

영구자석형 동기 전동기의 속도 제어

장석명, 박병임, 조한욱, 유대준, 이성호\*  
충남대학교, LG D/A\*

Speed Control of Permanent Magnet Synchronous Motor

S. M. Jang, B. I. Park, H. W. Cho, D. J. You, S. H. Lee  
Chungnam National University, LG D/A\*

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

1. 서 론

기존의 동기 전동기는 주로 대용량으로 전력계통의 발전용이나 역률 조정용으로 사용되었으나 1960년대 이후 전력전자 기술의 발달로 인한 제어성의 향상으로 유도전동기와 더불어 사용범위가 확대되었다. 동기 전동기는 유도전동기에 비해 고가이지만, 역률조정이 가능하고 큰 공극으로 인해 전기자 반작용의 영향을 줄일 수 있어 안정적이다. 또한 영구자석형 동기 전동기(Parmanent Magnet Synchronous Motor ; PMSM)의 경우, 회전자 축의 손실 등 전체 모터 및 인버터의 손실이 유도전동기에 비해 적다.[1] 필요한 자속을 외부 전원이 아닌 영구자석에 의해 일정하게 공급받기 때문인데, 회로류 계통의 자석과 같은 고 에너지밀도 자성체의 지속적인 발달도 동기전동기의 활용가능성을 높여주고 있다. 이런 특성들로 인해 제품의 소형화, 고효율화가 가능하고, 소형에서 중형급 이상의 용량 대에서 가정용, 산업용, 군사용 같은 특수 목적용도로 고성능 제어 시스템에 광범위하게 적용할 수 있다.

근래, 전동기 구동시스템에는 대용량의 고속 스위칭 소자 및 마이크로프로세서, DSP(Digital Signal Processor)가 많이 응용되고 있는데, 모터제어를 위한 주변기기가 내장된 DSP를 이용할 경우 개발 시간의 단축과 신뢰성을 향상시킬 수 있다.[2]

본 논문에서는 영구자석형 동기 전동기의 속도제어를 위해 전류 및 속도의 PI 제어를 구현하여 디지털 시뮬레이션을 이용해 검증하였고, DSP(TMS320F240)를 중심으로 구성된 Driver를 속도제어에 응용하였다.

2. 영구자석형 동기 전동기의 수학적 모델링

2.1 영구자석형 동기 전동기의 기본 특성 방정식

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

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

여기서,  $M^1 = I_s + M$

- $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  : 고정자 a, b, c 상 전압
- $i_{as}, i_{bs}, i_{cs}$  : 고정자 a, b, c 상 전류
- $e_{as}, e_{bs}, e_{cs}$  : 영구자석 계자가 a, b, c 상 고정자 권선에 유기되는 속도 기전력
- $R_s$  : 고정자 권선 저항
- $I_s$  : 전기자 누설 인덕턴스
- $M$  : 전기자 권선사이의 상호 인덕턴스
- $p$  : 미분 연산자 ( $\frac{d}{dt}$ )

3상의 전류의 합이 0 이므로, 이 조건을 이용하면 전압 방정식은 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,  $L_s = I_s + \frac{3}{2} M$ 이다.

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

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

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

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.

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

전동기의 속도제어 시스템은 크게 두 부분으로 구성된

다. 하나는 실제속도가 기준치를 추종하도록 하는 속도 제어부이며, 내부에 전류제어 루프가 이상적으로 동작한다는 가정 하에 PI 제어를 사용하였다. 속도제어 시스템을 구성하는 다른 하나는 전류제어부로서 이는 속도제어부에서 요구하는 기준 전류를 전동기에 공급하기 위하여 인버터를 구동하는 부분이다.

### 3. 제어 시스템 구성

#### 3.1 전체시스템 블록도

본 논문에서 구성한 제어시스템은 크게 전원부, 제어부, 3-Phase Inverter로 구성되며, 그림 1처럼 블록도로 나타낼 수 있다.

