

## 전력전자장치에 의한 왜형파의 마이컴분석

박수영 \* 이선호 전호철 최규하

## Microprocessor-based Analysis of Distorted Waveforms Caused by Power Electronic Converters

Su-Young Park Sun-Ho Lee Ho-Chul John Gyu-Ha Choe  
Dept. of Electrical Eng. Kon-Kuk Univ.

## Abstract

Various sampling methods are used for microprocessor-based measurement and analysis to nonsinusoidal waveforms caused by power electronic converters. The harmonic component generates the indicating errors at the measuring instruments. This can be solved by microprocessor-based measurement and hence the microprocessor-based measuring equipment and its algorithm are developed in this paper. As a result the suggested equipment has very good measuring performances.

## 1. 서론

현재 눈부신 반도체소자의 발달과 함께 저가격, 고성능의 마이크로프로세서와 주변소자들이 많이 개발되고 있다. 또한 이를 사용한 전압 및 전류의 온-라인 측정과 같은 요구도 많이 발생되고 있으나 전력전자장치의 사용중대로 인해 고조파에 의한 측정오차의 문제가 많이 발생되고 있다. 특히 전력계는 전압 및 전류 코일을 모두 지니고 있어 왜형에 대한 측정에 많은 오차가 함유되고 있어 이 문제 때문에 근래 전자전력계가 개발되고 있다. 또한 측정방법에 따라서 측정된 값들은 달라지며 또한 파형에 따라서 그 측정치가 달라진다.[1]

본 논문에서는 몇가지 측정방법에 대한 발생오차의 정도를 분석하고 파형에 따른 적당한 측정방법을 결정한다. 이를 토대로 하여 전력전자장치의 입출력 파형 측정 및 분석하기 위한 실현실 수준의 범용측정장치 및 프로그램을 개발하고자 한다.

## 2. 측정방법

digital에 의한 측정분야는 매우 신속히 발달하고 있으며, 또한 현재 여러가지 방법이 사용되고 있다. 따라서 여기서는 대표적으로 사용되는 측정방법 몇가지를 살펴본다.

고조파가 함유된 파형을 측정할 때 한주기에 필요한 샘플수의 결정은 식 (1)과 같이 최고주파수  $f_m$ [Hz]로 제한된 신호를  $2 \cdot f_m$  이상으로 샘플링한 결과로서도 연

속적으로 신호를 샘플링 하였을 경우와 동일한 효과를 낼 수 있다는 샘플링이론에 의하면 최소 샘플링주파수  $f_s$ 는 측정하고자 하는 파형의 최고주파수  $f_m$ 보다 2배 이상되어야 한다.[2]

$$f_s \geq 2 \cdot f_m \quad (1)$$

마이크로프로세서를 사용할 경우 이때  $f_s$ 는 A/D 변환기의 처리속도에 의해 제한되며 이 문제를 해결하기 위해 Low-Pass Filter를 사용한다.

## 2.1 첨두치 검출[3]

이 방법은 샘플링 주파수  $f_s$ 가 낮을 때 사용할 수 있는 매우 간단한 측정법으로 그림 1-a와 같이 한주기에서의 첨두치를 검출하고 이를  $\sqrt{2}$ 로 나누어 실효치를 구하는 방법으로 OP-AMP에 의한 첨두치검출법과 유사한 결과를 얻을 수 있으나 정현파에만 적용할 수 있다. 측정순서는 다음과 같다.

- I. 영교차를 검출하고
- II. 1/4 주기 만큼 지연한 후
- III. 첨두치를 측정한다.

연속적으로 샘플링하여 얻어진 값들 중에서 가장 큰 값을 첨두치로 가정할 수 있으나 이는 측정장치의 효율면에서 바람직하지 못하고, 고조파에 대한 오차가 특히 많이 발생하는 방법이다.

## 2.2 반주기 측정

정현파의 주파수를 안다면 그림 1-b와 같이 임의의 간격을 두고 얻어진 두개의 샘플치에 의해 파형의 크기를 알 수 있다. 즉, 다음 두값을 사용하여 A와  $\phi$ 를 구한다고 하면

$$V_1 = A \sin(\omega t_1 + \phi) \quad (2)$$

$$V_2 = A \sin(\omega t_2 + \phi) \quad (3)$$

여기서

$t_1, t_2$  두개의 샘플링 순간

$V_1, V_2$   $t_1, t_2$ 에서의 측정값  
 $A$  정현파의 크기  
 $\omega$  각속도  
 $\phi$   $t_1, t_2$ 의 위상차

