

브러쉬리스 동기발전기 자동전압조정기의 제어성능 향상을 위한 연구

이영찬¹ · 김종수² · 정병건[†]

(원고접수일 : 2014년 8월 25일, 원고수정일 : 2014년 9월 2일, 심사완료일 : 2014년 9월 12일)

A study on improvement of the control performance of the automatic voltage regulator of a brushless synchronous generator

Youngchan Lee¹ · Jongsu Kim² · Byung-gun Jung[†]

요약: 선박과 육상용 브러쉬리스 동기발전기의 자동전압조정기는 출력 단자전압을 주로 PID 제어방식으로 제어한다. 하지만 발전기 전력계통에서 부하의 변화량과 변화횟수가 클 경우에는 PID 제어방식으로 전압의 변화량과 정정시간에 대해 강인한 제어성능을 발휘하기 어려워진다. 본 논문에서는 PID 제어방식에 비해 기준 단자전압 값에 대한 추종성능이 우수한 퍼지제어방식을 사용하여 자동전압조정기의 발전기 단자전압을 조정하는 기법을 제안하였으며, MATLAB/SIMULINK 시뮬레이션을 통해 동기발전기 자동전압 조정성능에 대한 우수성을 입증하였다.

주제어: 브러쉬리스 동기발전기, 자동전압조정기, 단자전압, 퍼지제어

Abstract: Terminal voltage of the Automatic Voltage Regulator(AVR) of brushless synchronous generator is generally being controlled by PID Control way in shore and ship field. However, in case of changeable large load on power system, PID control method is deficiency to respond output voltage with settling time. Hence, taking into consideration this situation, it is required new control method. In this thesis, we propose Fuzzy Logic Control(FLC) which has more optimal robust control way in order to respond varying values of terminal voltage to the brushless synchronous generator through simulation of MATLAB/SIMULINK and prove Fuzzy logic control more optimal compared with PID control.

Keywords: Brushless synchronous generator, AVR, Terminal voltage, Fuzzy logic control

1. 서론

최근까지 선박 및 산업용 브러쉬리스 동기발전기의 자동전압조정기는 발전기 출력전압을 싸이리스터 정류기를 사용한 위상제어를 통해 여자전류의 크기를 제어하는 방식을 주로 사용하였다. 브러쉬리스 동기발전기의 자동전압조정기는 계자권선에 직류인 여자전류를 공급하여 단자전압을 상시 일정하게 유지하고 전력계통의 역률과 무효전력을 개선한다.

그 과정은 기준 전압값에 대한 자동전압조정기의 제어신호에 따라 3상 전파정류기의 스위칭 위상을 조정하여 여자기의 전류량을 제어함으로써 주 발전기의 출력전압을 제어한다. 현재 IEEE에서는 자동전압조정기의 여자전류 제어방식으로 PID 제어방식을 표준으로 정하고 있다[1]. 하지만 PID 제어방식은 단자전압의 큰 변화량과 잦은 변화횟수가 발생하는 경우에는 제어성능이 다소 떨어지는

[†]Corresponding Author: Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: bgjung@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4269

1 Division of Education and Research, Korea Institute of Maritime and Fisheries Technologies, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, E-mail: leeyoungchan76@msn.com, Tel: 051-620-5777

2 Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, Dongsam-dong, Yeongdo-gu, Busan, 606-791, Korea, E-mail: jongskim@kmou.ac.kr, Tel: 051-410-4831

단점을 가지고 있다. 또한 최근 동기발전기의 여자 제어방식으로 퍼지제어방식을 적용한 연구들이 있지만 육상 전력에 초점이 맞춰져 있고 그 제어대상은 전력안정화장치(Power Stability System, PSS)이다[2]. 선박의 전력계통에서는 육상에 비해 장소가 협소하여 PSS를 장착할 수 없고 전압변동이 훨씬 크다는 점을 감안할 때 자동전압조정기에 보다 강력한 제어기법을 고려해야 한다.

