

Ölçü Akım Transformatörlerinin Doğruluğunun Sinüzoidal Olmayan Şartlar Altında Deneysel İncelenmesi

An Experimental Study of Current Measurement Transformers Accuracy Under Nonsinusoidal Conditions

Emrah ANİĞİ¹, Özgür KARACASU², M. Hakan HOCAOĞLU³

Elektronik Mühendisliği Bölümü

Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, 41400, Gebze, Kocaeli

¹e-posta: emrahanigi@gyte.edu.tr ²e-posta: karacasu@gyte.edu.tr ³e-posta: hocaoglu@gyte.edu.tr

Özet

Gelişen teknoloji ile birlikte enerji sisteminde kullanılan lineer olmayan yüklerin sayısı ve oranı gün geçtikçe artmaktadır. Bu artışa paralel olarak dağıtım sistemlerindeki harmoniklerin oranında da artış görülmektedir. Akım genliği ve fazının ölçümünde kullanılan ölçü akım transformatörlerinin sinüzoidal şartlarda görevlerini doğru olarak yerine getirdikleri, bununla birlikte sinüzoidal olmayan şartlarda hatalı çalıştıkları bilinmektedir.

Bu çalışmada, ölçü akım transformatörlerinin sinüzoidal olmayan şartlarda genlik ve faz hatasının değişimi incelenmiştir. Sonuçlar göstermektedir ki akım transformatörlerinin doğruluğu özellikle ara ve alt harmoniklerden önemli ölçüde etkilenmektedir.

Abstract

The proportion and number of nonlinear loads that used in power systems have been increasing with the developments in the power electronics technology. It is known that nonlinear loads are a major harmonic source for the distribution systems and operating range of the current transformers vary significantly in the harmonically polluted systems.

This paper investigates the changes of the ratio and phase angle errors under nonsinusoidal conditions of measurement current transformers. The results indicate that accuracy of current transformers are significantly affected, especially sub and inter harmonics.

1. Giriş

Elektrik sistemindeki büyük genlikli akımları ölçülebilir akım değerlerine indiren akım transformatörleri ölçü ve koruma olmak üzere iki farklı amaç için üretilirler [1]. Akım transformatörlerinin doğruluk sınıfı genellikle 50/60 Hz frekans ve sinüzoidal akım için tanımlanmıştır. Bununla birlikte akım transformatörlerinin kısa devreler, anahtarlamalar gibi geçici olaylar ve lineer olmayan yükler sebebiyle ortaya çıkan sinüzoidal olmayan şartlardaki doğruluğu önem kazanmaktadır.

Literatürde akım transformatörlerinin bozuk dalga formlarında büyük belirsizlikler gösterdiği ve bunların ölçüm hatalarına yol açtığı belirtilmiştir. Genlik hatasının 1 kHz'e kadar ihmal edilebileceği [2], bununla birlikte faz hatasının düşük

frekanslarda da değerlendirilmesi gerektiği vurgulanmıştır [3]-[7]. Akım transformatörünün harmonik aktif gücü ölçmek için kullanılması sırasında ortaya çıkan faz hatasının kabul edilemez boyutlarda olduğu da belirtilmiştir [8].

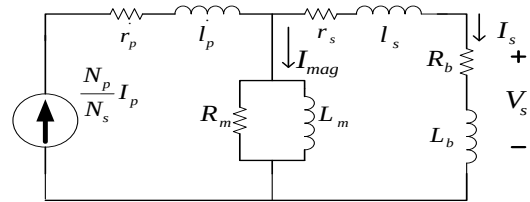
Bu çalışmada doğruluk sınıfı sinüzoidal şartlarda 0,5 olarak verilmiş olan ölçü akım transformatörünün sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan şartlar altında genlik ve faz doğruluğunu laboratuvar ortamında test etmek üzere geliştirilmiş düzenek tanıtılacak ve akım transformatörlerinin sinüzoidal olmayan şartlar altındaki performansları sunulacaktır.

