

# MATLAB/SIMULINK와 dSPACE 1104 시스템을 이용한 표면 부착형 영구자석 동기전동기 벡터제어

이용석<sup>1</sup>, 지준근<sup>2\*</sup>

## Vector Control of SPMSM Using MATLAB/SIMULINK & dSPACE 1104 System

Yong-Seok Lee<sup>1</sup> and Jun-Keun Ji<sup>2\*</sup>

**요약** 본 논문은 MATLAB/SIMULINK와 dSPACE 1104 시스템을 사용하여 표면부착형 영구자석 동기전동기 벡터 제어를 구현하였다. 영구자석 동기전동기는 고정자 전류를 자속발생 전류성분과 토크발생 전류성분으로 분리하고 이를 각각 독립적으로 제어함으로써 타여자 직류전동기처럼 다루는 것이 가능하기 때문에 기존의 직류전동기 제어에 사용되던 각종 제어 알고리즘을 적용하는 것이 가능하게 된다. 본 연구에서는 표면 부착형 영구자석 동기 전동기의 벡터제어를 구현하기 위하여, 먼저 MATLAB/SIMULINK 프로그램으로 영구자석 동기 전동기를 모델링하고 속도제어 부에는 비례-적분 제어기를, 전류제어부에는 비간섭 비례-적분 제어기를 설계하여 제어기의 응답을 미리 확인하였다. 그리고 설계된 제어기의 성능을 입증하기 위하여 dSPACE DS1104 R&D Board에 시뮬레이션을 통해 구현된 영구자석 동기전동기 벡터 제어 프로그램을 다운로드하여 실험을 통해 제안된 벡터제어 시스템의 타당성을 입증하였다.

**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. PI controller is used for speed control and decoupling PI controller is used for current control. For the implementation of high performance vector control system, dSPACE 1104 system is used. Experiments were carried out to examine validity of the proposed vector control implementation.

**Key Words** : SPMSM, 벡터 제어, MATLAB/SIMULINK, dSPACE 1104

### 1. 서론

오늘날 현대 산업의 발달로 우주 항공산업 및 각종 산업분야의 자동화 및 제어기 분야에서 동특성이 우수한 서보 제어 시스템이 요구되고 있다. NC 선반, 공작기계, 로봇 등과 같이 정밀하고 빠른 응답특성이 요구되는 서보제어용 전동기로는 대부분 직류전동기가 사용되어져 왔으나, 직류전동기는 구조상 정류자 및 브러시를 가지고 있어서 이에 대한 정기적인 유지 보

수를 필요로 하는 단점이 있고, 최근에 와서 제어기술의 발전과 더불어 반도체 기술의 향상으로 인해 유지, 보수가 용이한 교류전동기로의 전환이 적극적으로 이루어지고 있다. 교류 전동기 중 표면 부착형 영구자석 동기전동기는 회전계자형 동기전동기와 같은 구조로 되어 있어 벡터제어(vector control) 이론을 적용하여 우수한 동특성을 갖는 속도제어 시스템을 구현할 수 있다.

일반적인 제어 시스템은 먼저 Simulation을 통해 제어를 설계한 후, C나 assembly 프로그램으로 실시간 제어 프로그램을 다시 구현함으로써, 제어 시스템 개발을 각각의 하드웨어에 맞추어 장기간에 걸쳐 진행하

<sup>1</sup>순천향대학교 대학원 전기통신시스템공학과

<sup>2</sup>순천향대학교 전기통신공학과

\*교신저자 : 지준근(jkji@sch.ac.kr)

여 왔다. 그러나 본 논문에서는 MATLAB/SIMULINK를 이용하여 GUI(Graphic User Interface)기반으로 제어기를 설계하고, dSPACE 1104 시스템을 이용하여 실시간 제어 프로그램으로 자동 변환하여 제어기의 응답을 확인함으로써 전동기 제어 시스템 개발을 짧은 시간 안에 매우 편리하게 구현할 수 있음을 소개하고자 한다. 이를 위해 MATLAB/SIMULINK와 dSPACE 1104 시스템을 이용하여 0.63kW 표면부착형 영구자석 동기전동기 구동시스템의 고정자 전류를 토크를 발생하는 q축 전류  $i_{qs}^r$ 와 자속을 발생하는 d축 전류  $i_{ds}^r$ 로 분리하여 독립적으로 제어하는 벡터 제어를 구현하여 실험을 통해 성능을 확인하였다.

