

직접 순시전압 제어기법에 의한 동기발전기의 고성능 여자 제어시스템

(A High Performance Exciter Control System of Synchronous Generator using Direct Instantaneous Voltage Control Method)

이동희* · Jianing Liang · 이상훈 · 안진우

(Dong-Hee Lee · Jianing Liang · Sang-Hoon Lee · Jin-Woo Ahn)

요 약

본 논문에서는 부하 변동에 강인하고, 제어기의 구성이 매우 간단한 순시전압제어기법을 적용한 여자제어 시스템을 제안한다. 제안하는 순시전압 제어기법은 제어기의 이득을 결정하기 위한 복잡한 설계가 요구되지 않으며, 제어기의 시정수 설정만으로, 전력 변환 장치의 최대 응답성을 유도 할 수 있으며 과도 응답 상태에서 오버슈트의 발생을 크게 억제할 수 있는 장점이 있다.

제안된 순시전압 제어기법에 의한 동기 발전기 여자 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션과 소형 발전기 시스템에 적용된 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

Abstract

This paper presents a simple, robust excitation control system for synchronous generator using direct instantaneous voltage control(DIVC) method. DIVC method can operate as maximum dynamics of power conversion system without any control gains such as PID controller. And the transient overshoot of generator voltage can be suppressed with a simple time constant.

The proposed control scheme is verified by the computer simulation and experimental results in prototype generation system.

Key Words : Synchronous generator, Exciter system, Direct instantaneous voltage control

1. 서 론

AVR(Automatic Voltage Regulator)을 적용한 동기 발전기 시스템은 부하 변동에 대하여 강인하고, 신뢰성이 높아 육상 플랜트용 발전기뿐만 아니라, 비상용 발전기, 선박용 전원 장치에 이르기까지 그 활용이 크게 증가하고 있다. 일반적으로 발전기의

* 주저자 : 경성대학교 전기전자메카트로닉스공학부
Tel : 051-620-4693, Fax : 051-624-5980
E-mail : leedh@ks.ac.kr
접수일자 : 2007년 1월 12일
1차심사 : 2007년 1월 16일
심사완료 : 2007년 1월 30일

출력전압을 제어하는 AVR은 발전기에 맞게 설계된 아날로그 AVR이 많이 적용되어 왔으나, 다양한 발전기의 생산에 따른 AVR 적용의 어려움과 파라미터 변경의 문제와 더불어, 병렬 운전 및 고성능 제어 요구에 따른 시스템의 복잡성 문제로 인하여 점점 디지털 AVR(DAVR : Digital Automatic Voltage Regulator) 시스템으로 전환되고 있다[1-3].

DAVR 시스템에서 대부분의 플랜트에서는 고전적인 PID 제어기와 TCR(Thyristor Control Rectifier)이 널리 사용되고 있다[1-4]. 이 시스템은 제어기가 단순하고, 현장 엔지니어에게 익숙하다는 장점이 있지만, 제어 이득의 선정에 따라서 응답특성이 다르게 나타나고, 특히 정상상태 오차를 줄이기 위하여 제어이득을 높게 선정하는 경우 과도응답에서 높은 오버슈트 등이 발생하는 단점이 있다 [5-6]. 또한 TCR의 경우에는 정격이 60[Hz]인 3상 동기기의 경우에 180[Hz]에 한 번씩 만 제어 신호의 출력이 가능하므로, 과도 상태의 응답성이 매우 늦고, 이러한 점호각 제어에 따른 고주파 전류에 의한 노이즈로 인하여 게이트 발생기 및 제어기의 오동작 문제로, IGBT를 적용한 고성능 전력 변환 장치의 적용이 크게 증가하고 있다[7-8].

본 논문에서는 부하 변동에 강인하고, 제어기의 구성이 매우 간단하여 현장에서 쉽게 적용이 가능한 순시전압제어기법을 적용한 여자제어 시스템을 제안한다[9-10]. 순시전압 제어기법은 제어기의 이득을 결정하기 위한 복잡한 설계가 요구되지 않으며, 제어기의 시정수 설정만으로, 전력 변환 장치의 최대 응답성을 유도할 수 있으며 과도 응답 상태에서 오버슈트의 발생을 크게 억제할 수 있는 장점이 있다. 순시전압 제어기법을 적용하기 위해서는 기존의 TCR 전력 변환 장치로는 구현이 불가능하므로, 본 논문에서는 고속 스위칭이 가능한 IGBT형 인버터를 적용하였다.

