

# GÜÇ SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN GERÇEK ZAMANLI ÖLÇÜM VE ANALİZİ

**Şevki DEMİRBAŞ ve Sertaç BAYHAN\***

Elektrik Eğitimi Bölümü, Teknik Eğitim Fakültesi, Gazi Üniversitesi, 06500 Beşevler, Ankara

\*Teknik Bilimler Meslek Yüksekokulu, Başkent Üniversitesi, 06530 Etimesgut, Ankara

[demirbas@gazi.edu.tr](mailto:demirbas@gazi.edu.tr), [serbay@baskent.edu.tr](mailto:serbay@baskent.edu.tr)

(Geliş/Received: 15.07.2008 ; Kabul/Accepted: 11.05.2009)

## ÖZET

Bu çalışmada güç sistemlerinde akım ve gerilimdeki harmoniklerin gerçek zamanlı ölçüm ve analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistem bir dağıtım panosuna bağlanarak, değişik yüklerde akım ve gerilim değerleri ölçüm transformatörleri yardımıyla ölçülerek bir veri toplama kartı aracılığıyla bilgisayara aktarılmıştır. Verilerin veri toplama kartından bilgisayara aktarılması ve bu verilerin analizi LabVIEW programı ile hazırlanan yazılım yardımıyla sağlanmıştır. Bilgisayara aktarılan bu veriler kullanılarak üç faz akım, gerilim ve temel frekans değerleri ile harmonik değerleri hesaplanmış ve bu değerler grafik olarak bilgisayar ekranında gösterilmiştir. Deneysel sonuçlar, gerçekleştirilen ölçüm düzeneğinin akım ve gerilim dalga şekillerinin analizinde kullanışlı, doğruluğu yüksek ve düşük maliyetli bir sistem olduğunu göstermiştir.

**Anahtar Kelimeler:** Harmonik, LabVIEW, gerçek zamanlı ölçüm.

## REAL-TIME MEASUREMENT AND ANALYSIS OF HARMONICS IN POWER SYSTEMS

### ABSTRACT

In this study, real-time measurement and analysis of the current and the voltage harmonics in power systems have been realized. The system developed has been connected to an AC power source feeding several loads. The current and the voltage values are measured using measurement transformers and then they are transferred to the computer via a data acquisition board. Data transmission from the acquisition board to the computer and data analysis are achieved using a software developed in LabVIEW analysis environment. Three phase current, voltage, and their fundamental frequencies with harmonic values are calculated and then plotted on the computer screen. Experimental results show that the measurement setup is useful, high accuracy and cheap for analyzing current and voltage waveforms.

**Keywords:** Harmonic, LabVIEW, real-time measurement.

### 1. GİRİŞ (INTRODUCTION)

Elektrik santrallerinde alternatörler tarafından üretilen gerilim tam sinüsoidal yakın olmasına karşılık, doğrusal olmayan karakteristik gösteren yüklerin artması ile birlikte, şebekeden çekilen akım dalga şekillerinde bozulmalar meydana gelmektedir. Şebekeden çekilen düzensiz akım şebeke empedansından dolayı şebeke üzerinde gerilim düşümüne, dolayısıyla akım ve gerilim dalga şekillerinde de bozulmalara neden olmaktadır [1, 2]. Akım ve gerilim dalga şekillerini bozan bu etkenlere harmonik denir.

Harmonikler, şebeke frekansının tam katları frekanslara sahip sinüsoidal akım ve gerilimlerdir [3]. Güç sistemlerindeki harmoniklerin büyüklüğü 1920'li yılların başlarında yalnızca trafolar, motorlar ve doğrultucular ile sınırlı olmasına karşın, gelişen teknolojiye paralel olarak, endüstride kullanılan güç elektroniği elemanlarının artmasıyla harmoniklerin büyüklüğünde de bir artış gözlemlenmiştir. Modern ve hassas yüklerin üretim süreçlerinde kullanılmasıyla, harmonikler daha ciddi bir problem ve bu alanda çalışmaların yoğunlaştığı önemli bir konu başlığı haline gelmiştir [4].

Güç sistemlerinde meydana gelen harmonikler cihazların yanlış çalışmasına veya hiç çalışmamasına, trafo ve motorların aşırı ısınmasına, iletişim hatlarında parazitlere, ölçümlerin yanlış yapılmasına, elektrik aygıtlarının ömürlerinin azalmasına, alıcıların ve sistemlerin güç kayıplarının artmasına sebep olmaktadır [5, 6]. Ayrıca harmonikler, güç faktörünün düzeltilmesi için endüstriyel tesislerde yapılan kompanzasyon ünitelerinde rezonans olayı sonucu ciddi problemlere neden olmaktadır [7, 8]. Harmoniklerin zararlı etkilerinin azaltılması için harmonik değerlerinin doğru ve sürekli ölçülmesine ihtiyaç vardır. Harmonik değerlerinin nasıl ölçüleceği ve hangi aralıklarda ölçüleceği konusunda IEC 61000-4-7/CLASS B [9] standardı ve IEEE 519-1995 [10] standardı referans alınmaktadır.

