

반도체 제조 장비용 저 전압 DSP칩을 이용한 서보 모터의 벡터제어에 관한 연구

홍선기* · 방승현** · 최치영†

*호서대 정보제어공학과, **유유산업 센서 사업부, 호서대 정보제어공학과

A Study on Vector control of AC motor using Low-Voltage DSP for semiconductor transportation equipments

Sun-Ki Hong*, Seung-Hyun Bang**, and Chi-Young Choi†

*Department of Information Control Engineering, Hoseo University, **YUYU CO., LTD

†Department of Information Control Engineering, Hoseo University

ABSTRACT

In this study, the controller using TMS320LF2407 low voltage DSP for motor control is designed and realized. It has 40 MIPS calculating ability and its driving voltage is 3.3 V for low power. The peripheral elements, however usually use 5 V and they need voltage transfer interface. In this study, voltage transformation and reducing noise are studied and space vector PWM is adopted as a motor control scheme. According to these methods, the efforts for software programming and calculation processes are reduced. In addition, the hardware is also simplified by substituting the current control part with software programming. Through this study, the DSP based servo controller increases its ability for high performance multi-function on semiconductor transportation equipments..

Key Words : SVPWM, TMS320LF2407, Noise reduction, Low voltage DSP

1. 서 론

전력용 반도체 소자의 발달과 마이크로프로세서 및 디지털 신호처리(DSP)기술의 발전은 전동기 구동 분야에 큰 변혁을 가져오고 있다. 특히 모터 제어만을 목적으로 하는 전용 칩의 발전으로 인하여 복잡한 하드웨어와 많은 연산을 필요로 하는 디지털 AC 모터구동에 필요한 주변회로가 단일 칩으로 구성되어 회로가 간략화 되었고, 고속의 연산처리가 가능하게 되었다. 따라서 AC 모터구동 시스템의 신뢰도 향상은 물론, 좀더 정밀하게 전압을 생성할 수 있는 고정밀도의 SVPWM(Space voltage Vector Pulse Width Modulation)기법의 적용이 가능하게 되었다. 본 논문에서는 고성능 AC 서보 모터에 대하여 제어 시스템을 구현하고,

제어기를 설계한다. 하드웨어구성은 모터 전용 저전압 DSP칩인 TMS320LF2407A 칩을 이용하며, 칩에 내장되어있는 10비트의 A/D변환기를 활용한다. 또한 이 칩은 최근의 저전력 구동 추세에 따라서 3.3 V를 구동 전압으로 이용하는 DSP 칩이고, TMS320C24x 시리즈로 같은 코어를 사용하므로 소프트웨어적인 호환성이 유지되고 있다. 다만, 시스템 응답 속도에 따르는 연산처리 속도는 2407이 두 배 정도(40 MIPS) 좋은 성능을 보이고 있으나, 주변 소자들과의 인터페이스(보통 5 V로 동작)와 노이즈에 대한 대책을 고려하여야 한다. 본 논문에서는 이러한 전압 호환과 노이즈를 가능한 제거한 서보 모터제어기를 구성하고자 한다. 또한 옵셋전압을 이용한 공간벡터 PWM방식을 적용함으로써 계산과 정과 프로그램을 간단히 하고, 이런 과정에 의하여 앞으로 요구될 수 있는 고성능 다기능을 위한 모터제어의 효율성을 높이고자 한다.

†E-mail : ccyoung74@hotmail.com

2. 본 론

2.1. PMSM(Permanent Magnetic Synchronize Motor)의 벡터제어

3상 AC서보 모터의 제어 특성과 제어 방식을 구현 하는데 있어 3상 전압과 전류를 2상 교류로 표현한다면 간단해 질 것이다. 이것을 정지 좌표계로의 α - β 모델링이라 하며, 2상 교류를 2축 직류와 같이 표시한다면 2상 교류로 표시된 것보다 제어 특성과 제어 방식을 더욱 간단하게 구할 수 있을 것이다. 이를 동기좌표계 d-q 모델링이라 한다[4].

