

# 동기발전기 여자시스템 제어를 위한 직접순시전압제어기법

(Direct Instantaneous Voltage Control Strategy for Synchronous Generator Excitation System)

이상훈 · 김태형 · 이동희 · 안진우

(Sang-Hun Lee · Tae-Hyoung Kim · Dong-Hee Lee · Jin-Woo Ahn)

## Abstract

This paper presents a simple, robust excitation control system for synchronous generator using direct instantaneous voltage control(DIVC) method. The proposed DIVC excitation system can operate as high 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. For the continuous control of excitation system, the fast IGBT inverter system is used in this paper for exciter's field control. The proposed control scheme is verified by the computer simulations and experimental results in the prototype generation system.

## 1. 서론

최근 발전기 시스템에서는 다양한 발전기의 생산에 따라 아날로그 방식 자동전압조정기(AVR, Automatic Voltage Regulator) 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].

일반적인 DAVR 시스템에서는 출력전압을 제어하기 위해서 PID 제어와 TCR(Thyristor Control Rectifier)을 이용한 방식이 널리 이용되고 있다.[1-4]. PID 제어기는 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]. 이와 함께 이용되는 TCR의 경우에는 과도 상태의 응답성이 매우 늦고, 점호각 제어에 따른 고주파 전류에 의한 노이즈로 인하여 게이트 발생기 및 제어기의 오동작이 발생할 수 있다.[7]

본 논문에서는 부하 변동에 강인하고, 제어기의 구성이 매우 간단하여 현장에서 쉽게 적용이 가능한 순시전압제어기법을 적용한 여자제어 시스템을 제안한다. 제안하는 순시전압제어 기법은 고성능 전동기 및 전력변환 장치에서 순시토크를 제어하기 위해, 직접 전력변환 장치의 스위칭 패턴을 제어하는 방식으로[8-9], 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. 순시 전압 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 실험을 통하여 그 성능을 검증하였다.

## 2. 동기발전기 제어시스템과 제안된 기법

### 2.1. 동기발전기 제어 시스템

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

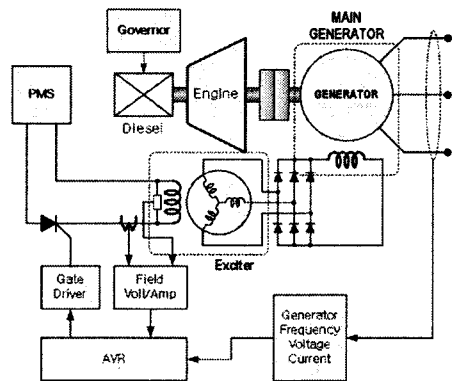


그림 1. 디젤 엔진으로 구동되는 일반적인 동기 발전기 제어 시스템

Fig. 1. Synchronous generator system driven by diesel engine

전체 시스템은 발전기를 구동하는 디젤 엔진과 조속기, AVR, 여자기 및 발전기와 전력계통으로 구성되어 있으며, 이때 여자기와 발전기의 조합은 시스템에 따라

서 다양하게 구성된다. 또한 여자기의 전원을 공급하는 방식에 따라 정지형 여자시스템과 직류여자시스템, 교류여자시스템 등으로 나누어진다.

그림 1의 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 PMS(Power Management System)로부터 공급되는 전압의 주파수에 따라 달라지며, 3상 60[Hz]의 전원이 공급되는 경우에는 180[Hz]에 한 번씩만 계자 전압의 제어가 가능하다. 따라서 미세한 출력전압의 조절이 어렵고, 정확한 점호각의 제어오차에 따라 발전기의 전압이 변동하게 되며, 급격한 부하 변동에 대하여 속응성이 떨어지는 단점을 가지고 있다.

