

# REAKTİF SAYAÇLARIN SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA PERFORMANS ANALİZİ

**M. Erhan BALCI<sup>1</sup>**

Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik Fakültesi  
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
41400, Gebze, Kocaeli  
<sup>1</sup>m.balci@gyte.edu.tr

**Hüseyin CEMEK<sup>2</sup>**

Türk Standartları Enstitüsü  
06100, Bakanlıklar, Ankara  
<sup>2</sup>hcemek @tse.gov.tr

**M. Hakan HOCAOĞLU<sup>3</sup>**

Elektronik Mühendisliği Bölümü  
Mühendislik Fakültesi  
Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü  
41400, Gebze, Kocaeli  
<sup>3</sup>hocaoglu@gyte.edu.tr

*Anahtar sözcükler: Reaktif Enerji Sayaçları, Sayaç Hataları, Harmonikler, Güç Kalitesi*

## ABSTRACT

The large proliferation of electronically controlled loads in power systems has caused distortion on waveforms of current and voltages. Under nonsinusoidal conditions, high distortion levels influence the accuracy of meters and the measuring principle of the meters causes the billing errors. The study presented here is about the measurement errors, caused by the non-linear loads, of the induction and electronic var-hour meters randomly sampled from Turkish market. All of the meters are complied to European Norm (EN) and show good performance on the tests defined in the standards. On the other hand, error of the meters exceeds of the prescribed amount of error in the standards when extreme nonsinusoidal conditions exist.

## 1. GİRİŞ

Günümüzde, bozulmuş akım ve gerilim karakteristiğine sahip güç elektroniği elemanlarının yaygın ve büyük güçlerde kullanılmasından dolayı güç sistemlerindeki akım ve gerilim dalga şekli sinüzoidal formdan uzaklaşmıştır. Aktif ve reaktif enerji sayaçları ise daha önceden belirlenmiş frekansta ve sinüzoidal dalga formunda gerilim ve akımların bulunduğu sistemlerde ölçüm için dizayn edilir. Bu sebeple bozulmuş akım ve gerilimlerin bulunduğu sistemlerde aktif ve reaktif enerji sayaçları büyük değerlerde hatalar yapmaktadır. Güç sistemlerinde ölçme elemanı olan enerji sayaçlarının bozulmuş dalga formları altındaki hataları 1905'ten beri incelenmektedir [1]. Literatürdeki bu çalışmalarda hata miktarının sayacın frekans cevabına ve akımın bozulma miktarına bağlı olduğu görülmekle birlikte hata mekanizması ile ilgili kesin bir sonuca varılamamıştır [2, 3, 4]. Türkiye'de indüksiyon tipi reaktif enerji sayaçları EN 60145 standardına [5] göre test edilmektedir. Elektronik reaktif enerji sayaçları ise 29.04.2005'e kadar EN 61268 [6] standardına göre test edilmiştir. Bu tarih itibarıyla EN 61268 standardı iptal edilmiştir. Bu standardın yerine elektronik reaktif enerji sayaçlarının testlerinde EN 62053 [7] standardı kullanılmaya başlanmıştır. EN 60145 yalnızca frekans aralığı, 40 Hz ile 60 Hz arasında A.A. elektrik reaktif enerjinin ölçülmesi için yeni olarak imal edilmiş 3 sınıfı doğrulukta indüksiyon tipi reaktif enerji ölçerlere uygulanan bir standarttır. EN 60145 standardına göre reaktif sayaçlara harmonik akım ve gerilim uygulanmaz. EN 62053 ise A.A. elektrik reaktif enerjisini 45 Hz ile 65 Hz arasında ölçmek için doğruluk sınıfları 2 ve 3 olan statik (elektronik) reaktif enerji ölçerleri kapsar. Bu standartta yarım dalga doğrultulmuş biçimde D.A. uygulandığında sayaç hatasının % 6 değerini geçmemesi gerektiği belirtilmiştir.

Sinüzoidal olmayan koşullarda reaktif enerji ölçerlerin performansı konusunda birçok araştırma yapılmıştır. Bu araştırmalardan sonuçları bakımından önemli olanları bu kısımda özetlenmiştir.

