

선박용 동기 발전기의 여자 제어시스템 설계

이영찬¹ · 정병건[†]

(Received January 5, 2015 ; Revised January 20, 2015 ; Accepted March 31, 2015)

Design of Excitation Control System of Synchronous Generator on Board Ships

Youngchan Lee¹ · Byung-gun Jung[†]

요약: 본 논문에서는 선박용 동기발전기 여자제어시스템의 성능을 확인하기 위해 선급기술규칙에 따라서 시행한 실험 결과를 제공한다. 실험에서는 발전기의 각 부하 변화에 대해 PID 제어기와 퍼지제어기를 적용하고 두 제어기법이 선급의 기술규칙을 만족하는 지 관찰하고 성능을 비교 검토 한다. 이를 위해 PID 제어기법과 퍼지제어기법을 랩뷰 프로그램으로 작성한 후, PID 제어기의 경우는 한계 감도법과 약간의 조정을 통해 이득값을 결정한다. 퍼지제어기는 맘다니(Mamdani)의 방법으로 전압오차값과 전압오차변화율값, 출력전압값에 대해 멤버십함수를 구성한다. 이상의 PID 제어기법과 퍼지제어기법을 실제 소형 발전기에 적용하고 선급기술규칙에 따른 실험을 통해 안정성과 성능개선 특성을 비교 검토한다.

주제어: 동기 발전기, 여자 제어시스템, 퍼지제어

Abstract: This paper provides experimental results of an excitation control system of the synchronous generator on board ships in accordance with rules of classification society to make sure its performance. The experiment compares and reviews control results between PID control and fuzzy logic control applied to change of loads of the generator in order to make sure to satisfy the rules of classification society. Both of them are written by Labview program. In case of PID Control, this paper firstly adjusts the gains by ultimate sensitive method and the gains is more tuned by engineer's experience. And the fuzzy logic controller uses Mamdani method to make membership function for error between reference voltage and measuring voltage, differential error rate and output voltage. This paper is to make sure the experimental results of the proposed excitation control system applied to actual small synchronous generator with PID control and fuzzy logic written by using Labview program and it is proved on stability and improvement through experiments.

Keywords: Synchronous generator, Excitation control system, Fuzzy logic control

1. 서론

해상을 항해하는 선박은 선내 발전기에 의해서 전원이 독립적으로 공급되기 때문에 전원 공급의 안정성을 확보하는 것은 선박과 선원의 안전을 위해서 매우 중요하다.

대부분의 선박용 동기 발전기 여자 제어시스템은 사이리스터나 연산증폭기 등의 전력 제어소자에 PID 제어기법을 적용한 아날로그 방식을 사용하고 있다. 최근에는 위상각을 제어하기 위해 사이리스터 대신 모스페트(MOSFET) 등 속응성이 좋은 반도체 소자를 삽입하여 실험한 연구들도 있다[1]. 하지만 이러한 여자 제어시스템은 제어 이득을 한번 설정하면 그 값들을 변경하는 것이 어렵고 반도체 소자로 구성되어 있어 장시간 사용 시에 파손되는 경우 정전

사고가 발생할 수도 있다[2].

발전기의 여자 제어시스템에 대한 연구는 육상 발전소 발전기에 대해 연구가 대부분이며, 선박의 경우는 전력품질과 관련 연구가 많이 이루어지고 있다. 예를 들면, 전력안정화장치와 자동전압조정기를 동시에 제어하는 고전적 제어이론인 주파수 응답법을 기반으로 한 진-지상 보상기 및 이론적인 접근방식으로 근궤적법, 고유값법, 극배치법, LQ 제어이론, 적응제어이론을 이용한 연구 뿐 아니라 인공신경 회로망과 퍼지제어기법까지 다양하게 이루어지고 있다[3]-[18].

본 연구에서는 선박용 발전기에 디지털 PID제어기법과 퍼지제어기법을 적용한 자동전압조정장치를 설계 및 개발

[†] Corresponding Author (ORCID: <http://orcid.org/0000-0001-9697-1861>): Division of Marine System Engineering, Korea Maritime and Ocean University, 727, Taejong-ro, 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 Technology, E-mail: leeyoungchan76@msn.com, Tel: 051-620-5777

하고 그 성능에 대해 실험을 한다. 실험은 선박용 발전기의 자동전압조정장치의 부하특성에 대한 선급의 기술규칙을 기준으로 행한다. 또한 선급의 기술규칙을 적용할 경우 PID 제어기보다 퍼지제어기가 좀 더 개선된 응답특성을 보이는지 관찰한다. 한국선급과 미국선급의 선급기술규칙이 대동소이하지만 일부 내용에 대해서는 미국선급이 자세하게 기술되어 있어서 본 실험에 용이하다고 판단하여 선택하게 되었다. 미국선급의 선급기술규칙에 따르면, 발전기는 부하변동이 없는 안정상태에서 정격전압의 $\pm 2.5\%$ (220[V]일 경우, ± 5.5 [V])를 유지되기를 규정한다. 또한 정격전류의 60% 부하 변동 시, 발전기 출력전압은 +20% 및 -15%이내의 범위에 있어야 하며 1.5초 이내에 정격전압의 $\pm 3.0\%$ (220[V]일 경우, ± 6.6 [V])를 유지되기를 기술하고 있다. 아울러, 발전기 정격 전류의 60% 부하 인가 시 유도전동기의 시동 시 순간전류를 적용하는 것으로 규정한다[9].

