

# SCADA SİSTEMİ YARDIMIYLA ENERJİ DAĞITIM SİSTEMLERİNDE HARMONİKLERİN ÖLÇÜLMESİ

Etem KÖKLÜKAYA

Mehmet BAYRAK

*SAÜ Mühendislik Fakültesi Elektrik-Elektronik Mühendisliği Bölümü*

## ÖZET

Enerji dağıtım sisteminde başta elektrik motorları hız kontrol devrelerinin oluşturduğu yükler olmak üzere lineer olmayan yükler hızla artmaktadır. Bu yüklerin oluşturduğu harmonikler, gerek şebekenin işletmesinde ve gerekse tüketicilerde birçok olumsuz etki yapmaktadır. Bu çalışmada SCADA sistemiyle enerji dağıtım sistemlerinde harmoniklerin ölçülmesi konusu incelenmiş ve ölçme yapılabilmesi için gerekli olan donanımların nasıl olması gerektiği açıklanmıştır. Örnek olarak seçilen üç fazlı kontrolsüz tam dalga doğrultucudan oluşan yükün dağıtım şebekesini besleyen transformatörden çektiği akımın dalga şekli ve harmonik spektrumu bilgisayar benzetimiyle incelenmiştir.

## 1. GİRİŞ

Enerji dağıtım sistemlerinde yıldırım gibi atmosferik dış olaylar ile açma-kapama olayları sonucu şebeke geriliminin aşırı yükselmesi, kısa devre olayları veya büyük güçlü elektrik motorlarının devreye girmesi sonucu gerilimin kısa süreli düşmesi ve lineer olmayan yüklerin oluşturduğu harmonikler enerji kalitesini etkilemektedir [1].

Elektrik enerjisi iletimi ve dağıtımını çoğunlukla radyal hatlarla yapılmaktadır. Radyal hatların uzunluğu arttıkça empedansı da arttığından, hat sonlarında gerilimin nominal değerinde tutulması güç olmaktadır. Böyle hatlardan beslenen dinamik yükler gerilimin genlik ve dalga şeklini bozarak enerji kalitesini etkilemektedir ve bunun sonucu olarak komşu diğer tüketicilere olumsuz etki yapmaktadır.

Elektrik güç sistemlerinde lineer olmayan yükler 1970 li yıllarda kullanılmaya başlamış, özellikle 1980 yılından itibaren yaygınlaşmıştır. Şebekede harmoniklerin oluşmasına neden olan lineer olmayan bu yükleri şöyle sınıflandırabiliriz.

- Doymuş transformatörler,
- Transformatör mıknatıslanma akımları,
- Transformatör nötr bağlantıları,
- Doğrultucular,
- Doğru akım motor sürücüleri,
- Kesintisiz güç kaynakları,
- Ark fırınları,
- Statik reaktif güç kompanzasyonu,
- Frekans dönüştürücüler,
- Statik motor yol alma devreleri,
- Elektronik balastlar,
- Anahtarlamalı güç kaynakları.

Yukarıda belirtilen harmonik kaynaklarının büyük çoğunluğunu güç elektroniği devreleri üzerinden beslenen elektrik motorları oluşturmaktadır [2]. Ark fırınlarının çalışma şartlarındaki ani değişimler sonucu güç sistemlerinden çektikleri akımlar da gelişigüzel olmaktadır. Bunun sonucu şebeke gerilimi de akıma bağlı olarak sinüs formundan gittikçe uzaklaşmaktadır [3]. Evlerde ve bürolarda bilgisayar kullanımının ve bir fazlı elektronik elemanların sayılarının hızlı bir biçimde artması, bu yükleri besleyen kabloların ilave harmonik akımları ile yüklenmelerine neden olmaktadır. Büyük çoğunluğu tam dalga diyotlu doğrultucu olan bu yükler şebekeyi üçüncü harmonik ile yüklemektedir. Üçüncü harmonik her bir fazda aynı faz açısında olduğundan, fazların dengeli yüklendiği kabul edilirse nötr iletkeninden faz iletkeninin üç katı kadar 3. harmonik akımı akar. Bunun sonucu olarak nötr iletkeni aşırı ısınır. Harmoniklerin şebeke ve tüketiciler üzerindeki etkileri yalnızca bununla kalmayıp aşağıda belirtilen birçok etkileri vardır [4].

