

# Matlab/Simulink 환경하에서 3상 위상제어 정류기 -DC 전동기 구동시스템의 모듈별 모델링 기법

(Module-based Modeling Method of 3 $\Phi$  Phase-Controlled Rectifier System  
for DC Motor Drive under Matlab/Simulink environment)

김상민\* · 한우용\*\* · 이창구\*\*\* · 김성중\*\*\*\*

(Sang-Min Kim · Woo-Yong Han · Chang-Goo Lee · Sung-Joong Kim)

## 요 약

본 논문에서는 MATLAB/SIMULINK를 이용한 DC 전동기 구동용 3상 위상제어 정류기 시스템의 모델링 기법을 제안하였다. 이 기법은 회로 시뮬레이터의 장점을 시스템 시뮬레이터에 도입한 것으로써 수식적인 전개가 필요없이 새로운 시스템과의 결합이 간단하다. 제안된 시스템의 전체 모델은 3상 위상제어 정류기와 DC 전동기, 속도/전류 제어기 블록으로 구성된다. 이와 같이 MATLAB/SIMULINK 환경에서 정류기와 전동기, 제어기시스템을 통합하여 구성하고 이를 시뮬레이션한 결과, 시스템의 각부 파형이 실제 시스템과 거의 일치하고 제어기의 경우도 제어가 원활히 수행됨을 알 수 있었다. 따라서 이 방식은 폐루프 제어되는 전력전자 시스템의 특성해석 분야에 적합하다는 것을 알 수 있다.

## Abstract

This paper presents the modeling method of 3 $\Phi$  phase-controlled rectifier for the DC motor drive in MATLAB/SIMULINK environment. This method has no need to extend the system mathematically and thus it's easy to integrate the various systems. The whole model consists of 3 $\Phi$  phase-controlled rectifier block, DC motor block and speed/current controller block. The simulation results show that the model outputs are almost similar to those of the real system and therefore that the presented method is suitable for the research of the closed-loop controlled power electronic systems.

## 1. 서 론

오늘날 전력전자 시스템과 전동력 제어분야에서 이용되고 있는 컴퓨터 시뮬레이션은 새로운 회로를 개

발하고 이들 회로를 수정, 보완하는 작업과정을 단축시킬 수 있어 전자 산업분야에서는 필수적인 요소가 되었다[1].

시뮬레이션 도구는 일반적으로 MATLAB, ACSL과 같은 시스템 시뮬레이터(System Simulator)와 PISPACE, EMTP, SABER 등과 같은 회로 시뮬레이터(Circuit Simulator)로 분류될 수 있다. 이러한 시뮬레이션 도구는 시뮬레이션 하려는 대상 시스템에 따라서 그에 적절한 도구를 선택해야 한다[2-4].

\*정회원 : 전북대학교원 전자공학과 박사과정  
\*\*정회원 : 전주공업대학 전기과 부교수  
\*\*\*정회원 : 전북대 공대 전자정보공학부 부교수  
\*\*\*\*정회원 : 전북대 공대 전자정보공학부 교수  
접수일자 : 1999년 12월 10일

시스템 시뮬레이터는 수학적인 모델로 표현되는 시스템을 모델링하기에 적합한 것으로서 전기기계와 제어시스템의 시뮬레이션에 편리하다. 반면에 회로 시뮬레이터는 소자 수준의 시스템, 즉 전력전자 회로의 시뮬레이션에 적합하다.

한편 전력전자 회로와 전기기계, 제어시스템을 통합하여 시뮬레이션할 경우에는 회로 내부의 동작특성 뿐만아니라 시스템의 응답특성도 관측할 수 있어야 하므로 앞에서 제시된 두 방식의 장점을 잘 살릴 수 있는 방법이 필요하다. 그런데 회로 시뮬레이터를 사용하게 되면 전기기계의 모델링과 복잡한 제어시스템을 구현하는데 있어서 많은 어려움이 따른다. 이와는 달리 시스템 시뮬레이터는 회로의 세부적 동작보다는 제어시스템에 초점을 둔 시뮬레이션에 주로 적용된다. 이때에는 전력전자회로의 세부적인 동작을 근사적으로 모델링한다. 그러므로 후자의 방법을 사용하는 것이 보다 현실적이라고 할 수 있다[5-7].