2. Akım Transformatörü

Akım transformatörü amper-tur eşitliği prensibine göre çalışmaktadır.

$$N_p I_p = N_s I_s \quad (1)$$

N_p ve N_s sırası ile primer ve sekonder sarım sayıları, I_p ve I_s ise sırası ile primer ve sekonder akımını ifade etmektedir. Sinüzoidal şartlar altında akım transformatörünün eşdeğer devresi Şekil 1'de verilmiştir. Burada I_p primer akımı, sekonder devreye $(N_p/N_s)I_p$ şeklinde indirgenir. Sekonder sarğı direnci r_s ve kaçak endüktansı L_s ile gösterilmektedir [8]. Şekil 1'de görülen $R_b + j\omega L_b$ devreye bağlı olan ölçü aletinin eşdeğer empedansını temsil eden yüküdür.



Şekil 1: Akım transformatörü eşdeğer devresi.

Magnetizasyon kolu üzerinde ise magnetizasyon endüktansı L_m ile manyetik çekirdekteki histeresis ve eddy kayıplarını gösteren R_m direnci bulunmaktadır. Akım transformatörünün eşdeğer devresine ait fazör diyagramı Şekil 2'de verilmiştir.

Sekonder gerilimi V_s ;

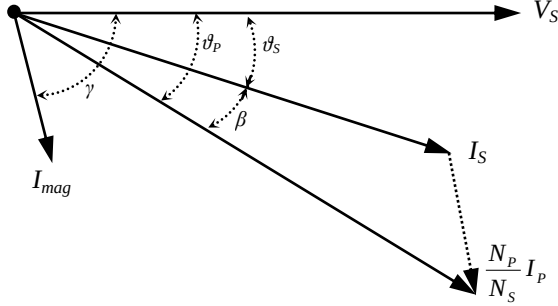
$$V_s = (R_b + j\omega L_b) I_s \quad (2)$$

olarak ifade edilir. Magnetizasyon kolu güç frekansında ve endüktif karakterli olduğunda akım fazörü I_{mag} , γ açısı kadar sekonder gerilim fazörü V_s 'nin gerisinde kalır. Kirchhoff akım yasasına göre;

$$\frac{N_p}{N_s} \vec{I}_p = \vec{I}_s + \vec{I}_{mag} \quad (3)$$

olacaktır. Eğer primer akımı Denklem (4)'den hesaplanırsa Denklem (3)'teki I_{mag} ölçüm hatasına sebep olur.

$$I_p = (N_p / N_s) I_s \quad (4)$$



Şekil 2: Akım transformatörüne ait fazör diyagramı.

Bu hatalar; faz hatası ve çevirme oranı hatası olarak sırasıyla Denklem (5) ve Denklem (6)'daki gibi hesaplanabilir.

- Faz hatası

$$\beta \approx \tan^{-1} \left[\frac{I_{mag} \sin(\gamma - \theta_s)}{\frac{N_p}{N_s} I_p - I_{mag} \cos(\gamma - \theta_s)} \right] \quad (5)$$

- Çevirme oranı hatası (Oran Düzeltme Faktörü (ODF) olarak karakterize edilmektedir.)

$$ODF = \frac{N_p}{N_s} \frac{|I_p|}{|I_s|} \approx \sqrt{1 + \left(\frac{N_s I_{mag}}{N_p I_p} \right)^2 - 2 \frac{N_s I_{mag}}{N_p I_p} \cos(\gamma - \theta_s)} \quad (6)$$

Bu hatalar, özellikle faz açısı hatası β , güç ölçümünün doğruluğunu etkilemektedir. Akım transformatörünün temel hata sebebi bu kayıplardır. Denklem (2)'den görülebileceği gibi her iki hata da I_{mag} ile dolayısıyla $j\omega L_b$ ile ilişkilidir.

