

# LCL 필터와 PWM 정류기를 이용한 3상 유도전동기의 시뮬레이터

조관열\*, 김학원  
한국교통대학교 전자공학과

## Simulator for 3 Phase Induction Motor with LCL Filter and PWM Rectifier

Kwan Yuhl Cho\*, Hag Wone Kim

Department of Electronic Engineering, Korea National University of Transportation

**요약** 대용량 유도전동기용 인버터 개발을 위한 부하 장치는 고가의 제작 비용 및 제작에 많은 시간이 필요하므로 유도전동기 및 부하 장치를 대체할 수 있는 시뮬레이터 개발에 대한 필요가 증대되고 있다. 기존의 대용량 3상 유도전동기의 인버터용 부하 시뮬레이터는 리액터와 3상 PWM 정류기를 사용하여 시험용 인버터의 전류를 제어함으로써 단지 인버터의 부하로만 작용할 뿐 유도전동기의 특성을 모사하기 어렵다. 본 논문에서는 LCL 필터와 3상 PWM 정류기를 이용하여 3상 유도전동기의 모델과 부하 특성을 모사할 수 있는 실시간 시뮬레이터를 제안한다. PWM 인버터에 흐르는 전류는 3상 유도전동기의 고정자 전류를 모사하며 LCL 필터의 인덕터에 흐르는 전류와 커패시터 전압에 의해 제어된다. LCL 필터의 커패시터 전압은 3상 유도전동기의 회전자 자속에 의해 고정자 권선에 유기되는 유도기전력을 모사하며 인덕터 전류와 PWM 정류기에 의해 제어된다. 3상 유도전동기의 회전자 전류, 고정자 및 회전자 자속, 전동기 토크, 슬립 주파수 및 회전자 속도는 인버터에 흐르는 전류와 유도전동기의 상수로부터 유도된다. MATLAB/Simulink 시뮬레이션을 통하여 제안된 3상 유도전동기용 실시간 시뮬레이터의 전기적, 기계적 모델 특성 및 벡터제어 동작을 검증하였다.

**Abstract** A dynamo set for a high-power induction motor drive is expensive and needs a long time to manufacture. Therefore, the development of a simulator that functions as the induction motor and load equipment is required. A load simulator of an inverter for a high-power three-phase induction motor consists of a reactor and three-phase PWM inverter. Therefore, it cannot simulate the dynamic characteristics of an induction motor and functions only as a load. In this paper, a real-time simulator is proposed to simulate a model of an induction motor and the load characteristics based on an LCL filter and three-phase PWM rectifier for a three-phase induction motor. The currents of a PWM inverter that simulate the stator currents of the motor are controlled by the inductor currents and capacitor voltages of the LCL filter. The capacitor voltages of the LCL filter simulate the induced voltages in the stator windings by the rotating rotor fluxes of the motor, and the capacitor voltages are controlled by the inductor currents and a PWM rectifier. The rotor currents, the stator and rotor flux linkages, the electromagnetic torque, the slip frequency, and the rotor speed are derived from the inverter currents and the motor parameters. The electrical and mechanical model characteristics and the operation of vector control were verified by MATLAB/Simulink simulation.

**Keywords** : Real Time Simulator, Induction Motor, LCL Filter, PWM Rectifier, Vector Control

본 논문은 2019년 한국교통대학교 지원과 2016년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20184030202270)

\*Corresponding Author : Kwan-Yuhl Cho(Korea National Univ. of Transportation)  
email: kycho@ut.ac.kr

Received October 21, 2020

Revised November 4, 2020

Accepted November 6, 2020

Published November 30, 2020

## 1. 서론

3상 유도전동기는 영구자석동기전동기에 비해 효율 측면에서 불리하나 저가격 및 보수의 필요성이 적은 관계로 대용량 및 산업용으로 많이 적용되고 있다. 3상 유도전동기 및 인버터는 부품, 소재 및 장비 관련 산업에 의한 영향을 많이 받는 분야로 이 부분의 기술 경쟁력 확보를 위해서는 유도전동기 및 인버터 개발에 필요한 제반 환경을 구축할 필요가 있다. 150kW~200kW의 대용량이 요구되는 산업용 유도전동기 및 인버터 제어기를 개발하기 위해 그림 1과 같은 시험장치(Dynamo system)를 구성하기 위해서는 고가의 비용이 요구된다. 따라서 유도전동기를 개발한 후에도 이를 구동하기 위한 인버터 제어기를 개발하기 위해서는 고비용이 요구되며 경우에 따라서는 고속운전 등의 운전조건에서 인버터 특성을 검증할 수 없는 문제가 발생한다. 또한 대용량 산업용 인버터의 경우, 400A~500A의 대전류 및 높은 전압이 전력용 반도체에 인가되며 수 kHz의 고속 스위칭을 하기 때문에 인버터의 신뢰성 확보가 매우 중요하다. 인버터 시스템의 개발 기간의 많은 시간을 전동기 제어 알고리즘 개발보다 인버터의 신뢰성 향상, 신뢰성 시험 및 수명 예측 등에 투자해야 한다. 또한 대용량 유도전동기를 설계 및 제작 후 인버터와의 매칭 특성에 따라 전동기를 재 설계 및 제작해야 할 경우 재 제작에 따른 시간 및 많은 비용이 수반된다. 따라서 산업용 유도전동기 및 전동기 제어 알고리즘의 개발기간을 단축하고, 인버터의 신뢰성 조기 확보를 위해서 대용량, 대전류의 유도전동기를 모사할 수 있는 유도전동기의 시뮬레이터(Simulator)의 필요성이 점차 증가되고 있다. 이에 따라 전동기 및 부하시험장치의 특성을 모사하고 기존 시험설비에 비해 낮은 가격으로 구현하기 위하여 DC 전동기, 동기전동기 및 유도전동기의 실시간 시뮬레이터에 대한 연구가 진행되어 왔다

[1-7].