### 1. Isınma etkisi;

- Asenkron motorlarda ve senkron makinalarda ek kayıplar ve aşırı ısınmalar,
- Kondansatör sigortalarının atması.

### 2. Yarıiletken elemanlar üzerindeki etkiler;

- Röle ve kesicilerin hatalı açması,
- Motor kontrol devrelerinde ve generatör uyarma devrelerinde bozucu etki oluşturmaması,
- Sıfır geçiş prensibine göre çalışan tetikleme devreleri ile kontrol cihazlarının kararsız çalışması,
- Yaniletken ölçme devrelerinde hatalı ölçme.

### 3. Haberleşme sistemlerindeki etkileri;

- Enerji iletim hatları üzerinden yapılan haberleşme sistemine etkisi,
- Haberleşme tesisleri üzerindeki etkisi.

### 4. Diğer etkiler;

- Kondansatörlerin ömürlerinin azalması,
- Rezonans sonucu şebekede aşırı akım ve gerilimlerin oluşması,
- Kabloların yalıtkanlarının bozulması,
- Sayaçlarda hatalı ölçme,
- Elektrik makinalarında mekanik salınımların oluşması,
- Hat ve kablolarda kayıpların artması.

Harmoniklerin yukarıda belirtilen etkilerini azaltmak için harmonikleri en az düzeyde tutmak gerekir. Enerji sistemlerinde harmoniklerin belirli bir düzeyde tutulması için ulusal ve uluslararası standartlar [5] getirilmiş ve bu standartlara nasıl uyulacağı konusunda bazı tanımlar verilmiştir [6]. Bu tanımlardan en önemlisi harmonik bozulma katsayısıdır (THD) ve

$$\%THD = \frac{\sqrt{\sum_{h=2}^{\infty} (I_h)^2}}{I_1} \quad (1)$$

bağıntısıyla verilir. Benzer biçimde bu bağıntı gerilim için de yazılabilir. Çeşitli ülkelerde bara gerilimlerine göre farklı THD değerleri kabul edilmiş olup aşağıdaki tabloda belirtilen sınır değerler verilmiştir [3].

Tablo 1. Kabul edilen gerilim THD sınırları

Ülke	Alçak Gerilim Barası (%)	Yüksek Gerilim Barası (%)
ABD	5	1.5
İngiltere	5	1.5
İsveç	4	1
Kanada	7	4
Fransa	1.6	1.6
Türkiye	1.6	1.6

Şebekede harmonik kontrolü yapılmadığı sürece harmonikler için belirlenen bu sınırlamaların hiçbir değeri yoktur. Bu nedenle şebekede ve elektrikli cihaz üretiminde sürekli olarak harmonik kontrolünün yapılması gerekir. Dağıtım şebekelerinin her noktasında