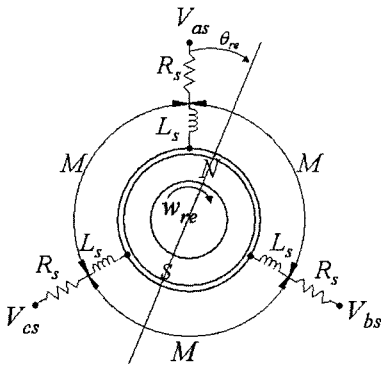


Fig. 1. Equivalent circuit representation of a PMSM.

일반적으로 3상이 평형하므로 위의 등가회로는 식(1)로 표현된다[8].

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix}$$

여기서 $L_s = l_s + \frac{3}{2}M$ 이다. (1)

좌표 변환 행렬을 이용하여 3상 교류 좌표계를 직류 좌표계(d-q축)로 변환하면 식(2)와 같다[8].

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -w_r L_s \\ w_r L_s & R + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ w_r \phi_f \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} \phi_{fd}^e \\ \phi_{fq}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \phi_f \\ 0 \end{bmatrix} \quad (2)$$

이 식은 3상 교류에서는 측정하기 어려운 속도 기전력 및 고정자 권선에 유기되는 자속쇄교수가 좌표변환 수행 이후에 자속쇄교수는 직류 값으로 d-축에 집중되

고, 속도 기전력은 직류 값으로 q-축에 집중되어 정확히 측정할 수 있다[4]. 또한 직류 값인 d-q축 전기자 전압으로 d-q축 전기자 전류를 제어할 수 있음을 보이고 있다. 토크에 관한 식은 아래의 식과 같이 나타내며 q-축 전류에 비례하게 되어 q-축 전류에 제어함으로써 토크를 직접 제어할 수 있다[8].

2.2. SVPWM(Space Voltage Vector PWM)

공간전압벡터 펄스 폭 변조 방식은 직류 전압의 이용률이 상대적으로 높고 일반적으로 사용되는 정현파 PWM 방식에 비해 전류 고조파 성분을 크게 억제할 수 있는 방식으로 알려져 있다[3].

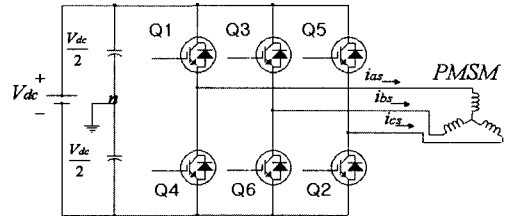


Fig. 2. 3-Phase PWM inverter.

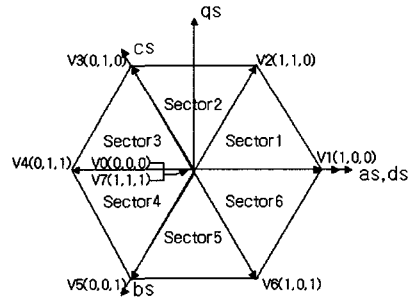


Fig. 3. Switching state vector.

그림 2는 본 논문에 사용된 3상 전압형 인버터를 나타내고 단일 직류 입력 전원에서부터 3상 교류 전압을 발생하여 3상 부하에 공급하는 기능을 갖는다. 그림 2의 3상 PWM 인버터는 각 상 직류전원의 (+)측에 접속된 IGBT가 온인지, (-)측에 접속된 IGBT가 온인지에 따라 2개의 모드가 있고, 3상분이 되면 총 8개의 조합이 존재한다. 이를 공간상에 도시하면 그림 3과 같다.

공간 벡터 전압변조 방식의 기본 원리는 한 주기 내에서 기준 전압 벡터와 평균적으로 동일한 전압을 인버터의 유효 벡터들을 이용하여 합성해 내는 것으로 다양한 방식의 공간 벡터 전압변조 방식이 발표되었고, 본 논문에서는 육섯 전압을 이용한 SVPWM방식을 채택하였다[3].

