

AC Motor제어용 PWM ASIC 설계 및 개발

김 중 대, 최 중 룰
현대자동차(주) 선형연구소

PWM ASIC Development for AC Servo and Spindle motor control

J.D Kim, S.Y Choe
Advanced R&D Center, Hyundai Motor Company

ABSTRACT

This paper presents a development of the Pulse Width Modulation ASIC¹⁾ for control of the AC servo or spindle motor in machine tools. The ASIC is designed two PWM functions for simultaneous control of a converter and an inverter. Also, the device includes additionally two UART²⁾ functions for interfacing the RS232C with PC or other devices. The device is connected to the microprocessor of Intel or Motorola by bus interface. The required output voltage and frequency for the motor control is programmed to the PWM block and the corresponding switching signals are calculated and generated with regard to the programmed value.

1. 서론

고집적 반도체 기술의 발전으로 인하여 AC 모터 제어 기술의 고성능화가 가능해졌으며 최근에는 DSP(Digital Signal Processor)의 산업계 응용이 점차적으로 일반화되고 있는 추세에 있다. 이러한 추세에 편승하여 보다 고성능, 고정도의 컨트롤러를 요구하는 공작기계용 AC 서보/스핀들 모터 컨트롤러에도 DSP를 채용한 제어기들이 출시되고 있으며 상위 수치제어용 컨트롤러와의 통신 및 각종 공작기계용 응용에 사용될 수 있는 다양한 기능들을 실시간에 제어하고 있다. 보다 다양한 인터페이스 기능, 각종 보상 기능 및 모터 제어 알고리즘을 한정된 제어 주기에 실시간으로 수행한다는 것은

많은 어려움이 있으며 컨버터와 인버터부를 동시에 제어해야 하는 알고리즘의 구현은 더욱 더 실시간 제어에 제약을 받게된다. 이러한 어려움을 극복하여 다양한 제어 알고리즘들이 수행될 수 있는 제어 시간의 확보 및 시스템의 신뢰성 향상을 위해 당사는 HVDS2001 PWM ASIC을 설계, 개발하였다. HVDS2001은 컨버터와 인버터부의 PWM 기능을 동시에 수행할 수 있도록 설계 개발되었으며 내부에 UART가 2개 내장되어 상위 컨트롤러 및 주변 장치들과 직렬 통신을 할 수 있다. ASIC의 개발로 인하여 컨트롤러 주변소자의 집적화 및 제어보드의 소형화가 가능하고, 제어 알고리즘의 분산에 따른 제어 성능의 향상과 다양한 공작기계용 기능을 개발할 수 있게 되었으며, 핵심 부품들의 수급상의 어려움을 극복하고 가격 경쟁력 및 신뢰성 있는 제품을 개발할 수 있는 기틀을 마련하였다. 본 논문에서는 당사에서 개발한 HVDS2001 ASIC의 주요 기능에 대해 소개한다.

2. ASIC의 기능

그림 1은 당사 드라이브 시스템의 주요 기능 블록을 나타내고 있다.

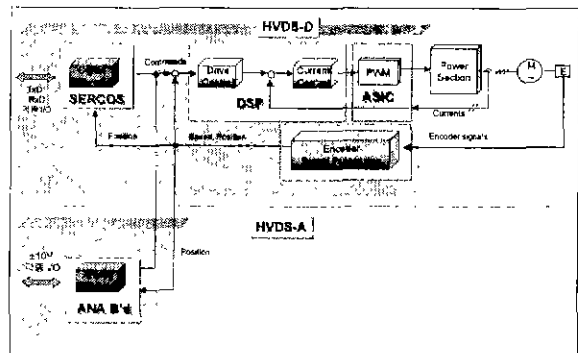


그림 1. HVDS-A/D의 구조
당사 드라이브 시스템은 HVDS-A와 HVDS-D

1) Application Specific Integrated Circuit
2) Universal Asynchronous Receiver and Transmitter

의 두 가지 모델이 있으며 상위 컨트롤러와의 인터페이스 방식에 따라 구분된다. 상위 컨트롤러로부터 지령되는 위치, 속도 또는 토크 지령 입력이 아날로그 $\pm 10V$ 신호 체계인 HVDS-A시스템과 광케이블을 이용한 2 또는 4Mbps의 고속 직렬 디지털 SERCOS(SERIAL Real-time COMMUNICATION System)통신 규격을 채용한 HVDS-D모델로 분류된다. 그림 2는 HVDS2001이 적용된 3상 AC 모터 구동시스템을 나타내고 있다. 3상 AC 모터를 제어하기 위해서는 3상 AC전원을 일정 직류 전압으로 변환하는 컨버터와 직류 전압을 가변 전압 및 가변 주파수 형태로 AC 모터에 인가하는 인버터등의 전력변환장치가 필요하다.

