

DSP를 이용한 유도전동기 디지털 제어시스템 Digital Control System for Induction Motor Drive Using DSP

김민회*, 김남훈**
Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim

<Abstract>

This paper presents a implementation of digital motion control system for induction motor vector drives using the 16bit DSP TMS320F240. The DSP controller enable enhanced real time algorithm and cost-effective design of intelligent controllers for motors which can be yield enhanced operation, fewer system components, lower system cost, increased efficiency and high performance. The system presented are speed and current sensing, sine look-up table and generated SVPWM by fully integrated control software. The developed system in a implementation are shown a good speed response and motion control characteristic results, and high performance features in general purposed 2.2[kW] machine. The system can be adapted variform motor drive system.

Key Words : *F240DSP, Digital Control, SVPWM, FOC, Motion Control*

1. 서론

최근 급속도로 발전되고 있는 산업분야에 있어서 전동기의 정밀한 속도제어, 위치제어, 토크제어 등이 요구되는 용도에 고도의 정밀도와 빠른 응답특성을 갖는 제어시스템이 필수적

이며, 이를 위해 구조가 간단하고 견고하며 가격이 저렴한 유도전동기에 벡터제어 이론을 도입한 제어시스템이 많이 적용되고 있다. 유도전동기의 벡터제어는 난해하고 많은 연산이 요구되는 제어 알고리즘으로 인하여 필수적으로 복잡한 아날로그 방식에 의한 전자회로적인 하드

* 정회원, 영남이공대학 전기과 교수, 工博
705-037, 대구광역시 남구 대명7동 1737
Tel: (053)650-9263, Fax: (053)624-4736

* Prof. Dept. of Electrical Engineering, Yeungnam
College of Science & Technology, Ph. D.
E-mail : mhkim825@chollian.net

** 학생회원, 영남대학교 대학원 박사과정
712-749, 경북 경산시 대동 영남대학교 전기공학과
Tel: (053)650-9263

**Dept. of Electrical Engineering, Yeungnam Univ.
Graduate School, Doctorial course
E-mail : cop1288@yahoo.com

웨어와 프로세서를 사용하여야만 구현이 가능하였다. 종전의 복잡하게 이루어진 하드웨어적인 제어를 비용이 저렴하며 여러 가지 형태로 변환이 쉽게 이루어지면서 간단하게 소프트웨어적으로 실행할 수 있는 제어시스템 구현이 요구됨에 따라 근래 고속연산과 처리속도가 빠른 전용 DSP가 개발되어 적용됨으로서 이를 해결 할 수 있었다[1]-[8].

종전에 많이 사용하여온 아날로그 방식은 다른 시스템들과의 인터페이스가 어려우며 주위환경에 따라 시스템의 변수들이 바뀌고 한번 고정된 하드웨어의 교체에 있어 매우 어려운 단점이 있다. 그러나 디지털 시스템은 대부분의 기능이 디지털 적으로 수행되므로 드리프트가 없어지고 소프트웨어적으로 설계를 쉽게 변경할 수 있으며 칩에서 제공해주는 여러 가지 기능을 이용할 수 있기 때문에 아날로그 방식보다 많은 이점을 가진다. 그러므로 하드웨어적인 제어를 비용이 저렴하며 여러 가지 형태로 변환하여 쉽게 설계할 수 있고 간단하게 소프트웨어적으로 실행할 수 있는 디지털 제어에 의한 전동기 정밀제어 시스템 개발이 요구되고 있는 실정이다.

이에 따라 본 연구는 범용 유도전동기를 서어보 제어시스템에 적용하기 위하여, 하드웨어적으로는 최근 전동기 정밀제어용으로 개발된 TI(Texas Instruments)사의 16비트 DSP인 TMS320F240를 적용하여 최소한의 하드웨어만 이용하고, 모든 제어는 소프트웨어적으로 제어될 수 있는 정밀제어용 유도전동기 디지털 제어시스템 뿐만 아니라 동기전동기 및 리럭턴스 전동기의 제어 알고리즘 개발에 소프트만 약간 수정하여 응용할 수 있는 시스템을 구현하였다. 개발된 시스템의 운전특성을 검증하기 위하여 IGBT 전압형 인버터에 의한 2.2[kW] 범용 유도전동기의 속도제어 응답특성을 고찰하였다.

2. F240 DSP 특성

DSP Controller Chip인 TMS320F240은 16비트로서 TI사에서 고성능 정밀제어용 전동기 구동용으로 개발된 것으로 장치를 제어하는데 뛰어난 성능을 가진다. DSP의 제어기는 일반적

으로 Fig. 1과 같은 구성으로 되어 있으며, F240 DSP의 내부 구조는 Fig. 2와 같다[6][7].

이 DSP는 가격적인 면을 고려하여 고정된 부동 소수점 방식이며, 전동기 구동용 제어기에 서 필요로 하는 주변회로 제어용모듈 즉 12개의 PWM 파형을 발생하는 Event manager, 4개의 엔코더 신호처리용 QEP, 2개의 10비트 A/D Converter(Channel 16개), SCI(Serial Communication Interface), SPI(Serial Peripheral Interface), Flash 메모리(16K Words x16), DARAM(Dual-Access, 544 Words x16), 최대 28개의 입출력 I/O Ports, 3개의 내부 Timer, 1개의 Watchdog timer, 6개의 외부 인터럽트 등이 내장되어 있다. 또한 이 DSP는 50nsec의 수행 사이클 시간을 가지므로 대부분의 명령이 하나의 실행 사이클 내에 이루어지며 20 MIPS의 실행속도를 가진다.

