

고분해능 위치센서 없는 영구자석 동기 전동기의 속도 제어

장석영\*, 조한욱\*, 유대준\*, 박지훈\*, 성소영\*\*, 양현섭\*\*\*  
 충남대학교\*, 한국 재활공학 연구소\*\*, 삼성 테크윈\*\*\*

Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor without High Resolution Position Sensor

Seok-Myeong Jang\*, Han-Wook Cho\*, Dae-Joon You\*, Ji-Hoon Park\*, So-Young Sung\*\*, Hyun-Sup Yang\*\*\*  
 Chungnam National University\*, Korea Orthopedics & Rehabilitation Engineering Center\*\*, Samsung Techwin Co.\*\*\*

**Abstract** - This paper presents test results for the speed control system of PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor). The PMSM has higher efficiency and torque per volume than other motors because PMSM use permanent magnet of high energy density instead of field winding. In this paper, current and speed control of PMSM using DSP was accomplished.

1. 서 론

근래, 전동기 구동시스템에는 대용량의 고속 스위칭 소자 및 마이크로프로세서, DSP(Digital Signal Processor)가 많이 응용되고 있는데, 모터제어를 위한 주변기가 내장된 DSP를 이용할 경우 개발 시간의 단축과 신뢰성을 향상시킬 수 있다는 장점을 갖는다. 본 논문에서는 영구자석형 동기 전동기의 속도제어를 위해 전류 및 속도의 PI 제어를 DSP(TMS320 F2812)를 중심으로 구현하였다. 고속 운전의 응용을 위하여 엔코더와 같은 고분해능 위치센서 없이 속도제어 시스템을 구현하였다.

2. 영구자석 동기전동기의 수학적 모델링

영구자석형 동기전동기의 3상에서의 전압방정식은 식(1)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pM^1 & -\frac{1}{2}pM & -\frac{1}{2}pM \\ -\frac{1}{2}pM & R_s + pM^1 & -\frac{1}{2}pM \\ -\frac{1}{2}pM & -\frac{1}{2}pM & R_s + pM^1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

3상의 전류의 합이 0 이므로, 이 조건을 이용하면 전압방정식은 식(2)로 간략화 된다.

$$\begin{bmatrix} V_{as} \\ V_{bs} \\ V_{cs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{as} \\ e_{bs} \\ e_{cs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서,  $L_s = L_s + \frac{3}{2} M$ 이다.

3상 교류 좌표계 a, b, c상을 2상 좌표 d, q축으로 변환하기 위한 행렬은 식 (3)과 같고, 동기좌표계에서의 영구자석형 동기전동기의 d-q 전압방정식을 구하기 위한 행렬은 식(3), (4)와 같다.

$$T(\theta) = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{\sqrt{3}} & -\frac{1}{\sqrt{3}} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$R(\theta) = \begin{bmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{bmatrix} \quad (4)$$

즉, 영구자석형 동기 전동기를 동기 회전좌표계에서의 전압방정식을 이용하여 표현하면 식(5)로 표현된다.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_r L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \phi_f \end{bmatrix} \quad (5)$$

그리고, 영구자석 동기 전동기의 출력 전력은 식(6)과 같이 구해진다.

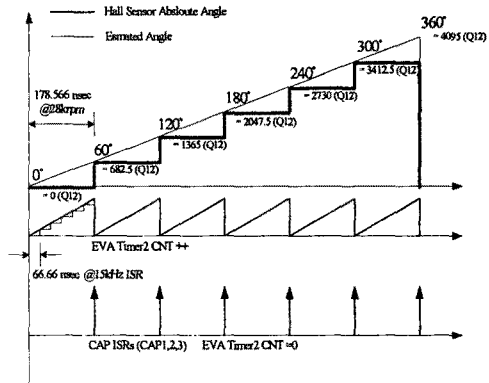
$$P = \frac{3}{2} (V_{ds}^e i_{ds}^e + V_{qs}^e i_{qs}^e) \quad (6)$$

여기서, 고정자 동손 및 자기에너지 변화에 해당하는 항을 제외하고 기계적 출력식만 적용하면, 기계적 출력은 식(7)과 같다.