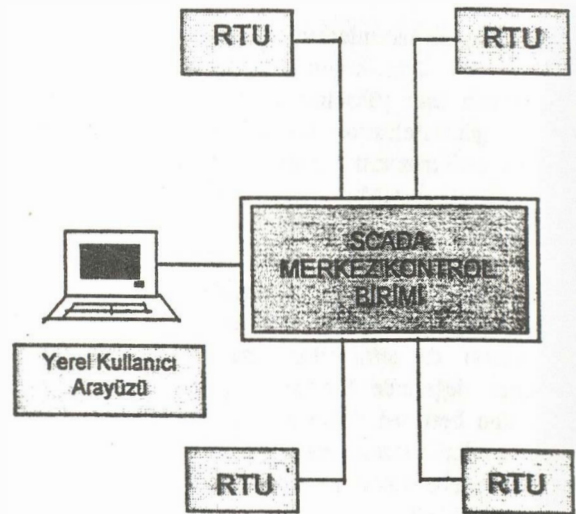
harmonik kontrolünün yapılması, özellikle büyük alana yayılmış şebekeler açısından, uzun zaman almaktadır. Özellikle kötü hava koşullarında bu zorluk daha da artmaktadır. Bu tür sorunlardan dolayı harmoniklerin şebekede mevcut olan SCADA sistemlerinden ölçülerek değerlendirilmesi büyük zaman kazancı sağlamaktadır.

## 2. SCADA SİSTEMLERİ

Enerji dağıtım sistemlerinde elektriksel büyüklüklerin uzaktan ölçülmesinde, kesicilere uzaktan açma-kapama komutlarının verilmesinde, transformatör ve hatlarda yük paylaşımlarının yapılmasında, optimum yük paylaşımı yapılarak kayıpların azaltılmasında SCADA (Supervisory Control And Data Acquisition) sistemleri büyük kolaylıklar sağlamaktadır. Bilgisayar ve haberleşme teknolojilerindeki gelişmeler sonucu SCADA sistemlerinin maliyeti dağıtım şebekesinin toplam maliyetine göre gün geçtikçe azalmaktadır. Bunun sonucu olarak endüstriyel tesislerde, enerji iletim ve dağıtım sistemlerinde SCADA uygulamaları yaygınlaşmaktadır. SCADA sisteminin kullanım amaçları aşağıdaki gibi sıralanabilir.

- Gerçek zamanda veri toplama,
- Arıza durum kaydı,
- Bilgilerin uzun süreli saklanması,
- Kontrol sistemlerinin durumunun gözlenmesi,
- Sistemin gözlenmesi,
- Uzaktan kontrol,
- Uzaktan ölçme.

SCADA sisteminin basitleştirilmiş yapısı Şekil 1'de görülmektedir.



Şekil 1. SCADA Sisteminin yapısı  
2.1 Yerel Birimler

Buldukları yerde ölçüm ve denetleme işlevlerini yürüten birimler " uzak terminal birimi " ( Remote Terminal Unit, RTU ) olarak adlandırılır. SCADA sistemi içerisinde yerel ölçüm ve kumanda noktalarını oluşturan RTU'lar kendilerine bağlı olan donanımlara kontrol edebilir ve gerekli duyulan ölçme ve değerlendirme işlemlerini yapabilir. Merkezi kumanda ve izlemeyi sağlamak için RTU'lar tüm ölçü sonuçları ile dağıtım sistemindeki donanımların çalışma durumlarını merkeze bildirir ve merkezden gelen komutları yerine getirir. Ayrıca bütün RTU'lar tüm ölçü sonuçlarını değerlendirebildiğinden, belirlenen sınırların dışındaki değerler için merkeze alarm komutu gönderir.

RTU'lar akılsız ve akıllı olmak üzere iki gruba ayrılır. Akılsız RTU'lar sadece ölçüm yapar, merkeze bildirir ve merkezden gelen komutları yerine getirir. Karar verme yetenekleri olmadığından bütün işlemleri merkezden gelen komutlara göre yapar. Bu sistemde merkez birim sürekli olarak RTU'ları tarayarak ölçüm sonuçlarını alır ve alarm durumu olup olmadığını kontrol eder. Eğer alarm durumu varsa gerekli müdahaleyi yapmak için RTU'ya komut gönderir. Şebekede arıza durumlarında ve merkezin devre dışı kaldığı yada merkez ile RTU'lar arasındaki iletişimin kesildiği durumlarda pratikte birçok sorunlar ortaya çıkmaktadır. Ayrıca merkez kontrol birimi bütün RTU'lardan gelen bilgileri sıra ile değerlendirdiğinden arıza durumlarında sisteme müdahale gecikmektedir. Bunun gibi sorunları ortadan kaldırmak için akıllı RTU'lar kullanılmaktadır.