3. Deney Sistemi ve İncelenen Akım Transformatörü

Doğruluğu incelenen ölçü akım transformatörünün detayları ve resmi Tablo 1'de verilmiştir. Akım transformatörünün doğruluk analizi sırasında primer akımı, nominal akımının %5 ile %120'si arasında değişken tutulmuştur. Bununla birlikte sekonder yükü nominal yük değerinde kullanılmıştır [1].

Tablo 1: (a) İncelenen ölçü akım transformatörü etiket bilgileri ve (b) fotoğrafı

$K_n = I_p / I_s$	10A/5A
Nominal yük	30 VA
Sınıf	0.5
Frekans	50 Hz

(a)



(b)

Akım transformatörünün doğruluk analizi primer akımını sekonder akıma dönüştürürken oluşabilecek iki tip hata için yapılmıştır [9].

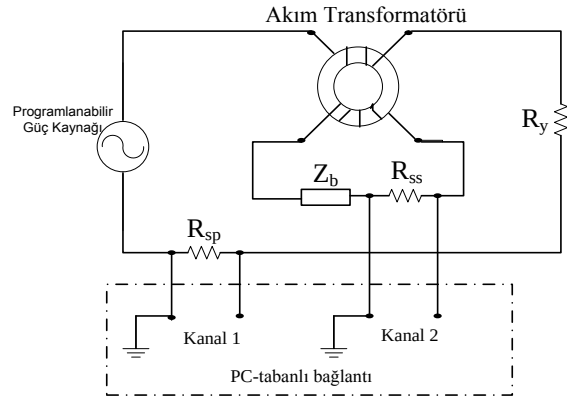
- Faz Hatası (FH); ölçümdeki reaktif kayıplar nedeniyle oluşan faz farkı hatasıdır. Primer ve sekonder akımlarının faz açıları sırasıyla θ_p ve θ_s olmak üzere faz hatası Denklem (8)'de verilmiştir.

$$\beta = \theta_{FH} = \theta_p - \theta_s \quad (7)$$

- Genlik (Oran) Hatası (%GH); efektif dönüştürme oranı hatasıdır. K_n , nominal dönüştürme oranı, I_p primerden geçen akım, I_s ise primer devreden I_p akımı geçerken sekonderden ölçülen akım olmak üzere Denklem (7)'deki formül ile yüzde genlik hatası olarak hesaplanmaktadır.

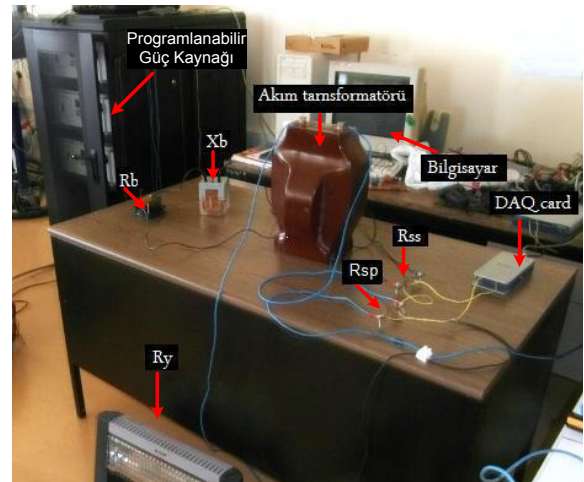
$$\%GH = \frac{(K_n \cdot I_s - I_p) \cdot 100}{I_p} = \left(\frac{1}{ODF} - 1 \right) \cdot 100 \quad (8)$$

Akım transformatörünün doğruluk analizi için kullanılan deney sistemi prensip şeması ve resmi sırasıyla Şekil 3 ve Şekil 4'te verilmiştir.



Şekil 3: Deney sistemi bağlantı şeması.

