

전기부하설비의 전력분석을 위한 데이터 획득 시스템의 개발

(Development of Data Aquisition System for Electrical Power Analysis of Electrical Load equipments)

이상익* · 전정채 · 유재근

(Sang - Ick Lee · Jeong - Chay Jeon · Jae - Geun Yoo)

요 약

전기부하설비의 전압, 전류, 전력, 고조파 등의 분석을 위해서는 수학적 모델링 보다는 실제 계측을 통한 전력 분석이 필요하고 이를 통해 전기설비의 효율적인 관리, 에너지 절약 및 사고 예방에 필요한 대책을 수립할 수 있다. 특히 비선형 부하에 의해 발생하는 고조파의 대책수립을 위해 계측을 통한 전력분석이 필수적이다. 따라서 본 논문에서는 전기부하설비에 공급되는 전력을 측정하고 분석할 수 있는 저가형 데이터 획득 시스템을 DSP 기반으로 개발하였고 이를 실제 전력계통에 설치하여 전력 및 고조파의 측정과 분석을 수행함으로써 그 성능을 입증하였다.

Abstract

In order to analyze voltage, current, electrical power, harmonic and so on of electrical load equipments, electrical power analysis by real measurement rather than mathematical modeling is necessary, and plan of countermeasure for efficient management, energy frugality and accident prevention of electrical equipments using it is possible. Especially, electrical power analysis by real measurement is indispensable in order to consider countermove of harmonic occurred by nonlinear load. So, in this paper, we developed DSP(Digital Signal Processor) based low price data aquisition system, and verified it's ability by performing measurement and analysis of electrical power and harmonic in the real power system.

Key Words : Power Analysis, Harmonic, Data Aquisition System, Electrical Load Equipments

1. 서 론

최근 지구 온난화와 에너지 자원의 감소로 인해 에너지 절약에 대한 관심이 점점 고조되고 있다. 특히 공장이나 빌딩의 전기에너지의 사용자들은 제품

생산과 설비 유지관리에 있어 비용을 최대한으로 억제하기 위해 에너지 절약에 대한 투자는 더욱 활발해지리라 예상된다. 이러한 에너지 절약을 실천하고 전기부하설비의 유지 관리를 위해 전압, 전류, 주파수, 역률 등의 전력관련 데이터의 파악을 통해 대책을 수립하는 것이 필수적으로 필요하다.

전기부하설비의 전압, 전류, 역률 등의 전력분석을 위해서는 계측 및 분석이 가능한 장치가 필요하다. 국내에서는 아직까지 대부분의 장비를 고가로 선진국의 Dranetz, Fluke, RPM사 등에서 수입해서 사용

* 주저자 : 한국전기안전공사 전기안전연구원 과장
Tel : 031-580-3160, Fax : 031-580-3111

E-mail : cameleon@kesco.or.kr

접수일자 : 2003년 7월 14일

1 차심사 : 2003년 7월 21일

심사완료 : 2003년 8월 21일

하고 있어 외화의 유출뿐만 아니라 고장이 발생하였을 경우 별도의 많은 비용이 발생하고 있다. 국내의 몇몇 업체에서 전력분석 관련 장치들을 개발하여 판매하고 있으나 아직까지 그 기술수준이 미비하고 국내 사용자들이 사용을 기피하고 있어 기술수준의 향상 및 경쟁력 확보가 되지 않고 있다.

따라서, 관련기술의 구현을 통해 국내에서 전력분석장치 제작기술의 발전과 관련기술의 저변 확대를 위하여 전기부하설비의 전력을 분석할 수 있는 DSP 기반의 저가형 데이터 획득 장치를 개발하였다. 이는 전압 및 전류신호의 동시 A/D 변환이 가능하고 내부 버스신호를 제어하기 위해 PLD(Programmable Logic Device)를 사용하여 그 구성을 간단히 하였다.

본 논문에서 개발된 데이터 획득시스템은 3상 4선식 계통에 설치하여 동작시험을 수행하였다.

