

PMSM의 벡터 제어를 위한 디지털 시뮬레이터의 구현

박철효* 노민식** 박승엽*

*창원대학교 **삼성테크윈(주) 파워시스템 연구소 선임연구원

Implementation of Digital Simulator for Vector Control of PMSM

C.H. Park* M.S. Rho** S.Y. Park*

*Changwon National University **Samsung Techwin Power Systems R&D Center

ABSTRACT

교류 전동기의 전류 제어 특성은 전동기의 재정수의 특성, 전류 제어기의 구성 및 제어 주기, PWM기법 및 주파수에 의해 달라지며, 시스템의 동적 특성 및 효율에도 큰 영향을 미친다. 본 논문은 PMSM(Permanent magnet synchronous motor)의 동기좌표계에서 벡터 제어 시 전류 제어 특성을 분석할 수 있는 실제와 동일한 디지털 전류 제어기 및 SVPWM(Space Vector PWM)을 포함한 시뮬레이터를 구현하였으며 고속 및 일반 PMSM을 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 그 결과 전류 제어 특성의 예측 가능성을 보였다.

1. 서 론

실제 시스템의 구현에 앞서 모의실험을 통한 시스템의 과도 응답 및 성능의 예측은 꼭 선행 되어야 한다. 교류 전동기의 경우 정격 속도가 높을수록 전류 제어 및 PWM 주파수도 높아야 하지만 실제 하드웨어 구현 시 비용과도 관련이 있기 때문에 만족할만한 전류 제어 특성과 비용과의 타협을 위해 시뮬레이션을 통한 전류 제어 특성의 분석은 충분한 의미를 가진다. 하지만 간략화 된 이상적인 아날로그 형태로 구현된 시뮬레이터의 경우에는 전류 제어 및 PWM 주파수에 따른 동기 좌표계에서 dq축 전류 및 상전류의 리플의 분석은 힘들다. 본 논문은 실제 프로세서 및 인버터로 구현 된 경우와 동일하게 디지털 비례 적분 전류 제어기(PI) 및 SVPWM(Space Vector PWM)를 포함한 동기 좌표계에서의 PMSM의 시뮬레이터를 Matlab/Simulink를 이용하여 구현 하였으며, 고속 및 일반 PMSM을 대상으로 전류 제어 및 PWM 주파수를 달리하여 시뮬레이션을 하였다. 그 결과 본 논문에서 구현된 시뮬레이터를 통해 PMSM의 동기 좌표계에서 벡터 제어 시

전류 제어 특성의 예측 가능성을 보였다.

2. 본 론

2.1 시뮬레이터의 구성

2.1.1 디지털 전류 제어기의 구성

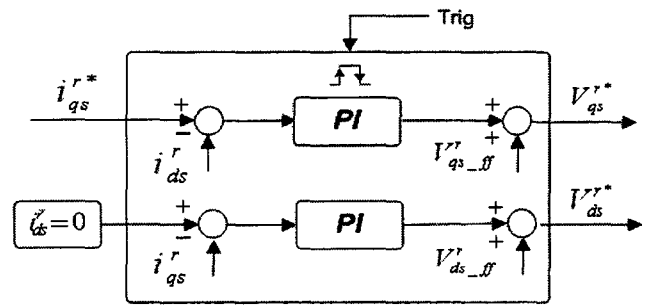


그림 1 디지털 전류 제어기의 구성

그림 1의 디지털 전류 제어기는 식(1)의 동기 좌표계에서의 PMSM의 전압 방정식을 근거로 하여 속도에 따른 역기전력 성분과 상호 간섭항은 식(2)의 전향 보상항 (Feed Forward Term)에 의해 보상되는 비례 적분(PI) 전류 제어기이다. 여기서 전류 제어기는 실제와 동일하게 트리거 신호에 동기 되어 동작하는 디지털 형태로 구현하였다.^[1]