MATLAB/SIMULINK는 거의 모든 종류의 동적시스템 시뮬레이션에서 가장 널리 사용되고 있는 컴퓨터 프로그램 중 하나로써, 최근에 전력전자 분야에서 많은 관심을 받고있으며 이를 이용한 시뮬레이션 방법들이 소개되고 있다[2,8-10].

SIMULINK 환경에서 3상 위상제어 정류기의 모델링은 보통 수학적인 모델링에 기초해서 수행되는데 여기에는 많은 어려움이 따른다. 3상 정류기를 모델링 하더라도 다른 시스템을 뒷단에 연결할 때는 전체 시스템을 다시 수식적으로 전개해야만 한다[2].

본 논문에서는 모듈별 모델링 기법에 기초해서 3상 위상제어 정류기를 SIMULINK 환경에서 모델링하였다[4]. 전력전자 시스템의 정류기 모델에서 각각의 모듈은 전향변수와 궤환변수를 가진다. 이 변수들은 모듈의 전후에 접속되는 회로의 속성에 따라 전류와 전압의 형태로 나타난다. 각각의 모듈은 교차 임피던스 모델, 교차 어드미턴스 모델, 전류 증폭 모델, 전압 증폭 모델의 4가지로 분류될 수 있다. 이러한 모델링 기법으로 인해 기존의 수식적인 모델링의 복잡성을 없애고 소자 수준 시뮬레이터에서와 같이 새로운 시스템을 결합할 때 원래 시스템의 앞단이나 뒷단에 연결하면 될 수 있도록 함으로서 확장성을 획득하도록 하였다. 그러므로 특히 입력 인덕턴스의 영향으로 발생하는 중첩각(overlap angle)을 고려한 모델링이 간략해졌다.

DC 전동기의 제어를 위한 속도제어기와 전류제어기는 모두 PI 제어기와 IP 제어기를 적절히 혼합한 2자유도 PI제어기와 시스템 동특성으로 인해 과도상태에서 발생하기 쉬운 오버슈트를 없애기 위한 Anti-Windup 기법을 결합한 제어기를 사용하였다 [11-12].

이와 같이 3상 위상제어 정류기와 DC 전동기, 제어기를 결합한 전체 시스템을 시뮬레이션해 본 결과 시스템 모델의 각부 동작 파형이 실제와 거의 유사하게 나타남을 알 수 있었다.

## 2. 3상 위상제어 정류기의 SIMULINK 모델

모듈별 모델링 기법을 이용하여 중첩각을 고려한 3상 위상제어 정류기를 모델링하면 그림 1과 같다. 중첩각을 고려한 3상 위상제어 정류기의 전체 모델은 전원측 인덕턴스(3Ls), 3상 정류기(3p full SCR REC), 출력측 LC 필터(LC Filter)로 구성된다.

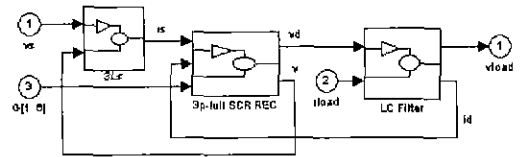


그림 1. 중첩각을 고려한 3상 SCR 정류기의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of the 3 $\Phi$  SCR rectifier in consideration of the overlap angle

그림 2는 그림 1에서 3Ls의 내부 블록도로서 중첩각을 발생시키는 전원측 인덕턴스의 모델을 나타낸다. 이것은  $V_s$ 와  $V$ 를 입력으로  $i_s$ [ $i_{as}$   $i_{bs}$   $i_{cs}$ ] $T$ 를 출력으로 가지는 교차 어드미턴스 모델이다.

모델의 선정은 고정된 것이 아니고 회로를 보는 관점에 따라서 달라질 수 있다. 전원측 인덕턴스를 교차 임피던스 모델로도 표현할 수 있지만 뒷단의 정류기로부터 궤환되는 변수가 전압이기 때문에 교차 어드미턴스 모델로 표현한 것이다.

그림 3은 3상 전파 위상제어 정류기를 Leg 단위로 모델링 한 것으로서 모델입력은  $i_s$ ,  $i_d$ 이고 모델출력은  $V_d$ ,  $V$ 이다. 그러므로 이것은 교차 임피던스 모델

로 분류될 수 있다. 여기서 R||C 블록은 가상의 RC 회로로써 모델간의 연결을 위해서 추가한 것이다. R과 C의 값은 매우 작은 값(1~0.1%)으로 설정함으로써 회로에 대한 영향을 최소화 할 수 있다.

