

가변부하 적용을 위한 고정밀 교류전원 제어시스템*

A High-precision AC Power Control System for Variable Loads Application

한 운동* 손진근**
(Wun-Dong Han) (Jin-Geun Shon)

요 약

고정밀 교류전원 제어시스템은 교통관제등과 같은 가변 부하를 운영하는데 중요하다. 이러한 시스템은 가변부하에 대응하기 위하여 제어의 정밀성이 요구되며, 이를 위하여 AC/DC/AC 변환이 가능한 인버터를 주로 사용하게 된다. 따라서 본 논문에서는 고정밀 전류제어를 수행하기 위하여 개선된 전류계측 기법을 이용한 제어시스템을 제안하였다. 제안된 계측기법은 전류의 왜화된 계측을 순시적 실효치의 이동평균법을 사용하여 응답 및 정밀성을 개선한 방식이다. 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험의 결과는 제안된 시스템의 타당성을 입증할 수 있었으며, 이는 항공관제 유도시스템의 조명제어 장치에도 폭넓게 적용되리라 사료된다.

Abstract

The control system of high-precision AC power is important in traffic management lighting and beaconing of aerodromes, etc. To control AC power supply in these load characteristics, inverter systems of AC/DC/AC conversion are widely used in high-precision current control. Therefore, in this paper, a inverter system of constant current regulation using improved measuring technique of feedback current is proposed. Proposed measuring techniques improve response and precision in that it use moving average method of instantaneous RMS for measuring current sensing. Results of the computer simulation and experiment prove the effects of proposed system.

Key words: High-precision AC power, inverter system, moving average method, instantaneous RMS

이 논문은 충주대학교 대학구조개혁지원사업비(교육인적자원부 지원)의 지원을 받아 수행한 연구임.

- * 주저자 : 충주대학교 첨단과학기술대학 전기공학전공 교수
- ** 공저자 : 충주대학교 첨단과학기술대학 전기공학전공 교수
- † 논문접수일 : 2008년 3월 19일
- † 논문심사일 : 2008년 5월 7일
- † 게재확정일 : 2008년 5월 26일

I. 서 론

산업의 수준이 날로 높아가면서 각 산업에 적용되는 각종 전기 부하시스템은 매우 높은 수준의 제어성과 고성능화를 요구하고 있다. 이러한 요구는 온/오프 스위칭 기능을 기반으로 한 전력용 반도체 소자의 발달과 고성능 마이크로프로세서의 출현에 의한 전력전자 기술의 발전에 따라 더욱 가속화되고 있다. 특히 전력전자분야는 전기, 전자, 제어, 컴퓨터 및 통신 분야가 서로 융합하여 전력에너지 상호변환이 가능하도록 하는 전력변환장치가 상당한 부분을 차지하고 있다 [1].

이러한 전력변환장치 중에서는 기존 전기설비의 연동적인 관계에 의하여 주문형 교류전원의 공급제어장치가 발달되어 있으며, 이러한 제어장치에는 교류/직류/교류의 전력변환장치인 컨버터(Converter)와 인버터(Inverter)가 결합되어 있고, 이는 가정용 및 산업용 뿐 만 아니라 통신 및 의료기기 등에 널리 적용되고 있으며 최근에는 활주로의 유도등, 지시등과 같은 항공관제용 유도등을 비롯한 교통 관제등에도 그 적용범위가 확장되고 있다 [2-5].

본 논문에서는 교류전원 제어공급장치인 UPS (uninterruptable power supply) 및 VVVF (variable voltage variable frequency) 가변속 전동기 드라이버, 각종 조명제어 및 항공교통 관제등에 널리 적용될 수 있는 고정밀 전류계측에 의한 고제어성의 교류전원 공급시스템을 제안하고자 한다. 고제어성을 만족시키기 위한 제어 요소로서는 전기적 제량의 신호계측이 필수적이며, 이러한 계측 신호는 대부분 부정확성 및 왜란 등으로 인하여 계측의 비선형성 및 속응성이 미흡한 실정이다 [6].

따라서 본 논문에서는 개선된 전류계측 기법을 적용하여 이러한 계측의 문제점을 해결하고자 한다. 이는 전기적 제량인 교류의 전류를 직류량으로 제어하기 위하여 실효치 계측기법으로 사용하여 왔는데, 기존의 평균적 기법에서 탈피하여 응답 속도와 정밀성이 개선된 순시적 실효치 이동평균기법을 사용하는 방식으로, 이의 계측에 의하여 부하가변에도 탄력적으로 적용할 수 있는 고정밀성의 교류

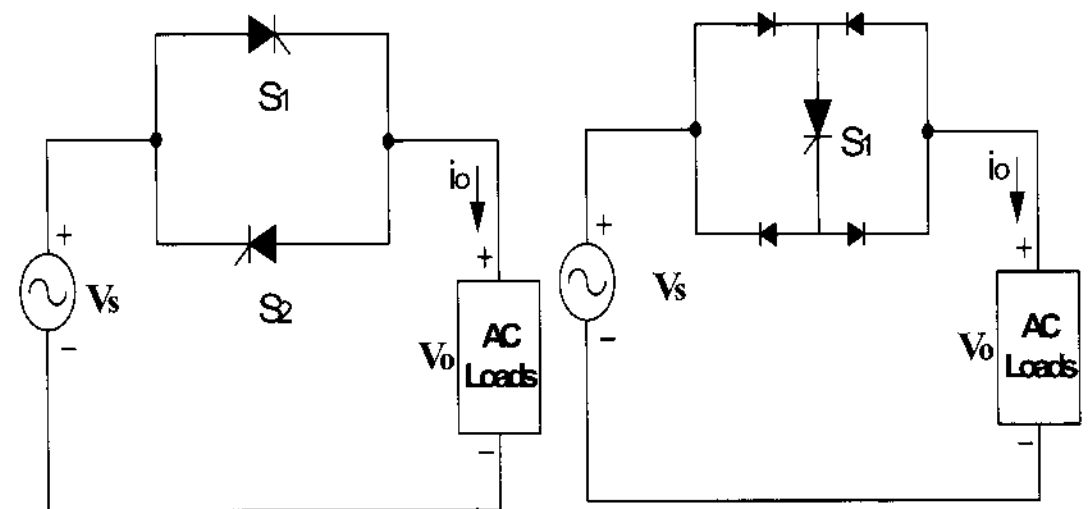
전원 제어시스템의 구현이 가능한 방식이다. 본 제안 시스템의 타당성을 검증하기 위하여 모의실험 및 실험을 수행하여 만족한 결과를 얻었으며, 이의 결과로 기타의 UPS와 전동기 구동용 인버터, 특히 항공관제 조명용 장치에도 널리 적용되리라 기대된다.