Harmoniklerin ölçülmesinde ölçüm noktaları da önem kazanmaktadır. Elektrik iletim ve dağıtım sistemlerindeki harmoniklerin ölçülmesinde ölçüm noktası olarak, trafo merkezleri kullanılmaktadır [11-13]. Bu merkezlerde yapılan ölçümler iletim ve dağıtım sisteminde meydana gelen toplam harmonikleri ölçmektedir. Böyle bir sistem toplam harmonik değerlerinin belirlenmesinde ve buna uygun filtrelerin tasarımında kullanılabilir. Trafo merkezlerinden gerçekleştirilen ölçüm yöntemleri ve harmonik önleme yöntemleri yüksek maliyet gerektirmektedir. Bunun yerine harmoniklere neden olan doğrusal olmayan yüklerle en yakın noktadan ölçümler alınarak, harmoniklerin azaltılması tercih edilmektedir [14-16]. Bu yöntemlerde doğrusal olmayan yüklerin harmonikleri ayrı ayrı analiz edilebildiğinden, her bir yükün harmonik etkisi daha düşük maliyet ile azaltılabilir. Harmoniklerin ölçümünde spektrum analizörleri, güç sistem analizörleri, dijital osiloskoplar ve bilgisayar tabanlı ölçüm sistemleri kullanılmaktadır [17]. Harmonik ölçümünde kullanılan bu elemanların bazıları akım ve gerilim değerleri ile belirli sayıda harmonik değerlerini ölçebilmektedir. Bu elemanların maliyeti düşük olmasına karşılık, grafik özellikleri olmadığından dolayı elde edilen verilerin grafikleri bir bilgisayar yardımıyla çizilebilmektedir. Grafik özelliği olan harmonik ölçüm aletlerinin maliyetleri oldukça yüksektir. Piyasa araştırmaları sonucu yapılan incelemelerde bu cihazların fiyat aralığının 3500 \$ ile 12000 \$ arasında olduğu saptanmıştır. Ayrıca bu tür cihazların kullanımı ve ölçümlerin yorumlanması için cihazı kullanacak teknik elemanlara ihtiyaç duyulmaktadır.

Bu çalışmada güç sistemlerindeki harmoniklerin ölçümü ve analizi için bir ölçüm düzeneği geliştirilmiştir. Geliştirilen düzenek ile güç sisteminin tüketici tarafından herhangi bir noktadan akım ve gerilim değerleri ölçülerek, harmonik analizi gerçekleştirilebilmektedir. Gerçekleştirilen bu sistemle, sadece ölçümlerin doğru ve hızlı şekilde alınması sağlanmış, aynı zamanda ölçüm sisteminin maliyeti de düşürülmüştür. Tasarlanan ölçüm düzeneği tüm donanımıyla yaklaşık 3000 \$ a gerçekleştirilebilmektedir.

Gerçekleştirilen deney düzeneğinin diğer önemli bir özelliği de bilgisayar ortamında hazırlanan arayüz yazılımı yardımıyla kullanıcı ekranının basit ve kolay anlaşılır şekilde tasarlanmış olmasıdır. Bu arayüz yazılımı sayesinde kullanıcı herhangi bir teknik bilgiye ihtiyaç duymadan 3 faz akım ve gerilim dalga şekillerini izleyebilmekte ve harmonik değerlerini sayısal ve grafiksel olarak görüntüleyebilmektedir.

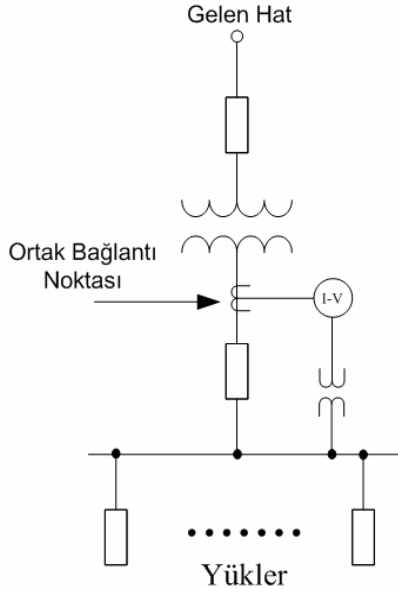
Gerçekleştirilen ölçüm düzeneği ile değişik yükleri besleyen bir dağıtım panosundan ölçümler alınarak, akım ve gerilim harmoniklerinin analizi yapılmıştır. Gerçekleştirilen ölçüm düzeneğinin doğruluğunu test etmek amacıyla aynı koşullarda ticari olarak üretilmiş bir harmonik analiz cihazı ile ölçümler yapılarak elde edilen değerler karşılaştırılmıştır. Her iki ölçüm değerlerinin birbirleri ile uyumlu olduğu görülmüştür.

## 2. HARMONİKLERİN ÖLÇÜM VE ANALİZİ (MEASUREMENT AND ANALYSIS OF HARMONICS)

Harmoniklerin güç sisteminde meydana getirdiği sorunların giderilmesi için bu bileşenlerin ölçümü ve analizleri çok önemlidir. Ele alınan sistemlerde, hangi noktalardan ölçüm yapılması, bunların analizlerinin nasıl gerçekleştirileceği dikkat edilmesi gereken konulardır. Çalışmalar gerçekleştirilirken uluslararası ve ulusal kuruluşların belirlediği standartlar temel alınarak, ölçüm süreleri, ölçüm ve analiz yöntemleri uygun standartlara göre seçilmelidir [18]. Bu amaçla, bazı ülkeler harmonikleri bir yaptırım olarak sınıflandırmışlar ve harmonik standartlarını oluşturmuşlardır.

Ülkemizde elektrik iletim sistemi kullanıcılarının yapmakla yükümlü oldukları harmonik sınır değerleri ve harmonik ölçüm sınır değerleri “Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği” [19] ile “Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği” [20] tarafından belirlenmektedir. Akım harmonik sınır değerleri Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği’nde, gerilim harmonik sınır değerleri de Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği’nde yer almıştır. Standartlarda ölçüm noktası olarak ölçüm yapılacak sistemin ortak bağlantı noktası tercih edilmektedir. Böyle bir ölçüm düzeneğinin bağlantı şeması Şekil 1’de görülmektedir. İncelenen sistemlerde, hangi noktalardan ne kadar süre ile ölçüm alınacağı ve bunların analizlerinin nasıl yapılacağı da önem arz etmektedir. Doğrusal olmayan elemanlar ile tam sinüsoidal olmayan kaynaklardan herhangi birisi veya bunların ikisinin sistemde bulunmasıyla, sistemdeki akım ve gerilim dalga şeklinin bozulduğu bilinmektedir. Bozulan bu dalga şekillerini Fourier Analizi olarak bilinen yöntem ile temsil etmek mümkündür [21].