Primer akımı, California Instruments 3001ix programlanabilir güç kaynağı ve buna seri bağlı rezistif R_y yük direnci ile sağlanmaktadır. Ölçümler için primer ve sekonder tarafa R_{sp} ve R_{ss} akım şöntleri bağlanmıştır. Sekonder yükü, 30VA ve $\cos\phi=0.8$ için $Z_b=0.98+j0.69 \Omega$ olarak hesaplanmıştır. Ölçümler 16 bit çözünürlüğe, 250ks/s örnekleme hızına sahip National Instruments NI 9205 veri toplama kartı ve geliştirilen Labview arayüzü ile alınmıştır.



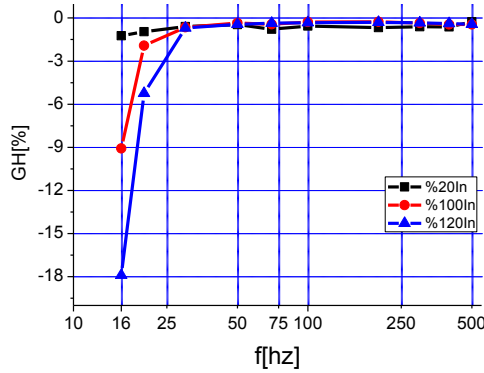
Şekil 4: Deney sistemi.

4. DeneySEL Sonuçlar

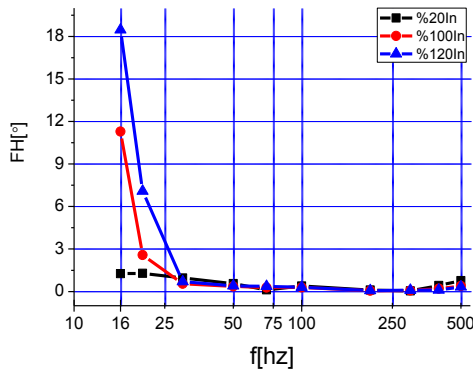
Deneyler iki ana grupta değerlendirilebilir. Birinci grup deneyler, ölçüm sisteminin doğruluğunu kanıtlamayı hedeflemektedir. Bu amaçla literatürde etkisi incelenen sinüzoidal şartlar altında frekansın etkisine bakılmıştır. İkinci grup deneylerde ise sinüzoidal olmayan şartların akım transformatörü üzerindeki etkisi incelenmektedir. Ölçüm hatası literatürden farklı olarak harmonik numarası bazlı değil yük bazlı olarak incelenmiştir. Öncelikli olarak simetrik ve asimetrik dalga formlarının etkisi incelenmiş, sonrasında ise günlük hayatta harmonik bozulmalara sebep olan 6 darbeli konvertör, 12 darbeli konvertör, AA kıyıcı ve yarım dalga doğrultucu ile elde edilen akım dalga formları kullanılmıştır

4.1. Sinüzoidal Şartlar Altında Frekansın Etkisi

Akım transformatörünün sinüzoidal şartlar altında frekans değişimine bağlı hata analizi, primer akımı nominal akımın %20, %100 ve %120 değerleri için incelenmiştir. Elde edilen sonuçlar sırasıyla Şekil 5 ve Şekil 6'da verilmiştir.



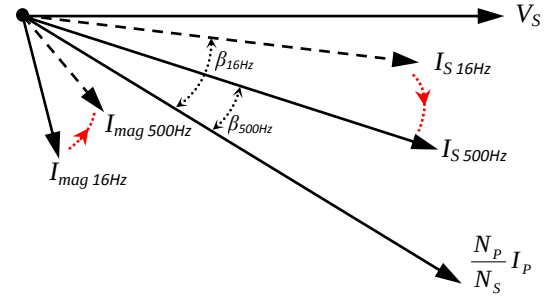
Şekil 5: Frekansa bağlı genlik hatası değişim.



Şekil 6: Frekansa bağlı faz hatası değişimi.

Grafikler incelendiğinde; 50Hz'in altındaki frekanslarda genlik ve faz hatasının büyük oranda arttığı ve akım transformatörünün sınıfının dışına çıktığı, 50Hz'in üzerindeki frekanslarda ise hata miktarlarının giderek azaldığı görülmektedir. Elde edilen sonuçlar literatürü destekler yöndedir [6][7][10].