II. 교류전원 제어시스템

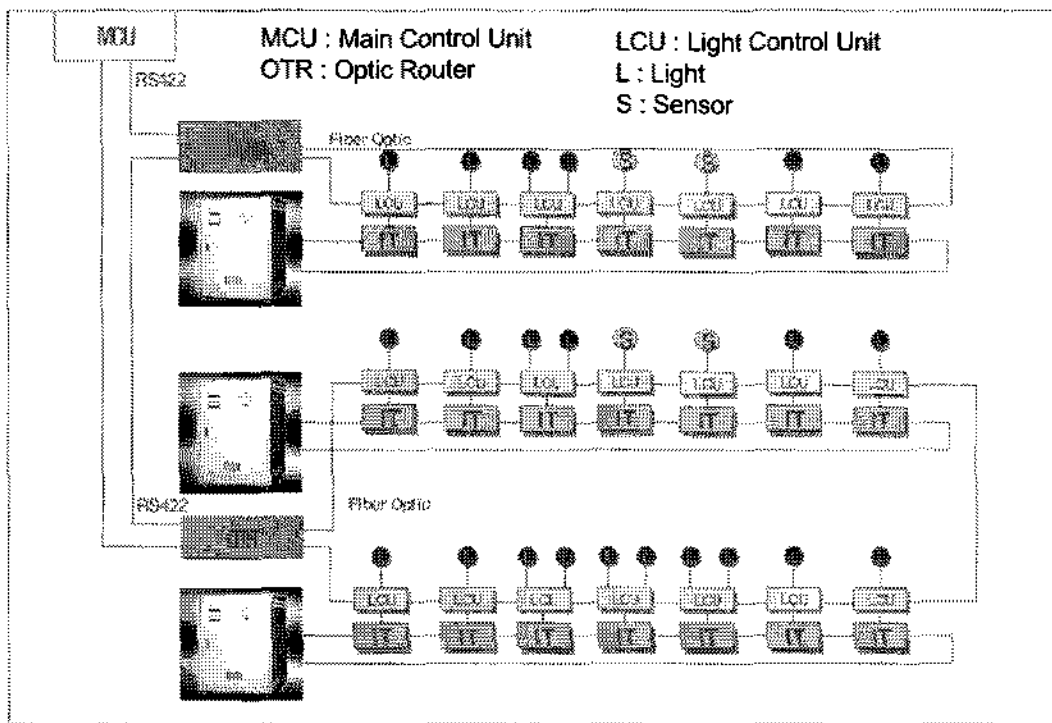
1. 기존의 교류전원 제어시스템

교류전원 제어시스템은 교류전원으로부터 교류 부하로 전달되는 전압과 전류, 평균전력을 제어하는 전력변환기이다. 이러한 교류전력변환은 전력용 BJT, MOSFET, GTO, IGBT 등의 스위칭소자를 이용하여 규칙적인 간격으로 전원과 부하를 온, 오프하는 것이며, 전형적인 교류/교류 변환장치는 <그림 1>과 같이 두 가지 방식으로 사용되며 이를 위상제어 방식이라고도 한다 [5].

이러한 방식은 교류전압 $V_s = V_m \sin \theta$ 에서 위상각 θ 를 위상각 α 로 제어하여 교류부하의 전류를 제어하며, 이때의 위상각 α 는 부하의 상태에 따른 제어기의 기준신호에 의해 조정된다. 이러한 회로의 부하에는 다양한 종류의 부하장치들이 연결될 수 있으며, <그림 2>는 항공관제용 조명기구에 직렬부하(활주로진입등, 활주로등, 활주로 중심선등, 접지대등, 진입각 지시등, 유도로등 및 기타등화)의 조명제어장치 관제시스템의 일례를 나타낸 것으로, 이때의 부하 전구는 조명밝기의 일정유지와 수명



<그림 1> 기존의 교류전원 제어시스템(위상제어 방식)
 <Fig. 1> Conventional AC power control system(Phase control method)



<그림 2> 교통관제용 직렬부하시스템의 일례
<Fig. 2> Serial loads of traffic management lighting

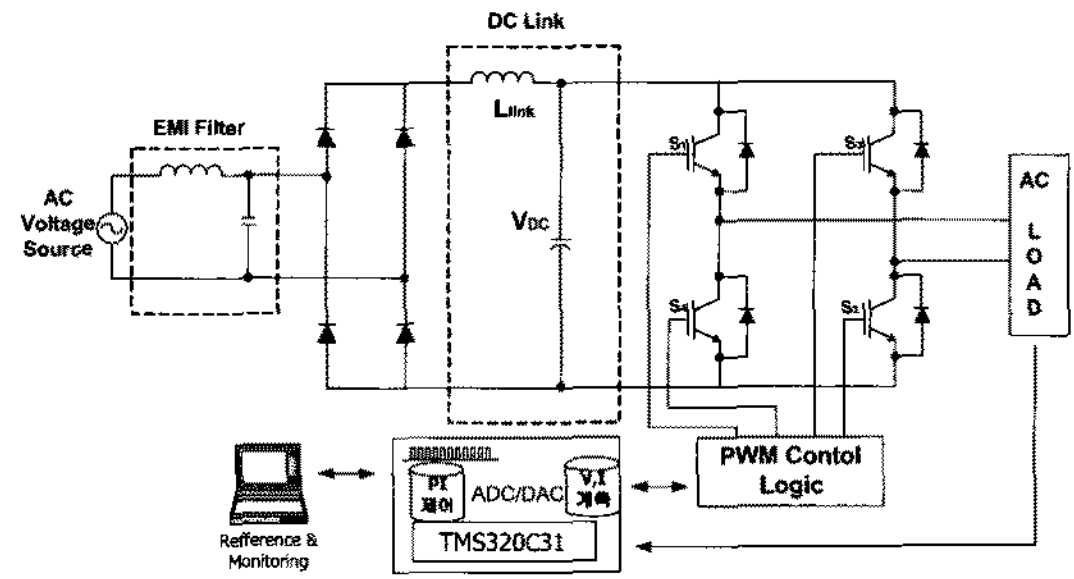
등의 관리를 위하여 가변부하에 적용할 수 있는 제어장치가 절대적으로 필요하다.

이러한 제어장치는 시스템의 구성이 간단하여, 저 가격의 구현이 가능하고 시스템의 전체 효율이 우수하다는 장점이 있으나 입력의 역을 저하, 느린 부하 응답 특성으로 사고 발생시 파급 효과 크고, 전류의 불연속으로 인하여 많은 고조파 성분이 발생하고, 부하의 불평형에 따른 상호 간섭작용이 발생한다는 결정적인 문제점이 존재한다.

따라서, 이러한 문제점의 해결을 위해서는 여러 가지의 방법을 모색할 수 있으나 PWM(pulse width modulation)방식의 인버터를 채용하여 위의 문제점을 해결할 수 있다.