본 논문에서는 선박에서 주로 사용하는 PID 제어 방식을 이용한 자동전압조정기의 전압 제어성능을 개선하기 위해서 과도상태 응답특성과 정정시간 제어성능이 우수한 퍼지제어방식을 사용하였으며 컴퓨터 시뮬레이션을 통해 그 유효성을 검증하였다.

2. 동기발전기

2.1 동기발전기의 구조 및 발전원리

브러쉬리스 동기발전기의 구성요소는 회전자인 계자와 고정자인 전기자를 갖는 주 발전기 부분과 발전기의 계자에 공급되는 여자전류를 생산하는 여자기로 크게 나누어진다.

발전기의 원리는 여자기에서 공급되는 여자전류에 의해 자화된 주 발전기의 계자의 자속과 전기자의 코일이 회전에 의해 쇄교 되어 전기자 코일에 기전력이 유도된다. 이는 패러데이 법칙에 의하여 정의되어 진다[1]-[6].

본 논문에서 대상으로 설정한 동기발전기는 Figure 1에 제시되어진 선박용 브러쉬리스 동기발전기이다.

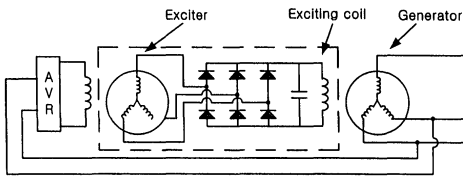


Figure 1: Structure of brushless synchronous generator

2.2 브러쉬리스 동기발전기의 수학적 모델링

브러쉬리스 동기발전기의 모델링은 주 발전기의 회전자 권선 전류에 의한 회전자계와 여자기의 전

기자 권선 전류에 의한 회전자계의 전자기적인 관계를 수식화 하는 것이다.

3상 좌표계에서는 동기기의 해석이 어렵기 때문에 3상 좌표계를 d-q 변환하여 2상 좌표계로 변환하여 모델 해석을 쉽게 하였다[8].

Figure 2는 동기발전기의 d-q 모델의 등가회로이다[3][6].

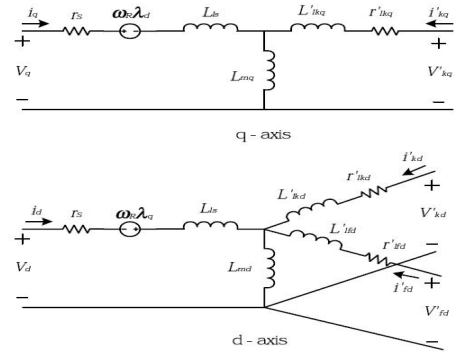


Figure 2: Equivalent circuit of brushless synchronous generator

다음 수식은 Figure 2의 등가회로를 나타낸 전압 방정식이다[4][7].

$$V_d = r_s i_d + \frac{d}{dt} \lambda_d - w_r \lambda_q \quad (1)$$

$$V_q = r_s i_q + \frac{d}{dt} \lambda_q + w_r \lambda_d \quad (2)$$

$$V_{fd} = r_{fd} i_{fd} + \frac{d}{dt} \lambda_{fd} \quad (3)$$

$$V_{kd} = r_{kd} i_{kd} + \frac{d}{dt} \lambda_{kd} \quad (4)$$

$$V_{kq} = r_{kq} i_{kq} + \frac{d}{dt} \lambda_{kq} \quad (5)$$

여기서, V_d, V_q : d축, q축 전기자 전압

i_d, i_q : d축, q축 전기자 전류

V_{fd}, i_{fd} : d축 계자전압, 전류

V_{kd}, V_{kq} : d축, q축 제동권선 전압

i_{kd}, i_{kq} : d축, q축 제동권선 전류

r_{kd}, r_{kq} : d축, q축 제동권선 저항

r_s : 고정자 저항, r_{fd} : d축 계자저항

w_r : 동기속도

또한, 자속쇄교 방정식은 다음과 같다.