Frekans arttıkça akım transformatörünün magnetizasyon reaktansı X_m artmaktadır. Ölçüm frekansı 16Hz'den 500Hz'e arttırılırken magnetizasyon akımı I_{mag} 'ın azaldığı, bununla birlikte sekonder akımı I_s 'nin ise arttığı Şekil 7'deki fazör diyagramından görülebilmektedir. Akımlardaki bu değişime bağlı olarak genlik hatası ve faz hatası azalmaktadır.



Şekil 7: Hata fazör diyagramı.

4.2. Sinüzoidal Olmayan Şartların Etkisi

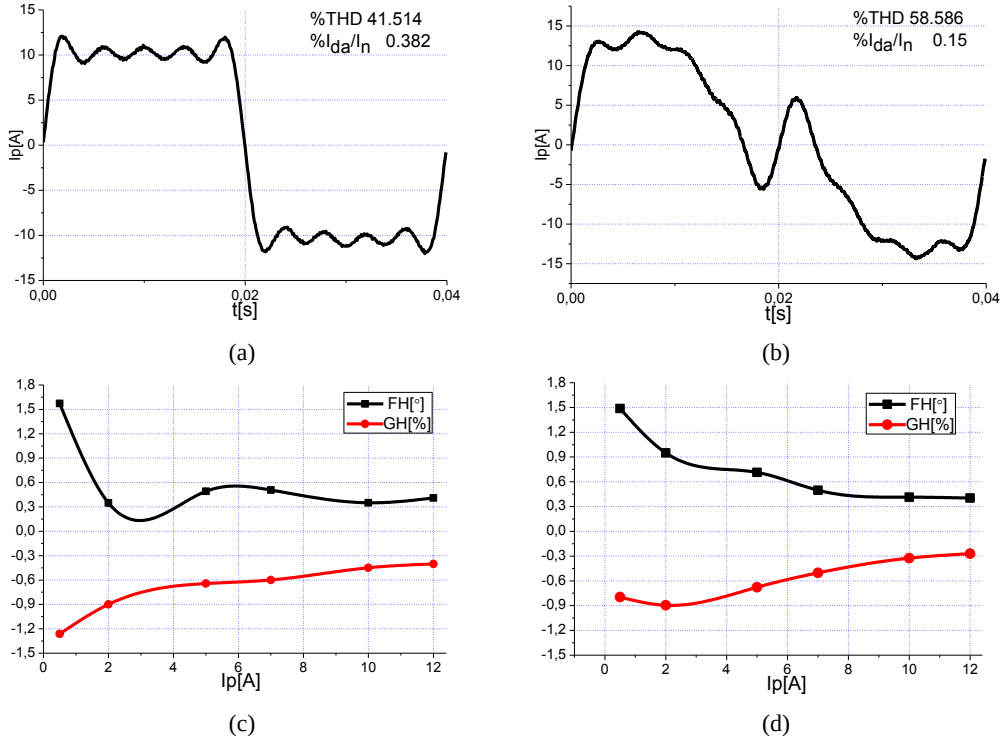
Sinüzoidal olmayan dalgalar sistemde zaman eksenine göre periyodik simetrik veya periyodik asimetrik olabilir. Sinüzoidal olmayan dalga formu tek sayılı harmoniklerden oluşuyorsa periyodik simetrik, çift sayılı harmoniklerden oluşuyorsa periyodik asimetrik. Periyodik asimetrik dalgaların ortalama değeri sıfırdan farklı ise DA bileşen ortaya çıkmaktadır. Tipik olarak harmonikler harmonik numarasının tersi büyüklüğünde değer alır [11]. Bu sebeple hata analizi yapılırken öncelikle harmonik akımları I_{temel}/I_h olacak şekilde belirlenip sırası ile tek sayılı harmonikler (THD₁ %41) ve çift sayılı harmonikler (THD₁ %58) olacak şekilde akım dalga formları oluşturulmuş ve akım transformatörüne uygulanmıştır.