제한된 순시전압 제어기법에 의한 동기 발전기 여자 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션과 소형 발전기 시스템에 적용된 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

2. 일반적인 동기발전기 제어시스템

그림 1은 디젤 엔진으로 구동되는 기본적인 동기 발전기 제어 시스템의 블록도를 나타내고 있다.

동기 발전기 제어 시스템에서 실제로 발전기의 계자를 제어하는 것은 여자기의 출력전압에 따른 발전기 계자 전류이며, 여자기의 출력전압은 여자기의 계자에 연결된 사이리스터의 점호각에 따라 여자기의 계자 전압을 조절함으로써 제어된다. 이때 실제적인 사이리스터의 점호각은 PMS로부터 공급되는

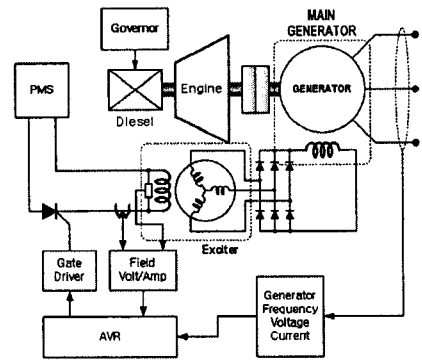
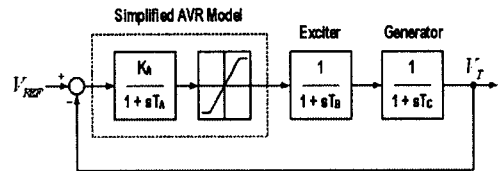
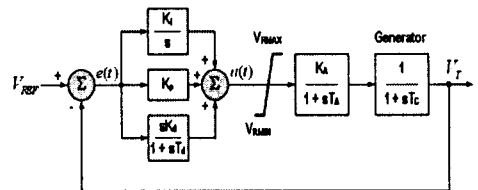


그림 1. 디젤 엔진으로 구동되는 일반적인 동기 발전기 제어 시스템
Fig. 1. Synchronous generator system driven by diesel engine



(a) A simple control block of generator



(b) Practical PID control block of AVR

그림 2. 간략화된 발전기 제어시스템 및 PID형 AVR 제어구조

Fig. 2. Block diagram of a simplified generation system and PID controller

직접 순시전압 제어기법에 의한 동기발전기의 고성능 여자 제어시스템

전압의 주파수에 따라 달라지며, 3상 60[Hz]의 전원이 공급되는 경우에는 180[Hz]에 한번씩 만 계자 전압의 제어가 가능하다. 따라서 미세한 출력전압의 조절이 어렵고, 정확한 점호각의 제어오차에 따라 발전기의 전압이 변동하게 되며, 급격한 부하 변동에 대하여 적응성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

그림 2는 간략화된 동기 발전기 제어 시스템의 블록도와 PID 제어기로 구성된 DAVR 장치의 제어 블록도를 나타내고 있다[1].

그림 2 (a)에서 K_A 및 T_A 는 AVR의 증폭이득 및 시정수를 나타내며, T_B 와 T_C 는 여자기와 발전기의 시정수를 나타낸다. 그림 2 (a)의 간략화된 발전기 제어시스템의 전달 함수는 다음과 같다.

$$G(s) = \frac{K_A}{(1 + sT_A)(1 + sT_B)(1 + sT_C)} \quad (1)$$

간략화된 발전기 제어시스템의 전달 함수에서 시스템의 응답성은 AVR 증폭이득에 매우 의존적으로 안정적인 제어기의 구성이 매우 어렵다. 따라서 그림 2 (b)와 같은 PID 제어기의 적용이 필요하다.