İndüksiyon tipi, elektronik sayaç ile dijital göstergeli indüksiyon tipinde dört farklı sayaç sinüzoidal olmayan koşullarda test edildiğinde sayaçların çalışma prensiplerine bağlı olarak % + 68 ile % - 41 arasında hatalı ölçüm yaptıkları görülmüştür [2]. Sayaçların hata değerlerinin Budeanu, Sharon, Fryze Kusters-Moore ve temel harmonik reaktif güçlerinin hesaplanan değerleri ile karşılaştırıldığı çalışmada sayaçların sinüzoidal şartlarda ve temel frekansta reaktif güç ölçmek üzere dizayn edilmeleri nedeni ile harmonikli yükleri hatalı ölçtükleri sonucuna varılmıştır.

İnverter, AA gerilim kontrollü ve kontrolsüz köprü doğrultucu çıkışı gibi bozulmuş dalga şekline sahip akım çeken yüklerin indüksiyon ve elektronik tip sayaçlara uygulanması durumunda sayaç hatalarının artması ile birlikte ölçülen güç değerlerine göre hesaplanan güç faktörlerinin de hatalı sonuç verildiği görülmüştür [3]. Bu çalışmada inverter üzerinden beslenen akım ile sayaçların test edildiği durumda; her iki sayacın hatasının da yaklaşık aynı ve % -25 - % -10 arasında değiştiği görülmüştür. AA gerilim kontrollü köprü doğrultucu ile oluşturulan dalga şekli uygulanan ikinci durumda ateşleme açısı 60 derece ile 120 derece arasında değiştirilmiş ve sayaçların gösterdiği hataların % -45 - % -35 arasında değişiklik gösterdiği görülmüştür. Kontrolsüz köprü doğrultucu çıkışının uygulandığı üçüncü durumda akımın değişimine bağlı olarak sayaç hataları % -8 - % -2 arasında değişim göstermiştir. Fakat THD indisinin sayaçların sinüzoidal olmayan şartlardaki hata mekanizmalarına ait bir bilgi vermemesinden dolayı her bir harmonik bileşenini frekans bilgisini dikkate alarak hesaba katan  $k_{faktör}$  indisinin sayaç hatalarına etkisinin incelenmesi önem kazanmıştır. Bu sebeple sinüzoidal olmayan şartlarda  $k_{faktör}$  indisinin değişimine bağlı olarak; indüksiyon ve elektronik reaktif enerji sayaçlarının yaptıkları ölçüm hataları incelenmiştir [8].

Bu bildiride Avrupa normlarında üretilmiş, ideal çalışma koşullarında standartlara [5, 7] uygun sonuçlar veren reaktif enerji sayaçları kullanılarak; indüksiyon ve elektronik reaktif enerji sayaçlarına ait hata değerlerinin  $k_{faktör}$  indisine bağlı olarak değişimi analiz edilmiştir. Sonuçlar doğrultusunda muhtemel hata mekanizması belirlenmeye çalışılmıştır.

## 2. SİNÜZOİDAL ŞARTLARDA GÜÇ İFADESİ

Sinüzoidal şartlarda V etkin değerine sahip w açısız frekansındaki ani gerilim, I etkin değerine ve  $\varphi$  faz açısına sahip w açısız frekansındaki ani akım değerleri :

$$v(t) = \sqrt{2} \cdot V \cdot \sin \omega t \quad (1)$$

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

ise bu değerlerin çarpımından ani güç

$$p(t) = v(t) \cdot i(t) = 2 \cdot V \cdot I \cdot \sin \omega t \cdot \sin(\omega t - \varphi) \quad (3)$$

biçiminde elde edilir.

Ani güç yarım açı formülleri kullanılarak

$$p(t) = V \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot (1 - \cos 2\omega t) - V \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (4)$$

biçimine dönüştürülebilir. Bu ifadeye;

$$p_a(t) = V \cdot I \cdot \cos\varphi \cdot (1 - \cos 2\omega t) \quad (5)$$

terimi ani aktif güç,

$$p_r(t) = V \cdot I \cdot \sin\varphi \cdot \sin 2\omega t \quad (6)$$

terimi ise ani reaktif güçtür.