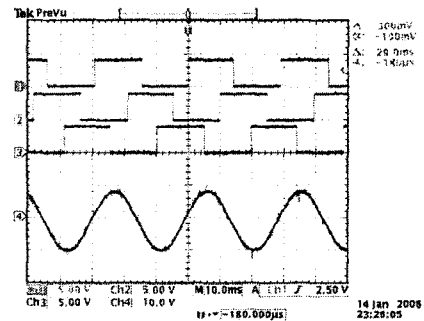
$$T_e = \frac{3}{2} \phi_f i_{qs}^e \quad (7)$$

3. 고분해능 위치 센서 없는 회전각 추정 및 기동법

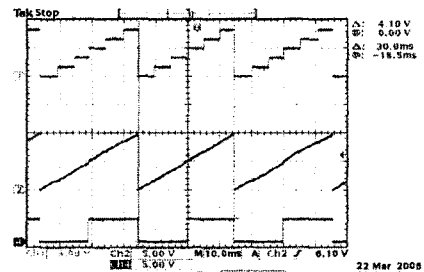
그림 1은 엔코더 등 고분해능 위치 센서 없이 3개의 홀센서만으로 1-회전각을 추정하기 위한 개념도를 나타낸다. 전기각 60 내에서 속도를 계산하고 이를 적분하여 0-360도의 전기각을 표현하였다.



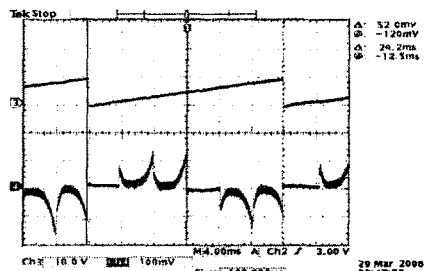
〈그림 1〉 홀센서에 의한 회전각 추정



〈그림 2〉 홀센서 파형 및 역기전력 U-상



〈그림 3〉 홀센서에 의한 절대 회전각 및 추정된 회전각



〈그림 4〉 120도 도통 (BLDC모드)운전시 회전각 및 전류파형

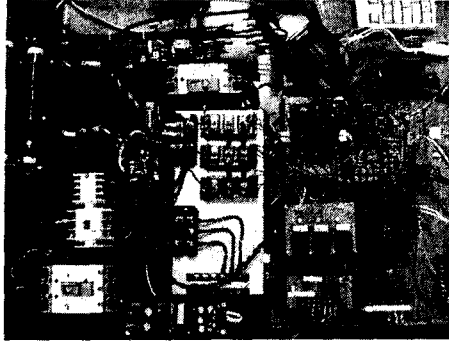


그림 5) DSP-TMS320F2812를 적용한 벡터제어 인버터 하드웨어

그림 2는 3개의 U, V, W 상의 홀센서 파형과 제어대상 전동기의 U-상 역기전력 파형을 나타낸다. 그림 3은 전기각 60도 간격으로 표현되는 6-분해능 절대각과 추정된 회전각을 각각 나타낸다. 그림 4는 PMSM 기동을 위120도 도통형 운전 (BLDC 모드)시 추정각과 U-상 전류 파형을 각각 나타낸다.

#### 4. TMS320F2812를 이용한 제어기 설계

##### 4.1 하드웨어

PMSM 속도제어를 위한 하드웨어는 클럭주파수가 150 MHz 인 TMS320F2812를 적용하였다. 고속 IGBT와 MC, 전자틸레이, 평활콘덴서, 초기충전저항, 제동저항 등을 이용하여 전력변환부를 구성하였다. 그림 5는 구성된 벡터제어 인버터 하드웨어를 보여준다.

##### 4.2 SVPWM을 이용한 전류-속도 제어기 설계

전류제어기의 출력값은 전류오차와 전류에 대한 피드백 성분  $V_b^*$ 와 역기전력 보상을 위한 전향 성분  $V_{ff}^*$ 로 구성되며 식(8)과 같다.

$$V^* = V_b^* + V_{ff}^* \quad (8)$$

역기전력 성분에 대한 보상이 정확히 이루어진다면 출력전류와 전류 지령치의 관계는 식(9)와 같다.

$$I(s) = \frac{\frac{K_p}{Ls + \frac{R}{L}} + \frac{K_I}{L}}{s^2 + \frac{K_p + R}{L}s + \frac{K_I}{L}} * I^* \quad (9)$$

비례이득과 적분이득을 선정하면 전달함수를 식(10)과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 주파수 대역을 갖는 일차 지연 함수이다.

$$I(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (10)$$

일반적으로 PI 제어기의 특성을 나타내는 변수는 페루프의 주파수 대역이다. 이 주파수 대역은 전류제어기의 주기나 PWM 스위칭 주파수에 의하여 제한되는데, 일반적으로 전류제어기의 제어주파수의 1/10 정도가 전류제어기의 주파수 대역의 최대로 주어지며, 1/20 정도에서 안정하게 사용할 수 있다.