우선 식 (2), (3)은 비선형이고 또  $\phi$ 를 주기의 1/4로 정하면

$$t_2 = t_1 + 90^\circ \quad (4)$$

의 관계가 있으므로 이들 식으로  $A$ 와  $\phi$ 는 다음과 같이 구해지고

$$A = \sqrt{V_1^2 + V_2^2}$$

$$\phi = \sin^{-1} \frac{V_1}{A} - \omega t_1 \quad (5)$$

또 측정하고자 하는 파형의 실효치는 다음과 같다.

$$V_{rms} = A / \sqrt{2} = \sqrt{(V_1^2 + V_2^2) / 2} \quad (6)$$

여기서  $V_{rms}$ 는 실효치

이 방법은 처음 측정되는 순간과 무관하게 정현파일 경우 항상 일정한 값을 얻을 수 있지만 샘플링 주파수가 고정되어 있어서 고조파가 함유될 경우 오차가 크게 발생되는 문제가 있다.

### 2.3 Shannon의 샘플링 방법[4]

이 방법은 Shannon의 주기파에 대한 이론에서 출발하는데  $N$ 차 이상의 고조파를 함유하지 않은 주기함수는 한 주기에  $2N+1$ 회 이상의 샘플링으로 측정할 수 있다는 것이다.

따라서  $N=1$ 인 순수한 정현파는 단지 세개의 샘플치에 의해서 표현될 수 있는데, 예를 들면 7차 이하의 고조파가 함유된 파형은 한 주기에 15번 측정함으로써 그 모양, 기본파와 각 고조파의 위상, 첨두치, 실효치, 평균치 등을 모두 알 수 있다.

7차고조파가 함유된 파형을 측정할 때 한 주기당 15번 이상의 샘플링이 필요하며 샘플링 수의 결정은 보통 편이상 주기당 샘플링 수가  $2^n$ 으로 균등 분할되게 취한다. 즉, 이 경우에는  $2^4$ 이상에서 적당한  $n$ 값을 결정한다. 그림 1-c에서 rms값을 구하려면 (7)식을 사용한다.

한주기에 등간적으로  $M$ 번 샘플링한 경우에는

$$V_{rms} = \sqrt{(V_1^2 + V_2^2 + \dots + V_M^2) / M} \quad (7)$$

로써 실효치를 구할 수 있다.

### 2.4 기본파 검출[3]

이 방법의 기본적인 목적은 파형의 기본파 성분의 실효치를 구하는 것으로 간단한 Low-pass-Filter가 입력측에 첨가되며 그림 1-d와 같이  $90^\circ$ 의 간격을 가진 네개 샘플로 부터 실효치를 식(8)로써 구할 수 있다.

$$V_{rms}(f) = \frac{1}{4} \sqrt{(V_1 + V_2 - V_3 - V_4)^2 + (V_1 - V_2 - V_3 + V_4)^2} \quad (8)$$

여기서

$V_1, V_2, V_3, V_4$  연속적인 측정치  
 $V_{rms}(f)$  기본파의 실효치

식(8)은 DC성분이 존재하더라도 단지 기본파 성분만의 크기를 구할 수 있으며 Shannon의 방식에 비하여 이 방식은 계급의 계산을 줄일 수 있기 때문에 빠른 동작을 요구하는 곳에서는 유리하다. 그러나 고조파가 함유되면 오차가 발생하기 때문에 정현파에만 적용할 수 있고 다른 방법으로 Fourier Trans-formation을 사용하면 고조파에는 무관하게 기본파 성분만을 구할 수 있지만 이러한 방법들을 실제 사용하기에는 너무 복잡하고 늦어서 적용하기가 어렵다.[2]

### 3. 실제측정의 적용

본 연구에는 마이크로프로세서에 의해 제어되어 파형을 측정하는 장치와 얻어진 결과를 분석하는 소프트웨어로 구성된다. 전류와 전압을 동시에 측정하여 전력을 계산한다.

#### 3.1 하드웨어 구성

본 연구에서는 Intel 80188 마이크로프로세서에 의해 제어되는 ADC-80Z(12 bit A/D 변환기)를 사용하여 측정된 결과를 IBM-PC에서 처리하는 방식을 사용하였다. 샘플링주기는  $150\mu\text{Sec}$ 로 하여 전류와 전압을 동시에 측정한다. A/D 변환기에서 측정할 수 없는 고조파성분을 제거할 목적으로 LPF를 입력단에 첨가하였으며 측정된 결과를 보정하기 위한 알고리즘은 사용하지 않았다. 대략적인 하드웨어의 구성은 그림 2와 같다. 사용한 LPF는 그림 3-a와 같이하였으며 주파수 대역은 출력이 30kHz에서 출력이 -3dB가 되게 하였다.