Ani gücün ortalama değeri aktif güç olarak tanımlanmıştır. Ani reaktif gücün bir yarı periyottaki akış yönü diğer yarı periyottakinin tersi yönde olduğu için ortalama değeri sıfırdır. Ani reaktif gücün azami değeri reaktif güç olarak tanımlanmıştır. Ani gücün ortalama değeri olarak tanımlanan aktif güç;

$$P = V \cdot I \cdot \cos\varphi \quad (7)$$

ifadesinden hesaplanabilir.

Denklem (8)'de verilen anlık reaktif gücün azami değeri;

$$Q = V \cdot I \cdot \sin\varphi \quad (8)$$

veya T/4 kadar zaman ekseninde ötelenmiş gerilimin akımla çarpımının ortalama değeri;

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v(t - \frac{T}{4}) \cdot i(t) dt \quad (9)$$

ifadesinden reaktif güç hesaplanır [9].

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

$$S = \sqrt{P^2 + Q^2} \quad (10)$$

biçiminde ifade edilmiştir [9].

### 3. SİNÜZOİDAL OLMAYAN ŞARTLARDA GÜÇ İFADELERİ

Akım veya gerilime ait sinüzoidal olmayan bir periyodik dalga; Fourier teoreminden yararlanarak;

$$v(t) = \sum_1^n \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t) \quad (11)$$

$$i(t) = \sum_1^n \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(\omega_n \cdot t - \varphi_n) \quad (12)$$

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

$$p(t) = \sum_1^n \sqrt{2} \cdot V_n \cdot \sin(\omega_n t) \cdot \sum_1^n \sqrt{2} \cdot I_n \cdot \sin(\omega_n t - \varphi_n) \quad (13)$$

biçiminde elde edilebilir. Sinüzoidal olmayan şartlarda görünür güç bileşenlerinin tanımlanmasında karşılaşılan zorluğun sebebi ani gücün içeriğinde bulunan farklı harmoniklere ait akım ve gerilim değerleri arasındaki çapraz çarpımlardır.

#### 3.1. BUDEANU GÜÇ İFADESİ

Budeanu, görünür gücü aktif ve aktif olmayan güç olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [9, 10, 11]. Aktif güç; her bir harmonik bileşenine ait aktif güçlerin toplamı olan;

$$P = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \cos\varphi_n \quad (14)$$

eşitliği yardımı ile hesaplanabilir. Bu yaklaşımda aktif olmayan güç ise; Budeanu reaktif ve bozulma gücü olarak iki dik bileşene ayrılmıştır. Budeanu reaktif gücü Denklem (15)'de verildiği gibi tüm harmoniklere ait reaktif güçlerin toplamından oluşmaktadır.

$$Q_B = \sum_1^n V_n \cdot I_n \cdot \sin\varphi_n \quad (15)$$

Budeanu yönteminde bozulma gücü farklı harmoniklerin akım ve gerilim bileşenlerinin çapraz çarpımları arasındaki ilişkiyi elde edilmiştir. Denklem (16)'da bozulma güç değeri görülmektedir.

$$D_B^2 = S^2 - P^2 - Q_B^2 = \sum_1^{n \neq m} V_n^2 \cdot I_m^2 + V_m^2 \cdot I_n^2 - 2 \cdot V_n \cdot I_m \cdot I_n \cdot V_m \cdot \cos(\varphi_n - \varphi_m) \quad (16)$$

Budeanu reaktif güç bileşenini basit bir kapasite ile tamamen kompanze edilebilecek reaktif gücü olarak belirlemiştir.

#### 3.2. FRYZE GÜÇ İFADESİ

Budeanu reaktif güç ifadesi basit bir kapasite ile kompanze edilebilen reaktif güç hakkında bilgi vermesine rağmen güç tanımındaki aktif ve reaktif güç ifadeleri kaynak verimi hakkında yeterli bilgi vermemektedir. Ayrıca Budeanu güç tanımı harmonik domeninde ölçümler ve sofistike ölçüm aletleri gerektirmektedir. Fryze, akımı aktif ve reaktif olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [9, 10, 11]. Aktif bileşen

$$i_a(t) = \frac{P}{V^2} \cdot v(t) \quad (17)$$

reaktif bileşen ise

$$i_r(t) = i(t) - i_a(t) \quad (18)$$

olarak ifade edilir.