Akıllı RTU'lar mikroişlemci tabanlı sistemlerdir. Bunlar merkez bilgisayarın işlem yükünün bir kısmını üzerlerine alarak sistemin verimliliğini ve performansını artırırlar. Akıllı RTU'lar şebeke işletmecileri tarafından programlanarak veya kontrol parametreleri değiştirilerek kendi görevlerini yerine getirmekle birlikte merkez ve diğer RTU'larla sürekli olarak haberleşir. Merkez kontrol biriminin devre dışı kalması yada iletişimin kesilmesi durumunda akıllı RTU'lar hiç durmadan çalışmasını sürdürür ve görevlerini aksatmadan işlevlerini yerine getirir.

## 2.2 İletişim Sistemi

SCADA sisteminin hızını ve performansını etkileyen en önemli kısmı iletişim ağıdır. Kullanılan amaca göre iletişimin biçimi de farklılıklar göstermektedir. İletişim ortamları aşağıdaki şekilde olabilir.

- Özel kablo hatları,
- Fiber optik kablolar,
- Telefon hatları,
- Telsiz,
- Uydü kanalları,
- Dağıtım şebekesindeki hatlar üzerinden.

## 3. HARMONİKLERİN ÖLÇÜLMESİ

### 3.1. Analog Ölçme Yöntemleri

Harmoniklerin analog olarak ölçülmesi, giriş işaretindeki ölçülebilecek harmonik frekansında band geçiren filtrelerin kullanılması ilkesine dayanır. Harmoniklerin doğru olarak ölçülmesi filtrenin band genişliğine bağlıdır. Analog filtrenin çıkışı giriş işareti ile filtrenin impulse cevabının konvolüsyonu ile elde edilir. Filtre çıkışındaki işaretin efektif değeri;

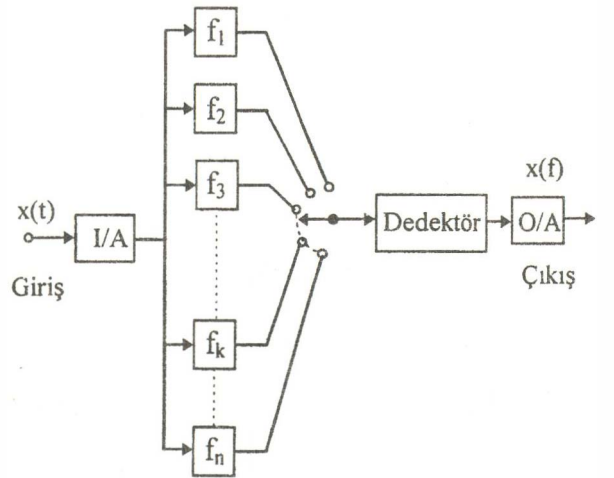
$$y_{rms} = \left[ \frac{1}{T} \int_{-T}^T y(\tau)^2 d\tau \right]^{1/2} \quad (2)$$

bağıntısıyla bulunur [7]. Analog harmonik analizörlerin başlıcaları aşağıdaki gibidir:

- Ayrık filtre analizörü,
- Paralel analizör,
- Taramalı frekans analizörü.

#### 3.1.1. Ayrık Filtre Analizörü

Şekil 2'de gösterilen ayrık filtre analizöründe giriş işareti kuvvetlendirildikten sonra ölçülmesi istenen her bir harmonik için tasarlanmış paralel filtrelere girer. Ölçülmesi istenen harmonik için dedektörün konumu ilgili filtre çıkışına getirilir. Bu yöntemde ne kadar harmonik ölçülmek isteniyorsa o kadar frekans cevabı ideale yakın filtre gerekir.