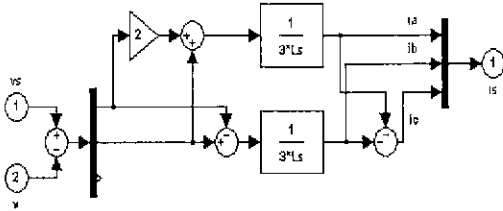


그림 2. '3Ls'의 내부 블록도  
Fig. 2. Block diagram of '3Ls'

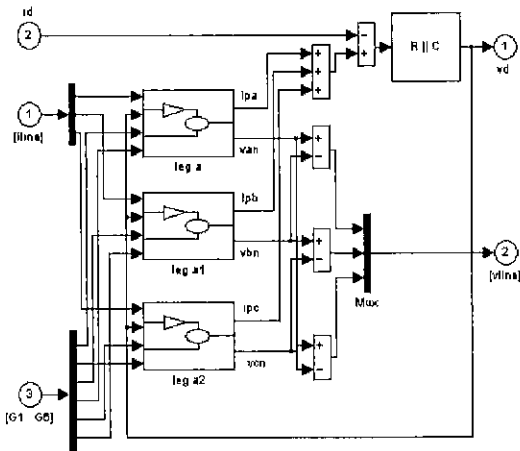


그림 3. 3p Full SCR REC의 내부 블록도  
Fig. 3. '3p Full SCR REC' Block

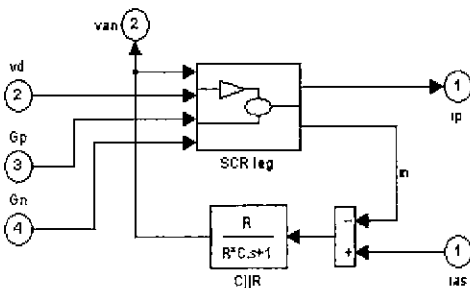


그림 4. leg a 의 내부 블록도  
Fig. 4. 'leg a' Block

그림 3에서 각각의 SCR leg는 그림 4와 같이 모델링 되었다. 이것은 입력이  $i_{aS}$ ,  $V_d$ 이고 출력이  $i_p$ ,  $V_{an}$ 인 전류 증폭 모델로 분류될 수 있다.

그림 1에서 LC 필터의 모델은 입력이 전압이고 출력이 전류인 교차 어드미턴스 모델로 분류될 수 있다.

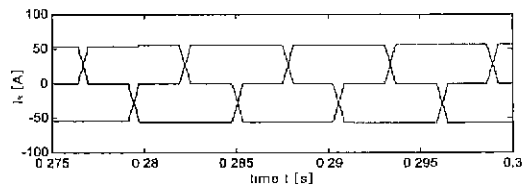
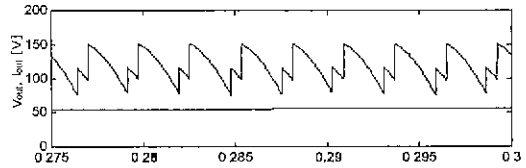


그림 5. 지연각  $30^\circ$  일 때 중첩각을 고려한 3상 위상제어 정류기의 출력 전압 및 전류 파형과 입력 상전류 파형

Fig. 5. Simulation results for 3 $\phi$  phase-controlled rectifier, showing the output voltage  $V_{out}$ , the output current  $i_{out}$  and the input phase current is  $[\alpha = 30^\circ]$ .

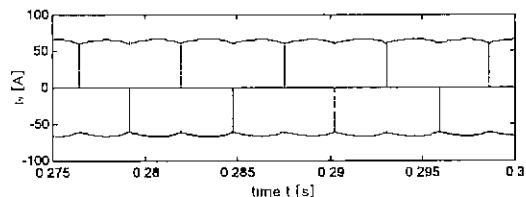
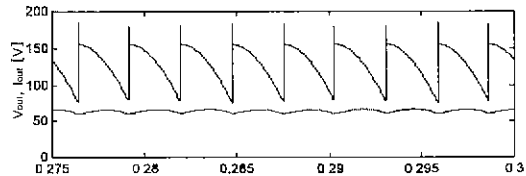


그림 6. 지연각  $30^\circ$  일 때 중첩각을 고려하지 않은 3상 위상제어 정류기의 출력 전압 및 전류파형과 입력 상전류 파형

Fig. 6. Simulation results for 3 $\phi$  phase-controlled rectifier, showing the output voltage  $V_{out}$ , the output current  $i_{out}$  and the input phase current is  $[\alpha = 30^\circ]$ .

