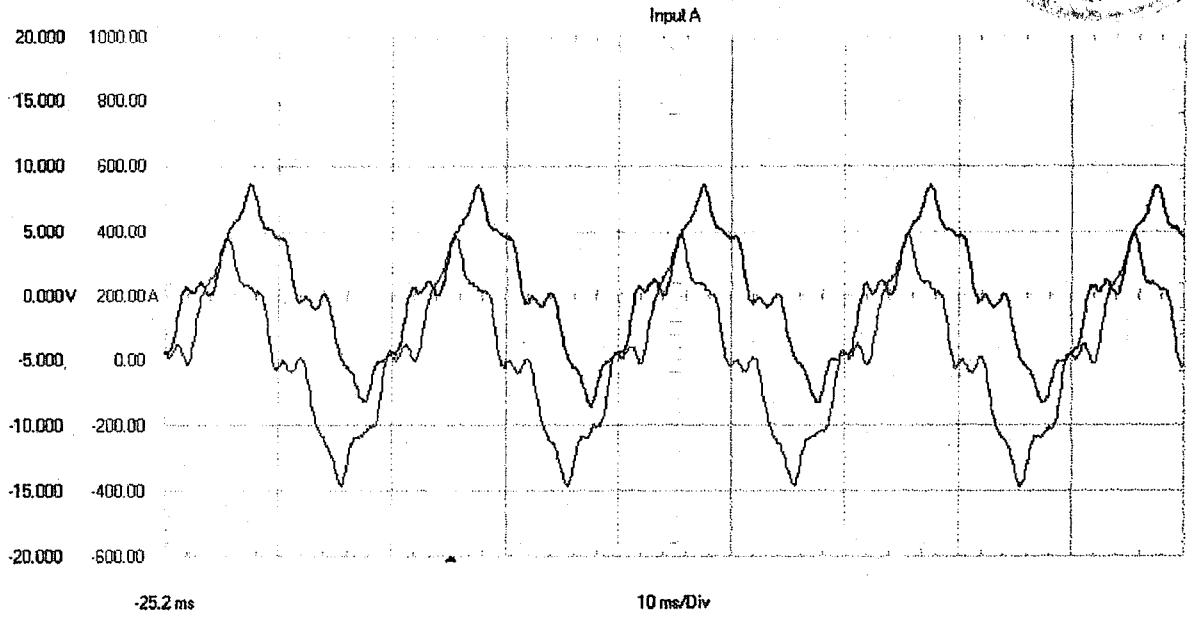
Şekil-4 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H4 Sayılı dalga şekli



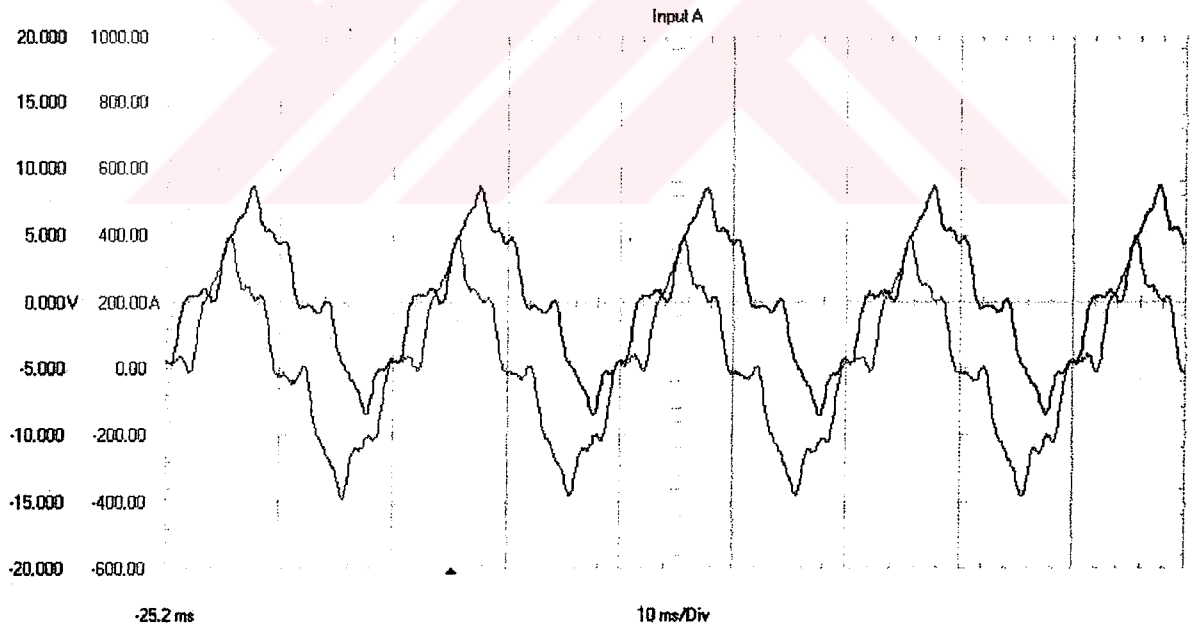
Şekil-5 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H5 Sayılı dalga şekli



