

모터 구동장치를 위한 DSP기반 3상 전력품질분석 시스템

金禹用, 鄭榮國, 任永徹

A DSP based Three Phase Power Quality Analyzer for Motor Drives

Woo-Yong Kim, Young-Gook Jung, Young-Cheol Lim

요 약

본 연구에서는 독립형 TMS320C31 DSP보드에 의해 전력분석 과정을 완전 소프트웨어화하고, 전압센서와 전류센서를 시스템 내부에 탑재한 저전력용 3상 모터구동장치를 위한 전력품질 분석시스템을 개발하였다. 평균전력이론에 의해 전력품질을 분석하였고 분석 결과를 LCD화면에 의해서 실시간으로 출력하였다. 특히 개발된 시스템은 설치공간이 필요한 종전의 대전력용 전력분석장비와는 다르게, 상용 인버터에 곧바로 탑재 가능하도록 하여 설치공간을 줄였고 또한 초보자도 사용하기 용이하게 하였다. 정상상태와 모터구동장치의 부하가 급변하는 과도상태에서도 제안된 전력품질 분석시스템은 실시간으로 전력분석을 하였으며, 본 연구의 유용성을 입증할 수 있었다.

ABSTRACT

This paper presents a digital instrument for a DSP based power quality analysis in three phase power system where current waveform is non-sinusoidal. It is based on stand alone type TMS320C31 DSP(digital signal processor)board and on a special high-speed data acquisition system. Power quality of low power motor drives are analyzed and processed by using a simple average power algorithm, and result of power analysis are displayed by LCD in the proposed system. This paper also goes on to discuss the performance of an instrument prototype, both in terms of accuracy and speed of measurement under the transient and steady state condition.

Key Words : Motor Drives, Three phase power quality analyzer, Digital signal processor, Average power theory

1. 서 론

최근 산업시설에서 가전제품에 이르기까지 전력의란에 민감한 전자부품 및 장비가 급증함에 따라, 전력의 품질을 실시간으로 분석하여 그 보상대책을 마련할 수 있는 전력분석장치가 필요하게 되었다.^[1,2] 특히 모터 구동 시스템과 같은 전력전자 변환장치는 산업현장의 동력제어용으로 광범위하게 보급되어 있으며, 이들이 발생하는 전압과 전류 고조파는 관련 산업계통과 통신 시설에 악영향을 미치고 있다.^[3] 종래의 전력분석장치는 대부분이 송배전 계통에 적합한 구조와 성능을 갖고 있으며 부피가 크고 고가여서 산업현장에 적용되고

있는 저전력용 모터 구동 시스템의 전력분석에 적합하지 못하다. 또한 종래의 대전력용 전력분석장치는 다양한 기능을 갖고 있어, 사용하기 복잡하며 전압과 전류센서들을 장비 외부에 부착하기 때문에 전체 시스템의 면적이 커지며, 이들 장비를 저전력용으로 전환할 때에는 저전류 측정 크랩프를 또 다시 마련해야하는 번거로움이 있어 왔다. 특히 장비의 다양한 기능을 익히기 위한 교육의 투자비용이 크며 현장 근무자들의 근무 순환이 발생시에는 다른 근무자들이 재교육을 받아야 하는 번거로움이 있어, 현장 근무자들은 이들 장비 사용을 기피하는 경향이 있다. 결국, 모터 구동 시스템에 적합한 저전력용 전력분석장비^[4,5]는 전압과 전

류센서를 장비내에 탑재하고 있어야 하며, 전력 품질을 평가하기 위한 파라미터는 종전의 대전력용 장비에 비해 간단하고 사용하기 용이해야 한다. 따라서 본 연구는 이상의 조건을 만족할 수 있는 간단한 전력분석 알고리즘에 의해 모터 구동장치의 전력품질을 평가할 수 있는 DSP기반 3상 전력분석장치를 개발하였다. 전력분석 알고리즘은 간단한 평균전력이론에 의하며, 독립형 TMS320C31 DSP 보드에 의해 실시간으로 전력을 분석하여, 본 연구의 유용성을 입증하였다.