50Hz'in üzerindeki frekanslarda tek ve çift harmoniklere sahip akım dalga formları sırasıyla Şekil 8-a ve b'de, bu akım dalga formlarına sahip primer akımları için genlik ve faz hataları ise sırasıyla Şekil 8-c ve d'de verilmiştir. Her iki akım dalga formu için de nominal akımının %5 ile %120'si arasında kalınması durumunda frekansın neden olduğu genlik ve faz hatasının giderek azaldığı ve transformatörün sınıfına uygun hata sınırları içerisinde çalıştığı görülmektedir.

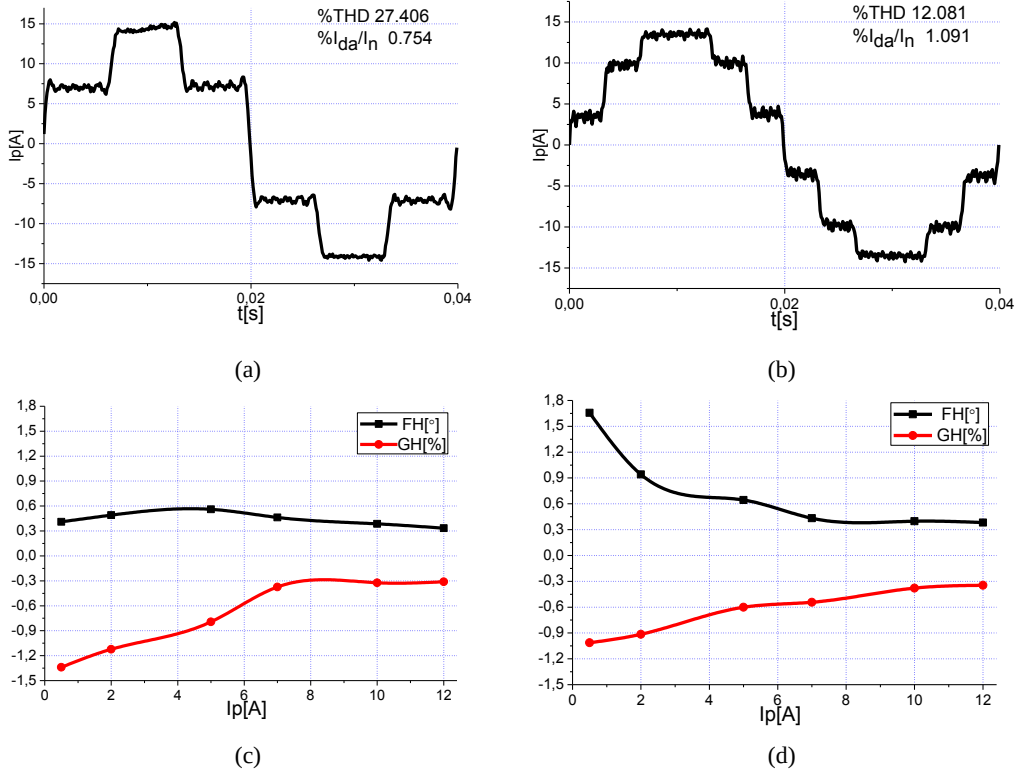
Çalışmanın devamında harmonik bozulmalara sebep olan 6 darbeli konvertör, 12 darbeli konvertör, AA kıyıcısı ve yarım dalga doğrultucu harmonik kaynaklarının akım dalga formları akım transformatörünün primerine uygulanmıştır. Akım transformatörünün primerine uygulanan 6 ve 12 darbeli konvertöre ait akım dalga formları sırasıyla Şekil 9-a ve b'de verilmiştir. Bu dalga formları programlanabilir güç kaynağı ile üretilip nominal akımın %5 ile %120'si arasında uygulanmıştır.