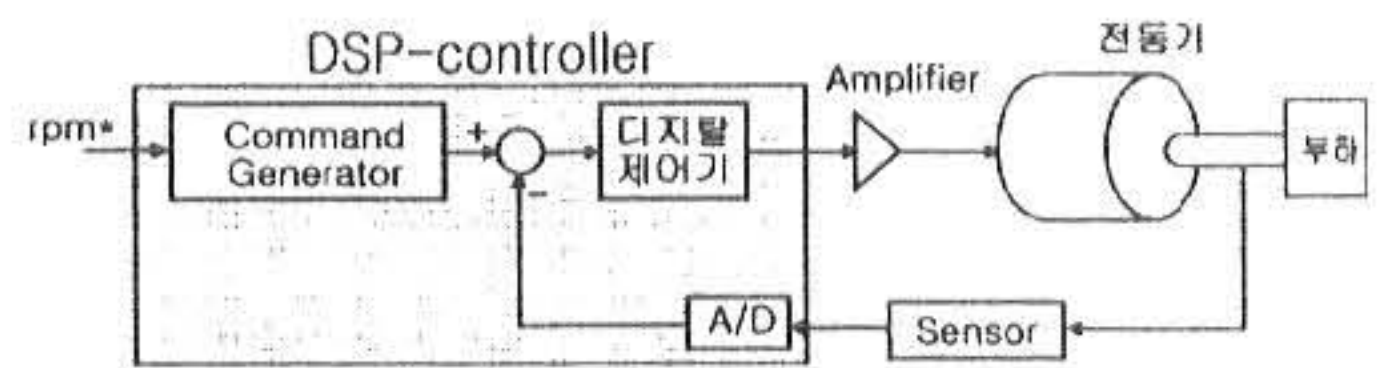


Fig. 1. Configuration of DSP-Controller

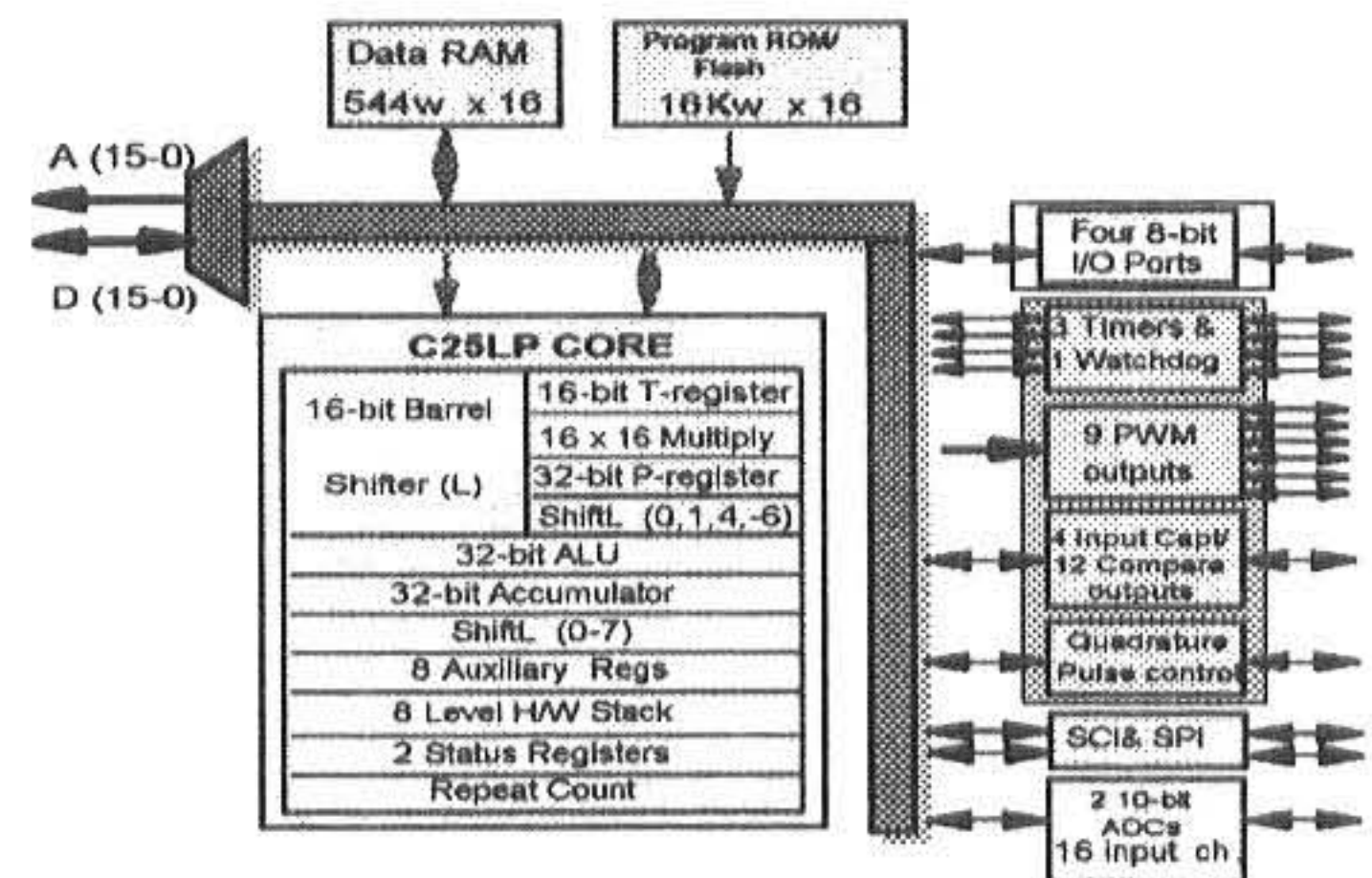


Fig. 2. DSP TMS320F240 Architecture

메모리는 3개의 다른 Program memory, I/O memory, Address space-Data memory를 가지며 주변 모듈들을 제어하는 방법은 각 모듈들에 해당하는 레지스터를 이용하여 제어할 수 있다. Fig. 3은 실제 적용된 메모리 맵을 나타낸 것이다.

3. 시스템 구성

Fig. 4는 시스템 개발에 적용하기 위하여 아주 단순하며 일반적인 벡터제어에 의한 유도전동기의 속도제어 시스템을 나타낸 것이다.

3.1 전류 Sensing과 Scaling

전동기를 정밀하게 제어하기 위해서는 2상 이상의 정확한 전류검출이 반드시 이루어져야 하며 검출되는 전류의 정확도에 따라 시스템의 운전특성이 결정된다. Fig. 5는 전류검출을 위한 회로와 블럭도를 나타낸 것이다. 전류센서로는 출력전압이 ±10V인 LEM-LA55P를 사용하였다. F240DSP에서 내장되어 있는 ADC는 0-5V의 전압을 사용하기 때문에 아날로그 적인 인터페이스 회로가 필요하므로 Fig. 6과 같이 OP-Amp를 사용하여 ±2.5V의 값으로 스케일링한 후 다시 2.5V의 오프셋을 주어서 0-5V로 한다.