Fransız fizikçisi ve matematikçisi J. Fourier, sinüsoidal olmayan periyodik dalgaların; genlik ve frekansları farklı birçok sinüsoidal dalgaların toplamından oluştuğunu, başka bir deyişle; sinüsoidal



**Şekil 1.** Ortak bağlantı noktası şeması (Diagram of common coupling point)

olmayan periyodik dalgaların genlik ve frekansları değişik (temel dalga frekansının tam katları) olan sinüsoidal dalgalara ayrılabilirliğini göstermiştir.

Periyodik fonksiyonlar Fourier serisine açıldıklarında, birinci terimi bir sabit, diğer terimleri ise bir değişkenin katlarının sinüs ve cosinüslerinden oluşan bir seri halinde yazılabilir.

$$i_s(t) = I_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (1)$$

$$v_s(t) = V_{dc} + \sum_{n=1}^{\infty} [a_n \cos(n\omega t) + b_n \sin(n\omega t)] \quad (2)$$

Akım ve gerilim harmonikleri simetrik olduklarından, cosinüslü terimlerin değeri sıfır olacaktır. Ayrıca ifadenin sadeleştirilmesi açısından DC (Doğru Akım) bileşenler ihmal edilirse, güç sistemlerinde akım ve gerilimin anlık değerlerinin Fourier açılımı aşağıdaki şekilde yazılabilir.

$$i_s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} I_{sn} \sin(n\omega_1 t + \theta_n) \quad (3)$$

$$v_s(t) = \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} V_{sn} \sin(n\omega_1 t + \delta_n) \quad (4)$$

Burada,  $V_{sn}$  ve  $I_{sn}$  n. harmonik derecesi için gerilim ve akımın etkin değerleri,  $\omega_1$  temel frekansa ait açısal frekans,  $\delta_n$  ile  $\theta_n$  ise n. harmonik için gerilim ve akıma ait faz açılarıdır.

n. harmonik akım etkin değeri ( $I_{sn}$ ) ile faz açısı ( $\theta_n$ ), Denklem 5'ten hesaplanmaktadır.

$$\theta_n = \tan^{-1} \left( \frac{a_n}{b_n} \right) \quad I_{sn} = \frac{1}{\sqrt{2}} \sqrt{a_n^2 + b_n^2} \quad (5)$$

Toplam akımın etkin değeri;

$$i_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} [i_s(t)]^2 d\omega t}$$

$$i_s = \sqrt{\frac{1}{2\pi} \int_0^{2\pi} \left[ \sum_{n=1}^{\infty} \sqrt{2} i_{sn} \sin(n\omega t + \theta_n) \right]^2 d\omega t} \quad (6)$$

$$i_s = \sqrt{\sum_{n=1}^{\infty} i_{sn}^2} = \sqrt{i_{s1}^2 + i_{s2}^2 + i_{s3}^2 + \dots}$$

ifadesinden elde edilmektedir.

Harmonik akımlarının etkin değeri;

$$i_h = \sqrt{i_{s2}^2 + i_{s3}^2 + i_{s4}^2 + \dots} \quad (7)$$

olarak bulunabilir.

Uygulamada harmonik ifadelerinde bazı sadeleştirmeler yapmak mümkündür. Örneğin dengeli güç sistemlerinde yarım dalga simetrisinden dolayı çift harmoniklerin etkisi sıfırdır. Trafolar tarafından üretilen 3 ve 3'ün katları harmoniklerin şebeke üzerindeki etkileri ise çeşitli trafo bağlantıları ile giderilebilmektedir. Bunların dışında elektrik üretim aşamasında alternatörlerin meydana getirdiği harmoniklerde alternatör sarım şekillerini değiştirerek giderilebilmektedir. Alternatör faz sargılarının toplu sarım yerine dağıtılmış sarımlı yapılmaları üretilen gerilim dalga şeklini trapez yerine sinüsoidale yaklaştırmaktadır. Bunlara ilaveten, alternatör bobin adımının, yok edilmesi istenen harmonik oranında kısaltılması da, harmoniklerin azaltılması için kullanılan yöntemlerdir[22].

Harmonik büyüklüklerin sınırlanmasını amaçlayan standartlarda çok yaygın olarak kullanılan toplam harmonik bozulumu;

$$THD = \frac{\sqrt{i_s^2 - i_{s1}^2}}{i_{s1}} = \frac{\sqrt{\sum_{n=2}^{\infty} i_{sn}^2}}{i_{s1}} = \frac{i_h}{i_{s1}} \quad (8)$$

ifadesinden yararlanılarak bulunmaktadır.

Denklem 8'den görüldüğü gibi THD, harmoniklerin etkin değerlerinin toplamının, temel bileşen etkin değerine oranıdır ve genellikle yüzde olarak ifade edilir. Bu değer, harmonikleri içeren periyodik dalga şeklinin, tam bir sinüs dalga şeklinden sapmasını tespit için kullanılır. Sadece temel frekanstan oluşan tam bir sinüs dalga şekli için THD sıfırdır.

### 3. HARMONİK ÖLÇÜM SİSTEMİ (HARMONIC MEASUREMENT SYSTEM)

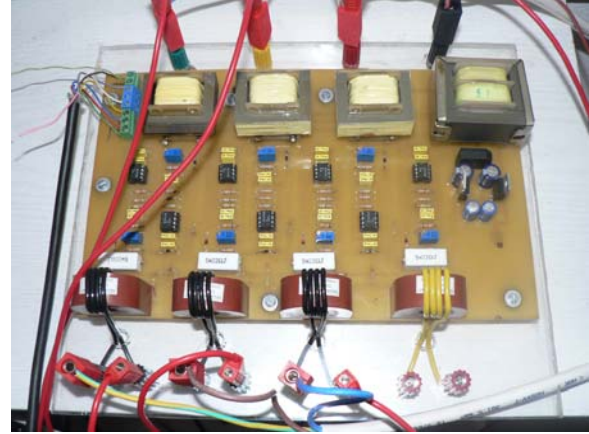
Bu çalışmada laboratuvar ortamında değişik yükleri besleyen bir dağıtım panosundan ölçümler alınarak harmonik analizi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistemin blok diyagramı Şekil 2’de görülmektedir.