[1]에서는 풍력발전기용 DC 전동기의 토크-속도 및 전력-속도 특성을 모사하기 위한 시뮬레이터를 제안하였고, [2]에서는 FPGA를 이용한 싱크로너스 릴럭턴스 동기전동기의 속도제어 시스템 시뮬레이터를 제안하였다. [3]에서는 LCL 필터와 PWM 정류기를 이용한 영구자석 동기전동기의 시뮬레이터를 제안하였다.

[4~7]에서는 유도전동기의 시뮬레이터에 대한 순환전류의 효율개선 등의 특성개선을 다루고 있다. [5, 6]에서는 시험용 인버터와 시뮬레이터 회로가 DC 링크단을 공유하고 출력단의 전류가 리액터를 통하여 시뮬레이터와 순환하도록 함으로써 전력소모를 줄이는 방법을 제안하였다. 이러한 방법은 시뮬레이터의 회로는 간단하지만 유도전동기의 저항, 인덕터 및 유도전압 특성을 정확히 모사하기 어렵고 단지 인버터의 부하장치로만 사용할 수 있다. [7]에서는 철도차량 추진기용 유도전동기 및 보조 전원장치용 시뮬레이터의 전력제어를 통하여 전력의 효율을 개선하였다. 지금까지 연구되어 왔던 유도전동기의 실시간 시뮬레이터는 유도전동기의 운전 조건에 따른 전류를 계산하고 전류 제어를 통하여 시뮬레이터를 구현하는 방법이 대부분이다. 또한 시험용 인버터와 시뮬레이터의 PWM 정류기 사이에는 인덕터만을 사용함으로써 유도전동기의 부하는 모사할 수 있으나 유도전동기의 전기적, 기계적 특성을 모사하기는 어렵다.

본 논문에서는 3상 유도전동기의 전기적, 기계적 모델과 부하장치를 모사할 수 있는 3상 유도전동기용 실시간 시뮬레이터를 제안한다. 제안하는 유도전동기용 시뮬레이터는 벡터제어로 동작하는 유도전동기의 고정자 dq 전류를 시험용 인버터에 흐르도록 하기 위해 LCL 필터[8, 9]와 PWM 정류기로 구성된다. LCL 필터의 커패시터 전압이 회전자 자속에 의해 고정자 권선에 유기되는 유도전압을 모사하고 커패시터 전압은 커패시터에 흐르는

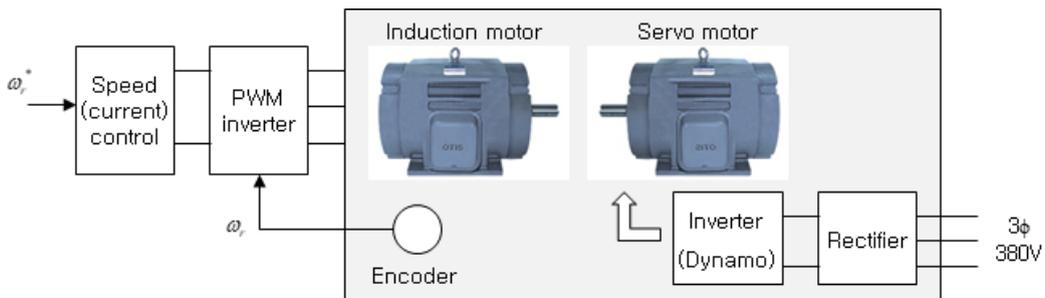


Fig. 1. Speed control of induction motor with dynamo set

전류에 의해 제어된다. 커패시터 전류는 LCL 필터의 인덕터에 흐르는 전류에 의해 제어되며 LCL 필터의 인덕터 전류는 3상 PWM 정류기를 통하여 제어된다. Matlab/Simulink를 사용하여 본 논문에서 제안한 유도전동기용 시뮬레이터의 모의해석을 위한 모델을 구현하고, 모의해석을 통하여 제안하는 3상 유도전동기용 시뮬레이터의 제어특성을 검증한다.

## 2. 시뮬레이터의 모델링 및 제어

### 2.1 3상 유도전동기의 수학적 모델

시뮬레이터가 모사할 3상 유도전동기의 고정자 및 회전자의 동기좌표계로 변환된 dq축 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} + p \lambda_{ds} - \omega_e \lambda_{qs} \quad (1)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + p \lambda_{qs} + \omega_e \lambda_{ds}$$

$$v_{dr}(=0) = R_r i_{dr} + p \lambda_{dr} - (\omega_e - \omega_r) \lambda_{qr} \quad (2)$$

$$v_{qr}(=0) = R_r i_{qr} + p \lambda_{qr} + (\omega_e - \omega_r) \lambda_{dr}$$

여기서  $v_{ds}, v_{qs}$ 는 각각 d축 및 q축 고정자 전압을,  $v_{dr}, v_{qr}$ 는 각각 d축 및 q축 회전자 전압을,  $R_s, R_r$ 는 각각 고정자 및 회전자 저항을,  $\lambda_{ds}, \lambda_{qs}$ 는 각각 d축 및 q축 고정자 쇄교자속을,  $\lambda_{dr}, \lambda_{qr}$ 는 각각 d축 및 q축 회전자 쇄교자속을,  $\omega_e, \omega_r$ 는 각각 동기 각속도 및 회전자의 각속도를,  $p$ 는 미분  $d/dt$ 를 나타낸다. 고정자 및 회전자의 쇄교자속은 식 (3), (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} + L_m i_{dr} \quad (3)$$

