

# MATLAB/SIMULINK의 임베디드 타겟을 이용한 영구자석 동기 전동기 구동시스템의 제어기 설계

이용석, 지준근, 차귀수  
 순천향대학교 전기통신시스템공학과  
 e-mail:[huntes@hanmail.net](mailto:huntes@hanmail.net), [jkji@sch.ac.kr](mailto:jkji@sch.ac.kr), [gsoocha@sch.ac.kr](mailto:gsoocha@sch.ac.kr)

## Controller Design of PMSM Drive System Using Embedded Target in MATLAB/SIMULINK

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

### 요 약

본 논문은 표면 부착형 영구자석 동기전동기 벡터제어 시스템의 속도 및 전류제어와 과변조 기법을 MATLAB/SIMULINK의 TI C2000 임베디드 타겟을 이용한 모델기반 제어기 설계방법으로 구현하였고, Mathwork사에서 제공하는 Demo 프로그램의 속도 및 전류제어와 과변조 기법을 비교하여 보았다. 먼저 각 제어기에 대한 구조를 설명하고, 각각의 응답에 대한 시뮬레이션과 실험을 통해 비교 검증하였다.

### 1. 서 론

일반적인 전동기 제어 시스템은 먼저 Simulation을 통해 제어기를 설계한 후, 다시 C나 어셈블리어로 프로그램을 작성하여 구현한다. 그러나 최근 들어 MATLAB/SIMULINK 프로그램에 TI C2000 DSP 플랫폼에서의 임베디드 시스템 구현을 지원하는 기능이 추가되었고, 영구자석 동기 전동기의 벡터 제어 프로그램을 Demo용 Simulink model로 추가하였다. 그리하여 Demo 프로그램을 테스트 해본 결과, Demo 프로그램은 속도 및 전류제어와 과변조 기법이 가장 단순한 구조로 되어있기 때문에 속도, 전류 응답이 좋지 않은 것을 볼 수 있었다.

본 논문에서는 Demo 프로그램과 새로 구현한 프로그램의 속도 및 전류제어와 과변조 기법의 구조들에 대한 설명을 하고 각각의 제어기법을 서로 비교하여 설명하였다. 그리고 0.63kW 표면 부착형 영구자석 동기전동기 구동 시스템에 Real Time Workshop과 Embedded Target for TI C2000 DSP

라이브러리를 이용하여 제어시스템을 구현하였고, 새로 구현된 시스템의 타당성을 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통하여 입증하였다.

### 2. 영구자석형 동기 전동기의 모델링<sup>[1]</sup>

회전자 좌표계에서 영구자석형 동기전동기의 전압 방정식을 구하면 다음과 같다.

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

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

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 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.

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

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

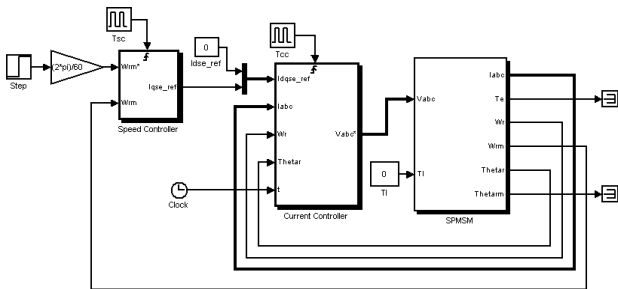


그림 1. 시뮬레이션 블록도

MATLAB/SIMULINK를 사용한 시뮬레이션을 통하여 모델 및 새로 설계한 제어기의 성능을 확인하였다. 시뮬레이션에 사용된 영구자석 동기 전동기의 파라미터는 표 1에 나타내었고, 속도 제어 주기는 1ms와 전류 제어주기는  $50\mu s$ 으로 설정하였다. 그리고 속도 제어 주파수 대역은  $200[\text{rad/s}]$ 와 전류 제어 주파수 대역은  $2000[\text{rad/s}]$ 로 설정하여 속도 및 전류 응답을 확인하였다.