2. 인버터에 의한 교류전원 제어 시스템

<그림 1>과 같은 전원의 제어 시스템은 회로의 구성이 간단하고 가격이 저렴하다는 장점이 있지만, 입력의 역을 저하, 전류의 불연속으로 인하여 많은 고조파 성분이 발생하는 등 많은 문제점이 존재한다. 따라서 이러한 문제점을 해결하기 위한 방안으로 DC/AC전환 인버터 시스템의 도입이 요구되며, 인버터의 입력부분은 AC/DC 정류부 및 EMI 필터부가 차지하고, 직류부 출력이 인버터의 입력이 되는 경우 인버터의 직류입력을 DC 링크(DC link)라고 하며 주로 캐패시터 및 역률개선용 리액터가 조합되어 있다. 또한 직류전원부에는 AC/DC



<그림 3> 인버터에 의한 교류전원 제어시스템
<Fig. 3> AC Power system by inverter control

부를 거치지 않고 2차전지인 배터리, 연료전지, 태양전지 등과 같은 전지류 전원시스템이 직접 연결될 수도 있다.

<그림 3>은 이와 같은 전력변환의 조명제어용 인버터의 구성 예를 나타내고 있다. 이때의 인버터 부하에는 <그림 2>와 마찬가지로 교류부하용 직렬 부하가 연결되어 있으며, 많은 직렬부하 중에서 어느 하나의 부하가 고장이 나더라도 즉, 이러한 부하 가변의 회로에 대해서도 탄력적으로 대응할 수 있는 고정밀 전류제어의 전원시스템이 필요하게 된다. 따라서 본 논문에서는 이러한 고정밀 전류제어를 위하여, 정확하고 빠른 응답 특성을 가진 피드백 전류 계측 시스템을 도입하여 조명밝기의 일정유지와 수명 등을 위한 인버터시스템의 제어장치를 구축하고자 한다.

III. 궤환(feedback)전류의 고정밀 계측

교류전원 제어시스템에서 교류의 제량(전압이나 전류, 또는 자속 등)을 정밀하게 검출하는 것은 매우 중요하다. 특히 전력변환 시스템에서의 각종 신호의 계측은 매우 어려운 문제이다. 이는 스위칭 소자의 온/오프 작용에 의한 고조파의 발생 때문에 더욱 그러하다.

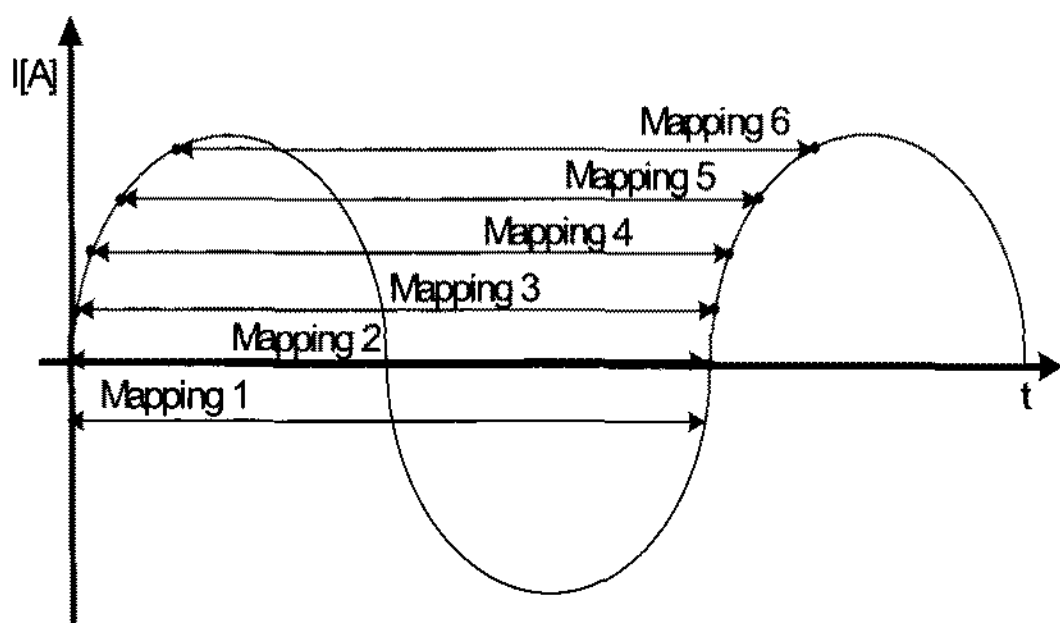
지금까지 전기의 제량을 검출하기 위한 전통적인 방법은 평균적 개념의 계측기법을 주로 사용하였다. 이 방법은 전기적 제량이 시간평균의 개념으로 사용되며 디지털 신호적 처리는 샘플링의 개념이 추가된다. 그러나, 이러한 평균적 계측기법은 정

확한 검출과 잡음에는 강인한 특성을 가지지만 검출에 최소 반주기 이상의 긴 시간이 필요 하며, 주기적 평균값을 구하려면 시간적분을 수행하게 되는데 이를 위해서는 정확한 영점검출(zero crossing)이 필요하게 되며, 최소 한주기 정도의 시간이 필요하다. 특히, 검출 초기 기간 동안에 한주기의 시간이 계산될 수 없기 때문에 이 부분에 대한 상당한 고려도 필요하다는 단점이 존재함에 따라, 새로운 개념의 고속 계측기법이 필요함을 알 수 있다.