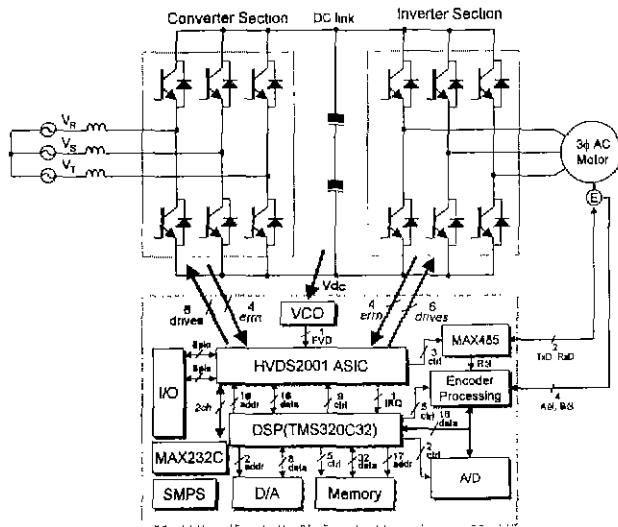


그림 2. HVDS2001이 적용된 전력변환장치

HVDS2001의 주요 기능은 크게 3가지로 분류할 수 있다. 클럭 및 Reset신호 발생, 8/16-비트 버스와의 인터페이스, 인터럽트 발생, 병렬 I/O 처리 기능을 수행하는 마이크로프로세서 인터페이스부와 PWM 스위칭 시간 계산, 펄스 발생 및 데드타임 발생, 직류링크 전압 검출, 출력 주파수 발생 및 각종 시스템의 에러 검출을 담당하는 PWM 변조부 및 직렬 통신 기능을 위한 UART 기능부로 나눌 수 있다. 그림 3은 PWM 기능에 관한 블록을 나타내고 있으며 2개의 PWM 블록은 독립적으로 동작할 수 있도록 설계되어 있다. 컨버터와 인버터를 하나의 프로세서로 제어하기 위해 독립적으로 설계된 마이크로프로세서 인터페이스 제어 신호들은 공통으로 연결하여 사용한다.

3. 마이크로프로세서 인터페이스

HVDS2001은 8/16-비트 폭의 인텔 혹은 모토롤러 버스 시스템과 인터페이스 할 수 있으며 당사

HVDS-A/D 드라이브 시스템에 사용되는 DSP (TMS320C32-50)^{[1][2]}는 이러한 버스를 통해 ASIC의 내부 레지스터 값들을 읽고 쓸 수 있다. HVDS2001은 제어 전원이 인가된 후 반드시 리셋되어야 하며 RSTN핀은 적어도 50ns동안 0으로 유지되어야만 한다. 클럭 발생기는 핀 X1, X2를 통해 Crystall oscillator로부터 신호를 입력받아 동일 주파수의 신호(CLK0)와 2분주된 클럭 신호(CLK02)를 생성하며 이 신호 중 하나를 CLK단자에 연결하여 HVDS2001의 주 클럭으로 사용한다. PWM 블록은 각각 8-비트의 병렬 입/출력포트를 갖고 있으며 PIOENBx(x는 비트 번호) 레지스터의 상당한 비트를 0 또는 1로 설정함으로써 입력 또는 출력포트로 정의할 수 있다.

