

# 인버터 장치 실험용 영구자석 동기전동기의 실시간 시뮬레이터 설계

오현철<sup>1</sup>, 안병웅<sup>1</sup>, 조관열<sup>1</sup>, 김학원<sup>1</sup>, 조정구<sup>2</sup>, 문용기<sup>2</sup>

<sup>1</sup>한국 교통대학교, <sup>2</sup>그린파워

## Design of a Real Time Simulator for Inverter Unit Test of PM Synchronous Motor

Hyuncheal Oh<sup>1</sup>, Byoung Woong An<sup>1</sup>, Kwan Yuhl Cho<sup>1</sup>, Hag Wone Kim<sup>1</sup>, Jung Gu Cho<sup>2</sup>, Yong Gi Moon<sup>2</sup>

<sup>1</sup>Korea National University of Transportation, <sup>2</sup>Green Power

### ABSTRACT

The real time simulator for testing the high power inverter unit of a PM synchronous motor is proposed. The power converter of the real time simulator can replace the dynamo test equipment that consists of a PMSM (PM synchronous motor) and load unit. It is verified by the simulation that the real time simulator has a similar electrical and mechanical characteristics of the PM synchronous motor.

### 1. 서론

전기자동차 구동 및 엘리베이터 등의 대용량 영구자석 동기전동기의 인버터 개발을 위해서는 전동기 및 부하실험장치 등의 개발이 선행되어야 한다. 그러나 대용량의 영구자석 동기전동기 및 다이내모 실험장치는 개발 및 제작에 많은 시간과 비용이 요구된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 실시간으로 전동기를 모사하는 실시간 시뮬레이터에 대한 연구가 진행되어 왔다. 전동기의 모사장치는 전류제어를 기반으로 하여 전동기의 특성을 모사하는 방법이 제시되어 왔다.<sup>[1] [3]</sup> 전류 제어를 기반으로 한 모사장치는 VVVF (Variable voltage variable frequency) 등과 같이 전압제어 기능만을 갖는 인버터의 경우 적용이 가능하지만, 고성능의 속도제어, 토크제어 등을 위한 전류제어기가 필요한 경우, 인버터의 전류제어기와 모사장치의 전류제어기의 충돌로 인해 전동기의 특성을 정확히 모사하기 어렵다.

본 논문에서는 전류제어기를 갖는 인버터의 실험용 전동기 모사장치를 개발하기 위하여 전압제어를 기반으로 하는 전동기 실시간 시뮬레이터를 제안한다. 제안된 대용량 영구자석 동기전동기용 모사장치는 Matlab/simulink를 사용하여 타당성을 검증하였다.

## 2. 영구자석 동기전동기용 실시간 시뮬레이터

### 2.1 PMSM의 수학적 모델

실시간 시뮬레이터가 모사해야 할 영구자석 동기전동기의 dq축 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_q &= r_s i_q + L_q \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_d i_d + E \\ v_d &= r_s i_d + L_d \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_q i_q \end{aligned} \quad (1)$$

식 (1)에서  $r_s$ 는 고정자 저항을,  $L_d$ ,  $L_q$ 는 각각 dq축 인덕턴스를,  $E$ 는 유기전압의 크기를 나타낸다.

### 2.2 PMSM 실시간 시뮬레이터 회로 구성

제안하는 PMSM의 실시간 시뮬레이터는 그림 1과 같다. 시뮬레이터는 영구자석 동기전동기의 전기적 특성을 모사하기 위하여 고정자의 저항( $r_m$ ), 인덕터( $L_m$ ) 및 유기전압 특성을 나타내는 커패시터( $C_f$ )로 구성된다. 영구자석 동기전동기의 유기전압은 정현파의 형태로 나타나며 유기전압의 크기는 전동기의 속도에 비례한다. 따라서 커패시터의 전압은 크기 및 주파수가 임의로 제어할 수 있어야 한다. 커패시터  $C_f$ 의 전압을 속도에 비례하는 정현파로 제어하기 위하여 인덕터  $L_s$  및 PWM 정류기를 사용한다.

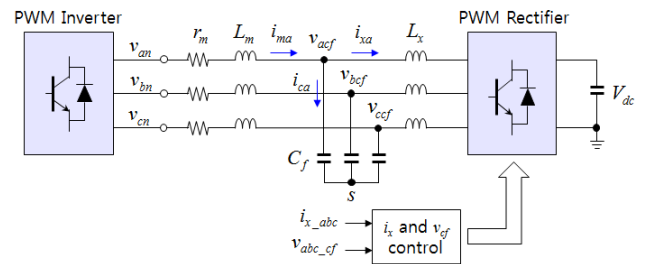


그림 1 시뮬레이터 회로 구성

Fig. 1 Simulator circuit configuration.

그림 1에서 PWM 인버터의 출력단 전압은 영구자석 동기전동기에 인가되는 전압을 나타내며 그림 1과 같이 LCL 회로로 구성된 시뮬레이터의 dq축 전압방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} v_q &= r_m i_q + L_m \frac{d}{dt} i_q + \omega_r L_m i_d + v_{qcf} \\ v_d &= r_m i_d + L_m \frac{d}{dt} i_d - \omega_r L_m i_q + v_{dcf} \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)로 나타낸 PMSM의 실시간 시뮬레이터가 식 (1)의 영구자석 동기전동기의 모델을 모사하기 위한 커패시터 전압은 식 (1)과 (2)로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$v_{qcf}^* = (r_s - r_m)i_q + (L_d - L_m)\frac{di_q}{dt} + \omega_r(L_d - L_m)i_d + E$$

$$v_{dcf}^* = (r_s - r_m)i_d + (L_d - L_m)\frac{di_d}{dt} - \omega_r(L_d - L_m)i_q$$

식 (3)에서 커패시터 전압은 PMSM의 역기전력을 모사한다. 다양한 영구자석 동기전동기를 모사하기 위해 시뮬레이터의 저항 및 인덕턴스는 PMSM의 저항 및 인덕턴스와 동일하게 구성할 수 없으므로 시뮬레이터와 전동기의 저항 및 인덕턴스 차이를 반영하여 커패시터 전압이 전동기의 유기전압을 모사할 수 있도록 구성한다.