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

$$Q_F = V \cdot I_r \quad (19)$$

olarak ifade edilir.

Bu yöntemde aktif güç ile reaktif gücün vektör toplamı olan

$$S^2 = P^2 + Q_F^2 \quad (20)$$

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

#### 3.3. SHEPHERD VE ZAND GÜÇ İFADESİ

Denklem (14)'de tüm harmoniklere ait aktif güçler toplamı verilmiştir. İşareti negatif olan harmonik güçleri yükten kaynağa doğru akmaktadır. Ana harmonik gücü ise pozitif değerdedir. Bu duruma Shepherd ve Zand tarafından dikkat çekilmiştir [10]. Shepherd ve Zand akımı aktif, reaktif ve bozulma akımı olmak üzere üç dik bileşene ayrılmıştır. Bu akım bileşenleri:

aktif akım;

$$I_R = \sqrt{\sum_1^n I_n^2 \cdot \cos^2\varphi_n} \quad (21)$$

reaktif akım;

$$I_X = \sqrt{\sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2\varphi_n} \quad (22)$$

ve bozulma akımları;

$$I_D = \sqrt{I^2 - I_R^2 - I_X^2} \quad (23)$$

şeklinde ifade edilirler.

Shepherd ve Zand'ın oluşturduğu güç tanımı

$$S^2 = S_R^2 + S_X^2 + S_D^2 \quad (24)$$

biçiminde ifade edilmiştir. Buradaki güç bileşenleri :

aktif görünür güç,  $S_R$  ;

$$S_R = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \cos^2\varphi_n} \quad (25)$$

reaktif görünür güç,  $S_X$  ;

$$S_X = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2\varphi_n} \quad (26)$$

ve bozulma görünür gücü,  $S_D$  ;

$$S_D = \sqrt{\sum_1^n V_n^2 \cdot \sum_1^r I_k^2 + \sum_1^s V_u^2 \cdot \left( \sum_1^n I_n^2 + \sum_1^r I_k^2 \right)} \quad (27)$$

k : Akımın içerdiği gerilimin içerdiğinden farklı harmonik numaraları,

u : Gerilimin içerdiği akımın içerdiğinden farklı harmonik numaraları,

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

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

### 3.4. KIMBARK GÜÇ İFADESİ

Kimark görünür gücü aktif ve aktif olmayan güç olmak üzere iki dik bileşene ayırmıştır [10, 11]. Bu güç tanımında aktif güç ani gücün ortalama değeri olarak ifade edilmiştir. Aktif olmayan güç ise iki dik bileşenden meydana gelmektedir. Bunlar ilki Denklem (28) ile verilen reaktif güç;

$$Q_K = Q_1 = V_1 \cdot I_1 \cdot \sin \phi_1 \quad (28)$$

diğeri ise Denklem (29) ile verilen bozulma gücüdür.

$$D_K = \sqrt{S^2 - P^2 - Q_K^2} \quad (29)$$

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

### 3.5 SHARON GÜÇ İFADESİ

Shepherd ve Zand güç tanımı hat kayıpları hakkında anlamlı bir bilgi sağlamasına rağmen bu güç tanımı güç faktörünün hesaplanmasında kullanılamamaktadır. Sharon güç ifadesi, Shepherd ve Zand'ın güç ifadesi içinde yer almayan P aktif gücünü içermektedir [11]. Sharon güç tanımına göre reaktif görünür güç

$$S_Q = V \cdot \sqrt{\sum_1^n I_n^2 \cdot \sin^2 \phi_n} \quad (30)$$

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

$$S^2 = P^2 + S_Q^2 + S_C^2 \quad (31)$$

ifadesiyle tanımlanmıştır. Sharon güç tanımı hem hatlardaki reaktif güce bağlı kayıplar hem de güç faktörü hakkında bilgi veren bir güç tanımıdır.