#### 3.2 전압, 전류, 전력의 측정

구형파 입력을 측정할 때 측정시간 동안의 파형의 입력과 출력은 그림 3-b와 같이 파형의 평균치는 파형의 면적을 시간으로 나눈 것과 같다. 따라서 그림 3-b와 같이 입력신호의 면적  $A_1$ 과 그림 3-c의 LPF를 거친 출력  $A_2$ 의 면적을 비교하면 시정수  $\tau$ 에 의한 효과를 알 수 있다.

$$A_1 = V_m \cdot T$$

$$A_2 = \int_0^\infty V_2(t) dt \quad (9)$$

$$\begin{aligned} &= V_m \int_0^\infty [1 - \exp(-t/\tau)] dt \\ &\quad + V_m \int_T^\infty [\exp((T-t)/\tau) - \exp(-t/\tau)] dt \\ &= V_m \cdot T \\ &= A_1 \end{aligned} \quad (10)$$

전류신호의 경우도 식 (9), (10)과 같이 표현된다.

따라서 LPF를 거친 출력은 평균치를 나타지만 본 논문에서는 주기  $T$ 에 비하여  $\tau$ 의 값을 매우 적게 취하

여 필터에 의한 영향을 무시하면서 식 (11)과 같이 입력 전력의 순시치는 같다고 본다.

$$\begin{aligned} v_1(t) &= v_2(t) \\ i_1(t) &= i_2(t) \end{aligned} \quad (11)$$

전압과 전류필터의 시정수  $\tau$ 가 정밀도에 미치는 영향을 무시하고  $v_2(t)$ 와  $i_2(t)$ 의 곱으로 순시전력  $p(t)$ 를 식 (12)와 같이 구한다.

$$P(t) = v_2(t) \cdot i_2(t) \quad (12)$$

전력의 실효치는  $P_{rms}$ 는 다음과 같다.

$$P_{rms} = \sqrt{\frac{1}{T} \sum_{n=1}^T [v_2(t)^2 \cdot i_2(t)^2] dt} \quad (13)$$

따라서 전력은 측정은 순시전압 및 순시전류에 의해서 계산된다.

#### 4. Sampling 주파수와 고조파의 관계

임의의 파형에 대한 주파수  $f_m$ 과 샘플링 주파수  $f_s$ 의 비에 대한 샘플링 시점은 그림 4와 같다.

그림 4-a는 직류에 대한 샘플링을 나타내며 샘플링 주파수와 측정결과와는 관계없다. 그림 4-b는 샘플링 주파수와 정현파의 주파수가 같을 경우의 샘플링 시점을 표현한 것으로 얻어진 결과를 보면 직류와 같은 결과를 나타낸다. 비슷하게 그림 4-c에서  $f_m$ 는  $f_s$ 의 1/8배이고 그림 4-d에서는  $f_m$ 는  $f_s$ 의 9/8배이다. 그림 4-c와 그림 4-d를 보면 실제 입력파형들의 주파수는 각각 다르지만 얻어지는 샘플치는 동일하며 식(1)의 관계가 성립하지 않는 파형에서는 입력파형에 따른 결과치가 잘못 인식됨을 보인다.

그림 5에서는  $f_m = f_s$ 인 경우에  $f_m$ 과  $f_s$ 의 위상차  $\delta$ 에 따른 오차에 대한 도식적 표현이며 그림 5와 같이  $\delta$  따라 전혀 다른 결과를 얻는다. 그림 5에서  $\delta=0^\circ$ 인 경우 측정된 결과는 0이고  $\delta=60^\circ$ 인 경우로  $\sqrt{3}/2$ 을 얻게 되고  $\delta=90^\circ$ 인 경우 정현파의 최대치를 얻게 된다.

그림 6은 식(1)의 관계가 성립할 때  $f_m$ 가  $f_s$ 의 8배인 경우의 샘플링 포인트를 보인 것으로서 이때 측정되는 결과는 정확하게 나타난다. 따라서 샘플링 주파수는 측정하고자 하는 고조파의 주파수 보다 2배이상 높아야 한다.

