

## 과도 응답 보상기를 가지는 동기발전기의 고성능 여자 제어시스템

(A Performance Improvement of Exciter Control System of Synchronous Generator using Transient Response Compensator)

이동희\* · Huijun Wang · 김태형 · 안진우

(Dong-Hee Lee · Huijun Wang · Tae-Hyoung Kim · Jin-Woo Ahn)

### 요 약

여자제어 시스템의 AVR(Automatic Voltage Regulator) 장치는 발전기의 출력 전압을 일정하게 유지시키기 위하여, 여자기의 전압 또는 전류를 발전기 부하 전류 및 전압 변동에 따라 제어하는 역할을 수행한다. 이러한 AVR 장치의 응답성과 제어 특성은 발전기의 부하 변동 또는 과도 응답 상태에서의 출력 특성을 결정하게 된다.

본 논문에서는 고성능 전동기 제어 시스템에 널리 사용되고 있는 PWM 제어 시스템과 부하 변동에 강인하게 동작할 수 있는 과도 응답 보상기를 적용한 고성능 여자 시스템을 제안한다. 과도 응답 보상기는 발전기의 부하 전류 변동에 따라, 여자기의 제어신호를 PID 제어기의 출력에 더하여 빠른 속응성과 안정성을 가지도록 함으로써, 발전기의 출력 전압을 안정적으로 공급할 수 있도록 제어한다.

제안된 고성능 여자 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션과 소형 발전기 시스템에 적용된 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

### Abstract

AVR(Automatic Voltage Regulator) of exciter control system in AC generator controls voltage and current according to load and terminal voltage variations in order to remain at the bus voltage. The output characteristics of main generator is dependent on the control performance of AVR.

This paper presents the PWM type exciter system with transient response compensator for robust control of load variations. Additional transient response compensator generates compensation signal for load variation. So the proposed excitation control system has fast dynamic response in transient period and can control terminal voltage constantly.

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

Key Words : Synchronous generator, Exciter system, Transient response compensator

\* 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, 2차심사 : 2007년 2월 21일, 심사완료 : 2007년 3월 12일

## 1. 서 론

최근 전기에너지의 다양한 수요에 따라 발전기 여자 시스템(Generator excitation system)의 요구 성능은 전력 시스템의 보급 확대 및 성능 향상과 더불어 그 중요성이 더욱 더 증가하게 되었다. 또한 제어 시스템의 구성도 기존의 아날로그 방식에서 다양한 제어 기법의 적용이 가능한 디지털 방식으로 전환되고 있다[1-6].

발전기의 여자제어 시스템은 자동전압조정장치(AVR : Automatic Voltage Regulator), 여자기(Exciter), 발전기 및 전력계통으로 구성된다[6].

여자제어 시스템의 AVR 장치는 발전기의 출력 전압을 일정하게 유지시키기 위하여, 여자기의 전압 또는 전류를 발전기 부하 전류 및 전압 변동에 따라 제어하는 역할을 수행한다. 기존의 AVR 장치는 진지상 보상기를 가지는 아날로그 방식이 대부분 적용되었으나, 제어 특성의 조절이 어렵고 복잡한 제어 알고리즘의 구현이 불가능하며, 특히 최근에 전력계통에서 요구되는 고성능 전력계통 시스템의 요구 성능을 만족하기 어렵기 때문에 최근에는 디지털 AVR 방식(DAVR : Digital Automatic Voltage Regulator)으로 전환되고 있다.

DAVR 시스템에서 일반적으로 이용되는 PID 제어기는 실제 산업 현장에서 엔지니어들이 쉽게 접근이 가능하고, 제어 이득의 전환이 용이하지만, 발전기의 부하가 급변하는 상황에서 과도응답 특성이 나쁘고, 특히 전력변환장치에서 발생하는 고조파 전류는 전원계통의 전압왜곡을 일으키며, 정밀한 출력 전압 제어가 어렵다는 단점이 있다[7].