$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} + L_m i_{qr}$$

$$\lambda_{dr} = L_{dr} i_{dr} + L_m i_{ds} \quad (4)$$

$$\lambda_{qr} = L_{qr} i_{qr} + L_m i_{qs}$$

여기서  $i_{ds}, i_{qs}$ 는 각각 d축 및 q축 고정자 전류를,  $i_{dr}, i_{qr}$ 는 각각 d축 및 q축 회전자 전류를,  $L_{ds}, L_{qs}$ 는 각각 d축 및 q축 고정자 인덕턴스를,  $L_{dr}, L_{qr}$ 는 각각 d축

및 q축 회전자 인덕턴스를,  $L_m$ 은 고정자와 회전자의 상호 인덕턴스를 나타낸다. 또한 3상 유도전동기의 전기적 토크는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있으며 여기서  $P$ 는 극수(number of poles)를 나타낸다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \frac{L_m}{L_r} (\lambda_{dr} i_{qs} - \lambda_{qr} i_{ds}) \quad (5)$$

$$= J \frac{d}{dt} \omega_r + B \omega_r + T_L$$

식 (1)~(4)는 유도전동기의 전기적 동특성을 나타내고, 식 (5)는 유도전동기의 기계적 동특성을 나타낸다. 식 (1), (3)으로 나타난 유도전동기의 고정자 dq 전압방정식은 정상상태에서 식 (6)과 같이 고정자 및 회전자 dq 전류로 나타낼 수 있다.

$$v_{ds} = R_s i_{ds} - \omega_e L_s i_{qs} - \omega_e L_m i_{qr} \quad (6)$$

$$v_{qs} = R_s i_{qs} + \omega_e L_s i_{ds} + \omega_e L_m i_{dr}$$

식 (6)에서 우변의 첫 번째 항은 고정자 3상 저항의 dq축 전압강하를 나타내고, 두 번째 항은 고정자 3상 abc축 인덕터 전압을 dq 변환할 때 나타나는 커플링(Coupling) 항이다. 우변의 3번째 항은 3상 회전자 자속의 회전에 의해 고정자 권선에 유기되는 dq축 유도전압을 나타낸다. 따라서 식 (6)의 dq축 고정자 전압방정식을 abc 3상의 고정자 전압 방정식으로 나타내면 그림 2와 같이 RL 회로와 회전자로부터 고정자 abc 축의 권선에 유기되는 유도 전압  $e_{abcn}$ 으로 나타낼 수 있다. 따라서 3상 유도전동기는 그림 2와 같이 전기적 전류 특성과 기계적 속도 특성을 갖는 등가회로로 나타낼 수 있다.

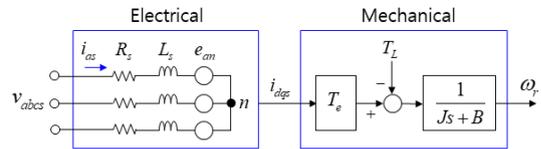


Fig. 2. Equivalent circuit of induction motor

### 2.2 시뮬레이터의 회로 및 제어

그림 3은 제안하는 유도전동기의 시뮬레이터의 회로 구성을 나타낸다. 그림 2의 유도전동기의 3상 등가회로와 유사하게 RL 회로와 유도전동기의 3상 유도전압을 나타내는 커패시터로 구성된다. 또한 PWM 정류기를 통하여 커패시터의 전압을 제어하기 위한 인덕터가 커패시터

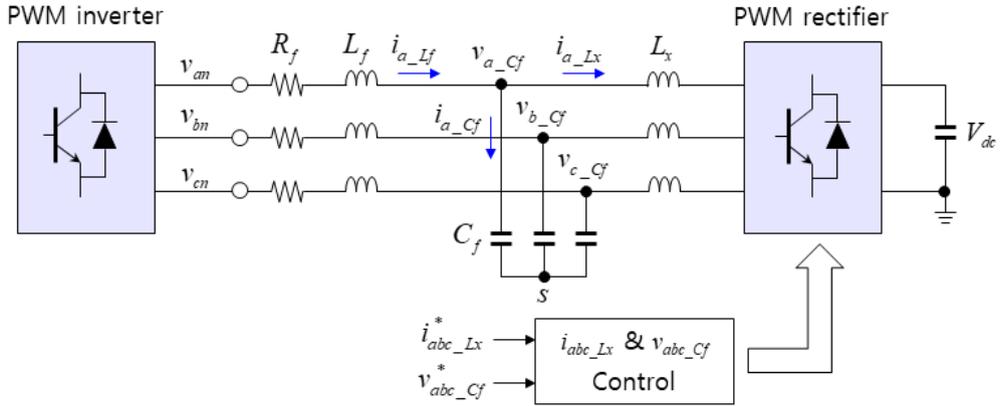


Fig. 3. Simulator circuit for induction motor

와 PWM 정류기 사이에 존재한다. PWM 인버터는 시뮬레이터로 구현된 유도전동기의 벡터제어, 전류 및 전압을 제어한다.