표 1. 영구자석형 동기전동기의 상수

정격 출력	0.63[kW]	$J_m$	$1.4E-4[\text{kgm}^2]$
정격 전압	400[V]	$R_s$	$24.5[\Omega(\text{ph-ph})]$
정격 전류	1.25[A]	$L_s$	$57.9\text{mH}(\text{ph-ph})$

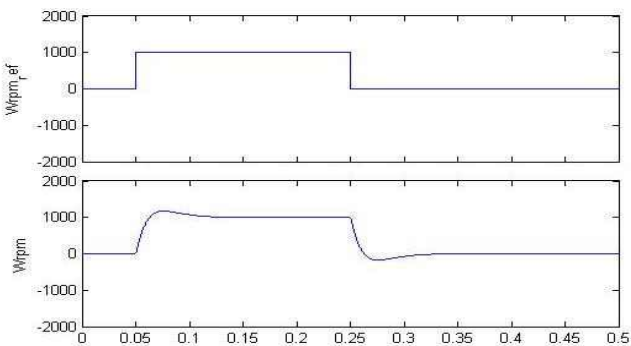


그림 2. 속도 응답( 0 ↔ 1000[RPM] )

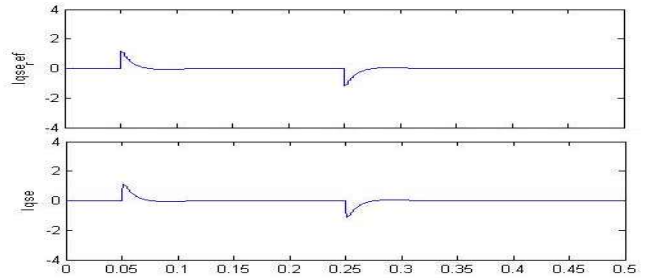


그림 3. q축 전류 응답( 0 ↔ 1000[RPM] )

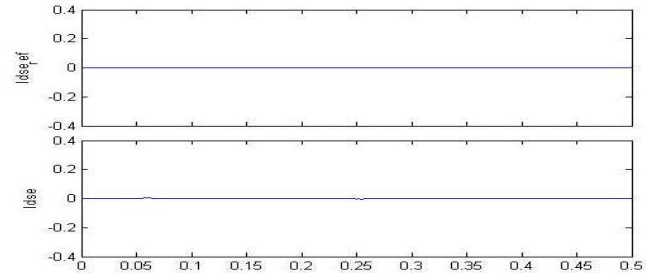


그림 4. d축 전류 응답( 0 ↔ 1000[RPM] )

### 4. MATLAB/SIMULINK의 모델기반 제어기 설계[2]

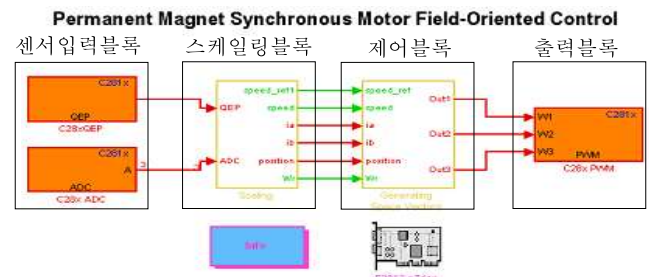


그림 5. 실시간 SMPMSM 벡터제어 프로그램

그림 5와 같이 영구자석 동기전동기의 실시간 벡터제어 프로그램은 SIMULINK 프로그램으로 작성되었으며, 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.

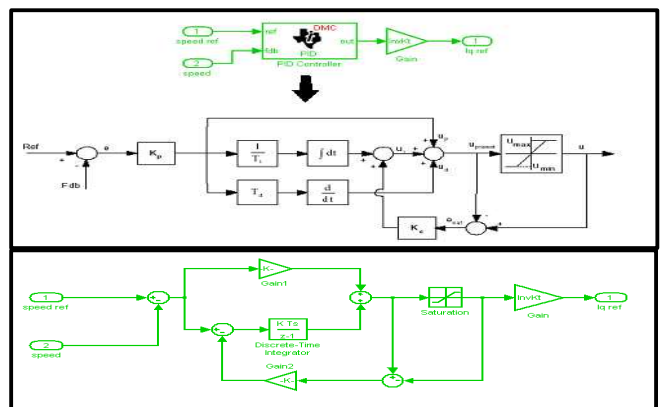


그림 6. 속도 제어 블록

( 위 : Demo 프로그램    아래 : 새로 설계한 프로그램 )

그림 6은 속도 제어 블록을 나타낸다. 위에는 Demo 프로그램에서의 속도 제어 블록이고 아래는 새로 설계한 속도 제어 블록이다. 속도 제어기의 제어주파수 대역은 서로 같도록 설정하였지만, Anti-Windup 제어기는 서로 구조가 다르게 구성되어 있다. Demo 프로그램에서는 적분 제어기의 적분기 뒤에서 포화요소의 출력 편차를 궤환하여 제거하지만 새로 설계한 프로그램에서는 적분 제어기의 적분기 앞에서 포화요소의 출력 편차를 궤환하여 제거하도록 되어 있다.