그림 5, 6은 저항 부하를 연결하여 시뮬레이션한 결과이다. 그림 5는 지연각 30° 일 때 중첩각을 고려한 3상 위상제어 정류기의 출력 전압 및 전류 파형과 입력 상전류 파형을 나타낸다. 결과 파형은 전원측 인덕턴스의 영향으로 전류들이 교차하는 영역에서 중첩각이 발생하는 현상을 잘 보여준다.

그림 6은 중첩각을 고려하지 않은 3상 위상제어 정류기의 출력 전압 및 전류 파형과 입력 상전류 파형을 나타낸다. 이 파형은 그림 1에서 전원측 인덕턴스를 매우 작은 값(본 논문에서는 10<sup>-7</sup>[H])으로 지정하여 시뮬레이션한 결과이다.

### 3. 3상 위상제어 정류기를 이용한 DC 전동기 구동 시스템의 모델링

3상 위상제어 정류기를 이용한 DC 전동기 구동 시스템의 전체 모델은 그림 7과 같이 전원과 정류기, DC 전동기, 속도/전류 제어기 블록으로 구성하였다.

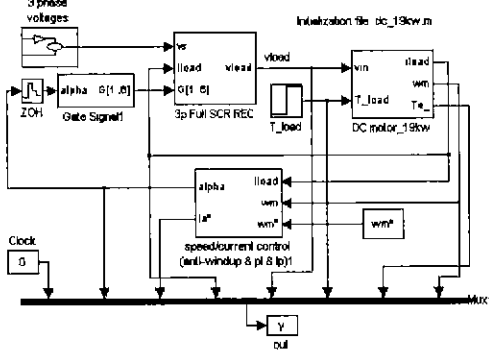


그림 7. 3상 위상제어 정류기를 이용한 DC 전동기 구동 시스템의 블록도  
Fig. 7. Block diagram of the DC motor drive system using a 3 $\phi$  phase-controlled rectifier

#### 3.1 DC 전동기 모델

타여자식 DC 전동기의 모델식은 식 (1)과 같이 표현될 수 있다[13].

$$\begin{aligned} V_m &= R_a I_a + L_a \frac{dI_a}{dt} + E_g \\ T_e - T_{load} &= J_m \frac{dW_m}{dt} + B_m W_m \\ T_e &= K_t I_a \\ E_g &= K_b W_m \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$V_m$  : 입력전압,  $I_a$  : 전기자 전류,  
 $T_{load}$  : 부하 토크,  $T_e$  : 전동기 토크,  
 $E_g$  : 역기전력,  $W_m$  : 전동기 회전속도

SIMULINK 환경에서 모델링 하기 위해 식 (1)을 적분형으로 바꾸어 표현하면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} I_a &= \frac{1}{L_a} \int_0^t (V_m - R_a I_a - E_g) dt \\ W_m &= \frac{1}{J_m} \int_0^t (T_e - T_{load} - B_m W_m) dt \end{aligned} \quad (2)$$

식 (2)는 그림 8과 같이 모델링될 수 있다. 모델의 입력은 정류기의 전압과 부하 토크이고, 출력은 전기자 전류와 전동기의 속도 및 토크이다. 속도는 속도제어기로 궤환되어 전류 지령치를 발생시키고, 전기자 전류는 전류제어기로 궤환되어 지연각을 발생시킨다.