## 2. 모델링 및 벡터제어[1,2]

### 2.1 3상 정지좌표계와 2상 회전좌표계의 상호 변환

a, b, c 축의 전류를 d, q 축으로 변환하는 행렬식은 a, b, c 축을  $\alpha, \beta$  축으로 변환하고 이를 다시 d, q축으로 변환하는 과정을 거치게 되므로 다음과 같이 정리된다

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

d, q 축을 a, b, c 상으로 변환하는 경우에도 역시 d, q 축을  $\alpha, \beta$  축으로 변환하고 다시 a, b, c 상으로 변환하는 과정을 거치게 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

2상 회전자 좌표계로 좌표변환을 하여 영구자석형 동기전동기의 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

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

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

발생 토크는 전류의 성분  $i_{ds}^r$ 와  $i_{qs}^r$ 에 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  $i_{qs}^r$ 를 제어함으로써 전동기의 토크를 직접 제어할 수 있게 된다.

전동기가 부하를 구동할 때의 역학적인 운동방정식은 다음과 같다.

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

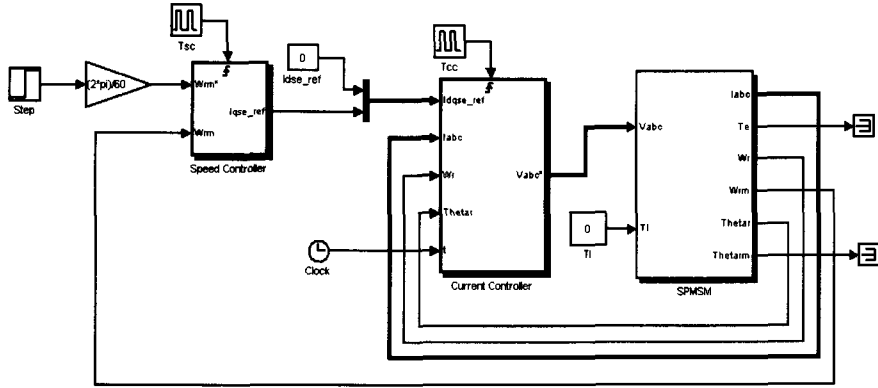
식 (6)과 (7)로부터 속도 제어 시스템 구성을 위한 PMSM의 모델은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

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

### 2.3 영구자석 동기전동기의 벡터제어

벡터제어 기법은 교류전동기의 고정자 전류를 자속발생 전류성분인  $i_{ds}^r$ 와 토크발생 전류 성분인  $i_{qs}^r$ 로 분리시켜 각각 독립적으로 제어하는 것이다. 이를 위해 전동기의 고정자 전류를 자속각을 기준으로 분리하여 제어하는데, 이를 벡터제어 혹은 자속기준제어라 한다. 일반적으로 동기전동기를 정격속도 이내에서 운전할 경우에는 q축 전류를 가변하여 토크를 제어하며,