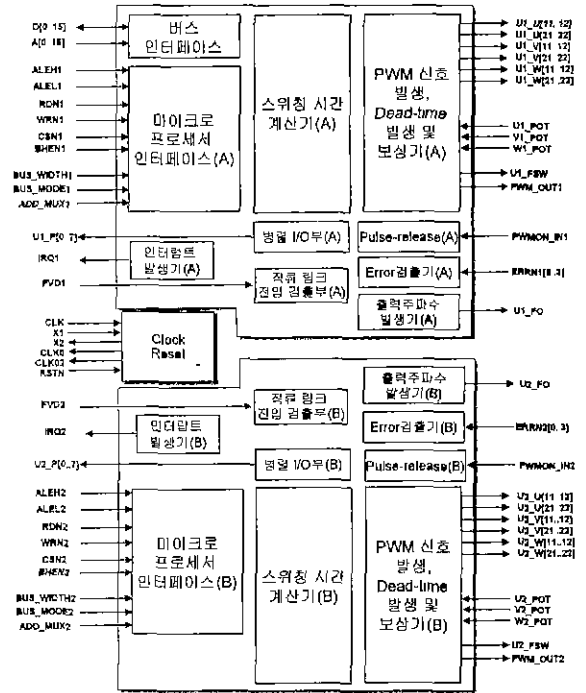


그림 3. PWM 기능 블록도

4. 펄스폭 변조기

3상 AC 모터 제어를 위한 최적의 출력 전압을 생성하기 위해 공간 전압 벡터 PWM 기법을 적용하였으며 최소 400Hz에서 최대 30kHz까지 비동기 또는 동기 PWM 변조^{[3][4]}가 가능하다. PWM 스위칭 시간 계산을 위해 DSP는 원하는 모터 출력 전압에 대한 고정자 dq 기준전압 벡터를 ASIC에 다운로드하며 ASIC은 이 기준전압 벡터 값을 고정자 abc 전압 벡터로 변환하고 PWM 스위칭 시간을 산출하여 최종 PWM 펄스 신호를 출력한다.

HVDS2001은 2상 또는 3상 변조 기법이 가능하며 직류 링크 전압을 검출하기 위해 두 가지 방법을 적용할 수 있다. 첫 번째 방법은 HVDS2001의

부에 VCO를 설계하는 방법으로서 ASIC의 FVD단자는 VCO로부터 직류 링크 전압에 비례하는 주파수를 입력받아 내부적으로 직류 링크 전압 값을 계산한다. 두 번째 방법은 상전류 등의 아날로그 신호를 디지털로 변환하기 위해 사용되는 A/D 컨버터를 이용하는 방법으로 DSP가 변환된 디지털 값을 직접 내부 레지스터 VDCINV에 다운로드 하는 방법이다. 펄스폭 변조기는 데드타임 발생기 및 보상이 있으며 실제의 상전압 또는 상전류의 부호를 센싱하여 데드타임을 보상할 수 있다. 시스템의 과전압, 과전류 및 인코더 동작과 같은 드라이브 운전에 치명적인 영향을 미칠 수 있는 오류 검출을 위해 ERRN[0:3]핀이 이용되며 오류 발생시 입력 단자의 상태는 내부에 래치되고 외부로 인터럽트 신호를 발생하게 된다. 또한 인터럽트 신호는 내부 레지스터를 설정하여 스위칭 주파수의 하강 모서리 혹은 모든 모서리에서 인터럽트를 발생할 수 있도록 할 수 있다. 스위칭 주파수는 16비트 폭의 카운터 TSAMP에 샘플링 주파수 값을 지정함으로써 결정된다. PWM 블록은 스위칭 주파수에 동기된 구형파 펄스를 FSW단자로 출력하며 이 신호를 이용해 DSP는 제일 내부 제어기인 전류제어기를 PWM 스위칭 주파수에 동기시키고, 상전류등의 각종 아날로그 신호들을 PWM의 영전압 벡터 지점에서 동시에 샘플링할 수 있도록 A/D 컨버터의 S/H 시작 신호를 설계할 수 있다.

4.1 공간 전압 변조^{[3][4][5][6]}

모터 전압 벡터는 3상 전압시스템의 경우 다음과 같이 기술할 수 있다.

$$V_s(t) = \frac{3}{2} \sqrt{2} V_{srms} e^{j2\pi f_s t} \quad (1)$$

여기서, V_{srms} 는 모터 상전압의 실효치이고 f_s 은 고정자 주파수이다.