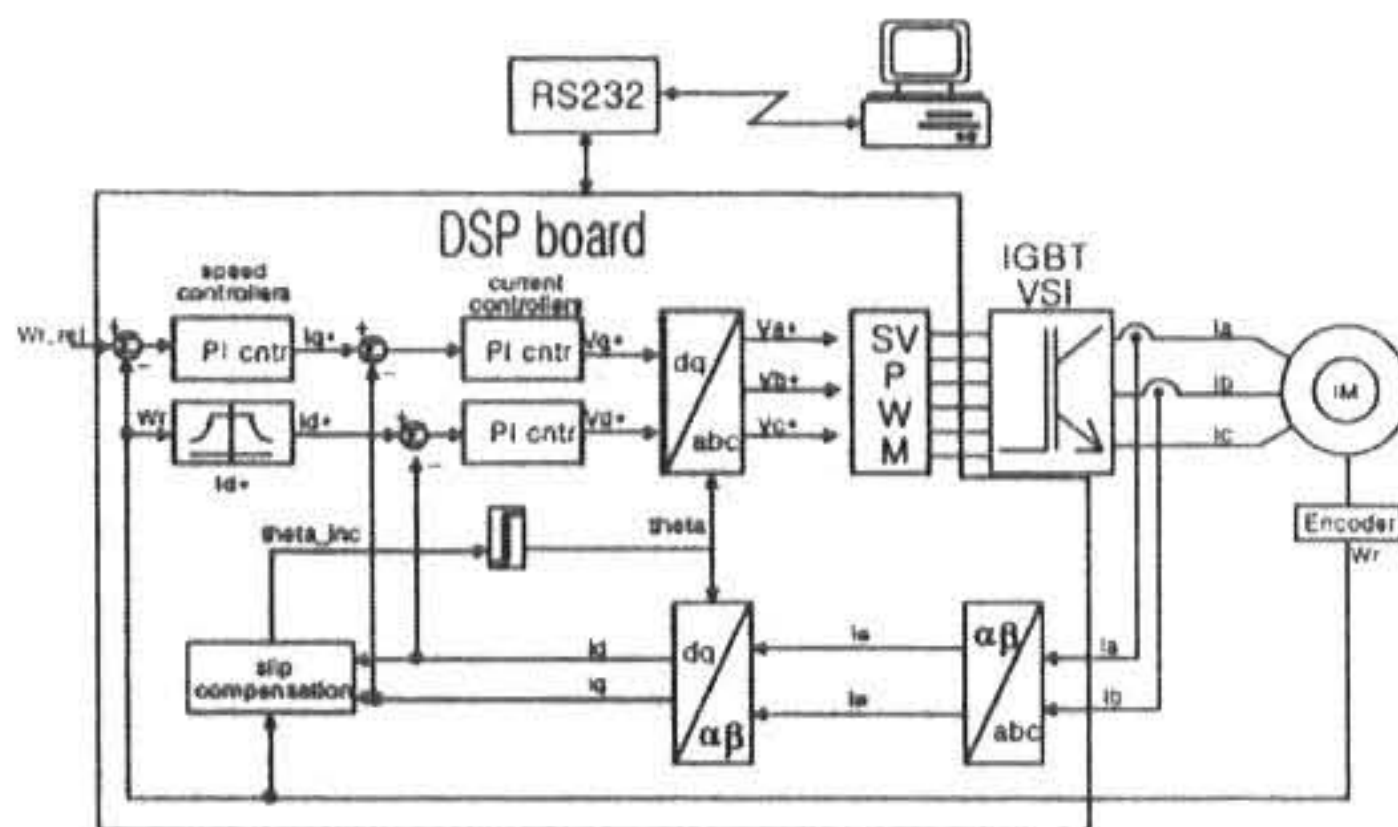


Fig. 4. Block Diagram for a Speed Control of IM

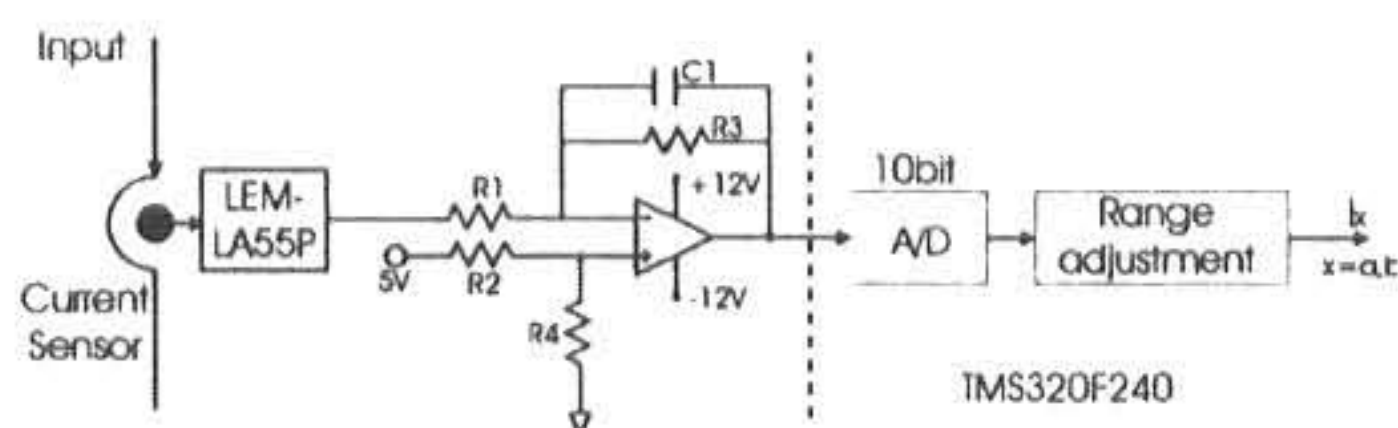


Fig. 5. Concept of Current Measurement

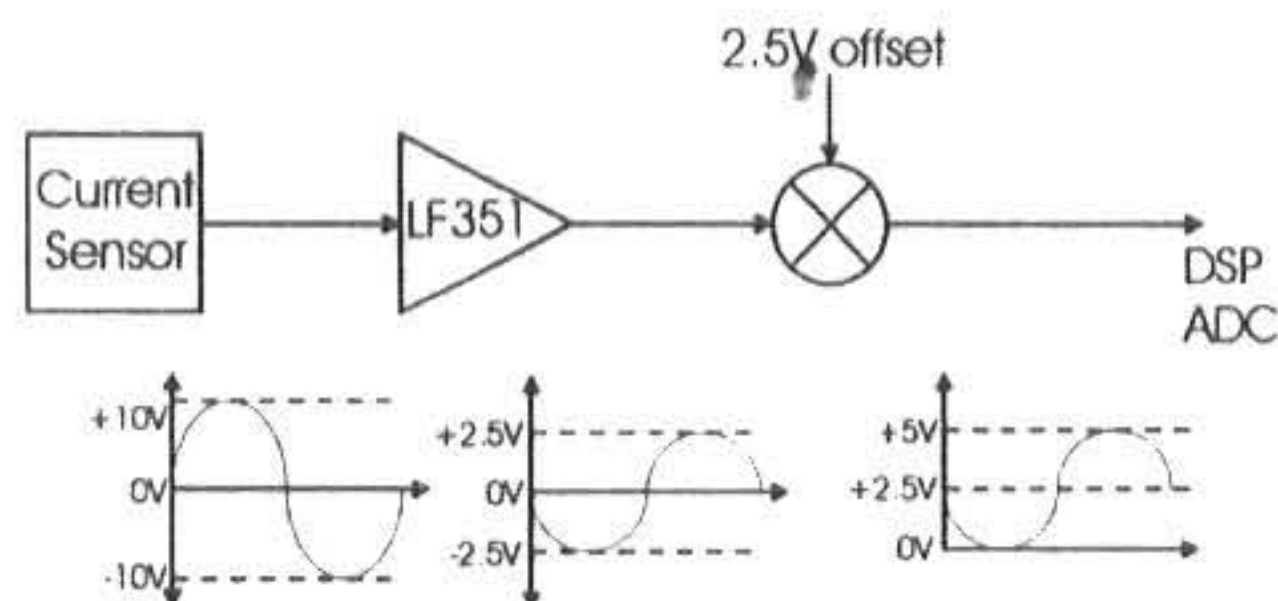


Fig. 6. Reappraisal Offset of Measured Current

Memory 범위		Memory 내용	Memory 형태
0000h~3FFFh	0~FFFh	F240 monitor program	Flash memory F240 Monitor program
	1000h~3FFFh	Free Space	
0060h~007Fh		ISR addresses for H/W interrupt	On-chip DARAM B2
0200h~02FFh		Free Space (User Program)	On-chip DARAM B1
0300h~03FFh	360h~35Fh	F240 Variables	On-chip DARAM B2
	360h	F240 SP starting address	
	3E9h~3FFh	ISR addresses for S/W interrupt	
8000h~FFFFh		Free Space (User Program)	External RAM

Fig. 3. Applied Memory Maps

3.2 속도 Sensing

Fig. 7은 속도 피이드백을 위한 블럭도이다. 속도 및 위치는 엔코더의 3개 신호출력(A, B & Z)는 DSP Controller의 QEP 단자로 바로 연결하여 소프트웨어적으로 연산에 의하여 측정된다. 실험에 적용된 엔코더는 6000[PPR]이므로 속도는 식(1)의하여 계산된다[8].

$$W_{rpm} = \frac{60 \cdot f_c \cdot N_p}{P \cdot m_1} = K_{speed} N_p = 1.3089969 N_p \quad (1)$$

여기서 f_c 는 클럭주파수(20MHz), P 는 회전당 펄스수($6000 \times 4 = 24000$), N_p 는 샘플링 시간당 엔코더의 펄스수, m_1 는 샘플링 시간당 클럭 펄스수(20000)이다.

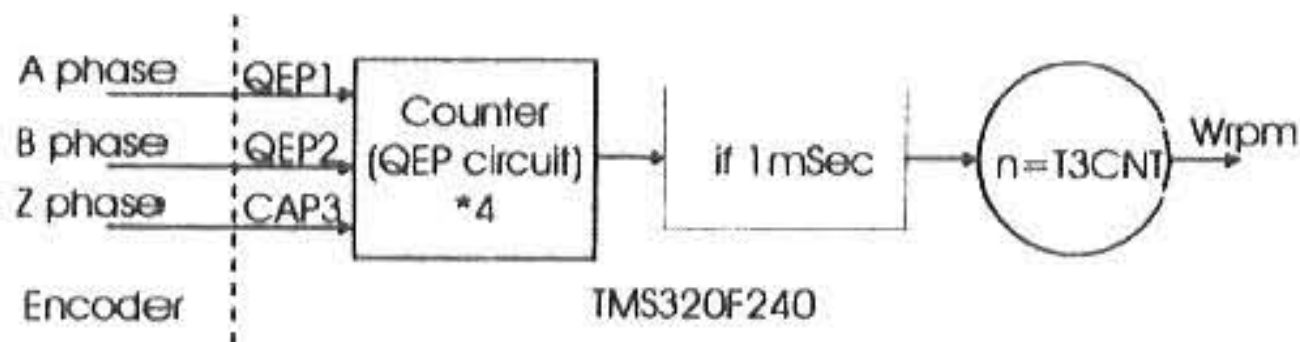


Fig. 7. Block Diagram for Speed Measurement

Fig.8은 속도계산을 위한 프로차트를 나타낸 것이다.

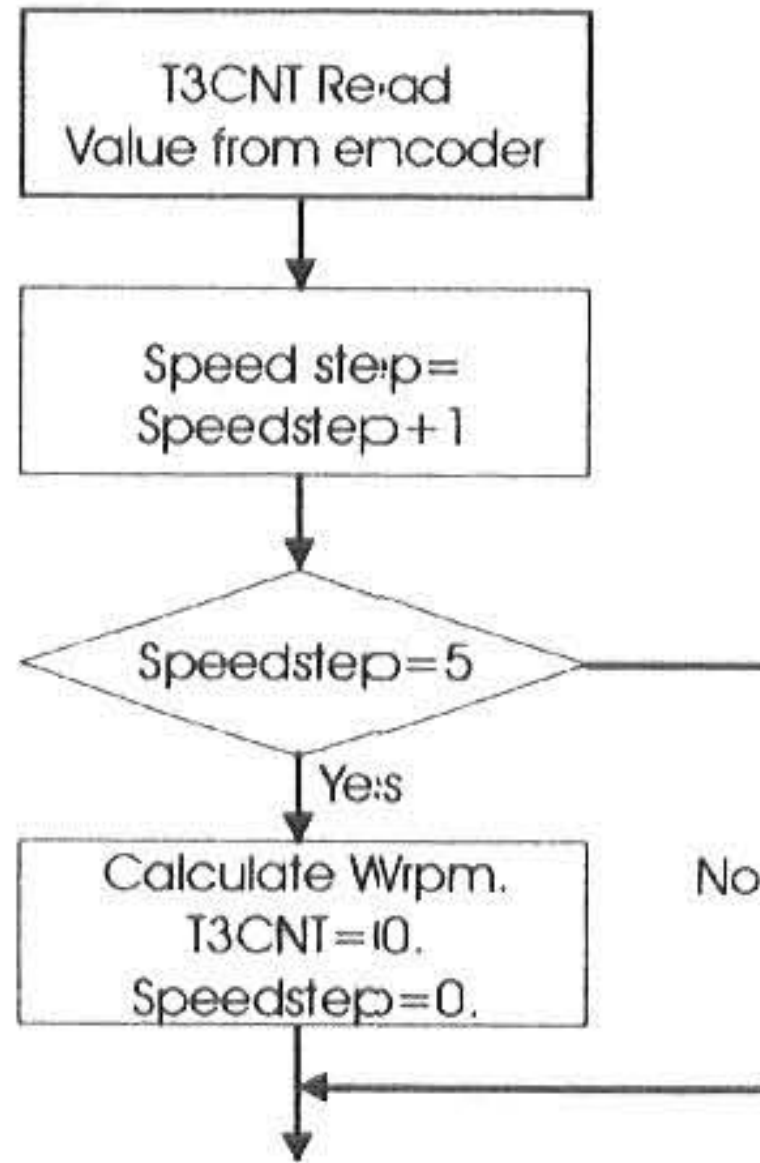
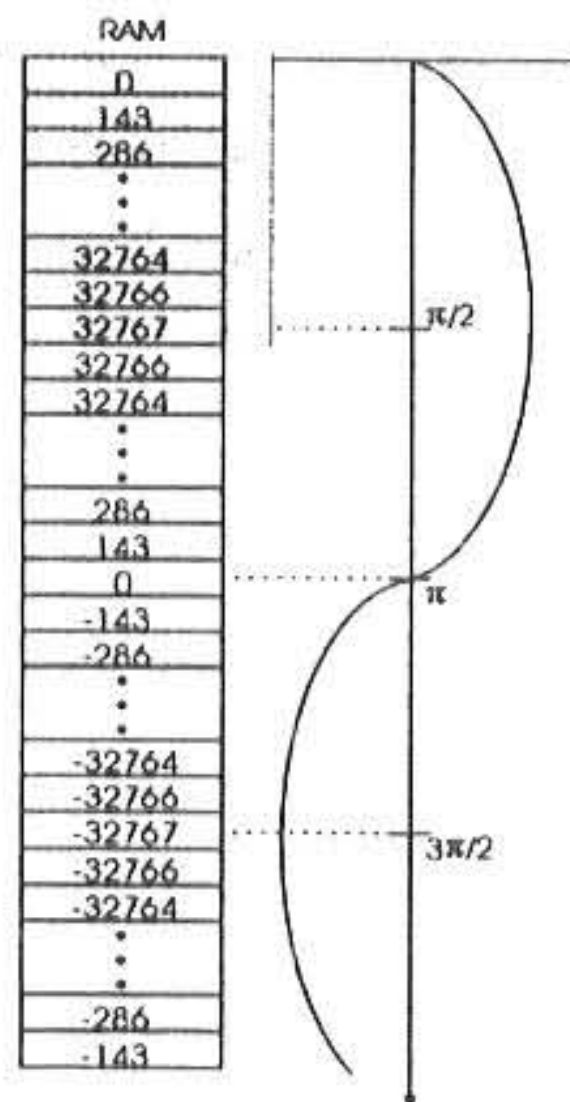