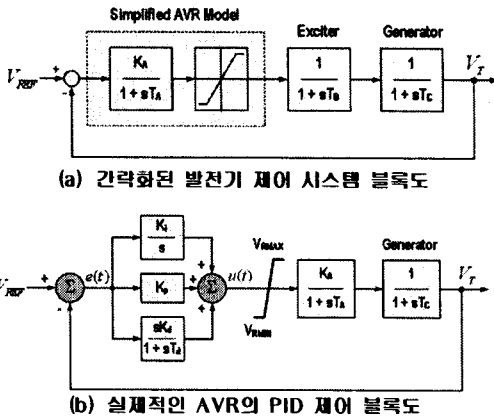


그림 2. 간략화된 발전기 제어시스템 및 PID형 AVR 제어구조  
Fig. 2. Block diagram of a simplified generation system and PID controller

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.

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

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

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.

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

단,  $T_s$ : 디지털 제어기의 샘플링 주기

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.

## 2.2. 제안된 기법

본 논문에서는 부하 변동에 강인하고, 제어기의 구성이 매우 간단하여 현장에서 쉽게 적용이 가능한 순시전압제어기법을 적용한 여자제어 시스템을 제안한다. 제안하는 순시전압제어 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 전압에 대한 스위칭 패턴을 결정할 수 있다.

인버터 회로의 스위칭 패턴은 적용되는 전력 변환 장치에 따라 다르게 구성된다. 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.

상태 1:

$$V_{FD} = V_{dc} \quad (5)$$

상태 0:

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

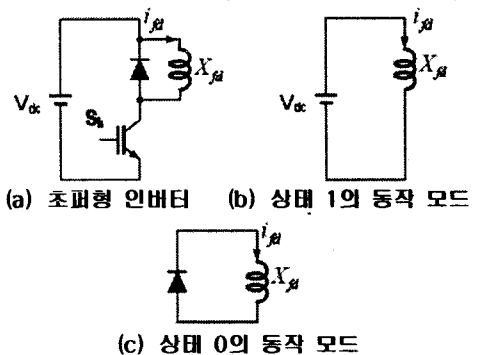


그림 3. 초퍼형 인버터와 스위칭에 따른 동작 모드  
Fig. 3. Chopper inverter and operating modes

그림 4는 직접 계자 제어 방식과 여자기 계자 제어 방식에 따른 제안된 DIVC 제어기 블록도를 나타내고 있다. 그림 4에서 제어기의 제어규칙은 지령 전압  $V_{REF}$ 에 대한 실제 발전기의 출력단 전압이 피드백 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. 진상인 경우에는 스위칭 신호는 반대로 동작하게 된다.

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

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

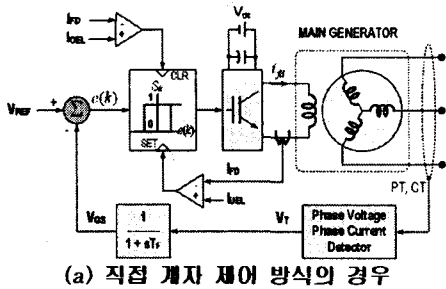
$$S_k = \begin{cases} 1 : e(k) > e_{BW} \\ 0 : e(k) < -e_{BW} \end{cases} \quad (9)$$

단,  $V_T$ : 발전기 단자 출력전압

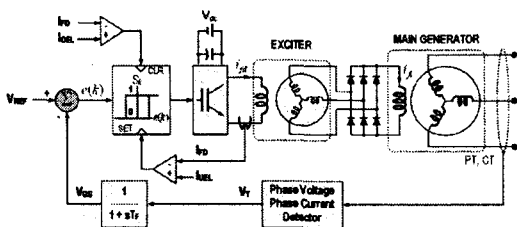
$T_F$ : 발전기 출력전압의 피드백 1차 지연 시정수

$e_{BW}$ : 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.



(a) 직접 계자 제어 방식의 경우



(b) 여자기 계자 제어 방식의 경우

그림 4. 제안된 DIVC 제어기를 적용한 여자제어 시스템 구성도

Fig. 4. Block diagram of the proposed excitation control system with DIVC

그림 4는 제안된 DIVC 제어기를 적용한 여자 시스템을 나타내고 있다. 그림 4의 제어 블록에서  $T_F$ 는 발전기 단자의 출력전압을 피드백 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.