## 4. TEST SİSTEMİ

Bu çalışmadaki reaktif enerji sayaçlarının bozulmuş akım ve gerilim dalga formlarında ölçüm hatalarının incelendiği testler TSE Gebze Kalite Kampusu laboratuvarında gerçekleştirilmiştir. Test sistemi Şekil 1 (a) Zera referans sayaç, Şekil 1 (b) ve (c) test masası, akım-gerilim dalga formunun oluşturulduğu kısım ve Zera referans sayaçtan oluşan TSE sayaç test sistemi ile bu sisteme ek olarak harmonik analizörü ve bilgisayardan oluşmaktadır. Referans sayaç akım, gerilim, frekans, her bir faza ait aktif güç, reaktif güç, değerlerini  $10^{-5}$  doğrulukla ölçebilir. Referans sayaca ölçülecek olan akım 16 ampere kadar doğrudan 16-120 amper arasında akım transformatörü aracılığı ile girilir. Referans sayaç girilen akım ve gerilim değerlerini her periyot için 720 örnek olmak üzere örnekleyerek reaktif güç ve sayaç hatalarını

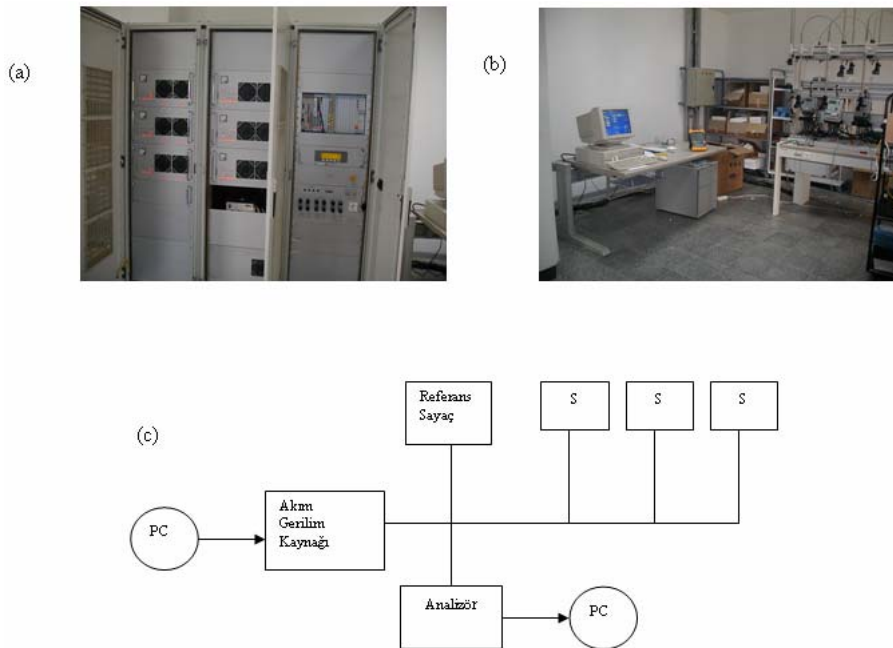
$$Q = \frac{1}{720} \sum_{i=n}^{n+719} v_i \cdot i_{i-180} \quad (32)$$

$$F\% = \frac{N_{must} - N_{actual}}{N_{actual}} \cdot 100\% \quad (33)$$

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

$N_{must}$  : Hesaplanan puls veya devir sayısı.

ifadelerinden hesaplamaktadır.



Şekil 1 : (a) Zera referans sayaç, (b) ve (c) Test sistemi.

Literatürdeki THD indisinin sayaçların sinüzoidal olmayan şartlardaki hata mekanizmalarına ait bir bilgi vermemesi sebebiyle  $k_{\text{faktör}}$  indisinin sayaç hatalarına etkisinin incelenmesi gereği ortaya çıkmıştır.  $k_{\text{faktör}}$  indisinin sayaç hatalarının analizinde tercih edilmesinin sebebi her bir harmonik bileşenini frekans bilgisini dikkate alarak hesaba katmasıdır.