#### 5. A/D 변환기의 양자화 오차 [5]

이 오차는 아날로그 신호를 디지털 신호로 양자화하는 과정에서 생기는 오차로서 이것은 A/D 변환기의 분해능에 따라 결정된다. 그림 6-a와 같이 입력되는 신호는 연속적이지만 디지털 값이 불연속적으로 인해 생기는 오차는 분해능의 1/2에 해당하며 입력 값에 따른 오차는 그림 6-b와 같이  $\pm e_q$ 사이 존재한다.

신호를 샘플링 하여 연산하기 까지의 경로에 의한 오차들은 식 (14)와 같이 주로 A/D 변환기의 입력과

출력에 관한 오차들이다. A/D 변환기 n번째 샘플링의 입력을  $X_n$ , 출력을  $Y_n$ 라고하면

$$Y_n = K \cdot X_n \quad (14)$$

여기서

$$Y_n = (K_x X_n + e_k + e_q + e_{n1} + e_o)_n$$

$$K = A/D \text{ 변환기 상수}$$

$$K_x = \text{입력 증폭이득}$$

$$e_k = A/D \text{ 변환기 이득오차}$$

$$e_q = A/D \text{ 변환기 양자화 오차}$$

$$e_{n1} = A/D \text{ 변환기 비선형성 오차}$$

$$e_o = A/D \text{ 변환기 offset}$$

#### 6. 비정현파의 측정결과

여러가지 샘플링 방법을 적용하여 이론치와 실제 측정치를 비교하여 표 1과 같은 결과를 얻을 수 있었다. 이 표는 보간법(Interpolation)과 같은 결과치 보정방법을 사용하지 않고 구하였으며 이 표에서는 고조파에 함유될 때 Shannon의 방법 이외에는 고조파에 의한 오차가 발생하고 Shannon의 방법에서도 최고차 고조파가 식(1)의 관계를 만족할 경우에 오차의 발생이 가장 적었고 다른 경우는 약간의 오차가 발생한다. 첨두치 검출법과 반주기 측정법은 주기당 샘플링수가 기본파에 대해서만 고려됨으로 고조파가 함유될 경우에는 오차가 발생하고 기본파 검출법은 정현파에 직류성분을 주입할 경우에도 측정결과에는 거의 영향을 미치지 않으나 역시 고조파가 함유될 경우에는 오차가 발생한다. 이상에서와 같이 전력전자장치에 의해서 발생하는 비정현 전압, 전류 및 전력의 측정을 위해서는 Shannon의 샘플링 이론에 충실한 방법을 사용하면 측정된 결과에 다른 보간법을 사용하지 않더라도 얻어진 결과를 신뢰할 수 있다.

#### 7. 검토 및 결론

본 연구에서는 전력전자 장치의 입출력을 실험실에서 측정하는 하나의 방법을 제안하였다. 이를 토대로 하여 전력전자장치의 입출력 파형을 측정 및 분석하기 위한 실험실 수준의 범용측정장치 및 프로그램을 개발 본 연구실에서 스펙트럼 분석을 위한 도구로써 사용되고 있다. 얻어진 결과 표 1에서 보는 바와 같이 샘플링주파수가 충분히 높을 경우 대단히 만족스러운 결과를 얻을 수 있으며 대학 실험실에서 사용하기에는 크게 지장이 없다고 보며 또한 컴퓨터를 이용한 측정이므로 샘플링 된 자료로써 다양한 수학적 분석이 가능하다는 장점을 보면 매우 유리하다고 본다. 다만 매우 정확한 측정을 위해서는 극단적으로 샘플링 주파수를 높여야 하지만 측정될 파형에 따라 측정방법을 달리 함으로써 측정장치의 효율을 개선하고 보다 정확한 측정을 할 수 있으리라 기대된다.

#### 참고문헌

1. Saul Goldberg, William F. Horton, "Induction Watthour Meter Accuracy with Non-sinusoidal

Currents," IEEE Trans. on Power Delivery, Vol. PWRD-2, No. 3, July 1987.

2. E. Oran Brigham, The Fast Fourier Transform and Applications, Prentice-Hall, NJ 1988.

3. Glenn W. Swift, "Current and Voltage Waveform Sampling Methods for Digital Protection and Metering Devices," IEEE IAS Annual Meeting Conf. record 1987.

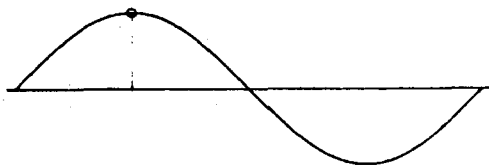
4. R. B. Randall, B. Tech., B. A., Application of B&K Equipment, Brüel & Kjør, Denmark. 1977.