2. 전력품질분석 알고리즘

교류전압 $v(t)$ 가 정현파라 하더라도, 교류전류 $i(t)$ 는 전력전자기기의 비선형 특성으로 인해 왜형이 되며, 이때 전압과 전류의 실효치 V, I 및 피상전력 S , 유효전력 P 는 다음과 같다.

$$V = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T v(t)v(t)dt} \quad (1)$$

$$I = \sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i(t)i(t)dt} \quad (2)$$

$$S = VI \quad (3)$$

$$P = \frac{1}{T} \int_0^T v(t)i(t)dt \quad (4)$$

또한 기본파 무효전력 Q 는 식 (5)와 같이 90° 이동한 교류전압에 의해서 구해진다

$$Q = \frac{1}{T} \int_0^T v(t - \frac{\pi}{2})i(t)dt \quad (5)$$

전력의 각 성분들은, 서로 독립적이며 직교성이 유지되므로 왜형전력 D 는 식 (6)으로 구해진다.

$$D = \sqrt{S^2 - P^2 - Q^2} \quad (6)$$

이상의 분해된 전력성분으로부터, 비선형 부하의 등가변수 G, B, K 는 다음과 같으며,

$$B = \frac{Q}{V^2} \quad (7)$$

$$G = \frac{P}{V^2} \quad (8)$$

$$K = \frac{D}{V^2} \quad (9)$$

이들 등가변수에 의해, 전류의 실효치 성분과 전력 품질평가 지수들이 구해진다.

$$I_a = GV \quad (10)$$

$$I_r = BV \quad (11)$$

$$I_d = KV \quad (12)$$

$$I_1^2 = I_a^2 + I_r^2 \quad (13)$$

$$b.f. = \frac{I_a}{I} \quad (14)$$

$$\%THD = \frac{I_d}{I_1} 100 \quad (15)$$

이상으로부터 모터구동장치의 입력교류전류 $i(t)$ 의 유효성분 $i_a(t)$ 와 기본파 무효성분 $i_r(t)$ 그리고 왜형 성분 $i_d(t)$ 은 각각 다음으로 구해진다.

$$i_a(t) = G v(t) \quad (16)$$

$$i_r(t) = B v(t - \frac{\pi}{2}) \quad (17)$$

$$i_d(t) = K v(t) \quad (18)$$

종래의 3상 전력분석을 위해 사용된 p-q이론과 주파수 영역의 접근법에 비해 제안된 방법은 비교적 간단하고 쉬운 수학적인 디지털 신호처리만으로 단상 뿐만 아니라 3상의 전력분석에 모두 적용 가능함을 알 수 있다.

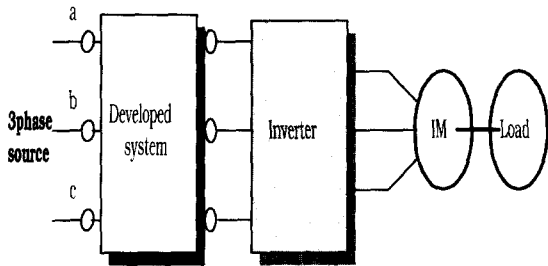
3. 제안된 시스템

3.1 하드웨어

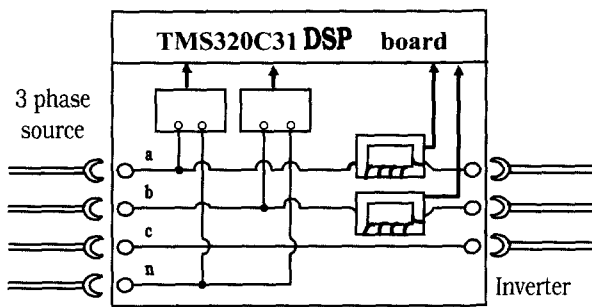
그림 1은 상용 모터 구동장치와 개발된 시스템과의 연결도를 보여주고 있으며, 표 1은 본 연구의 전력품질 분석대상인 모터구동장치의 사양을 나타내고 있다.