따라서 본 논문에서는 고성능 전동기 제어 시스템에 널리 사용되고 있는 PWM 제어 시스템과 부하 변동에 강인하게 동작할 수 있는 과도 응답 보상기를 적용한 고성능 여자 시스템을 제안한다. 제안된 여자 시스템은 기존의 TCR 전력 변환 장치의 응답성과 고조파 왜형 및 오동작의 문제를 해결하기 위하여 IGBT형 인버터로 구성된 PWM 제어 장치를 적용하고, 발전기의 부하 변동에 따른 응답성을 개선하기 위하여 부하 전류의 피이드백에 따른 과도 응답 보상기를 가지는 구조이다. 과도 응답 보상기

는 발전기의 부하 전류 변동에 따라 여자기의 제어 신호를 PID 제어기의 출력에 더하여 빠른 속응성과 안정성을 가지도록 함으로써, 발전기의 출력 전압을 안정적으로 공급할 수 있도록 제어한다.

제안된 고성능 여자 시스템은 컴퓨터 시뮬레이션과 소형 발전기 시스템에 적용된 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

## 2. 동기발전기 제어 시스템과 제어기의 구성

그림 1은 기본적인 발전기 제어 시스템의 블록도를 나타내고 있다.

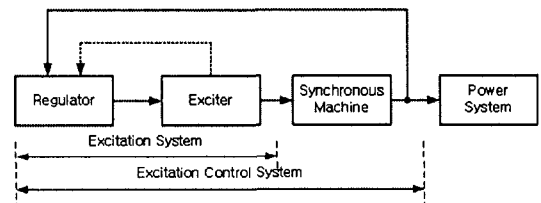


그림 1. 발전기 제어시스템의 블록도  
Fig. 1. Block diagram of generator control system

여자는 동기 발전기의 계자권선에 발전기의 출력 전압을 유지하기 위한 전압 또는 전류를 공급하는 장치이고, Regulator는 발전기의 출력 전압 및 전류로부터 단자전압을 일정하게 제어하기 위해 여자기의 계자를 제어하는 장치이며, 다양한 제어기능과 보호기능을 포함한다.

기존의 발전기 여자 시스템의 전원은 직류 발전기가 사용되었으나, 직류 발전기의 정류자 및 브러쉬 사용으로 인한 보수 및 교체 문제로 인하여 정지형 여자 시스템과 브러쉬리스 여자시스템의 적용으로 발전하였다.

그림 2는 일반적인 TCR 방식의 DAVR 여자 제어 시스템의 블록도를 나타내고 있다.

그림 2의 여자 제어 시스템 블록도에서 DAVR은 발전기의 단자 전압과 전류로부터 여자기의 사이리스터 점호각을 제어하여 여자기 발전 전압을 조절하고, 이 전압에 따라 주 발전기의 계자가 제어 된다.

과도 응답 보상을 가지는 동기발전기의 고성능 여자 제어시스템

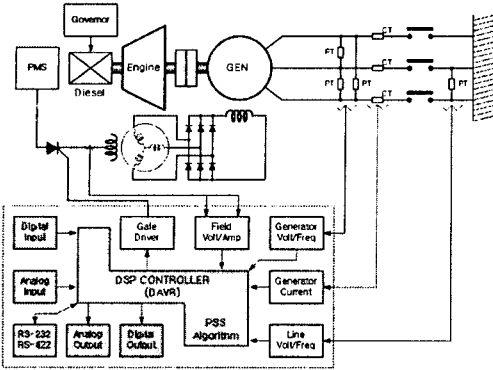
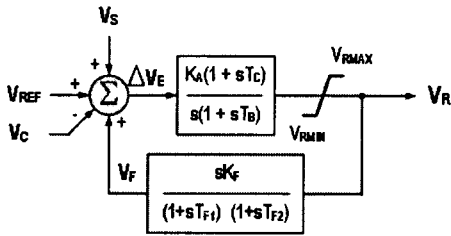
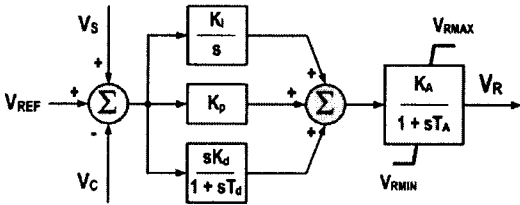


그림 2. 일반적인 TCR 방식의 DAVR 여자 제어 시스템 블록도  
 Fig. 2. Typical TCR digital excitation control system