$$\lambda_d = L_d \dot{i}_d + L_{md}(i_{fd} + i_{kd}) \quad (6)$$

$$\lambda_q = L_q \dot{i}_q + L_{mq} \dot{i}_{kq} \quad (7)$$

$$\lambda_{fd} = L_{fd} \dot{i}_{fd} + L_{md}(i_{fd} + i_{kd}) \quad (8)$$

$$\lambda_{kd} = L_{kd} \dot{i}_{kd} + L_{md}(i_d + i_{fd}) \quad (9)$$

$$\lambda_{kq} = L_{kq} \dot{i}_{kq} + L_{mq} \dot{i}_q \quad (10)$$

여기서, λ_d, λ_q : 전기자 자속

$\lambda_{kd}, \lambda_{kq}$: 제동권선 자속

L_d, L_q : 자기 인덕턴스

L_{kd}, L_{kq} : 제동권선 자기 인덕턴스

L_{fd}, λ_{fd} : 계자권선 인덕턴스 및 자속

L_{md}, L_{mq} : 상호 인덕턴스

회전자에 작용하는 토크의 불균형이 발생하였을 경우, 가속 또는 감속으로 인한 순수 토크는 다음과 같다[4][7].

$$T_a = T_m - T_e \quad (11)$$

여기서, T_a : 가속 토크, T_m : 기계적인 토크

T_e : 전자기 토크

T_m 과 T_e 의 값은 동기발전기에서는 양의 값이다. 발전기와 디젤엔진의 합성 관성력은 불균형에 의해서 가속이 되며, 운동 방정식은 다음과 같다.

$$J \frac{dw_m}{dt} = T_a = T_m - T_e \quad (12)$$

여기서, J : 발전기와 원동기의 관성 합성 모멘트

w_m : 회전자의 각속도

3. 동기발전기 여자시스템

3.1 자동전압조정기 구성

브러쉬리스 동기발전기의 여자시스템은 기본적

으로 크게 자동전압조정기와 여자로 구성된다. 그 구성은 다음 **Figure 3**과 같으며 여자시스템에 의해 발전기 출력 전압을 피드백(Feedback)하여 기준값과 비교하며, 그 오차를 자동전압조정기에서 PID 제어방식을 통해 여자의 계자권선에 공급되는 여자전류량이 제어됨으로써 발전기 출력 단자전압을 기준값과 일치되도록 조정한다. **Figure 3**에서 PID Controller는 자동전압조정기에 해당하며 이 제어기의 출력전압은 발전기 Amplifier, Exciter, Generator 등을 거쳐 전압을 출력한다.

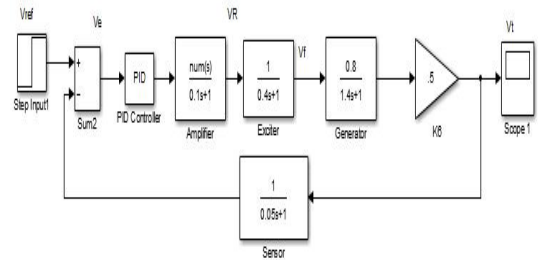


Figure 3: AVR system with PID

또한, 자동전압조정기의 PID 제어기의 전달함수는 다음 식으로 표현한다.

$$G_C(s) = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (13)$$

여기서, K_P : 비례이득, K_I : 적분이득

K_D : 미분이득, s : 라플라스 연산자

3.2 여자기 모델

여자시스템은 여러 종류가 있지만, 여자의 출력 전압은 자기회로의 포화효과로 인해 계자 전압의 비선형 함수인 경우가 대부분이다. 최근의 여자기 모델은 주로 시정수를 고려하고 포화 또는 비선형을 무시하며, 따라서 가장 단순화한 여자의 전달함수는 다음과 같이 정리할 수 있다.

$$\frac{V_F(s)}{V_R(s)} = \frac{K_E}{1 + \tau_E s} \quad (14)$$

여기서, $V_F(s)$: 여자기 출력전압
 K_E : 이득, τ_E : 시정수

4. 새로운 발전기 단자전압 제어방식

본 논문에서는 최근 브러쉬리스 동기 발전기에 주로 사용되는 PID 제어방식을 사용하는 자동전압 조정기의 전압 제어를 대신하여 퍼지제어방식을 사용하여 전압 제어성능을 개선하였다.