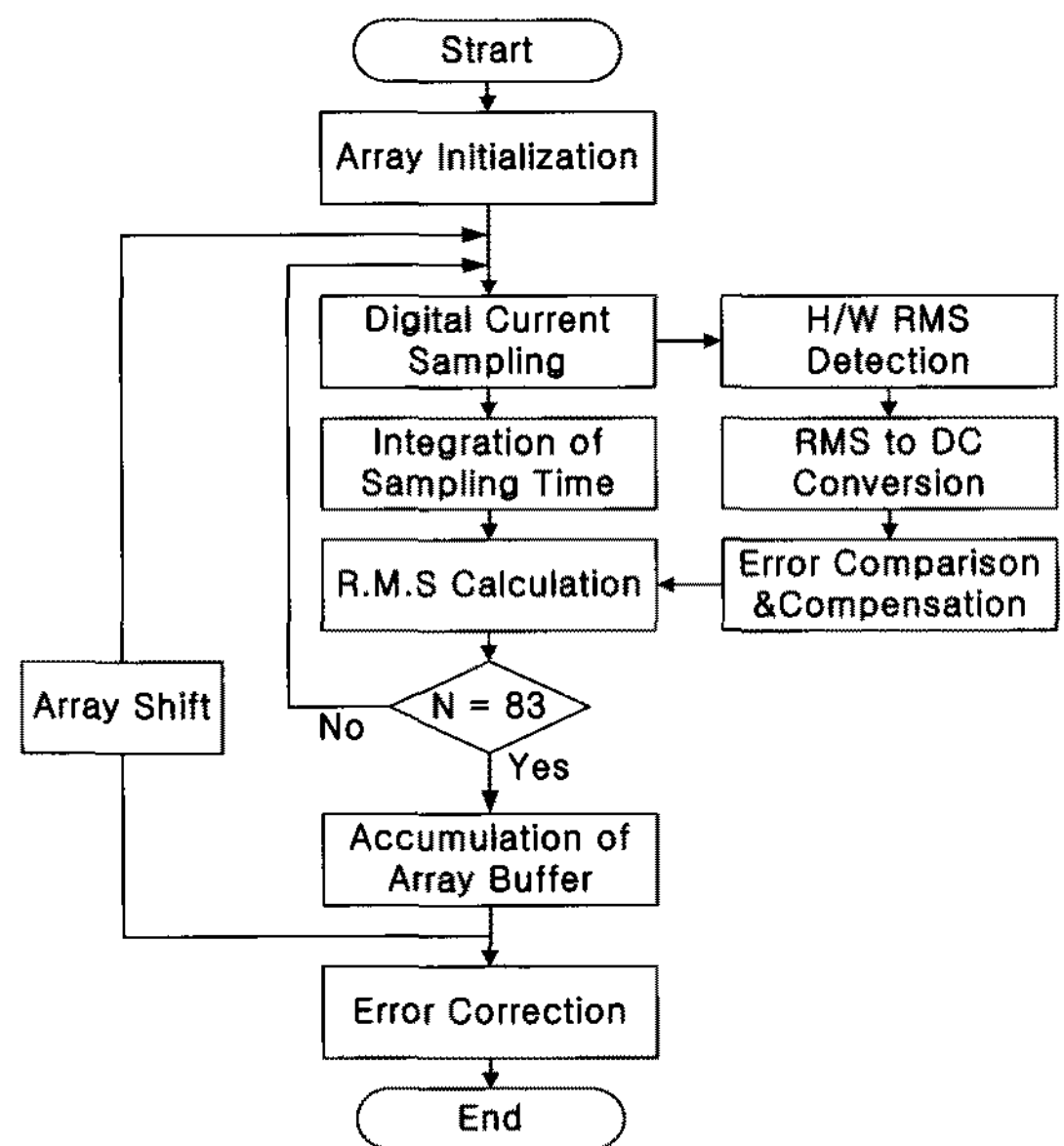
반면에, 본 논문에서는 위의 방식보다 개선된 순시적 이동평균기법을 제안하고자 한다. 이는 계측 신호의 최초 반주기에서 시작되는 순시치 기법의 기본 Mapping모양이 여러 개로 중첩되고 있는 개념을 <그림 4>에서 보여주고 있다. 이의 그림과 같이 A 의 교류량을 직류량으로 표현하기 위해서는 실효치 개념의 접근이 필요하며, 이는 Mapping 1과 같이 식 (1)로 계산하며, 이후 Mapping 2에서는 식 (2)와 같이 동일한 샘플링 수 K 를 가지고 샘플링의 순번을 한 단계 이동시켜 계측 값이 계속 순시적 개념을 갖도록 지속적으로 반복하여 검출하는 방식을 사용한다.

$$A_1 = \sqrt{\frac{S_1^2 + S_2^2 + S_3^2 + \dots + S_K^2}{K}} \quad (1)$$

$$A_2 = \sqrt{\frac{S_2^2 + S_3^2 + S_4^2 + \dots + S_{K+1}^2}{K}} \quad (2)$$



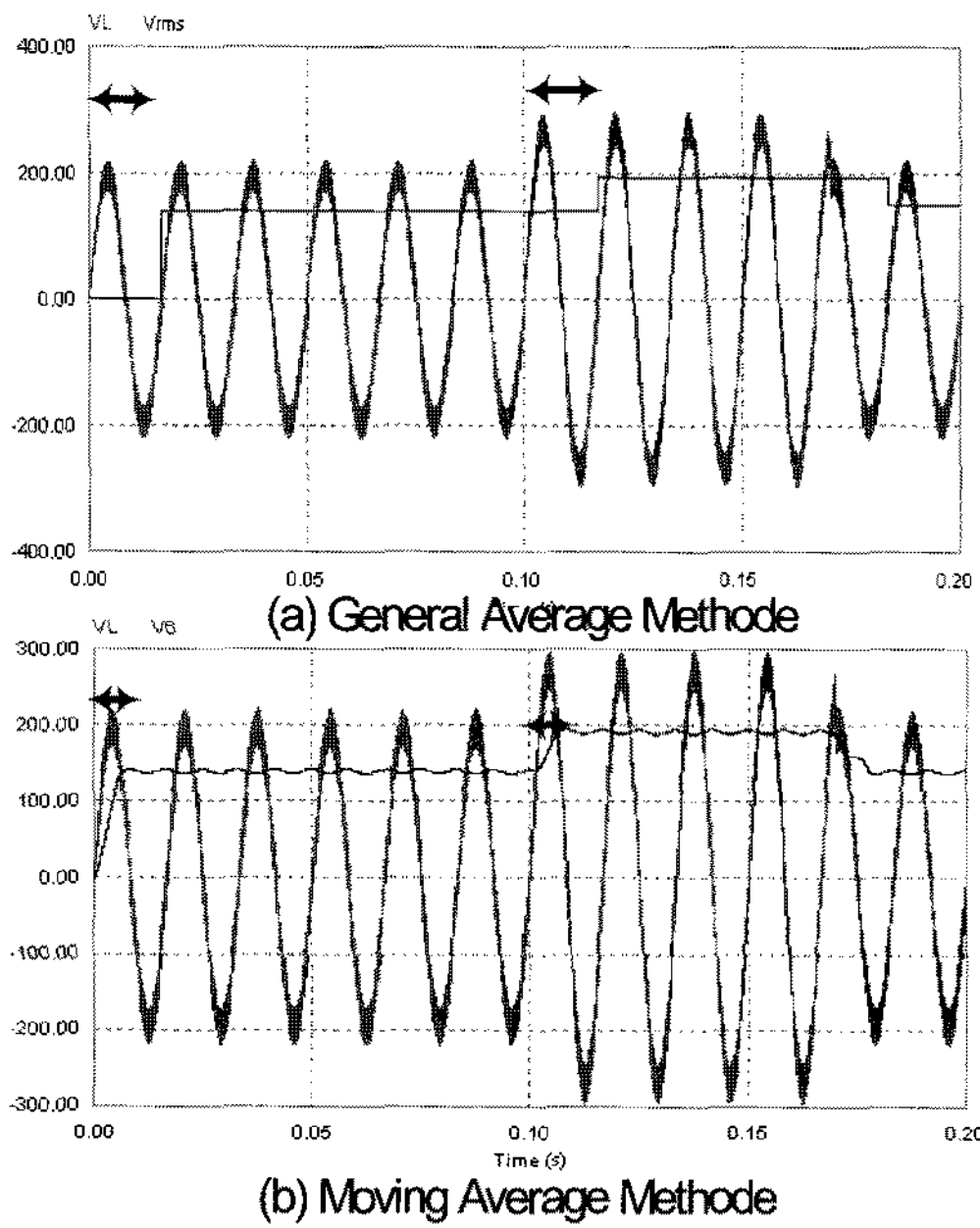
<그림 4> 순시적 이동평균 기법의 개념도
<Fig. 4> Block diagram of instantaneous moving average



<그림 5> 순시적 이동평균 기법의 순서도
<Fig. 5> Flowchart of instantaneous moving average

<그림 5>는 위와 같은 개념의 순시적 이동평균 기법의 처리 순서도를 나타낸 것이다. 교류 전류 1 주기가 16.67[ms]임을 감안하여 교류파형의 반주기 동안 샘플링 수를 83개를 갖도록 하였고, 이후의 매 샘플링 값마다 평균값을 계산하여 정해진 순서에 따라 교류량을 실효치 개념의 직류량으로 처리하도록 하였으며, 하드웨어 RMS(root mean Square)연산 소자인 Analog Device사의 AD637소자를 이용하여 보정을 거치도록 하여 계측의 정밀성을 한층 강화시켰다.