Sistem üç basamaktan oluşmaktadır. Birinci basamakta ölçüm yapılacak sistemden gerekli akım ve gerilim bilgilerini okuyan ölçme kartı bulunmaktadır. Tasarlanan ölçme kartının fotoğrafı Şekil 3’te görülmektedir. Ölçme kartının görevi gerilim ve akım sinyallerini veri toplama kartının girişine uygun düzeye dönüştürmektir. Bu amaçla akım bilgileri 1000/1 dönüştürme oranına sahip akım transformatörleri ile gerilim bilgileri ise akım transformatörlerinin bağlı olduğu fazlara bağlanan gerilim transformatörleri yardımıyla okunmaktadır.

Okunan bu değerler bir yükseltici devrenin girişine uygulanarak gerekli kazançlar elde edildikten sonra çıkışa aktarılmaktadır. Ölçme kartının çıkışından elde edilen akım ve gerilim bilgileri veri toplama kartının analog giriş kanallarına uygulanmaktadır. Veri toplama kartı olarak National Instruments firmasına ait 6071E model veri toplama kartı kullanılmıştır [23]. Bu kart yardımıyla ölçme kartından okunan veriler eş zamanlı olarak bilgisayara aktarılmaktadır.

Gerçek zamanlı ham veri LabVIEW programı yardımıyla 5120 örnek/saniye/kanal örnekleme hızıyla birbirini kapsamayan 1 saniyelik pencereler kullanılarak alınmaktadır.

IEC 61000-4-7/Class B standardına uygunluğu sağlamak için 3 faz akım ve gerilimlerin her biri saniyede 5120 örnek alınarak ölçülmüş, ölçülen değerler 5 tane 10 (50 Hz lik sistemler için) tam periyoda bölünmüş ve DFT (Discrete Fourier Transform) algoritması kullanılarak frekans spektrumu elde edilmiştir. Bu çalışmada alınan örnek sayısının 2’nin üslü katı olmamasından dolayı FFT (Fast Fourier Transform) yerine DFT algoritması kullanılmıştır. DFT algoritması kullanılması sinyalin bazı bileşenlerinin dönüşüme girememesi nedeniyle eksik genlikli bir frekans spektrumu elde edilmesine neden olmuştur. Bu sorunu çözmek için standartta belirtilen Hanning Penceresi kullanılmıştır. Bu çalışmada gerilimin örneklenecek incelenmesi sırasındaki gerilim dalgalanmalarının

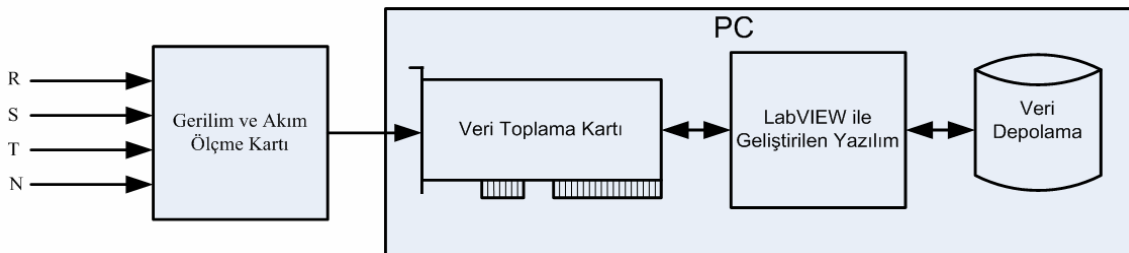


Şekil 3. Tasarlanan ölçme kartının fotoğrafı (Photograph of the measurement board designed)

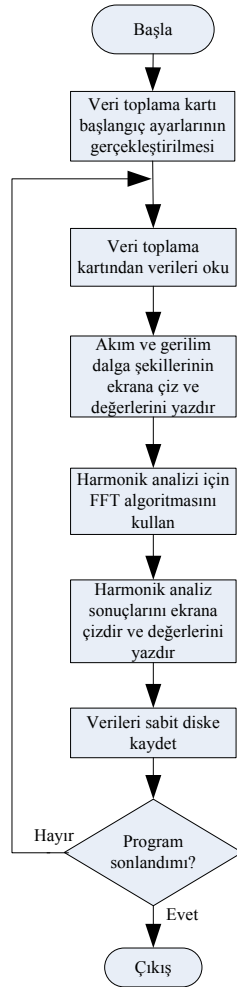
etkisini de dahil etmek için alt-grup analizi tercih edilmiştir.

Şekil 4’te gerçekleştirilen yazılımın akış diyagramı verilmiştir. Program ilk çalıştırıldığında veri toplama kartının ön ayarları (örnekleme hızı, giriş kanalları, vb.) yapılmaktadır. Daha sonra veri toplama kartından veriler yukarıda anlatıldığı gibi okunmaktadır. Gerçekleştirilen yazılım kullanıcı etkileşimli olup, akım ve gerilim dalga şekilleri ile harmonik dağılımı kullanıcı ekranında gerçek zamanlı olarak görülebilmektedir. Ayrıca 3 faz akım ve gerilim etkin değerleri, toplam harmonik bozulumu ve istenilen harmoniklerin değerleri de kullanıcı ekranında görüntülenmektedir. Bununla birlikte veri toplama kartından elde edilen veriler bir dosyada saklanmak suretiyle, istenilen her hangi bir zaman aralığındaki harmonik değerlerini görmek mümkündür.