전압형 인버터에 의해 가변속되는 주 모터는 2HP이며 정격전류와 정격토크는 5.9A와 0.85N-m이다. 부하로는 주 모터와 직결된 1HP의 유도모터인데, 이 부하 모터의 속도를 조절하여 주 모터에 인가되는 부하량을 제어하고 있다. 그리고 주 모터의 %부하는 전류용량을 기준으로 할 때, 정상상태에서는 주 모터의 정격부

하에 대해 50%이고, 과도상태에서는 60%에서 최고 120%까지 부하를 증감하였다.



(a) Schematic diagram



(b) Voltage and current sensor part

그림 1 제안된 3상 전력품질분석 시스템
Fig. 1 Proposed power quality analyzer

표 1 모터구동장치의 사양
Table 1 Specifications of motor drives

Driver	<ul style="list-style-type: none"> 3phase voltage source inverter (commercial inverter: MIMOCON)
Motor	<ul style="list-style-type: none"> 3 phase, squirrel cage type induction motor, 1.5kw(2HP), 4pole, 220v/380v, 5.9A/3.4A Torque : 0.85N-m Speed : 1730rpm(slip=3.8%)
Load	<ul style="list-style-type: none"> 3phase, squirrel cage type induction motor, 4pole, 0.75KW(1HP), 220v/380v, 3.5A/2.0A

사진 1은 DSP기반의 개발된 시스템을 나타내고 있다.

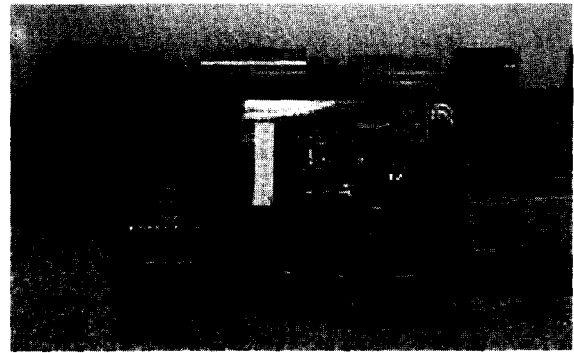


사진 1 개발된 시스템의 실험장치 사진
Photo 1 Experimental photograph of the developed system

3.2 DSP프로그램

그림 2는 DSP기반의 개발된 시스템의 블록선도를 나타내고 있다.

전력품질분석알고리즘은 TMS320C31-60MHz의 독립형 DSP보드에 의해 제어되고 있다. DSP보드는 4채널의 고속A/D변환기와 4채널의 고속 D/A변환기를 가지고 있으며, A/D변환기는 12비트 분해능과 채널당 8 μ sec의 A/D변환시간을 가지므로 4채널을 모두 사용할 경우에는 29KHz까지의 샘플링이 가능하다. 내부클럭은 DSP의 외부클럭을 4분주하여 사용하고 있으며, 타이머 인터럽트는 $60\text{MHz} / (4 \times 2083) = 7.2\text{KHz}$ 이다.

즉, 60Hz전원의 한 주기 동안 120회 샘플링을 하고 샘플링 시간 139 μ sec(샘플링 주파수 7.2KHz)마다 DSP 외부 인터럽트에 의해서 샘플링 및 전력품질을 분석하였다.

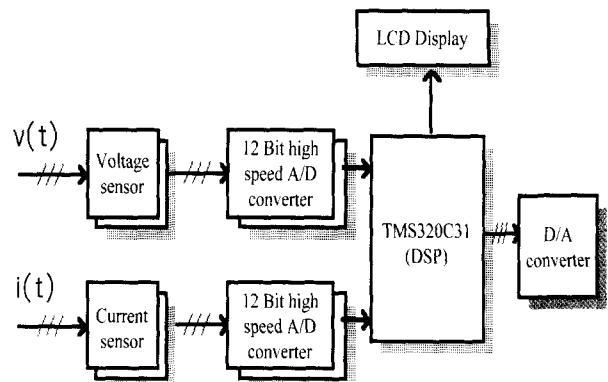
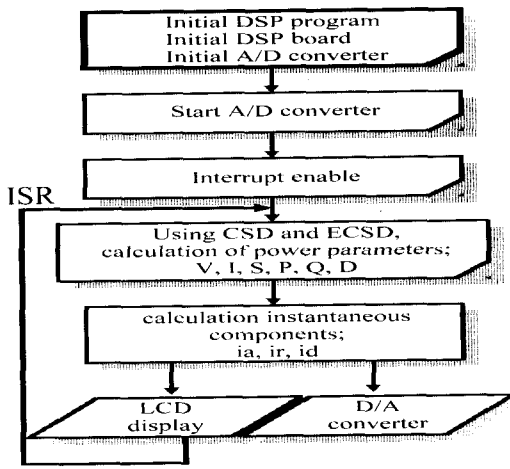
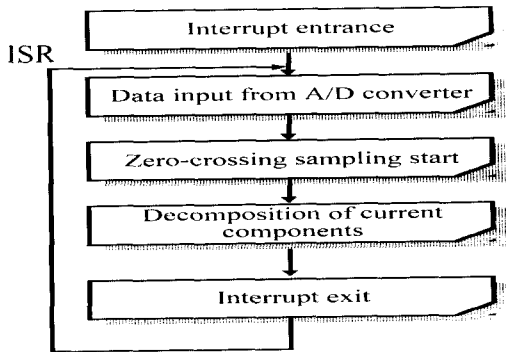


