

dSPACE 1104 시스템을 이용한 영구자석 동기전동기 벡터제어 구현

이용석*, 이동민, 지준근, 차귀수
순천향대학교 전기통신시스템학과

Vector Control Implementation of PMSM Using dSPACE 1104 System

Yong-Seok Lee*, Dong-Min Lee, Jun-Keun Ji, Gui-Soo Cha
Department of Electrical Communication System Engineering, SoonChunHyang University

Abstract - This paper presents a vector control implementation for SPMSM(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor) using dSPACE 1104 system and MATLAB/SIMULINK. SPMSM can be treated as a DC motor provided that currents of flux and torque component are controlled independently using vector control. Therefore various control algorithms for conventional DC motor control can be adopted to SPMSM. The system is designed to improve set-point tracking capability, fast response, and accuracy. In this paper, d-q equivalent modeling of PMSM is derived based on vector control theory. The PI controller is used for speed control and state feedback PI current control method is used for current control. For the implementation of high performance vector control system, dSPACE 1104 system is used. Simulations and experiments were carried out to examine validity of the proposed vector control implementation.

1. 서 론

오늘날 현대 산업의 발달로 우주 항공산업 및 각종 산업분야의 자동화 및 제어기기 분야에서 동특성이 우수한 성능의 서보 제어 시스템이 요구되고 있다. NC 선반, 공작기계, 로봇 등과 같이 정밀하고 빠른 응답 특성이 요구되는 서보제어용 전동기로는 대부분 직류전동기가 사용되어져 왔으나, 직류전동기는 구조상 정류자 및 브러시를 가지고 있어서 이에 대한 정기적인 유지 보수를 필요로 하는 단점이 있고, 최근에 와서 제어기술의 발전과 더불어 반도체 기술의 향상으로 인해 유지, 보수가 용이한 교류전동기로의 전환이 적극적으로 이루어지고 있다.

영구자석형 동기전동기는 회전자형 동기전동기와 같은 구조로 되어 있어 벡터제어(vector control) 이론을 적용하여 우수한 동특성을 갖는 속도제어 시스템을 구현할 수 있다. 벡터제어는 3상 교류입력을 2상 입력으로 등가 변환하여 고정자 전류를 토크를 발생시키는 q축 전류 iq_s와 자속을 발생시키는 d축 전류 ids로 분리하여 각각 독립적으로 제어함으로써 타여자 직류전동기와 유사한 특성을 얻도록 하는 것이다.

본 논문에서는 dSPACE 1104 시스템과 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 0.63kW 표면부착형 영구자석 동기전동기 구동시스템에 벡터 제어를 적용하여 실험을 통해 성능을 확인하였다. 이 시스템은 GUI(Graphic User Interface)기반으로 제어를 설계하고 Simulation을 한 다음 직접 실시간 프로그램으로 자동변환하여 제어기의 응답을 확인함으로써 전동기의 제어 시스템 개발을 짧은 시간 안에 매우 편리하게 구현할 수 있음을 소개하고자 한다.

2. 영구자석형 동기전동기의 모델링 및 벡터제어

2.1 3상 정자표계와 2상 회전자표계의 상호 변환

a, b, c 축의 전류를 d, q 축으로 변환하는 행렬식은 a, b, c 축을 α, β 축으로 변환하고 이를 다시 d, q 축으로 변환하는 과정을 거쳐게 되므로 다음과 같이 정리 된다

$$\begin{pmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & \sin\theta \\ -\sin\theta & \cos\theta \end{pmatrix} \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos 0 & \cos \frac{2\pi}{3} & \cos \frac{4\pi}{3} \\ \sin 0 & \sin \frac{2\pi}{3} & \sin \frac{4\pi}{3} \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} \quad (1)$$

$$= \frac{2}{3} \begin{pmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) \\ -\sin\theta & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix}$$

d, q 축을 a, b, c 상으로 변환하는 경우에도 역시 d, q 축을 α, β 축으로 변환하고 다시 a, b, c 상으로 변환하는 과정을 거쳐게 되므로 위의 식을 역변환하면 다음 식이 성립한다.

$$\begin{pmatrix} i_{as} \\ i_{bs} \\ i_{cs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} \cos\theta & -\sin\theta \\ \cos(\theta - \frac{2\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{2\pi}{3}) \\ \cos(\theta - \frac{4\pi}{3}) & -\sin(\theta - \frac{4\pi}{3}) \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{pmatrix} \quad (2)$$

2.2 영구자석 동기전동기의 모델링

회전자 좌표계로 좌표변환을 하여 영구자석형 동기전동기의 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + L_d \frac{di_{ds}^r}{dt} - \omega_r L_q i_{qs}^r \quad (3)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + L_q \frac{di_{qs}^r}{dt} + \omega_r L_d i_{ds}^r + \omega_r \lambda_f \quad (4)$$

발생 토크는 전류의 성분 id와 iq에 의해 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (\lambda_f i_{qs}^r + (L_d - L_q) i_{ds}^r i_{qs}^r) \quad (5)$$

표면부착형 영구자석 동기전동기의 경우에는 회전자에 돌극성이 없으므로 전동기의 d축 리액턴스와 q축 리액턴스가 같게 되어 발생토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_{qs}^r \quad (6)$$

회전자는 영구자석으로 되어 있어서 회전자의 쇠교자속이 일정하므로, 결국 고정자 전류의 토크발생 전류성분인 iq_s를 제어함으로써 전동기의 토크를 직접 제어할 수 있게 된다.