Fig. 8. Flowchart for Speed Calculation



if, angle $\leq \pi/2$
 $\text{Sin}(\theta) = \text{Sin}(\text{angle})$
 $\text{Cos}(\theta) = \text{Sin}(\pi/2 - \text{angle})$
 if, angle $\leq \pi$
 $\text{Sin}(\theta) = \text{Sin}(\pi - \text{angle})$
 $\text{Cos}(\theta) = -\text{Sin}(\text{angle} - \pi/2)$
 if, angle $\leq \frac{2}{3}\pi$
 $\text{Sin}(\theta) = -\text{Sin}(\text{angle} - \pi)$
 $\text{Cos}(\theta) = -\text{Sin}(\frac{2}{3}\pi - \text{angle})$
 if, angle $\leq 2\pi$
 $\text{Sin}(\theta) = -\text{Sin}(2\pi - \text{angle})$
 $\text{Cos}(\theta) = \text{Sin}(\text{angle} - \frac{2}{3}\pi)$

Fig. 9. Concept for Sine Function Generator

3.3 정현파 Look-up Table

벡터 회전에 적용하기 위하여 Sine 및

Cosine 값의 계산이 필수적으로 요구된다. 수식에 의한 연산방법은 DSP의 연산부담을 가중시키므로 Look-up Table을 이용하는 방법이 일반적으로 많이 적용되고 있다. Fig. 9는 정현파 함수를 발생하는 프로그램과 원리를 나타낸 것이다[1][2][7].

3.4 SVPWM 구현

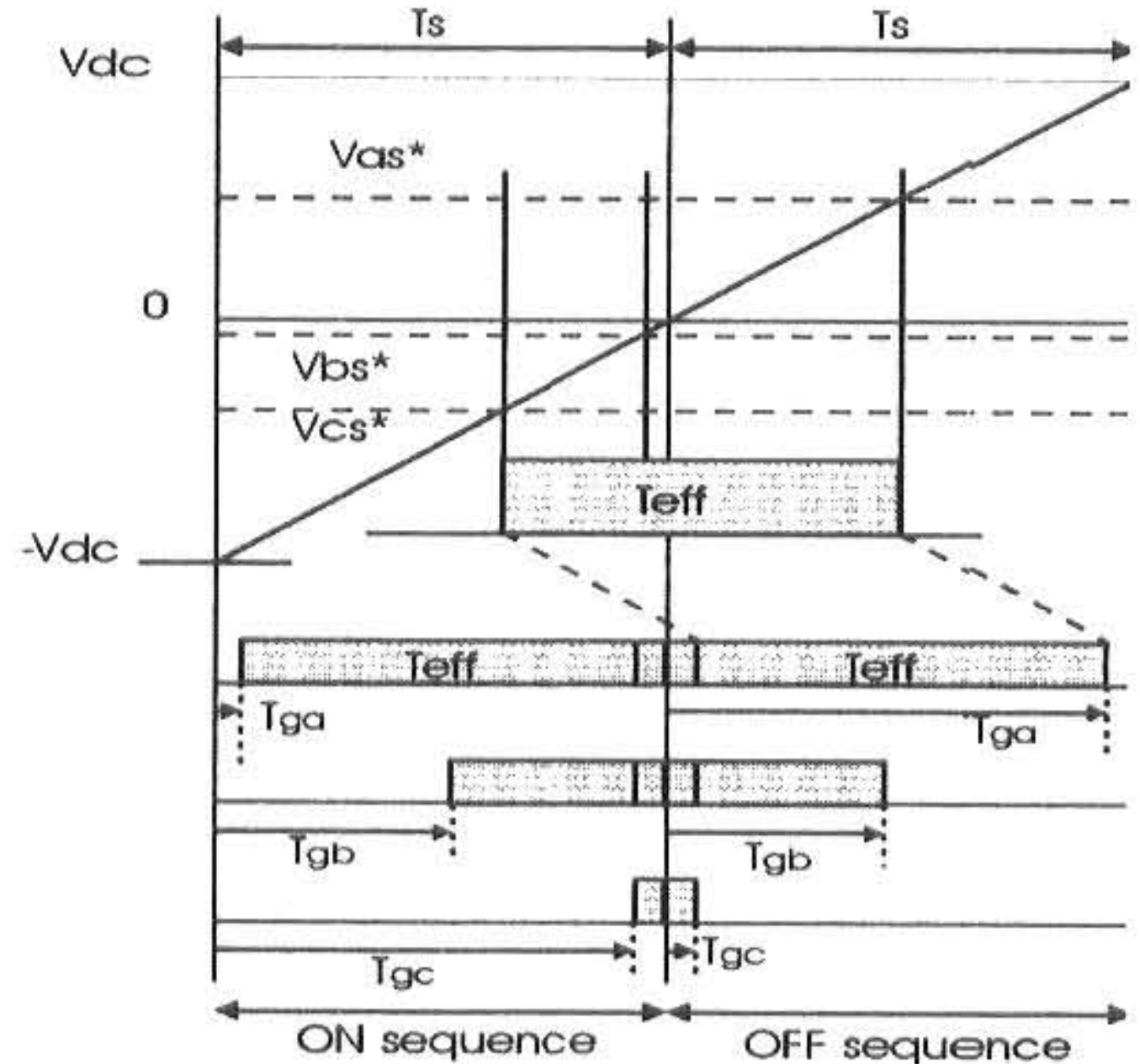


Fig. 10. Concept for SVPWM

SVPWM방식은 상 전압에 대한 등가시간 개념으로부터 간단하게 계산할 수 있는 식(2)를 적용한 방법을 이용하였다. 가상 스위칭 시간에서 가장 큰 값(T_{max}) 및 가장 작은 값(T_{min})을 선정하고 유효시간(T_{eff})과 제로시간(T_{zero})을 구하여 시간적 이동 편차(T_{offset})를 연산하면 다음 식(3)으로 된다. 이때 스위칭 Off 시간과 스위칭 On 시간은 식(4)로 계산되며, 과변조 방식은 수선법을 적용한다[2][9].

$$T_{as} = T_s V_{as}^*/V_{dc}, \quad T_{bs} = T_s V_{bs}^*/V_{dc}, \quad (2)$$

$$T_{cs} = T_s V_{cs}^*/V_{dc}$$

$$T_{eff} = T_{max} - T_{min}, \quad T_{zero} = T_s - T_{eff} \quad (3)$$

$$T_{offset} = T_{zero}/2 - T_{min}$$

$$T_{ga}(\text{Off}) = T_{as} + T_{offset}, \quad T_{gb}(\text{Off}) = T_{bs} + T_{offset},$$

$$T_{gc}(\text{Off}) = T_{cs} + T_{offset},$$

$$T_{ga}(\text{On}) = T_s - T_{ga}(\text{Off}), \quad T_{gb}(\text{On}) = T_s - T_{gb}(\text{Off}), \quad (4)$$

$$T_{gc}(\text{On}) = T_s - T_{gc}(\text{Off})$$

3.5 소프트웨어 구성

Fig. 11은 제어시스템의 간략화 한 소프트웨어의 프로차트를 보여준 것으로, 여러 가지 형태의 전동기(동기전동기, BLDCM, SRM등)를 제어 할 경우 제어 알고리즘만 소프트 적으로 변환하면 쉽게 바꾸어 적용 할 수 있다. Fig. 12는 타임차트를 나타낸 것이며, Fig. 13은 위치제어시 펄스 지령에 추종하는 전동기 상태를 나타낸 것이다.