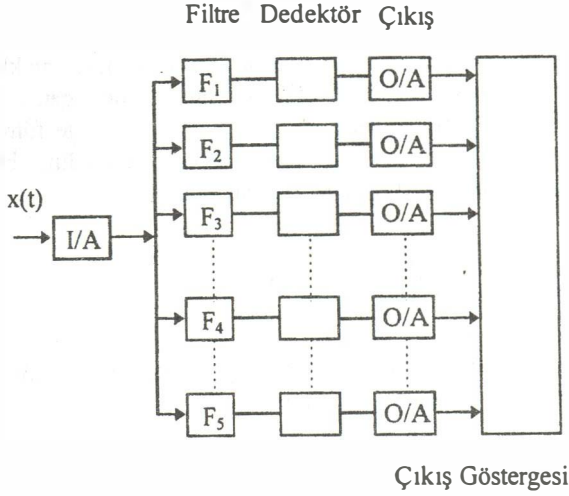
Şekil 2. Ayrık filtre analizörü

#### 3.1.2. Paralel Analizör

Ayrık filtre analizöründe dedektörlerin konum değiştirmesi sırasında istenmeyen osilasyonlar olabilir.



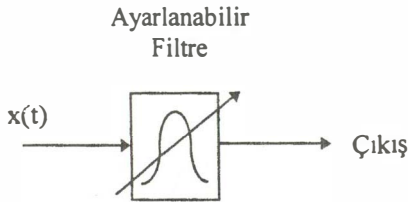
Bu problemleri ortadan kaldırmak için paralel analizörler (Şekil 3) kullanılır.



Şekil 3. Paralel Analizör

### 3.1.3. Taramalı Frekans Analizörü

Yukarıda bahsedilen yöntemlerde ölçülecek her bir frekans için band geçiren filtre gerekir. Maliyeti azaltmak için Şekil 4'de gösterilen frekansı ayarlanabilir analizörler kullanılır.



Şekil 4. Taramalı frekans analizörü

### 3.2. Sayısal Ölçme Yöntemleri

Haberleşme ve bilgisayar teknolojisindeki gelişmeler sonucu analog ölçme sistemlerinin birçoğu sayısal olarak tasarlanmaktadır. Bu gelişmelere orantılı olarak harmoniklerin ölçülmesinde analog ölçme yöntemlerinin yerini sayısal yöntemler almıştır. Sayısal yöntemlerden yaygın olarak kullanılanı ayrık fourier dönüşümüdür (Discrete Fourier Transform, DFT).

$$F_n = \sum_{k=0}^{N-1} W(k) f_k e^{-j2\pi kn/N} \quad (3)$$

bağıntısıyla verilir. Burada;

- $F_n$  : n. harmoniğin fourier katsayısı,
- $f_k$  : k. örneğin değeri,
- $N$  : Bir penceredeki toplam örnek sayısı,
- $n$  : Harmonik derecesi,
- $k$  : Data göstergesi,
- $W(k)$  : Pencere fonksiyonu

dur. m tamsayı olmak üzere  $N=2^m$  olmalıdır. Harmonik ölçmelerinde örnekleme frekansı, dolayısıyla örnekleme periyodu, temel frekans bileşenine göre sürekli olarak kontrol edilmelidir. Frekans değişimlerinde örnekleme periyodu yeniden ayarlanmalıdır. Aksi durumda hatalı ölçme yapılır. Nyquist kriterine göre örnekleme frekansı ölçülecek en yüksek frekansın en az iki katı olmalıdır. Harmonik incelemelerinde ölçülecek en yüksek frekans 3 kHz olarak alınabilir. Bu durumda örnekleme frekansı yaklaşık 6400 Hz olur. Bu ise 50 Hz'lik temel frekans için bir periyotta 128 örneğe karşı düşer. Dikdörtgen pencere kullanıldığında, ölçme için minimum 8 periyot gerektiğinden, fourier dönüşümü için toplam 1024 sayısal örneğe ihtiyaç vardır.