### 3. 시뮬레이션 및 실험결과

#### 3.1. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안된 DIVC 여자 제어 시스템의 성능을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션과 실험을 수행하였다. 컴퓨터 시뮬레이션은 Matlab의 Simulink를 적용하여 수행하였고, 실험은 시험용 발전기 장치에 대하여 수행하였다.

표 1은 시뮬레이션 및 실험에 적용된 시험용 발전기의 파라미터를 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	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 5는 제안된 DIVC 기법을 적용한 3상 동기 발전기 여자 시스템의 시뮬레이션 모델을 나타내고 있다.

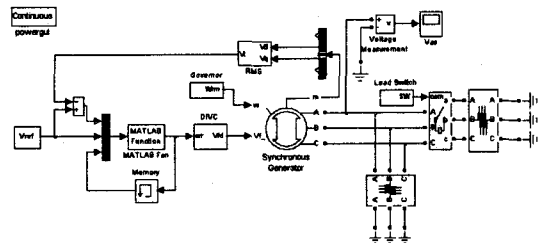
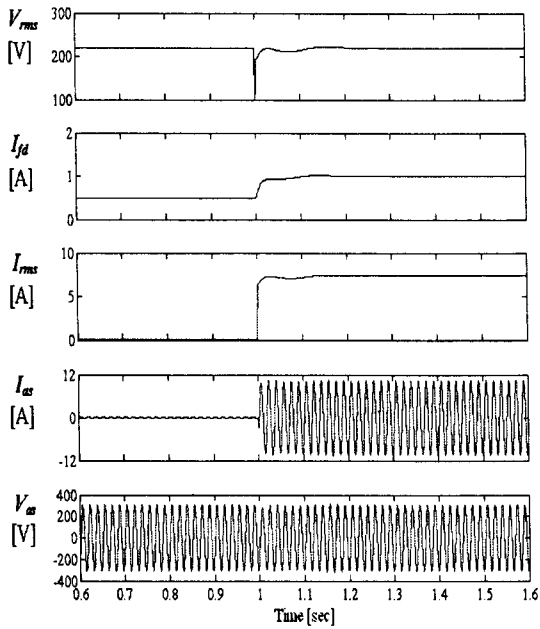


그림 5. 제안된 DIVC 제어기를 적용한 시뮬레이션 모델  
Fig. 5. Simulation model of the proposed DIVC

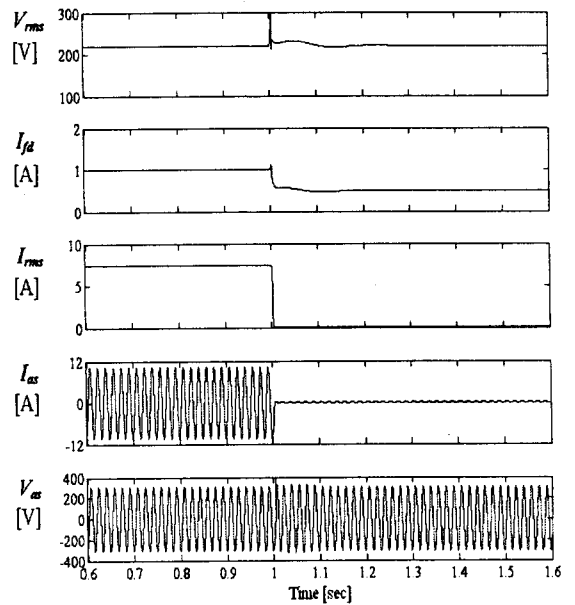
그림 6과 그림 7은 부하가 무부하에서 정격으로 변동할 경우와, 정격에서 무부하로 변동할 경우의 제어기의 응답 및 발전 전압의 변동을 나타내고 있다.

시뮬레이션 결과에서 제안된 제어 방식의 경우에 기존의 PID 제어기 보다 과도 상태 응답이 크게 개선되며, 안정 상태에 도달하기 위한 오버 슈트 및 진동이 발생하지 않고 순시적으로 발전기의 전압이 제어되는 것을 알 수 있다. 이는 DIVC의 순시 스위칭에 의해 발전기의 전압이 연속적으로 제어되기 때문이다.