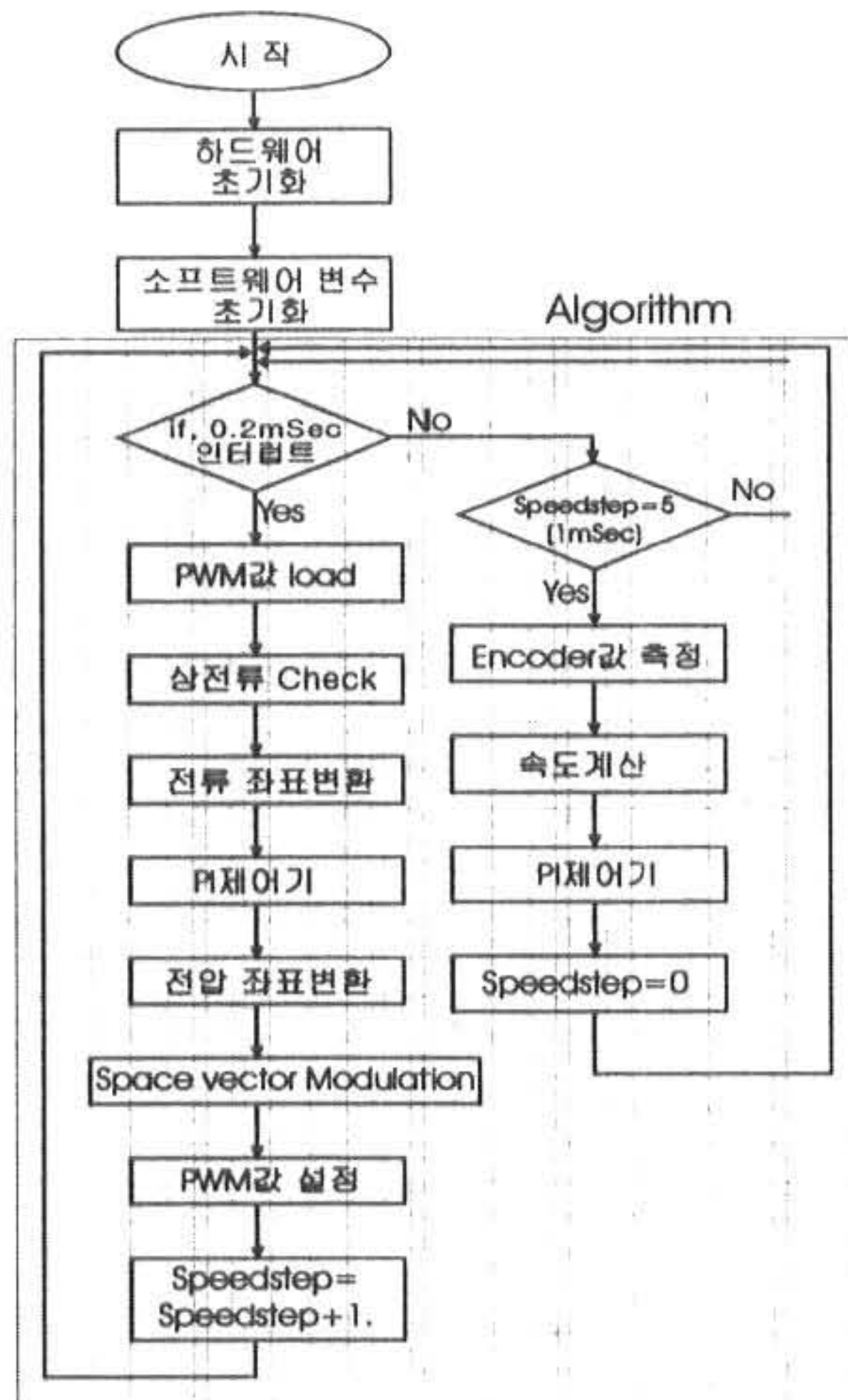


Fig. 11. System Flowchart

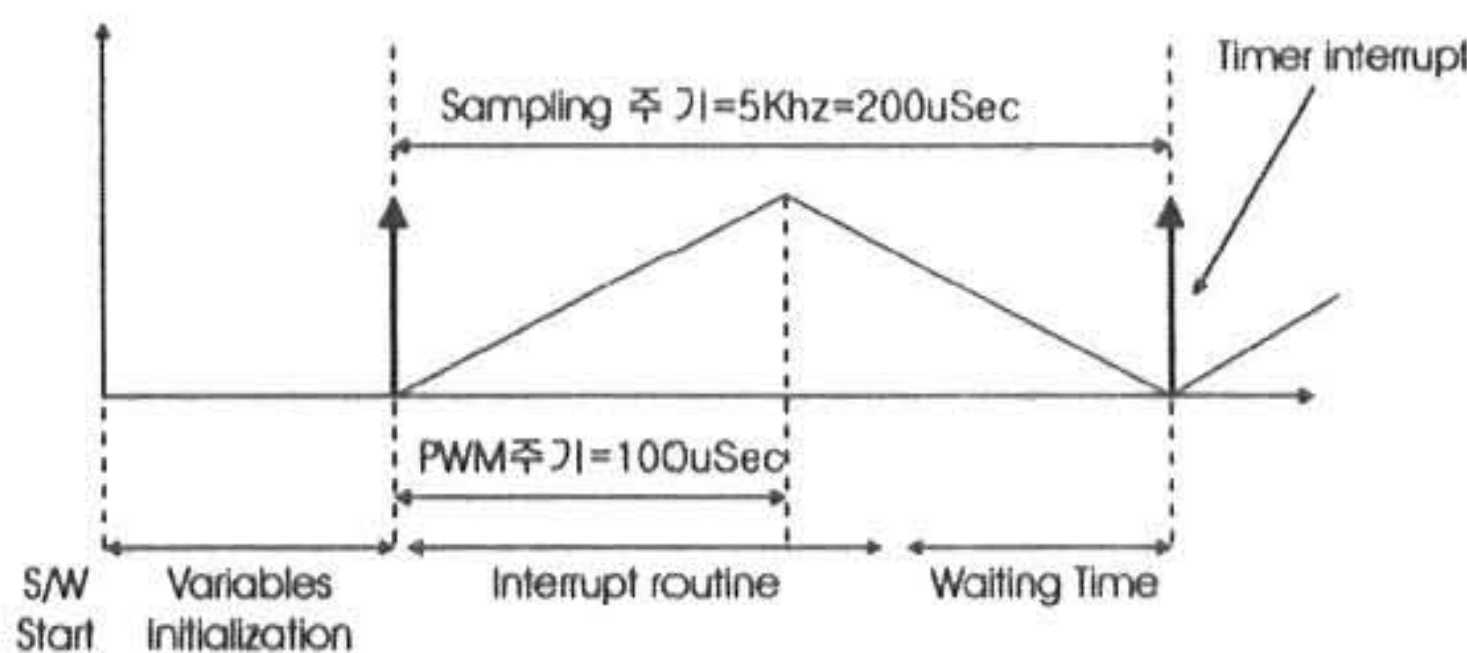


Fig. 12. System Time Chart

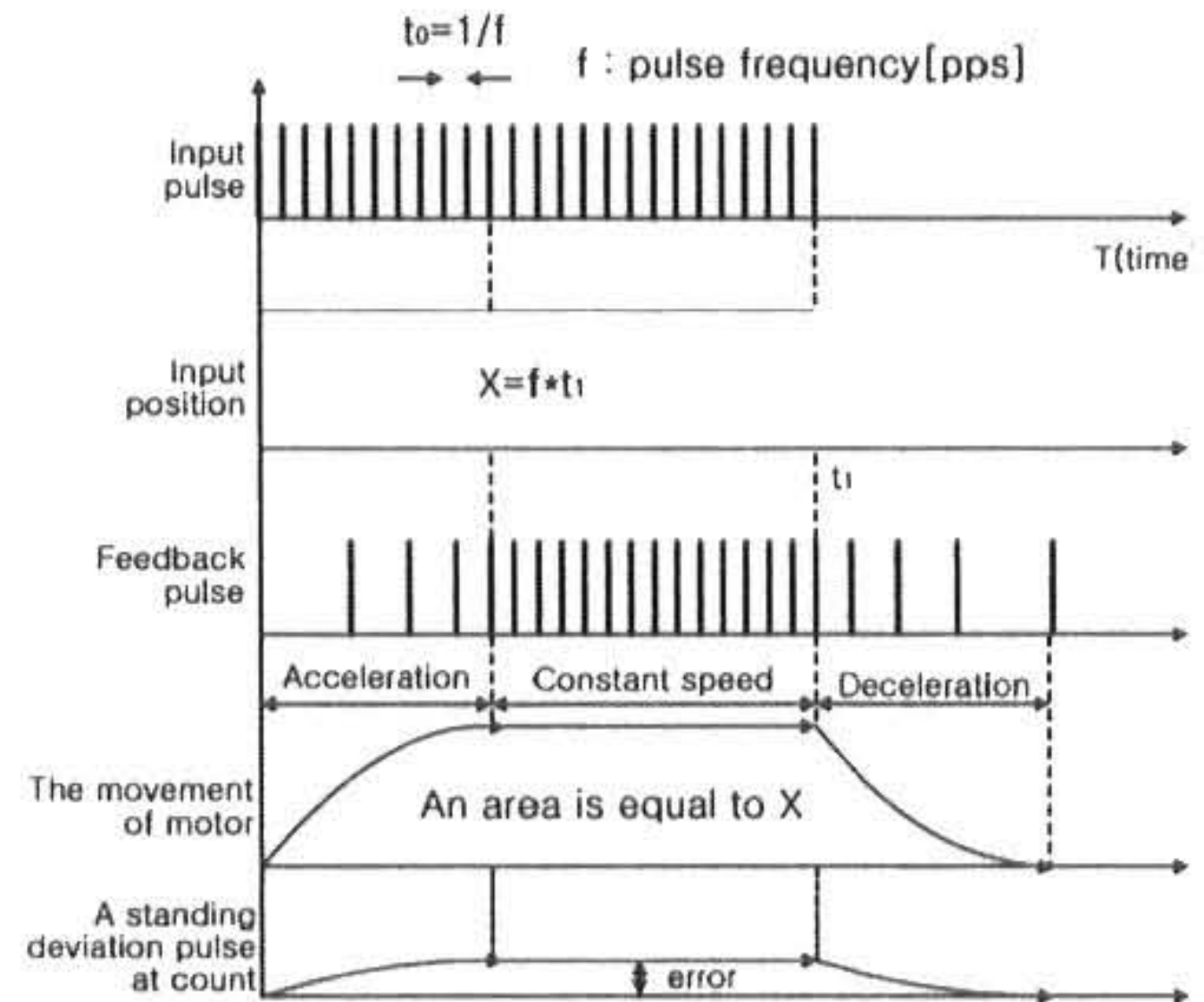


Fig. 13. Operating Motor with Pulse Commender

3.6 PC와 DSP Board와의 데이터 전송

DSP Board와 PC 사이의 데이터 전송은 RS232 Port를 이용하여 모든 제어는 PC에서 프로그래밍과 제어를 하며, 운전자가 원하는 위치에서 logger()라는 외부 함수를 통해 변수들의 운전된 값들을 RAM에 저장한 후 프로그램을 마친 다음 RAM에 저장되어 있던 Data들을 RS232 통신을 통해서 컴퓨터로 디스플레이 하는 방식을 사용한다. 동시에 8개의 변수들을 수집할 수 있고 화면에는 4개의 변수들만이 디스플레이 되며 수집된 값들은 파일로도 저장이 가능하여 과도상태에서 동작특성을 쉽게 비교 관측 할 수 있도록 하였다.