Tetikleme açısı 70° olan AA kıyıcısı ve yarım dalga doğrultucuya ait akım dalga formları sırasıyla Şekil 10-a ve b'de verilmiştir. AA kıyıcısı ölçümü, primer akımının 5A, 7A ve 10A değerleri için gerçekleştirilmiştir. Yarım dalga doğrultucu ölçümü ise primer akımı akım transformatörü nominal akımının %50, %70 ve %100 değerleri için yapılmıştır.

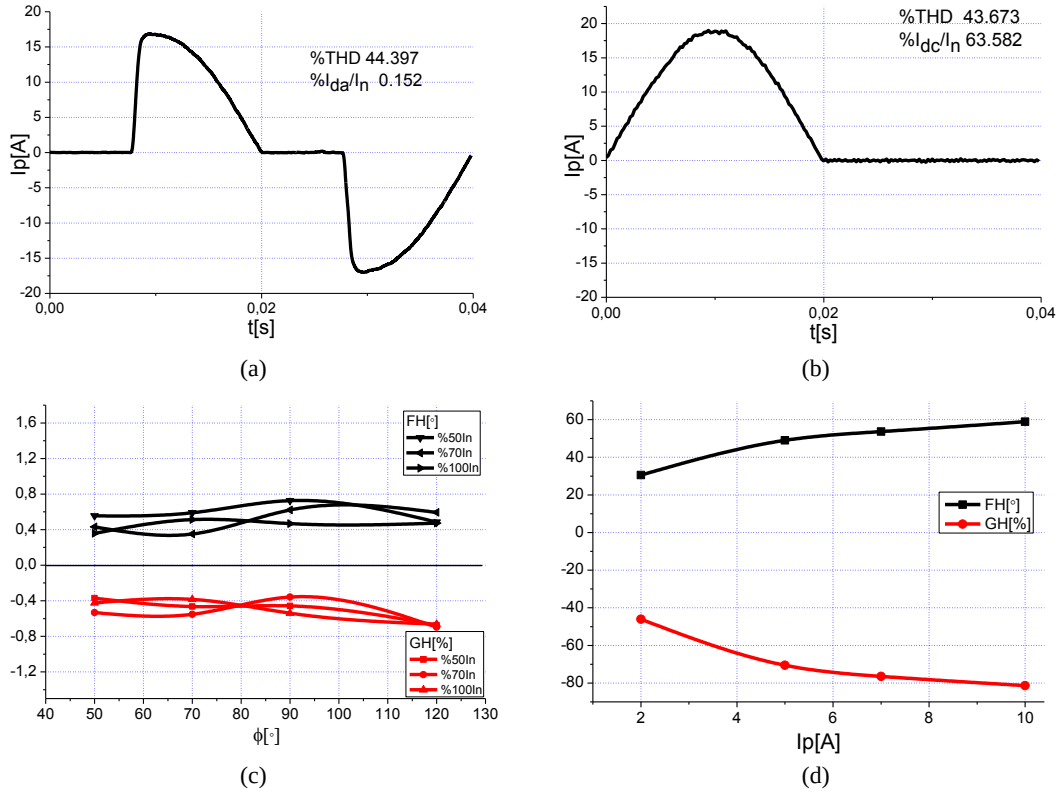
Şekil 9-c ve d ile Şekil 10-c ve d'de verilen sonuçlar toplu olarak incelendiğinde DA bileşeni içermeyen harmonikli dalga formlarının akım transformatörünün genlik ve faz hatasına olumsuz bir etkisi olmadığı, sonuçların standartların izin verdiği hata aralığında olduğu görülmektedir. Bununla birlikte DA bileşeni içeren harmonikli dalga formlarının neden olduğu genlik ve faz hatası miktarının standartların izin verdiği sınırların çok üzerinde tespit edilmiştir.



Şekil 8: (a) Tek harmonikli primer akımı dalga şekli, (b) Tek harmonikli primer akımı için genlik ve faz hatası, (c) Çift harmonikli primer akımı dalga şekli, (d) Çift harmonikli primer akımı için genlik ve faz hatası.



