

고분해능 엔코더를 이용한 PMSM의 벡터제어에 관한 연구

황인성, 장중학, 홍선기
호서대학교 정보제어공학과

A study on Vector Control of Permanent Magnetic Synchronous Motor Using High Resolution Encoder

In-Sung Hwang, Jung-Hak Jang, Sun-Ki Hong

Department of Information Control Engineering, Hoseo University

Abstract - AC Servo system has been implemented to semiconductor equipments system for their requirements of the high resolution control. This paper is based on the newly produced DSP TMS320F2812 which has the performance of fast processing speed, 150 MIPS, and rich peripheral interface. The implemented system has been developed for the position control that also has speed and current control as inner loops. The controller implemented a high precision position control system with SVPWM and digital PI control and using high resolution rotary encoder.

1. 서 론

본 논문에서는 반도체 제조를 위한 AC 서보 모터의 정밀 위치 제어에 관하여 연구하였다. 제어기는 150 MIPS의 고속 처리가 가능한 TI사의 차세대 모터 제어용 DSP TMS320F2812를 이용하여 컨트롤러를 구성하였으며, 2,500 PPR 분해능의 광학식 중분형 엔코더가 장착된 PMSM에 대하여 위치 제어를 수행하고, 17bit 절대치식 엔코더가 장착 된 PMSM에 대한 위치 제어 연구도 수행하였다. 17bit 절대치식 엔코더는 전용 직렬 통신 IC를 사용하여야 하며 연속회전시 16bit 위치 분해능을 갖으며, 2500 PPR의 중분치식 엔코더를 장착한 경우 보다 26배 정도의 높은 분해능의 위치 제어가 가능하다.

2. 본 론

2.1 제어 시스템 구성

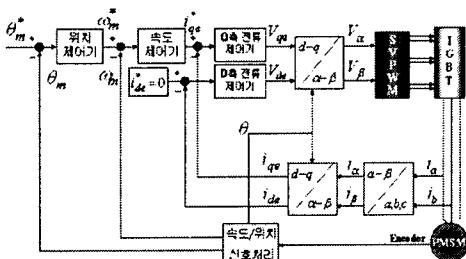


그림 1. 전체 제어 시스템 블록 다이어그램

위의 그림 1은 시스템의 전체 블록도이다. TMS320F2812를 이용하여 AC서보 모터의 벡터제어를 구현하여 위치제어를 수행하는 블록도이다. 엔코더를 통해서 얻은 PMSM의 회전자 위치와 변위를 검출하여 속도를 얻고, 이를 적분하여 위치 값을 얻는다. 위치제어기는 위치 명령 값을 받아 하위루프의 속도제어기에 속도명령 값을 입력시키고, 속도제어기는 속도명령을 받아 좌표변환을

통한 d-q축 각각의 전류 제어 명령을 출력하게 된다. 이때 모터의 상전류를 검출하는 전류 센서의 출력 값을 A/D 변환 하여, 전류 제어기 채환을 받게 된다. 전력 효율을 높이기 위해 부하에 공급되는 3상 신호는 SVPWM 방식을 사용하였다 [3,4]. θ_m^* 은 위치지령이고, θ_m 은 PMSM 회전자의 위치, ω_m^* 은 속도지령, ω_m 은 측정 속도다.

2.1.1 전류 제어기

전류 제어기는 PI 제어를 하였으며, 적분기의 와인드업(windup) 현상을 방지하기 위하여 제한기의 입력과 출력의 차이를 앤티 와인드업(Anti-windup) 이득(K_a)을 적분기에 연결하였다. 전류제어기의 출력 값(전압)은 전류오차와 전류에 대한 궤환 성분(V_{fb}^*)과 역기전력 보상을 위한 전향 성분(V_{fb}^*)으로 구성된다. 역기전력 성분에 대한 보상이 정확히 이루어진다면 전향성분은 제거되고, 페루프 전달함수는 하나의 극점과 2개의 영점을 가진 시스템이 된다 [1]. 그리고 분자 부분의 극점을 분모 부분의 영점이 상쇄시킬 수 있다면 이 식은 하나의 영점을 가진 1차 지연 시스템으로 해석할 수 있을 것이다. K_p 와 K_I 를 식 1과 같이 설정하면 분모 부분의 영점이 분자 부분의 극점을 상쇄시킬 수 있게 되고 식 2와 같은 1차 지연함수로 표현 가능하다.