(a) 진지상 보상을 가지는 아날로그 AVR 블록도



(b) PID 제어를 가지는 디지털 AVR 블록도

그림 3. AVR 제어기의 블록도  
 Fig. 3. Block diagram of AVR controller

그림 3은 여자 제어 시스템의 핵심이 되는 자동전압조정 장치의 블록도를 나타내고 있다. 그림 3 (a)는 기존의 아날로그 AVR 제어기를 그림 3 (b)는 DAVR 제어기의 제어 구조를 나타내고 있다. 그림 3 (a)의 아날로그 AVR 제어 구조는 안정성을 높이기 위하여 제어 전압을 진지상 보상기로 피드백하여 사용하고 있으며, 피드백 이득  $K_F$ 는 외부에서 조절하여 안정적인 동작이 수행되도록 조절한다. 여자

기의 증폭이득  $K_A$ 는 여자의 시정수  $T_B$ 와  $T_C$ 에 의해 지연되어 전달된다. 이때 여자의 출력전압  $V_R$ 은 다음과 같이 결정된다.

$$\Delta V_E = V_{REF} - V_C + V_F + V_S \quad (1)$$

$$V_F = \left( \frac{sK_F}{(1+sT_{F1}) \cdot (1+sT_{F2})} \right) \cdot V_R \quad (2)$$

$$V_R = K_A \cdot \left( \frac{1+sT_C}{s(1+sT_B)} \right) \cdot \Delta V_E \quad (3)$$

단,  $V_S$  : 전력 안정화 제어신호  
 $T_{F1}, T_{F2}$  : 진 지상 보상기의 시정수

DAVR 시스템은 마이크로 프로세서에서 다양한 제어 기능을 구현할 수 있고, 아날로그 방식에서 적용하기 힘든 발전기 제어 파라미터를 쉽게 변경하여, 제어성능을 높일 수 있으므로 최근에 많이 적용되고 있다. 그림 3(b)의 PID 방식으로 구현된 DAVR 제어 구조에서  $K_p, K_i$  및  $K_d$ 는 비례, 적분 및 미분 제어이득을 나타내고 있으며, 여자의 출력전압은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta V_E = V_{REF} - V_C + V_S \quad (4)$$

$$V_R = \Delta V_E \cdot \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{sT_d}{(1+sT_d)} \right) \cdot \left( \frac{K_A}{1+sT_A} \right) \quad (5)$$

단,  $T_d$  : 1차 지연함수의 시정수  
 $K_A, T_A$  : 여자의 증폭이득과 시정수

그림 3 (b)와 같은 PID 제어기는 구조가 간단하고 PID 계수가 목표치 추종과 외란 억제를 위해서 적절하게 설정되면, 부하 변동이나 외란에 의한 시스템 특성이 변하지 않는 한 매우 강한 제어기 특성을 가지기 때문에 산업현장에서 널리 사용된다. 그러나 PID 제어기는 제어계의 지연시간이나 외란, 부하변동과 같은 시스템 동특성이 변화할 때 PID 제어계수를 재조정하여야 하는 문제가 있으며, 안정성을 높이기 위하여 미분이득을 적게 설정하는 경우에는 용

답성이 늦어지며, 높게 설정하는 경우에는 안정성이 낮아지는 단점이 있다.

본 논문에서는 TCR 방식으로 제어되는 PID형 여자 시스템의 응답성을 개선시키고, 제어 성능을 개선하기 위하여 PWM 제어 방식으로 구현되는 과도 응답 보상형 PID 여자 시스템을 제안한다.

그림 4는 본 논문에서 제안하는 과도응답 보상기를 적용한 PWM형 여자 제어 시스템의 블록도를 나타내고 있다.