<그림 6>은 위에서 설명한 평균적 계측기법 및 순시적 이동평균기법에 의한 모의 파형발생의 검출 결과를 나타낸 것이다. <그림 6.a>의 평균적 개념의 계측기법에 의한 전류가변 파형의 검출 결과는 최소 한주기 정도의 시간이 필요하며, 특히 검출 초기 기간 동안에 한주기의 시간이 계산될 수 없기 때문에 이 부분에 대한 상당한 고려도 필요하다는 단점이 존재함을 알 수 있다. 반면에 <그림 6.b>에서는 순간적 전류변화 파형 발생시 교류/직류 변경파형이 매우 빠르게 적응됨을 확인할 수 있다.

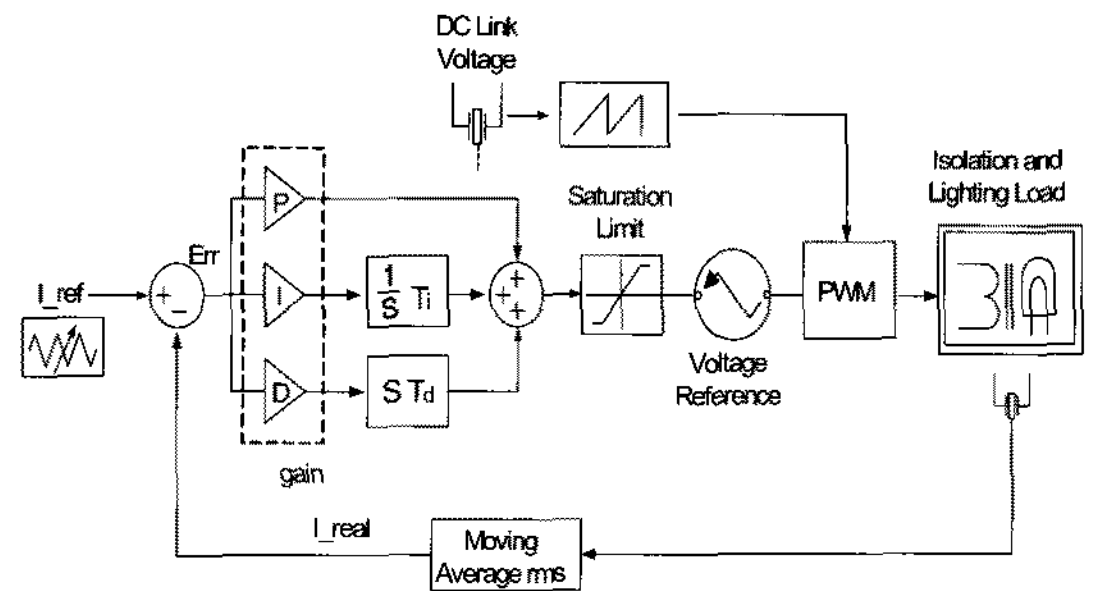


〈그림 6〉 순시적 이동평균 기법에 의한 파형결과
 〈Fig. 6〉 Waveform results of moving average method

IV. 시스템의 구성과 실험

본 논문에서 수행하고자 하는 고정밀 교류전원 제어시스템의 회로는 <그림 3>과 같이 구성하였다. EMI 필터를 거쳐 다이오드 정류기에 의하여 교류전원이 직류로 변환되게끔 하였고 DC Link부에서 PWM인버터를 거쳐 가변부하에 적용되도록 제어기를 구성하였다. 이때의 부하시스템은 <그림 2>와 같은 교통관제용 직렬부하를 상징하여 실험을 수행하였다. 이때의 부하시스템은 회로의 고장이나 부하의 변형에 의하여 부하임피던스가 변화되더라도 이에 적응할 수 있어야만 하고, 특히 이러한 제어시스템에서는 전류 궤환신호의 계측량에 대한 부정확성 등으로 인하여 제어의 비선형성 및 속응성에 문제점이 있고, 인버터의 입력단 전압의 맥동 등에 의하여 고정밀 제어기능을 저하시키는 요인이 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 고정밀 제어시스템에 필수적인 전류의 계측을 실효치 이동평균법을 사용하여 응답 속도와 정밀성을 개선하여 입력의 공급전압 및 부하변동에 무관한 전류제어를 수행할



〈그림 7〉 피드백 전류제어기에 의한 교류전원 시스템
 〈Fig. 7〉 AC Power by the feedback current controller

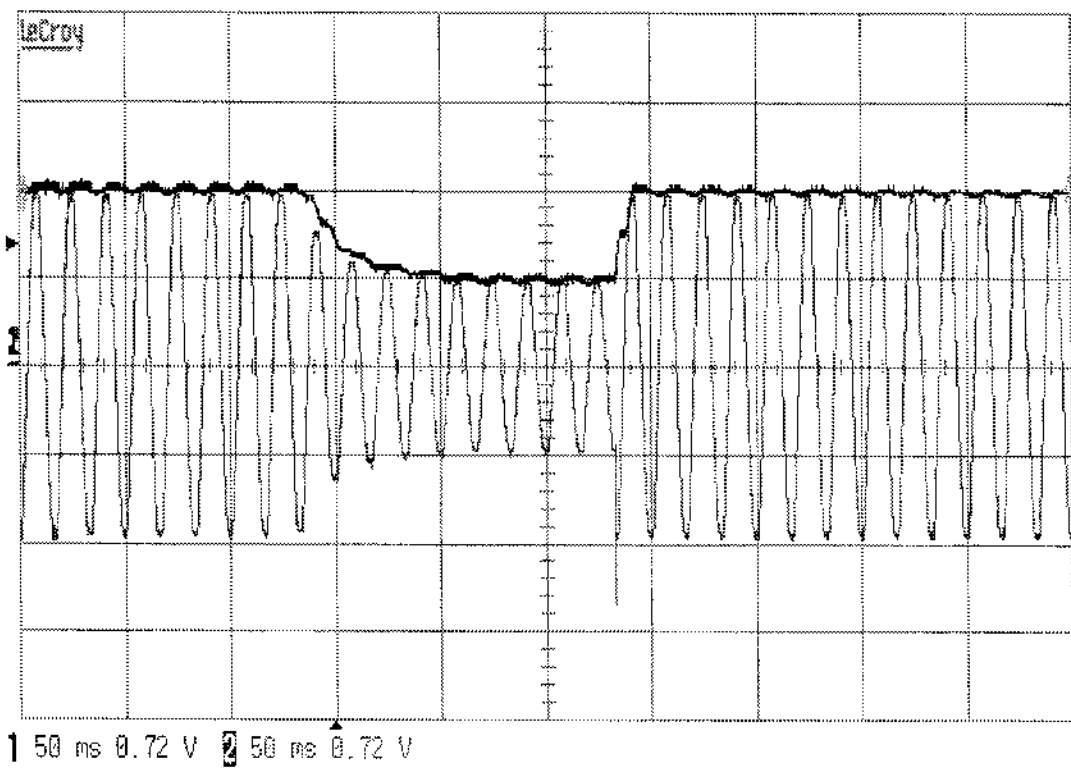
수 있도록 시스템을 구성하였다.