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

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

$$V_{ds_ff}^r = -\omega_r L_q i_{qs}^r \quad (2)$$

$$V_{qs_ff}^r = \omega_r L_d i_{ds}^r + \omega_r \lambda_f$$

R_s : dq축 등가 상 저항

L_q : q축 등가 상 인덕턴스,

L_d : d축 등가 상 인덕턴스

λ_f : 역기전력 상수

2.1.2 SVPWM 발생부의 구성

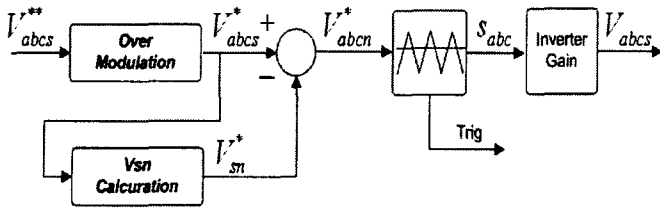


그림 2. SVPWM부의 블록도

SVPWM(Space Vector PWM)부의 동작 시퀀스는 그림 2와 같다. 먼저 on 시퀀스 및 off 시퀀스의 시작점에서 Trig 신호를 발생시켜 전류 제어기로부터 전압 지령치를 갱신한다. 그리고 과변조 상태를 인지하고, 육상 전압을 이용하여 극전압을 생성하여 삼각파 비교 전압 변조 방식을 이용하여 인버터의 스위치 시퀀스를 결정하였다. 여기서 과변조 구간에서는 전압/지령 전압의 선형성이 깨지는 현상을 막기 위해 동일 위상 과변조 기법을 적용하였으며, 공간벡터 변조는 육상 전압을 이용하여 구현 하였다.^[1]

2.1.3 전체 제어 루프의 구성

앞서 언급한 디지털 전류 제어기와 SVPWM부를 이용한 PMSM의 동기 좌표계에서 전체 시뮬레이터의 구성은 그림 3과 같다. 여기서 한 가지 고려되어야 할 사항은 디지털 전류제어기의 경우 제어기의 연산 시간에 의해 이번 트리거 시점에 계산된 전압 정보는 PWM 발생부에서 다음 트리거 시점에 갱신되어지는 현상에 기인한 1 전류 제어 주기의 시 지연이 발생한다. 따라서 실제와 동일하게 전류 제어기와 PWM 발생부 사이에 1전류 제어 주기의 Update Delay를 고려하였다. 이러한 시 지연은 전류 제어기의 기준좌표축을 이동시키고 출력 전압

위상과 크기에 오차를 발생시킨다. 특히 고속 전동기의 고속 운전 영역처럼 출력 주파수에 대한 샘플링 비가 충분하지 못할 경우 오차가 커져 전류 제어의 동특성 및 안정성을 저하 시킨다. 따라서 이를 고려한 PWM 기법이 연구 되었는데^[2] 이는 SVPWM 변조 방식에서 영벡터가 유효 벡터의 시작과 끝부분에 위치하는 특성을 고려하여 PWM 주기의 반을 지연으로 근사화하여 샘플링 시점부터 PWM 출력까지 1.5 전류 제어 주기의 지연으로 고려하여 지연 시간 동안 출력 전압의 크기 및 위상에 대한 오차를 구하고 그 역을 이용하여 보상하는 방법이다. 본 논문에서 구현된 제어 루프에서도 이와 같은 보상 방법을 적용하였다. 보상을 위한 오차 및 보상 함수는 식(3) (4)과 같으며 여기서 식(3)의 분자 및 분모는 각각 출력 전압의 위상 및 크기 오차이고 식(4)은 역함수를 이용하여 구한 보상을 위한 함수이다.^[2]

$$f_{error} = \frac{e^{j(-1.5T_s\omega_e)}}{K(\omega_e, T_s)} \quad (3)$$

$$f_c = \frac{1}{f_{error}} = K(\omega_e, T_s)e^{j(1.5T_s\omega_e)} \quad (4)$$

$$K(\omega_e, T_s) = \frac{2}{\omega_e T_s} \sin\left(\frac{\omega_e T_s}{2}\right) \quad (5)$$

2.2 모의실험

벡터 제어 시 동기좌표계에서 전류 제어 특성을 분석하기 위한 시뮬레이션은 고속 및 일반 PMSM을 대상으로 아날로그 형태로 구현된 이상적인 제어 루프와 구현된 시뮬레이터에서 전류 제어 및 PWM 주파수를 다르게 하며 무 부하에서 정격 속도까지 가속하여 정격 부하를 인가하였다. 시뮬레이션에 사용된 고속 및 일반 PMSM의 사양은 표1과 같으며 회전자의 형태는 표면 부착형이다. (Lq=Ld)