4. 실험결과

4.1 전동기 모델링

실험에 적용된 전동기의 정격 및 파라미터는 Table 1과 같으며, 제어시스템의 프로그램을 위하여 유도전동기의 수학적 모델링은 일반적으로 많이 적용하는 식(5)같은 전압전류방정식 및 운동방정식과 토오크 식을 이용하였으며, 벡터제어 이론을 도입하여 Fig. 3과 같은 속도제어 알고리즘을 적용하였다[3][10][11].

$$\begin{bmatrix} V_{ds} \\ V_{qs} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + p\sigma L_s & \omega \sigma L_s & p(M/L_r) & -\omega_e(M/L_r) \\ -\omega_e \sigma L_s & R_s + p\sigma L_s & \omega_e(M/L_r) & p(M/L_r) \\ -M(R_r/L_r) & 0 & p + (R_r/L_r) & -\omega_{sl} \\ 0 & -M(R_r/L_r) & \omega_{sl} & p + (R_r/L_r) \end{bmatrix} \begin{bmatrix} I_{ds} \\ I_{qs} \\ \Phi_{dr} \\ \Phi_{qr} \end{bmatrix}$$

$$T_e = (3/2)(P/2) M (I_{ds} I_{qr} - I_{dr} I_{qs})$$

$$= J (d/dt) \omega_m + B_m \omega_m + T_L \quad (5)$$

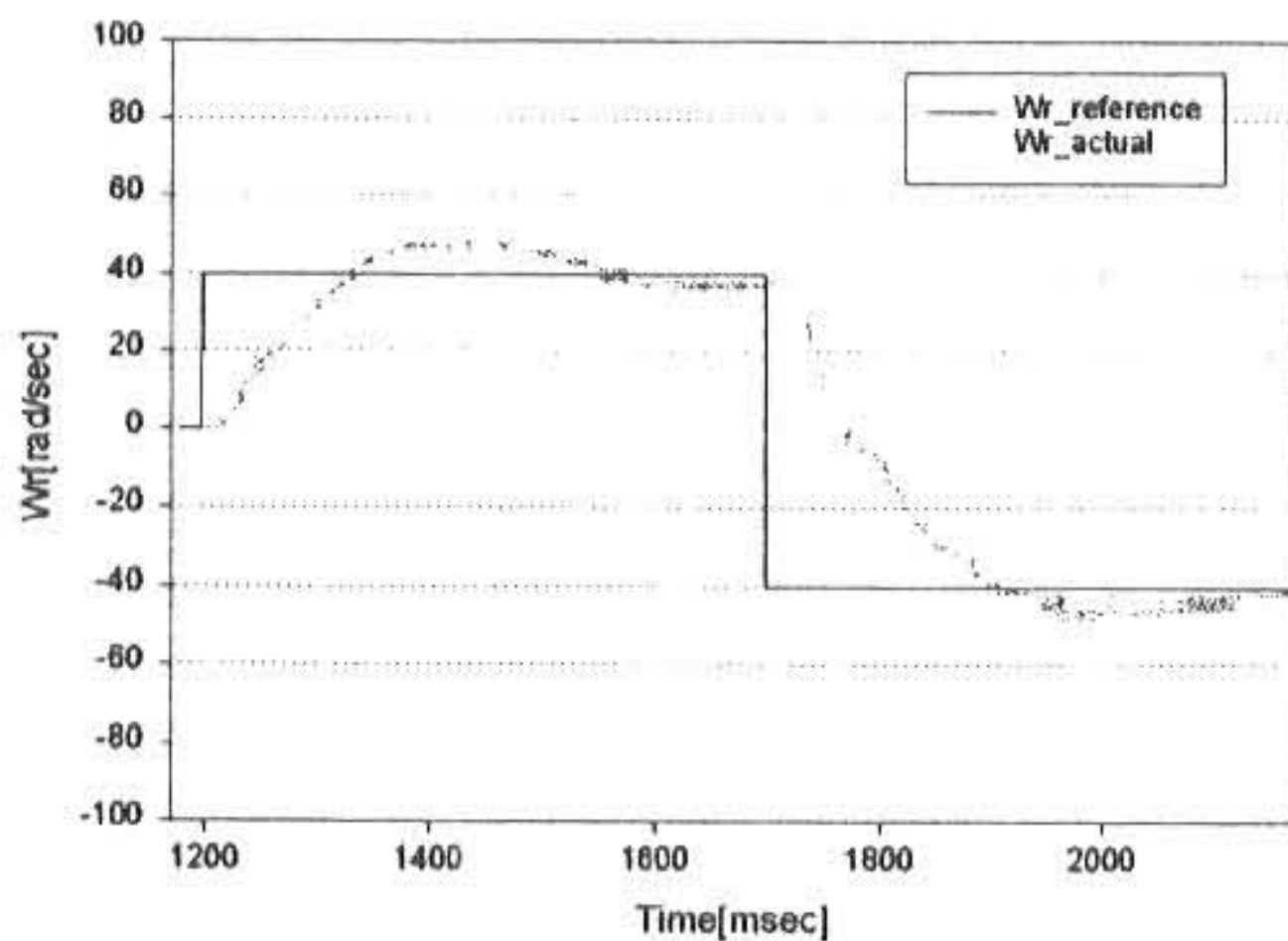
Table 1. Parameters of Applied Motor

$P_o = 2.2[\text{Kw}]$, $V = 220[\text{Volt}]$, $f = 60[\text{Hz}]$
$I = 8.2$, $I_{no} = 4.2[\text{A}]$, $N = 1720[\text{rpm}]$, $P = 4$ 극
$L_s = L_r = 79.156[\text{mH}]$, $M = 75.01$
$R_s = 0.7138$, $R_r = 0.7732[\text{Ohm}]$
$T_r = 0.1024[\text{Sec}]$, $\sigma = 0.102$
$J = 0.015[\text{Kgm}^2]$, $B_m = 0.007[\text{Kg m}^2/\text{Sec}]$

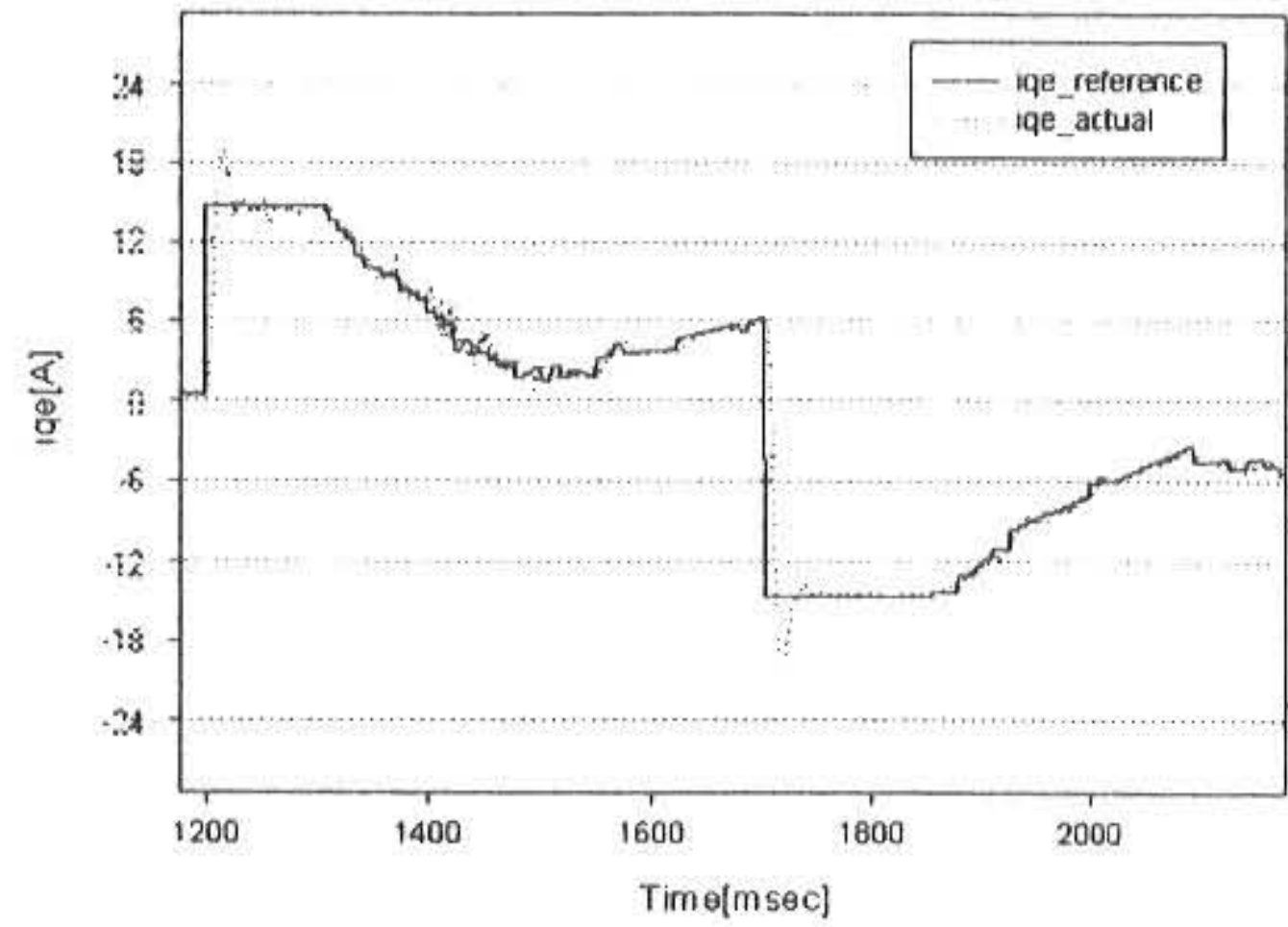
4.2 특성실험 결과

개발된 디지털 유도전동기 제어시스템의 운전특성은 다음 그림과 같다. Fig. 14는 전동기를 0 에서 $\pm 200\text{rpm}$ 으로 정역 운전시 속도제어 특성을 보여준 것으로 (a)는 속도응답특성, (b)는 벡터제어시 토오크 성분전류(I_q)의 응답특성을 나타낸 것으로 리미트 값은 $\pm 15[\text{A}]$ 로 제한하였고, (c)는 자속 성분전류(I_d)의 응답특성을 나타낸 것으로 기준 값을 무부하 전류 값인 $4.5 [\text{A}]$ 로 설정하였으며, (d)는 이때 전동기의 3상 전류파형을 보여준 것이다.