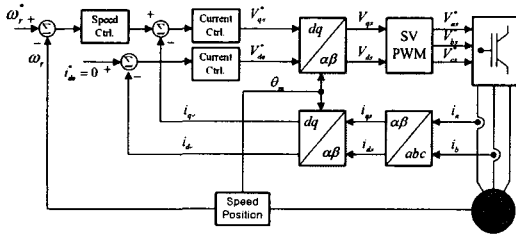


그림 1. 전체 시스템 블록도

#### 3.2 PI 제어기 설계

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

$$u(t) = K_p e(t) + K_i \int_0^t e(t) dt \quad (8)$$

따라서, 식(8)의 PI 속도제어기의 전달함수는 식(9)와 같다.

$$G_s(s) = \frac{U(s)}{E(s)} = K_p + \frac{K_i}{s} \quad (9)$$

PI 속도 제어기의 전방경로 전달함수는 식(10)과 같다.

$$G_{sc}(s) = \left( K_p + \frac{K_i}{s} \right) * \frac{1}{T_m s + 1} * \frac{K_T}{J_m s} \quad (10)$$

전류제어기에서 교차각 주파수를 PI 속도제어계의 교차각 주파수보다 충분히 크게 잡으면 속도제어계 교차각 주파수 ω\_sc에서는 전류제어계의 페루프 전달함수를 1로 근사시킬 수 있다. 또한 속도 제어기의 절점주파수가 ω\_sc의 수분의 1이 아닌 경우 ω\_sc에서 PI속도 제어계의 전방경로 전달함수는 식(11)과 같다.

$$G_{sc} \approx K_p * \frac{K_T}{J_m s} \quad (11)$$

이득이 1이 되도록 K\_sp의 값을 구하면

$$K_{sp} = \frac{J_m * \omega_{sc}}{K_T} \quad (12)$$

여기서, K\_p : 비례이득, K\_i : 적분이득이다.

그리고, 식(8)에 t = nT\_s 를 적용하여 유한차분근사 방법에 의해 다시 표현하면 PI제어기의 계산식은 식(13)과 같이 된다.

$$u_n = u_{n-1} + (K_p + K_i T_s) e_n - K_p \cdot e_{n-1} \quad (13)$$

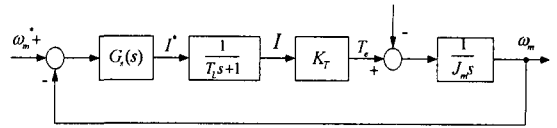


그림 3. PI 속도 제어기 블록도

전류제어기의 출력값은 전류오차와 전류에 대한 피드백 성분 V\_β\*와 역기전력 보상을 위한 전향 성분 V\_β//로 구성되며 식(14)와 같다.

$$V^* = V_{\beta}^* + V_{\beta}^{\prime\prime} \quad (14)$$

역기전력 성분에 대한 보상이 정확히 이루어진다면 출력 전류와 전류 지령치와의 관계는 식(15)과 같다.

$$I(s) = \frac{\frac{K_p}{L} s + \frac{K_i}{L}}{s^2 + \frac{K_p + R}{L} s + \frac{K_i}{L}} * I^* \quad (15)$$

비례이득과 적분이득을 식(15)와 같이 선정하면 전달함수를 식(16)과 같이 나타낼 수 있으며, 이는 주파수 대역을 갖는 일차 지연 함수이다.

$$I(s) = \frac{\omega_c}{s + \omega_c} \quad (16)$$

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.

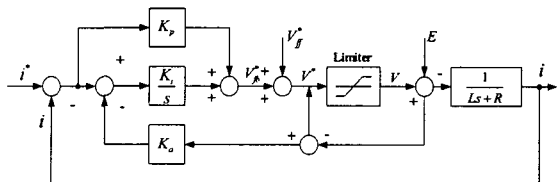


그림 4. PI 전류 제어기 블록도

## 4. 시뮬레이션 결과

표 1 적용된 전동기의 정격 및 상수

Model 1		
Coil dependant	Phase Resistance	5.25Ω
	Phase Inductance	0.46mH
	Back EMF Constant	2.62V/1,000rpm
	Torque Constant	25mNm/A
Dynamic parameters	Rated Voltage	19
	Max. cont. current	3.6A
	Max. cont. torque	29mN
Mechanical parameters	Max. Speed	8,000rpm
	Rotor Inertia	9.9e-7kg
	Time Constant	8ms