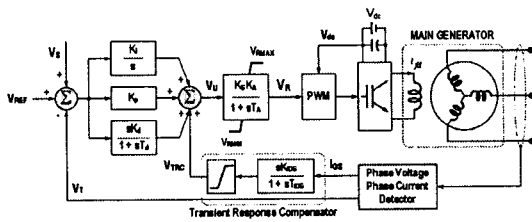


그림 4. 제안된 과도응답 보상 시스템  
Fig. 4. Proposed transient response compensator excitation system

제안된 과도응답 보상기는 부하의 변동에 따라 발전기의 부하전류가 변동하고 이에 따라 발전기 내부의 전압 강하에 의해 발전기 단자 전압이 변동하는 것을 억제하기 위해, 발전기의 부하전류를 피드백하여 부하 전류의 변동에 따른 보상신호를 인가하는 방식이다. 따라서 정상상태에서는 기존의 PID 제어 이득에 따른 안정적인 제어 신호에 의해 발전기의 단자전압이 일정하게 유지되고, 과도 응답 상태에서 발전기의 출력전압 변동을 억제하기 위한 보상기의 신호가 여자전압을 제어하여, 발전기 단자전압이 빠르게 정상상태를 유지하도록 제어하게 된다. 이때 여자의 출력 전압은 다음과 같이 계산된다.

$$\Delta V_E = V_{REF} - V_T + V_S \quad (6)$$

$$V_{TRC} = I_{GS} \cdot \left( \frac{sK_{IDG}}{1+sT_{IDG}} \right) \quad (7)$$

$$V_{II} = \Delta V_E \cdot \left( K_p + \frac{K_i}{s} + \frac{sT_d}{(1+sT_d)} \right) + V_{TRC} \quad (8)$$

$$V_R = \left( \frac{K_A}{1+sT_A} \right) \cdot V_{II} \quad (9)$$

단,  $V_T$  : 발전기 출력단 전압

$I_{GS}$  : 발전기 출력단 부하 전류

$K_{IDG}$  : 과도응답 보상기 제어이득

$T_{IDG}$  : 과도응답 보상기 지연 시정수

$V_{TRC}$  : 과도응답 보상기 출력

과도 응답 보상기의 출력은 여자의 정격에 따라 제한치 내에서 동작하도록 설계하여 신뢰성 높은 제어가 구현되도록 설계되었다. 또한 제어기의 출력은 기존의 TCR 방식에서 가지는 응답성 문제와 오동작 문제를 해결하기 위해 PWM 제어 방식으로 설계되었다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

#### 3.1 시뮬레이션 모델 및 결과

표 1. 시험용 발전기 파라미터

Table 1. Parameters of prototype synchronous generator

파라미터	값	파라미터	값
정격 출력	2.0[kW]	정격 전압	3Φ, 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]

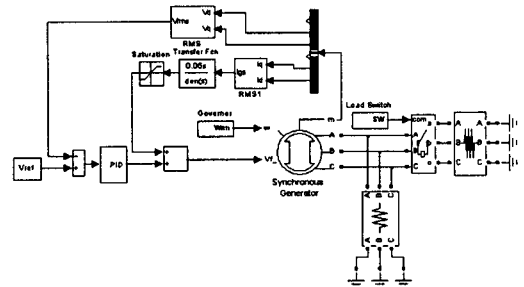
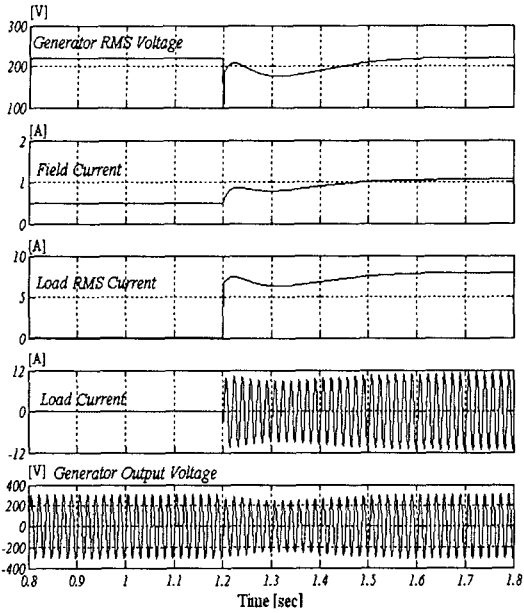
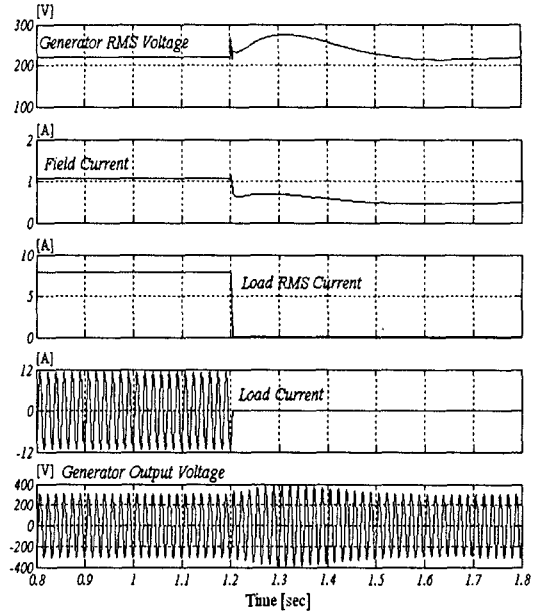