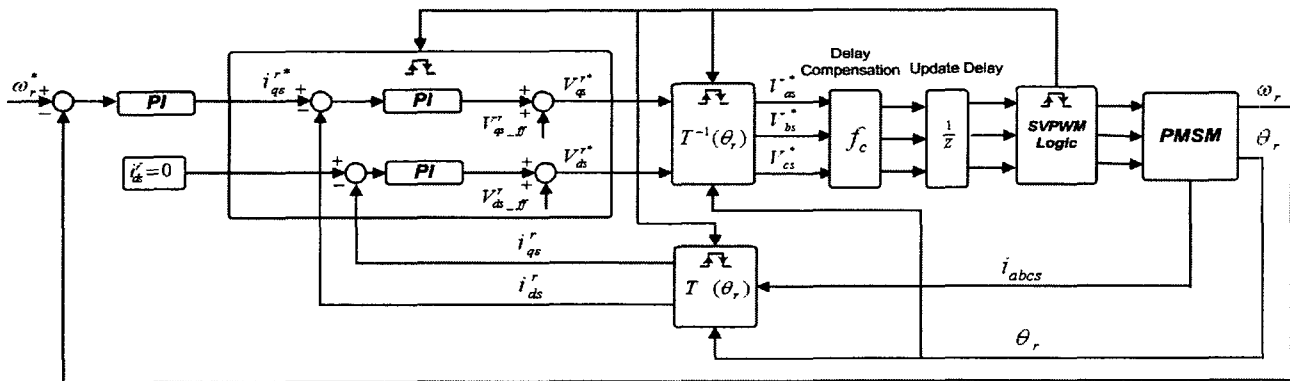


그림 3 전체 제어 루프의 구성

표 1 모의실험에 사용된 PMSM 사양

	고속 PMSM	일반 PMSM
정격	135 [kW]	470[W]
전경속도	68000 [rpm]	2000 [rpm]
정격전류	335 [A]	3.9 [A]
토크상수	0.053381	1.368
Ls	0.0285 [mH]	6.5[mH]
Rs	0.0055 [Ω]	1.3 [Ω]
극수	2	6
관성	0.0068 [Kgm ²]	0.008 [Kgm ²]

2.2.1 전류 제어 및 PWM 주파수에 따른 전류 제어 특성

그림 4,5는 고속 및 일반 PMSM의 무 부하 조건에서 정격 속도 까지 가속한 시물레이션 결과이다. 우선 이상적인 제어기 경우 dq축 전류는 리플 없이 이상적으로 제어됨을 보이지만 구현된 시뮬레이터의 경우 전류 및 PWM 주파수에 따라 전류 제어 특성이 달라짐을 볼 수 있다. 그리고 전류 제어 및 PWM 주파수가 15kHz / 7.5kHz 일 때 고속 PMSM의 경우 대략 40000 [rpm] 이상에서 전류 리플이 심해 전류 제어가 어렵지만(그림 4.b) 일반 PMSM의 경우에는 전류 제어가 가능함을 보인다.(그림 5.b) 그리고 두 경우 모두 전류 제어 및 PWM 주파수가 높을수록 dq축 전류 제어 특성이 나아짐을 확인할 수 있다.