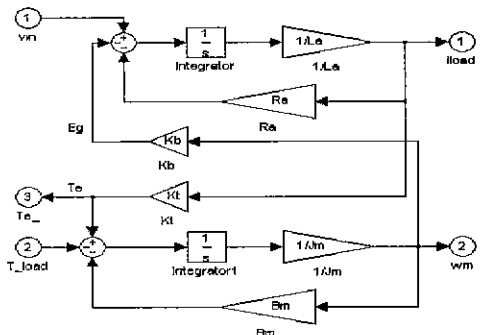


그림 8. DC 전동기의 블록도  
Fig. 8. Block diagram for a DC motor

시뮬레이션에 사용된 DC 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1. DC 전동기 파라미터  
Table 1. DC motor parameters

정격용량	19.9 [kw]
정격전압	260 [V]
정격전류	90 [A]
정격속도	1850 [rpm]
역기전력 상수(K <sub>b</sub> )	1.1410 [V · s/rad]
토크 상수(K <sub>t</sub> )	1.1410 [N · m/A]
전기자 저항(R <sub>a</sub> )	0.3500 [Ω]
전기자 인덕턴스(L <sub>a</sub> )	0.0065 [H]
관성모멘트(J <sub>m</sub> )	0.1200 [N · m · s <sup>2</sup> /rad]
마찰계수(B <sub>m</sub> )	0.0166 [N · m · s/rad]

### 3.2 전류/속도 제어기

전류/속도 제어기는 그림 9와 같이 모델링하였다. 전류와 속도 제어를 위해서 Anti-Windup 제어기를 포함한 2자유도 PI 제어기를 사용하였다.

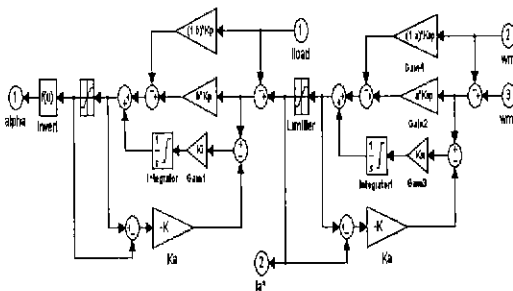


그림 9. 속도/전류 제어기의 블록도  
Fig. 9. Block diagram for the speed and current controller

제어기 출력을 제한함으로써 전동기가 광범위한 운영영역에서 동작할 경우, 즉 과도 상태가 오래 지속되는 경우에 발생하는 제어기의 포화현상과 이로 인해 적분항이 매우 커지는 Windup 현상을 막기 위해 전류 제어기와 속도제어기 모두에 Anti-Windup 기법을 사용하였다[11-12].

PI 제어와 IP 제어의 장점을 혼합한 2자유도 PI 제어기는 속도제어에 사용했을 때 식 (3)과 같이 표현할 수 있다. 여기서 β=1로 하면 PI제어기가 되고 β=0으로 하면 IP제어기가 된다.

$$I_a^* = \left( \beta K_\phi + \frac{K_{st}}{s} \right) \cdot (W_m^* - W_m) - (1 - \beta) \cdot K_{sp} \cdot W_m \quad (3)$$

여기서 K<sub>sp</sub> : 비례이득, K<sub>st</sub> : 적분이득  
β : 0 ~ 1사이의 값

### 4. 시뮬레이션 결과

3상 위상제어 정류기를 이용한 DC 전동기 구동시스템의 시뮬레이션을 위해 사용된 파라미터는 표 2와 같다[5].

표 2. 시뮬레이션 파라미터  
Table 2. Simulation parameters

Simulation time	1.40 [sec]
Integration method	ode15s(stiff/NDF)
Max step size	0.0001 [sec]
Relative tolerance	0.001
Absolute tolerance	0.0001

그림 10은 전동기 회전속도의 기준값을 10 [rad/s]에서 100[rad/s], 그리고 150[rad/s]으로 가변한 경우의 결과 파형을 나타낸다. 지연각이 전류 기준값에 따라 변하는 것을 알 수 있다. 전류 기준값은 속도제어기에 의해서 발생되므로 지연각은 기준속도에 반비례하여 변하는 것을 알 수 있다. 지연각은 0° ~ 150° 사이에서 변하도록 제한하였다.

그림 11은 전동기 회전속도의 기준값을 100 [rad/s]에서 150[rad/s]으로 가변하고 크기 10×Trated인 부하 토크를 0.7 초에서 인가한 경우의 결과파형을 나타낸다. 부하 토크를 인가하여도 짧은 시간동안 속도오차를 보이고 0.1초 이내에 회전 속도가 기준 속도 150[rad/s]를 추종하는 것을 볼 수 있다.

그림 10과 그림 11의 결과를 통해 제어기에 Anti-Windup 기법을 추가하여 과도상태에서 적분항이 매우 커지는 현상을 억제함으로써 오버슈트의 발생을 억제하고 응답 파형이 기준값을 잘 추종하도록 한 것을 알 수 있다.