그림 2 (b)와 같은 일반적인 PID 제어기의 출력은 다음과 같다.

$$e(t) = V_{REF} - V_T \quad (2)$$

$$u(t) = K_p \cdot e(t) + K_i \int e(t) dt + K_d \frac{e(t)}{dt} \quad (3)$$

단 V_T : 발전기 단자 출력전압

K_p, K_i, K_d : 비례, 적분 및 미분 제어이득

DAVR에서 이산치 모델로 변형된 PID 제어기는 다음과 같이 표현된다.

$$u(k) = K_p \cdot e(k) + K_i \cdot \sum_{n=0}^k e(n) \cdot T_s + K_d(e(k) - e(k-1)) \quad (4)$$

단 T_s 는 : 디지털 제어기의 샘플링 주기이며, $e(k) = V_{REF(k)} - V_T(k)$ 는 이산치 전압 오차를 의미한다.

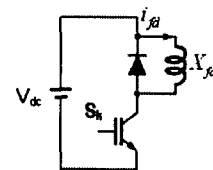
식 (4)와 같이 표현되는 PID 제어기는 그 구성이 간단하고, 계산이 용이하여 DAVR 시스템에 쉽게 적용되지만, 근본적으로 각각의 제어 이득의 조정이 매우 어렵다는 단점이 있다.

3. 순시전압 제어기법에 의한 동기 발전기의 여자제어 시스템

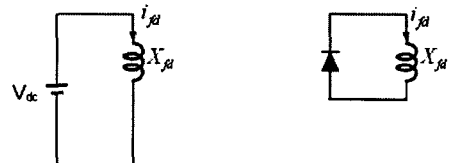
본 논문에서는 부하 변동에 강인하고, 제어기의 구성이 매우 간단하여 현장에서 쉽게 적용이 가능한 순시전압제어기법을 적용한 여자제어 시스템을 제안한다. 이를 위하여 본 논문에서는 연속적인 스위칭이 가능한 IGBT로 구성된 초퍼형 인버터를 적용하였다. 그림 3은 본 논문에서 적용한 초퍼형 인버터의 스위칭 상태에 따른 동작 모드를 나타내고 있으며, 각 스위칭 상태는 IGBT가 턴-온 되어 계자 전압이 인가되는 1과 턴-오프되어 프리휠링이 되는 0의 상태로 구성되며, 각 상태에 따른 인가 전압의 크기는 다음과 같다.

$$\text{상태 1 : } V_{FD} = V_{dc} \quad (5)$$

$$\text{상태 0 : } V_{FD} = 0 \quad (6)$$



(a) Chopper inverter



(b) Operating mode 1 (c) Operating mode 0

그림 3. 초퍼형 인버터와 스위칭 상태에 따른 동작 모드
Fig. 3. Chopper inverter and operating modes

그림 4는 직접 계자 제어 방식과 여자기 계자 제어 방식에 따른 제안된 DIVC 제어기 블록도를 나타내

고 있다. 그림 4에서 제어기의 제어규칙은 지령 전압 V_{REF} 에 대한 실제 발전기의 출력단 전압이 피이드백 되어진 V_{GS} 와의 오차에 따라 IGBT 인버터의 스위칭을 직접 결정하게 된다. 단위 샘플링 구간에서 초퍼형 인버터의 스위칭 신호 S_k 는 지상인 경우 발전기 전압의 오차에 따라 다음과 같이 결정된다. 지상인 경우에는 스위칭 신호는 반대로 동작하게 된다.

$$e(k) = V_{REF} - V_{GS} \quad (7)$$

$$V_{GS} = \left(\frac{1}{1+sT_F} \right) \cdot V_T \quad (8)$$

$$S_k = \begin{cases} 1 & : e(k) > e_{BW} \\ 0 & : e(k) < -e_{BW} \end{cases} \quad (9)$$

- 단 V_T : 발전기 단자 출력전압
- T_F : 발전기 출력전압의 1차 지연 시정수
- e_{BW} : 출력단 전압의 설정 오차 대역

일반적인 초퍼형 인버터의 경우 적용 가능한 스위칭의 상태는 그림 3에서 보여지는 바와 같이 1, 0의 두 가지 상태가 가능하므로, 식 (7)~(9)의 출력전압 오차의 대역에 따라 스위칭을 결정하게 된다.