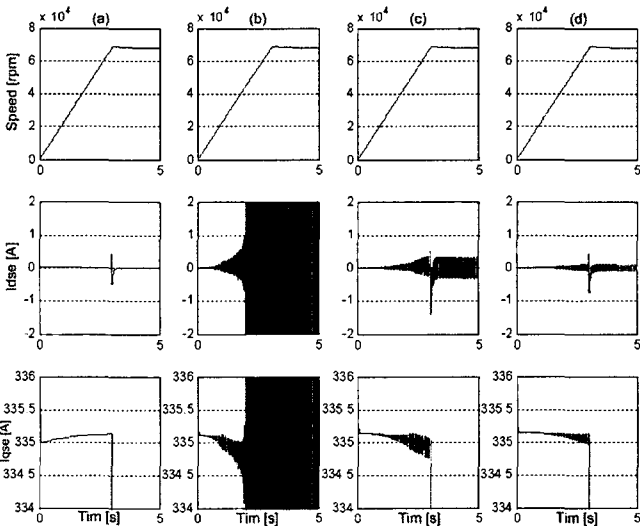


그림 4 고속 PMSM의 속도 및 전류 제어 특성

- (a) Ideal 한 제어루프
- (b) 전류 제어 및 PWM 주파수가 10kHz / 5kHz 인 경우
- (c) 전류 제어 및 PWM 주파수가 15kHz / 7.5kHz 인 경우
- (d) 전류 제어 및 PWM 주파수가 30kHz / 15kHz 인 경우

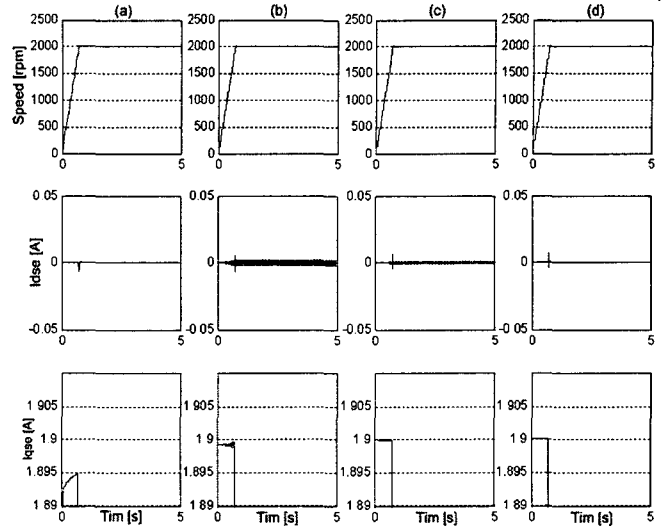


그림 5 일반 PMSM의 속도 및 전류 제어 특성

- (a) Ideal 한 제어루프
- (b) 전류 제어 및 PWM 주파수가 10kHz / 5kHz 인 경우
- (c) 전류 제어 및 PWM 주파수가 15kHz / 7.5kHz 인 경우
- (d) 전류 제어 및 PWM 주파수가 30kHz / 15kHz 인 경우

2.2.2 상전류의 THD 분석

THD (Total harmonics of Distortion)는 아래 식 (6)과 같이 기본 주파수의 실효치 대한 나머지 고조파 실효치의 합의 비로 나타내어지며 고조파 함유율을 수치적으로 나타낼 수 있다.

$$THD = \frac{I_F}{I_H} \quad (I_F = \sqrt{I_2^2 + I_3^2 + I_n^2}) \quad (6)$$

- I_H : RMS Value of the Fundamental current
- I_n : RMS Value of the Harmonics current
- I_F : Sum of the Harmonics current

그림 6은 고속 및 일반 PMSM의 정격 속도에서 정격 부하를 인가한 상태에서의 상전류 및 THD 이다. 고속 PMSM의 경우에는 높은 출력 주파수에 대한 상대적으로 낮은 PWM 주파수로 인해 일반 PMSM에 비해 정격 속도에서 상전류의 리플이 심하고, 고조파 함유도 높게 나타나고 있다. 특히 전류 제어 및 PWM 주파수가 10kHz / 5kHz 일 때 고속 PMSM의 경우 상전류의 리플이 심해 THD의 값이 일정하지 않지만, 일반 PMSM은 THD가 30% 이하이다. 이러한 결과를 볼 때 고속 PMSM의 고속 영역에서의 운전 시 만족 할만한 전류 제어 특성을 얻기 위해서는 속도에 대한 전류 제어 및 PWM 주파수를 높여야 하며 상전류 리플을 줄이기 위한 대안으로는 저주파 필터를 이용하는 방법이 있지만 이 경우 필터의 의한 지연이 발생하기 때문에 이를 고려해야 한다.^[3]

3. 결 론

본 논문에서는 PMSM의 동기 좌표계에서 벡터 제어 시 전류 제어 특성을 분석할 수 있는 시뮬레이터를 구현하였으며, 고속 및 일반 PMSM을 대상으로 시뮬레이션을 수행하여 그 결과 본 논문에서 구현된 시뮬레이터를 통해 PMSM의 전류 제어 특성의 분석이 가능함을 보였다.