2.3. 하드웨어 구성

2.3.1 TMS320LF2407 구성

본 논문에서 사용된 DSP칩인 TMS320LF2407A는 외부에 20 MHz 오실레이터를 장착하였으며, 내부적으로 2채배하여 40 MHz의 명령어 사이클로 동작된다.

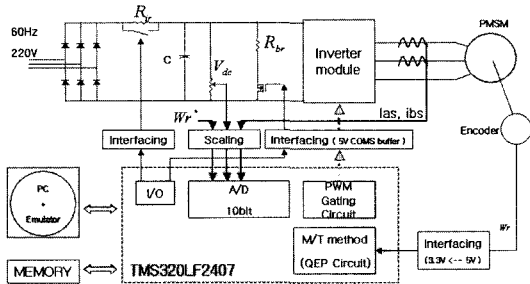


Fig. 4. Block diagram of the control system.

온-칩 메모리로 32 K 워드의 플래쉬 메모리와 DATA/PROGRAM RAM으로 544 워드의 Dual-Access RAM과 2 K 워드의 Single-Access RAM을 내장하고 있다. 또한 A/D 변환기(2개, 16채널)는 2채널을 동시에 변환이 가능하므로 전류 검출 시 2개의 상 전류를 한번에 검출 할 수 있다. 이 밖에 3상 모터 구동이 가능한 PWM 단자와 엔코더 신호 입력을 받는 2개의 QEP(Quadrature Encoder Pulse)단자를 가지고 있다. 따라서 DSP칩 하나로 주변 회로가 간단한 서보 모터 제어기를 구성 할 수 있다.

2.3.2 주변 인터페이스

보통 기존의 5V로 동작하는 논리소자와 저전압형 3.3V로 동작하는 DSP칩 사이에는 2가지 경우의 인터페이스가 요구된다.

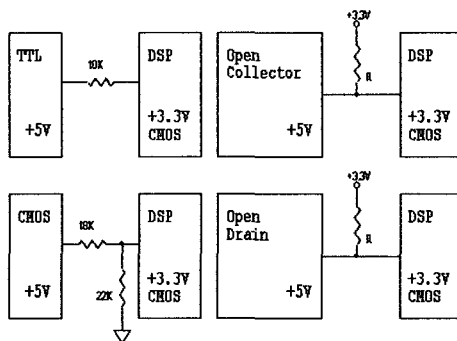


Fig. 5. Connection between 5 V and 3.3 V(5V=>3.3 V).

첫 번째로 5 V TTL 출력을 3.3 V CMOS형의 DSP 입력에 연결하는 경우이고 두 번째로 DSP의 3.3 V 출

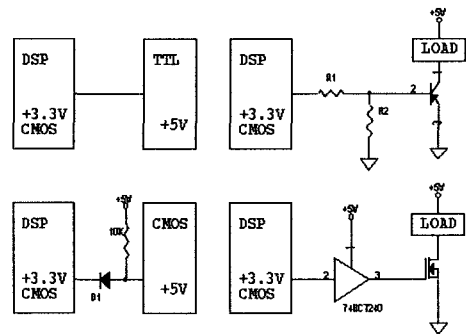


Fig. 6. Connection between 3.3 V to 5V(3.3 V=>5 V).

력신호를 5 V 논리소자에 입력하는 경우이다. 두 경우 모두 저전압의 DSP칩과 연결 시 각 소자와 DSP칩 포트와의 임피던스 매칭이 주요 관건이 된다. 보통은 무시하고 연결하는 경우도 있으나 DSP칩의 수행 속도가 빨라 질 수록 예기치 못한 문제점을 발생시키는 원인이 되기도 한다. 그림 5와 6은 각 경우에 대한 접속도를 나타내고 있다.