[그림 3] 시뮬레이션 블록도

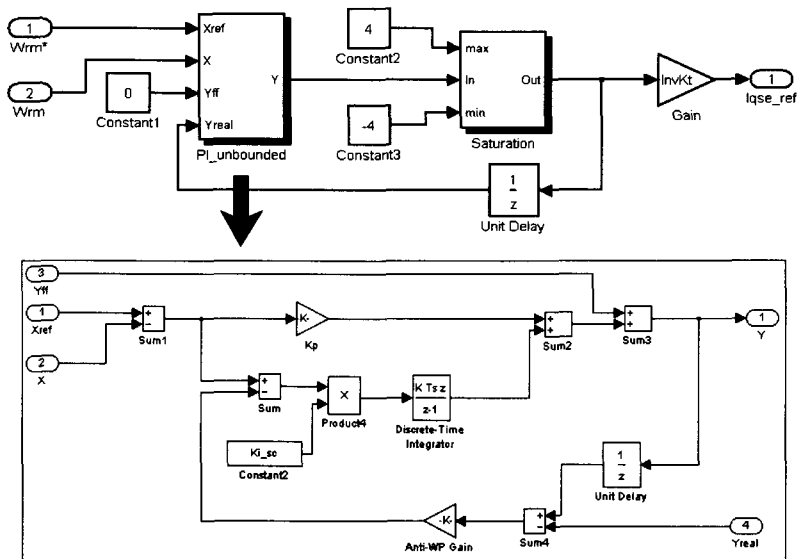
[표 1] 영구자석형 동기전동기의 상수

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 <sup>2</sup>	1.4E-4
전기자 저항	Ω (ph-ph)	24.5
전기자 인덕턴스	mH(ph-ph)	57.9

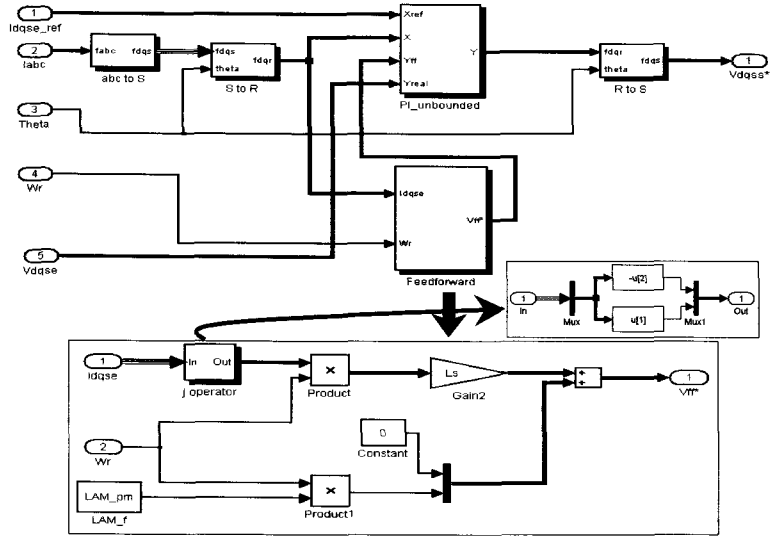
블록은 비례-적분 제어기 블록과 Saturation 블록으로 구성되어 있다. 그리고 제어기의 내부 블록을 화살표 아래에 함께 나타내었다.

그림 5는 전류 제어기의 블록을 나타낸다. 전류제어기 블록은 비례-적분 제어기와 전향보상(Feedforward) 제어기로 구성되어 있다. 비례-적분 제어기의 구성은 앞에서의 속도 제어기와 같은 구조로 되어 있고 전향보상 제어기의 구성은 화살표 아래에 나타내었다. 간섭성분에 대한 보상 전압을 d축은  $-w_r \hat{L}_s i_{qs}^r$  와 q 축은  $w_r \hat{L}_s i_{ds}^r$  의 값으로 보상하였고, 역기전력은  $\lambda_f w_r$  의 값으로 q축 전류 제어기의 출력에 보상하였다.