2. 전력의 계산과 고조파

2.1 전압, 전류 및 전력

일반적으로 전기설비에 공급되는 전력을 계산하기 위한 장치들은 대부분 전압과 전류센서를 통해 입력된 아날로그 신호를 디지털 데이터로 변환하여 처리하게 된다. 기본적으로 전압과 전류 신호를 계산하는데 있어 기본주파수 성분 이외에 나머지 주파수 성분(고조파)등을 고려하여 전력분석에 필요한 요소들을 계산하게 된다[1,2].

전력분석을 위한 디지털 시스템에서 고조파 성분이 포함된 전압과 전류신호를 50차수까지 분석하기 위한 샘플링 주파수(f_s)는 다음 식의 Nyquist 샘플링 주파수이론을 만족해야 한다[3].

$$f_s > 2 \times 50f_0 \quad (1)$$

여기서, f_0 는 기본주파수이다.

기본주파수가 60[Hz]일 경우 식(1)과 정확히 일치하는 샘플링 주파수는 6k[Hz]이고 한 사이클 당 샘플링 수는 100개가 필요하다. 그러나 스펙트럼 분석을 위해 이용하는 FFT(Fast Fourier Transform) 알고리즘은 처리할 데이터의 수를 $N = 2^\gamma$ (γ 는 정

수)으로 하였을 때 가장 높은 효율을 나타낸다. 즉, FFT 처리를 수행할 때는 입력신호의 샘플링 데이터 수가 $N = 2^\gamma$ (γ 는 정수)개로 되고 이와 같이 샘플링 된 입력신호가 주기의 정수배일 때 가장 정확한 스펙트럼으로 표현된다. 이와 같은 FFT를 2를 기저로 하는(Radix-2) 알고리즘이라 부른다[3]. 따라서 식(1)을 만족하는 N 의 가장 작은 값은 128이 되고 샘플링 주파수는 7.68[kHz]가 된다.

한 주기를 128개의 데이터로 샘플링 한 경우 다음 식에 의해 전압과 전류의 실효치를 계산한다.

$$V_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{128} V_n^2}{128}}, \quad I_{rms} = \sqrt{\frac{\sum_{n=1}^{128} I_n^2}{128}} \quad (2)$$

식 (2)로부터 고조파 성분이 포함된 실제 피상전력을 다음과 같이 구할 수 있다.

$$VA_T = V_{rms} \times I_{rms} \quad (3)$$

그리고 유효 전력 (W_T)은 식 (4)와 같이 각 주기에서 샘플링 된 실효치 전압 (V_n)과 이에 일치하는 시점에서의 샘플링 된 실효치 전류 (I_n)를 곱하여 계산함으로써 구할 수 있고 이 결과는 고조파를 포함하는 실제 전력이 되며 실제 무효전력 (VAR_T)은 식(5)에 의해 계산된다. 또한 실제 역률 (PF_T)은 피상전력에 대한 유효 전력의 비로 식(6)에 의해 구할 수 있다.

$$W_T = \frac{\sum_{n=1}^{128} V_n \times I_n}{128} \quad (4)$$

$$VAR_T = \sqrt{(VA_T)^2 - (W_T)^2} \quad (5)$$

$$PF_T = \frac{W_T}{VA_T} \quad (6)$$

2.2 고조파

전기신호에서 고조파는 일반적으로 왜형파의 구성성분 중 기본파 이외의 항 즉, 기본파에 대해서 2배 이상의 정수배 주파수를 갖는 파를 의미하는데

전기부하설비의 전력분석을 위한 데이터 획득 시스템의 개발

일반적으로 전력전자 응용기기에 정현파 전압을 공급하면 부하기에 흐르는 전류파형은 비정현파가 되며, 이 파형은 기본파에 동조하여 주기적으로 연속된다. 이 비정현파는 정현파 공급전압과 같은 주파수 성분(기본파 성분)에 정수배의 주파수 성분이 합성된 것으로서 이와 같이 기본파에 정수배의 주파수 성분이 합성된 것을 총칭하여 고조파라 한다[2].