4.1 퍼지 추론 및 퍼지 시스템

퍼지제어기는 인간의 의사결정능력을 효과적으로 묘사할 수 있어 널리 이용하고 있다[8]. 언어적인 형태로 기술된 퍼지제어의 규칙을 적용하기 위해서는 논리적인 실행과정이 필요하다.

따라서 Figure 4와 같은 과정을 거쳐 퍼지제어기를 구성한다.

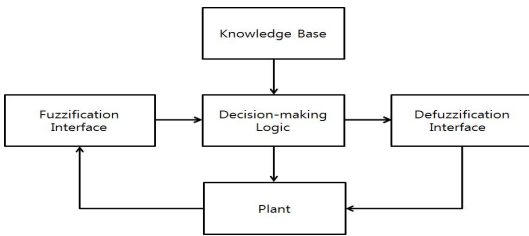


Figure 4: Basic structure of general FLC

지식기반(Knowledge Base)은 규칙기반(Rule - Base)으로 불리기도 하며 기준입력과 제어프로세스의 실제출력값의 차이로부터 전압오차를 계산한다. 그 오차값은 If-then 형식으로 입력인자가 된다. 퍼지화(Fuzzification interface)는 애매한 표현의 명령문들이 모여서 각 경우에 대해 제어결정을 일차적으로 하게 된다. 비퍼지화(Defuzzification interface)는 퍼지제어기의 내부에서 이루어지는 규칙기반) 및 추론부분에서는 퍼지적인 표현의 명령문을 사용하고 실제 퍼지제어기의 출력은 산술적인 값이 필요하다[10].

4.2 퍼지제어방식을 사용한 전압조정시스템

다음 Figure 5는 본 논문에서 새롭게 구성하여 사용하는 퍼지제어방식을 사용하는 전압조정시스

템의 구성도이다. Figure 4에 나타낸 퍼지제어기를 사용하여 기준 단자전압값과 실제 측정된 단자전압값의 오차를 계산하고 이 값을 퍼지화를 통해 제어 출력 로직을 결정하고 비퍼지화를 거쳐 여자기의 여자전류량을 제어함으로써 실제 발전기 출력 전압값을 기준 단자전압값에 일치시킨다.

또한 본 논문에서 사용하는 퍼지제어기는 Mamdani 방식을 사용하였다.

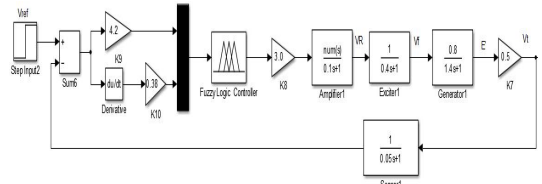


Figure 5: AVR system with FLC

Figure 6은 오차의 멤버십 함수를 표시한 것으로서 동기발전기의 입력변수 오차(e)의 범위를 [-3~3]로 지정하여 5개의 멤버십 함수로 구성하였다.

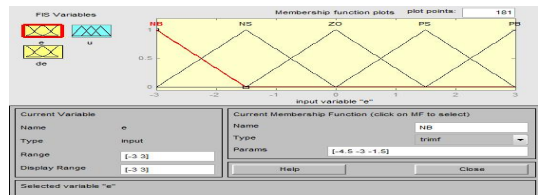


Figure 6: Membership function of error

Figure 7은 입력변수인 오차 변화율(de)에 대한 5개의 멤버십 함수로 그 범위를 [-1~1]로 설정하였다.