그림 5. 제안된 과도응답 보상 시스템의 시뮬레이션 모델  
Fig. 5. Simulation model of the proposed transient response compensator

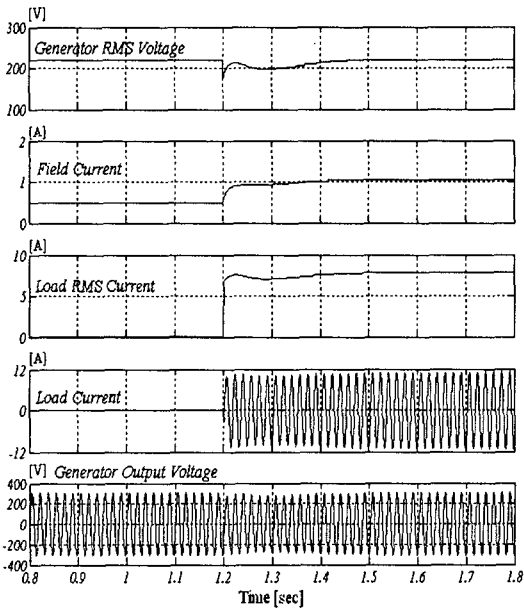
과도 응답 보상을 가지는 동기발전기의 고성능 여자 제어시스템



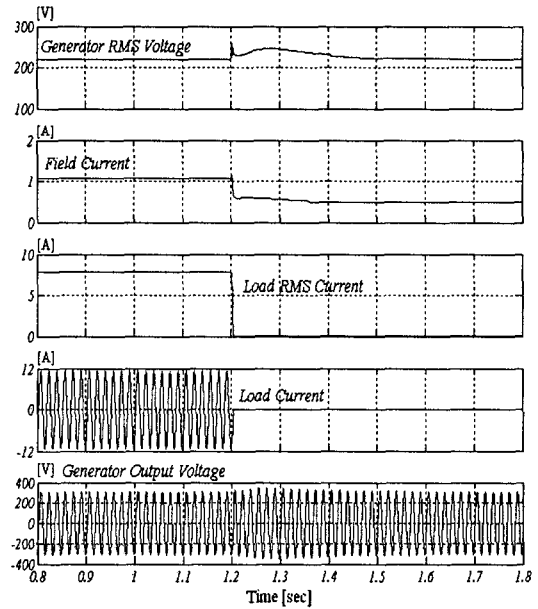
(a) PID 제어기의 경우



(a) PID 제어기의 경우



(b) 제안된 제어기의 경우



(b) 제안된 제어기의 경우

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

Fig. 6. The simulation results in case of sudden load change(no load → rated load)

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

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

본 논문에서 제안된 과도응답 보상기를 적용한 PWM형 여자 제어 시스템의 성능을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 소형 및 중용량 발전기에 대하여 Matlab의 Simulink를 적용하여 수행하였고, 실험은 소형 발전기 장치에 대하여 수행하였다.

표 1은 시뮬레이션 및 실험에 적용된 시험용 발전기의 파라미터를 나타내고 있다. 그림 5는 제안된 과도 응답 보상기를 가지는 3상 동기 발전기의 시뮬레이션 모델을 나타내고 있다.

그림 6과 그림 7은 무부하에서 정격으로 변동할 경우와, 정격에서 무부하로 변동할 경우, 제어기의 응답 및 발전 전압의 변동을 나타내고 있다.