3상 유도전동기의 시뮬레이터는 그림 3에 나타난 바와 같이 저항 \$R\_f\$와 직렬로 연결된 LCL 필터 및 PWM 정류기로 구성된다. LCL 필터는 3상 유도 전동기 구동용 PWM 인버터와 연결되는 인덕터 \$L\_f\$, PWM 정류기에 연결되는 인덕터 \$L\_x\$, 그리고 두 인덕터 사이에 Y결선 형태로 연결된 커패시터 \$C\_f\$로 구성된다. PWM 인버터의 출력단에서 바라본 LCL 필터의 dq축 전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_f i_{ds} + L_f \frac{di_{ds}}{dt} - \omega_c L_f i_{qs} + v_{d\_Cf} \\ v_{qs} &= r_m i_{qs} + L_f \frac{di_{qs}}{dt} + \omega_c L_f i_{ds} + v_{q\_Cf} \end{aligned} \quad (7)$$

여기서 \$v\_{ds}\$, \$v\_{qs}\$는 각각 인버터의 출력전압 \$v\_{abcn}\$을 동기 좌표계로 변환한 dq 전압을, \$R\_f\$와 \$L\_f\$는 각각 3상 유도전동기의 고정자 저항과 인덕턴스인 \$R\_s\$ 및 \$L\_s\$를 모사하기 위한 저항과 인덕턴스를 나타내고, \$v\_{d\\_Cf}\$, \$v\_{q\\_Cf}\$는 3상 유도전동기의 역기전력을 모사하기 위한 LCL 필터의 커패시터 dq축 전압을 나타낸다. 식 (7)로부터 3상 유도전동기 시뮬레이터의 정상상태 전압방정식은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_f i_{ds} - \omega_c L_f i_{qs} + v_{d\_Cf} \\ v_{qs} &= r_m i_{qs} + \omega_c L_f i_{ds} + v_{q\_Cf} \end{aligned} \quad (8)$$

식 (8)의 정상상태에서 시뮬레이터가 식 (6)의 3상 유도전동기의 정상상태 특성을 모사하기 위한 LCL 필터의 dq축 커패시터 전압은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v_{d\_Cf}^* &= -\omega_c L_m i_{qr} + \Delta R_s i_{ds} - \omega_c \Delta L_s i_{qs} \\ v_{q\_Cf}^* &= \omega_c L_m i_{dr} + \Delta R_s i_{qs} + \omega_c \Delta L_s i_{ds} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서 \$\Delta R\_s = R\_s - R\_f\$, \$\Delta L\_s = L\_s - L\_f\$를 나타낸다. 만약 시뮬레이터의 저항 \$R\_f\$가 유도전동기의 고정자 \$R\_s\$와 같고, 시뮬레이터의 \$L\_f\$가 유도전동기의 고정자 인덕턴스 \$L\_s\$와 같다면 \$v\_{d\\_Cf}^\* = -\omega\_c L\_m i\_{qr}\$, \$v\_{q\\_Cf}^\* = \omega\_c L\_m i\_{dr}\$과 같이 나타낼 수 있다. 식 (9)에서 정상상태의 회전자 dq 전류는 식 (2)와 식 (4)로부터 다음과 같이 고정자 dq 전류로부터 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{dr} &= -\frac{\omega_{slip}^2 L_m L_r}{Z_r^2} i_{ds} + \frac{\omega_{slip} L_m R_r}{Z_r^2} i_{qs} \\ i_{qr} &= -\frac{\omega_{slip} L_m R_r}{Z_r^2} i_{ds} - \frac{\omega_{slip}^2 L_m L_r}{Z_r^2} i_{qs} \end{aligned} \quad (10)$$

여기서 \$Z\_r = \sqrt{R\_r^2 + (\omega\_{slip} L\_r)^2}\$, \$\omega\_{slip} = \omega\_c - \omega\_r\$ 이다. 식 (9)와 (10)으로부터 시뮬레이터의 dq축 커패시터 전압은 식 (11)과 같이 나타낼 수 있다.

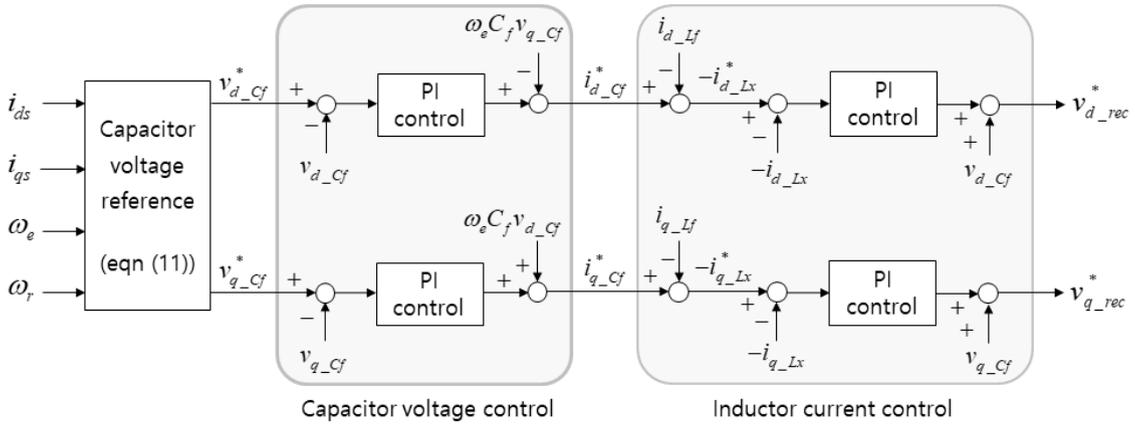


Fig. 4. Block diagram of capacitor voltage and inductor current control

$$v_{d\_Cf}^* = \frac{\omega_e \omega_{slip} L_m^2}{Z_r^2} (R_r i_{ds} + \omega_{slip} L_r i_{qs}) + \Delta R_s i_{ds} - \omega_c \Delta L_s i_{qs} \quad (11)$$

$$v_{q\_Cf}^* = \frac{\omega_e \omega_{slip} L_m^2}{Z_r^2} (R_r i_{qs} - \omega_{slip} L_r i_{ds}) + \Delta R_s i_{qs} + \omega_c \Delta L_s i_{ds}$$