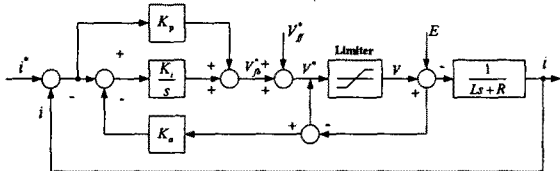


그림 6) PI 전류 제어기 블록도

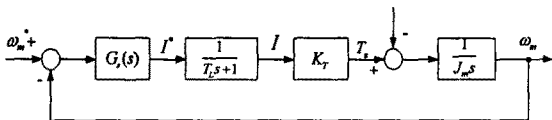


그림 7) PI 속도 제어기 블록도

본 논문에서 사용하는 디지털 PI 제어기의 제어동작은 식(8)과 같이 정의된다.

$$u(t) = K_p e(t) + K_I \int_0^t e(t) dt \quad (11)$$

따라서, 식(8)의 PI 속도제어기의 전달함수는 식(12)와 같다.

$$G_s(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_I}{s} \quad (12)$$

PI 속도 제어기의 전방경로 전달함수는 식(13)과 같다.

$$G_{sc}(s) = \left( K_p + \frac{K_I}{s} \right) * \frac{1}{T_s s + 1} * \frac{K_T}{J_m s} \quad (13)$$

전류제어기에서 교차각 주파수를 PI 속도제어기의 교차각 주파수보다 충분히

히 크게 잡으면 속도제어기가 교차각 주파수  $\omega_{sc}$ 에서는 전류제어기의 페루프 전달함수를 1로 근사시킬 수 있다. 또한 속도 제어기의 절점주파수가  $\omega_{sc}$ 의 수분의 1이 아닌 경우  $\omega_{sc}$ 에서 PI속도 제어기의 전방경로 전달함수는 식(14)과 같다.

$$G_{sc} = K_p * \frac{K_T}{J_m s} \quad (14)$$

이득이 1이 되도록  $K_{sp}$ 의 값을 구하면

$$K_{sp} = \frac{J_m * \omega_{sc}}{K_T} \quad (15)$$

여기서,  $K_p$  : 비례이득,  $K_I$  : 적분이득이다.

그리고,  $t = nT_s$  를 적용하여 유한차분근사 방법에 의해 다시 표현하면 PI제어기의 계산식은 식(15)과 같이 된다.

$$u_n = u_{n-1} + (K_p + K_I T_s) e_n - K_p * e_{n-1} \quad (15)$$

그림 8은 홀센서 파형, SVPWM을 이용한 U상 기준전압 파형을 각각 나타낸다. 그림 9는 기동-운전시 3상 홀센서 파형 및 속도 약 5000rpm 수렴 특성을 보여준다.

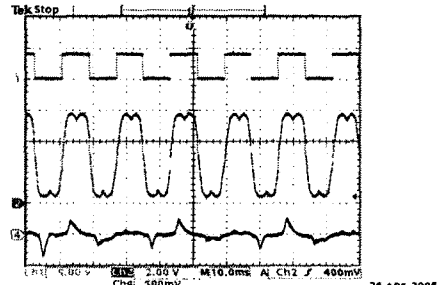


그림 8) 홀센서 파형 및 U상 기준전압 파형

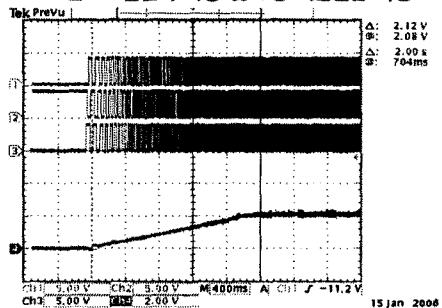


그림 9) 기동-운전시 홀센서 파형 및 속도수렴특성

표 1) 적용된 전동기의 정격 및 상수

Item	Value	
Coil dependent	Phase Resistance	0.484 Ω
	Phase Inductance	0.377mH
	Back EMF Constant	0.0483 V/rad/sec
Dynamic parameters	Torque Constant	0.0772Nm/A
	Rated Voltage	3phase 220Vac
	Max. cont. current	4.7 A
	Max. cont. torque	29mN
Mechanical parameters	Max. Speed	30,000rpm
	Rotor Inertia	9.9e-7kgm²
	Time Constant	779 usec

#### 5. 결 론

본 논문에서는 DSP (TMS320F2812)를 이용하여, 영구자석형 동기전동기의 속도제어를 위한 하드웨어를 구현하고 실험을 수행하였다. 향후, 센서리스 운전, 약제자 제어 운전을 위한 이론적 연구 및 실험 과 초고속 운전애의 적용에 대한 연구가 진행될 예정이다.

#### [참 고 문헌]

- [1]철승기, 전기기기제어론, 도서출판 브레인 코리아, 2002.
- [2]Chee-Mun Ong, Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice Hall PTR, 1998.
- [3]Texas Instrument. "DSP Solution of a Speed Controlled Brushless DC Driver part," 1997
- [4]최치영, 홍선기, "고성능 DSP를 이용한 AC 서보 모터의 벡터제어," 대한전기학회춘계학술대회(B)논문집, pp.258-261.2003.