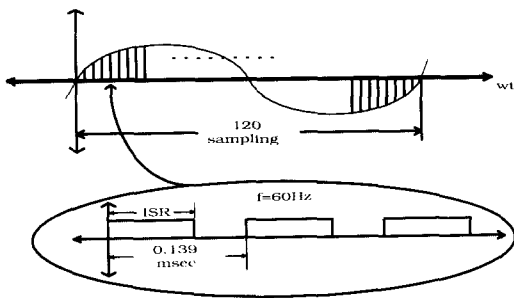
그림 2 개발된 시스템의 블록선도
Fig. 2 Block diagram of developed system



(a) Main program



(b) Interrupt service routine (ISR)



(c) Detail representation of ISR

그림 3 전력품질 분석 프로그램의 흐름선도
Fig. 3 Flowchart of program for power quality analysis

그림 3은 전력품질 분석을 위한 주 프로그램과 인터럽트 서비스 루틴(ISR)을 나타내고 있다. ISR은 60Hz 전원을 120회 샘플링 할 때, 139μsec(7.2KHz)내에서 이루어지고 있다. 120회 샘플링하는 동안 계속 인터럽

트가 발생하여 전압과 전류 성분들의 순시치가 계산되며, 따라서 120회의 샘플링이 끝나게 되면 1주기 동안의 최종 전류성분과 전압의 실효치들이 계산된다. 이와 같이 연산된 결과는 DSP에 탑재된 LCD에 의해 각상의 전압과 전류 그리고 전력성분과 역률, %THD 등이 수치적인 데이터로 출력됨과 동시에 D/A변환기를 통하여 전압과 전류 성분을 내보내게 된다.

실효치 계산을 위해서는 한 주기 동안의 샘플링 값을 이용하며 전압, 전류의 실효치의 곱에 의해 피상전력이 얻어지고, 같은 주기 동안의 샘플링 데이터를 이용하여 유효전력이 얻어진다. 또한 샘플링된 전압 데이터를 90° 이동시켜 기본과 무효전력을 구하며 각각의 전력의 차로 왜형전력이 구해진다. 이상과 같은 방법으로 분해된 전력성분으로 부터 전류의 3성분을 구할 수 있으며 최종적으로 모터 구동 시스템의 전력품질 평가지수인 역률 p.f., 총고조파 왜형률 %THD 등을 구하게 된다.

본 연구에서 사용된 전압의 동기화 기법은 영점 검출법(zero-crossing detection)이다. 물론 영점 검출법은 다른 종류의 동기화 기법에 비교해서 매우 간단한 방법이기도 하나, 전압의 왜형에 영향을 받는 단점이 있다. 3상의 전압과 전류를 동기화하기 위해서, 각상의 전압은 직접 영점을 검출하고, 전류는 전압의 영점이 검출되어지는 지점들 사이의 전류 샘플링 값들을 한 주기로 하면 120° 위상차가 나는 각 상의 전류를 구할 수 있다.