그림 4는 유도전동기용 시뮬레이터의 커패시터 전압 제어기 및 인덕터 전류제어기의 블록도를 나타낸다. dq 커패시터 전압명령은 식 (11)에 나타난 바와 같이 dq 고정자 전류, 동기속도 및 슬립주파수로 주어진다. LCL 필터의 dq 커패시터 전압제어기는 커패시터 전압명령과 실제 커패시터 전압의 오차를 비례적분 제어에 의해 dq 커패시터 전류명령을 발생한다. dq 커패시터 전류제어 시동특성 개선 및 dq 전류의 상호 간섭을 피하기 위하여 dq 커패시터 전류명령에 각각  $-w_c C_f v_{q\_Cf}$  와  $w_e C_f v_{d\_Cf}$ 를 전향보상(Feed-forward compensation)

하여 최종 dq 커패시터 전류명령을 발생한다.

그림 3의 LCL 필터에서 커패시터 전류와 인덕터  $L_x$ 에 흐르는 전류의 관계식은 다음과 같이 주어진다.

$$-i_{dq\_Lx} = i_{dq\_Cf} - i_{dq\_Lf} \quad (12)$$

식 (12)에서 인덕터 Lf에 흐르는 전류  $i_{dq\_Lf}$ 는 인버터에 흐르는 dq 전류  $i_{dq}$ 와 동일하다. 따라서 커패시터 dq 전류는 인덕터 Lx에 흐르는 dq 전류에 의해 제어될 수 있음을 알 수 있다. 인덕터 Lx에 흐르는 전류는 인덕터 Lx에 걸리는 전압에 의해 제어되므로 정류기에 필요한 dq 전압  $v_{dq\_rec}$ 은 식 (13)으로부터 식 (14)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서  $\Delta i_{dq\_Lx} = i_{dq\_Lx}^* - i_{dq\_Lx}$ 이다.

$$(k_p + \frac{k_i}{s}) \Delta i_{dq\_Lx} = v_{dq\_Cf} - v_{dq\_rec} \quad (13)$$

$$v_{dq\_rec} = (k_p + \frac{k_i}{s})(-\Delta i_{dq\_Lx}) + v_{dq\_Cf} \quad (14)$$

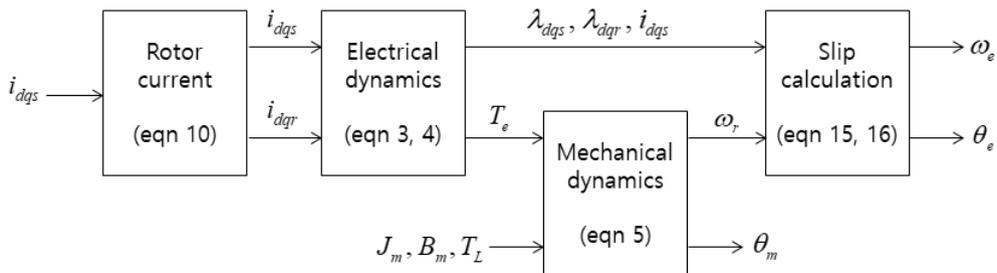


Fig. 5. Calculation of simulator output

그림 5는 3상 PWM 인버터, LCL 필터와 PWM 정류기로 구성된 시뮬레이터 하드웨어에서 3상 PWM 인버터에 흐르는 전류로부터 모사대상인 3상 유도전동기의 회전자 전류, 고정자 및 회전자 자속, 회전자 속도 및 위치 등의 유도전동기 특성을 계산하는 블록도를 나타낸다. 3상 유도전동기의 회전자 dq 전류는 식 (10)으로부터 고정자 dq 전류, 슬립주파수와 유도전동기의 모터 파라미터로부터 구할 수 있다. 식 (3)~(5)로부터 고정자와 회전자 dq 자속, 유도전동기의 토크를 구할 수 있으며 식 (5)로부터 회전자의 속도를 구할 수 있다. 또한 슬립 주파수와 동기속도는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\omega_{slip} = \frac{1}{T_r} \frac{i_{qs}}{i_{ds}}, \quad T_r = \frac{L_r}{R_r} \quad (15)$$

$$\omega_e = \omega_r + \omega_{slip} \quad (16)$$

### 3. 모의해석 결과

제안된 3상 유도전동기용 시뮬레이터의 동작특성을 검증하기 위한 모의 해석에 사용된 3상 유도전동기는 4극, 정격출력은 839kW, 정격속도는 1,786rpm, 정격토크는 4.49kNm이고 유도전동기 상수와 LCL 필터의 상수는 표 1과 같다. 시뮬레이터의 저항은 유도전동기의 고정자 저항과 같은 값을 사용하였고 LCL 필터의 커패시터 용량은 20uF이다. 시뮬레이터로 모사된 유도전동기 구동을 위한 인버터와 시뮬레이터 정류기의 스위칭 주파수는 동일하게 20kHz로 선정하였다. 인버터 전류제어기의 대역폭(Bandwidth)은 1kHz, 속도제어기의 대역폭은 10Hz로 선정하였다.

시뮬레이터의 모델구현 및 동작특성은 MATLAB/Simulink를 이용하여 모의해석을 실시하였으며, PWM 정류기 및 LCL 필터는 SimPowerSystem 툴 박스를 사용하여 구현하였다.