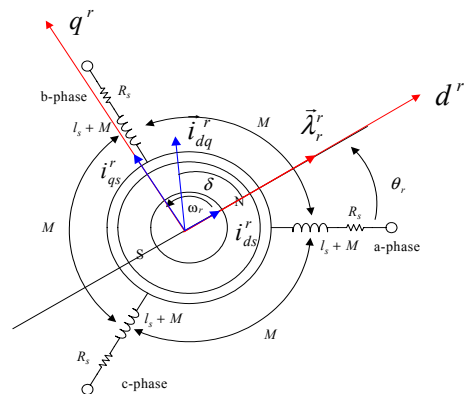
전동기가 부하를 구동할 때의 역학적인 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = J \frac{dw_m}{dt} + Bw_m + T_L, \quad w_m = \frac{P}{2} \omega_r \quad (7)$$

식 (6)과 식 (7)로부터 속도 제어 시스템 구성을 위한 PMSM의 모델은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} w_m = -\frac{B}{J} w_m + \frac{K_t}{J} i_{qs}^r - \frac{1}{J} T_L, \quad K_t = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f \quad (8)$$

2.3 영구자석 동기전동기의 벡터제어



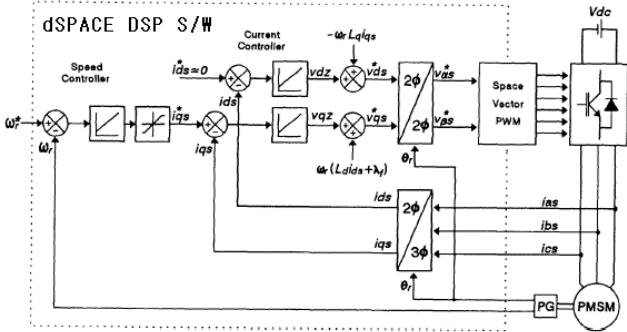
〈그림 1〉 표면부착형 영구자석 동기전동기 벡터도

벡터제어 기법은 교류전동기의 고정자 전류를 자속발생 전류성분인 id와 토크발생 전류 성분인 iq_s로 분리시켜 각각 독립적으로 제어함으로써, 타여자 직류전동기와 유사한 특성을 갖도록 제어하는 것이다. 이를 위해

전동기의 고정자 전류를 자속각을 기준으로 하여 제어하는데, 이를 벡터 제어 혹은 자속기준제어라 한다. 일반적으로 동기전동기를 정격속도 이내에서 운전할 경우에는 q축 전류를 가변하여 토크를 제어하며, 공극자속은 회전자의 영구자속에 의한 것만을 이용하고, d축 전류는 0으로 유지하는 " $i_{ds} = 0$ 제어"를 사용하는 것이 바람직하다.

3. 벡터제어 시스템 구현

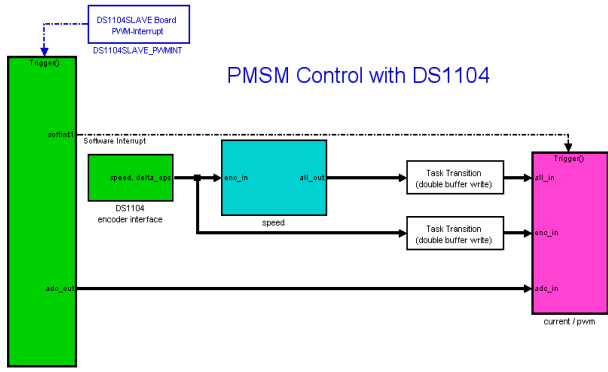
3.1 전체 시스템



<그림 2> 전체 시스템 구성도

그림 2의 전체 시스템은 제어부인 dSPACE 1104 시스템의 DSP 보드와 전력변환장치 및 영구자석 동기전동기로 이루어져 있다. DSP 보드에서 전류 및 속도제어기가 프로그램으로 설계되어 있으며 전류센서를 통해 ADC로 전동기의 전류값을 받고, 전동기의 엔코더 신호를 QEP로 받아 제어기가 동작하여 최종출력은 PWM 신호로 내보낸다.