그림 4의 제어 블록에서 T_F 는 발전기 단자의 출력전압을 궤환 받기 위한 1차 지연 시정수로, 이는 스위칭에 의한 출력전압의 노이즈를 억제하여 부드러운 출력전압이 생성되도록 시정수를 조절한다. 또한 I_{OEL} 및 I_{UEL} 은 발전기의 과여자 및 부족여자 제한을 위한 계자 전류의 제한치를 나타내며, 이는 DIVC의 출력 상태에 따라 발전기가 부족여자 상태나 과여자 상태가 발생하지 않도록 스위칭 상태를 연속적으로 턴-오프 또는 턴-온 하도록 제어하게 된다.

제안된 순시전압 제어기법은 제어기의 이득을 결정하기 위한 복잡한 설계가 요구되지 않으며, 제어기의 시정수 설정만으로, 전력 변환 장치의 최대 응답성을 유도할 수 있으며 과도 응답 상태에서 오버슈트의 발생을 크게 억제할 수 있는 장점이 있다.

4. 시뮬레이션 및 실험결과

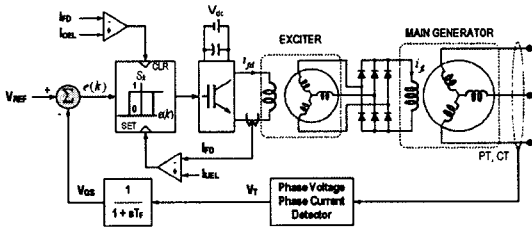
4.1 시뮬레이션

본 논문에서 제안된 DIVC 여자 제어 시스템의 성능을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 시뮬레이션은 Matlab의 Simulink를 적용하여 수행하였고, 실험은 시험용 발전기 장치에 대하여 수행하였다. 부하는 28.5[Ω]의 3상 저항부하를 적용하였다. 표 1은 시뮬레이션 및 실험에 적용된 시험용 발전기의 파라미터를 나타내고 있다. 그림 5는 제안된 DIVC 기법을 적용한 3상 동기 발전기 여자 제어 시스템의 시뮬레이션 모델을 나타내고 있다.

표 1. 시험용 발전기 파라미터
Table 1. Parameters of prototype synchronous generator

파라미터	값	파라미터	값
정격 출력	2.0[kW]	정격 전압	3[Φ], 220[V]
정격 주파수	60[Hz]	정격 회전 속도	[rpm]
계자 저항	280[Ω]	계자 인덕턴스	1.2[H]
전기자 저항	5.6[Ω]	전기자 인덕턴스	8.5[mH]

(a) Direct field control method



b) Exciter field control method

그림 4. 제안된 DIVC 제어기를 적용한 여자제어 시스템 구성도
Fig. 4. Block diagram of the proposed excitation control system with DIVC

직접 순시전압 제어기법에 의한 동기발전기의 고성능 여자 제어시스템

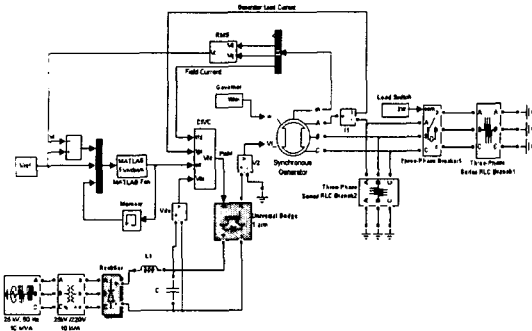
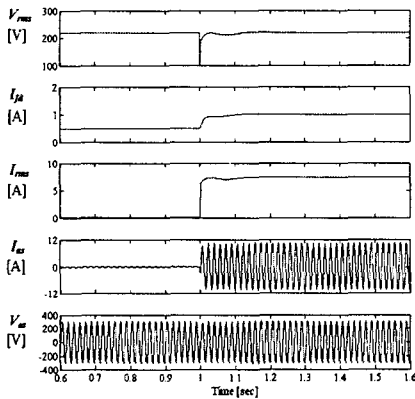