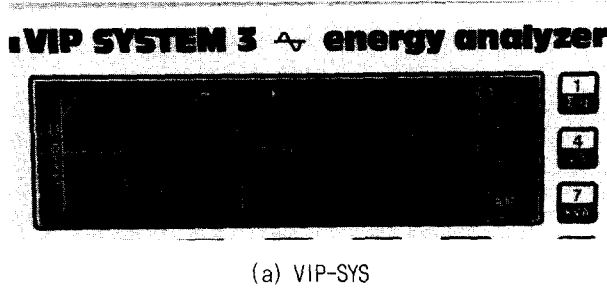
4. 실험결과 및 고찰

표 2와 사진 2는 본 연구에서 개발된 시스템의 전력품질 분석결과를 전력분석 상용제품인 VIP SYS과 비교한 것이다.

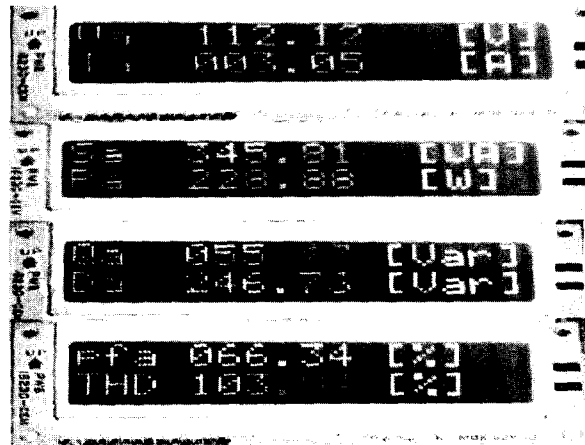
표 2 제안된 시스템과 VIP-SYS의 전력분석결과
Table 2 Power analysis results of the proposed system and VIP-SYS

	VIP SYS	Proposed system
V[V]	112.6	112.1
I[A]	3.04	3.05
S[VA]	342.3	345.8
P[W]	227.3	228.8
Q[VAR]	55.6	55.5
D[VAR]	250	246.8
$\sqrt{Q^2 + D^2}$	256.1	253.0
p.f.	0.664	0.663
%THD[%]	106.7	103.9

모터의 정격에 대해서 50%부하를 인가하였으며, 인버터 출력전압의 주파수가100Hz(2,892rpm)인 정상상태에서 실험을 하였다. 표 2에서 보는 바와 같이 VIP-SYS와 개발된 시스템의 a상에 대한 전력분석 결과는 서로 일치하고 있음을 알 수 있다.



(a) VIP-SYS



(b) Proposed system

사진 2 제안된 시스템과 VIP-SYS 전력분석사진
Photo 2 Power analysis photograph of the proposed system and VIP-SYS

그림 4는 모터구동장치의 전력을 분석한 후 얻어지는 식 (16)~식 (18)에 의한 전류성분을, D/A를 통하여 출력한 파형을 나타내고 있다.

그림 5는 모터 구동장치에 의해, 모터를 30Hz에서 120Hz까지 단계적인 속도변화를 시켰을 때 %THD와 p.f.의 변화를 개발된 시스템에 의해 분석한 결과이다.

모터 구동장치의 역률과 %THD는 모터의 속도변화에 따라 서로 반비례함을 알 수 있다. 과도상태 전력품질 분석결과를 살펴보기 위해서, 주 모터의 정격부하에 대한 %부하는 전류용량을 기준으로 하여, 60%에서 최고 120%까지 증가를 시켰고, 또한 110%에서 70%까지 부하량을 감소하는 순간의 전력분석을 하였

다. 이때의 인버터의 출력전압 주파수는 60Hz이다. 과도상태의 전력품질 분석결과를 모터 제어장치의 입력 전류-순시유효성분, 순시무효성분의 파형으로 나타낸 이유는 과도상태의 전력분석 결과를 수치화하기에는 어려운 점이 있기 때문이다.

개발된 시스템의 정밀도를 비교하기 위해서 사용된 시제품 전력분석기인 VIP-SYS의 일반사양을 표 3에 나타내었다.