Table 1. Simulation parameters

Induction motor		Simulator	
$R_s$	0.029 $\Omega$	$R_r$	0.029 $\Omega$
$R_r$	0.022 $\Omega$	$L_f$	7.0mH
$L_{ls}$	0.60mH	$C_f$	20.0 $\mu F$
$L_{lr}$	0.60mH	$R_p$	0.001 $\Omega$
$L_m$	34.6mH	$L_\sigma$	1.0mH
$L_s$	35.2mH		
$L_r$	35.2mH		
$J_m$	1.0 $kgm^2$		

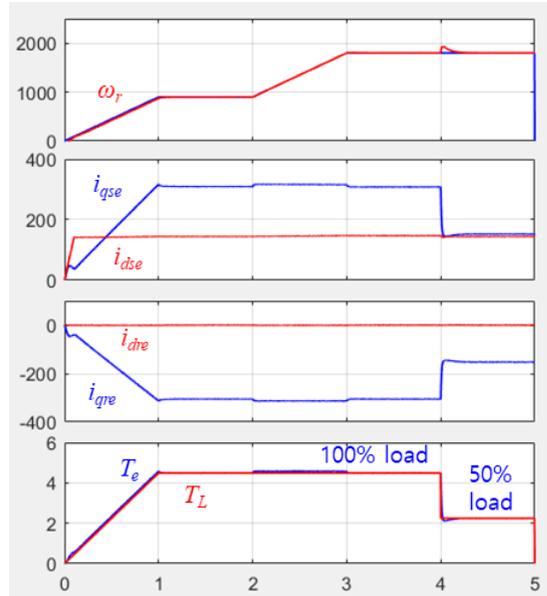


Fig. 6. Speed and dq current response of simulator for 3 phase induction motor

그림 6은 3상 유도전동기를 구동하기 위한 인버터와 3상 유도전동기 및 부하장치를 모사하기 위한 시뮬레이터 시스템의 속도제어 특성을 나타낸다. 그림 6의 고정자 및 회전자 dq축 전류는 시뮬레이터로 모사된 3상 유도전동기의 고정자 및 회전자의 dq축 전류를 나타낸다. 그림 7은 dq축 고정자 전압 및 고정자와 회전자의 dq축 자속을 나타낸다. 속도지령은 초기 기동에서 900rpm, 1,800rpm으로 순차적으로 변화하였으며 부하는 100% 정격부하에서 정격부하의 50% 부하로 감소하였다. 벡터제어에 의해 회전자의 d축 전류는 영(Zero)으로 제어되고 있으며 고정자의 d축 전류는 143A로 제어됨으로써 회전자의 d축 자속은 정격자속인 4.9Wb로 제어된다. 유도전동기의 토크 성분 전류인 고정자 q축 전류는 그림 6의 부하토크와 유사한 패턴을 나타냄을 알 수 있으며 100% 부하조건에서 고정자의 q축 전류는 310A이다. 그림 7에 나타난 바와 같이 고정자의 q축 전압은 그림 6의 전동기 속도와 유사한 패턴을 나타냄을 알 수 있으며 전동기의 속도가 1,800rpm 일 때 고정자의 d축 전압은 -89V, q축 전압은 1,094V를 나타낸다. 시뮬레이터의 속도가 속도지령을 잘 추종하고 있으며 전동기의 토크도 부하토크를 따라 발생하고 있으므로 유도전동기의 시뮬레이터가 유도전동기 모델과 부하특성을 잘 모사하고 있음을 알 수 있다.

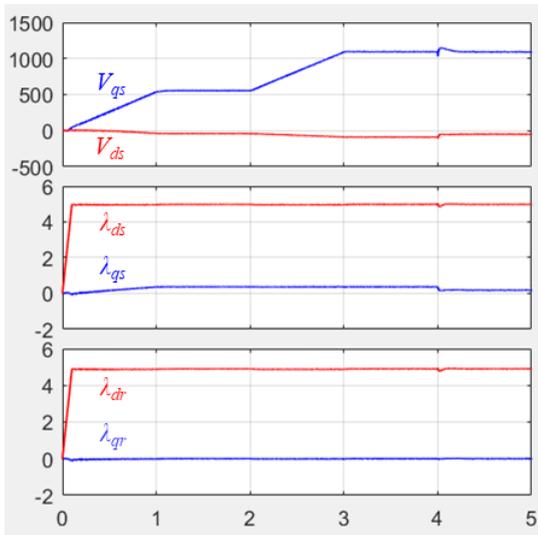


Fig. 7. dq stator voltages and dq flux linkages of stator and rotor

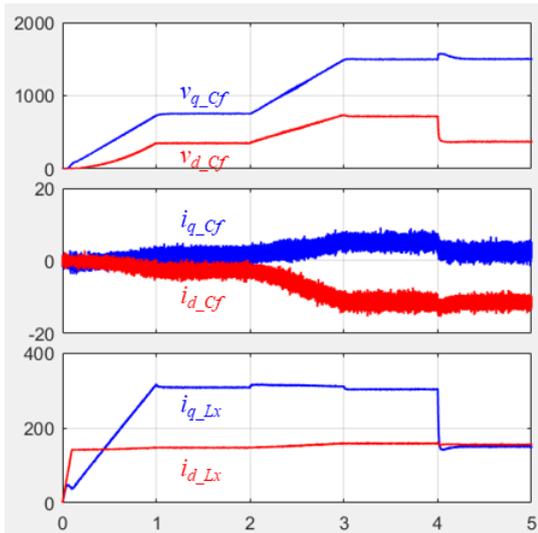


Fig. 8. Capacitor voltages and currents and inductor currents of LCL filter of simulator