Şekil 9: (a) 6 darbeli ve (b) 12 darbeli konvertör primer akımı dalga şekli, (c) 6 darbeli konvertör primer akımı için genlik ve faz hatası, (d) 12 darbeli konvertör primer akımı için genlik ve faz hatası.



Şekil 10: (a) AA Kıyıcısı primer akımı ($\theta=70^\circ$), (b) DA bileşen içeren harmonikli akım, (c) AA Kıyıcısı primer akımı için genlik ve faz hatası, (d) DA bileşen içeren harmonikli akım için genlik ve faz hatası.

5. Sonuç

Akım transformatörünün doğruluğunun sinüzoidal olmayan şartlardan nasıl etkilendiği farklı tipte lineer olmayan yüklerle deneysel olarak incelenmiştir. Deneysel sonuçlardan görüldüğü gibi akım transformatörünün bağlı olduğu sistemde lineer olmayan yüklerin bulunması ölçüm hassasiyeti önemli ölçüde etkilenmektedir. Özellikle temel frekansın altındaki harmoniklerde ve akım dalga formundaki DA bileşen oranına göre akım transformatörü hata sınıfının dışına çıkabilmektedir.

İlerleyen çalışmalarda farklı sekonder yüklerine bağlı olarak akım transformatörünün sinüzoidal ve sinüzoidal olmayan durumlarda hata analizi yapılacak, akım dalga formuna bağlı olarak düzeltme katsayısı belirlenmesi üzerine çalışılacaktır.

6. Teşekkür

Bu çalışma TÜBİTAK tarafından desteklenen 110E113 numaralı araştırma projesi çerçevesinde yapılan çalışmaların bir ürünüdür.

7. Kaynaklar

- [1] IEC 60044-1, Current Transformers, Ed. 1.2, 2003.
- [2] D.W. Ackermann, "Current Transformer Measurement of Distorted Current Waveforms with Secondary Load Impedance," IEEE AFRICON 1999, vol. 2, pp. 765-768, Oct. 1999.
- [3] N. Locci, C. Muscas, "Comparative analysis between active and passive current transducers in sinusoidal and

distorted conditions," in Proc. Of IMTC1999, Venezia, Italy, May 1999, pp. 993-998.

- [4] G. Mahesh, B. George, V. Jayashankar, V. Jagadeesh Kumar, "Instrument Transformer Performance Under Distorted Conditions" IEEE INDIA ANNUAL CONFERENCE 2004, pp. 468-471.
- [5] T. Leibfried, "Determination of phase angle and amplitude error of voltage and current transformers up to some 100 Hz for loss measurement on power transformers" Electrical Engineering, vol. 83, p.47-54, Springer Verlag, 2001
- [6] S. Yıldız, M.H. Hocaoglu, "Akım Transformatorlerinin Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Performansının Simülasyon İle İncelenmesi", Elektrik, Elektronik, Bil. Mühendisliği 11. Ulusal Kongresi, 2005, İstanbul, sayfa: 437-441
- [7] S. Yıldız, "Akım Transformatorlerinin Sinüzoidal Olmayan Şartlarda Performansının Simülasyon İle İncelenmesi", Yüksek Lisans Tezi, Gebze Yüksek Teknoloji Enstitüsü, Gebze, 2005.
- [8] A.E. Emanuel, J.A. Orr, "Current Harmonics Measurement by Means of Current Transformer" IEEE Transaction on Power Delivery, Vol.22, No.3, July 2007, pp. 13 18-25.
- [9] IEEE Std. C37.110, IEEE Guide for the Application of Current Transformers, 1996.
- [10] V. L. Pham, K. P. Wong, N. Watson, J. Arrilaga, "Sub-Harmonic State Estimation In Power Systems", IEEE 0-7803-5935-6, pp. 1168-1173, 2000.
- [11] C. Kocatepe ve Ark., Elektrik Tesislerinde Harmonikler, BIRSEN YAYINEVI, 2003.