Analiz sırasında kullanılan harmonik indisi  $k_{\text{faktör}}$  ise

$$k_{\text{faktör}} = \sum_1^n n^2 \cdot \left( \frac{I_n}{I} \right)^2 \quad (34)$$

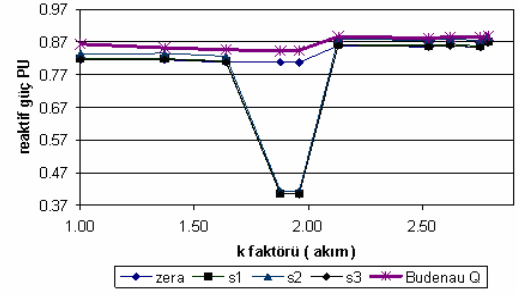
biçiminde tanımlanmış olup akım dalga formunda bulunan harmonik frekanslarının büyüklüklerinin ve etkin değerlerinin dikkate alınarak transformatör gibi şebeke elemanları üzerindeki sinüzoidal olmayan akımların ısı etkilerini belirlemek amacıyla oluşturulmuş bir indistir [12].

Testler sırasında; referans sayaç Zera'nın gösterdiği 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 direnç üzerinden gerilim örneklenerek harmonik analizörüne aktarılmış ve bu dalga şekilleri kaydedilmiştir. Testlerde kullanılan reaktif enerji sayaçları ve özellikleri Tablo 1'de verilmiştir.

**Tablo 1 : Test edilen sayaçlar.**

Sayaç No	Tipi	Diğer Özellikleri
S <sub>1</sub>	indüksiyon reaktif	A marka 220/380Volt, X5Amper 480Devir/kVArh
S <sub>2</sub>	indüksiyon reaktif	B marka 220/380Volt, 480devir/kVArh
S <sub>3</sub>	elektronik reaktif	C marka 220/380Volt, 10(30)Amper, 200darbe/kVArh

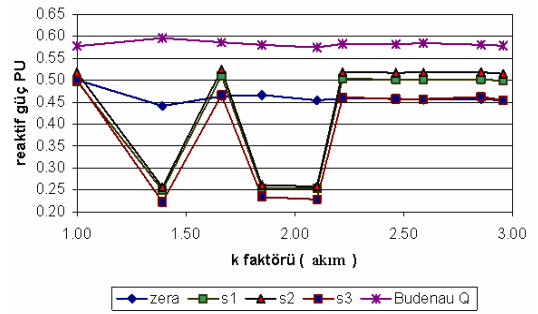
Analizler sırasında sayaçlar öncelikle gerilim sinüzoidal, akım bozulmuş dalga formunda ve gerilim-akım arasındaki faz farkı 30° olduğu şartlarda test edilmiştir. Sayaçların test edildiği diğer durum ise akım ve gerilimin aynı harmoniklere sahip olduğu ve aralarındaki faz farkının 30° olduğu şartlardır. Yalnız akımın harmoniklere sahip olduğu ve akım-gerilim dalga formlarının aynı harmoniklere sahip olduğu her iki durumda; ekler bölümündeki Tablo 2'de verilen spektrum 1'den spektrum 10'a kadar bütün dalga şekilleri sayaçlara uygulanmıştır. Bu yöntemle sayaçlara uygulanan bozulmuş dalga formunun  $k_{\text{faktör}}$  değeri artırılmıştır. Literatürde farklı reaktif güç ifadeleri bulunmaktadır. Bu sebeple analizler sırasında öncelikle Zera referans sayacın hangi ifadeye yakın ölçüm yaptığının görülmesi için farklı  $k_{\text{faktör}}$  değerlerinde ölçümler yapılmış ve bu ölçümlerde referans sayaç Zera'ya en yakın değerleri Budeanu reaktif gücü sağlamıştır. Bu sebeple ölçüm sonuçları Budeanu reaktif gücüne göre kıyaslanması ve grafiklerde Budeanu gücü ile birlikte gösterilmesi Zera referans sayaç ile uyumlu olması açısından tercih edilmiştir. Buna göre; akımın bozulmuş dalga şeklinde, gerilimin sinüzoidal şekilde olduğu ve gerilim - akım arasındaki faz farkının 30° seçildiği durum için Zera referans sayaç ve diğer sayaçların gösterdikleri, Budeanu reaktif güç ifadesinin verdiği değerler Şekil 2'de gösterilmiştir.



