

고전력 동기전동기용 3레벨 인버터를 위한 센서리스 자속 기준 제어 설계

조현태, 김예린
울산과학기술원

Sensorless Field-Oriented Control Design for High-Power 3-Level PMSM Drive Inverter

Hyeun-Tae Cho, Katherine A. Kim

Ulsan National Institute of Science and Technology (UNIST)

ABSTRACT

차세대 고속 이동수단에 필요한 고전력 전동기에 대한 관심이 꾸준히 증가하는 추세이다. 본 논문에서는 고전력 동기전동기(PMSM) 구동에 필요한 전력 인버터의 제어 및 센서리스 제어기법을 적용한 자속 기준 제어(Field oriented control)를 시뮬레이션을 통해 입증하였다. 고전력에서 인버터 스위치의 전력부담을 줄이기 위해 3 레벨 인버터를 설계하고, 벡터 제어 SVPWM 방식을 적용하였으며 고전력 및 고속 PMSM의 파라미터에 맞추어 센서리스(sensorless) 제어를 설계하였다. 센서리스 제어에는 모델 기준 적응 시스템(MRAS)을 통해 속도 및 위치를 예측하여 모터를 제어하는 방식을 적용하였다. 가속 시 5초간 가가속도 값을 적용하여 필요 토크 및 속도제어를 Matlab/Simulink에서 설계 및 구현하고, 예측속도와 실제 모터 속도는 최대 0.01 rad의 오차를 나타냈고, 67초 동안 목표 속도 500 rad/s까지 가속함을 확인하였다.

1. 서론

차세대 고속 이동수단에 대한 관심이 증가하면서 고전력 전동기 구동의 신뢰성 및 안정성이 중요시되고 있다. 그중 동기전동기는 유도전동기에 비해 효율 및 역률에서 좋은 성능을 가지고 있으며, 고전력 및 고속에 적합한 전동기로 여러 분야에서 활용되고 있다.^[1] 고속 이동수단의 전력시스템에서 전동기 구동용 전력 인버터는 DC bus 고전압의 입력을 받아 출력으로 3상 AC 전압으로 변환하여 PMSM을 구동 및 제어한다. 따라서 본 논문에서는 높은 입력 전압에 따른 스위치의 전압부담을 줄이기 위해 기존의 2 레벨 인버터 구조를 3 레벨로 구성하여, 스위치에 인가되는 전압을 절반으로 줄여 설계의 타당성을 얻을 수 있다. 또한, 벡터제어를 기반으로 한 SVPWM과 자속 기준 제어를 통해 동기전동기의 효율적인 제어, 적은 토크 리플과 고속운행에서의 빠른 동적 성능을 구현할 수 있다.

위치 센서의 고장이나 노이즈 문제는 전동기 구동의 신뢰성을 감소시키는 주요 요인이고, 그에 따라 센서리스 제어가 여러 전동기 제어에서 활발히 이용되고 있다.^{[1][2]} 역기전력을 이용한 방법, 그중 고속 이동수단에 적용되기 위해 신뢰성이 높은 MRAS(Model reference adaptive system)를 기반으로한 센서리스 제어기법을 설계하여 적용하려 한다.

2. 고전력 PMSM 구동 및 센서리스 제어

2.1 고전력 3-레벨 NPC 인버터 구동

그림 1은 고전력 동기전동기용 3-레벨 NPC 인버터의 구조를 나타내며, 기존의 2레벨 인버터대비 낮은 스위치 전압 스트레스와 출력전압 고조파 감소시키는 이점이 있다.

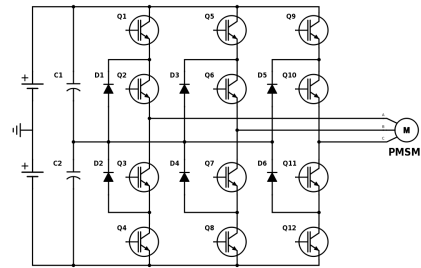


그림 1 동기전동기용 3-레벨 NPC 인버터

그림 2는 자속 기준 제어(FOC) 시스템을 포함한 전체 동기전동기 구동 시스템을 나타낸다. 자속 기준 제어를 통해 고속 이동수단에서 요구되는 낮은 토크 리플과 빠른 동적 성능을 구현할 수 있다. 측정된 d q 전류와 목표 속도를 기준으로 필요한 토크에 맞는 d q 전압을 PI 제어기를 통해 얻는다. 계산된 d q 전압을 abc축으로 변환한 뒤, 벡터제어 SVPWM을 통해 인버터의 스위치를 제어함으로써 자속 기준 제어를 구현할 수 있다.