그림 8은 시뮬레이터 LCL 필터의 dq축 커패시터 전압과 전류 및 인덕터 Lx에 흐르는 전류를 나타낸다. LCL 필터의 L에 흐르는 dq축 전류는 인버터에 흐르는 dq축 전류와 같으므로 그림 6의 고정자 권선에 흐르는 dq축 전류와 동일하다. LCL 필터의 커패시터 Cf의 dq축 전압은 식 (9)에서  $\Delta R_s = 0, i_{dr} \approx 0$ 이므로 다음과 같이 나타난다.

$$v_{d\_cf}^* = -\omega_e L_m i_{qr} + \Delta R_s i_{ds} - \omega_e \Delta L_s i_{qs} \quad (17)$$

$$\approx -\omega_e L_m i_{qr} - \omega_e \Delta L_s i_{qs}$$

$$v_{q\_cf}^* = \omega_e L_m i_{dr} + \Delta R_s i_{qs} + \omega_e \Delta L_s i_{ds}$$

$$\approx \omega_e \Delta L_s i_{ds}$$

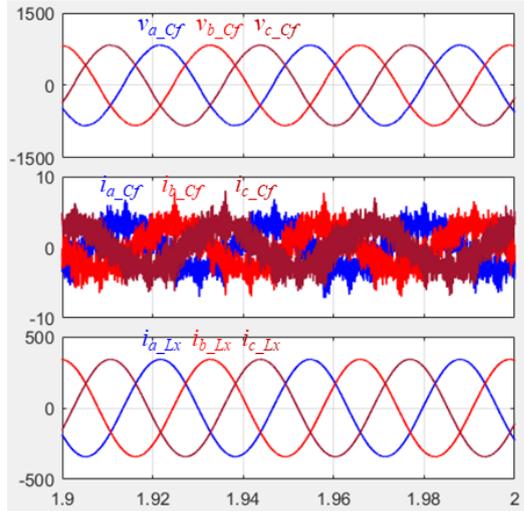


Fig. 9. Capacitor voltages and currents and inductor currents at 900rpm

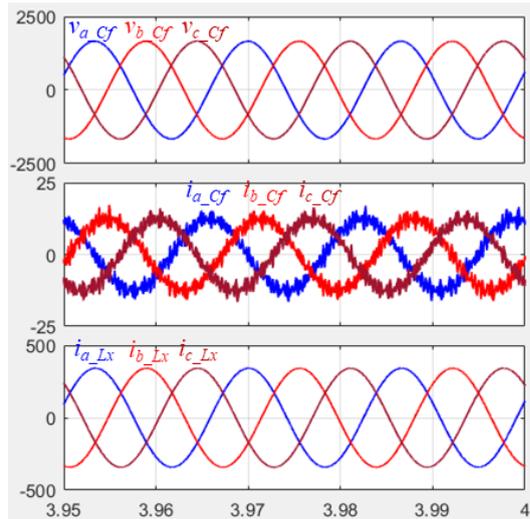


Fig. 10. Capacitor voltages and currents and inductor currents at 1,800rpm

커패시터 d축 전압은 고정자 및 회전자 q축 전류와 동기속도에 의해 결정되며, 커패시터 q축 전압은 고정자 d축 전류가 일정하면 그림 8에 나타난 바와 같이 속도

턴을 따라감을 알 수 있다. 또한 그림 3의 시뮬레이터 회로에 나타난 바와 같이 LCL 필터의 인덕터  $L_f$ 에 흐르는 전류와 인덕터  $L_x$ 에 흐르는 전류의 차이가 커패시터  $C_f$ 에 흐르는 전류이므로 커패시터  $C_f$ 의 전류가 상대적으로 작을 경우 그림 5와 그림 7에서 인덕터  $L_f$ 에 흐르는 전류(고정자 dq축 전류)와 인덕터  $L_x$ 에 흐르는 dq축 전류는 거의 유사하게 나타남을 알 수 있다.

그림 9와 그림 10은 각각 900rpm과 1,800rpm에서 LCL 필터의 커패시터  $C_f$ 의 상 전압과 상 전류 및 인덕터  $L_x$ 에 흐르는 상 전류를 나타낸다. 커패시터  $C_f$  전압의 진폭(Amplitude)은 900rpm에서 800Vpeak, 1,800rpm에서는 1,600Vpeak로 유도전동기의 속도에 비례하여 나타남을 알 수 있다. 또한 커패시터  $C_f$  전류의 진폭도 900rpm에서 5Apeak, 1,800rpm에서 11Apeak를 나타낸다.

그림 11은 1,800rpm으로 운전 시 부하가 정격부하의 100%에서 50%로 변동할 경우 전동기 속도, 고정자 및 회전자 dq축 전류의 과도상태를 나타내고, 그림 12는 이 때 고정자 및 회전자의 abc축 상전류를 나타낸다. 전동기 부하가 정격부하의 100%에서 50%로 변동함에 따라 자속성분 전류인 고정자 및 회전자의 d축 전류는 일정하게 유지하고 있는 반면 토크성분 전류인 고정자의 q축 전류는 310A에서 154A로, 회전자의 q축 전류는 300A에서 151A로 토크에 비례하여 거의 50%로 줄어들음을 알 수 있다.