그림 4는 속도 제어기 블록을 보여준다. 속도제어기



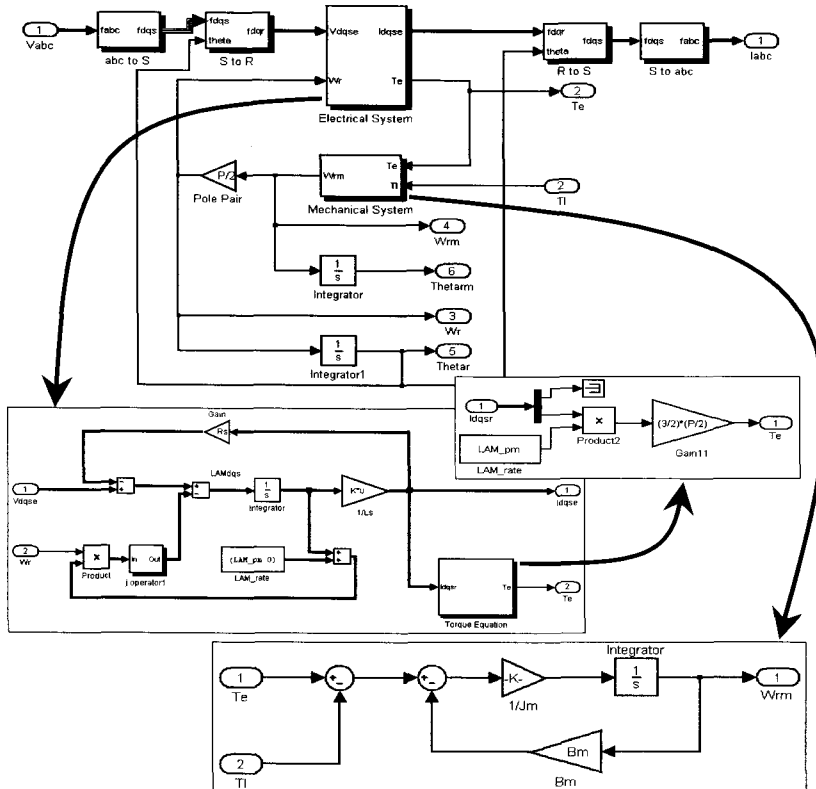
[그림 4] 속도 제어기 블록도



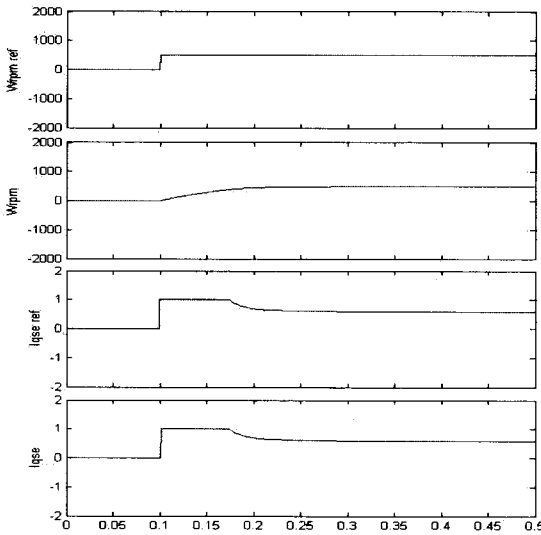
[그림 5] 전류 제어기 블록도

그림 6은 영구자석 동기전동기의 모델링 블록을 나타내고 있다. 좌표계의 변환을 위한 좌표 변환식과 동

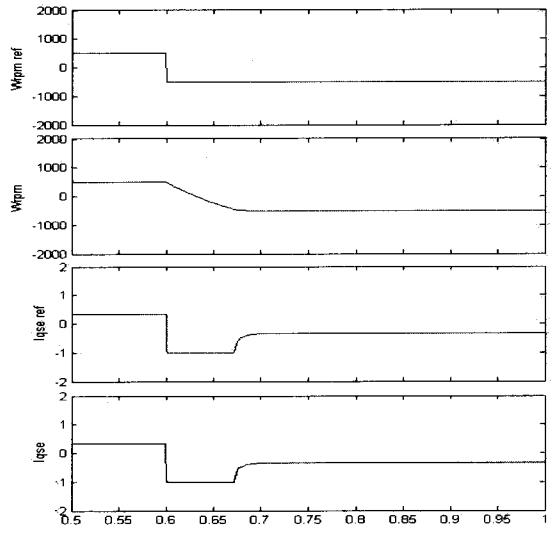
기좌표계에서 영구자석 동기전동기의 전압방정식, 기계적 운동방정식, 토크방정식을 이용하여 구현하였다.



[그림 6] 영구자석 동기전동기의 모델링 블록도



[그림 7] 가속시 스텝응답(0[rpm] ⇒ 500[rpm]),(50ms/div)



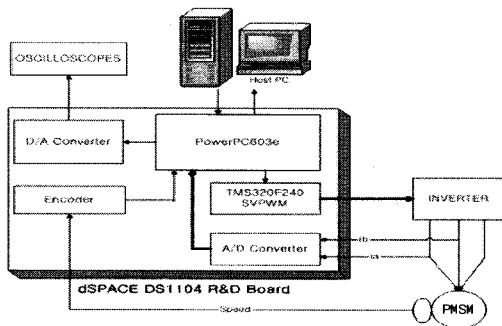
[그림 8] 정역 스텝응답(500[rpm] ⇒ -500[rpm]),(50ms/div)

그림 7과 그림 8은 각각 속도 지령을 0[RPM]에서 500[RPM]으로 가속시켰을 때와 500[RPM]에서 -500[RPM]으로 정역 회전시켰을 때의 속도 지령과 실제 속도, q축 전류지령과 실제 q축 전류를 서로 비교하여 보았다.

