

MATLAB/SIMULINK의 모델기반 제어기 설계를 이용한 표면 부착형 영구자석 동기 전동기의 벡터제어

이용석, 지준근, 차귀수
 순천향대학교 전기통신시스템공학과

Implementation of Vector Control for SMPMSM Using Model Based Controller Design in MATLAB/SIMULINK

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

ABSTRACT

This paper presents an implementation of vector control for SMPMSM using model based controller design in MATLAB/SIMULINK. The model based controller design enables fast development of control system for motor by designing controllers and performing simulation on the GUI (Graphic User Interface) platform, converting program code directly into real-time programs, and then performing tests for the responses from controllers.

The controller is designed as PI controller for speed and decoupling PI controller for current. And PWM used space vector modulation method using offset voltage and system stability is also secured by close magnitude overmodulation method, maintaining dynamics of load when it overmodulation. The validity of vector control implemented is verified through simulations and experiments.

1. 서 론

일반적인 전동기 제어 시스템은 먼저 Simulation을 통해 제어기를 설계한 후, 다시 C나 assembly 언어로 프로그램을 작성하여 구현한다. 그러나 최근 들어 MATLAB/SIMULINK에서 TI C2000 DSP 플랫폼에서의 임베디드 시스템 구현을 지원하는 기능이 추가되었다. 그리하여 MATLAB/SIMULINK를 이용한 모델기반 제어기 설계는 GUI(Graphic User Interface) 기반으로 필요한 블록을 그때그때 추가하는 계층적 설계 프로세스를 적용함으로써 신속한 설계의 반복과 매개변수 최적화를 가능하게 하여 매우 편리하게 제어기 설계를 할 수 있다.

본 논문에서는 0.63kW 표면 부착형 영구자석 동기전동기 구동 시스템에 고정자 전류를 토크를 발생하는 q축 전류 i_{qs}^r 와 자속을 발생하는 d축 전류 i_{ds}^r 로 분리하여 독립적으로 제어하는 벡터 제어를 적용하였으며, Real Time Workshop과 Embedded Target for TI C2000 DSP 라이브러리를 이용하여 제어시스템을 구현하였다.

2. 영구자석형 동기 전동기의 모델링^[1]

회전자 좌표계에서 영구자석형 동기전동기의 전압방정식을 구하면 다음과 같다.

$$V_{ds}^r = R_s i_{ds}^r + L_d \frac{di_{ds}^r}{dt} - w_r L_q i_{qs}^r \quad (1)$$

$$V_{qs}^r = R_s i_{qs}^r + L_q \frac{di_{qs}^r}{dt} + w_r L_d i_{ds}^r + w_r \lambda_f \quad (2)$$

발생 토크는 전류의 성분 i_{ds}^r 와 i_{qs}^r 에 의해 다음과 같다.

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

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

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_{qs}^r \quad (4)$$

회전자는 영구자석으로 되어 있어서 회전자의 쇄교자속이 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.

$$T_e = J \frac{dw_m}{dt} + B w_m + T_L, \quad w_m = \frac{P}{2} w_r \quad (5)$$

식 (4)과 (5)로부터 속도 제어 시스템 구성을 위한 PMSM의 모델은 아래의 식으로 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} w_m = -\frac{B}{J} w_m + \frac{K_t}{J} i_{qs}^r - \frac{1}{J} T_L, \quad K_t = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f \quad (6)$$

3. 시뮬레이션

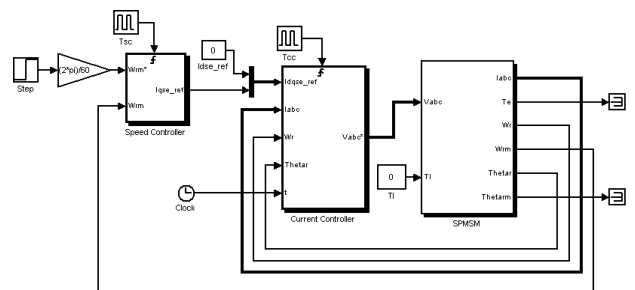


그림 1 시뮬레이션 블록도

MATLAB/SIMULINK를 사용한 시뮬레이션을 통하여 모델 및 제어기의 성능을 확인한다. 시뮬레이션에 사용된 영구자석 동기 전동기의 파라미터는 표 1에 나타내었다. 속도 제어 주기는 1ms와 전류 제어주기는 50 μ s으로 설정하였고, 속도 제어 주파수 대역은 40(rad/s)와 전류 제어 주파수 대역은 400(rad/s)로 설정하여 속도 및 전류 응답을 확인하였다.