**Şekil 2: Akımın bozulmuş dalga şeklinde, gerilimin sinüzoidal şekilde olduğu ve gerilim - akım arasındaki faz farkının 30° seçildiği durum için Zera referans sayaç, diğer sayaçların gösterdikleri ve Budeanu reaktif güç ifadesinin verdiği değerler.**

Bütün  $k_{\text{faktör}}$  değerleri için Zera'nın gösterdiği ve Budeanu reaktif güçleri arasında 0.05pu fark değer aşılmamıştır. Bununla birlikte sayaçlar  $k_{\text{faktör}}$ 'ün 1.7 ve 2.2 değerleri arasında Budeanu reaktif gücüne göre 0.45pu hata yapmışlardır. Bu aralığın dışındaki  $k_{\text{faktör}}$  değerlerinde ise sayaç hata değerleri 0.02pu'e yakın bir değişim göstermiştir.

Gerilim-akımın aynı harmonik spektrumuna sahip ve gerilim - akım arasındaki faz farkının 30° olduğu durum için; Zera referans sayaç ve diğer sayaçların gösterdikleri, Budeanu reaktif güç ifadesinin verdiği değerler Şekil 3'de gösterilmiştir.



**Şekil 3: Gerilim-akımın aynı harmonik spektrumuna sahip ve gerilim - akım arasındaki faz farkının 30° olduğu durum için Zera referans sayacın, diğer sayaçların gösterdikleri ve Budeanu reaktif güç ifadesinin verdiği değerler.**

Bütün  $k_{\text{faktör}}$  değerleri için Zera'nın gösterdiği ve Budeanu reaktif güçleri arasında 0.15pu fark değer aşılmamıştır. Sayaçlar  $k_{\text{faktör}}$  1.35 iken ve 1.7 ile 2.1 arasında değerler alırken Budeanu reaktif güç tanımına göre 0.36pu hata yapmışlardır. Bu aralığın dışındaki  $k_{\text{faktör}}$  değerlerinde dikkat çeken husus;  $k_{\text{faktör}}$  2.1 ile 3 değerleri arasındayken S<sub>3</sub> elektronik reaktif güç sayacının Zera referans sayacıyla çok yakın sonuçlar vermesidir.

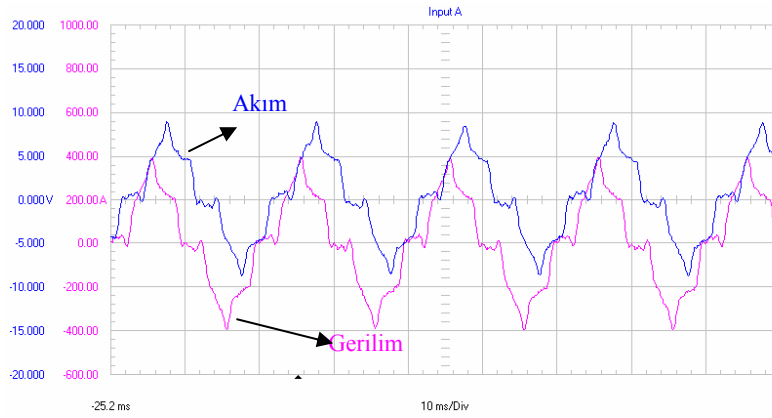
## 5. SONUÇ

Bu çalışmada Türkiye piyasasındaki Avrupa normlarında uygun olan ideal çalışma koşullarında standartlara uygun sonuçlar veren sayaçlar kullanılarak; indüksiyon ve elektronik tip reaktif enerji sayaçlarının akımın ve gerilimin farklı bozulma oranlarında yapmış oldukları hatalar analiz edilmiştir. Analizler sonucunda sayaçların bozulmuş akım ve/veya gerilim dalga şekillerinde kabul edilebilir hata değerlerinin üzerinde hatalar yaptıkları görülmüştür. Sayaçların yaptıkları hataların  $k_{\text{faktör}}$  e bağlı olmadığı  $k_{\text{faktör}}$  artışı sırasında sayaç hatalarının belirli bir trendinin olmamasından anlaşılmıştır. Bu durum sayaç hatalarının analizinde akım harmoniklerinin büyüklüğünün yanında akış yönünü de dikkate alan bir indis türetilmesi gerekliliğini göstermiştir.