시뮬레이션 결과에서 제안된 제어 방식의 경우에 기존의 PID 제어기 보다 과도 상태 응답이 크게 개선되며, 안정 상태에 도달하기 위한 오버 슈트 및 진동이 크게 감소 되는 것을 알 수 있다. 이는 부하 전류의 변동에 따라, 이를 보상하는 제어 신호가 과도 상태의 안정성을 빠르게 개선시키기 때문이다.

### 3.2 실험 결과

그림 8은 실험에 적용된 발전기 시험 장치와 제어기를 나타내고 있다.

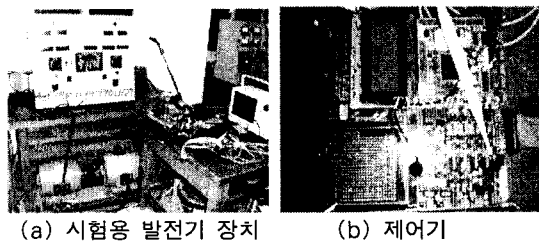
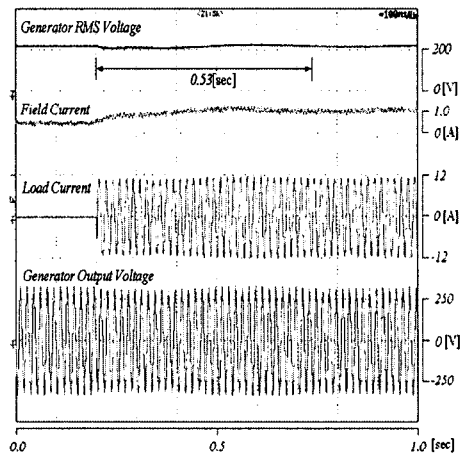


그림 8. 실험 장치의 구성과 제어기  
Fig. 8. Experimental configurations and exciter controller

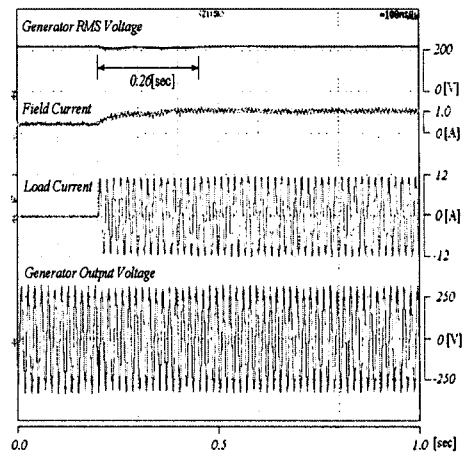
발전기는 동기 전동기로 구성되는 3상 원통형 동기 발전기이며, 전압을 제어하는 여자 제어 시스템은 TI(Texas Instrument)사의 TMS320F2812-150 [MHz]의 DSP로 구성되었다. 발전 전압과 부하 전류는 Analog Device사의 AD637을 통하여 DSP의 12비트

AD로 입력된 후, moving average 기법을 통하여 실효치를 계산하였으며, 계자 전압과 전류는 전압 센서와 전류 센서를 통하여 DSP의 AD로 입력되도록 설계 되었다. 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, PWM의 스위칭 주기는 10[kHz]로 설정되었다.



(a) PID 제어기의 경우

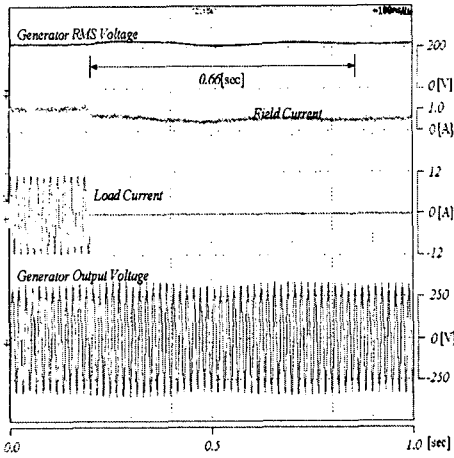


(b) 제안된 제어기의 경우

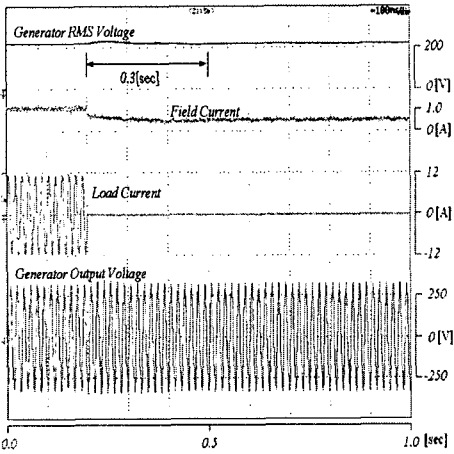
그림 9. 부하 변동에 따른 발전기 시뮬레이션 결과 (무부하 → 정격부하)