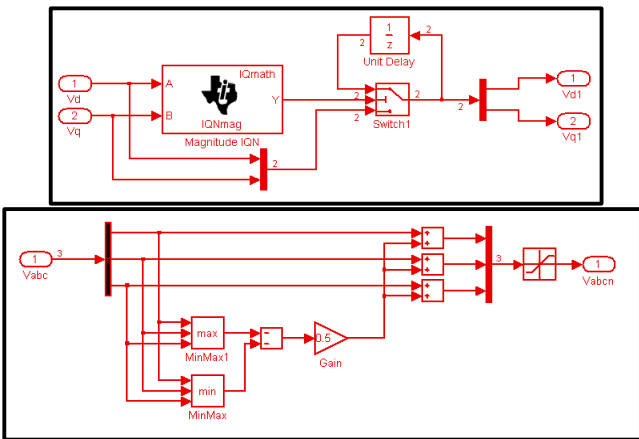


그림 7. 과변조시 전압 제한 블록

(위 : Demo 프로그램 아래 : 새로 설계한 프로그램)

그림 7은 전류 제어 블록을 나타낸다. 제어기의 구조는 앞에서의 속도 제어기와 같은 구조로 되어 있으며 전류 제어기 주파수 대역폭 또한 같도록 설정되어 있다. Demo 프로그램에서는 전류 지령과 실제 전류에 비례-적분 제어기로만 구성되어 있다. 하지만 새로 설계한 프로그램에서는 d축은 q축의 전류에 의해 영향을 받고 또한 q축은 d축의 전류에 영향을 받는 간접 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 8은 Demo 프로그램에서 과변조 구간에 진입할 때의 전압 제한 블록이다. Demo 프로그램은 d축 전압 지령과 q축 전압 지령을 이용하여 Magnitude 블록으로 지령 전압의 크기를 구해 스위치 블록에서 입력값이 Vdc/2보다 작으면 입력을 출력으로 보내고 크면 이전 출력값을 유지 시킨다. 하지만 새로 설계한 프로그램에서는 옹셋 전압을 이용한 공간 벡터 변조 방식을 사용하여 극전압을 결정하였다. 옹셋 전압은 위의 블록에서 보는 것처럼

$-(V_{max}^* + V_{min}^*)/2$ 의 값으로 결정하였고, 극전압을 Vdc/2, -Vdc/2사이의 값으로 제한하여 최소 거리 과변조 기법을 적용하였다.

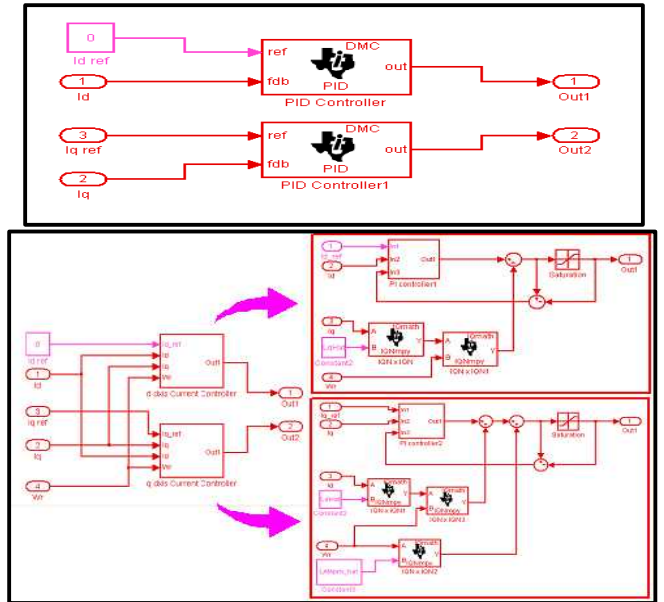


그림 8. 전류 제어 블록

(위 : Demo 프로그램 아래 : 새로 설계한 프로그램)

### 5. 실험 결과

실험은 50ms에서 1000[RPM]으로 가속후 다시 250ms에서 0[RPM]으로 다시 감속시켜 속도 및 전류 응답을 확인하였다.