Şekil 5’te hazırlanan arayüz program görüntüsü verilmiştir. Arayüz programı iki kısımdan meydana gelmiştir. Şekil 5.a’da verilen ilk kısımda akım ve gerilim dalga şekilleri ile birlikte, 3 faz etkin değerlerinin, temel frekans değerlerinin ve THD değerlerinin gösterildiği kutucuklar yer almaktadır. Ekranın sağ tarafına yerleştirilen butonlar yardımı ile istenilen fazın akım ve gerilim sinyalleri tek başına veya birlikte gösterilebilmektedir. İlgili butona basıldığında ona karşılık gelen faz gerilim veya akım dalga şekli ekranda görülmektedir. Şekil 5.b’de verilen ikinci kısımda ise, harmonik analiz sonuçlarını gösteren ekranlar yer almaktadır. Bu kısımda bütün akım ve gerilim sinyallerinin harmonikleri ayrı ayrı ekranlarda



Şekil 2. Gerçekleştirilen sistemin blok diyagramı (Block diagram of the system implemented)



Şekil 4. Yazılımın akış diyagramı (Flow chart of the software)

gösterilerek analiz kolaylaştırılmıştır. Ayrıca, her ekranın altına eklenen butonlar yardımıyla istenen harmonik derecesinin büyüklüğü de kullanıcıya verilmektedir. Burada gösterilen harmoniklerin dereceleri tek olabileceği gibi çift harmonikleri de görmek mümkündür. Bu sayede kullanıcı hangi faz akımı veya geriliminde kaçınıcı dereceden harmoniğin yer aldığını ve bunun büyüklüğünü kolayca tespit

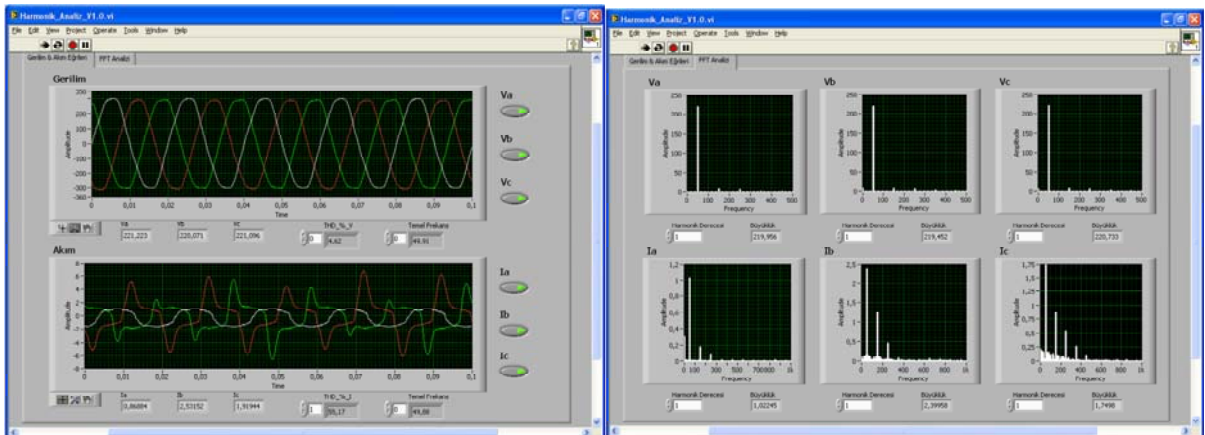


Şekil 6. Harmonik ölçüm düzeneği (Harmonic measurement setup)

edebilmektedir. Bütün faz akım ve gerilimlerine ait THD değerlerinin izlenebilmesi için akım ve gerilim eğrilerinin gösterildiği ekranların alt taraflarına bilgi kutucukları yerleştirilmiştir. Bu bilgi kutucuklarından istenen faz akımı veya faz geriliminin THD değeri kolaylıkla okunabilmektedir. Hazırlanan yazılıma bütün halinde bakıldığında görsel olarak zengin, kullanışlı ve özgün olduğu görülmektedir.