예를 들어 3.3 V DSP 출력을 바이폴라 트랜지스터나 MOSFET 입력에 접속하는 경우에는 바로 연결하여 사용할 수 없다. 바이폴라 트랜지스터의 경우에는 구동하려는 트랜지스터의 전류 증폭률을 고려하여 적절한 베이스 전류를 흘려주어야 한다. 따라서 베이스 저항 값을 적절히 선정해야 한다. MOSFET의 경우에는 대부분의 MOSFET가 필요로 하는 게이트 전압이 3.3 V를 넘어야 하므로 간편하게 74HCT240과 같은 5 V CMOS 버퍼를 사용하여 3.3 V 레벨의 출력을 5 V 레벨의 출력으로 변환하여 사용한다.

2.3.3 노이즈 대처 방안

전원 외래 잡음에 대한 문제점을 집중적으로 해결하려 하였다. 특히 도선을 통한 잡음은 저역 통과 필터와 노치필터를 DSP칩 전원 부분과 각 IC 소자 및 도선에 적용하여 잡음을 제거하였다. 또한 전원공급장치의 공급 전원을 안정화 시키기 위하여 교류전원과 직류전원 사이에 노이즈 필터를 설치하였다. 회로를 동작시키기 위해서는 반드시 직류전원을 회로에 접속해야 한다. 직류전원은 보통 교류전원을 정류해서 얻고 있으므로 회로의 소자 쪽에서 보면 전원단자→직류전원→교류전원과 전기적으로 이어지게 된다. 교류전원은 잡음을 많이 포함하고 있고 특히 50 Hz~60 Hz 및 고주파성분의 잡음이 존재한다. 전원라인에 포함된 잡음의 영향을 줄려면 전원의 바이패스 회로를 충분히 낮은 임피던스로 할 필요가 있다. 따라서, 교류전원과 직류전원 사이에 노이즈 필터를 설치하는 것이다. 그리고 마지막으로 마

이크로 프로세서 및 TTL 로직 IC의 구동 전원(전압레벨 5 V 및 3.3 V)용 소자는 SMPS 스위칭 소자보다는 REGUL-TOR 소자를 사용하였다. SMPS 스위칭 전원 소자는 최소 42 KHz로 스위칭 하기때문에 REGULATOR 전원 소자에 비하여 많은 잡음 성분을 가지고 있다. 또한 회로구성에 있어서 입력 부분과 출력 부분의 너무 가까워 정제환 루프를 구성하여 발진 현상이 일어나는 경우가 있으므로, 회로 구성 시 이를 잘 검토하여야 한다.

2.4. 시뮬레이션 결과

그림7은 시뮬레이션 출력 파형을 보이고 있다.

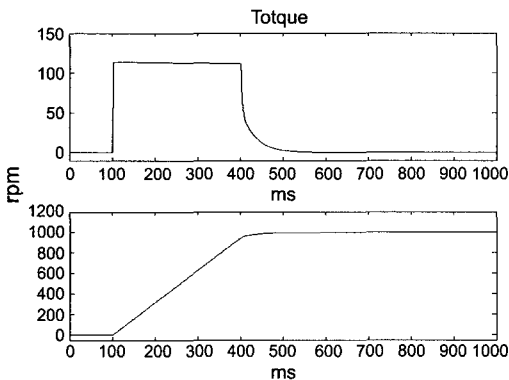


Fig. 7. Simulated SVPWM with offset voltage.

그림 7과 같은 파형을 얻기 위해서는 풀전압의 최대치와 최소치의 절대값이 같아야만 하며 이와 같은 조건이 만족될 때 PWM파형이 대칭적으로 발생된다 [8].