그리고 본 논문에서는 시스템의 디지털화 구현을 위해서, 고성능 CPU소자인 Texas Instrument사의 TMS320C31의 DSP소자를 사용하였다. 주 특징은 33[MHz]의 시스템 클럭으로 60[nsec]의 단일 사이클 명령어 처리시간을 가지면서 32비트의 부동소수점 연산이 가능하기 때문에 많은 양의 프로그램을 제어 주기 내에 충분히 실행할 수 있고 고단위 프로그램 언어인 C언어를 지원하기 때문에 프로그램 구성이 용이하다.

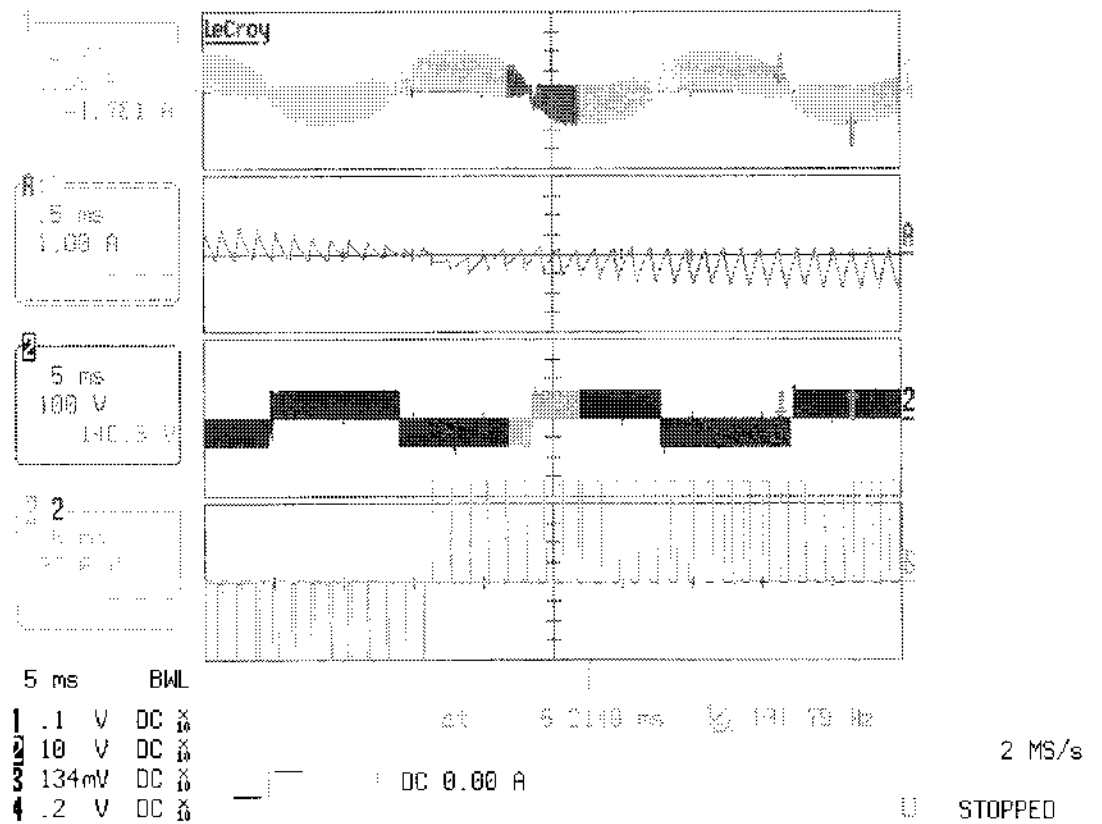
또한, 고정밀 교류전원 시스템인 인버터의 제어 기능을 수행할 수 있는 전류제어기의 설계는 여러 가지가 있으나, 본 연구에서는 전통적으로 제어 성능을 확보한 PID 제어기를 사용하였으며, 이에 대한 전체의 제어블록다이어그램을 <그림 7>과 같이 구성하여 고정밀 전류제어에 사용되는 전류의 궤환 신호 계측량에 대한 정확성을 유지하였다.

이러한 제어기의 구성은 실효치 이동평균법의 전류계측에 의하여 측정 속도와 정밀성을 개선하였고, 이의 계측량에 의하여 PID제어기법을 수행하도록 하였다. 전류의 지령(I_{ref}) 및 전류의 피드백(I_{real})에 의한 오차값 관계에 의하여 전압이 발생되도록 하였으며, 이때 전압의 PWM은 DC Link전압과 연동되도록 가중치를 두어 관제용 가변부하에 적용하도록 하였다.

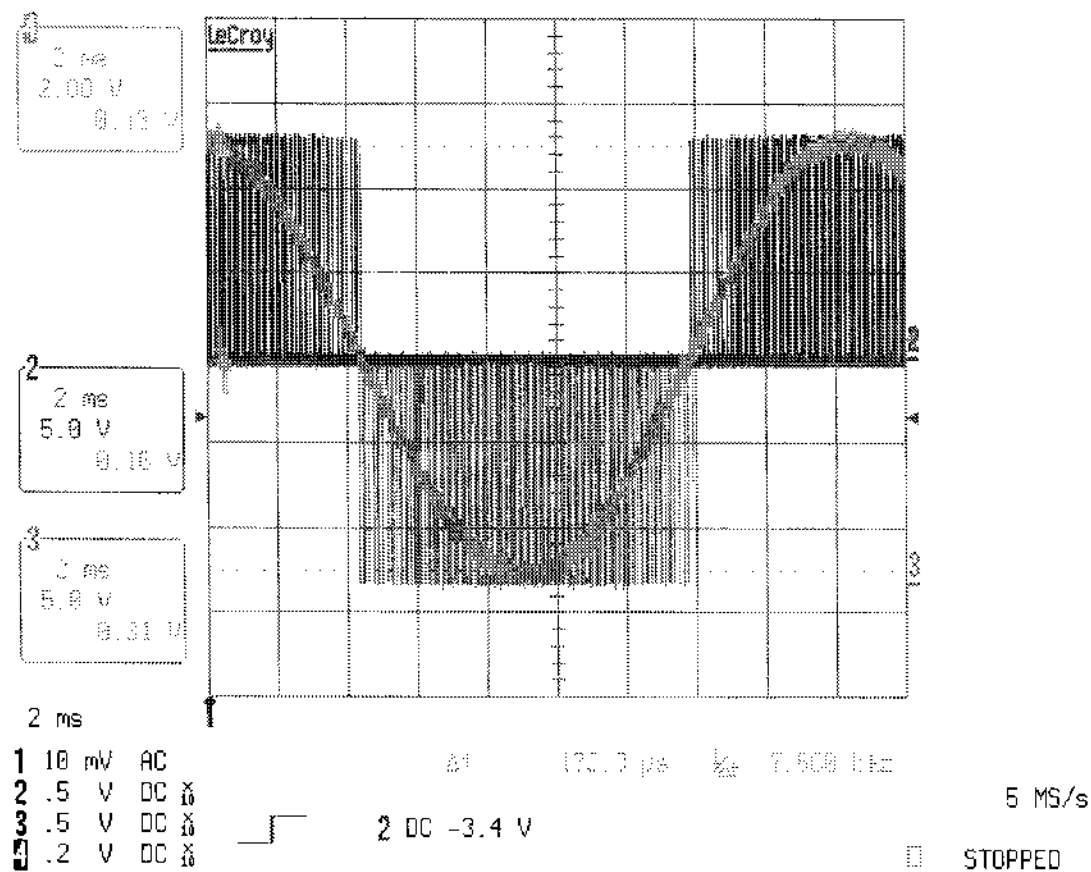
본 논문에서는 위와 같은 절차의 실험시스템에 의하여 실험을 수행하였다. <그림 8>은 인버터의