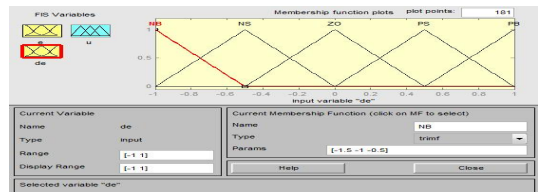


Figure 7: Membership function of differential error

Figure 8에서 출력변수 단자전압(u)은 5개의 멤버십 함수로 구성하였으며 범위는 [-1~1]로 설정하였다.

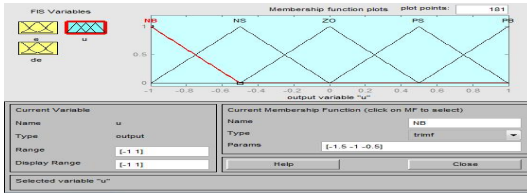


Figure 8: Membership function of output

5. 시뮬레이션

본 논문에서 제안하는 퍼지제어방식의 우수성을 입증하기 위해서 시뮬레이션을 시행하였으며 발전 시스템의 각 중 파라미터는 다음과 같다[5].

최대 전압변화량과 정정시간에 대해서 퍼지제어 방식의 속응성의 우수성을 비교 분석하기 위해서 단자전압의 기준값을 0.6[Unit]과 1.0[Unit]으로 설정하여 시뮬레이션을 하였다. 시뮬레이션을 위한 전체 시스템 구성도는 Figure 9와 같다.

PID 제어방식을 사용하는 경우는 Ziegler Nichols의 제2방법에 의해서 조정하였다. 단자전압 0.6으로 설정하였을 경우, 임계이득 K_{cr} 는 3.825이고 임계주기 P_{cr} 는 1.4이다. 시뮬레이션 결과 최대 단자전압 변화량은 기준값보다 0.26 상승하였으며, 정정시간은 3.1[sec] 이었다. 또한, 단자전압을 1.0[Unit]으로 설정하였을 경우에는 임계이득 K_{cr} 는 3.83이고 임계주기 P_{cr} 는 1.4이다. 이 때 최대

Table 1 : Generator system parameters

Parameter	Values
Output	5000 Kva
Voltage	440V
Hz	60Hz
RPM	1800 r/min

Table 2 : Gain and time constant of transfer function of generator system

	Gain	Time constant
Engine	$K_T=1$	$\tau_T=0.5$
Governor	$K_g=1$	$\tau_g=0.2$
Exciter	$K_E=1$	$\tau_E=0.4$
Generator	$K_G=0.8$	$\tau_G=1.4$

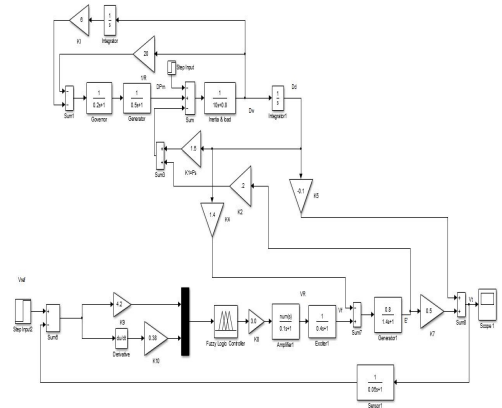
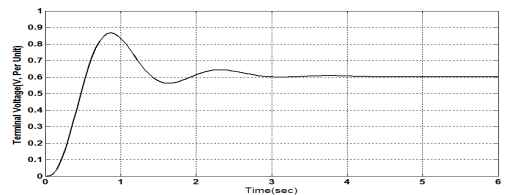
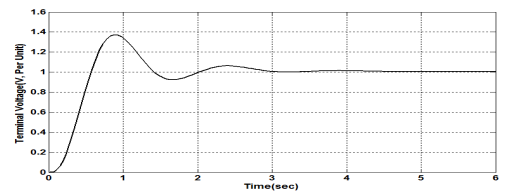


Figure 9: Structure of brushless synchronous generator by FLC



(a)



(b)

Figure 10: Terminal voltage response (0.6[Unit] and 1.0[Unit]) by PID

단자전압 변화량은 기준값보다 0.36정도 상승하였으며 정정시간은 3.2[sec]임을 Figure 10을 통해서 알 수 있다.