표 3 VIP-SYS의 일반사양
Table 3 General specifications of VIP SYS

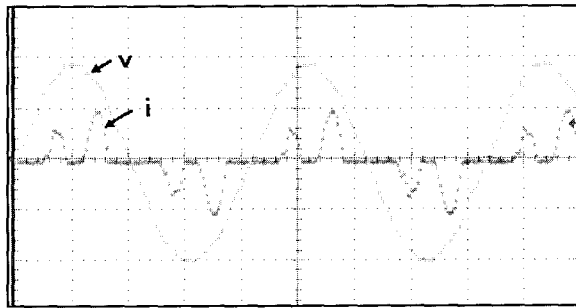
Formulas used for power measurement	· Average power theory · FFT harmonic analysis
Voltage inputs	A,B,C,N phase
Current inputs	A,B,C phase
Voltage range	600v(more than 600v with C.T)
Current range	1000A(provided clamp meter)
Measurement frequency range	50Hz,1.5KHz
Harmonic analysis	Up to 25 harmonics
Sampling frequency	4KHz
Accuracy	V_{rms}, I_{rms} : 0.4% Harmonics: 1%
Sensitivity	0.2% of scale max.
Response time at scale	1 phase: 10sec. 3 phase: 20sec.

5. 결 론

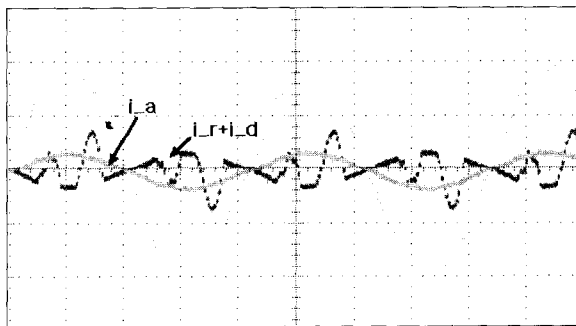
본 연구에서 개발된 장치는 독립형 TMS320C31 DSP 보드에 의해 전력분석 과정을 완전 소프트웨어화 하였으며, 전압과 전류센서는 모두 전력분석 장치내부에 탑재하여 3상 전력품질 분석시스템을 저가격화 및 소형화를 추구하였다. 전력품질 분석 알고리즘은 시간영역에서의 평균전력이론이며 C-언어에 의해 구현하였으며 전력분석 결과는 LCD화면에 의해서 실시간으로 출력하였다.

개발된 시스템은 종전의 대전력용 전력분석장비에 비해 사용하기 쉬우며, 설치공간과 가격이 크게 감소되므로 모터 구동 시스템에 적합한 저전력용 전력품질

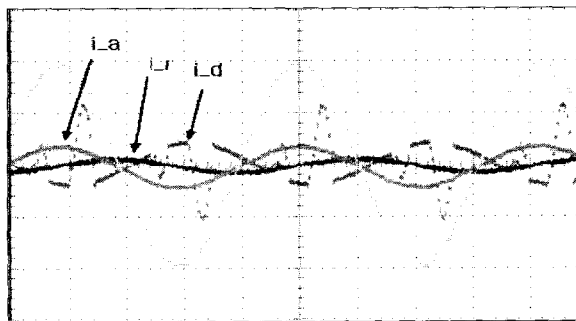
분석장비임을 확인할 수 있었다. 연구의 결과는 현재 국내 전력소모의 절반 이상을 차지하고 있는 모터 구동장치의 전력품질 분석기술과 계측 분석된 전력을 제어하기 위한 기술축적에 중요한 의미를 가질 수 있을 것이라 사료된다.



(a) Voltage and input currents



(b) Waveforms of active and reactive currents



(c) Waveforms of active, fundamental reactive and distorted currents

그림 4 모터구동장치의 입력전류 파형
(80V/div. 5A/div. 4ms/div.)

Fig. 4 Input current waveforms of motor drives
(80V/div. 5A/div. 4ms/div.)