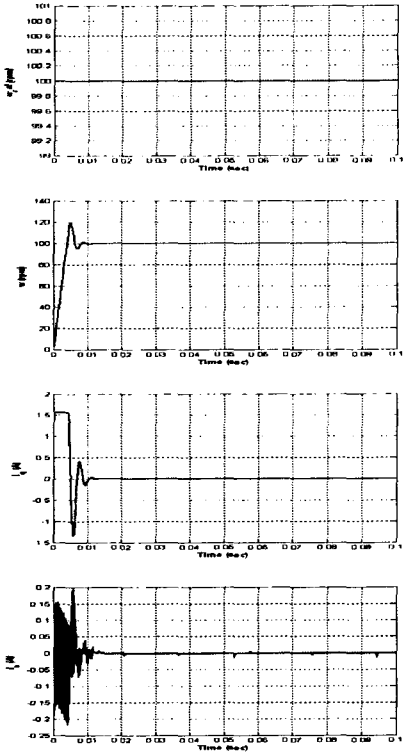


그림 5. 0-100 rpm 의 기동특성(시뮬레이션)

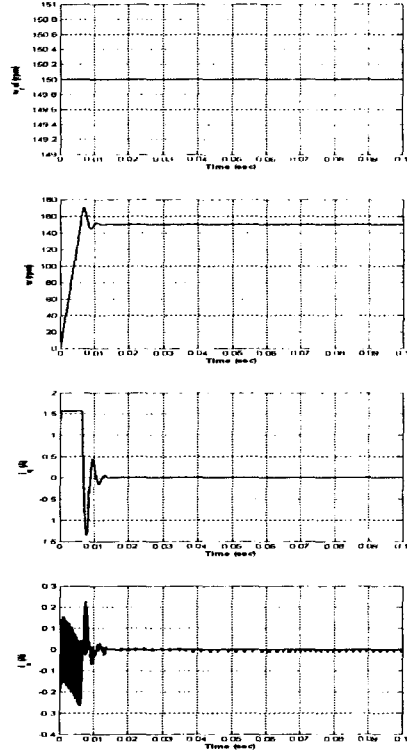


그림 7. 0-150 rpm 의 기동특성(시뮬레이션)

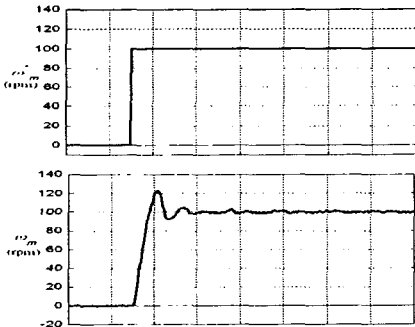


그림 6. 0-100 rpm 의 기동특성(실험)

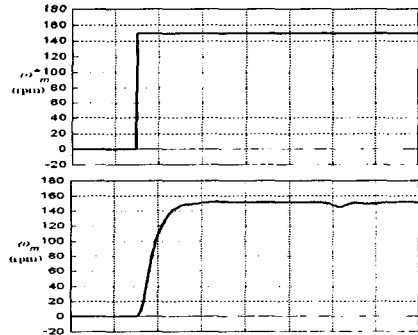


그림 8. 0-150 rpm 의 기동특성(실험)

표 1은 본 논문에 적용된 영구자석형 동기전동기의 제원을 나타낸다. 본 논문에서는 전류제어 주기를 55 $\mu$ s, 속도제어 주기를 4.2ms 단위로 수행하였다. 따라서, 전류제어기의 주파수 대역  $\omega_c$ 를 3000rad/sec 로 정하였으며, 속도 제어기의 주파수 대역은 1500rad/sec 로 설정하였다.  $K_{PI}=1.38$ ,  $K_{II}=16575$  로 설정하였고, 비례이득 및 적분이득은  $K_{PS}=1.12$ ,  $K_{IS}=1188$  로 설정하였다. 그림 5는 100 rpm 에 대한 속도 응답 시뮬레이션결과를 나타낸다. 지령속도, 속도응답, q축 전류응답, 상전류응답을 각각 나타내며, 시간의 단위는 샘플링 시간을 단위로 하였고 각 샘플시간은 100 $\mu$ s 이다. 정상상태 도달 시간은 약 10ms 이고, 20 rpm 정도의 최대 오버슈트가 발생하였다.

그림 7은 150 rpm 에 대한 영구자석 동기 전동기의 속도 응답 시뮬레이션 결과이다. 그림 6, 8은 100 rpm, 150 rpm 에 대한 실험 결과이며, 시뮬레이션 결과와 잘 부합된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 DSP (TMS320F240)을 이용하여, 영구자석형 동기전동기의 속도제어를 위한 시뮬레이션 및 실험을 수행하였으며, 두 결과가 잘 부합됨을 확인하였다.

### [참고 문헌]

- [1]설승기, 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 백터제어,"대한전기학회춘계학술대회(B)논문집, pp.258-261, 2003