Figure 11의 (a)와 (b)를 통해서 본 논문에서 제안하는 퍼지제어방식을 사용하였을 경우의 단자전압 기준값 0.6[Unit]와 1.0[Unit]에 대한 최대 전압변화량과 전압 정정시간은 0.08과 1.4[sec] 및 0.1과 2.3[sec]로써 PID 제어방식에 비해 각각 기준 단자전압값이 0.6[Unit]의 경우에는 최대 변화량은

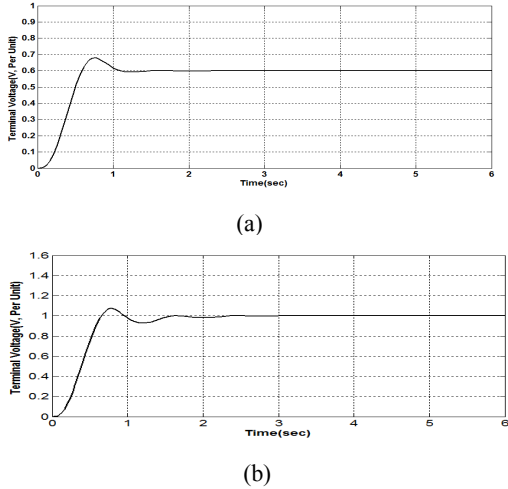


Figure 11: Terminal voltage response (0.6[Unit] and 1.0[Unit]) by FLC

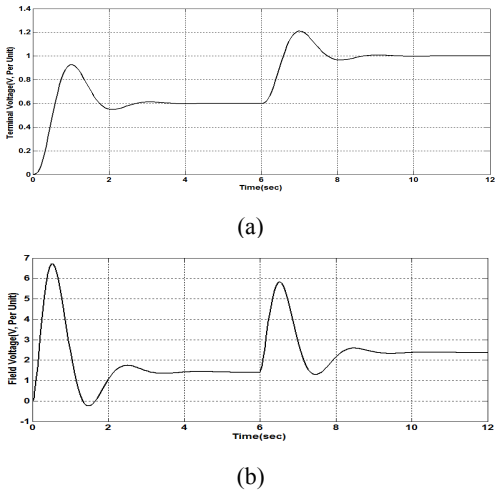


Figure 12: Terminal voltage step response(0.6[Unit] to 1.0[Unit]) and field voltage by PID

0.18[Unit], 정정시간은 1.7[sec]로 개선되었으며, 1.0[Unit]의 경우에는 최대 변화량은 0.26[Unit], 정정시간은 0.9[sec] 개선되었음을 확인하였다.

또한, 실제 발전기 운전 상황에 대한 PID 제어방식의 단자전압 조정성능을 분석하기 위해 단자전압변동에 따른 전압 조정 정도를 시뮬레이션 하였다.

Figure 12의 (a)는 단자전압을 0.6[Unit]을 6[sec]

에서 1.0[Unit]으로 변동 시켰을 경우의 응답 결과이며, 전압변화량과 정정시간에 있어서도 제어성능이 다소 떨어짐을 알 수 있다. 또한, 그림 (b)는 PID 제어방식에 의해 출력되어진 계자전압값을 보여준다.

Figure 13의 (a)는 퍼지제어방식을 사용하는 발전시스템에서 단자전압을 0.6[Unit]을 6[sec]에서 1.0[Unit]으로 변화시켰을 경우의 전압 변화량과 정정시간이며, 제어성능이 PID 제어방식에 비해 크게 개선되었음을 알 수 있으며, (b)에는 단자전압변동에 따른 퍼지제어기의 계자전압 제어결과를 보여준다.