## EKLER

**Tablo 2: Sayaçlara uygulanan bozulmuş dalga şekillerinin harmonik spektrumu.**

Uygulanan Dalga Şekli	Uygulana Dalga Şeklinin Büyüklüğü (%) ve Faz Açısı Olarak Harmonik İçeriği									
	1.Har.	3.Har.	5.Har.	7.Har.	9.Har.	11.Har.	13.Har.	15.Har.	17.Har.	19.Har.
Spektrum 1	89< 30°	0	0	0	0	0	0	0	0	0
Spektrum 2	89< 30°	20 < 90°	0	0	0	0	0	0	0	0
Spektrum 3	89< 30°	20 < 90°	12 < 150°	0	0	0	0	0	0	0
Spektrum 4	89< 30°	20 < 90°	12 < 150°	8,60 < 210°	0	0	0	0	0	0
Spektrum 5	89< 30°	20 < 90°	12 < 150°	8,60 < 210°	6,7 < 270°	0	0	0	0	0
Spektrum 6	89< 30°	20 < 90°	12 < 150°	8,60 < 210°	6,7 < 270°	5,5< 330°	0	0	0	0
Spektrum 7	89< 30°	20 < 90°	12 < 150°	8,60 < 210°	6,7 < 270°	5,5< 330°	4,6<30°	0	0	0
Spektrum 8	89< 30°	20 < 90°	12 < 150°	8,60 < 210°	6,7 < 270°	5,5< 330°	4,6<30°	4 < 90°	0	0
Spektrum 9	89< 30°	20 < 90°	12 < 150°	8,60 < 210°	6,7 < 270°	5,5< 330°	4,6<30°	4 < 90°	3,5 <150°	0
Spektrum 10	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°



**Şekil 4:Bozulmuş gerilim ve akımın spektrum 10 harmonik içeriğine göre dalga şekilleri.**

## KAYNAKLAR

- [1] Rosa, E.B., Lloyd, M.G., Reid, C.E., “Influence of Waveform on the Rate of Integrating Induction Watt-meters”, Bulletin No.3, pp.421, National Bureau of Standarts, 1905 : Reprint No.21.
- [2] Pilipski, P. S. and Labaj, P.W.; “Evaluation of Reactive Power Meters in the Presence of High Harmonic Distortion”, IEEE Transactions on Power Delivery, vol. 7, No: 4, pp.1793-1799, October 1992.
- [3] Cox, M.D. and Williams, T.B.; “Induction Varhour and Solid-State Varhour Meters Performance on Nonlinear Loads”, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol. 5, No. 4, pp.1678-1686, November 1990.
- [4] 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.
- [5] TS 786 IEC 60145; “Sayaçlar - VAR - Saat Metre (Reaktif Enerji Sayaçları)”, Ocak 1999.
- [6] TS EN 61268; “Elektrik Sayaçları-Alternatif Akım Statik Reaktif Sayaçlar-Reaktif Enerji İçin (Sınıf 2 ve Sınıf 3)”, Nisan 2003.

- [7] TS EN 62053, “Elektrik ölçme donanımı (a.a.) – Özel Kurallar”, Nisan 2005.
- [8] Cemek, H.; “Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Enerji Ölçümü”, Yüksek Lisans Tezi, GYTE, 2003.
- [9] IEEE Std 1459-2000: IEEE Trial-Use Standard Definitions for The Measurement of Electric Power Quantities Under Sinusoidal, Nonsinusoidal, Balanced, or Unbalanced Conditions, 21 June 2000.
- [10] Czarnecki, L.S., Swiatlicki, T.; “Powers in Nonsinusoidal Networks: Their Interpretation, Analysis, and Measurement”, IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement, Volume 39, Issue 2,Page(s):340 – 345, April 1990.
- [11] Balcı M.E., Hocaoglu M.H.; “Comparison of Power Definitions for Reactive Power Compensation in Nonsinusoidal Conditions”, IEEE Proceeding of 11<sup>th</sup> ICHQP, Page(s): 519-524, 12-15 Sept. 2004.
- [12] Kandil, M.S.; Farghal, S.A.; Elmitwally, A.; “Refined power quality indices”, IEE Proceedings Generation, Transmission and Distribution, Volume 148, Issue 6, Nov. 2001 Page(s):590 – 596.