참 고 문 헌

- [1] 설승기, "전기기기 제어론", 브레인 코리아, 서울대학교 전력전자 연구실, 2002
- [2] 배분호, 설승기, "디지털 동기 좌표계 전류제어기에서의 시 지연을 고려한 PWM기법", 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템부회 춘계학술대회 논문집 2001.4.19~21
- [3] 노민식, 박승엽, "터보 제너레이터의 시동 알고리즘 및 시동기 개발", 전력 전자 학회지, 2004, 제9권1호, pp.17 ~ 24.

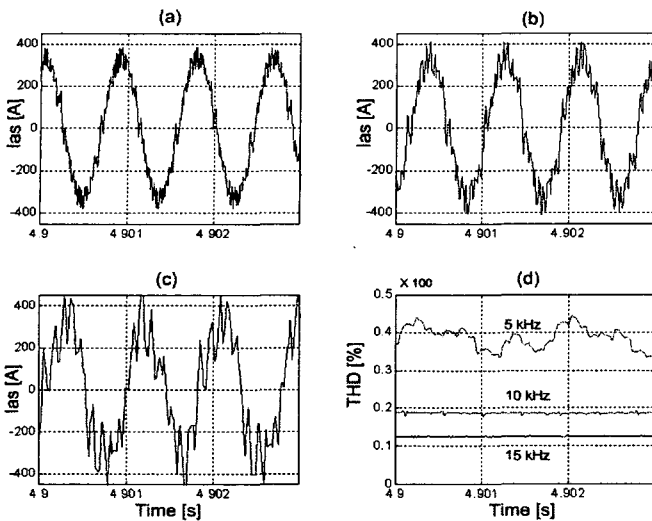


그림 6 고속 PMSM의 상전류 및 THD

- (a) 전류 제어 및 PWM 주파수가 30kHz / 15kHz 인 경우
- (b) 전류 제어 및 PWM 주파수가 20kHz / 7.5kHz 인 경우
- (c) 전류 제어 및 PWM 주파수가 10kHz / 5kHz 인 경우

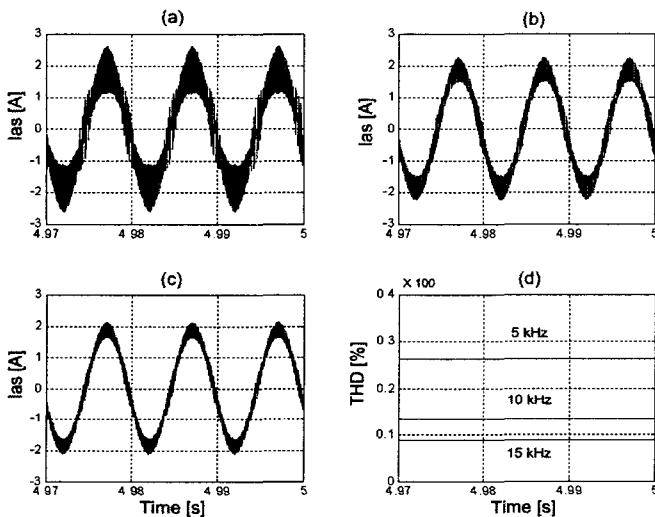


그림 7 일반 PMSM의 상전류 및 THD

- (a) 전류 제어 및 PWM 주파수가 10kHz / 5kHz 인 경우
- (b) 전류 제어 및 PWM 주파수가 15kHz / 7.5kHz 인 경우
- (c) 전류 제어 및 PWM 주파수가 30kHz / 15kHz 인 경우

지금까지는 구현된 시뮬레이터를 이용해 동기 좌표계에서의 벡터 제어 시 전류 제어 및 PWM 주파수에 따른 전류 제어 특성 분석한 결과이다. 따라서 실제 실험을 통해 시뮬레이터의 타당성이 입증된다면 본 논문에서 구현된 시뮬레이터는 PMSM의 벡터 제어 시스템의 구현에 앞서 유용한 도구로 쓰일 수 있겠다.