3.2 실시간 제어 프로그램



<그림 3> 실험에 사용된 실시간 제어 프로그램

실시간 제어 프로그램은 왼쪽에서부터 순서대로 전류 측정부, 속도 및 회전자 위치 측정부, 속도 제어부, 전류 제어부로 나누어져 있다. 각각의 구동 주기는 서로 다르며 전류 측정부가 62.5[us]로 가장 빠르다. 전류 측정부는 PWM Interrupt 주기로 동작하게 되어 있으며 그 주기를 2분 주 하여 Software Interrupt를 발생한다. 속도 및 회전자 위치 측정부와 속도 제어부는 제어 주기가 1[ms]로 동작하게 되어 있고, 속도 및 회전자 위치 측정은 Encoder 신호를 QEP로 받아 회전자의 속도와 회전자 위치가 검출되며 그 속도 정보를 가지고 속도 제어기가 동작한다. 속도 제어기는 PI 제어를 사용하였으며 속도 제어부의 출력은 전류지령과 Decoupling을 위한 속도 정보가 출력된다. 전류 제어부는 전류 측정부에서 발생한 Software Interrupt 주기(125[us])로 동작하며 전류 지령과 속도, 실제 전류를 입력 받아 전류 제어기가 동작한다. 전류 제어기는 PI 폐환 제어기와 비간섭화 제어기, 역기전력 전향보상기로 구성되어 있다. 전류 제어기의 대역폭은 400[rad/s]로 설정하였고 속도제어기의 대역폭은 전류제어기보다 1/5 작은 80[rad/s]로 설정하여 구동하였다.

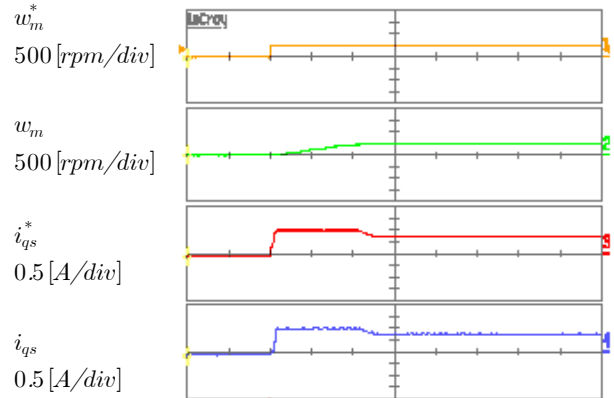
4. 실험 결과

표 1은 실험에 사용된 영구자석 전동기의 상수들을 나타낸다. 그림 4는 무부하 상태에서 속도 지령을 0[rpm]에서 500[rpm]으로 변화시 속도 지령과 실제 속도, q축 전류 지령과 q축 실제 전류를 비교하여 보았다. 속도 지령에 대한 실제 속도는 잘 추종하는 것을 볼 수 있었고 전류 역

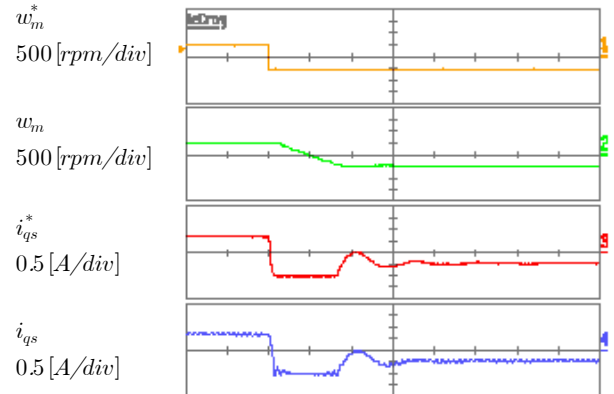
시 지령을 잘 추종하였다. 그림 5는 500[rpm]에서 -500[rpm]으로 정역 스텝 속도지령 변경시 속도 응답을 보여주고 있다.

<표 1> 영구자석형 동기전동기의 상수

전동기 정수	단위	값
정격 출력	kW	0.63
정격 토크	Nm	2.0
순시 최대토크	Nm	6.9
정격 전류	Arms	1.25
정격 회전속도	RPM	3000
관성모멘트	kgm ²	1.4E-4
전기자 저항	Ω(ph-ph)	24.5
전기자 인덕턴스	mH(ph-ph)	57.9



<그림 4> 가속시 스텝응답(0[rpm] ⇒ 500[rpm]), (50ms/div)



<그림 5> 정역 스텝응답(0[rpm] ⇒ -500[rpm]), (50ms/div)

5. 결론

본 논문에서는 dSPACE 1104 시스템을 사용하여 영구자석 동기전동기의 벡터 제어를 구현하여 속도스텝 명령시 속도 및 전류 응답을 살펴 보았다. dSPACE 1104 시스템과 MATLAB/SIMULINK 프로그램은 이용할 경우 기존의 제어시스템 개발시 보다 제어기의 설계 및 구현이 매우 쉽고 수정과 보완이 용이하여 제어시스템 해석 및 설계에 관하여 쉽게 이해하고 단기간에 구현할 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] 설승기, "전기기기제어론," BRAIN KOREA, 2002.
- [2] 윤덕용, "공간전압벡터 PWM 기법을 이용한 영구자석형 동기전동기의 속도제어", 단국대학교 전기공학과 공학박사학위논문, 1995년 2월.
- [3] 하동우, "d-SPACE(DS-1104)를 이용한 PMSM의 벡터제어에 관한 연구", 창원대학교 전기공학과 공학석사학위논문, 2006년 12월.
- [4] 이동민, 지준근, "MATLAB/SIMULINK와 dSPACE DS1104를 이용한 유도전동기의 간접벡터제어," 대한전기학회회계학술대회논문집, pp. 1022-1023, 2006.