그림 8은 실험에 사용된 AC 모터에 초기에서부터 100 ms 후에 스텝응답을 가했을 때 영구자석형 동기모터 출력축의 회전속도(RPM, 하단)와 토크(상단)를 시뮬레이션한 출력 파형을 나타내고 있다. 본 실험에 사용된 모터는 4극, 510 V, 600 W 영구자석형 동기 모터이다. 토크와 속도 시뮬레이션 파형에서 보여지는 것과

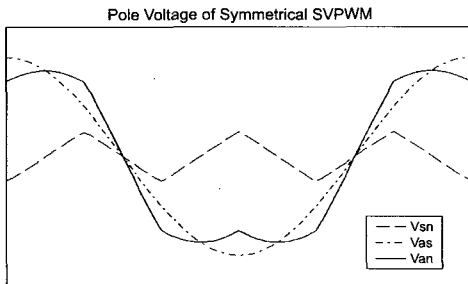


Fig. 8. The result of the simulation (torque, speed).

같이 정상상태까지 도달하는데 걸리는 시간은 약 400 ms 정도 소요됨을 알 수 있다.

그림 9는 상전압(상단) 및 상 전류(하단)를 시뮬레이션 한 것이다. 약 400 ms 후에 상전류가 수렴하는 것을 알 수 있다.

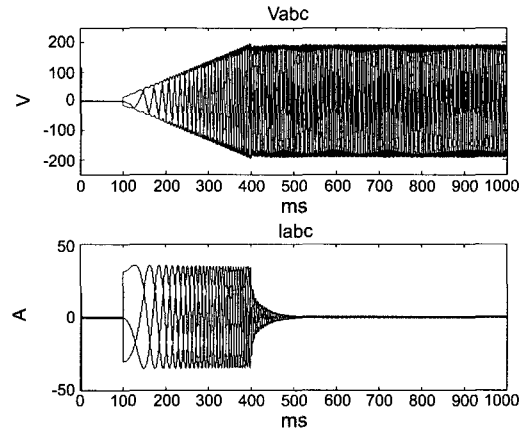


Fig. 9. The result of the simulation (voltage, current).

2.5. 실험 결과

개선된 SVPWM 방법을 이용하여 실제 모터를 구동하였다. 표 1에 실험에 사용한 PMSM의 파라미터를 나타내었다.

Table 1. Specification of the PMSM

변수	Specification
상수/극수	3상 4극
정격 출력	600 W
관성 모멘트	1.02 g · cm · s ²
토크 상수	4.8 kgf · cm/A
상당 저항	0.46 ohm
상당 인덕턴스	2.66 mH
역기전력 상수	0.049 V/rpm

모터의 구동은 TMS320LF2407A에서 발생하는 옵셋 전압을 이용한 SVPWM을 사용하여 조절하게 된다. A/D 컨버터에 연결된 가변저항을 이용하여 받아들인 속도 지령치는 속도제어기 및 전류제어기를 거쳐서 SVPWM의 듀티비를 조절하게 되며 이 신호는 포토 커플러를 거쳐 인버터 모듈의 IGBT를 구동하여 모터에 상을 인가 시키게 된다.

그림 10은 DSP칩인 TMS320LF2407A의 SVPWM 출력 파형이다. 이 DSP칩은 내부에 있는 3개의 독립된

범용 타이머 중 1개를 사용하여 육섯 전압을 이용한

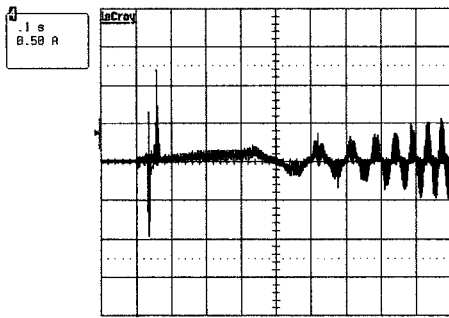


Fig. 10. Output of SVPWM.

SVPWM 출력을 간편하게 만들어 낼 수 있는 장점이 있다.

그림 11은 육섯 전압 방식을 이용한 섹터1에서의 대칭 SVPWM 파형을 보이고 있다[8]. 각 섹터별 게이팅 출력 파형이 올바르게 동작하고 있음을 알 수 있다.