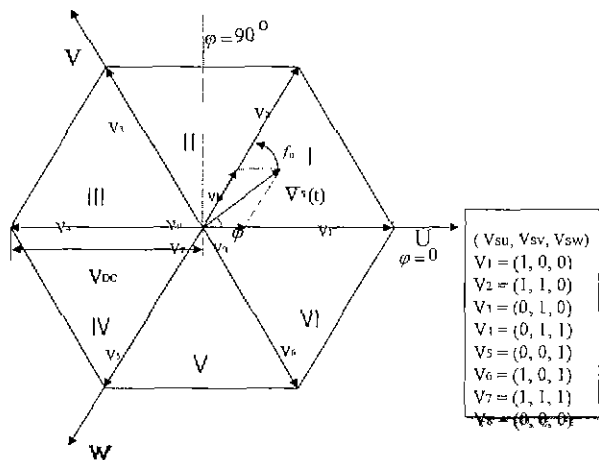


그림 4. 인버터 전압 벡터도

상기 그림 4의 8개 동작 상태 중 $V_1(0,0,0)$ 과 $V_2(1,1,1)$ 스위칭은 영전압 벡터를 나타내고 그 이외의 스위칭 상태는 유효전압 벡터를 나타낸다. 출력하고자 하는 출력 전압 벡터는 그림 5와 같이 인접한 삼각형의 두 변에 해당되는 전압 벡터로부터 지령 전압을 합성할 수 있으며, 두 전압 벡터의 인가 시간의 합이 샘플링 시간 보다 낮으면 나머지 시간 만큼 영벡터를 인가하게 된다.

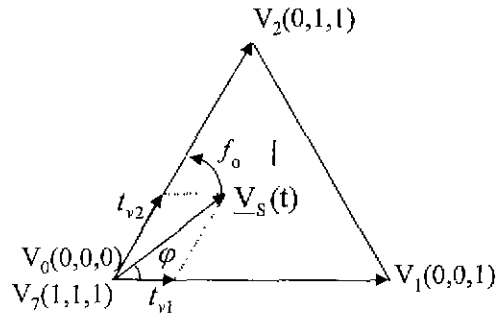


그림 5. 스위칭 시간 계산

$0^\circ \leq \phi \leq 60^\circ$ 영역에서 $V_1(0,0,1)$ 과 $V_2(0,1,1)$ 두 벡터에 대한 턴온 시간 계산은 다음 식과 같다.

$$t_{v1} = t(0,0,1) = \frac{\sqrt{3}\sqrt{2} V_{srms}}{f_{switching} V_{dc}} \sin(60^\circ - \phi) \quad (2)$$

$$t_{v2} = t(0,1,1) = \frac{\sqrt{3}\sqrt{2} V_{srms}}{f_{switching} V_{dc}} \sin(\phi)$$

4.2 데드타임과 보상^{[3][4]}

직류 링크의 short through를 방지하기 위해 인버터의 동일 레그에 있는 하나의 스위치가 턴오프 한 후 일정시간 후에 반대 스위치가 턴온되어야 한다. 이때 인가되는 시간을 데드타임이라 하며 시스템 초기화 과정에서 파워부 등을 고려하여 적절하게 TDEAD에 설정한다. 최대 설정 가능한 데드타임은 주 클럭이 25MHz시에 약 $81\mu s$ 까지 입력할 수 있다. 모터 제어에 있어서 데드타임으로 인하여 원하는 전압과 실제 전압 사이에 차이가 발생하게 되고 이러한 상전압의 차이는 모터의 토크 리플을 발생시키게 된다. 특히 이러한 현상은 저속에서 심하게 나타나며 이로 인해 실제 출력 전압의 실효값이 기준 전압 값에 비해 줄어들게 된다. 데드타임 영향을 보상하기 위해 전류의 방향을 검출하여 보상하는 방법과 상전압을 검출하여 보상하는 방법이 설계되어 있으며 COMP_TDEAD의 설정에 의해 2가지 방법 중 하나의 보상을 선택할 수 있다.

4.3 스위칭 타이밍

스위칭 시간 계산은 각 스위칭 주기마다 1 또는 2회 진행된다. 2회 수행시 스위칭의 반주기마다 다음 반주기의 스위칭 시간이 계산되고 다음 반주기의 시작 전에 계산된 스위칭 값들이 펄스 발생기로

전달되어 PWM 신호 패턴을 발생하게 된다. 스위칭 시간은 가능한 한 빨리 계산되어야 하며 스위칭 계산 시점과 실제로 실행되는 시점은 최대한 시간 지연이 없어야 한다. 또한 A/D컨버터가 상전류등의 아날로그 제어신호들을 디지털로 변환하는데 소요되는 변환시간을 고려하여 스위칭 계산 시점이 적절히 조절되어야 한다.