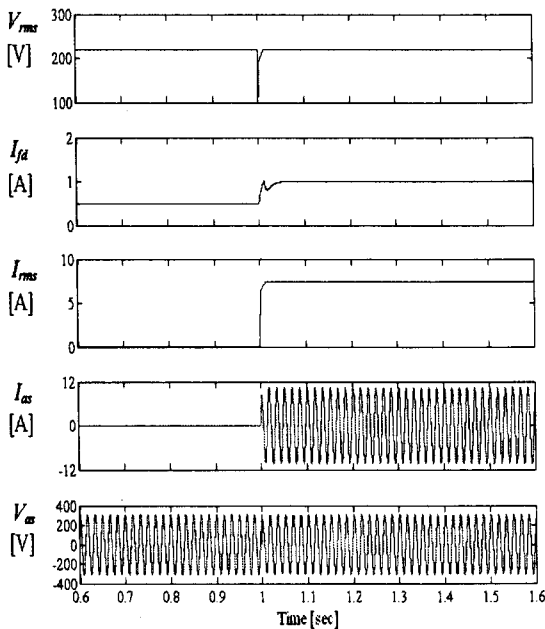
입력은 매 30[μs] 주기로 아날로그 데이터가 입력되며, DIVC의 스위칭 주기는 10[kHz]로 설정되었다.



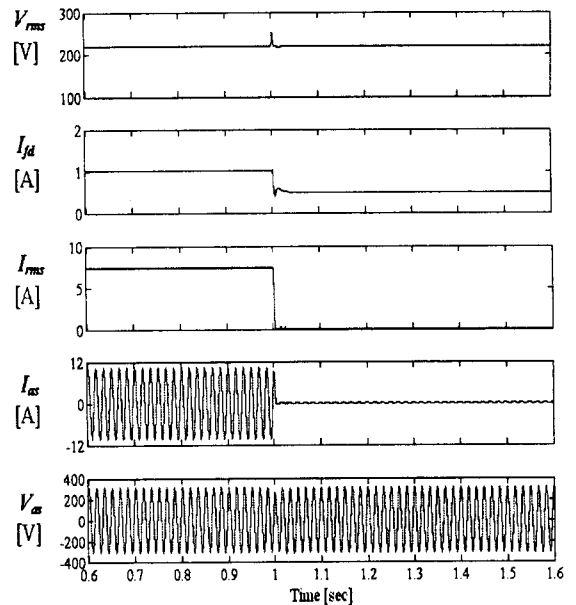
(a) PID 제어기의 경우



(a) PID 제어기의 경우



(b) 제한된 제어기의 경우



(b) 제한된 제어기의 경우

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

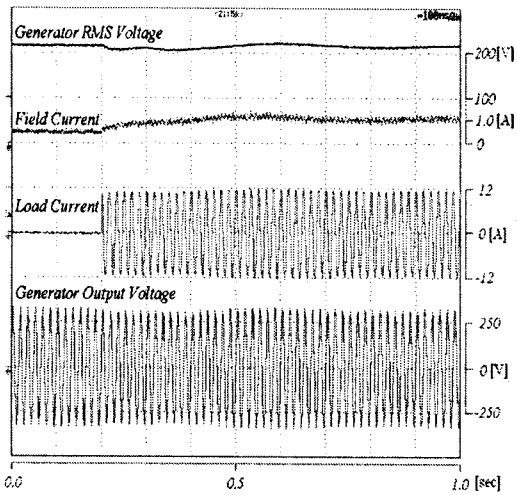
Fig. 6. Simulation results of sudden load change  
(no load → rated load)