그림 5. 제안된 DIVC 제어기를 적용한 시뮬레이션 모델
Fig. 5. Simulation model of the proposed DIVC

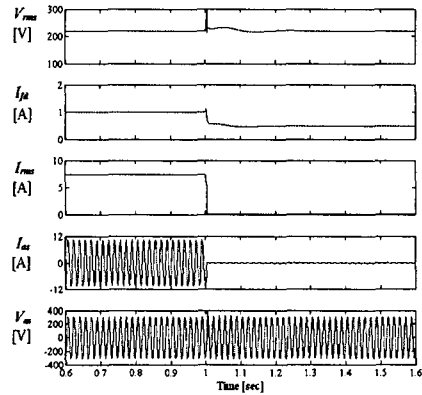
그림 6과 그림 7은 부하가 변동 할 경우의 응답 및 발전 전압의 변동을 나타내고 있다. 시뮬레이션에서 제안된 제어 방식의 경우에 PID 제어기보다 과도 상태 응답이 크게 개선되며, 안정 상태에 도달하기 위한 오버 슈트 및 진동이 발생하지 않고 순시적으로 발전기의 전압이 제어되는 것을 알 수 있다.

4.2 실험 결과

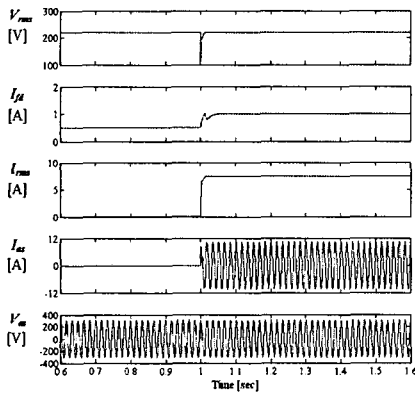
제안된 과도 응답 보상을 가지는 여자제어 시스템의 성능을 검증하기 위하여 소형 2[kW]급 발전기에 대하여 실험을 수행하였다. 발전기는 동기 전동기로



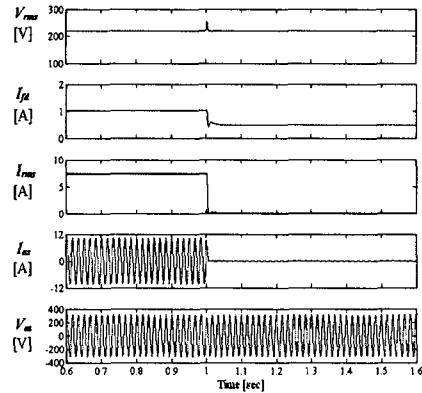
(a) Simulation result in PID controller



(a) Simulation result in PID controller



(b) Simulation result in the proposed method



(b) Simulation result in the proposed method

그림 6. 부하 변동에 따른 발전기 시뮬레이션 결과 (무부하 → 정격부하)

Fig. 6. Simulation results of sudden load change (no load → rated load)

그림 7. 부하 변동에 따른 발전기 시뮬레이션 결과 (정격부하 → 무부하)

Fig. 7. Simulation results of sudden load change (rated load → no load)

구동되는 3상 원통형 동기 발전기이며, 전압을 제어하는 여자 제어 시스템은 TI사의 TMS320F2812-150 [MHz]의 DSP로 구성되었다. 발전 전압과 부하 전류는 Analog Device사의 AD637을 통하여 DSP의 12비트 AD로 입력된 후, moving average 기법을 통하여 실효치를 계산하였으며, 계자 전압과 전류는 전압 센서와 전류 센서를 통하여 DSP의 AD로 입력되도록 설계되었다. 여자 제어를 위한 전력 변환 장치는 초퍼형 컨버터로 구성하였으며, 600[V], 30[A]급의 IGBT와 다이오드로 설계하였다.

입력은 매 30[μs] 주기로 아날로그 데이터가 입력되며, DIVC의 스위칭 주기는 10[kHz]로 설정되었다.