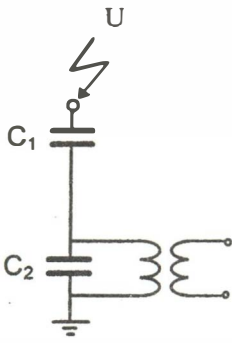
Ayrık fourier dönüşümünün hesaplanması uzun süre almaktadır. Gerçek zamanda ölçme yapılması için hesap süresinin çok kısa olması gerekir. Eğer bu hesap için hızlı mikroişlemci kullanılmıyorsa DFT'ye göre işlem süresi daha kısa olan hızlı fourier dönüşümü (Fast Fourier Transform, FFT) kullanılır [8].

## 4. ÖLÇME DONANIMLARI

Enerji dağıtım sistemlerinde ölçme işlemlerini yapmak için akım veya gerilimin ölçülebilir düzeye indirilmesi gerekir. Bu amaçla akım ve gerilim trafoları yaygın olarak kullanılır.

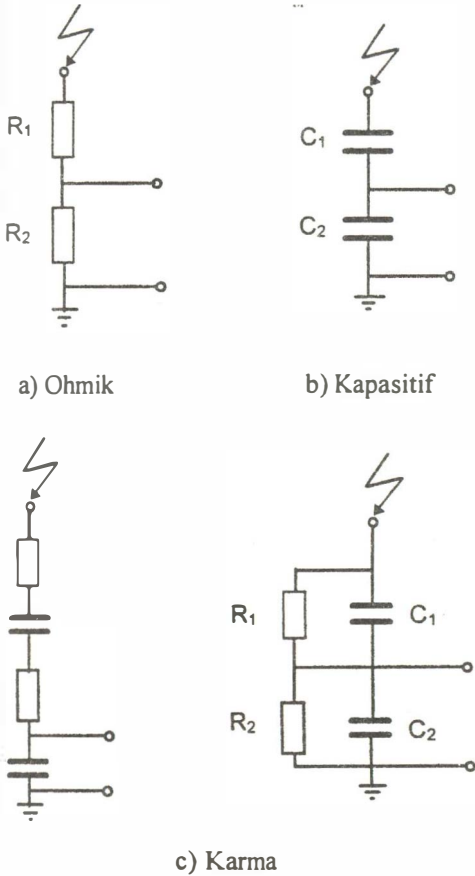
### 4.1. Gerilim Dönüştürücüleri

Birçok uygulamada yüksek gerilimlerin ölçülmesinde gerilim transformatörleri kullanılır. Şebekede oluşabilecek gerilim değişimlerinde ölçme düzeninin doğru ölçebilmesi için ölçü transformatörünün nominal değerinin ancak iki katında doycak şekilde seçilmesi gerekir. Bazı ölçme uygulamalarında kapasitif gerilim bölücü üzerinden beslenen gerilim transformatörleri kullanılır (Şekil 5).



Şekil 5. Kapasitif gerilim bölücü üzerinden beslenen gerilim ölçü transformatörü

Gerilim ölçü transformatörlerinin frekans cevabı sınırlıdır. Hızlı değişen gerilim dalgalanmaları ile yüksek dereceden harmonikler transformatörün sekonderinde görülmez. Bu nedenle harmoniklerin ölçülmesi için gerilim transformatörlerinin kullanılması uygun değildir. Bu sakıncalardan dolayı harmonikler Şekil 6'da görülen ohmik, kapasitif veya karma gerilim bölücüler yardımıyla ölçülürler [9]. Bu tür bölücüler çok hızlı değişen gerilimlerin dalga şeklini bozmadan ölçülebilecek düzeye indirerek çıkışa verirler.