$$K_p = L\omega_c, \quad K_I = R\omega_c \quad (\text{식 } 1)$$

$$I(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (\text{식 } 2)$$

식 2는 주파수 대역 을 가지는 일차 지연 함수이다. 일반적으로 PI전류제어기의 특성을 나타내는 변수는 페루프의 주파수 대역(ω_c)이다. 이 주파수 대역은 전류제어기의 제어주기나 PWM 스위칭 주파수에 의하여 제한되는데, 일반적으로 전류제어기의 제어주파수의 1/10정도가 전류제어기의 주파수 대역의 최대로 주어지며, 1/20 정도에서 안정하게 사용할 수 있다 [1].

2.1.2 속도 제어기

속도 제어기는 PI 제어를 사용하였고, 전류제어기의 교차각 주파수를 PI속도 제어계의 교차각 주파수보다 충분히 크게 잡아서 속도 제어계의 교차각 주파수(ω_{sc})에서는 전류제어계의 페루프 전달함수를 1로 근사 시킬 수 있었다. 또한 속도 제어기의 절점주파수가 ω_{sc} 의 수분의 1이하인 경우에서 PI 속도제어계의 전방경로 전달함수는 식 3과 같다 [2].

$$G_{sc} \equiv K_{ps} \times \frac{K_T}{J_m s} \quad (\text{식 } 3)$$

그러므로 $|G_{sc}(j\omega_{sc})|$ 값이 1이 되도록 하면 속도제어 기의 주파수 대역폭이 ω_{sc} 가 되고, 이 경우 비례이득을 구하면 식 4 와 같다 [1].

$$K_p = \frac{J_m \times \omega_{sc}}{K_r} \quad (\text{식 } 4)$$

$$K_u = K_p \times \omega_{pi} \square K_p \times \frac{\omega_{sc}}{5} \quad (\text{식 } 5)$$

적분기 이득 K_{is} 값은 통상 PI 절점주파수가 $\omega_{pi} \leq \omega_{sc}/5$ 가 되도록 하여 식 5 와 같이 구하였다.

2.1.3 위치 제어기

그림 2 는 P 위치제어기의 블록도를 나타낸다. 일반적으로 지령 위치에 대한 스텝 응답이 오버슈트를 생성하는 것은 바람직하지 않다. 그러므로 위치제어기는 P제어기를 이용한다. 속도 제어계의 교차 각 주파수가 위치제어계의 교차각 주파수와 비교하여 충분히 크다고 가정하면 속도 제어계의 전달함수는 1로 근사화 될 수 있고, 이때의 위치 제어계의 전달함수는 식 6 과 같다. ω_p 는 위치제어계의 교차각 주파수로 위치 지령에 대한 응답을 결정한다.

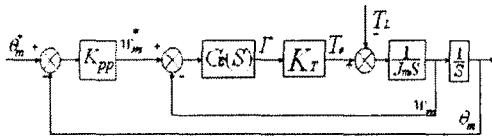


그림 2. 위치 제어기 블록 다이어그램

$$G_p(S) = \frac{\theta_m}{\theta_m^*} = \frac{\omega_p}{S + \omega_p} \quad (\text{식 } 6)$$

2.2 모터 파라미터와 증분형 엔코더 실험

표 1 은 실험에 사용된 AC서보 모터의 사양과 주요 파라미터의 값을 나타낸다. 이러한 모터의 주요 파라미터들은 위치 제어기, 전류 제어기 그리고 속도 제어기의 적분기, 비례기의 이득을 결정에 사용하므로 중요하다. 제어 대상이 되는 모터의 정확한 사양을 알지 못한다면 모터가 가지는 최대 성능을 내지 못할 것이다. 이러한 PMSM 타입 AC모터를 가지고 속도 및 위치에 대한 주종 실험을 실행하였다. 본 논문에 사용된 전류 센서로는 5 A에서 4 V 가 출력되는 HINODE사의 P10-5/4를 사용하였고 이를 3V 스케일로 바꾸어 TMS320F812에 내장된 12비트의 A/D변환기에 입력된다.