본 연구에서는 브러쉬리스 동기발전기를 이용하여 5단계(①20%, ②26%, ③40%, ④50%, ⑤115%)의 부하시험을 실시하여 발전기 단자전압 제어 응답특성과 계자전류의 응답특성에 관하여 PID 제어방식과 퍼지 제어방식을 비교 검토한다. 이에 제안된 디지털 여자 제어시스템을 실험용 소형 발전기에 적용하여 선급의 규정에 적합한지 실험하고 그 성능을 확인한다.

2. 동기발전기의 여자시스템 구성

2.1 동기발전기 구성

동기발전기의 고정자 권선에 유기되는 유기기전력은 페르테이 법칙으로부터 다음과 같이 나타낸다[10][11].

$$E = 4.44f W\Phi \frac{K_w}{K_\phi} [V] \quad (1)$$

여기서, f 는 주파수 [Hz]이며, W 는 직렬 접속된 권선수, Φ 는 한 극당의 자속 [Wb], K_w 는 권선계수이며, K_ϕ 는 자속분포계수를 나타낸다.

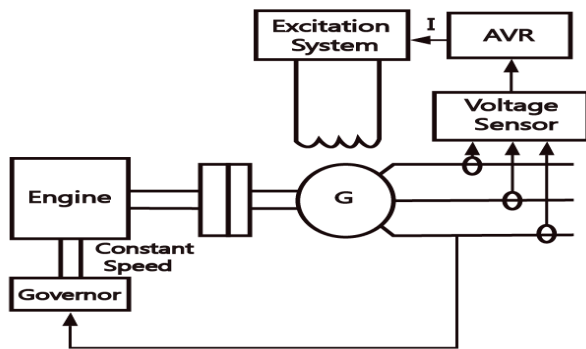


Figure 1: Configuration of Excitation System of Brushless Synchronous Generator on board ship[12]

Figure 1에서는 선박용 동기발전기의 여자제어시스템을 나타낸다. 선박에서 발전기의 원동기로는 주로 디젤기관을 사용하며, 조속기에 의해서 일정한 동기속도와 주파수를 유지한다. 또한 발전기 출력측 단자전압을 계측한 후, 자동전압조정기를 통해 다이오드로 정류된 직류를 계자전류로 여자에 흘려보내어 자속을 발생시키고 이를 통해 일정한 전압을 유지한다.

3. 퍼지제어 시스템

3.1 퍼지제어 이론

퍼지제어의 일반적인 구성은 지식기반(knowledge base)은 규칙기반(rule-base)으로 불리기도 하며 기준입력과 제어프로세스의 실제 출력값의 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[13][14].

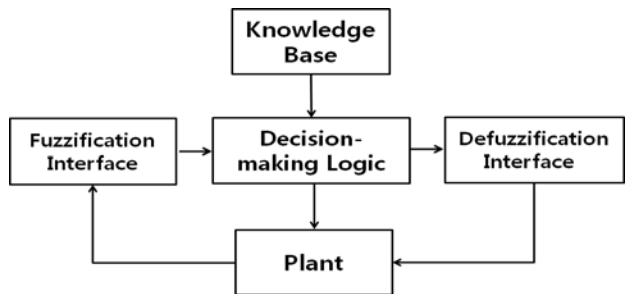


Figure 2: Basic structure of general Fuzzy Logic Controller

3.2 멤버쉽함수 및 퍼지제어규칙

본 논문에서는 Mamdani 방법에 의해서 멤버쉽 함수를 구성하며, 또한 입력전압의 오차(e , [V_{rms}]) 범위는 [-220, 70], 입력전압 오차변화율($\frac{de}{dt}$, [V_{rms}/ms])의 범위는 [-70, 70], 출력전압[V] 범위는 [0, 5]으로 설정한다.