#### 4. DENEYSSEL ÇALIŞMALAR (EXPERIMENTAL STUDIES)

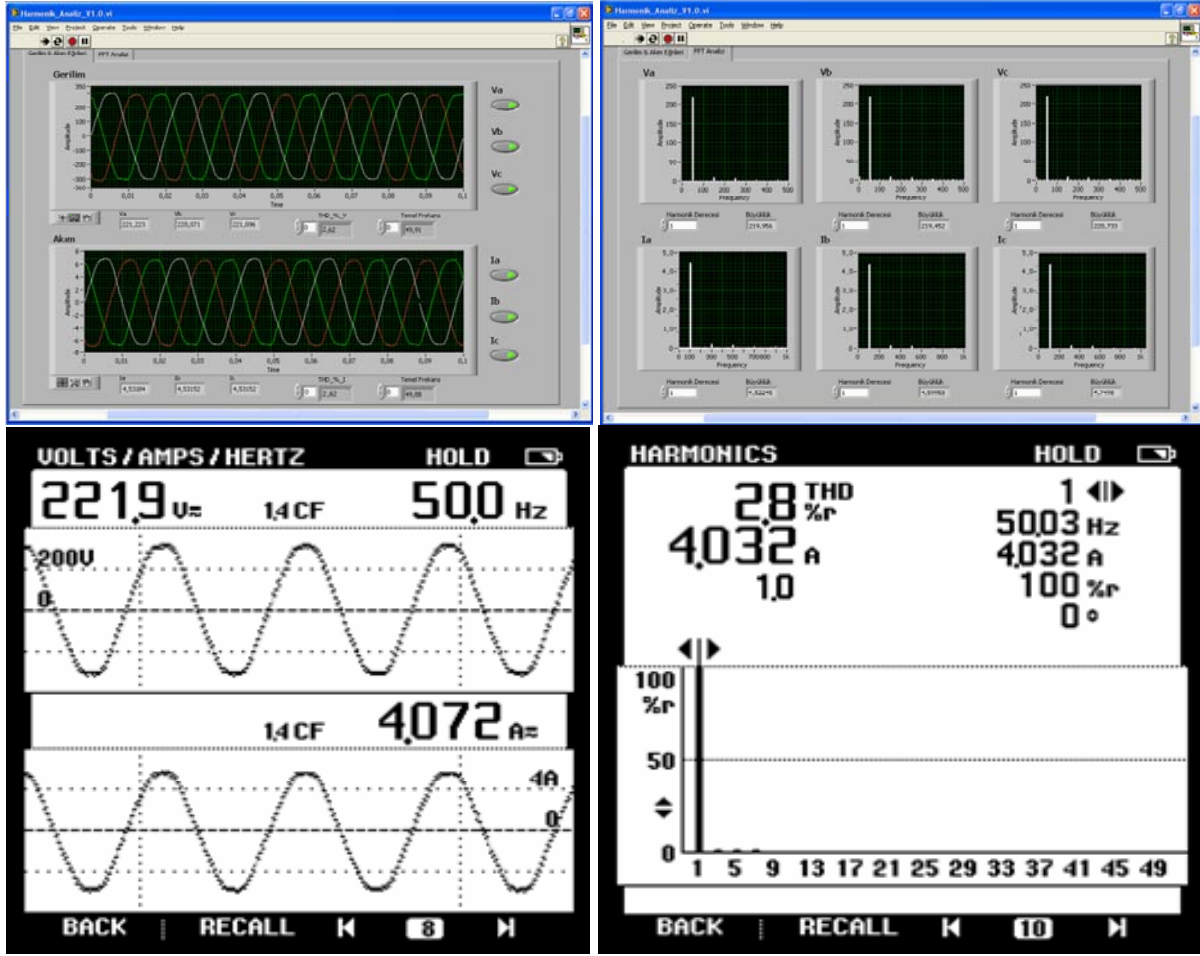
Harmoniklerin gerçek zamanlı analizi için gerçekleştirilen sistem Başkent Üniversitesi Denetim Laboratuvarında bulunan bir dağıtım panosuna bağlanmış ve gerekli ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 6'da gerçekleştirilen ölçüm sisteminin fotoğrafı görülmektedir. Deneysel çalışmada değişik karakteristikteki yükler dağıtım panosuna bağlanarak, ölçüm sisteminin doğruluğu test edilmiştir. İlk olarak devreye direnç bağlanarak ölçüm sisteminin tepkisi incelenmiştir. Saf direnç yük olarak 3 kW gücündeki 3 fazlı direnç kullanılmıştır. Şekil 7'de tasarlanan ölçüm sistemi ile alınan ekran görüntülerinin yanında FLUKE 43B model bir enerji analizörünün ekran görüntüleri de verilmiştir.



(a) Gerilim ve akım dalga şekilleri (Waveforms of voltage and current)

(b) Gerilim ve akım harmonikleri (Harmonics of voltage and current)

Şekil 5. Harmonik ölçüm programı ön görünüşleri (Front panels of harmonic measurement program)



Şekil 7. Direnç yüklerde akım-gerilim dalga şekli ve harmonik dağılımı (Current and voltage waveforms and their harmonic spectrums of resistive loads)

Şekillerden görüldüğü gibi direnç doğrusal özelliğe sahip olduğundan, şebekeden harmonikli akım çekmeyecek, dolayısıyla dalga şekli sinüsoidal olacaktır. Harmonik analiz sonuçları incelendiğinde 150, 250 ve 350 Hz'lerde çok küçük değerli akım harmonikleri görülmektedir. Bunun nedeni gerilim sinyallerindeki harmoniklerin akıma yansmasıdır. Eğer gerilim tam sinüsoidal olup harmonik içermezse, direnç yük akımındaki harmonikler de sıfır olacaktır. Direnç yük durumunda, gerçekleştirilen ölçüm sistemi yardımıyla alınan değerler ile FLUKE 43B enerji analizörü yardımıyla alınan değerler Tablo 1' de verilmiştir.

İkinci olarak, bir fazlı köprü tipi doğrultucu çıkışına direnç yükü bağlanarak ölçümler gerçekleştirilmiştir. Şekil 8'de tasarlanan ölçüm sistemi ile alınan ekran görüntüleri ve FLUKE 43B model bir enerji analizörünün ekran görüntüleri verilmiştir. Doğrusal bir devre elemanı olmayan doğrultucunun giriş akım dalga şekli sinüsoidalden uzaklaşmış ve akım harmonik miktarında artış gözlenmiştir.

Bu yük durumunda, gerçekleştirilen ölçüm sistemi yardımıyla alınan değerler ile FLUKE 43B enerji analizörü yardımıyla alınan değerler Tablo 2'de verilmiştir. Burada tablonun okunabilmesi için yedinci harmonik değerine kadar değerler verilmiştir.

Yapılan ölçümlerden elde edilen sonuçlar karşılaştırıldığında gerçekleştirilen harmonik ölçüm sisteminin ölçüm hatasının FLUKE 43B model bir enerji analizörü referans alındığında %1' den daha küçük olduğu görülmektedir.

## 5. SONUÇ VE DEĞERLENDİRME (RESULT AND CONCLUSION)

Bu çalışmada akım ve gerilim değerlerinin ölçüm ve analizi için bir ölçme sistemi gerçekleştirilmiştir. Gerçekleştirilen sistem ile akım ve gerilim değerleri 5120 örnek/saniye/kanal hızında ölçülmüş ve bu değerler bilgisayar ortamına aktarılmıştır. Elde edilen ölçüm değerleri kullanılarak 3 faz akım ve gerilim etkin değerleri, frekans değerleri ve THD' leri

Tablo 1. Direnç yükü altında ölçülen değerler (Measurement values of resistive load)

	$V_f$ (V)	$I_f$ (A)	f(Hz)	%V THD	%I THD	$I_1$ (A)	$I_3$ (A)	$I_5$ (A)	$I_7$ (A)
Ger. Sistem	221.2	4.064	50.01	2.78	2.78	4.029	0.11	0.14	0.10
FLUKE 43B	221.9	4.072	50.00	2.80	2.80	4.032	0.12	0.14	0.11