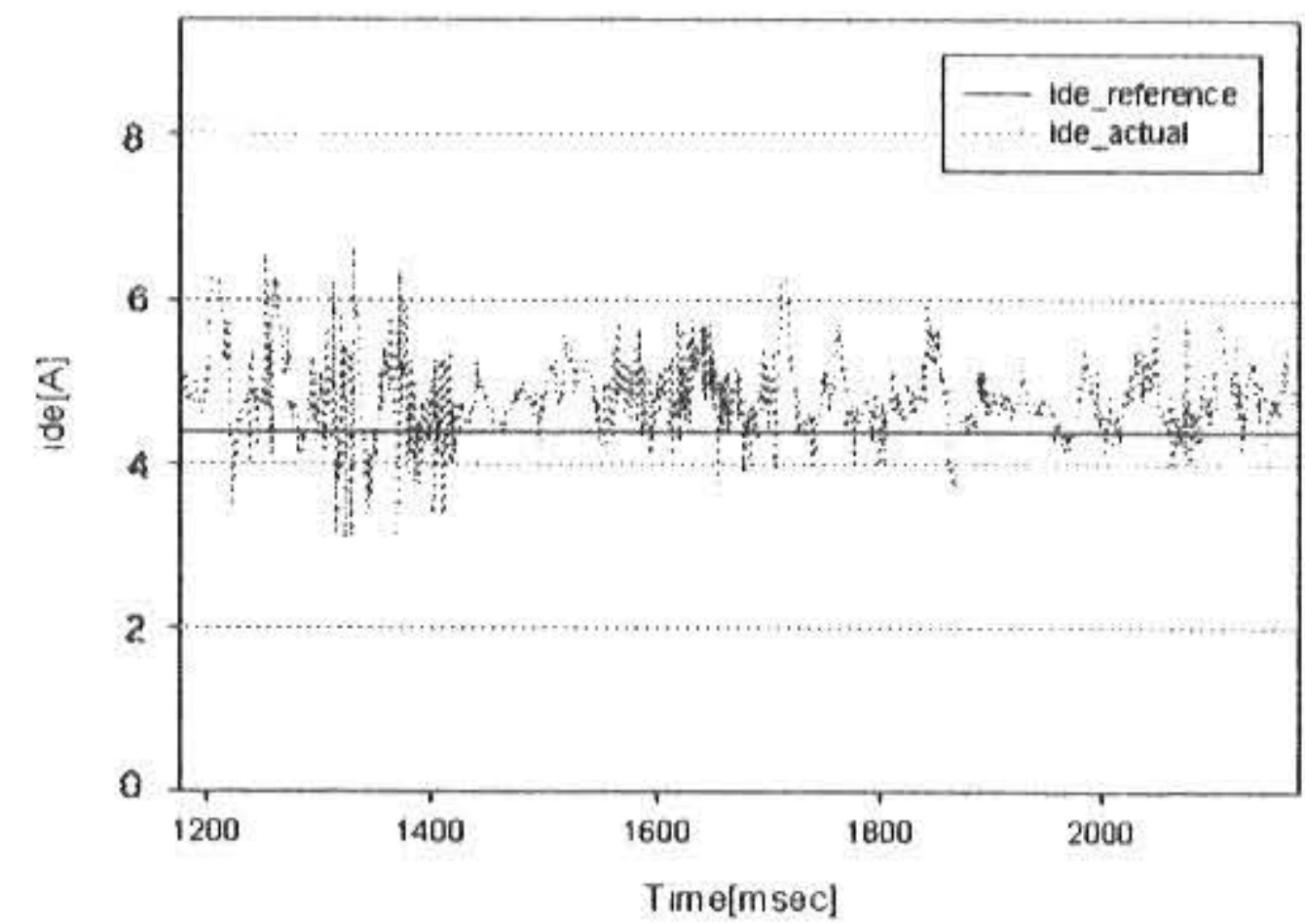
Fig. 15는 전동기를 0 rpm에서 $\pm 800\text{rpm}$ 으로 정역 운전하여 위치제어를 할 경우 응답특성을 보여준 것으로 (a)는 동시 2축 직선운동 추종성의 위치제어특성을, (b)는 위치제어시 속도 응답특성을 보여준 것이다.



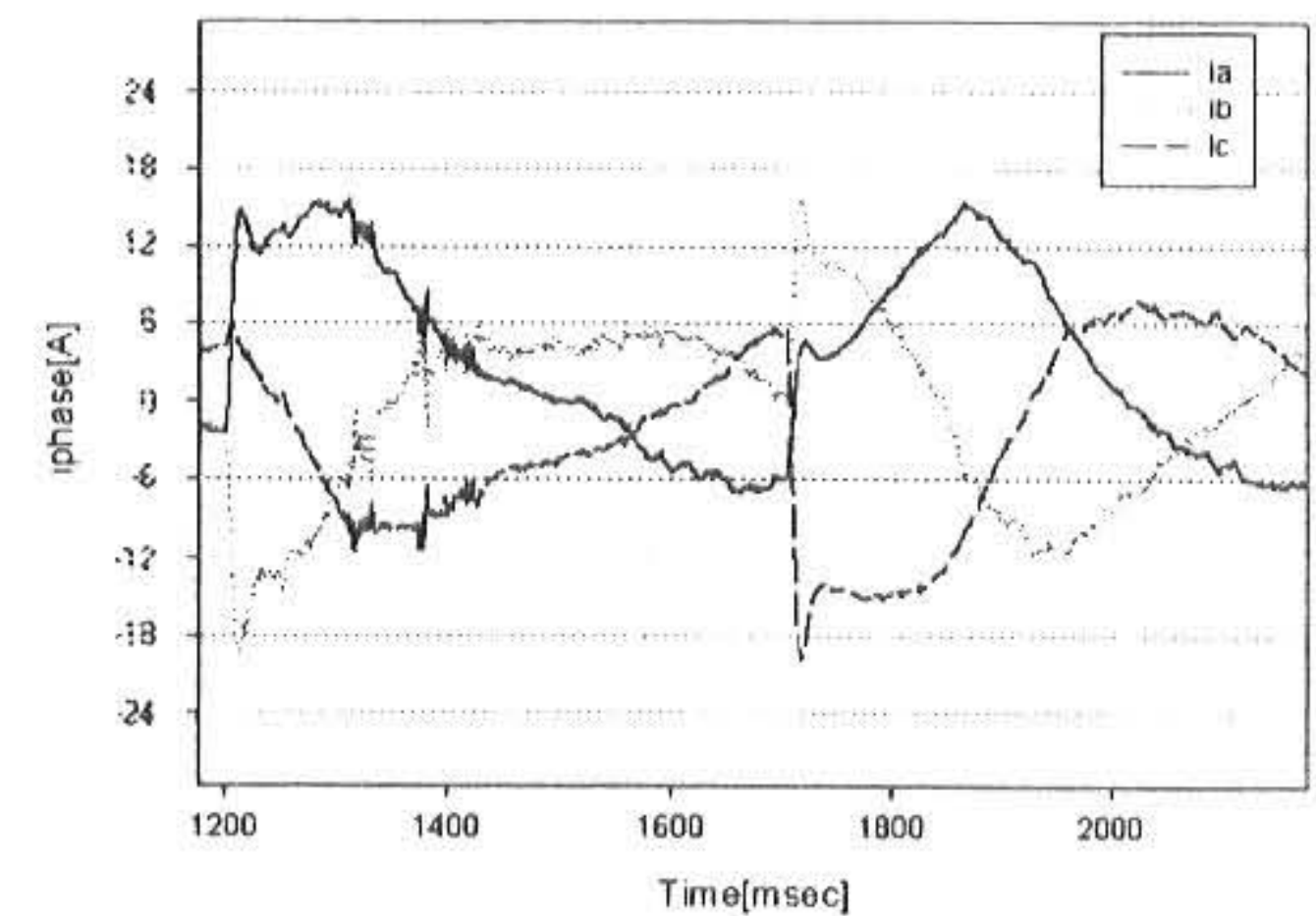
(a) Speed Control



(b) Torque Component Current(I_q)