표 1 영구자석형 동기전동기의 상수

전동기 정수	단위	값
정격 출력	kW	0.63
정격 토크	N·m	2.0
정격 전압	V	400
정격 전류	A	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

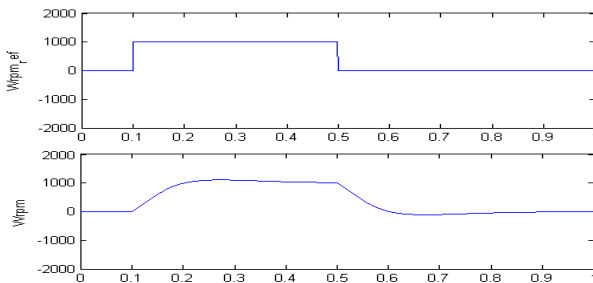


그림 2 속도 응답(0 -> 1000 -> 0[RPM])

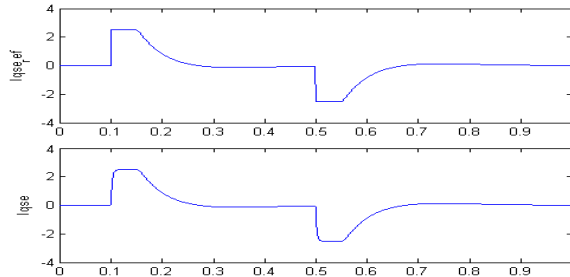


그림 3 q축 전류 응답(0 -> 1000 -> 0[RPM])

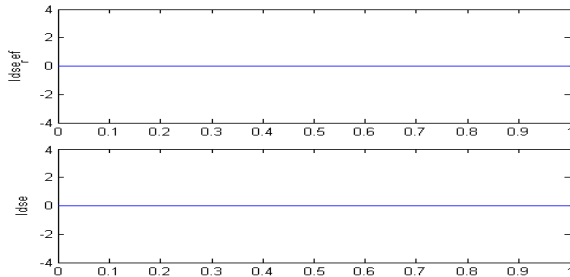


그림 4 d축 전류 응답(0 -> 1000 -> 0[RPM])

4. SPMSM의 벡터제어 시스템 구현

4.1 전체 시스템

그림 5에서 보듯이 전체 시스템 구성은 제어부인 eZdsp 2812 DSP 보드와 3상 인버터, 센서부 및 영구자석 동기전동기로 이루어져 있다. DSP 보드에 전류 및 속도제어기가 설계되어 있으며, 전류센서를 통해 ADC로 전동기의 전류값을 받고,

전동기의 엔코더를 통해 QEP로 전동기의 속도값을 받아 제어기가 동작하여 최종 출력은 PWM 신호로 내보낸다.

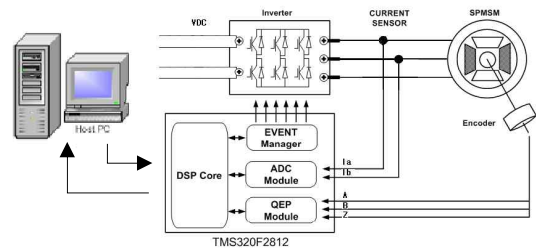


그림 5 전체 시스템 구성도

4.2 MATLAB/SIMULINK의 모델기반 제어기 설계

MATLAB/SIMULINK는 TI의 eXpress DSP tool들과 통합하여 SIMULINK Model로부터 C코드를 자동 생성할 수 있다. 생성된 코드는 자동적으로 그 다음 단계인 Code Composer Studio 프로젝트로 옮겨진다. 그 다음 사용자는 생성된 프로젝트를 컴파일(Compile), 링크(Link) 및 타겟 보드에 다운로드(Download)하여 실행할 수 있다.