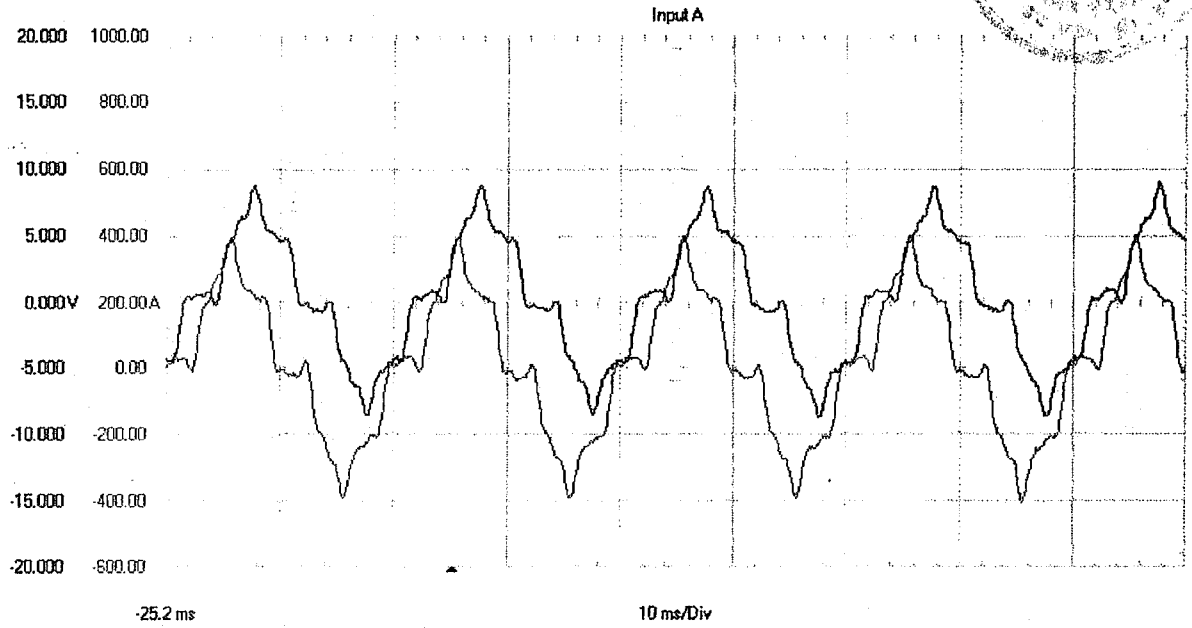
Şekil-6 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H6 Sayılı dalga şekli