이와 같이 MATLAB/SIMULINK 환경에서 정류기,

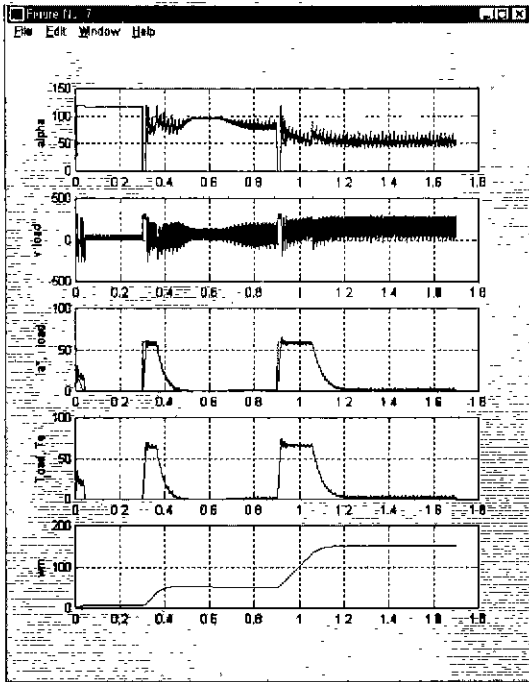


그림 10. 기준속도를 10 [rad/s] 에서 100 [rad/s] , 그리고 150 [rad/s] 로 가변한 경우의 결과파형 (여기서 alpha: 지연각, vload: 전동기 인가전압, ia\*: 기준전류, iload: 실제전류, Tload: 부하 토오크, Te: 전기자 토오크, wm: 회전속도)

Fig. 10. Simulation results for the DC motor drive system using 3 $\phi$  phase-controlled rectifier, when the reference speed is changed from 5 [rad/s] to 100 [rad/s] and then to 150 [rad/s].

전동기, 제어기 시스템을 통합하여 구성하고 이를 시뮬레이션한 결과 각부의 동작특성을 잘 표현하고 있으며 제어기의 경우도 제어가 원활히 수행됨을 알 수 있었다. 따라서 이 방식을 이용하면 제어대상에 대한 모델링이 용이하여 새로운 제어 시스템의 연구분야에 적용이 가능함을 알 수 있다.

### 5. 결 론

본 논문은 MATLAB/SIMULINK 환경에서 중첩각을 고려한 3상 위상제어 정류기를 모델링하고 DC 전동기에 연결하여 속도/전류제어 시뮬레이션을 행하였다. 즉, 전력변환 회로와 전기기계, 제어기의 통합시스

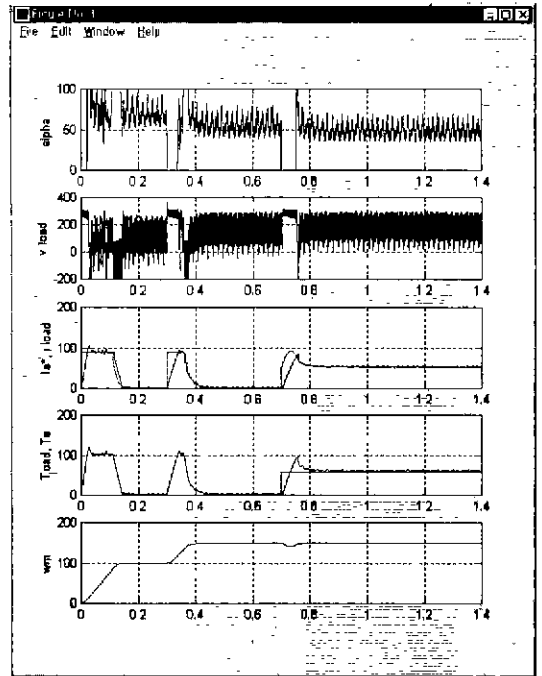


그림 11. 기준속도를 100 [rad/s] 에서 150 [rad/s] 로 가변하고 크기 10 $\times$ Trated인 부하 토오크를 0.7 초에서 인가한 경우의 결과파형 (여기서 alpha: 지연각, vload: 전동기 인가전압, ia\*: 기준전류, iload: 실제전류, Tload: 부하 토오크, Te: 전기자 토오크, wm: 회전속도)

Fig. 11. Simulation results for the DC motor drive system using 3 $\phi$  phase-controlled rectifier, when the reference speed is changed from 100 [rad/s] to 150 [rad/s]. The load torque 10 $\times$ Trated (Nm) is inserted at 0.7 (sec)

템을 시스템적인 측면에서 시뮬레이션하였다.