그림을 다운로드하여 실행하였으며, 전류센서를 통해 ADC로 전동기의 고정자 전류값을 받고, 전동기의 엔코더를 통해 속도값을 받아 제어가 동작하여 최종 출력은 PWM 신호로 내보낸다.

## 4. 벡터제어 시스템 구현[3,4]

### 4.1 전체 시스템

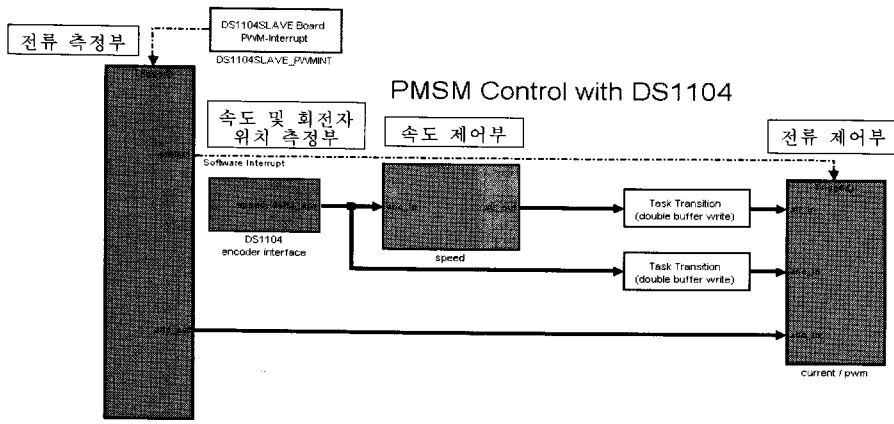


[그림 9] 전체 시스템 구성도

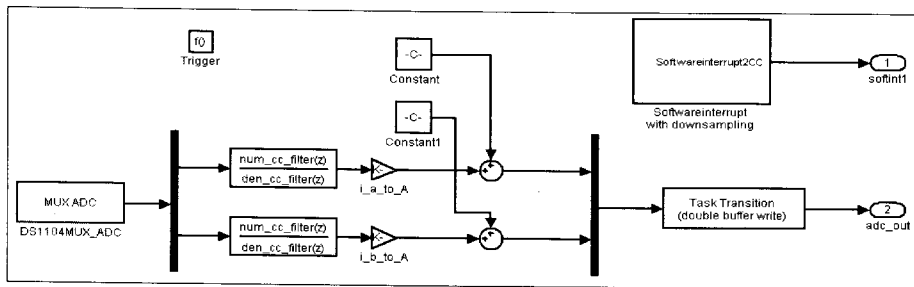
전체 시스템은 제어보드인 dSPACE DS1104 R&D Board와 3상 인버터 및 영구자석 동기전동기로 이루어져 있다. 호스트 PC를 이용하여 MATLAB/SIMULINK로 알고리즘을 구현하였고, dSPACE DS1104 R&D Board에 구현한 영구자석 동기전동기 벡터 제어 프로

### 4.2 실시간 제어 프로그램

그림 10의 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 2분주 하여 Software Interrupt를 발생한다. 속도 및 회전자 위치 측정부와 속도 제어부는 제어 주기가 1[ms]로 동작하게 되어 있고, 속도 및 회전자 위치 측정부에서는 Encoder 신호를 QEP로 받아 회전자의 속도와 위치가 검출되며 그 속도 정보를 가지고 속도 제어부에서 속도 제어가 동작한다. 속도 제어부는 비례-적분 제어를 사용하였으며 속도 제어부에서는 속도 제어기의 출력인 전류지령과 Decoupling을 위하여 속도 정보에 극수/2를 곱한 값인 각속도 정보를 전류 제어부로 보낸다. 전류 제어부는 전류 측정부에서 발생한 Software Interrupt (주기 125[us])로 동작하며, 전류 지령과 각속도, 회전자 위치 및 실제 전류를 입력 받아 전류 제어가 동작한다. 전류 제어기는 비례-적분 궤환 제어기와 비간섭화 제어기, 역기전력 전향보상기로 구성되어 있다.