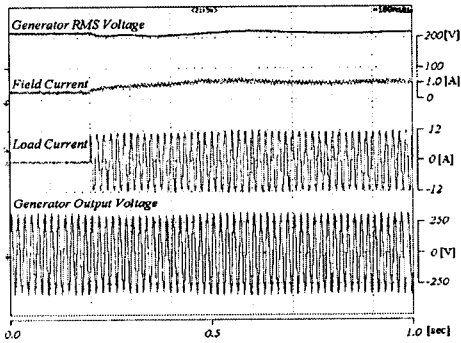
그림 8과 그림 9는 부하가 무부하에서 정격으로 변동할 경우와, 정격에서 무부하로 변동할 경우의 제어기의 응답 및 발전 전압의 변동에 대한 실험 결과

를 나타내고 있다. 각각 발전기의 실효치 전압과 발전기 계자 전류, 부하 전류 및 발전기의 발전전압을 나타내고 있다.

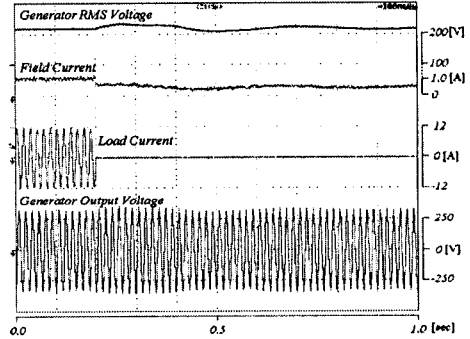
기존의 PID 제어기를 적용한 경우에는 부하의 변동시에 0.53[sec] 및 0.66[sec]의 과도 상태와 진동이 발생하며, 제안된 방식의 경우에는 거의 순시적으로 전압이 제어됨을 보이고 있다. 특히 부하 변동에 대한 응답성이 매우 크게 개선되었으며, 과도 상태의 변동이 거의 발생하지 않음을 보인다.

5. 결 론

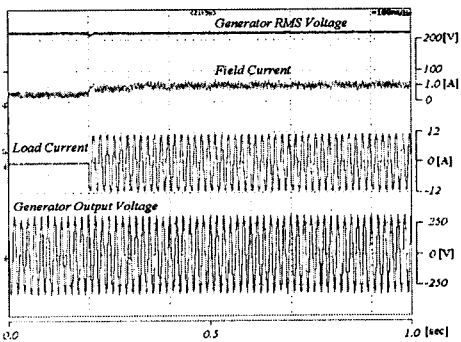
본 논문에서는 부하 변동에 강인하고, 제어기의 구성이 매우 간단하여 현장에서 쉽게 적용이 가능한 순시전압제어기법을 적용한 여자제어 시스템을 제



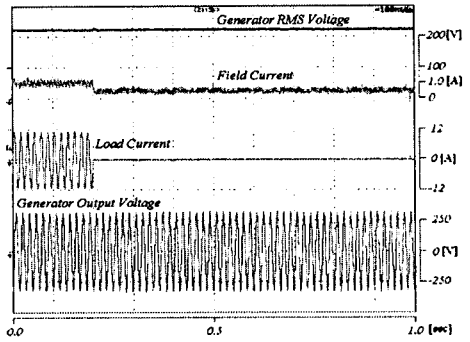
(a) Experimental result in PID controller



(a) Experimental result in PID controller



(b) Experimental result in the proposed method



(b) Experimental result in the proposed method

그림 8. 부하 변동에 따른 발전기 시뮬레이션 결과 (무부하 → 정격부하)

Fig. 8. Experimental results of sudden load change (no load → rated load)

그림 9. 부하 변동에 따른 발전기 시뮬레이션 결과 (정격부하 → 무부하)

Fig. 9. Experimental results of sudden load change (rated load → no load)

안하고, 이를 기존의 PID 제어기로 구성된 동기발전기 여자 제어 시스템과 비교하였다. 제안된 순시전압 제어 기법은 고성능 전동기 및 전력변환 장치에서 순시토크를 제어하기 위해, 직접 전력변환 장치의 스위칭 패턴을 제어하는 방식으로, 발전기 전압 제어 시스템에서는 전동기와 달리, 전류 또는 전압에 따른 토크 모델이 요구되지 않고, 직접 발전기의 단자 출력 전압을 피드백 받을 수 있으므로, 그 적용이 매우 용이하다.