이러한 고조파를 평가하는데 가장 중요한 척도는 총합왜형률(THD : Total Harmonic Distortion Factor)과 차수별 고조파 함유율이다. 총합 왜형률은 총 고조파율로서 기본파 성분과 그 외 파형간의 모양의 근접도를 나타내는 지표로서 전압 및 전류 총합 왜형률은 식(7)과 (8)로 나타낼 수 있고 THD가 낮을수록 특성은 우수하다. 그리고 차수별 고조파 함유율은 기본파 성분 실효치에 대한 특정 차수 고조파 성분 실효치의 비율로 식 (9)와 (10)로 나타낼 수 있다[3,4].

$$\text{전압 THD} = \frac{1}{V_1} \left(\sum_{N=2,3,\dots}^{\infty} V_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \times 100(\%) \quad (7)$$

$$\text{전류 THD} = \frac{1}{I_1} \left(\sum_{N=2,3,\dots}^{\infty} I_n^2 \right)^{\frac{1}{2}} \times 100(\%) \quad (8)$$

$$\text{전압 차수별 고조파 함유율} = \frac{V_n}{V_1} \times 100(\%) \quad (9)$$

$$\text{전류 차수별 고조파 함유율} = \frac{I_n}{I_1} \times 100(\%) \quad (10)$$

여기서, V_1 : 기본파 전압, V_n : n차 고조파 전압
 I_1 : 기본파 전류, I_n : n차 고조파 전류

3. 데이터 획득 시스템의 설계

본 논문에서 제안한 데이터 획득 시스템은 전압·전류를 측정하는 센서와 입력되는 전기신호의 최대 주파수를 제한하기 위한 필터로 구성되는 신호 입력부, 아날로그 신호를 디지털 신호로 변환하는 A/D 변환부, 연산기능과 주변장치를 제어하는 디지털 신호처리부, 논리연산을 통해 시스템 인터페이스 처리를 수행하는 PLD부, S-RAM 및 F-ROM으로 구성되는 메모리부, 시스템의 동작전원을 공급하는 동작 전원부로 구성되며 블록다이어그램과 실제 제작한 보드를 그림 1과 2에 나타내었다.

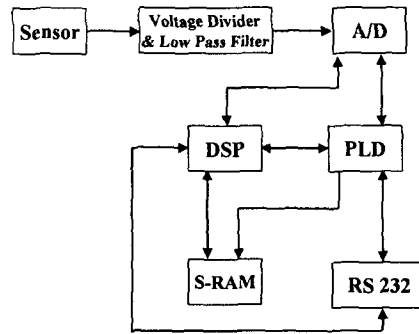


그림 1. 데이터 획득 시스템의 블록다이어그램
 Fig. 1. Block diagram of data acquisition system

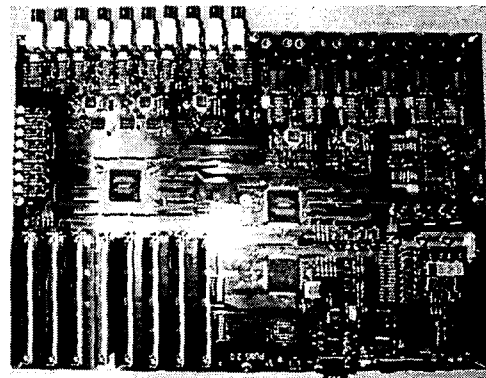


그림 2. 데이터 획득 시스템
 Fig. 2. Data acquisition system

3.1 아날로그 신호 입력부

전압신호 입력회로에서 센서에 의해 측정된 전압 신호를 시스템에 맞는 신호크기로 바꾸기 위해 용량 3[W], 오차율 0.1% 그리고 온도 특성 B급의 고정밀 저항을 이용하여 전압 분배기(Voltage Divider)를 설계하였다. 이는 시스템에 사용된 A/D 변환기의 입력신호에 적합한 전압범위로 조정하는 역할을 수행한다. 또한 시스템의 서지보호를 위해 바리스터를 사용하였고 양방향 제너다이오드를 이용하여 과전압으로부터 시스템을 보호할 수 있게 하였다.