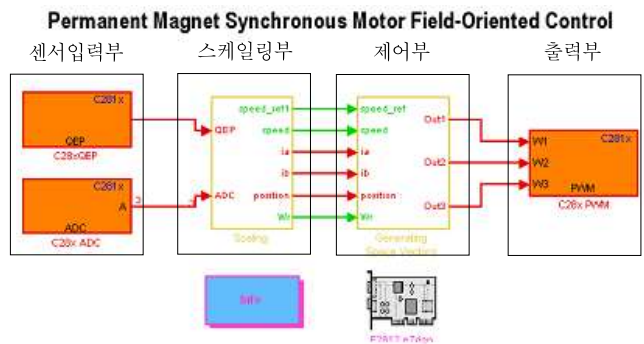


그림 6 실시간 SMPMSM 벡터제어 프로그램

그림 6과 같이 영구자석 동기전동기의 실시간 벡터제어 프로그램은 SIMULINK 프로그램으로 작성되었으며, 크게 센서입력부, 스케일링부, 제어부, 출력부로 나눌 수 있다. 센서값을 센서입력부로 받고 입력받은 값을 스케일링부에서 전동기의 속도 및 회전자 위치 측정과 고정자전류로 스케일링을 한다. 제어부에서는 속도제어, 고정자전류의 좌표변환 및 전류제어, 공간전압벡터 PWM 신호를 생성하여 출력부에서 최종 출력인 PWM 신호를 내보낸다.

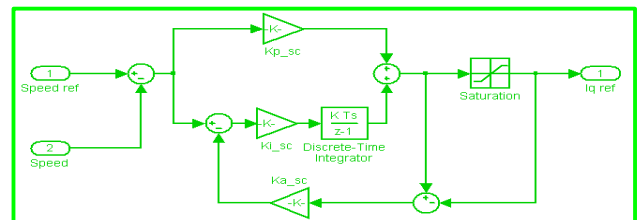


그림 7 속도 제어 블록

속도 제어 블록은 비례-적분 제어기와 Anti-Windup 제어기로 구성되어 있다. 속도제어기 및 전류제어기의 제어주기와 제어주파수 대역은 시뮬레이션과 같게 설정하였고 Anti-Windup 제어기는 Limiter에 의해 제한된 출력의 편차를 궤환하여 적분기의 앞단에서 포화요소를 제거하였다.

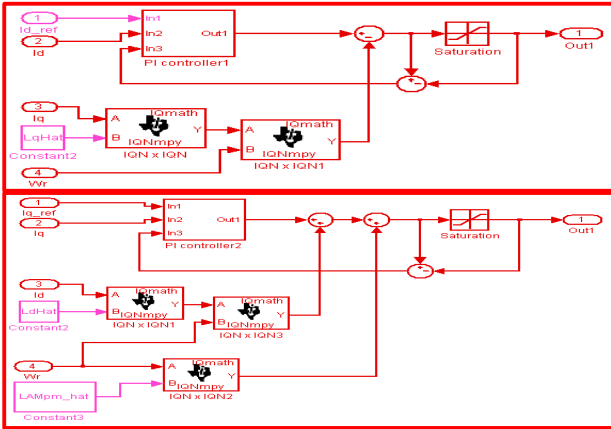


그림 8 비간섭 전류 제어 블록

그림 8에서 보듯이 전류제어기는 d축 전류와 q축 전류로 분리시켜 각각 독립적으로 제어하였고 전류 제어 블록 안에 있는 PI controller 블록은 앞에서 설명한 속도제어기 블록과 같은 구조로 되어있다. d축은 q축의 전류에 의해 영향을 받고 또한 q축은 d축의 전류에 영향을 받는 간섭 때문에, 이를 위해 $-w_r \hat{L}_s i_{qs}^r$ 과 $w_r \hat{L}_s i_{ds}^r$ 값으로 보상하였고 역기전력(E)을 $\lambda_m w_r$ 의 값으로 q축 전류 제어기의 출력에 전향보상(Feed-forward Compensation)하여 구성하였다.

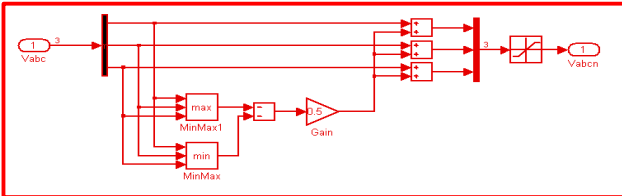


그림 9 윗섯 전압을 이용한 공간 벡터 전압 변조 블록

그림 9와 같이 윗섯 전압을 이용한 공간 벡터 변조 방식을 사용하여 출력전압을 결정하였고, 출력 전압을 $V_{dc}/2$, $-V_{dc}/2$ 사이의 값으로 제한하여 최소 거리 과변조 기법을 적용하였다.

5. 실험 결과

실험은 0.2초에서 1000[RPM]으로 가속후 다시 0.6초에서 0[RPM]으로 다시 감속시켜 속도 및 전류 응답을 확인하였다. 실험 결과 설계한 제어기는 속도 및 전류응답이 모두 속도 및 전류 지령에 잘 추종하였다. 한편 시뮬레이션과 실험에 사용된 전동기는 MG 세트로 구성되어 부하로 사용하기 위한 직류전동기가 커플링으로 연결되어 있다. 현재 무부하 상태를 실험하였고 부하 응답 특성을 검토하는 중에 있다.