특히 순시전압 제어기법은 제어기의 이득을 결정하기 위한 복잡한 설계가 요구되지 않으며, 제어기의 시정수 설정만으로, 전력 변환 장치의 최대 응답성을 유도 할 수 있으며 과도 응답 상태에서 오버슈트의 발생을 크게 억제할 수 있는 장점이 있다. 순시전압 제어기법을 적용하기 위해서는 기존의 TCR 전력 변환 장치로는 구현이 불가능하므로, 본 논문에서는 고속 스위칭이 가능한 IGBT형 인버터를 적용하였다.

제안된 순시전압 제어기법에 의한 동기 발전기 여자 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션과 소형 발전기 시스템에 적용된 실험에서 기존의 PID 제어기에 비하여 응답속도가 크게 개선되고, 과도 상태에서 오버슈트 없는 전압제어가 가능함을 확인하였다.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구 결과로 수행되었음.

References

- [1] P. M. Anderson, A. A. Fouad, "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, 1977.
- [2] K. J. Runtz, "Digital Control Scheme for a Generating Unit", Joint IEEE/ASME Power Generation Conference Proceedings, pp. 478-483, 1972.
- [3] "IEEE Guide for Specification for Excitation Systems", IEEE Std. 421. 4. 1990.
- [4] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers, and M. S. Zywno, "Application of Power System Stabilizer for Enhancement of Overall System Stability", IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 4, No. 2. pp. 614-626, May, 1989.
- [5] Shigeyuki FUNABIKI and Atsumi HITSUMOTO, "Automatic Voltage Regulation of Synchronous Generator with Pole Assignment Self-Tuning Regulator", IECON91, pp.1807-1811, 1991.

- [6] A. Godhwani and M. J. Basler, "Design, test and simulation results of a var/power factor controller implemented in a modern digital excitation system", IEEE Power Engineering Society Summer Meeting 1998, SanDiego, CA.
- [7] Kuo-Kai Shyu, Ming-Ji Yang, Jing-Heng Hong and Bau-Hung Lin, "Automatic Voltage Regulator Using a Novel Phase-Shifted PWM Single-Phase Inverter", The 30th Annual Conference of the IEEE Industrial Electronics Society, November 2-6, pp. 1851-1855, 2004.
- [8] S. J. Jang, D. K. Ryu, M. S. S대, J. H. Kim, C. Y. won, J. K. Lee, "A study on excitation system for synchronous generator using current mode controlled PWM converter," Journal of the KIIEE, vol. 17, no. 3, pp.32-39 , 2003.
- [8] Husain and M. Eshani, "Torque ripple minimization in switched reluctance motor drives by PWM current control," in Proc. IEEE PESC'94, vol. 1, 1994, pp. 72 - 77.
- [9] Inderka, R.B., De Doncker, R.W., "DTC-direct instantaneous torque control of switched reluctance drives", 37th IAS Annual Meeting, Conference Record of the Volume 3, pp. 1605 - 1609, 2002.

◆ 저자소개 ◆

이동희 (李東熙)

1970년 11월 11일생. 1996년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2002~2005년 OTIS-LG 서보 R&D 선임연구원. 2005년~현재 경성대 전기·전자·메카트로닉스 공학부 전임강사.

Liang Jianing (梁嘉寧)

1980년 7월 26일생. 2003년 중국 심양공업대 전기공학과 졸업. 2007년 3월 경성대학교 대학원 전기전자공학과 졸업(석사). 2007년 3월~현재 경성대학교 대학원 산업시스템공학과 전기전자공학전공 박사과정.

이상훈 (李相勳)

1974년 8월 11일생. 2000년 경성대 전기공학과 졸업. 2002년 경성대학교 전기전자공학과 졸업(석사). 2002년~2004년 9월 KT전기 기술연구소 주임연구원. 2006년 부산대학교 메카트로닉스협동과정 졸업(박사). 2006년 3월~현재 전남대학교 공학기술연구소 연구원, 경성대 공학기술연구소 연구원.

안진우 (安珍雨)

1958년 5월 26일생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스컨신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수.

Tel : 051-620-4773, Fax : 051-624-5980
E-mail : jwahn@ks.ac.kr