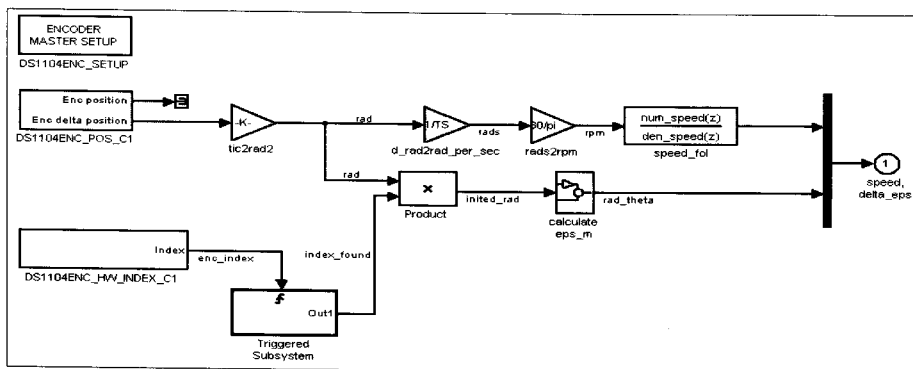
[그림 10] 실시간 벡터 제어 프로그램



[그림 11] 전류 측정 블록

그림 11은 전류 측정 블록을 나타낸다. 전류 센서의 출력값을 실제 전류값으로 스케일링을 하는 부분과 Software Interrupt를 발생하는 부분으로 나누어 진다.

Software Interrupt는 전류 측정 블록이 2번 수행할 때 1번 인터럽트를 발생하도록 설정되어 있다.

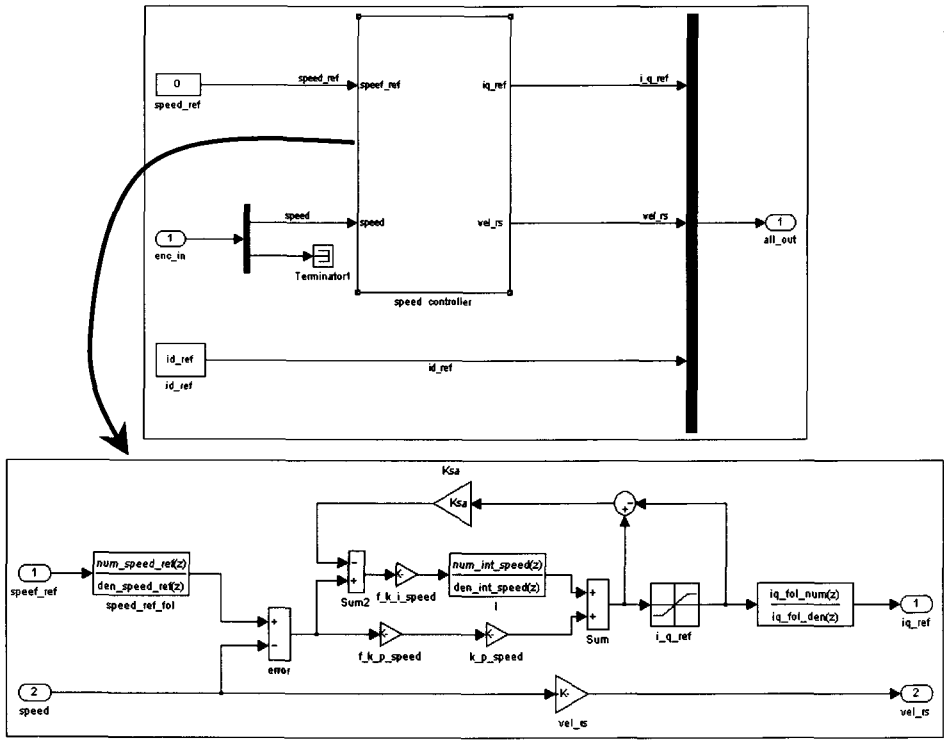


[그림 12] 속도 및 회전자 위치 측정 블록

그림 12는 영구자석 동기전동기의 속도와 회전자의 위치를 측정하는 블록이다. 그림에서 보듯이 DS1104ENC\_POS\_C1블록으로부터 Encoder position 정보와 Encoder delta position 정보를 얻을 수 있다. 하지만 Encoder delta position 정보만 사용하여 전동기의 속도와 회전자의 위치를 측정하였다. Encoder delta position 정보는