### 2.3 PMSM 시뮬레이터의 커패시터 전압 제어

식 (3)으로 나타난 커패시터 전압을 제어하기 위하여 실제 커패시터 전압을 검출하고 PI 제어기를 구성한다. 커패시터 전압은 커패시터에 흐르는 전류에 의해 제어할 수 있으므로 커패시터 전압제어기의 출력은 커패시터 전류명령이 되며 커패시터의 전류는 인덕터  $L_m$  에 흐르는 전류로 제어할 수 있다.

$$i_{qx} = i_{qi} - i_{qcf}$$

$$i_{dx} = i_{di} - i_{dcf}$$

LCL회로에 KVL을 적용하여 다음과 같은 식을 나타내었다.

$$v_{conv} = v_c - L_x \frac{di_x}{dt}$$

식 (5)를 이용하여 컨버터측 지령 전압을 나타낼 수 있다. 이 때, 인버터 측 전류제어기의 대역폭에 영향을 받지 않게 하기 위해 식 (6)과 같이 dead beat control을 적용하였다.

$$v_{dconv}^* = L_x \frac{d(i_{dLx} - i_{dLx}^*)}{dt} + v_{dcf}$$

$$v_{qconv}^* = L_x \frac{d(i_{qLx} - i_{qLx}^*)}{dt} + v_{qcf}$$

### 2.4 모의실험 결과

표 1 시뮬레이션 파라메타  
Table1 Simulation Parameter.

PMSM		LCL	
$R_s$	0.015Ω	$R_m$	0.007Ω
$L_d$	0.196mH	$L_m$	0.196mH
$L_q$	0.359mH	$C_f$	0.365μF
$\phi_f$	0.046	$L_x$	19.1mH
Pole	16		
$J_m$	0.005kgm <sup>2</sup> /sec		

다음과 같은 조건에서 모의실험을 실행 하였다.

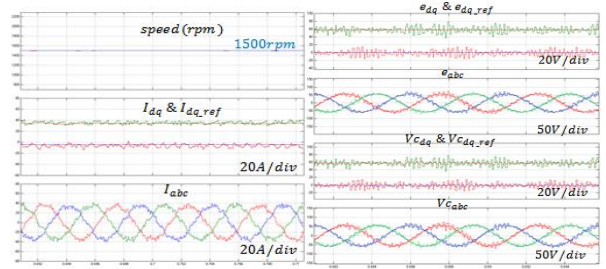


그림 2. 1500rpm 시뮬레이션 결과  
Fig. 2 Simulation results of 1500rpm

그림 2에서 1500rpm의 시뮬레이션 결과를 나타내었다. 부하 토크는 20Nm로 설정 되어 있다. 속도 제어기의 출력을 이용하여 전류 제어를 하였을 때, dq축 전류가 전류 지령을 추종한다. 이 때, 커패시터의 전압은 역기전력을 모사하고 있다.

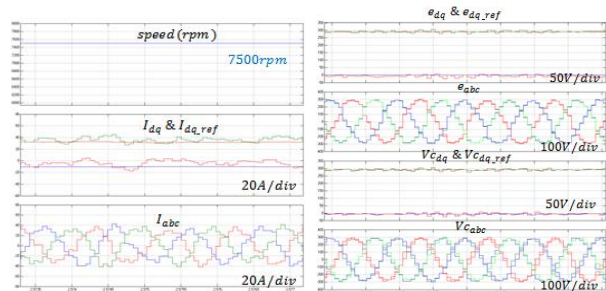


그림 3 7500rpm 시뮬레이션 결과  
Fig. 3 Simulation result of 7500rpm

그림 3에서 그림 2와 같은 실험을 7500rpm에서 실행하였다. 그림 2와 같이 전류 제어를 하였을 때 고정자 dq축 전류는 지령 전류를 추종한다. 그리고 커패시터의 전압이 역기전력을 모사 하고 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 PMSM의 전압 방정식을 LCL 회로의 전압 방정식을 통해 모사하였다. 이 때 커패시터의 전압을 제어함으로써 PMSM의 모델을 모사할 수 있음을 matlab/simulink를 활용하여 증명하였다.

이 논문은 (주)그린파워의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] G. Kim, H. Lee, S. Oh, C. Lee, and S. Park, "Study on Real Time Load Simulator for Testing Propulsion Inverter Test," SICE ICASE International Joint Conference 2006, pp. 3858-3863 Oct. 2006 Busan, Korea
- [2] L. Kovudhikulrungsri, K. Yuki, T. Arai, and A. Hirahara, "Real Time Simulator for Railway Traction and Auxiliary Power Unit Control Applications," Proc. of IPEC 2010, pp. 244-247, 2010
- [3] T. Hanamoto, Jun'ichi Yano, H. Ikeda, and T. Tsuji, "Hardware Real Time Simulator of Synchronous Reluctance Motor Including Three Phase PWM Inverter Model," Proc. of IPEC2010, pp. 2005-2009, 2010