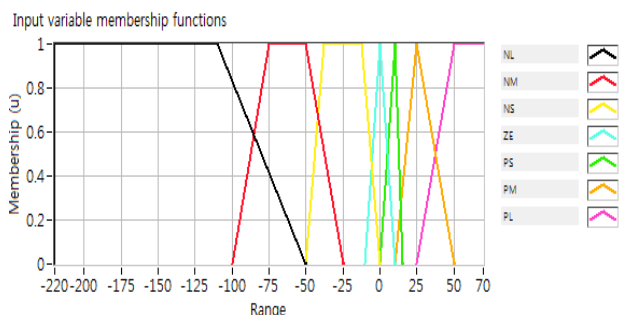


Figure 3: Membership Function of error

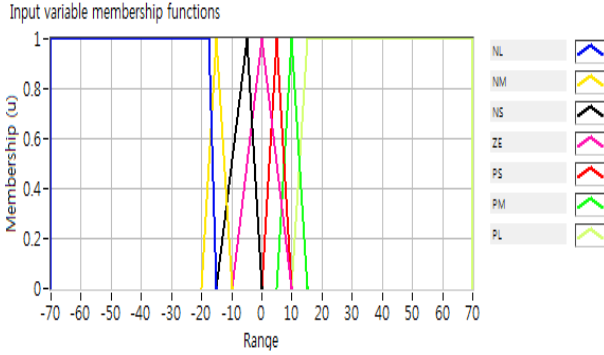


Figure 4: Membership Function of Rate of Change of Voltage

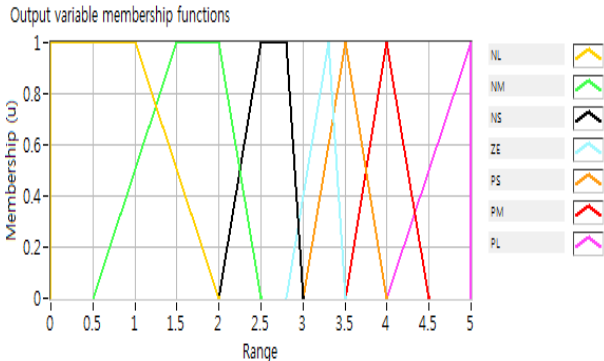


Figure 5: Membership Function of Output Voltage

본 논문에서는 기준값과 단자 전압의 오차 및 오차변화율에 대해 각 7개의 멤버십 함수를 구성하고 퍼지 제어 규칙은 Table 1과 같이 정한다. 각 파라미터에 대한 언어적 변수는 P는 Positive, N은 Negative, L은 Large, M은 Medium, S은 Small, ZE은 Zero을 의미한다. 퍼지 제어 규칙의 예를 들면, 오차가 NL(negative large)이고 오차변화율이 NL(negative large)이면, 출력은 PL(positive large)이 된다.

Table 1: Lookup Table of Control Rules

		e						
		NL	NM	NS	ZE	PS	PM	PL
$\frac{de}{dt}$	NL	PL	PL	PL	PL	PM	PS	ZE
	NM	PL	PL	PM	PM	PS	ZE	NM
	NS	PL	PM	PS	PS	NS	NM	NL
	ZE	PL	PM	PS	ZE	NS	NM	NL
	PS	PL	PM	PS	NS	NS	NM	NL
	PM	PM	ZE	NS	NM	NM	NL	NL
	PL	ZE	NS	NM	NL	NL	NL	NL

본 논문의 비퍼지화의 방법에는 무게중심법(Center of Gravity, COG)을 사용하였으며 이 방법은 최종 퍼지집합의 면적중심에 해당하는 명확한 출력을 환산한다. 비퍼지화 부분의 정확한 출력을 위해 랩뷰 프로그램의 퍼지제어기 테스트 시스템을 이용하며 Figure 6에서 확인할 수 있

다. Figure 6에서 기준값과의 전압오차(e)는 $+70[V_{rms}]$ (PL) 이고, 전압 오차변화율($\frac{de}{dt}$)이 $-40[V_{rms}/ms]$ (NL)이면, 출력은 $+3.2[V]$ (ZE)이 된다.

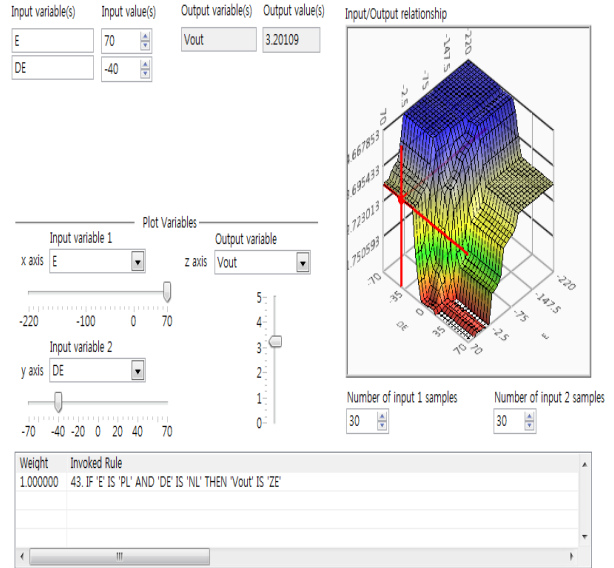


Figure 6: Test System of FUZZY Logic Controller

4. 실험 및 결과

4.1 실험 기기의 구성

본 연구에서 제안하는 동기발전기의 여자 제어시스템 실험장비는 Figure 7과 같이 구성한다.