표 1. PMSM의 사양과 주요 파라미터

상수 / 극수	3상 4극
정격 출력	100 [W]
관성 모멘트	0.11 [kg.cm.s^2]
정격 속도	3000 [rpm]
토크 상수	3.24 [kgf*cm]
상당 저항	4 [Ω]
상당 인덕턴스	11.4 [mH]
역기전력 상수	0.11 [Vrms/rad/s]

각각의 제어 정수의 값을 2.2.1~2.2.3장의 식 6, 7, 8, 9, 10, 11 을 이용하여 설정하였다. 전류제어는 10 kHz의 스위칭 주파수를 사용하였고, 전류제어 주기 또한 10 kHz이다. 그리하여 최대 주파수 대역의 약 1/20인 3,000 rad/s로 ω_p 를 설정하였다. 속도 제어계의 교차각 주파수는 전류 제어계의 교차각 주파수의 1/10인 300 rad/s로 설정하였다. 위치 제어계의 교차각 주파수 ω_p 를 속도 제어계의 교차각 주파수의 1/10인 30 rad/s로 설정하

였다 [6]. 그림 3, 4는 엔코더 체배에 따른 위치 제어 실험으로 모두 기계각 360도에 해당하는 펄스 값(PPR)을 위치 명령으로 주었다. 본 논문의 실험에서는 2,500 PPR 짜리 증분형 엔코더를 사용하였고, 4체배 된 엔코더 펄스를 최대로 이용한 10,000 펄스 위치제어 명령에도 충돌함을 확인하였다. 실험 그래프 모두 Y축은 위치명령 펄스 값이고, X축은 시간 축으로 ms 단위이다.

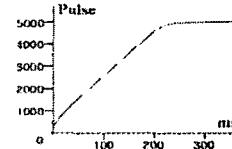


그림 3. 위치 제어

5,000 PPR 실험

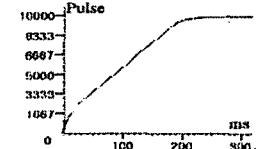


그림 3. 위치 제어

10,000 PPR 실험

2.3 절대치형 엔코더와 신호 처리

위의 증분형 엔코더 펄스 체배에 의한 고분해능 제어에는 한계가 따른다 기본적인 펄스의 분해능이 작기 때문이다. 이에 본 연구에서는 1회전에 17bit, 연속 회전에 16bit의 절대위치 값을 출력해 주는 고분해능 엔코더를 장착하여 위치제어를 하려는 연구를 시작하였다. 광학식 증분형의 경우 가격대비 성능은 좋으나 위치제어에 한계가 있다. 절대치형의 엔코더는 증분형보다는 비싸지만 분해능이 기계각 360도를 최소 6만 등분 이상 할 수 있기 때문에 PMSM의 최대 위치제어 분해능을 알아 볼 수 있는 실험이라는데 의의가 있다. 절대치 엔코더의 경우 Bit 수가 높아서 페레럴 형식으로 데이터를 교환하기 위해서는 많은 선이 필요해 지기 때문에 보통 시리얼 형태의 데이터를 출력해 주는 방식이 대부분이다. 본 연구에서 사용된 절대치 17bit/turn, 16bit/turns 의 엔코더도 신호를 시리얼 형태로 출력해준다. 이 신호를 DSP 자체의 시리얼 통신 포트를 이용하여 직접 처리가 가능하지만, 프로세서의 부하를 줄이고 가장 정확한 동작을 위해 본 연구에서는 우선 전용 IC를 이용하였다. 이 리시버IC는 시리얼 형태의 데이터를 받아서 페레럴 형태로 분리 시켜서 DSP로 공급하고 있다. 분리된 16개의 bit 데이터는 TMS320F2812의 GPIO(General Purpose I/O) 핀 16 개와 리시버 IC를 제어하는 명령선들도 GPIO에 연결되어 있다.