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

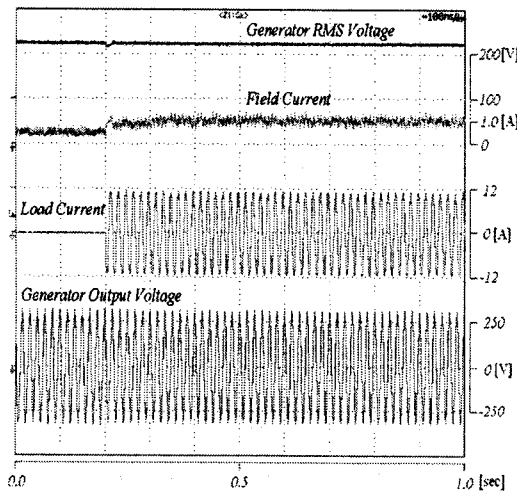
Fig. 7. Simulation results of sudden load change  
(rated load → no load)

### 3.2. 실험결과

제안된 과도 응답 보상을 가지는 여자제어 시스템의 성능을 검증하기 위하여 소형 2kW급 발전기에 대하여 실험을 수행하였다. 발전기는 동기 전동기로 구동되는 3상 원통형 동기 발전기이며, 전압을 제어하는 여자 제어 시스템은 TI사의 TMS320F2812-150MHz의 DSP로 구성하였다. 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 입력 되도록 설계 되었다. 여자 제어를 위한 전력 변환 장치는 초퍼형 컨버터로 구성하였으며, 600V, 30A급의 IGBT와 다이오드로 설계하였다.



(a) PID 제어기의 경우



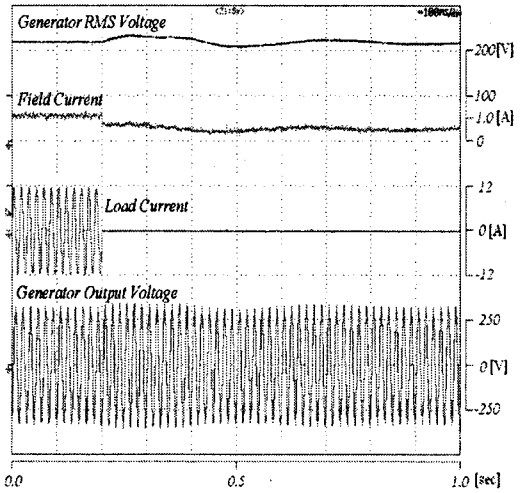
(b) 제안된 제어기의 경우

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

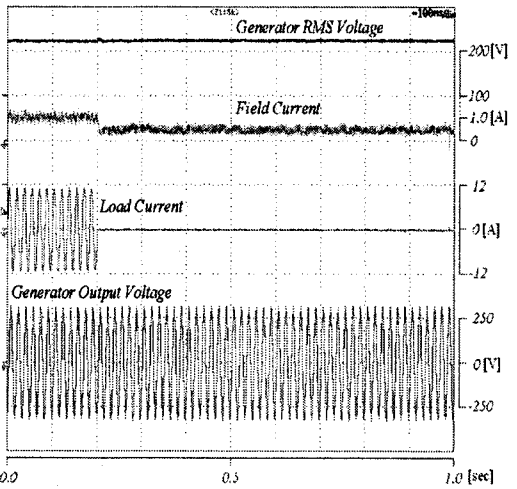
Fig. 9. Experimental results of sudden load change (no load → rated load)

그림 8과 그림 9는 부하가 무부하에서 정격으로 변동

할 경우와, 정격에서 무부하로 변동 할 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 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.



(a) PID 제어기의 경우



(b) 제안된 제어기의 경우

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

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

### 4. 결론

본 논문에서는 부하 변동에 강인하고, 제어기의 구성이 매우 간단하여 현장에서 쉽게 적용이 가능

한 순시전압제어기법을 적용한 여자제어 시스템을 제안하고, 이를 기존의 PID 제어기로 구성된 동기 발전기 여자 제어 시스템과 비교 하였다. 제안된 순시전압제어 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. 순시 전압 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.

torque control of switched reluctance drives", 37th IAS Annual Meeting, Conference Record of the Volume 3, pp. 1605 - 1609, 2002.

본 연구는 산업자원부의 지역혁신 인력양성사업의 연구 결과로 수행되었음.

### 참 고 문 헌

- [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] 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., "DITC-direct instantaneous