샘플링 시간  $T_s$ 마다 발생하는 펄스수가 출력되고, 이 값을 적절히 스케일링하여 전동기의 속도를 측정하였다. 그리고 전동기의 회전자 위치는 Encoder index값을 찾으면 그 때부터 스케일링을 하도록 되어있다.

그림 13은 속도 제어 블록을 나타낸다. 속도 제어 블록은 비례-적분 제어기와 Decoupling을 위한 각속도 정

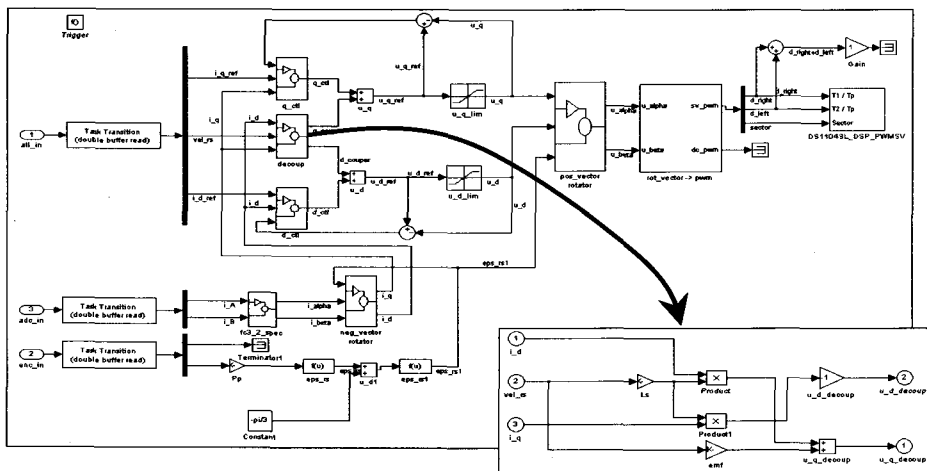


[그림 13] 속도 제어 블록

보를 구하는 부분으로 나누어 진다. 각속도는 속도 정보에 극수/2를 곱하여 구한다.

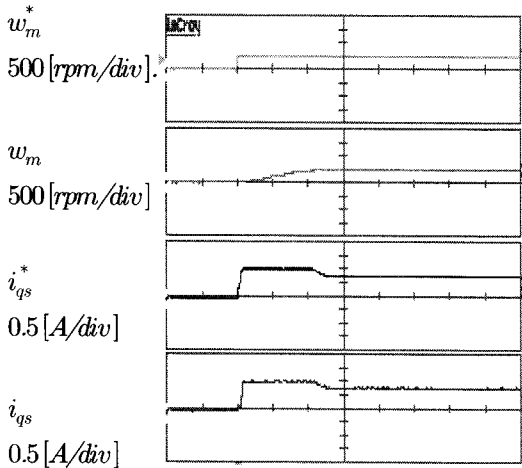
그림 14는 전류 제어 블록을 나타낸다. 전류 제어 블록은 q축 전류 제어 부분, Decoupling을 위한 부분, d축 전류 제어 부분으로 나누어진다. 전류 제어 부분은 앞에서의 속도 제어 블록과 같은 구조로 되어 있고

Decoupling을 위한 부분은 화살표 아래에 표시하였다. Decoupling을 위한 d축과 q축의 출력값은 각각  $-w_r \hat{L}_s i_{qs}^r$ 와  $w_r \hat{L}_s i_{ds}^r + \lambda_f w_r$ 임을 확인할 수 있다. 그리고 EMF값을  $\lambda_f$ 로 설정하였다.