간혹 그림11과 같이 전원의 잡음으로 인하여 출력 파형에 리플이 발생하게 되는 경우가 발생된다. 이런 경우에는 앞 절에서 설명한 바와 같이 SMPS에 노이즈 필터를 설치하여, 상용전원의 고조파 노이즈 원을 되도록 줄여야 하며, 시스템 보드나 기타 주변 기기에 전원을 공급할 때에는 콘덴서와 코일을 이용하여 전류 리플과 도선을 통한 노이즈 등을 줄여야 한다.

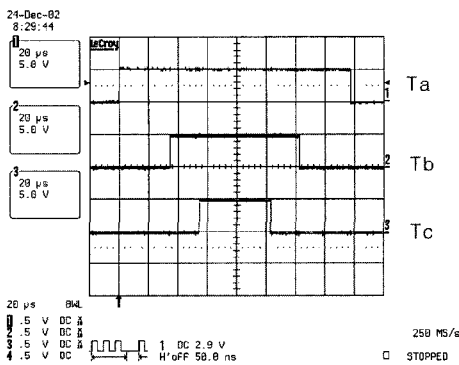


Fig. 11. Output of SVPWM involved noise.

그림 12는 본 논문에서 실험한 모터의 A상 전류 파형이며, 그림 13은 1000 rpm 기동 시 정상상태에서의 A상 전류 파형이다. 그림 14는 시중에서 판매되는 파나소닉 사의 모터와 드라이버를 이용하여 측정한 전류 파형이며, 그림 15는 1000 rpm 기동 시 정상상태에서의 전류 파형이다.

본 논문의 실험 파형을 보면, 기동 시 특성이 상용

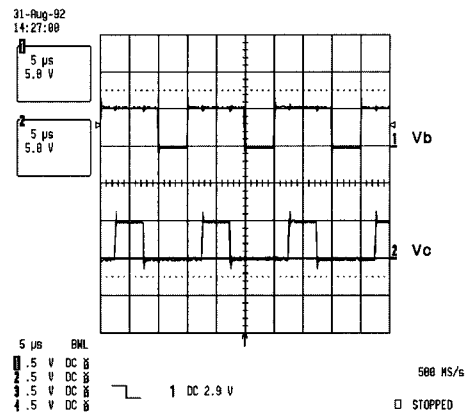


Fig. 12. Output of the A-phase current.

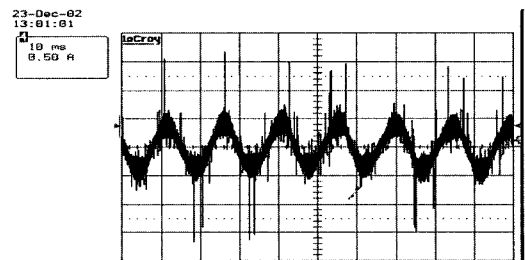


Fig. 13. Output of the A-phase current at 1000 RPM.

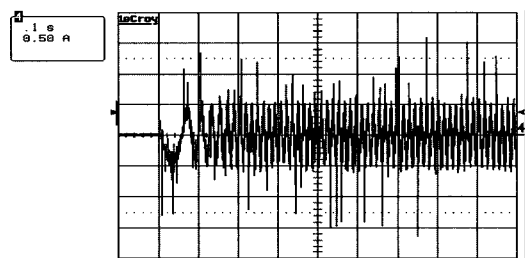


Fig. 14. A-phase current of the Panasonic system.

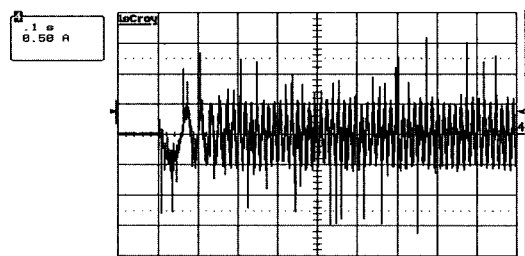


Fig. 15. A-phase current of the Panasonic system at 1000 RPM.