2.4 3.3 V 시스템과 5 V 시스템 사이의 신호교환

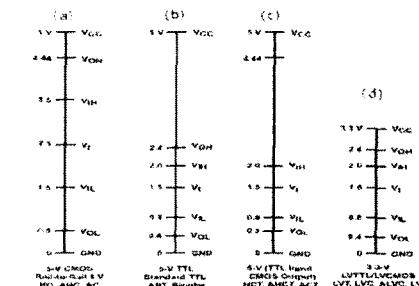


그림 7. 소자의 High, Low 인식

그림 7 은 소자의 종류에 따른 High, Low 인식 레

벨을 나타낸 그림이다[8]. V_{OH} 는 드라이버에서 출력하는 Logic High 신호의 최저 전위이다. V_{IH} 는 리시버가 받아들일 수 있는 Logic High 신호의 최저 전위이다. 여기에서 Logic High의 정확한 전달을 위해서는 반드시 $V_{OH} > V_{IH}$ 여야 한다. V_{IL} 은 리시버가 받아들일 수 있는 Logic Low의 최고 전위다. V_{OL} 은 드라이버가 제공하는 최고의 Logic Low의 최고 전위다. Logic Low의 정확한 전달을 위해서는 반드시 $V_{OL} < V_{IL}$ 이 만족되어야 한다. TMS320F2812는 3.3 V CMOS 타입으로 그림의 (d)와 같은 신호 규격을 따른다. 그리고 리시버 IC는 5 V CMOS 타입으로 (a)와 같은 형태의 신호 규격을 따른다. 이는 기존의 5 V 시스템과 같다. (a) 와 (d)는 서로 high, low를 인식하는 신호 규격이 틀리다. 이러한 전위가 틀린 시스템의 신호 연결을 위해서 DSP 측에서 출력된 제어 신호는 (c)와 같은 형태의 신호 규격을 갖는 HCT 타입의 버퍼를 한번 거쳐서 리시버 IC로 공급되도록 하였다. HCT 타입의 소자는 TTL 레벨의 신호를 받아 들여서 5 V CMOS 레벨의 출력을 낸다. LS 타입이나 HC 타입 사용하여도 High, Low를 인식 할 수는 있다. 그러나 인식률이 문제가 되거나 노이즈 마진이 적어서 신뢰도가 떨어질 수도 있다[8]. 그림 7에서 V_{OH} , V_{IH} , V_{IL} , V_{OL} 을 고려해서 보면 (d)의 출력 신호를 (c)가 인식하고, 이를 다시 (a)에게 출력 하였을 경우 Logic High, Low에는 문제가 없음을 알 수 있다.[8] 이번에는 리시버 IC에서 출력되는 폐레벨 형태의 위치정보를 가져오는 문제다. 5 V 시스템에서 출력된 신호를 3.3 V 시스템에서 받아들이는 것이므로 잘못 처리 할 경우 DSP가 손상 될 수도 있다. 저항을 이용하는 간단한 방법도 있지만, 안정적인 인식률을 기대하기 어려운 문제들이 많다. 가장 안정적인 방법은 Voltage Level Shifter를 사용하는 방법이다. 이 레벨 쉬프터는 양방향 통신이 가능하지만, 리시버 IC에서 DSP로 신호를 공급할 때만 사용하였다. 본 연구에서 사용한 상호간의 위치 레벨 인식을 고려한 회로 설계는 가장 신뢰도가 높은 위치 레벨 인식률을 가져오는 방법이다.