A/D 변환과정에서 샘플링 정리에 의해 샘플링 간격(또는 샘플링 주파수)을 정하기 위해서는 연속신호가 갖는 최고의 주파수 성분을 알 필요가 있다. 그러나 센서로부터 입력받은 전압과 전류의 연속신호는 정확한 주파수 대역을 알 수 없다. 따라서 저역통과 필터를 구성하여 신호의 상한값을 설정하고 측정하고자 하는

최고 고조파 입력주파수를 제한하여야 한다. 본 논문에서 제작한 시스템에서는 50차 고조파까지의 주파수를 측정할 수 있도록 차단주파수가 3[kHz]가 되도록 R, C, OP-AMP LM2902를 사용하여 설계하였다.

3.2 A/D 변환부

시스템에 입력되는 전압 4채널과 전류 5채널의 아날로그 신호를 동시에 A/D 변환하기 위해 AC레벨의 아날로그 입력 4채널, Analog Device사의 14[bit] A/D 컨버터를 3개 사용하였고 샘플링 주파수는 FFT 알고리즘에 의해 7.68[kHz] 선택하였고 전압과 전류 신호의 한 주기가 128개의 샘플로 분해된다. 또한 A/D 변환부의 어드레스 및 데이터 버스는 소자에 고장이 발생할 경우 소자의 독립고장으로 국한시키기 위해 DSP와 A/D 변환기 사이에 8bit 양방향 버퍼(Buffer) 74F245를 설치하여 고장발생에 의한 안정성을 확보하였다.

3.3 디지털 신호처리부

디지털 신호처리부의 DSP는 장치 본체의 모든 주변장치를 PLD를 이용하여 제어하며, A/D 변환기에 의해 검출된 불연속 신호는 UART 및 전압 Buffer IC를 이용하여 RS232 방식으로 PC로 측정 데이터를 송신하는 역할을 수행하며, FFT · 전력량 계산 등을 수행한다. 본 시스템에서는 TI사의 32bit 부동소수점 연산방식의 DSP를 사용하였다.

또한 데이터 획득 시스템에서 DSP와 연결하여 동작 오류 및 정전 등의 상황에 대처하여 측정 환경 및 진행 상태 등을 저장할 수 있는 4[kByte] 용량의 EEPROM 24LC32를 설계 · 장착하였다. 그리고 시스템 내부의 온도를 측정하여 OP-Amp의 주파수 온도특성을 보정할 수 있도록 IC 디지털 온도 센서를 설계 · 장착하였다.

이러한 디지털 신호처리부에서 본 시스템에 사용된 DSP가 60[MHz]의 높은 주파수로 동작하므로 인터페이스 회로가 이에 무리 없이 따라가도록 하기 위해 사용자가 논리회로를 설계하여 프로그램 할 수 있는 PLD를 사용하였다. 또한 DSP의 hardware reset 동작을 위해 외부 스위치로 동작을 제어할 수 있는 reset 전용 IC DS1233을 사용하였다.

3.4 메모리부

메모리 부분은 데이터의 저장을 위한 주 메모리인 SRAM(K684008C1C)과 DSP의 프로그램 메모리로 사용되는 F-ROM(Am29F040), DSP와 연결하여 시스템의 동작 오류 및 정전 등의 상황에 대처하여 측정 환경 및 진행 상태 등을 저장하기 위해 사용된 EEPROM(24LC32)으로 구성된다.

3.5 인터페이스부

시스템 본체의 측정데이터와 PC의 제어데이터의 송 · 수신을 담당하는 부분으로 RS232C 방식을 사용하여 PC로부터 장치의 제어명령을 입력받아 전원 품질을 측정하고 측정결과를 PC로 전송하는 동작을 수행하도록 설계 · 제작하였다. 시스템과 PC와의 데이터 송 · 수신을 위해 데이터의 직 · 병렬 변환용 소자로 PC16550을 사용하였고 RS232C 인터페이스를 위해 Maxim사의 MAX232를 사용하였다.