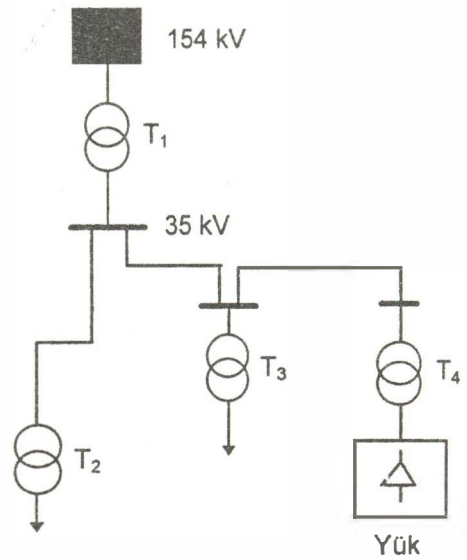
Şekil 6. Gerilim bölücüler

#### 4.2. Akım Dönüştürücüleri

Enerji sistemlerinde akım ölçülmesi gerilim ölçülmesinden daha zordur. Bunun nedeni, akımın sürekli

değişmesi, bazı durumlarda nominal değerinin 20-40 katına kadar ve kısa devrelerde çok daha büyük değerlere çıkmasıdır. Akımların ölçülmesinde şönt veya akım transformatörlerinden yararlanılır. Akım transformatörleri genel olarak maksimum yük akımına göre seçilir. Arıza akımları veya motor ve transformatörlerin çektiği mıknatıslanma akımlarını ölçmek için akım transformatörleri nominal akımından 20-30 kat daha büyük seçilir. Fakat bu durumda yük akımlarının (veya düşük değerdeki akımların) ölçülmesinde çözünürlük azalır. Yani daha büyük ölçme hatası yapılır. Ayrıca akım transformatörlerinin belirli bir frekans cevabı vardır. Harmoniklerin ölçülmesi için akım transformatörlerinin sınıfının düşük olması ve yüksek dereceden harmonikleri dalga şeklini bozmadan çıkışa vermesi gerekir. Standard akım transformatörleri ile 2 kHz'lik frekansa kadar olan alternatif akımlar ölçülebilmektedir. Bu tür transformatörler kullanıldığında en fazla 40. harmonik ölçülebilir. Akım transformatörlerinde oluşan faz kaymaları ölçmeyi etkileyen diğer bir etkidir. Akım transformatörlerinin çabuk doymasını engellemek için magnetik malzemenin kalitesi ve miktarı artırılır. Bunun sonucu olarak transformatörün frekans cevabı iyileşir. Ölçme amacıyla sekonderine bağlanan direncin büyük olması akım transformatörünün daha düşük akımlarda doymasına neden olur.