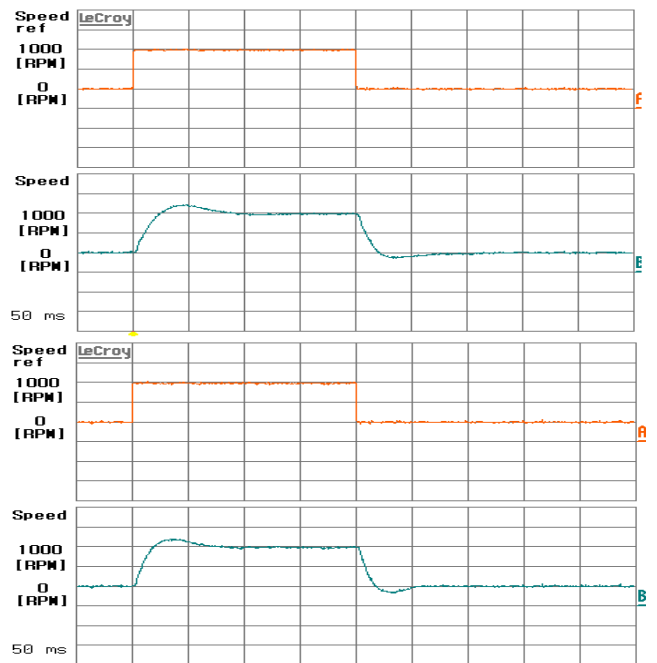


그림 9. 속도 제어 응답 비교 ( 0 ↔ 1000[RPM] )

(위 : Demo 프로그램 아래 : 새로 설계한 프로그램)

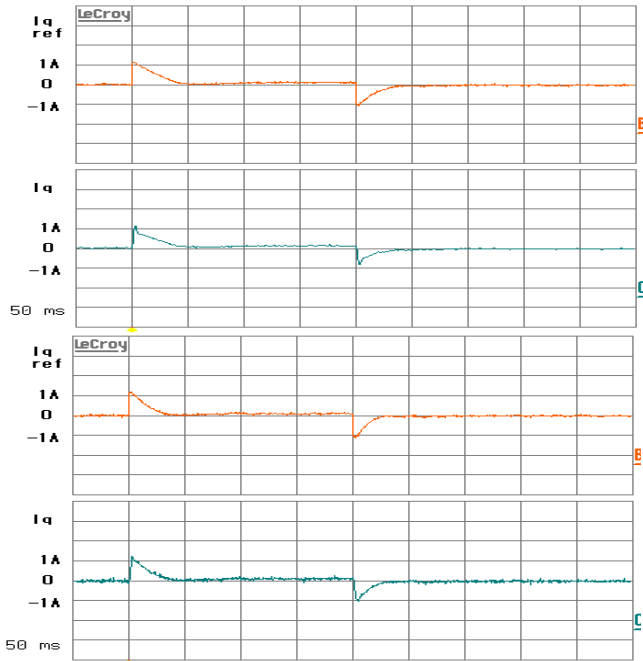


그림 10. q축 전류 제어 응답 비교( 0 ↔ 1000[RPM] )  
( 위 : Demo 프로그램 아래 : 새로 설계한 프로그램 )