4. 전력의 측정 및 분석

그림 2의 DSP를 기반으로 설계한 데이터 획득 시스템을 그림 3과 같이 22.9[kV]를 수전하여 380[V]로 공급하는 3상 4선식의 변압기(300kVA) 2차측에 설치하여 측정하였다. 데이터 획득 시스템에서 얻어진 데이터는 PC로 전송, 저장되며 PC에 설치되어 있는 Origin 프로그램을 이용하여 측정 및 분석결과를 그래픽 처리하였다.

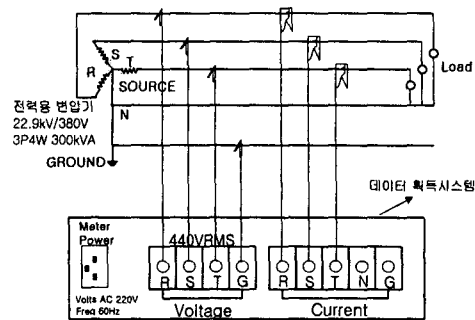


그림 3. 측정결선도
Fig. 3. Measurement wiring diagram

전기부하설비의 전력분석을 위한 데이터 획득 시스템의 개발

그림 4와 그림 5는 제안된 시스템으로 측정된 삼상의 전압 및 전류파형을 상별로 보여주고 있고 그림 6과 그림 7에서는 측정된 RMS 상전압과 상전류의 크기변화를 상별로 나타내었다. 그림 4~5에서 알 수 있듯이 전압보다는 전류 파형이 왜곡되어 있음을 알 수 있다.

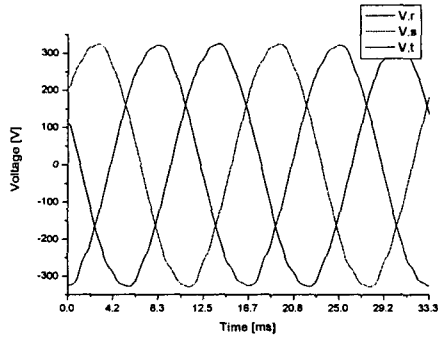


그림 4. 전압 파형
Fig. 4. Voltage waveform

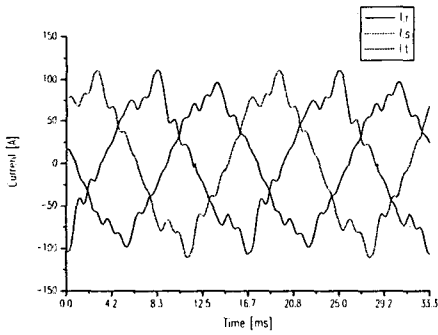


그림 5. 전류 파형
Fig. 5. Current waveform

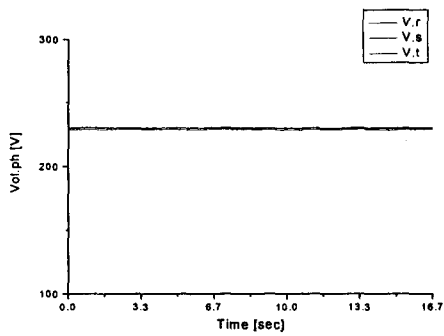


그림 6. 상전압 크기
Fig. 6. Magnitude of phase voltage

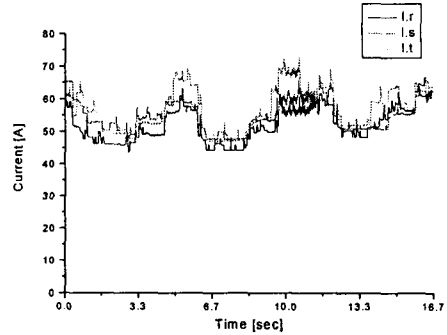


그림 7. 상전류 크기
Fig. 7. Magnitude of phase current

그림 8~10에서는 각 상별 유효, 무효, 피상전력의 파형을 나타내었다. 그림 11에 보여주는 역률 그래프는 측정 계통의 역률이 거의 1에 가까운 정도를 유지하고 있음을 알 수 있다.