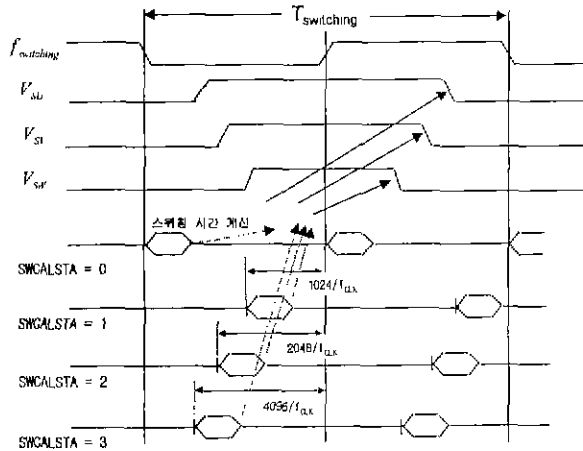


그림 6. 스위칭 시간 계산 및 출력 타이밍
SWCALSTA는 스위칭 계산 시점과 PWM 펄스 신호 발생 시점을 제어하며 그림 6은 관련 타이밍을 나타내고 있다. 다음 그림 7은 HVDS2001의 외관을 나타낸다.

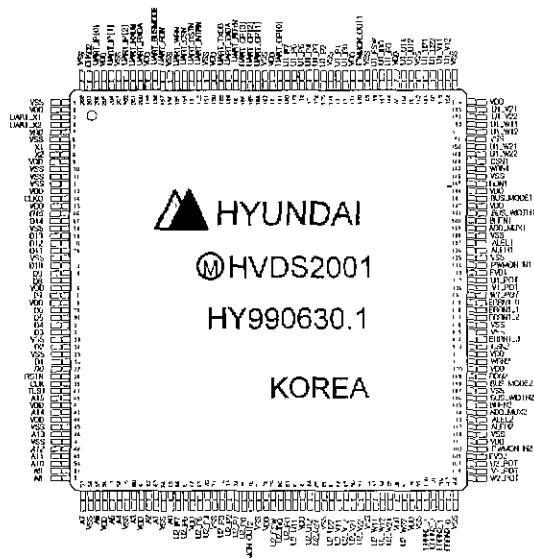


그림 7. HVDS2001 ASIC 외관

5. UART 기능

2채널의 UART 기능부는 동작 모드, Receiver와 Transmitter의 데이터 형식 및 보레이트(20가지)를 각각 독립적으로 설정할 수 있으며 다음과 같은 6개의 주요 블록으로 구성되어 있다. 2채널 UART 중 하나는 PC로부터 드라이브 시스템의 각종 상태

감시를 위해 사용할 수 있고 다른 채널은 인코더와 RS485통신을 통해 모터의 위치 및 속도를 검출하는 SinCoder¹⁵⁾ 인터페이스에 사용할 수 있다.

2.3.1 Bus buffer

UART의 버스 동작 모드에 따라 읽기 동작을 수행한다.

2.3.2 Operation Control

쓰기 동작을 제어하며 마이크로프로세서로부터 입력받은 명령을 해석하고 UART의 다른 기능 블록들을 제어한다.

2.3.2 인터럽트 제어

인터럽트 발생 신호(INTRN)는 active-low 출력으로 IMR(Interrupt Mask Register)를 적절히 설정함으로써 특정 조건하에서 인터럽트가 발생하도록 할 수 있다.

2.3.4 타이밍

타이밍 컨트롤러는 16비트 카운터/타이머, 4개의 클럭 선택기, 4개의 보레이트 발생기 및 UART 준비 완료(UART_RDYN) 신호를 출력하는 부분으로 구성되어 있다.

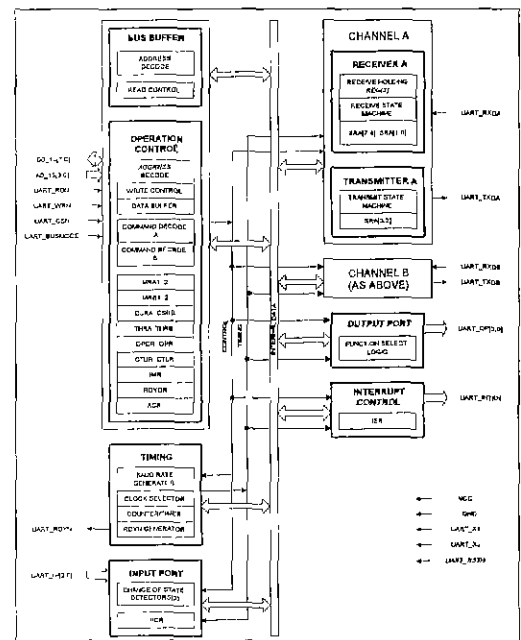


그림 8. UART의 주요 기능 블록

2.3.5 통신 채널

UART는 비동기 전이중방식의 2개 채널이 있으며 각 채널은 독립적으로 동작한다. 외부로부터 입력되는 기준 클럭을 3.6864MHz로 설계할 경우 보레이트는 50bps에서 115.2kbp중에서 선택하여 사용할 수 있다.