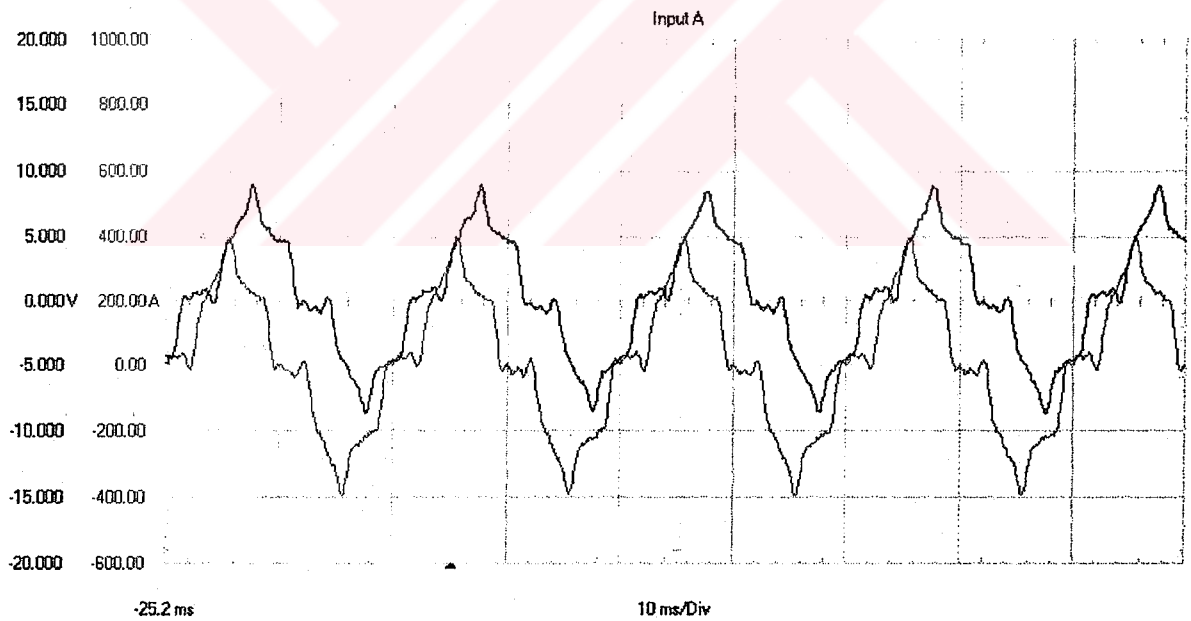
Şekil-7 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H7 Sayılı dalga şekli



Şekil-8 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H8 Sayılı dalga şekli



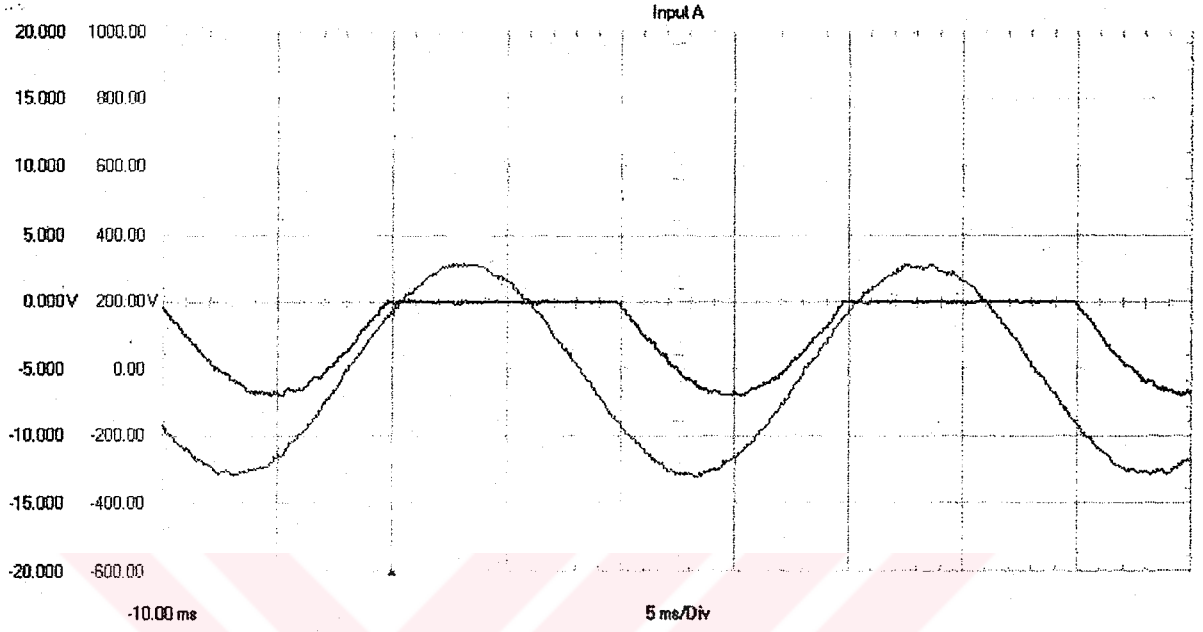
Şekil-9 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H9 Sayılı dalga şekli