5. Michael F. Matouka, "A Wide-Range Digital Power/Energy Meter for Systems with Nonsinusoidal Waveforms," IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol. IE-29, No. 1, Feb. 1982.

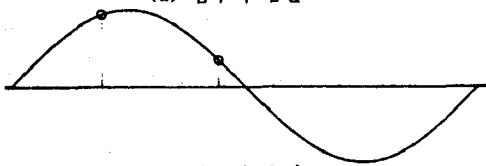
표 1. 샘플링 방법에 따른 결과치

	정현파	삼각파	구형파	5차고조파 함유
이 론 치	3.001	2.507	4.211	3.117
첨두치검출	2.983	2.925	3.062	3.501
반주기측정	3.007	2.595	4.330	2.365
Shannon's $f_s/f_m = 4$	2.994	2.902	4.234	3.492
Shannon's $f_s/f_m = 16$	2.997	2.508	4.234	3.116
Shannon's $f_s/f_m = 32$	2.998	2.504	4.234	3.114
기본파측정	3.012	2.368	4.234	2.031

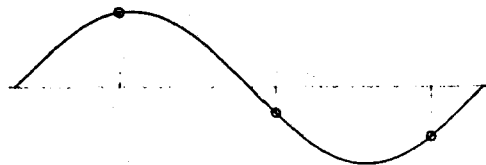
입력 주파수 : 60 Hz  
단 위 : Volt



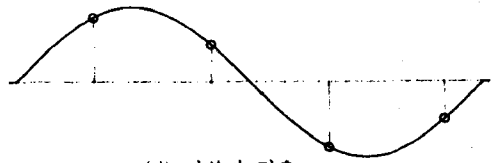
(a) 첨두치 검출



(b) 반주기 측정



(c) Shannon의 샘플링



(d) 기본파 검출

그림 1. 샘플링 방법

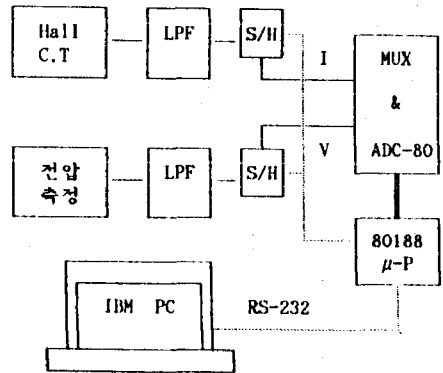


그림 2. 하드웨어 구성도

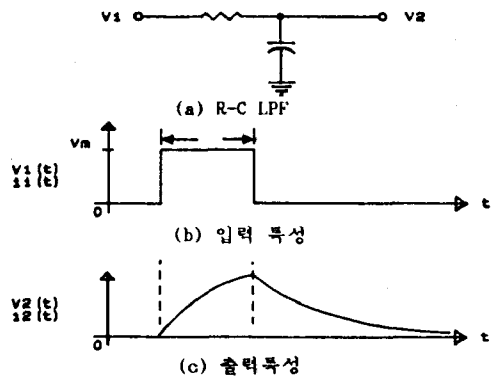
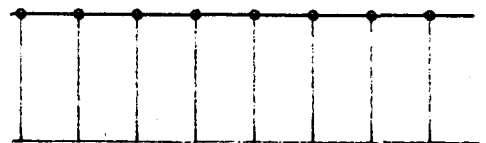
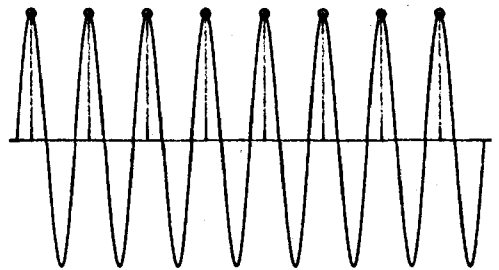


그림 3. LPF의 입출력



(a) 직류 측정



(b)  $f_m = f_s$

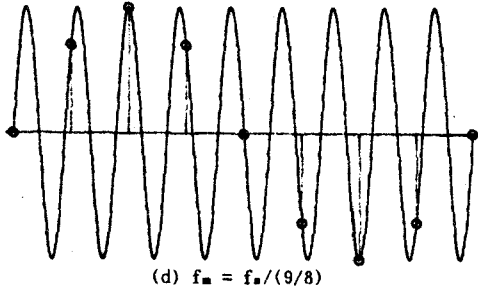
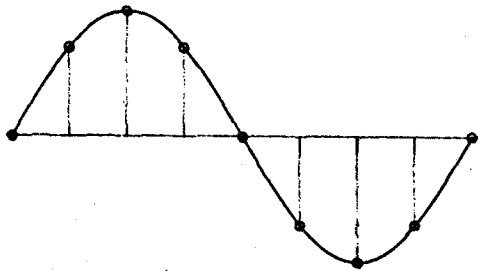