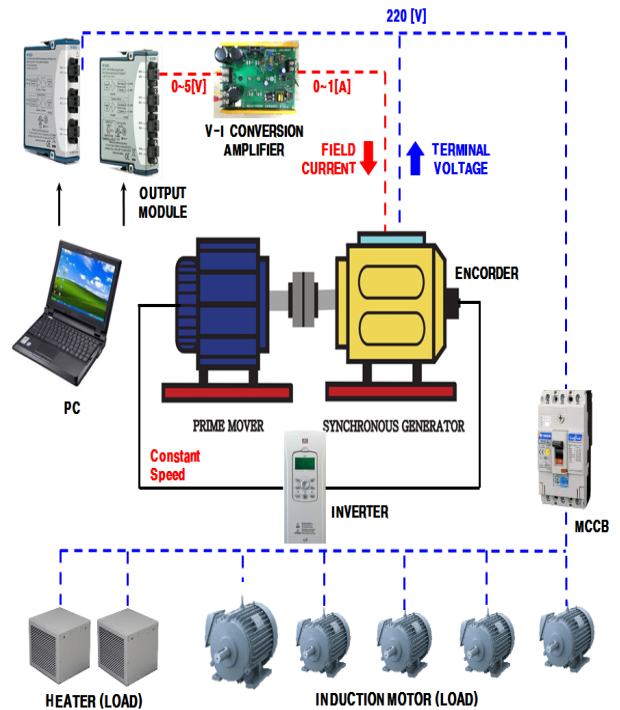


Figure 7: Experimental Synchronous Generator System

원동기(유도전동기), 동기 발전기, 인버터 및 엔코더의 사양은 **Table 2**와 같이 구성한다. 실험용 발전기의 원동기는 유도전동기가 되며, 전동기는 속도측정센서 엔코더에 의해서 속도를 측정하고 인버터에 그 값을 입력하여 부하 변동에도 동기속도 1800 [RPM]로 유지하도록 한다.

본 연구의 실험에 사용한 부하는 소형 유도전동기 4대 (0.75[kW]), 유도전동기(3.7[kW]) 1대 및 히터 2대이며 사양은 **Table 3**과 같다.

발전기의 출력전압 측정과 컴퓨터를 이용하여 PID 제어 및 피지제어의 계산된 값은 **Table 4**의 NI DAQ 기기로 실험한다.

Table 4의 NI DAQ의 출력 전압값(0 ~ 5[V])은 V-I 변환 증폭기를 통해 전류 값(0~1[A])으로 정비례 변환하여 발전기의 여자에 입력한다. 즉, 발전기의 여자에 입력되는 값은 전류값으로 0 ~ 1[A] 범위이다. **Figure 8**은 V-I 변환 증폭기의 입력 전압과 출력 전류간의 특성 곡선을 나타낸다.

Table 2: Specifications of Experimental Synchronous Generator

Equipment	Parameters	Values	
Prime Mover	Output	7.5 [kVA]	
	Rated Voltage	220 [V]	
	Rated Current	28.6 [A]	
	Phase	3	
	Speed	1800 [RPM]	
	Frequency	60 [Hz]	
	Pole	4P	
Generator	Output	28.8 [kVA]	
	Rated Voltage	220 [V]	
	Rated Current	75.5 [A]	
	Rated Voltage of Exciter	50 [V]	
	Rated Current of Exciter	2.5 [A]	
	Phase	3	
	Speed	1800 [RPM]	
	Frequency	60 [Hz]	
Inverter	Input	Output	17.5 [kVA]
		Voltage	200 ~ 230 [V]
			Frequency
		Current	CT
	VT		54.7 [A]
	Output	Voltage	200 ~ 230 [V]
		Frequency	0 ~ 400 [Hz]
		Current	CT
VT			74 [A]
Encoder	Voltage	12 [V]	
	Pulse	1000 Pulse	

Table 3: Specifications of Loads

Loads	Parameters	Values
Induction Motor	Output	0.75 [kVA]
	Rated Voltage	220 [V]
	Rated Current	3.5 [A]
	Phase	3
	Frequency	60 [Hz]
Induction Motor	Output	3.7 [kVA]
	Rated Voltage	220 [V]
	Rated Current	14 [A]
	Phase	3
	Frequency	60 [Hz]
Heater	Rated Voltage	220 [V]
	Rated Current	4.5 [A]
	Phase	1

Table 4: Specifications of NI Compact DAQ

Module	Parameters	Values
Input module	Number of Channels	3 analog input channels
	Operating Voltage	AC 300 [V _{rms}]
	Sampling mode	simultaneous
	ADC Resolution	24 bits
	Input impedance	1 [MΩ]
Output module	Number of channels	4 analog input channels
	Output Voltage	DC ±10 [V]
	Current drive	DC ±20 [mA]
	DAC Resolution	16 bits
	Output impedance	0.1 [Ω]

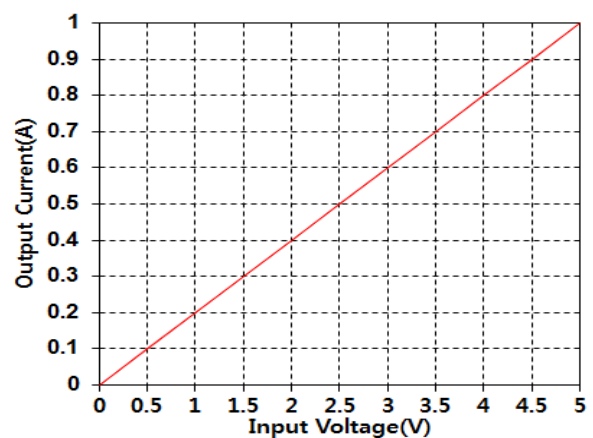


Figure 8: Characteristic curve of V-I Conversion Amplifier

4.2 PID 제어 랩뷰 프로그램 구성

본 논문에서 랩뷰를 이용한 PID 프로그램은 **Figure 9**과 같이 구성한다.