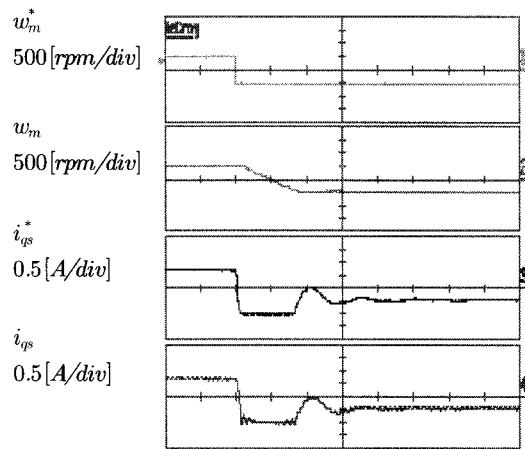


[그림 14] 전류 제어 블록





[그림 15] 가속시 스텝응답(0[rpm] ⇒ 500[rpm]),(50ms/div)



[그림 16] 정역 스텝응답(500[rpm] ⇒ -500[rpm]),(50ms/div)

### 5. 실험 결과

그림 15는 무부하 상태에서 속도 지령을 0[rpm]에서 500[rpm]으로 스텝 속도지령 변경시 속도 지령과 실제 속도, q축 전류 지령과 q축 실제 전류를 비교하여 보았다. 속도 지령에 대한 실제 속도는 잘 추종하는 것을 볼 수 있었고, 전류 역시 지령을 잘 추종하였다. 그림 16은 500[rpm]에서 -500[rpm]으로 정역 스텝 속도지령 변경시 전류 및 속도 응답을 보여주고 있으며, 정역 운전시에도 속도 및 전류 응답 모두 지령에 잘 추종하는 것을 확인하였다.

### 6. 결 론

본 논문에서는 MATLAB/SIMULINK와 dSPACE 1104 시스템으로 표면부착형 영구자석 동기전동기의 벡터 제어를 구현하여 속도지령 가속시(0[rpm] ⇒ 500[rpm]) 스텝응답과 속도지령 정역시(500[rpm] ⇒ -500[rpm]) 스텝응답을 살펴보았다. 시뮬레이션 및 실험 결과로부터 속도 응답과 전류 응답 모두 속도 및 전류 지령을 잘 추종하는 것을 확인하였으며, 구현된 벡터 제어의 타당성을 실험을 통해 입증하였다. 그리고 dSPACE 1104 시스템과 MATLAB/SIMULINK 프로그램을 이용할 경우, 기존의 표면부착형 영구자석 동기전동기 제어시스템 개발시보다 제어기의 설계 및 구현이 매우 쉽고 수정과 보완이 용이하여 제어시스템의 해석 및 설계에 관하여 쉽게 이해하고 단기간에 구현할 수 있었다.

### 참고문헌

- [1] 설승기, “전기기기제어론,” BRAIN KOREA, pp. 299-352, 2002.
- [2] 윤덕용, “공간전압벡터 PWM 기법을 이용한 영구자석형 동기전동기의 속도제어”, 단국대학교 전기공학과 공학박사학위논문, 1995년 2월.
- [3] 이동민, 지준근, “MATLAB/SIMULINK와 dSPACE DS1104를 이용한 유도전동기의 간접벡터제어,” 대한전기학회 하계학술대회논문집, pp. 1022-1023, 2006.
- [4] 이용석, 이동민, 지준근, 차귀수, “dSPACE 1104 시스템을 이용한 영구자석 동기전동기 벡터제어 구현,” 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 1084-1085, 2007. 7.

이용석(Yong-Seok Lee)

[준회원]



- 2006년 2월 : 순천향대학교 정보기술공학부(공학사)
- 2008년 2월 : 순천향대학교 대학원전기통신시스템공학과 (공학석사)

<관심분야>  
전력전자, 전기기계, 전력변환, 전동기제어

지 준 근(Jun-Keun Ji)

[정회원]



- 1986년 2월 : 서울대학교 전기공학과 (공학사)
- 1988년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 (공학석사)
- 1994년 2월 : 서울대학교 대학원 전기공학과 (공학박사)
- 1994년 9월 ~ 현재 : 순천향대학교 전기통신공학과 교수

<관심분야>

전력변환, 전동기 제어, 전원장치, 전력품질제어