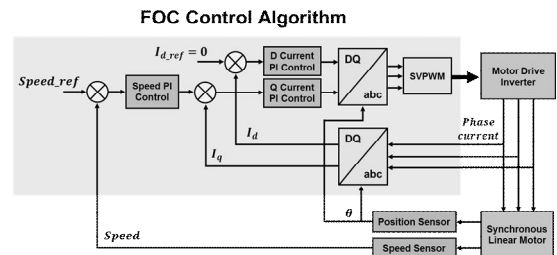


그림 2 자속 기준 제어 시스템 블록도

2.2 MRAS 기반 센서리스 제어

센서리스 제어는 측정된 전류와 전압으로 전동기의 속도 및 각도를 예측할 수 있다. PMSM의 전류방정식에 측정된 d q 전압과 flux linkage를 이용하여 d q 전류를 예측하고, 실제 d q 전류와 비교하여 속도 및 각도를 예측한다. 식 (1)과 (2)는 PMSM의 전류방정식으로 측정된 d q 전압으로 d q 전류를 예측한 뒤, 식 (3)을 통해 측정된 d q 전류와 비교하여 속도를 예측한다.

$$\frac{d\hat{i}_d}{dt} = \frac{V_d}{L} - \frac{R}{L}\hat{i}_d + \hat{i}_q\hat{\omega} \quad (1)$$

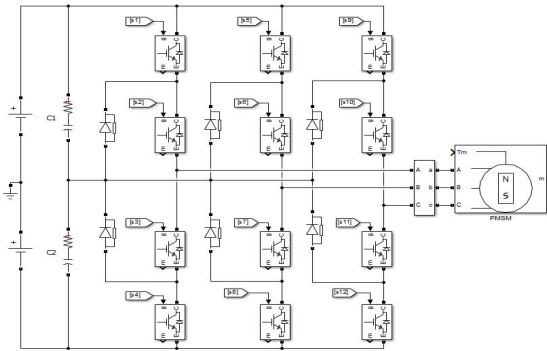
$$\frac{d\hat{i}_q}{dt} = \frac{V_q}{L} - \frac{R}{L}\hat{i}_q - \frac{\Psi_f}{L}\hat{\omega} - \hat{i}_d\hat{\omega} \quad (2)$$

$$\hat{\omega} = \left(K_p + \frac{K_i}{s} \right) \left[(i_d\hat{i}_q - \hat{i}_d i_q) - \frac{\Psi_f}{L}(i_q - \hat{i}_q) \right] \quad (3)$$

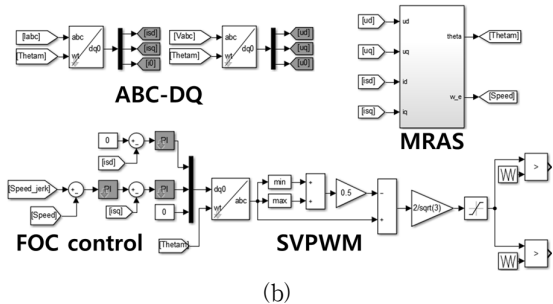
모터의 위치는 MRAS에서 얻은 모터속도를 적분하여 구할 수 있으며, 이렇게 예측된 모터위치로 자속 기준 제어에 필요한 전류 및 전압의 abc dq 변환에 사용된다.

3. 시뮬레이션 설계 및 결과

동기전동기 구동 시뮬레이션은 MATLAB Simulink에서 구현되었다. 시뮬레이션 회로는 3 레벨 NPC 인버터와 계산된 파라미터의 PMSM 모델로 구성되어 있으며, 목표 속도는 가속 초기와 말기 5초 동안 가가속도값을 적용하여 부드러운 전동기 구동을 구현하였다.