**Tablo 2.** Köprü doğrultuculu yük altında ölçülen değerler (Measurement values of bridge rectifier load)

	$V_f$ (V)	$I_f$ (A)	f (Hz)	%V THD	%I THD	$I_1$ (A)	$I_3$ (A)	$I_5$ (A)	$I_7$ (A)
<b>Ger. Sistem</b>	221.8	1.019	50.03	4.59	67.74	0.732	0.510	0.371	0.14
<b>FLUKE 43B</b>	219.8	0.998	50.00	4.56	67.60	0.728	0.513	0.374	0.12

hesaplanmış ve bilgisayar ekranında görüntülenmiştir. Ayrıca 3 faz akım ve gerilim dalga şekilleri ile harmonik bozulum grafikleri de ekranda gösterilmiştir. Gerçekleştirilen deneysel çalışmalarda değişik karakteristikteki yükler devreye alınarak tasarlanan ölçüm sistemi ve FLUKE 43B model bir enerji analizöründen alınan sonuçlar karşılaştırılmıştır. Deneysel sonuçlar, gerçekleştirilen ölçüm düzeneğinin akım ve gerilim dalga şekillerinin analizinde kullanışlı doğruluğu yüksek ve düşük maliyetli bir sistem olduğunu göstermiştir. Ayrıca gerçekleştirilen sistem ile ayrı bir donanıma gerek kalmadan yazılımda yapılacak değişiklikler ile diğer enerji kalitesi değerlerinin ölçülmesi mümkündür.

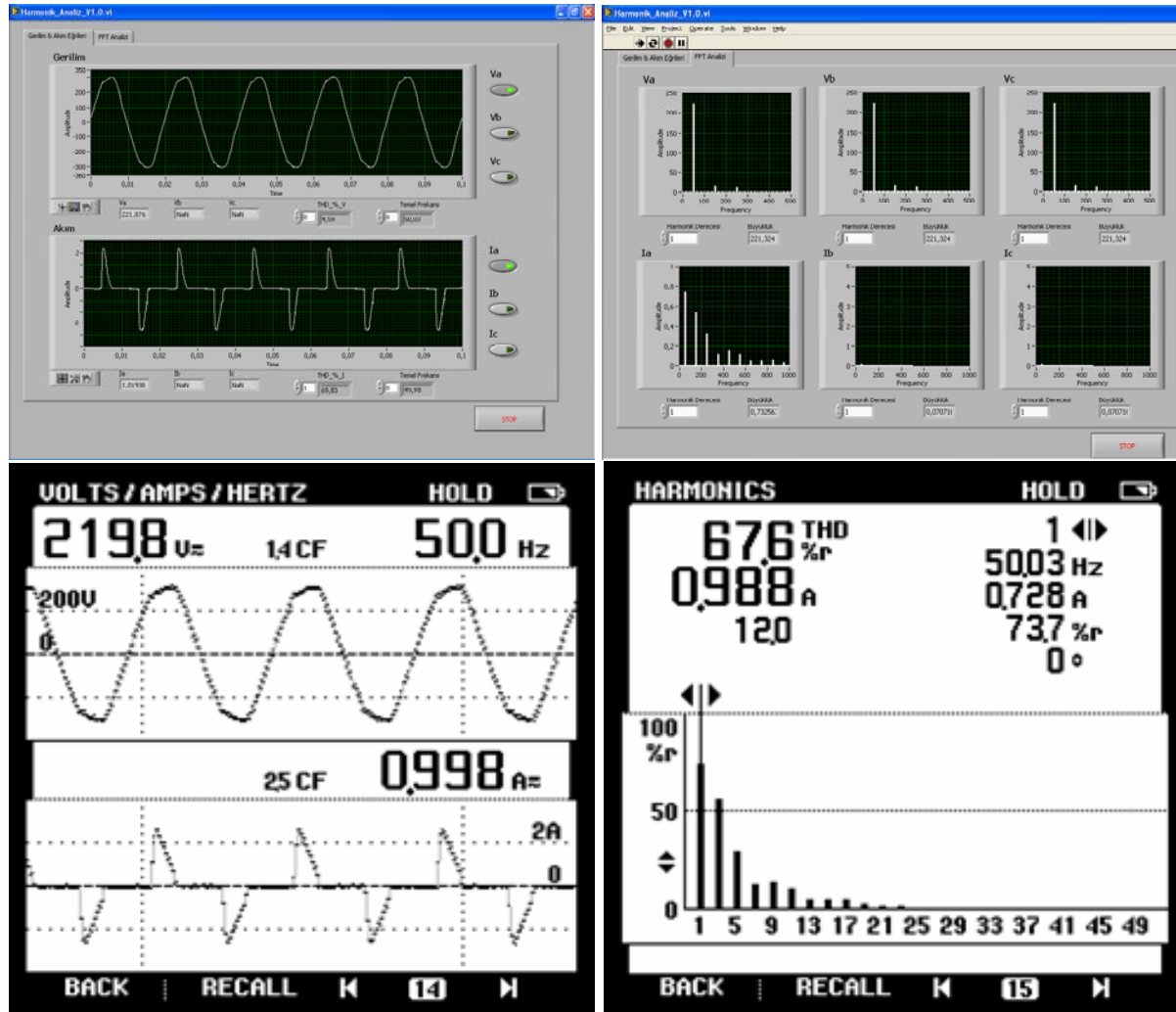
## 6. TEŞEKKÜR (ACKNOWLEDGMENT)

Yazarlar, bu çalışmaya proje kapsamında 07/2007-37

nolu proje ile destek veren Gazi Üniversitesi Bilimsel Araştırma Projeleri Birimi'ne teşekkür ederler.