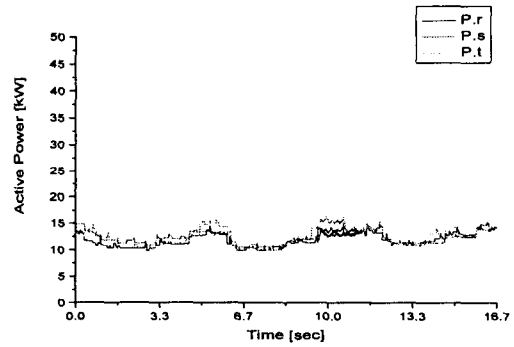


그림 8. 유효전력
Fig. 8. Active Power

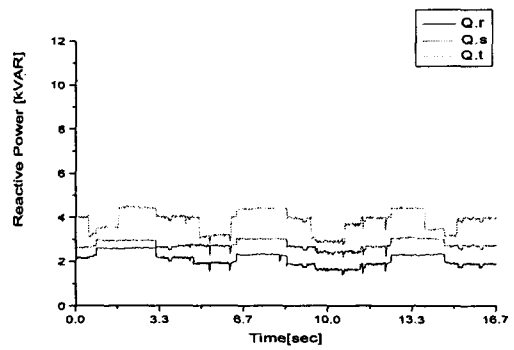


그림 9. 무효전력
Fig. 9. Reactive power

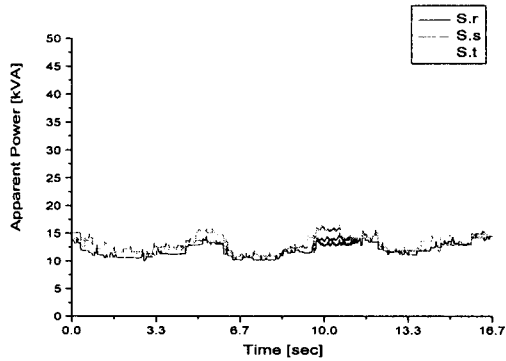


그림 10. 피상전력
Fig. 10. Apparent power

그림 12와 13에서는 상별 %전압 THD와 전압의 주파수 분석결과를 그림 14와 15에서는 %전류 THD와 전류의 주파수 분석결과를 보여주고 있다. 그림 12~15에서 알 수 있듯이 전압 THD는 1.5~2.0% 수준이지만 전류 THD는 상별로 10~25% 정도임을 알 수 있다.