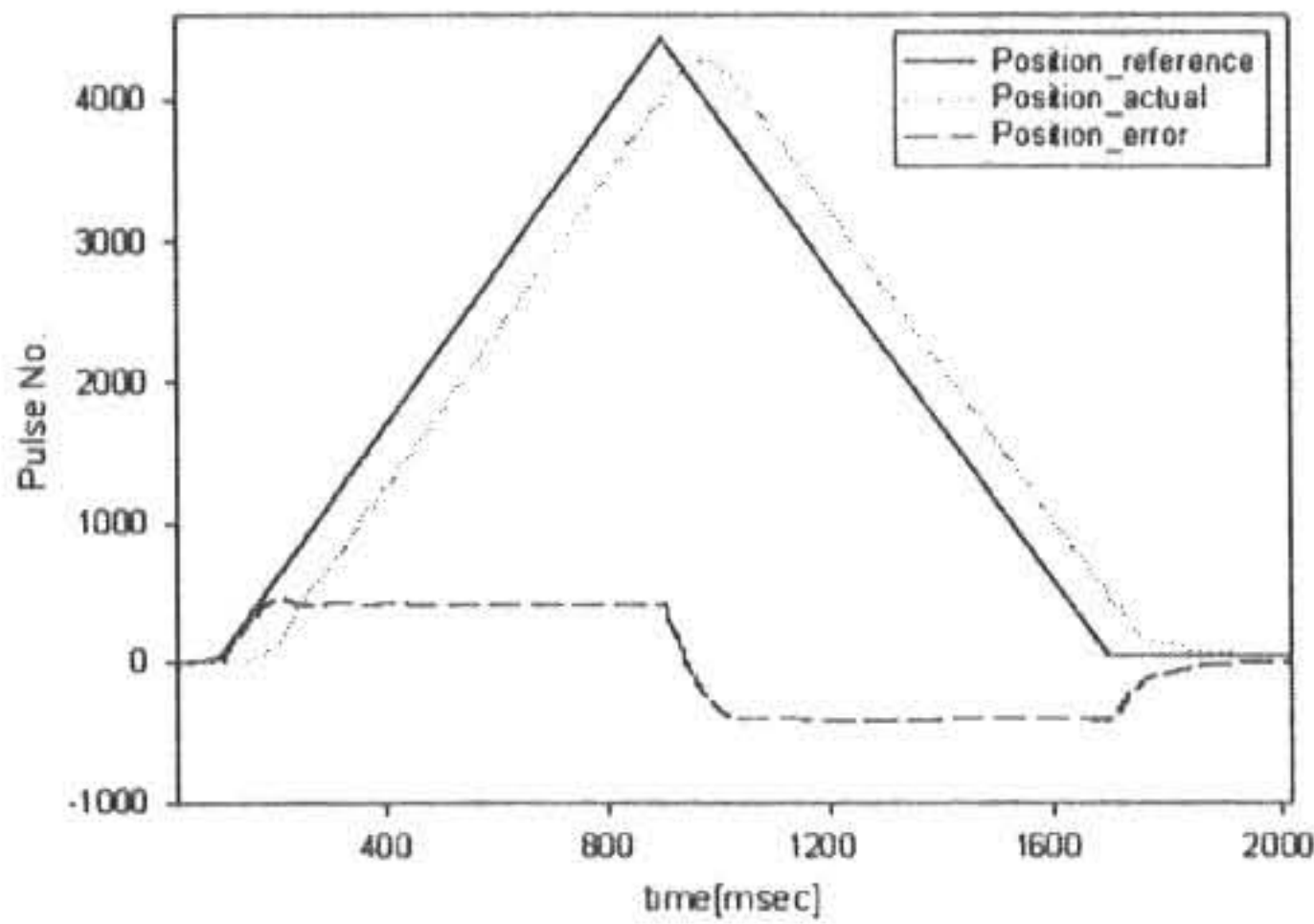


(c) Flux Component Current(I_d)

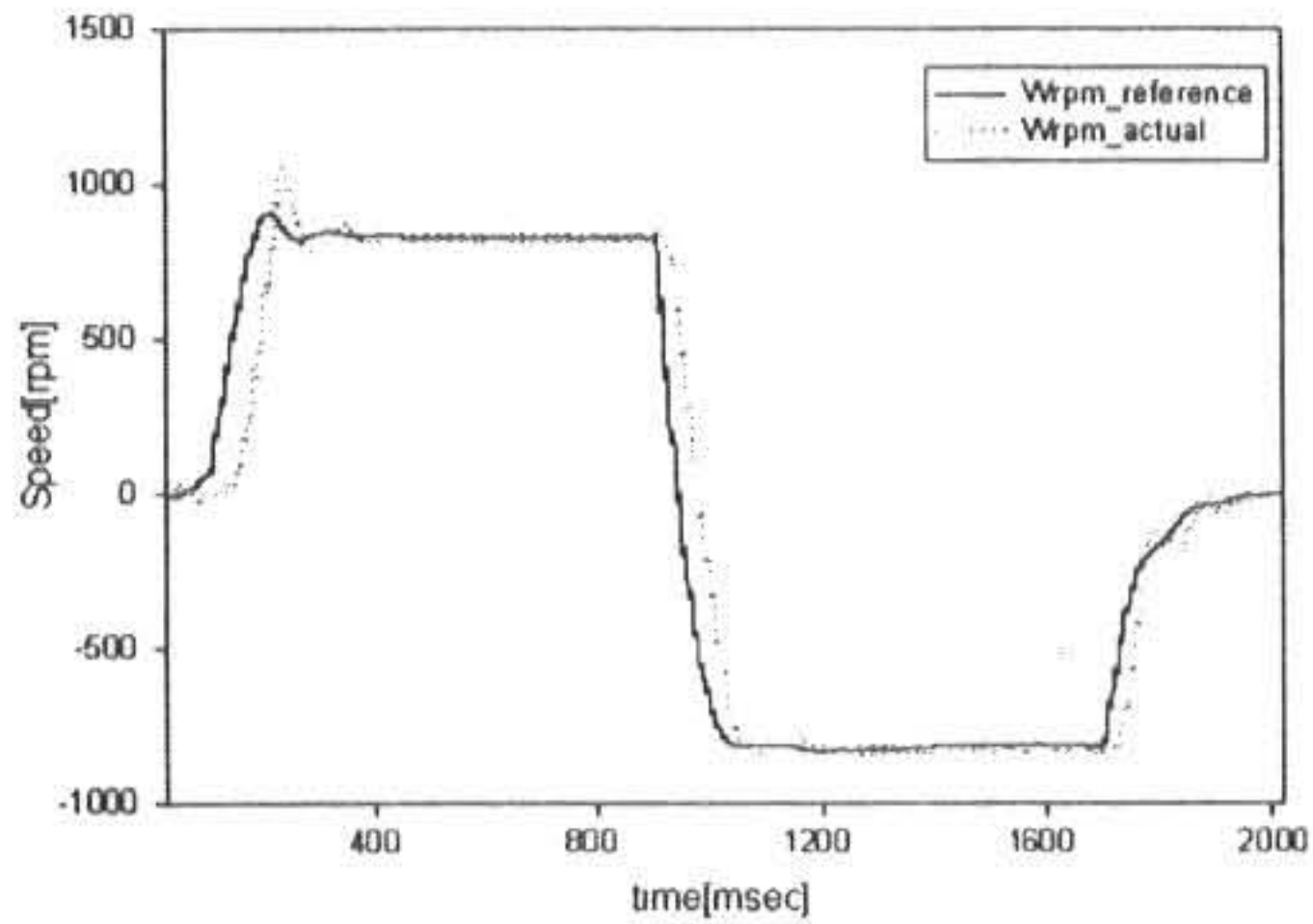


(d) Three Phase Current Waveform

Fig. 14. Response Characteristics of Speed Control



(a) Position Control



(b) Speed Control

Fig. 15. Response Characteristics of Position Control

5. 결론

범용 농형 유도전동기를 고성능 정밀 제어용 서어보 시스템에 적용하기 위하여 하드웨어적으로는 최근 전동기 제어 전용으로 개발된 TI(Texas Instruments)사의 16비트 DSP인 TMS320F240를 적용하여 최소한의 하드웨어만 이용하고, 모든 제어는 소프트웨어적으로 제어될 수 있는 유도전동기 디지털 제어시스템을 구현하였다[1][2]. 개발된 제어 프로그램과 시스템의 운전특성을 검증하기 위하여 IGBT 전압형 인버터에 의한 2.2[kW] 유도전동기의 속도 제어 및 위치제어 응답특성을 고찰한 결과 우수한 특성이 얻어짐을 보여 주었다. 앞으로 이를 이용하면 여러 가지 형태의 전동기 정밀제어 분야의 알고리즘 개발과 운전특성 분석 적

용 및 응용에 유용하게 이용될 것이다.

이 연구는 1999년도 영남이공대학 연구조성비 지원에 의한 것임.

참고문헌

- 1) 김남훈, 김동희, 이상호, 김민희, "F240DSP를 이용한 유도전동기 디지털 제어시스템", 전력전자학회 하계 전력전자학술대회 논문집", pp.377-381, 1999
- 2) 김남훈, 김동희, 김민희, "F240 DSP를 이용한 유도전동기 위치제어 시스템", 대한전기학회 추계 전력전자학술대회 논문집", pp 203-207, 1999
- 3) Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drivers, IEEE Press, 1997
- 4) Technosoft Co., "MCK240 DSP Motion Control Solutions", 1998
- 5) Technosoft Co., "DSP Digital Motion Controller DMCS-ac Toolbox", 1998
- 6) Texas Instruments, "TMS320F240C24x DSP Controllers Reference Set: CPU, System, and Instruction Set", 1999
- 7) Texas Instruments, "Implementation of a Speed Field Oriented Control of Three Phase AC Induction Motor using TMS320F240", 1998
- 8) S. Beierke, "Digital Signal Processing Solutions for Motor Control Using TMS320F240 DSP-Controller, Sept. 1996
- 9) Joohn-sheok Kim "A Novel Voltage Modulation Technique of the Space Vector PWM", The transactions of the Institute of Electrica of Japan. Vol.116-D, No.8. pp.820-82, 1996
- 10) D. W. Novotny and T.A. Lipo, "Vector Control and Dynamics of AC Drives", Oxford Press, 1996
- 11) Werner Leonhard, "Control of Electrical Drives", Springer, 1996

(1999년 12월1일 접수, 2000년 2월25일 채택)