PID 프로그램은 크게 **Figure 9**에서 ① 시퀀스 구문, ② While Loop 및 ③ While Loop 구문으로 나뉜다. 프로그램을 시작하게 되면 먼저 ① 시퀀스 구문이 작동하여 전압을 감지하고 샘플링(샘플속도 1000 S/sec와 채널당 샘플 1000 개)하여 ②에서 전압을 실효치(RMS)로 변환하며 이 값을 ‘단자전압’이라 표기했다. 이 전압값은 ③의 ‘단자전압’은 로컬변수로 삽입하며 PID 제어기의 입력이 된다.

PID 제어기의 출력은 최소치와 최대치를 각각 0 ~ 300 [V]으로 설정한다. 이 PID의 출력은 0~5 [V]의 비례 축소하여 NI DAQ의 출력모듈의 출력값이 된다. 또한 PID 제어기의 최적의 이득값은 한계감도법에 의해 일차적으로 조정하고 발전기의 여자제어시스템의 특성에 맞게 재조정하였다. PID 최적 이득값은 $K_c = 0.46$, $T_i = 0.02$, $T_d = 0.005$ 이었다.

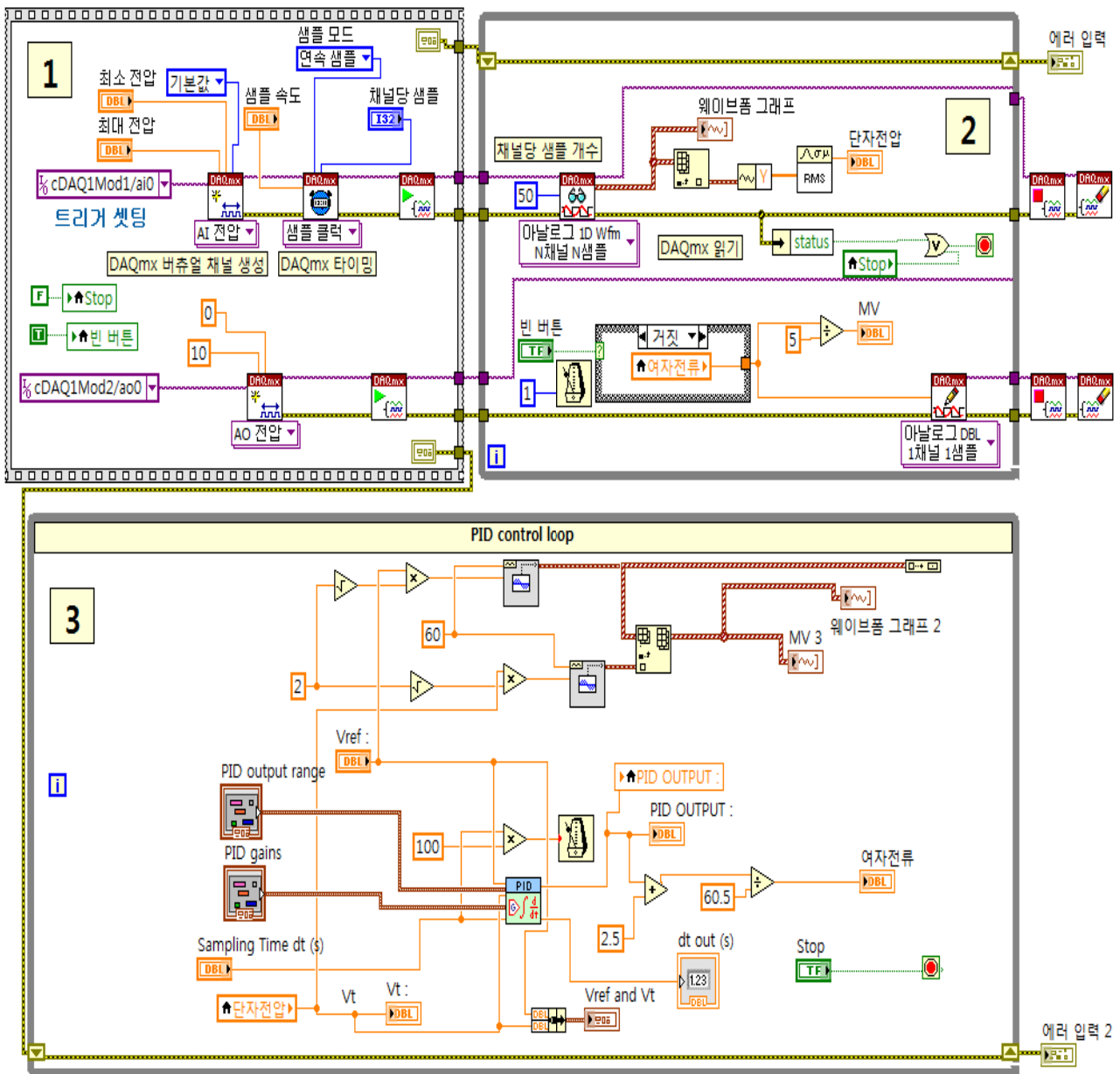


Figure 9: PID Controller Program

4.3 퍼지제어 랩뷰 프로그램 구성

퍼지 제어기에서도 마찬가지로 **Figure 9**의 ①과 ②에서 동기발전기의 단자전압을 샘플링하고 실효치로 변환한다. 이 단자전압은 **Figure 10**의 ‘단자전압’으로 들어와 퍼지 제

어기로 입력된다. 퍼지제어기의 입력 값은 기준전압과의 전압 오차값과 전압 오차변화율을 배열로 입력하게 되면 퍼지제어기는 제3장의 멤버집합수와 제어규칙으로 퍼지화와 비퍼지화의 연산을 통해 출력값을 산출한다.