제품보다 떨어짐을 알 수 있으며, 노이즈 또한 기준 제품보다는 떨어진다. 그러나 노이즈에 대한 문제점은 실험에 사용된 제어기와 모터 드라이버를 원-보드 PCB

화하면, 현 실험보다 감소 될 수 있다. 기동 특성의 향상을 위하여 전류와 속도 제어기의 게인 값에 대한 예측이 좀더 필요하다.

그림 16은 본 논문에서 사용된 제어보드와 드라이버 그리고 모터의 사진이다. 왼쪽부터 TMS320 LF2407A 보드와 애플레이터, 중간에는 모터 드라이버, 그리고 제어 대상인 모터를 보이고 있다.

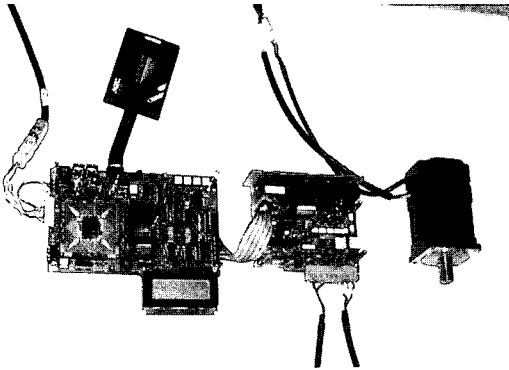


Fig. 16. System photograph.

3. 결 론

본 연구에서는 반도체 제조 장비 용 AC 서보 모터 제어 시스템을 구현하였고, 시뮬레이션을 수행하였다. 특히, 모터 전용 저전압 3.3 V 구동의 DSP 칩인 TMS 320 LF2407 칩을 이용하여 주변 회로를 간략히 할 수 있었고, 옵셋 전압을 이용한 SVPWM을 이용하여 DSP 칩의 연산 수행 부하를 줄일 수 있었다. 또한, 주변 5 V 전원의 TTL 및 COMS 칩, 그리고 스위칭 소자들과 효과적으로 인터페이스 시킬 수 있었고, 전원 분리 및 저역 통과 필터와 노치 필터의 사용으로 시스템 보드와 공급전원에서 발생하는 노이즈를 효과적으로 줄일 수 있었다. 이러한 과정에 의하여 앞으로 요구될

성능 다기능을 위한 AC 모터 제어 시스템에 대응할 수 있을 것으로 기대된다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 지역협력 연구센터인 호서대학교 반도체 제조장비 국산화 연구센터의 연구비 지원에 의해 연구되었음.

참고문헌

1. Lee, H.-D. and Sul, S.-K. "Common-Mode Voltage Reduction Method Modifying the Distribution of Zero-Voltage Vector in PWM Converter/Invert System", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 37, No. 6, November, pp. 1732-1738 (2001).
2. Ji, J.-K. and Sul, S.-K. "DSP-Based Self Tuning IP Speed Controller with Load Torque Compensation for Rolling Mill DC Drive", IEEE Trans, on Ind. Elec. Vol. 42, No. 4, August. pp. 382-386 (1995).
3. 김준석, 설승기, "공간전압벡터 PWM의 새로운 기법", 전기학회, 44권 7호, pp. 865-874 (1995).
4. TSUNEO KUME, TAKANOBU IWAKANE "High-Performance Vector-Controlled AC Motor Drives", IEEE, Vol. 23, pp. 872-880 (1987).
5. Ong, C.-M. "Dynamic Simulation of Electric Machinery", Prentice Hall, (1998).
6. Holts, J. "Pulse width Modulation A Survey", Conf. Rec. of IEEE PESC, pp. 11-18 (1992).
7. Bonnert, R. and Wu, R. S. "Improved three phase pulse width modulation for overmodulation", in Conf. Rec. IEEE-IAS Annual Meeting, Chicago, IL., (1984).
8. 설승기, "전기기기제어론", 도서출판 브레인코리아, pp. 65-117, 239-277 (2002).