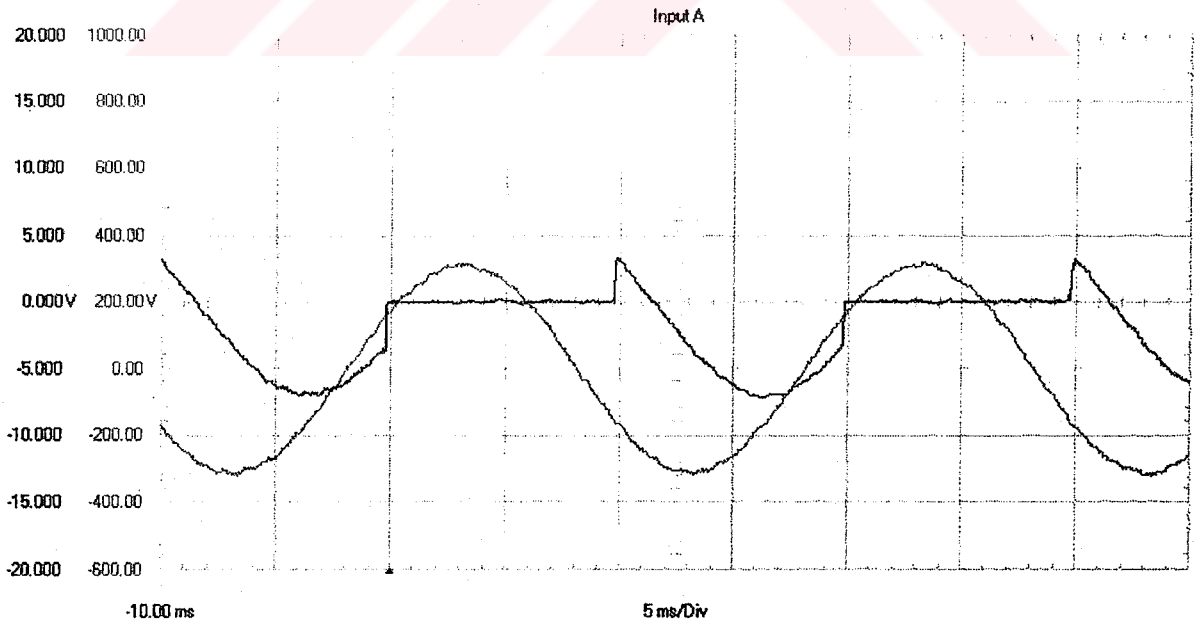
Şekil-10 Ek-1 Tablo-1 de verilen F1H10 Sayılı dalga şekli