2.3.6 일출력 포트

RS232C 통신을 위해 3개의 입력단자와 4개의 출력단자가 있으며 이러한 포트는 일반적인 디지털 입출력 단자로도 사용할 수 있다.

3. 결론

공작기계용 3상 AC 서보/스핀들 모터제어용 컨트롤러의 PWM 관련 기능과 UART 기능을 ASIC 으로 개발하였으며 주요특징은 다음과 같다.

1. 8/16-비트 인텔 또는 모토롤라 버스 시스템과 인터페이스 가능하다.
2. 최대 30kHz까지 동기/비동기 변조를 위한 스위칭 주파수를 설정할 수 있다.
3. 2개의 공간전압벡터 PWM 블록이 설계되었다.
4. 2채널 UART기능을 내장하고 있다.
5. 0.6 μ m Standard Cell 기법으로 설계되었다.
6. DSP에서 수행하는 제어 알고리즘의 부하를 줄일수 있도록 설계되었다.
7. 전력 변환 소자의 보호 및 시스템의 안전성을 장구하였다.
8. 데드타임 발생 및 보상 기능으로 컨버터와 인버터의 보호 및 제어 성능을 향상시켰다.

본 ASIC 개발을 통해 모터 제어를 위한 H/W 및 S/W의 신뢰성을 확보하였으며, 상품화시 가격, 품질의 경쟁력을 확보할 수 있는 기반을 마련하였다. HVDS2001은 현재 AC 서보/스핀들 모터 컨트롤러에 적용하여 시험 운전 중이며 성능 향상과 기능 보안을 위해 계속 연구 진행 중에 있다.

HVDS2001의 응용으로서 모듈화 타입의 드라이브 시스템에서 하나의 프로세서로 2개의 모터를 동시에 제어할 수 있는 2축 서보 모터 제어 시스템이 현재 개발되고 있다.

이 논문은 산업자원부에서 시행한 공업기반기술개발사업의 연구비 지원에 의하여 연구되었습

참 고 문 헌

- [1] TMS320C3x Users Guide
- [2] TMS320C32 Addendum to the TMS320C3x Users Guide.
- [3] Ned Mohan, Tore M. Undeland, William P. Robbins, Heumann, "Power Electronics Converters, Application and Design," 2nd Edition, WILEY 1995.
- [4] B.K. BOSE, "Power Electronics And Variable Frequency Drives," IEEE PRESS 1997.
- [5] Werner Leonhard, "Control of Electrical Drives," 2nd Edition, Springer 1996
- [6] T.G. Habetler, "A Space Vector-Based Rectifier Regulator for AC/DC/ AC Converters," IEEE Trans on PE., Vol. 8, No. 1, Jan. 1993, 30~36.
- [7] L. Malesani, "Three Phase AC/DC PWM Converter with Sinusoidal ac Currents and Minimum Filter Requirements," IEEE Trans. on IA, Vol. 23, No. 1, 71-77
- [8] S. R. Bowes, et al., "Computer-aided Design of PWM inverter systems," IEE Proc., Vol. 129, Pt. B, No. 1, 1982, 1-17.
- [9] Joachim Holtz, "Field-Oriented Asynchronous Pulse-Width Modulation for High-Performance ac Machine Drives Operating at Low Switching Frequency," IEEE Trans. on IND, VOL. 27, NO. 3, pp 574-581, 1991. May/June.
- [10] H. S. Song and K. H. Nam, "왜곡된 입력 전압을 고려한 PWM AC/DC 컨버터 제어기," 전력전자 학술대회 논문집, 1997 7. 17~19. 1~8
- [11] P. N. Enjeti, P. D. Ziogas and J. F. Lindsay, "Programmed PWM Techniques to Eliminate Harmonics a Critical Evaluation," IAS'88, 418~430.
- [12] V. Blasco and V. Kaura, "A New Mathematical Model and Control of a Three-Phase AC-DC Voltage Source Converter," IEEE Trans. on PE., Vol. 12, No. 1, Jan. 1997, 116~122.
- [13] 윤덕용, "공간전압벡터 PWM 기법을 이용한 영구자석형 동기전동기의 속도제어," 박사학위논문, 1995.
- [14] Philips, "SCC2691 Data Sheet: Universal Asynchronous Receiver/Transmitter," 1998.
- [15] Stegmann, "SinCoder SNS50 / SNS60 Data Sheet," 1997