그림 4. 샘플링과 입력주파수 관계

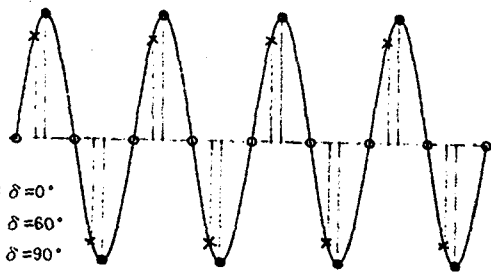
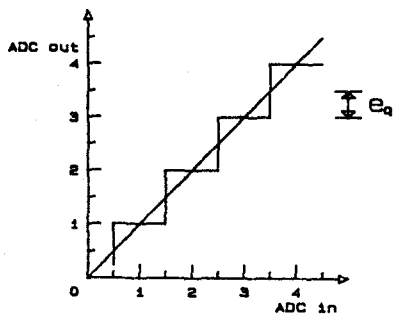
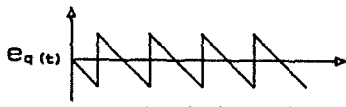


그림 5. 샘플링과 입력주파수 위상



(a). 입력에 대한 출력



(b). 입력에 대한 오차  
그림 6. A/D 양자화에 의한 오차

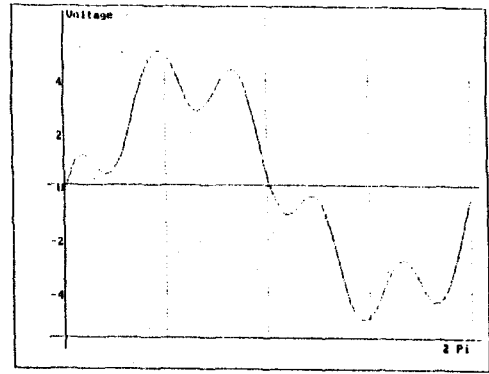


그림 7. 5차고조파 함유 실속파형

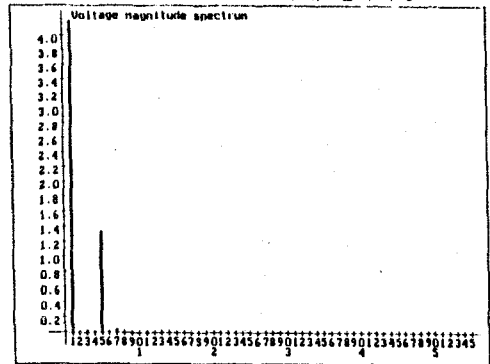


그림 8. 5차고조파 함유 스펙트럼

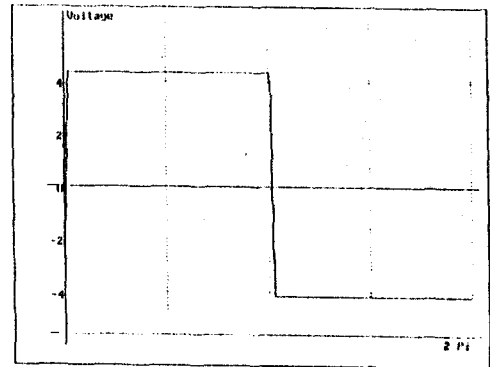


그림 9. 구형파 실속파형

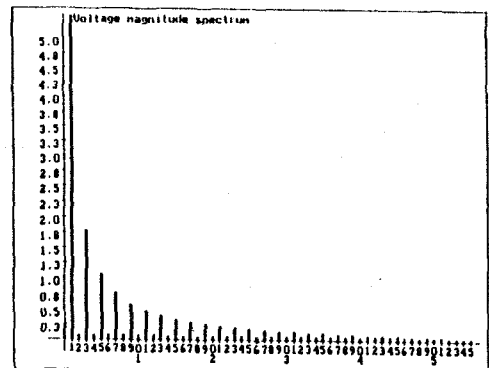


그림 10. 구형파 스펙트럼