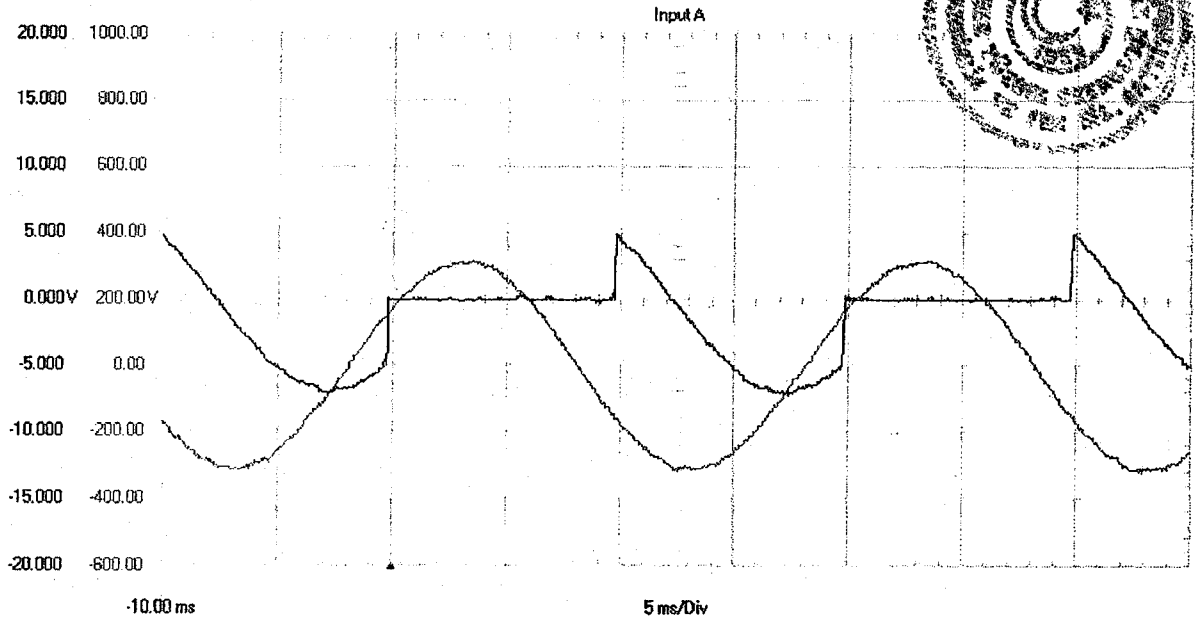
Gerilimin sinüs, akımın yarım dalga doğrultulmuş olduğu dalga şekilleri



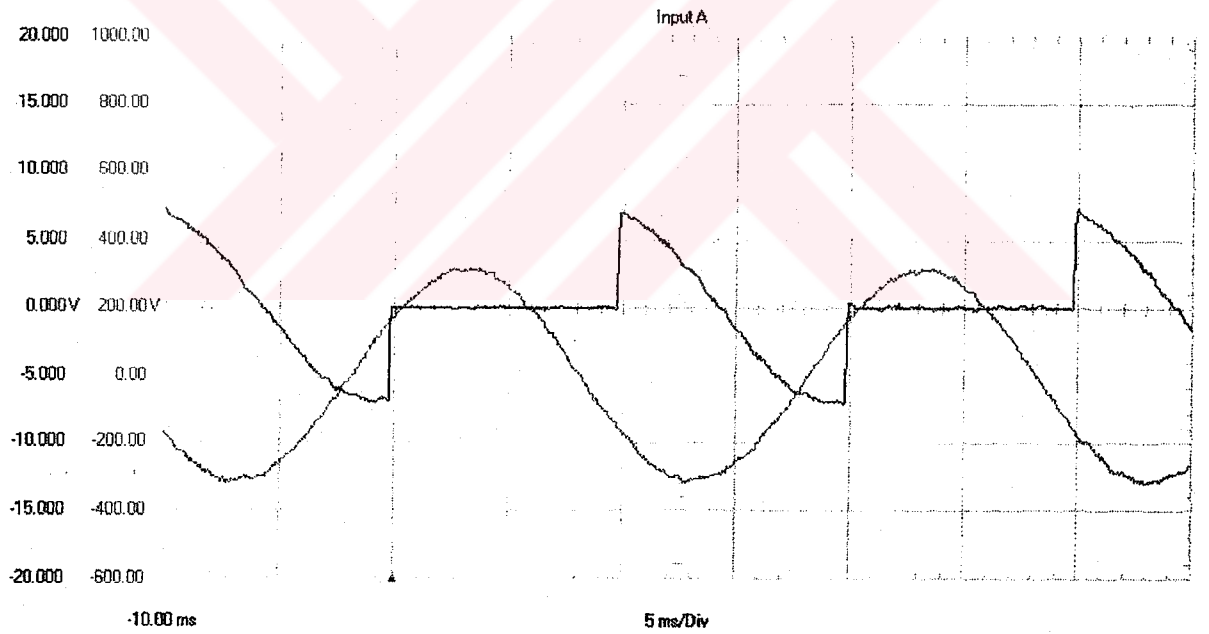
Şekil-11 Ateşleme açısının 0° olduğu dalga şekli



Şekil-12 Ateşleme açısının 30° olduğu dalga şekli



Şekil-13 Ateşleme açısının 60° olduğu dalga şekli



Şekil-14 Ateşleme açısının 80° olduğu dalga şekli