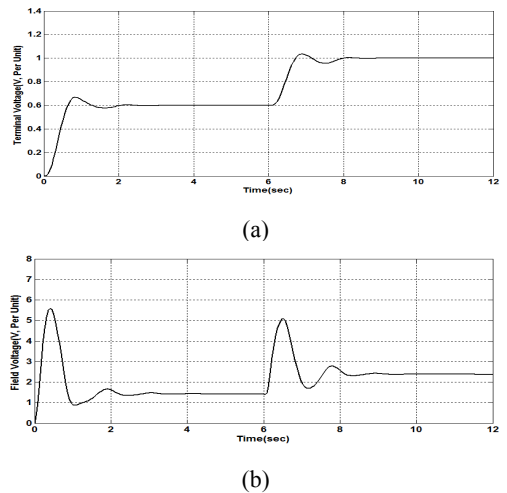


Figure 13: Terminal voltage step response (0.6 [Unit] to 1.0[Unit]) and field voltage by FLC

6. 결론

본 논문에서는 브러쉬리스 동기발전기의 자동전압조정기에 주로 사용되는 PID 제어방식에 대해서 응답성과 제어성능을 향상시키기 위해서 새로운 방식인 퍼지제어방식을 제안하였다. 제안하는 방식의 유효성과 우수성을 입증하기 위해서 시뮬레이션을 실시하였으며, 발전기 출력 단자전압을 0.6[Unit]과 1.0[Unit]로 설정하고 자동전압조정기의 전압제어방식을 PID 제어방식과 퍼지제어방식을 적용하여 전압 제어과정의 최대 전압변화량과 정정시간을 측정하여 비교 분석하였다.

단자전압이 0.6[Unit] 일 경우에는 새롭게 제안된 퍼지제어방식이 기존의 PID 제어방식을 사용하였을 경우에 비해서 최대 전압변화량은 69[%], 정정시간은 55[%] 개선됨을 확인할 수 있었다. 단자전압을 1.0[Unit]으로 설정하였을 경우에는 최대 전압변화량은 72[%], 정정시간은 28[%] 개선되었다. 또한, 부하 변동에 따른 전압조정 성능을 평가하기 위해서 단자전압의 설정을 0.6에서 1.0으로 변화시켰을 경우의 최대 전압변화량과 정정시간을 PID 제어방식과 제안된 퍼지제어방식을 사용하여 시뮬레이션 하였으며, 그 결과에서도 퍼지제어방식을 사용하였을 경우에 보다 우수한 제어성능을 보임을 알 수 있었다.

Dept of Mechtronics Engineering, Sung Kyun Kwan University, Korea, 2002 (in Korean).

- [8] R. H. Park, "Two - reaction theory of synchronous machines - generalized method of analysis - part1", Transactions of American Institute of Electrical Engineers, vol. 48, pp. 716-727, 1929.
- [9] J. J. Park, Fuzzy Control System, Seoul, Korea: Gyowoosa, 2008(in Korean).
- [10] B. R. Lee, "Fuzzy-Neural Network Control focusing Matlab/Simulink", Ulsan, Korea: UUP, 2012 (in Korean).

참고문헌

- [1] IEEE, "IEEE guide for synchronous generator modeling practices in stability analyses," New York, IEEE Std 1110-1991, March 21, 1991.
- [2] A. R. Roosta, H. Khorsand, and M. Nayeripour, "Design and analysis of fuzzy power system stabilizer", IEEE PES, pp. 545-551, 2010.
- [3] Y. S Park, Characteristics Analysis and Parameter Calculation of Brushless Synchronous Generator, M.S. Dissertation, Dept of Electrical Engineering, Dong-A University, Korea, 2003 (in Korean).
- [4] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [5] Hadi Saadat, Power System Analysis (second edition), New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [6] S. M Joo, A Study on Load Frequency Control of Power System Using Fuzzy PID Controller, Ph.D. Dissertation, Dept of Electrical Engineering, Dong-A University, Korea, 1997 (in Korean).
- [7] M. S Seo, A Study on the High Performance Control of Digital Excitation System for Synchronous Generator, M.S. Dissertation,