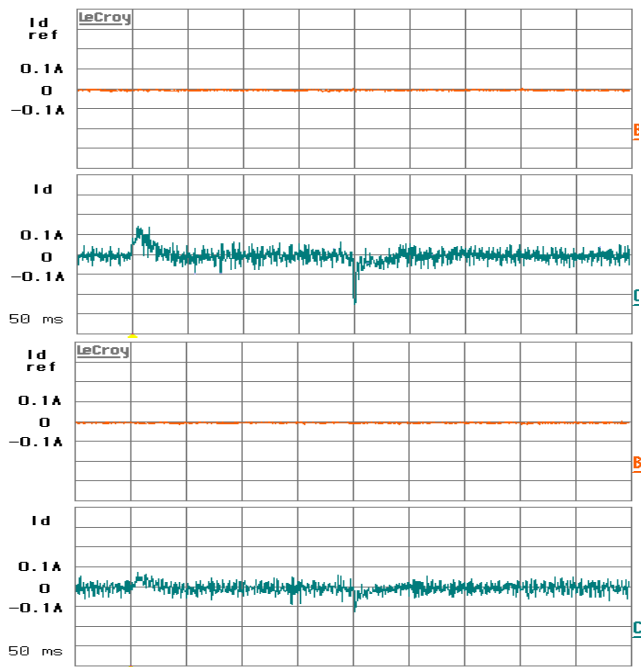


그림 11. d축 전류 제어 응답 비교( 0 ↔ 1000[RPM] )  
( 위 : Demo 프로그램 아래 : 새로 설계한 프로그램 )

그림 9,10,11은 Demo 프로그램과 새로 설계한 프로그램의 속도, q축 전류, d축 전류의 제어 응답을 서로 비교하여 보았다. 그림에서 보듯이 Demo 프로그램에서는 d축은 q축의 전류에 의해 영향을 받고 또한 q축은 d축의 전류에 의해 영향을 받는 간섭성분 때문에 전류 응답에 악영향이 미치고 역기전력(E)도 보상되지 않아 q축, d축 전류응답이 전류 지령을 따라가지 못하는 것을 볼 수 있었다. 새로 설계한 제어기는 이를 모두 보상하여 전류 지령에 잘

추종하는 것을 확인하였으며, 속도 응답 또한 Demo 프로그램 보다 빠르게 추종하는 것을 볼 수 있다.

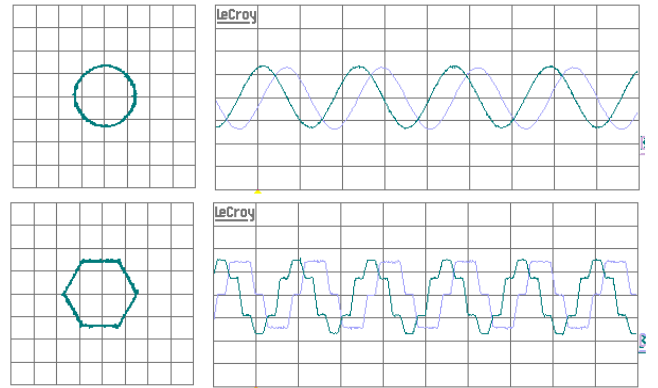


그림 12. 공간벡터에서 출력 전압과  $\alpha, \beta$ 축에서 출력 전압  
( 위 : Demo 프로그램 아래 : 새로 설계한 프로그램 )

그림 12는 과변조 구간에서 공간 벡터에서의 출력 전압과  $\alpha, \beta$ 축에서의 출력 전압을 나타낸 것이다. 이 경우는 지령 전압 벡터가 육각형 전압 제한을 벗어나는 과변조의 경우로서, Demo 프로그램에서는 출력 전압이 6각형의 내접원까지 출력되지만, 새로 설계한 프로그램에서는 최소 거리 과변조 기법을 사용하여 출력 전압을 6각형의 전압 제한선상까지 출력하였다.

## 6. 결론

본 논문에서는 MATLAB/SIMULINK의 임베디드 타겟을 이용한 모델기반 제어기 설계방법으로 영구자석 동기전동기의 벡터 제어를 구현하였고, 스탭 속도 명령시(0↔1000[RPM]) 속도 및 전류 응답을 Demo 프로그램과 비교하여 새로 설계한 프로그램의 우수성을 확인하였다. 그리고 과변조시에도 Demo 프로그램은 인버터가 출력 할 수 있는 최대 전압까지 사용하지 않지만, 새로 설계한 프로그램은 최소 거리 과변조 기법을 사용하여 최대 출력 전압인 6각형의 전압 제한선상까지 출력하였으며, 새로 설계한 프로그램의 타당성을 시뮬레이션과 실험을 통하여 확인하였다.

본 연구는 산업자원부 지정 순천향대학교 차세대 BIT무선부품지역혁신센터의 지원에 의한 것입니다.

## 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.