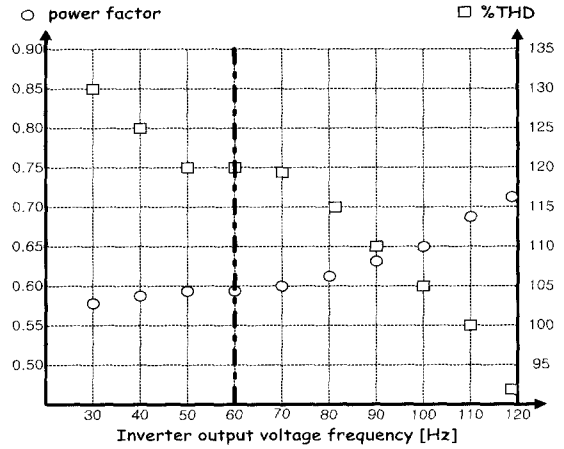
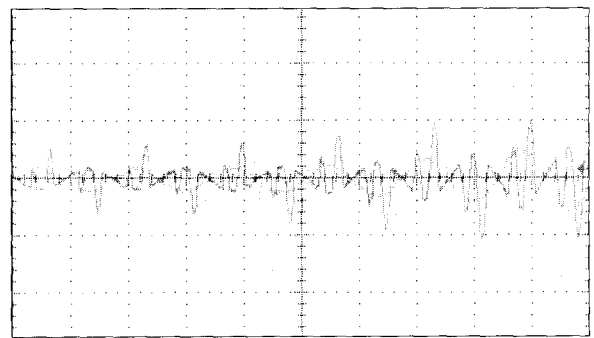
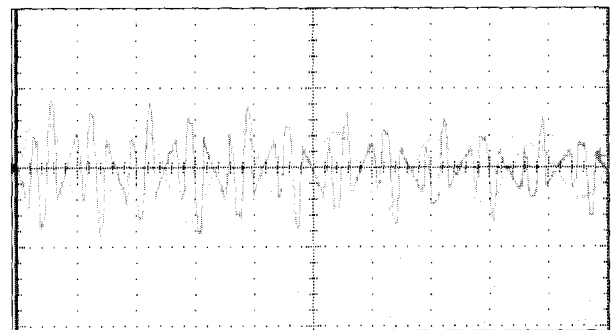


그림 5 모터속도 변화에 따른 역률 및 %THD의 관계

Fig. 5 Power factor and %THD in variation of motor speed



(a) Dynamic characteristics for increasing load



(b) Dynamic characteristics for decreasing load

그림 6 부하의 변동에 대한 과도특성
(80V/div. 5A/div. 10ms/div.)

Fig. 6 Dynamic characteristics of the proposed system
in the variation of load
(80V/div. 5A/div. 10ms/div.)

이 논문은 2000년도 전남대학교 연구년 교수연구비 지원에 의하여 연구되었음.

참 고 문 헌

- [1] Y.G.Jung, Y.C.Lim, S.H.Yang, "Single-Phase Active Power Filter based on Three-Dimensional Current Coordinates", IEE Proc. Electr. Power Appl., vol.147, no.6, November, pp.572-578, 2000.
- [2] Y.G.Jung, Y.C.Lim, "A DSP Based Power Analyzing and Control System Using Three-Dimensional Current Coordinates", IEEE IECON,(TAIWAN), pp. 1094-1099. 1996.
- [3] 한국전력공사 전력경제처, 모터 제어장치 보급 및 사용 행태 조사연구, 1997.
- [4] G.Bucci, C.Landi, "On-Line Digital Measurement for the Quality Analysis of Power Systems Under Nonsinusoidal Conditions", IEEE Trans. on Instrument and Measurement, vol. 48, no. 4, 1999.
- [5] L.Cristaldi, A.Ferrero, "Measuring Equipment for the Electric Quantities at the Terminals of an Inverter-Fed Induction Motor", IEEE Trans. on Instrument and Measurement, vol. 45, no. 2, 1996.

저 자 소 개



김우용(金禹用)

1973년 9월 7일생. 1999년 동신대 전기공학과 졸업. 2001년 현재 전남대 대학원 전기공학과 석사과정.



정영국(鄭榮國)

1963년 11월 10일생. 1986년 전남대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2000년 일본 오카야마대학 연구방문. 2001년 현재 대불대 전기공학과 전임강사. 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC) 연구원.



임영철(任永徹)

1953년 4월 22일생. 1975년 전남대 전기공학과 졸업. 1977년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 고려대 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1997년 오스트레일리아 모나시대학 Visiting Scholar. 2001년 현재 전남대 전기공학과 교수. 한국과학재단 지정 전남대 고품질 전기전자부품 및 시스템 연구센터(RRC)소장. 당 학회 편집이사.