(a)



(b)

그림 3 (a) PMSM 구동 3-레벨 인버터 시뮬레이션 회로와 (b) FOC 센서리스 제어기

그림 4는 MRAS를 통해 얻은 위치 예측 값과 실제 모터 위치의 오차를 나타내고, 오차는 최대 0.01 rad으로 위치를 예측하는 것을 확인할 수 있다. 그림 5에서 동기전동기의 속도가 목표 속도를 따라 가속하는 것을 확인할 수 있고, 속도 증가에 따라 증가하는 역기전력에 맞추어 SVPWM 기준 신호의 진폭이 증가함을 확인할 수 있다. 또한, 상전류는 가속 초기와 말기 5초 동안 가가속도에 맞추어 일정하게 증가 및 감소하며, 일정한 가속도일 때는 일정한 전류로 토크를 발생시킨다.

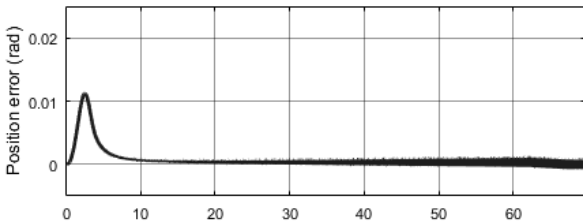


그림 4 MRAS 위치 예측과 실제 모터 위치와의 오차

그림 6는 출력 토크가 제어를 통해 설정된 가속도에 따라 출력되는 것을 나타낸다. 가가속도가 적용되어 초기 구동시 선형적인 토크를 통해 부드러운 가속을 확인할 수 있다.

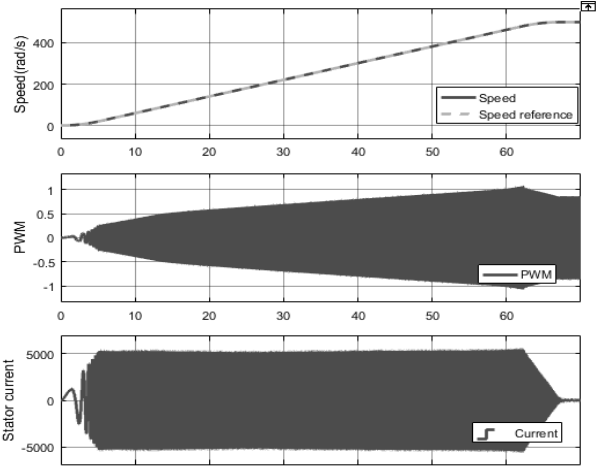


그림 5 동기전동기 속도, PWM 기준 신호, 상전류 그래프

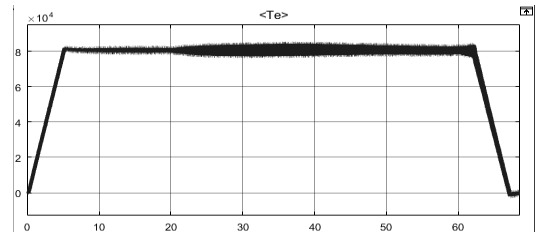


그림 6 동기전동기 출력 토크 그래프

4. 결론

본 논문은 차세대 고속 이동수단을 위한 고전력 동기전동기 구동을 위한 3 레벨 인버터 제어 및 MRAS를 통한 센서리스 자속 기준 제어기법을 MATLAB Simulink에서 구현 및 검증하였다. 설계된 PMSM 파라미터를 이용하여 목표 속도 및 가가속도를 만족하는 자속 기준 제어기를 설계하였고, MRAS를 통해 센서리스 제어를 적용하였다. 시뮬레이션 결과, 목표 속도 500 rad/s까지 낮은 토크 리플과 최대 0.01 rad의 속도오차로 동기전동기가 가속함을 검증하였다.

This material is based upon work supported by the research funding from Ulsan National Institute of Science and Technology (Grant No. 1.170004.01).

참고 문헌

- [1] N. H. Saad, A. A. El Sattar and M. A. Gad, "Sensorless Field Oriented Control based on improved MRAS speed observer for Permanent Magnet Synchronous Motor drive," 2016 Eighteenth International Middle East Power Systems Conference (MEPCON), Cairo, 2016, pp. 991-998.
- [2] J. Zhao, X. Zhang, C. Lin and G. Tian, "Simulation research of sensorless control of PMSM based on MRAS considering parameters variation and dead time," 2016 19th International Conference on Electrical Machines and Systems (ICEMS), Chiba, 2016, pp. 1-6.