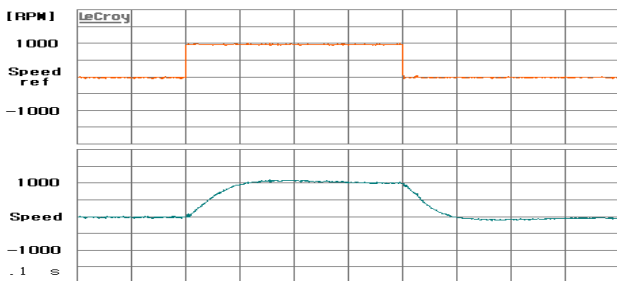


그림 10 속도 제어 응답(0 → 1000 → 0[RPM])

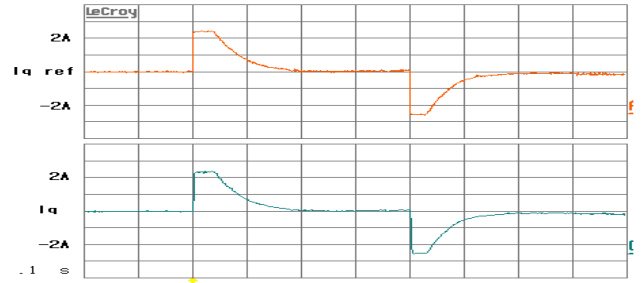


그림 11 q축 전류 제어 응답(0 → 1000 → 0[RPM])

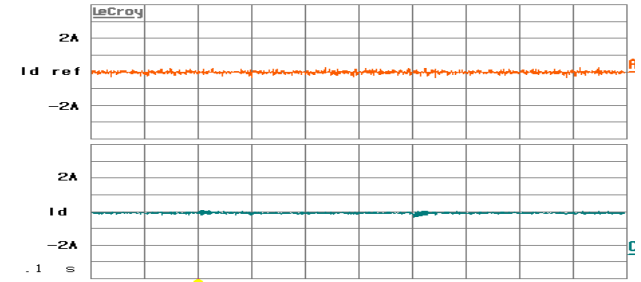


그림 12 d축 전류 제어 응답(0 → 1000 → 0[RPM])

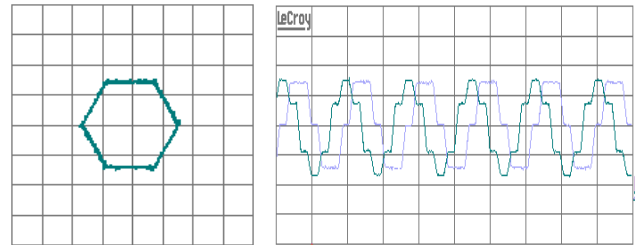


그림 13 공간 벡터에서의 출력 전압과 α, β 축에서의 출력 전압

그림 13은 과변조 구간에서의 공간 벡터에서의 출력 전압과 α, β 축에서의 출력 전압을 나타낸 것이다. 이 경우는 지령 전압 벡터가 육각형 전압 제한을 벗어나는 과변조의 경우로서, 최소 거리 과변조 기법을 사용하여 출력 전압을 6각형의 전압 제한선상에 위치 시켰다.

6. 결론

본 논문에서는 MATLAB/SIMULINK의 모델기반 제어기 설계를 이용하여 영구자석 동기전동기의 벡터 제어를 구현하였고, 스텝 속도 명령시(0↔1000[RPM]) 속도 및 전류 응답이 모두 잘 추종하는 것을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

TI사의 eZdsp 2812보드와 MATLAB/SIMULINK 프로그램을 이용한 모델 기반 제어기 설계는 기존의 벡터제어 시스템 개발시 보다 제어기의 설계 및 구현이 쉽고 수정과 보완이 용이하여 제어시스템 해석 및 설계에 관하여 쉽게 이해하고 단기간에 구현할 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 설승기, “전기기기제어론,” BRAIN KOREA, 2002, pp.299-352
- [2] 이용석, 지준근, 차귀수, “MATLAB/SIMULINK의 TI C2000 DSP 임베디드 타겟을 이용한 동기전동기 구동시스템,” 전력전자학회 하계학술대회 논문집, pp.400-402, 2007.