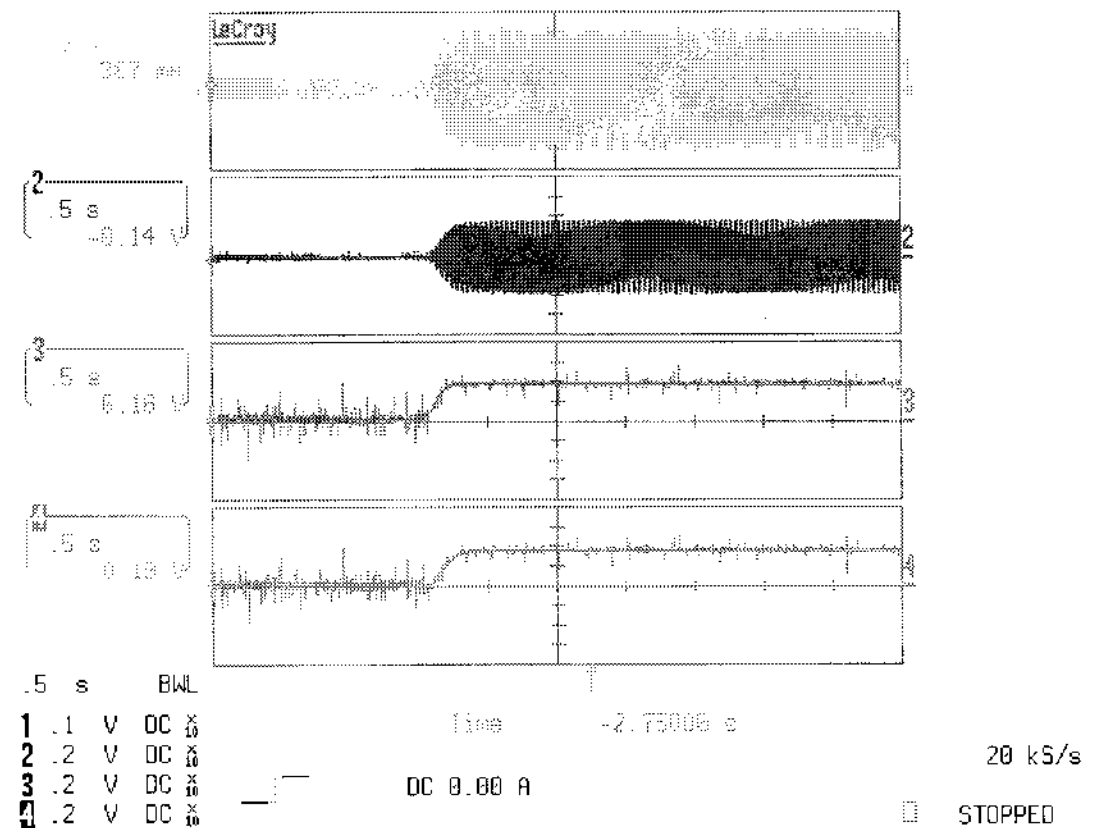
<그림 8> 이동평균 전류 실효치의 과도상태 계측파형
<Fig. 8> Moving average r.m.s. waveform with variable current



<그림 10> PWM 출력전압과 필터 커패시터전류
<Fig. 10> Output waveform of PWM voltage and filtering capacitor current



<그림 9> PWM 출력전압과 정현파 출력전류
<Fig. 9> Output waveform of PWM voltage and sinusoidal current