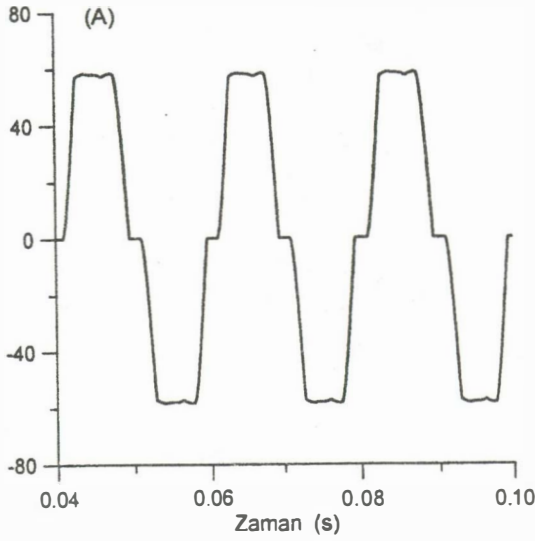
#### 5. BİLGİSAYAR BENZETİMİ



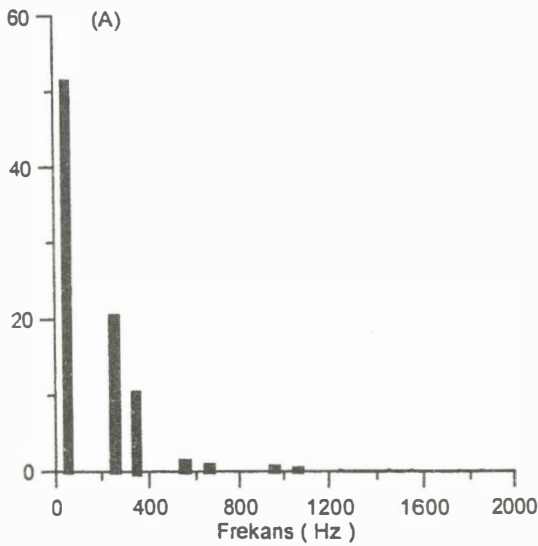
Şekil 7. İncelenen dağıtım şebekesi

Burada bir dağıtım şebekesi modeli (Şekil7) ele alınmış, bir motor hız sürücüsünün şebekeden çektiği akımın dalga şekli PSpice bilgisayar programı yardımıyla incelenmiştir (Şekil 8.a). Sinüs formundan uzaklaşmış bu

dalga şekli için fourier analizi yapılmış ve harmonik bileşenleri Şekil 8.b'de gösterilmiştir.



a) Akım dalga şekli



b) Harmonik spektrumu

Şekil 8. Yükün T1 trafosundan çektiği akım

## 6. SONUÇ

Şebekede lineer olmayan yüklerin büyük bir hızla artması şebekede birçok problemleri ortaya çıkarmaktadır. Şebekenin akım ve gerilimindeki harmonik bozulmaları belirli değerlerde sınırlandırılmıştır. Harmoniklerin büyük çoğunluğu tüketiciler tarafından oluşturulduğundan, şebekedeki harmonikleri azaltmak için tüketicilerin ürettiği harmoniklerin istenilen sınırların

altında tutulması yeterli olur. Bunun için dağıtım şebekelerinin birçok noktalarında sürekli olarak harmoniklerin ölçülmesi gerekir. SCADA sistemiyle şebekenin bütün noktalarında harmonikler gerçek zamanda ölçülüp, istenilen sınırlar altında olup olmadığı kolaylıkla kontrol edilebilir ve gerekli uyarılar merkez kontrol birimine çok kısa sürede gönderilebilir.

## KAYNAKLAR

- [1] REID, E. W., 'Power Quality Issues-Standards and Guidelines', IEEE Trans on IA, Vol 32 No 1, May/June 1996.
- [2] PHIPPS, J. K., et all, 'Power Quality and Harmonic Distortion on Distribution Systems', IEEE Trans on IA, Vol 30, No 2, March/April 1994.
- [3] ÖZBULUR, V., BROWN, P., TUNÇAY, N., 'Ark Fırını Harmoniklerinin Analizi ve Ölçülmesi' Elektrik Mühendisliği 4. Ulusal Kongresi, 1991.
- [4] JAMES, J., et all, 'Benefits of an Automated On-Line Harmonic Measurement System' IEEE Trans on IA, Vol 22 No 5, Sept/Oct 1986.
- [5] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems, ANSI/IEEE Standard 519, 1992.
- [6] MASSEY, G. W., 'Estimation Methods for Power System Harmonic on Power Distribution Transformer', IEEE Trans on IA, Vol 30 No 2, 1994.
- [7] ARILLAGA, J., et all, 'Power System Harmonics', John Wiley & Sons, 1988.
- [8] MARVEN, C., EWERS, G., 'Digital Signal Processing' Texas Instruments, 1994.
- [9] BAYRAK, M., 'Yüksek Gerilim Laboratuvarlarının Tasarımı ve Deney Devrelerinin İncelenmesi' Yüksek Lisans Tezi, İ.T.Ü. Fen Bilimleri, 1993.