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

과도 응답 보상기를 가지는 동기발전기의 고성능 여자 제어시스템



(a) PID 제어기의 경우



b) 제안된 제어기의 경우

그림 10. 부하 변동에 따른 발전기 시뮬레이션 결과 (정격부하 → 무부하)

Fig. 10. Experimental results of sudden load change(rated load → no load)

그림 9와 그림 10은 부하가 무부하에서 정격으로 변동할 경우와 정격에서 무부하로 변동할 경우의 제어기의 응답 및 발전 전압의 변동에 대한 실험 결과를 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 발생한다. 제안된 방식의 경우에는 과도 기간이 0.26[sec] 및 0.3[sec]로 감소하며, 과도 상

태에서 진동도 거의 발생하지 않음을 볼 수 있다.

4. 결 론

본 논문에서는 TCR 방식으로 제어되는 PID형 여자 시스템의 응답성을 개선시키고, 제어 성능을 개선하기 위하여 PWM 제어 방식으로 구현되는 과도 응답 보상형 PID 여자 시스템을 제안한다. 제안된 과도응답 보상은 부하의 변동에 따라 발전기의 부하전류가 변동하고 이에 따라 발전기 내부의 전압강하에 의해 발전기 단자 전압이 변동하는 것을 억제하기 위해, 발전기의 부하전류를 피드백하여 부하 전류의 변동에 따른 보상신호를 인가하는 방식이다. 따라서 정상상태에서는 기존의 PID 제어 이득에 따른 안정적인 제어 신호에 의해 발전기의 단자전압이 일정하게 유지되고, 과도 응답 상태에서 발전기의 출력전압 변동을 억제하기 위한 보상기의 신호가 여자전압을 제어하여, 발전기 단자전압이 빠르게 정상상태를 유지하도록 제어하게 된다.

컴퓨터 시뮬레이션 및 실험결과에서 제안된 제어 방식이 기존의 PID 방식에 비하여 빠르게 안정상태를 유지하는 것을 확인하였다.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구 결과로 수행되었음.

References

- [1] Chung-Yuen Won, Jung-ho Ahn, "A Trend of Excitation System for Synchronous Generator and Digital Voltage Control", The Proceedings of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers, pp. 51-57, 2002.
- [2] "An American National Standard IEEE Standard Definitions Excitation System for Synchronous Machines", pp. 8-14, 1986.
- [3] P. Kundur, M. Klin, 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.
- [4] Min-Sung Seo, "High Performance Control of Digital Excitation System for Synchronous Generator", 2002 Power Electronics Annual Conference, pp.763-765, 2002
- [5] K. A. Riddle, "Renovation of a paper mill steam driven turbine-generator", presented at IEEE Pulp and Paper Technical Conference, Rome, GA, 1995.

- [6] A. Godhwani, M. J. Basler, and T. W. Eberly, "Commissioning and operational experience with a modern digital excitation system", IEEE Trans. Energy Conversiton, Vol. 13, pp. 183-187, June, 1998.
- [7] 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.
- [8] "IEEE Guide for Specification for Excitation Systems", IEEE Std. 421. 4. 1990.

◇ 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.

**Huijun Wang (王惠軍)**

1980년 12월 5일생. 2003년 중국 심양공업대 전기공학과 졸업. 2006년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2006년 3월~현재 경성대학교 대학원 산업시스템공학과 전기전자공학전공 박사과정.

**김태형 (金泰亨)**

1977년 12월 5일생. 2003년 경성대 전기공학과 졸업. 2005년 경성대학교 전기전자공학과 졸업(석사). 2005년 3월~현재 경성대학교 대학원 산업시스템공학과 전기전자공학전공 박사과정.

**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