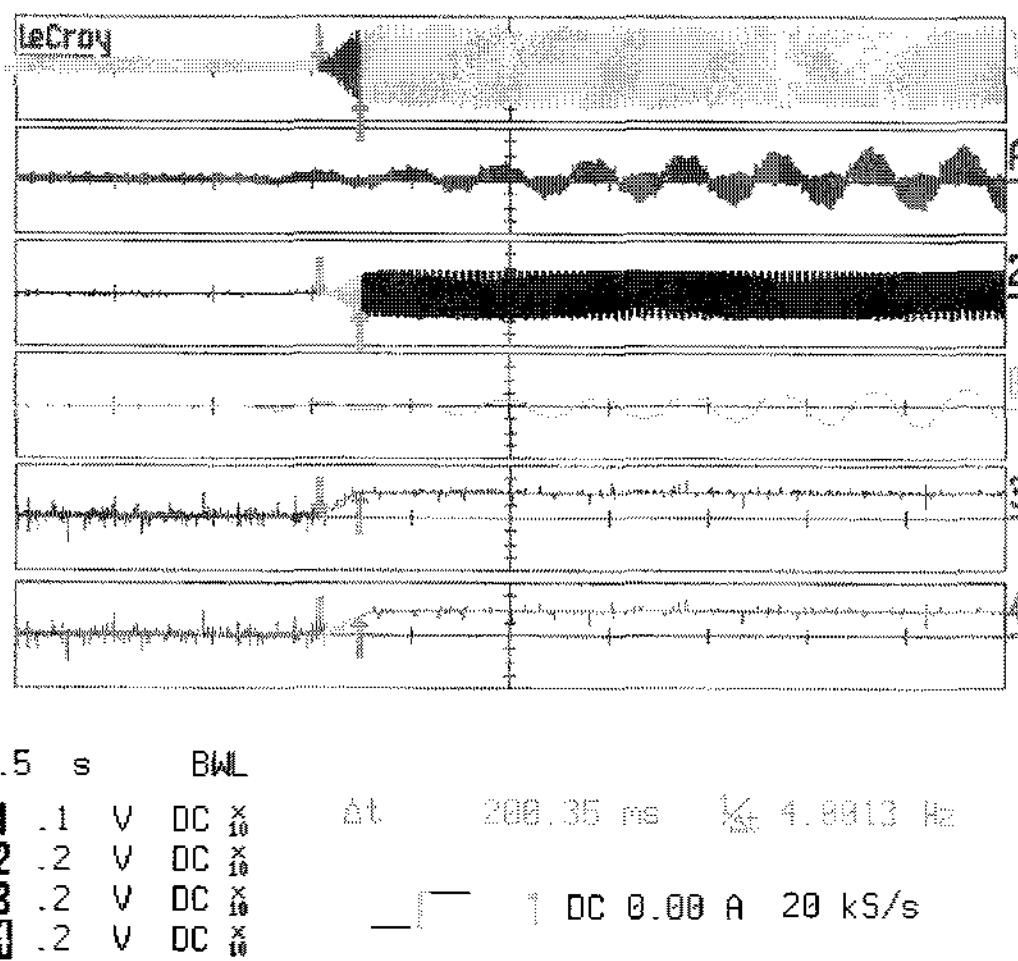


<그림 11> 가변 전류지령에 따른 전류의 추종제어
<Fig. 11> Response waveform of variable current reference

부하를 변동시킨 전류의 가변에 따른 과도상태의 이동평균 전류 실효치의 계측파형을 나타낸 것으로 <그림 5>의 계측 알고리즘을 충실히 수행하고 있음을 알 수 있다.

<그림 9>에서는 인버터 PWM 스위칭에 대한 단상 출력전압과 필터링된 출력전류를 나타낸 것으로 정현적인 출력파형이 나타나고 있음을 볼 수 있으며, <그림 10>에서는 PWM 출력전압과 부하단 필터 커패시터의 PWM 전류특성을 각각 나타낸 것이다.

<그림 11>은 고정밀 교류제어 전원을 위한 인버터의 가변 전류지령에 따른 전류의 추종제어특성을 나타낸 것이다. 1채널에서는 필터 커패시터의 PWM 전류, 2채널에서는 전류센서에 의한 정현파 부하전류 계측파형, 3채널은 가변전류 지령의 순시치 전류추종을, 4채널은 가변전류 지령치를 각각 나타낸 것으로 제안하는 제어시스템에 잘 추종됨을 알 수 있다. <그림 12>는 <그림 11>과 마찬가지로 파형에서 1채널 및 2채널에서 필터 커패시터의 PWM전류



〈그림 12〉 전류지령에 따른 전류의 추종(시간확대)
 〈Fig. 12〉 Response waveform of variable current reference(time expansion)

및 전류센서에 의한 정현파 부하전류 계측파형을 추가로 확대하여 나타낸 파형이다.

V. 결 론

고정밀 교류전원 제어시스템을 구성하기 위하여 널리 사용되고 있는 인버터는 제어의 용이성, 다기능화 및 고 정밀성을 향해 계속 진보하고 있으나 아직도 부하의 특성에 따라 미흡한 점이 잔존하고 있다. 이는 각 부하의 특수성에 따라 요구되는 제어 조건이 각 각 다르기 때문이다.

따라서 본 논문에서는 교통관제 시스템이나 항공관제용 유도등과 같은 부하조건에서 부하의 급격한 가변에 따른 고 정밀성의 전류제어를 목적으로 하는 시스템에 맞도록 인버터 제어시스템을 구성하였다. 이들의 부하 시스템은 직렬부하로 연결된 조명등과 같은 부하로, 부하전류의 고장시 다른부하와 연동이 되지 않도록 전류제어의 원활성 및 고정밀 제어가 필요하게 되며 이를 위하여 부하의 피드백제어를 원활히 수행할 수 있는 개선된 계측기법을 제안하였다.

기존의 주문형 전원장치는 궤환신호의 계측 제

량에 대한 부정확성 및 부하의 왜란 등으로 인하여 제어의 비선형성 및 속응성의 문제점이 발생하였으나, 본 논문에서는 전류의 계측을 실효치 이동평균법을 사용하여 이들의 문제점을 해결하였으며 입력의 불규칙전압 및 순시성의 저하에 의한 성능 악화 문제를 해결할 수 있었다. 이에 따라 본 시스템은 PID제어기의 수행에 충실히 추종하였으며 이로써 LED등으로 구성되어 가고 있는 교통관제 시스템 뿐만 아니라 항공관제조명등과 같은 각종 조명장치에도 널리 적용이 가능하리라 사료된다.

참고문헌

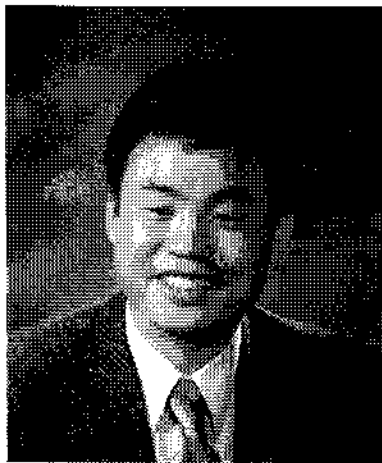
- [1] H. J. Jeon, J. G. Son, K. J. Kim, and J. S. Kim, "Adjustable speed control of induction motor using on-line efficiency maximization method," *Proc. of ICEE*, vol. 2, pp. 854-858, Aug. 1996.
- [2] G. O. Garcia, J. C. M. Luis, R. M. Stephan, and E. H. Watanabe, "An efficiency controller for an adjustable speed induction motor drive," *IEEE Trans. Industry Electronics*, vol. 41, no. 5, pp. 533-539, Oct. 1994.
- [3] J. A. Bright and W. J. Lee, "Integrated monitoring, protection, and control systems for industrial and commercial power system," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 36, no. 1, pp. 11-15, Jan. 2000.
- [4] D. M. Vilathgamuwa, A. A. Perera, and D. R. Choi, "Voltage sag compensation with energy optimized dynamic voltage restorer," *IEEE Trans. Power Delivery*, vol. 18, no. 3, pp. 928-936, July 2003.
- [5] K. Tungpimolrut and T. Fukao, "Robust vector control of induction motor without using stator and rotor circuit time constants," *IEEE Trans. Industry Applications*, vol. 30, no. 5, pp. 1241-1246, May 1994.
- [6] T. Wildi, *Electrical Machines, Drives and Power System*, Prentice-Hall, Ch. 21, 1997.

저자소개



한 운 동 (Han, Wun-Dong)

1978년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학사
1984년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학석사(전력전자전공)
2002년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학박사(전력전자전공)
1980년 5월~현재 : 충주대학교 전기공학과 교수
관심분야 : SMPS, 지능경관조명, 전력 Filter, IT 전력기반사업



손 진 근 (Shon, Jin-geun)

1990년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학사
1992년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학석사(전력전자전공)
1997년 2월 : 숭실대학교 전기공학과 공학박사(전력전자전공)
2002년 2월 ~2003년 2월: 일본 가고시마대학 해외 Post-Doc.
1997년 3월~현재 : 경원전문대학/경원대학교 전기공학과 교수
관심분야 : 전기품질(Power Quality), 전동기제어, 능동전력필터