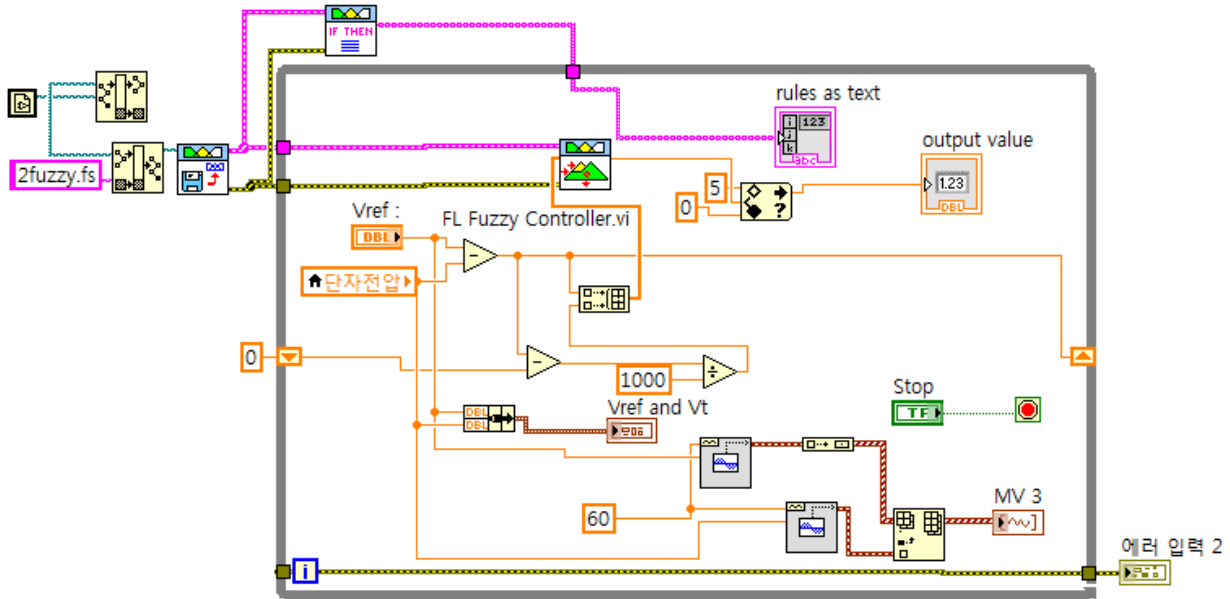


Figure 10: Fuzzy Logic Controller Program

4.4 실험 방법

본 논문에서는 실험용 동기 발전기에 부하시험을 0.75 [kW] 유도전동기 4대, 3.7 [kW] 유도전동기 1대 그리고 히터 2대를 이용하여 다음 5단계로 실험하였다.

- 1) 무부하 → 부하 20 % (유도전동기 1.5 [kW]) → 무부하
- 2) 무부하 → 부하 26 % (히터 2대) → 무부하
- 3) 무부하 → 부하 40 % (유도전동기 3.0 [kW]) → 무부하
- 4) 무부하 → 부하 50 % (유도전동기 3.7 [kW]) → 무부하
- 5) 무부하 → 부하 115 % (히터 1.98 [kW] + 유도전동기 6.7 [kW]) → 무부하

본 논문의 실험 결과에 대해 주목해야 할 사항은 아래와 같다.

- 1) 발전기의 부하변동이 없는 안정상태에서 단자전압의 ±2.5 % (220 [V]일 경우, ±5.5 [V])가 유지되는지 관찰한다.
- 2) 발전기의 정격전류 60 % 이내의 부하변동의 경우, 발전기 출력전압의 -15 % ~ +20 % (187 [V] ~ 264 [V]) 이내의 범위에 있어야 하며 1.5초 이내 정격전압의 ±3.0 % (220 [V]일 경우, ±6.6 [V])를 유지하기를 확인한다. 단, 발전기 정격 전류의 60 % 부하 인가 시에는 유도전동기의 시동 시간전류를 적용한다.
- 3) PID 제어기보다 퍼지제어기를 적용하였을 때 단자전압과 계자전류의 응답특성이 개선되는지를 관찰한다.

4.5 실험 결과

본 연구의 결과는 Figure 11와 같이 나타났으며 요약하면 다음과 같다.

- 1) PID 제어기법과 퍼지 제어기법, 두 제어기법 모두 발전기의 부하의 변동이 없는 경우에 ±1.4%(±3 [V])이었으며 선급의 규정을 만족하였다.