## SEMBOLLER (NOMENCLATURE)

- $i_s(t)$  : Akımın anlık değeri
- $v_s(t)$  : Gerilimin anlık değeri
- $I_{dc}$  : Akımın DC (Doğru Akım) bileşeni
- $V_{dc}$  : Gerilimin DC bileşeni
- $I_{sn}$  : n. harmonik derecesi için akımın etkin değeri
- $V_{sn}$  : n. harmonik derecesi için gerilimin etkin değeri
- $\omega_1$  : Temel açısal frekans
- $\delta_n$  : n. harmonik için gerilime ait faz açısı
- $\theta_n$  : n. harmonik için akıma ait faz açısı
- $i_s$  : Toplam akımın etkin değeri
- $i_h$  : Harmonik akımlarının etkin değeri
- $a_n$  : n. harmonik için cosinüslü terimin büyüklüğü
- $b_n$  : n. harmonik için sinüslü terimin büyüklüğü



**Şekil 8.** Köprü doğrultucu çıkışına bağlanan direnç yükünün akım-gerilim dalga şekli ve harmonik dağılımı (Current and voltage waveforms and harmonic spectrums of full-bridge rectifier)

**KAYNAKLAR (REFERENCES)**

1. Arrillaga J., Watson N., **Power System Harmonics**, John Wiley & Sons, 2003.
2. Mack G., S. Santoso, **Understanding Power System Harmonics**, IEEE Power Engineering Review, November 2001.
3. Türker, T., Öztürk, S., Alboyacı, B., Yörükeren, N., Çetinkaya, H. B., “Harmonikli Yük Akımlarının Konut Bölgelerinde Kullanılan Transformatörler Üzerindeki Etkisinin İncelenmesi” **I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu**, Kocaeli/Türkiye, Mayıs 2005.
4. Boyrazoğlu, B., Ünsar, Ö., Polat, B., “Elektrik İletim Sisteminde Akım ve Gerilimdeki Harmonik Bileşenlerin Gerçek Zamanlı Ölçülmesi”, **II. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu**, Kocaeli/Türkiye, Mayıs 2007.
5. Chi-Jui, W., Wei-Nan, C., “Developing a Harmonics Education Facility in a Power System Simulator for Power Engineering Education”, **IEEE Transactions on Power Systems**, Vol 12, No.1, February 1997.
6. Lin, H., “An Internet-Based Graphical Programming Tool for Teaching Power System Harmonic Measurement”, **IEEE Transactions on Education**, Vol 49, No 3, August 2006.
7. Didem, E., “Harmonikli Ortamlarda Kompanzasyon”, **I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu**, Kocaeli, Mayıs 2005.
8. Sucu M., “Elektrik Enerji Sistemlerinde Oluşan Harmoniklerin Filtrelenmesinin Bilgisayar Destekli Modellenmesi ve Simülasyonu”, **Yüksek Lisans Tezi**, Marmara Üniversitesi, Fen Bilimleri Enstitüsü, 2003.
9. Testing and Measurement Techniques-General Guide on Harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto, IEC Standard 61000-4-7, 2002.
10. IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, IEEE Standard 519-1995, 1995.
11. Buhan, S., Boyrazoğlu, B., Ünsar, Ö., Altıntaş, E., Haliloğlu, B., Polat, B., Özdemirci, E., “Türkiye Elektrik İletim Sisteminde Mobil Güç Kalitesi Ölçümleri”, **II. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu**, Kocaeli/Türkiye, Mayıs 2007.
12. Salor, Ö., Buhan, S., Ünsar, Ö., Boyrazoğlu, B., Altıntaş, E., Atalık, T., Haliloğlu, B., İnan, T., Kalaycıoğlu, A., Terciyanlı, A., Demirci, T., Özdemirci, E., Çadırcı, I., Ermiş, M., “Mobile monitoring system to take nationwide PQ measurements on electricity transmission systems”, **Measurement**, 2008.
13. Demirci, T., Kalaycıoğlu, A., Salor, Ö., Pakhuylu, S., İnan, T., Küçük, D., Güder M., can. T., Akkaya, Y., Bilgen, S., Çadırcı, I., Ermiş, M., “Türkiye Elektrik İletim Sistemi için Yurt Çapında Güç Kalitesi İzleme Ağı ve Veri Değerlendirme Merkezi: Güncel Gelişmeler”, Sinyal İşleme, İletişim ve Uygulamaları Kurultayı, Didim/Türkiye, Nisan 2008.
14. Batista, J., Afonso, J., Martins, J., “Low-Cost Power Quality Monitor Based on a PC”, **IEEE International Symposium on Industrial Electronics**, Rio de Janeiro, 9-11 July, 2003.
15. Costa, J., Pregitzer, R., Sousa, T., Batista, J., Afonso, J., “A Case of Power Quality Assesment Using a Developed Power Quality Monitor”, **IEEE 1 st International Conference on Electrical Engineering Coimbra**, Portugal, 10-12 October, 2005.
16. Moreno, J., Paracula, J., “A PC-based Tool for Evaluation of Harmonics and Power in Three-Phase Power Electronic Converters”, **IEEE 7 th Computers in Power Electronics Workshop**, USA, July, 2000.
17. Sutherland, P., “Harmonic Measurements in Industrial Power Systems”, **IEEE Transactions on Industry Applications**, Vol 31, No 1, January/February 1995.
18. Kocatepe, C., Arıkan, O., Onar, Ö., Uzunoğlu, M., “Harmonik Distorsiyonunun Ölçüm Noktası ve Güç Kompanzasyonu Bakımından İncelenmesi”, **I. Enerji Verimliliği ve Kalitesi Sempozyumu**, Kocaeli/Türkiye, Mayıs 2005.
19. Elektrik İletim Sistemi Arz Güvenirliği ve Kalitesi Yönetmeliği, Resmi Gazete, Sayı: 25639, 10/11/2004.
20. Elektrik Piyasası Şebeke Yönetmeliği, Resmi Gazete, Sayı: 25001, 22/01/2003.
21. Kocatepe, C., Uzunoğlu, M., Yumurtacı, R., Karakaş, A., Arıkan, O., **Elektrik Tesislerinde Harmonikler**, Birsan Yayınevi, 2003.
22. Çolak, İ., **Senkron Makinalar**, Seçkin Yayıncılık, 2003.
23. 6071E DAQ card datasheet, National Instruments, www.ni.com, 2008.