2.5 TMS320F2812 컨트롤 시스템

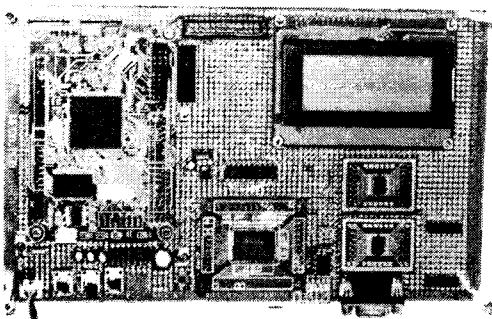


그림 8. 전체 시스템 사진

그림 8 은 이번 연구를 위해서 제작 된 컨트롤러 보드

이다. 좌측의 PCB 보드는 TMS320F2812가 실장 된 프로세서 보드이고, 중앙 하단에 변환기판에 실장 되어 있는 소자가 리시버 IC이다. 중앙에 리시버 IC 바로 위에 있는 소자가 DSP의 3.3 V 신호를 5 V 시스템인 리시버 IC에게 전달해 주는 HCT 타입 버퍼다. 우측 하단에는 레벨 쉬프터가 변환기판에 실장 되어 있으며, 16 bit의 신호를 처리해야 하기 때문에 상위, 하위 8 bit 씩 두 개가 사용 되었다. 그 밑에 있는 D-sub 커넥터는 엔코더와의 연결을 위해서 사용되었다.

3. 결 론

본 연구에서는 TMS320F2812를 이용하여 위치제어 실험을 하였으며, 충분형 엔코더를 통하여 위치 제어를 기계각 360도당 2,500, 5,000, 10,000 등분의 분해능으로 위치제어 실험을 하여 위치 추종이 가능함을 확인하였다. 2,500 PPR의 엔코더를 사용했으며, 고분해능의 엔코더를 사용하면 더욱 높은 분해능의 위치제어가 가능 할 것이다 예상하였다. 이에 16 bit의 분해능을 출력해 주는 절대치형 로터리 엔코더를 통한 위치 제어 실험을 시작하였다. 아직은 실험 초기 단계이기 때문에 3.3 V 시스템과 5 V 시스템 사이의 신호 교환을 위한 회로 구성으로 상호간 신호가 오고 가는 것을 확인하였다. 정확한 위치값을 받아오기 위해 실험이 진행되고 있으며, 실제로 16 bit 분해능의 위치 값을 받아올 수 있게 된다면, 이전의 충분형 엔코더를 사용한 위치 제어 실험보다 대폭 향상된 회전형 전동기의 고분해능 위치 제어가 가능할 것이다. 아울러 이러한 기술은 향후 선형 동기 전동기(Linear Synchronous Motor)에도 같은 방식으로 적용 할 수 있을 것이다.

감사의 글

본 과제는 교육인적자원부와 산업자원부의 출연금 및 보조금으로 수행한 산학협력 중심대학 육성사업의 연구 결과입니다.

(참 고 문 헌)

- [1] 설승기, 전기기기제어론, 도서출판 브레인코리아, pp.65~117, 239~277, 2002.
- [2] 小山正人, 玉正伸三, “산업용 서보 모터의 제어 시스템 설계”, 대영사, 184~213.
- [3] Marian P.Kazmierkowski, Luigi Malesani, "Current Control Techniques for Three-Phase Voltage-Source PWM Converter : A Survey", IEEE Trans. on Ind. electronics vol.45, no. pp.691~702. OCTOBER 1998.
- [4] Ahmet M.Hava, Seung-Ki Sul, Russel J.Kerkman, Thomas A.Lipo, "Dynamic Overmodulation Characteristics of Triangle Intersection PWM Methods", IEEE Trans. on Industry Application, Vol. 35, No. 4, pp 896~907, July/August 1999.
- [5] Zhang Dongliang, Ai Xing, Xu Chuanjun, Zhang Chengrui, "DSP-Based Software AC Servo Systems with PM Synchronous Motors", pp.755~758, Shandong University Jinan.
- [6] 윤덕용, "공간전압 벡터 PWM기법을 이용한 영구자석형 동기전동기의 속도제어", 단국대학교 대학원 박사논문, pp.8~22, 1995.
- [7] Texas Instruments, "TMS320F28x Event Manager Peripheral Guide", May 2002.
- [8] 백종철, "TMS320C24계열을 이용한 DSP 하드웨어 설계", 싱크워스, 184~196, 2004.