2) Figure 11 (a)의 경우, 유도 전동기(0.75 [kW]) 2개를 동시에 접속하고 이탈시켰을 때, 시동전류가 20 [A]로 유도전동기의 정격전류의 4 [A]의 5배가 측정되었다. 원동기의 정격용량이 7.5 [kVA]이고 발전기의 용량이 28.8 [kVA]이므로 서로 다르므로 발전기의 용량은 원동기(유도전동기)의 피상전력 7.5 [kVA]로 계산해야 한다. 따라서 발전기의 정격전류는 19.6 [A]가 된다. 미국선급의 선급기술규칙의 경우 유도전동기는 시동전류를 적용하기 때문에 유도전동기 0.75 [kW] 2개를 기동하였지만 발전기의 100 % 부하를 접속시켰다고 볼 수 있다. PID 제어 기법의 경우, 최대 언더슈트는 190 [V] 이며 정격전압의 ±3.0%(±6.6 [V])에 도달하는 정정시간은 0.05 초 이었다. 또한 퍼지 제어 기법의 경우, 최대 언더슈트는 205 [V] 이었으며 정정시간은 0.02 초 이었다. 즉 선급기술규칙에서 규정하는 1.5 초 보다는 PID와 퍼지제어기법이 월등하게 제어할 수 있었지만 PID 제어기법보다는 퍼지제어기법이 최대 언더슈트는 50 % 증가시켰고 정정시간은 2.5배 개선시켰다.

3) Figure 11 (b)의 경우, 저항성 부하인 히터를 접속 및 이탈시켰을 경우 Table 5와 같이 나타났다.

Table 5: Analysis to 26%, 40%, 50% & 100% Loadings On-Off

Load		Max Undershoot [V]	Set Time [sec]
26 %	PID Control	203	0.05
	Fuzzy Control	210	0.01
40 %	PID Control	169	0.09
	Fuzzy Control	181	0.02
50 %	PID Control	115	0.1
	Fuzzy Control	141	0.02
100 %	PID Control	79	0.09
	Fuzzy Control	111	0.025