모듈별 모델링 기법을 이용하여 3상 위상제어 정류기를 설계함으로써 수직적인 전개의 필요성이 없어졌다. 또한 시스템의 성능을 개선시키고자 할 때 각 부분별 수정이 용이하며 다양한 형태의 새로운 시스템을 개발 및 통합하는 것이 간편해졌다.

속도/전류제어를 위해서 Anti-Windup 기법을 포함하는 2자유도 PI 제어기를 사용하였다.

시뮬레이션 결과를 통하여 모듈별 모델링 기법의 유용성을 확인할 수 있었다. 그러나 현재 시뮬레이션 시간이 다소 길다는 단점을 가지고 있다. 이후로는 시뮬레이션 시간을 단축시킬 수 있는 방법을 연구하고

이와 병행하여 다중화된 위상제어 정류기의 연구에 이 방법을 적용해 보고자 한다.

참 고 문 헌

- [1] Mohan, Undeland, Robins, Power Electronics, Second Edition, Wiley, 1995.
- [2] G. D. Marques, "A Simple and Accurate System Simulation of Three-Phase Diode Rectifiers", IEEE, pp. 416-421, 1998.
- [3] C. M. Ong Dynamic Simulation of Electric Machinery, Prentice-Hall, 1998.
- [4] 정승기, "전력변환회로의 독립형 시뮬레이션 모델 구축에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제3권 제4호, pp.353-364, 1998.
- [5] Using Simulink, The Math Works, 1990.
- [6] N. Mohan, T.M. Undeland, etc., "Simulation of Power Electronics and Motion Control System - An Overview", IEEE, vol. 82, no. 8, 1994.
- [7] Luis F. A. Pereira, Jese F. Haffner, Elder M. Hemerly, Hilton A. Grundling, "A Simulation Frame work for Flux Estimation and Vector Control of Induction Machines", IEEE, pp. 1587-1591, 1998.
- [8] J. Fernando Silva, "Matlab/Simulink Model for Thyristor Rectifiers", PEMC, pp. 414-418, 1998.
- [9] P. R. Holme, "Modeling of Voltage and Current Mode Controlled PWM Converters using Simulink", EPE95, vol.1, pp. 770-776, 1995.
- [10] 김수석, 김희준, "MATLAB을 이용한 DC-DC 컨버터의 병렬운전 해석 연구", 대한 전기학회 논문지, 제27권 제 9호, pp. 1432-1440, 1998.
- [11] C. Bohn and D. P. Atherton, "An Analysis Package Comparing PID Anti-Windup Strategies", IEEE Control Systems Magazine, vol. 15, no. 2, pp. 34-40, 1995.
- [12] A. H. Galtfelder and W. Schaufelberger, "Start-up Performance of Different PI Anti-Windup Regulators", Int. J. Control, vol. 44, no. 2, pp. 493-505, 1986.
- [13] Werner Leonhard, Control of Electrical Drives, 2nd Edition, Springer, 1996.

◇ 저자소개 ◇

김 상 민 (金相敏)

1974년 1월 1일생. 1996년 전북대 제어계측공학과 졸업(학사). 1998년 전북대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998~현재 전북대 대학원 전자공학과 박사과정.

한 우 용 (韓宇勇)

1964년 5월 23일생. 1986년 전북대 공대 전기과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 전주공업대학 전기과 부교수

이 창 구 (李昌求)

1958년 12월 25일생. 1981년 전북대 전기공학과 졸업(학사) 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1983년~1992년 한국전자통신연구소 선임연구원. 1996년 Alberta대학 방문교수. 현재 전북대 공대 전자정보공학부 부교수.

김 성 중 (金聖中)

1942년 3월 7일생. 1965년 전북대 전기공학과 졸업(학사) 1974년 전북대 전기공학과 졸업(석사) 1985년 전남대 전기공학과 졸업(박사). 1989년~현재 IEEE 정회원. 1998년~현재 전북대 메카트로닉스 연구센터 소장.