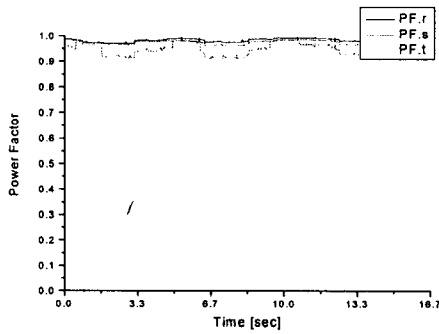


그림 11. 역률
Fig. 11. Power factor

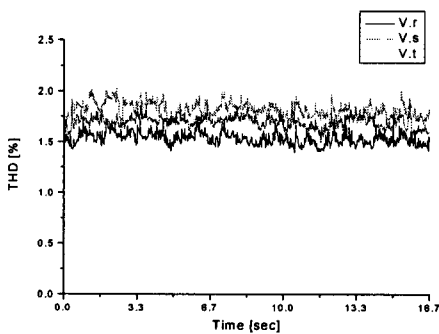


그림 12. 전압 총합 고조파 왜형률
Fig. 12. Voltage total harmonic distortion

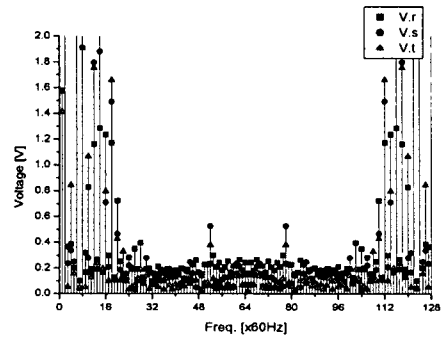


그림 13. 전압의 주파수 분석
Fig. 13. Frequency analysis of voltage

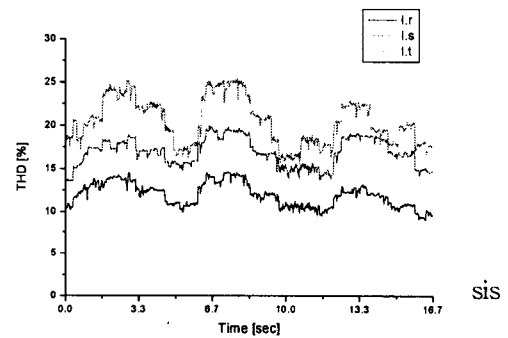


그림 14. 전류 총합 고조파 왜형률
Fig. 14. Current total harmonic distortion

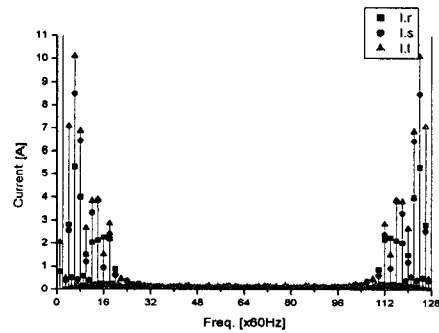


그림 15. 전류의 주파수 분석
Fig. 15. Frequency analysis of current

6. 결 론

본 논문에서는 DSP를 기반으로 전압, 전류, 전력, 역률 및 고조파 등을 측정할 수 있는 시스템을 개발

전기부하설비의 전력분석을 위한 데이터 획득 시스템의 개발

역률 및 고조파 등을 측정할 수 있는 시스템을 개발하였다. 개발된 시스템을 전동, 전열기, 실험장치 등 다양한 부하들이 연결되어 있는 22.9[kV]/380[V] 변압기 2차측에 설치하여 전압 및 전류를 측정·분석함으로써 개발된 데이터 시스템의 동작을 확인하였고 각종 데이터는 PC를 이용해 각종 그래프 형태로 나타낼 수 있었다. 측정 및 분석 결과 제안된 데이터 획득 시스템은 전기부하설비에 공급되는 전압, 전류, 전력 등을 측정하고 분석하는데 충분히 활용할 수 있음을 알 수 있었다. 본 논문에서 제안된 시스템은 DSP를 기반으로 하여 그 구성이 간단하고 저 비용으로 시스템을 구성할 수 있어 관련 장치의 국산화를 통해 외국의 고가장비를 대체할 수 있으리라 사료된다.

본 연구는 전력산업기반기금 전력연구개발사업의 연구비 지원으로 수행되었습니다.

◇ 저자소개 ◇

이상익 (李尙益)

1968년 12월 9일생. 1994년 호서대학교 전기공학과 졸. 1996년 호서대학교 대학원 전기공학과(석사)졸. 현재 건국대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구1팀 과장.

전정재 (全正宰)

1971년 6월 8일생. 1997년 원광대학교 전기공학과 졸. 1999년 원광대학교 대학원 전기공학과(석사)졸. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구1팀 연구원.

유재근 (兪在根)

1965년 12월 5일생. 1990년 건국대학교 전기공학과 졸. 1992년 건국대학교 대학원 전기공학과(석사)졸. 1992~1996 대우전자 연구소 근무. 현재 건국대학교 대학원 박사과정 수료. 현재 한국전기안전공사 전기안전연구원 진단연구1팀 팀장.

References

- [1] Larry D. Jones and A. Foster Chin, "Electronic Instruments and Measurements", Prentice-Hall, 1991.
- [2] J. Arrillaga, D. A. Bradley, "Power System Harmonics" John Wiley & Sons, 1985.
- [3] J. Arrillaga, N. R. Watson and S. Chen, "Power System Quality Assessment, WILEY", 2001.
- [4] JAMES S. WALKER, "Fast Fourier Transforms", CRC Press, 2000.