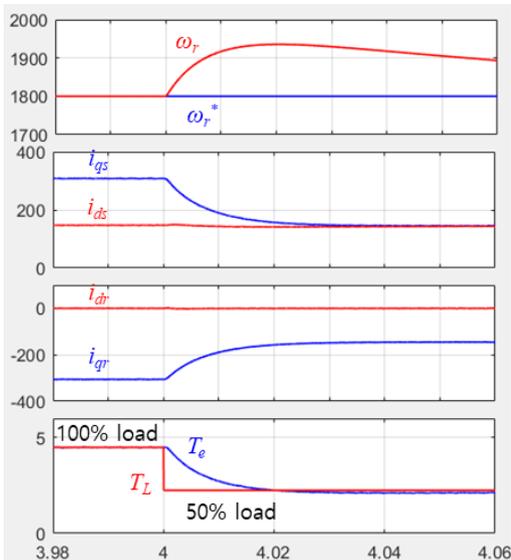


Fig. 11. Speed and dq currents when load torque changes at 1,800rpm

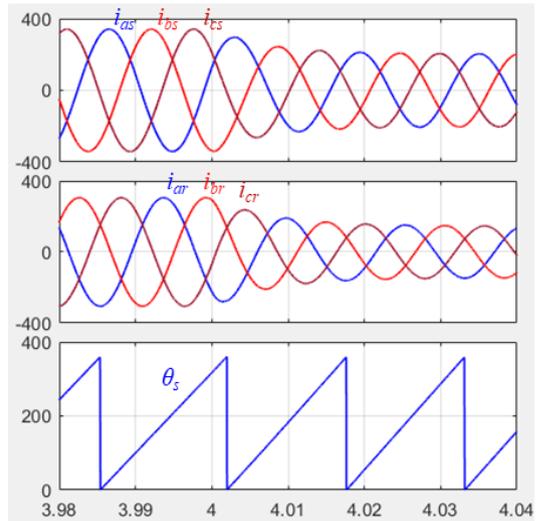


Fig. 12. Phase currents of stator and rotor when load torque changes at 1,800rpm

#### 4. 결론

본 논문에서는 3상 유도전동기의 전기적, 기계적 동특성과 부하 시험장치를 모사할 수 있는 실시간 시뮬레이터를 제안하였다. 제안된 3상 유도전동기용 시뮬레이터는 LCL 필터와 3상 PWM 정류기로 구성된다. 제안된 시뮬레이터의 LCL 필터의 커패시터 전압은 3상 유도전동기의 회전자 자속에 의해 고정자 권선에 유기되는 유도 전압을 모사한다. 3상 유도전동기의 회전자 전류, 고정자 및 회전자 자속, 전동기 토크, 슬립주파수 및 회전자 속도는 시뮬레이터의 인버터에 흐르는 전류와 유도전동기의 상수로부터 유도하였다.

제안된 3상 유도전동기용 시뮬레이터의 동작 및 속도 제어 특성은 MATLAB/Simulink를 통하여 검증하였다. 모의해석 결과로부터 제안된 3상 유도전동기용 시뮬레이터는 벡터제어 유도전동기의 정상상태에서 전기적, 기계적 특성과 부하가 변동할 경우 과도상태 특성을 잘 모사하고 있음을 확인하였다.

#### References

- [1] L. Guangchen, W. Shengtie, and Z. Jike, "Design and realization of DC motor and drives based simulator for small wind turbine," Proc. on APPEEC 2010,

pp.1-4, 2010.

DOI: <https://doi.org/10.1109/APPEEC.2010.5448831>

- [2] T. Hanamoto, J. Yano, H. Ikeda, and T. Tsuji, "Hardware real time simulator of synchronous reluctance motor including three phase PWM inverter model," Proc. of IPEC 2010, pp.2005-2009, 2010.
- [3] H. C. Oh, H. W. Kim, and K. Y. Cho, "Real time simulator for a permanent magnet synchronous motor with power converter," Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, Vol.27, No.12, pp.1-9, Dec. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.5207/IIEE.2013.27.12.114>
- [4] Z. Hakan Akpolat, "Dynamic emulation of mechanical loads using a vector-controlled induction motor-generator set", IEEE Trans. on Industrial Electronics, Vol.46, No.2, pp.370-379, April 1999.
- [5] G. D. Kim, H. M. Lee, S. C. Oh, C. M. Lee, and S. H. Park, "Study on real-time load simulator for testing propulsion inverter test," SICE-ICASE International Joint Conference 2006, Busan, Korea, pp.3858-3863 Oct. 2006.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/SICE.2006.314841>
- [6] j. Itoh and T. Abe, "Circulation current reduction for a motor simulator system using a power converter with a common mode transformer," International Power Electronics and Motion Control Conference(IPEMC'09), pp.1662-1667, 2009.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEMC.2009.5157658>
- [7] 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.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/IPEC.2010.5542287>
- [8] M. Liserre, F. Blaabjerg, and S. Hansen, "Design and control of an LCL-filter based three-phase active rectifier," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 41, No. 5, pp. 1281-1291, Sept./Aug. 2005.  
DOI: <https://doi.org/10.1109/TIA.2005.853373>
- [9] B. W. An, H. K. Shin, H. W. Kim, K. Y. Cho, and B. M. Han, "Active damping of LCL filter for three-phase PWM inverter without additional hardware sensors," Transactions of the Korean Institute of Power Electronics, Vol.18, No.1, pp.10-17, Feb. 2013.  
DOI: <https://doi.org/10.6113/TKPE.2013.18.1.10>

## 조 관 열(Kwan-Yuhl Cho)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 2004년 3월 : LG 전자 DA 연구소 책임연구원
- 2004년 4월 ~ 현재 : 한국교통대학교 전자공학과 교수
- 2010년 1월 ~ 2011년 1월 : Virginia Tech Visiting Scholar

<관심분야>

전력전자, 모터제어

## 김 학 원(Hag-Wone Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한국과학기술원 전기및전자공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 한국과학기술원 전자전산학과 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 2008년 2월 : LG 전자 디지털어플라이언스 연구소 책임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

전력전자, 모터제어, 전력품질