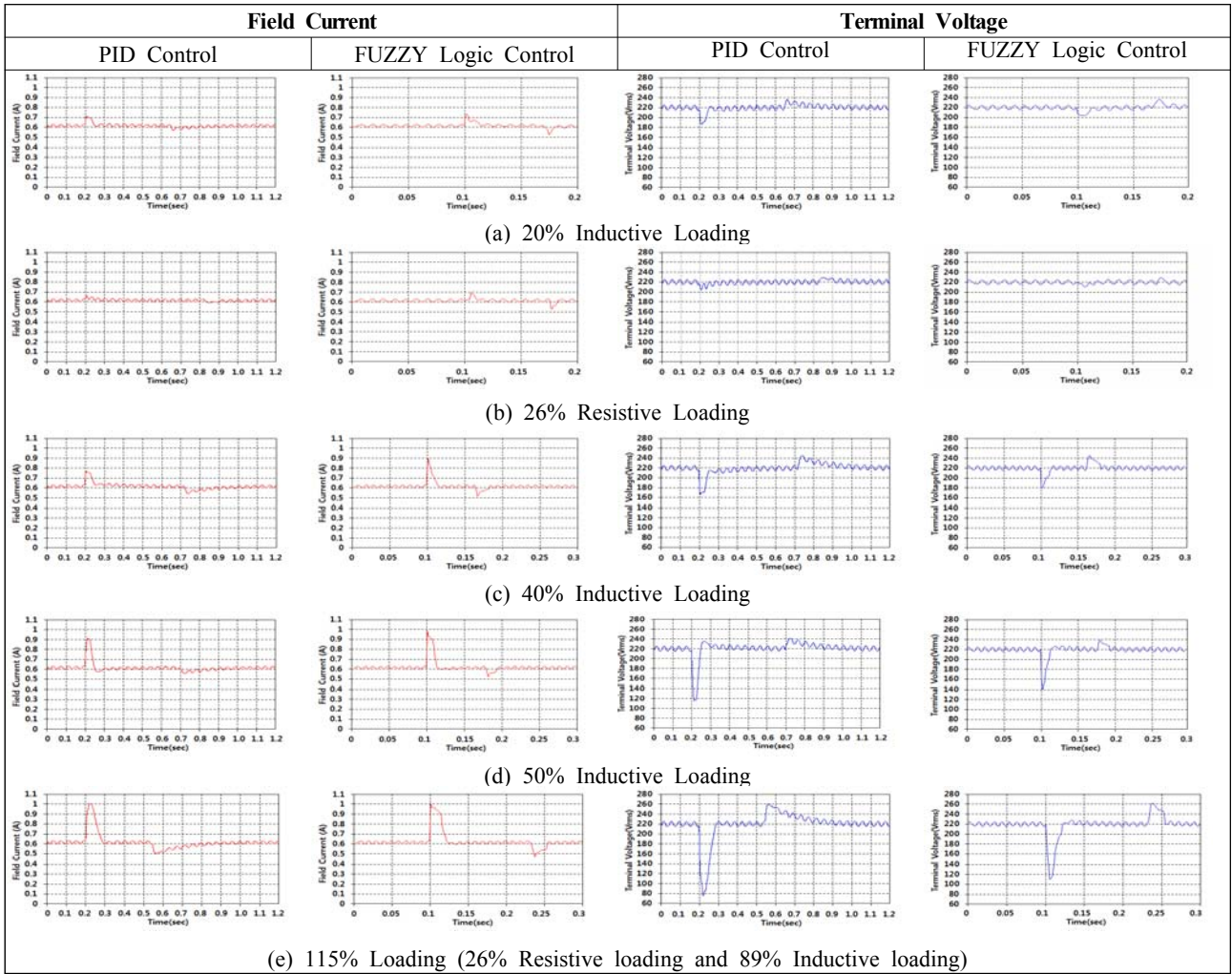


Figure 11: Field Current and Terminal Voltage under different sudden loadings with PID Controller and FUZZY LOGIC Controller

퍼지 제어기법을 사용했을 경우, 각 부하단계 변화시 최대언더슈트와 정정시간은 각각 59%, 76%, 75% & 77% 및 5배, 4.5배, 5배 & 3.6배 개선되었다.

또한 PID 제어방식에서보다 퍼지 제어방식에서 계자전류는 부하시험 단계마다 좀 더 빠른 시간에 많은 변화량이 있었음을 알 수 있었고 계자전류의 변화율과 양은 단자전압과 비례됨을 확인하였다.

5. 결론

IEEE에서는 동기발전기의 여자 제어시스템에 대해서 PID 제어방식을 권고하고 현재 대부분의 선박 발전기에서도 PID 제어방식을 사용하고 있다[15].

본 연구에서는 미국선급의 선급기술규칙에 따라서 PID 제어기법과 퍼지제어기법을 이용하여 실험을 실시하였다.

실험에서는 PID 제어기법에 비하여 퍼지제어기법의 과도응답 특성 정정시간이 2.5~5배 개선되었고 최대 언더슈트는 59%~77%까지 감소되었다.

본 논문에서 제안한 퍼지제어기반 디지털 여자 제어시스

템은 동기발전기의 운전 특성에 맞게 신속하고 정확하게 제어이득을 선택할 수 있어 고신뢰도가 요구되는 해상에서 더욱 활용가치가 있음을 알 수 있었다.

References

- [1] D. H. Yoo, C. H. Hwang, S. H. Park, J. S. Yoo, S. Lee, and C. Y. Won, "1MVA synchronous generator control for vessel used for digital AVR of drop method," Proceedings of the Korean Institute of Illumination and Electrical Installation Engineers, pp. 225-229, 2007 (in Korean).
- [2] H. M. Hong, "Synchronous generator digital exciter PSS control," Journal of Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineer, vol. 4, no. 3, pp. 144-148, 2004.
- [3] R. Ramya and K. Selvi, "Simulation of synchronous generator with fuzzy based automatic voltage regulator," International Journal of Electrical and Computer

- Engineering, vol. 2, no. 6, pp. 798-805, 2012.
- [4] S. Pillutla and A. Keyhani, "Neural network based saturation model for round rotor synchronous generator," IEEE Transactions on Energy Conversion, vol. 14, no. 4, pp. 1019-1025, 1999.
- [5] S. M. Joo, D. R. Hur, S. H. Kim, D. I. Chung, and H. H. Chung, "A study on damping improvement of a synchronous generator with static VAR compensator using a fuzzy-PI controller," Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, vol. 15, no. 3, pp. 57-66, 2001.
- [6] C. T. Su, H. R. Hwung, and G. R. Lii, "Fuzzy logic based voltage control for a synchronous generator," Electric Power System Research of Elsevier, vol. 3, no. 2, pp. 225-331, 1997.
- [7] I. H. Lim, A Study on the Development of Digital Excitation Control System of Synchronous Generator, Ph.D. Dissertation, Department of Electrical Engineering, Hong-Ik University, Korea, 2001 (in Korean).
- [8] Y. C. Lee, J. S. Kim, and B. G. Jung, "A study on improvement of the control performance of the automatic voltage regulator of a brushless synchronous generator," Journal of the Korean Society of Marine Engineering, vol. 38, no. 7, pp. 909-915, 2014.
- [9] ABS, "Rules for building and Classing on Steel Vessels," Huston, Part 4, July, 2014.
- [10] P. Kundur, Power System Stability and Control, New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [11] Hadi Saadat, Power System Analysis(second edition), New York, USA: McGraw-Hill Inc, 1994.
- [12] Y. S. Park, Characteristics Analysis and Parameter Calculation of Brushless Synchronous Generator, M.S. Dissertation, Department of Electrical Engineering, Dong-A University, Korea, 2003 (in Korean).
- [13] S. G. Oh, Fuzzy Model and Control System by using C program, Suwon, Korea: Naeha, 2002 (in Korean).
- [14] J. J. Park, "Fuzzy Control System," pp. 5, Gyo Woo, 2008 (in Korean).
- [15] IEEE, "IEEE Guide for Synchronous Generator Modeling Practices in Stability Analyses," New York, IEEE Std 1110-1991, March 21, 1991.