

## 동기발전기용 디지털 여자시스템 고성능 제어

서민성, 류동균, 김이훈, 김준호, 원충연, 배기훈\*

성균관대학교, \*(주)K<sub>2</sub>파워

## High Performance Control of Digital Excitation System for Synchronous Generator

M.S. Seo, D.K. Ryu, L.H. Kim, J.H. Kim, C.Y. Won, K.H. Bae\*

Sungkyunkwan Univ., \*K<sub>2</sub> Power Ltd.

### ABSTRACT

In this paper digitally based excitation systems for the synchronous brushless generators are presented. System configuration, control functions with their structure functions are also shown.

The control system has two feedback loops: main one based on a generator's voltage with digital controller and inner one based on excitation voltage of the exciter with analog controller.

Usually the generator regulation of voltage is made with transducers for the voltage measurement. This paper shows technique of measuring the voltage without harmonics affect, using Park's equation transformation.

### 1. 서 론

전력산업의 발달과 더불어 전력장비의 신뢰성에 대한 요구가 점점 높아지고 있다. 그러나 일반적으로 적용되고 있는 발전기 AVR(Automatic Voltage Regulator)은 TCR(Thyristor Control Rectifier)형 인데 산업현장에 적용시 다양한 문제를 야기시킬 수 있다. 첫 번째로 다양한 정류부하가 발전기 출력에 연결되고 이로 인하여 발전기 출력전압이 왜곡된다. 그 결과로서 다이리스터의 제어각을 정확하게 설정할 수 없어 정확한 발전기 출력전압을 제어할 수 없게되어 오동작이 일어난다.

둘째로는 발전기 출력전압을 빠르게 제어하기 위하여 AVR이 속응성이 있어야 한다. 그러나 일반적인 TCR방식의 AVR은 입력이 3상일 경우 최대 180[Hz]의 제어주기를 가질 수 있어 빠른 응답특성을 얻기가 어렵다. 셋째로는 현재의 AVR의 발전추세는 발전기의 원격감시, 제어를 요구하고 있는데

기존의 AVR로는 또 다른 데이터 획득 시스템을 사용해야하는 문제들을 야기 시킨다.<sup>[1]</sup> 그러므로 AVR의 고성능 제어를 위하여 전력계산을 이용한 출력전압제어, 무효전력, 부하분담 제어를 할 수 있어야하고 궤환신호로 사용되고 있는 전압 측정 시스템에 대한 정밀도가 확보되어야한다.

최근 DVR(Digital Voltage Regulator)이 한국전력에서 국산화가 되어 사용되고 있지만 대용량 발전기에만 적용되었고 아직까지는 중소형 발전기 DVR은 수입에 의존하고 가격이 매우 고가인 편이다. 따라서 군부대 또는 비상용 전원으로 단독발전시스템에서 사용 될 수 있는 저렴하고 성능이 우수한 DVR의 국산화 연구가 진행되고 있다.<sup>[1][2][3]</sup>

따라서 본 연구에서는 동기발전기 DVR 시스템에서의 여자기 전원용 컨버터 설계 및 해석을 위한 시스템의 안정도를 해석하였다.

그리고 발전기 출력전압 제어 응답특성에 관해 시뮬레이션을 통하여 알고리즘의 타당성을 입증하였다.

### 2. 전압 측정방법과 여자기 안정도해석

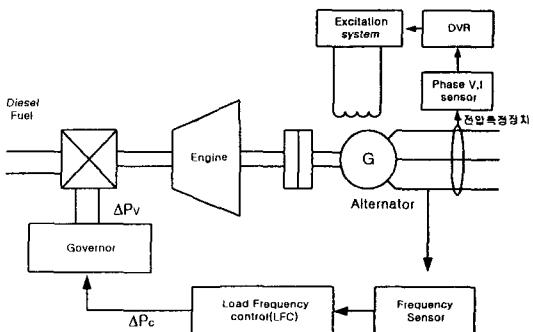


그림 1 동기발전기 전체 구성도

그림 1은 동기발전기의 구성도이며, 토크를 발생시키는 엔진부분과 주파수를 측정할 수 있는 주

DVR : Digital automatic Voltage Regulator  
P.M.G : Permanent magnetic generator

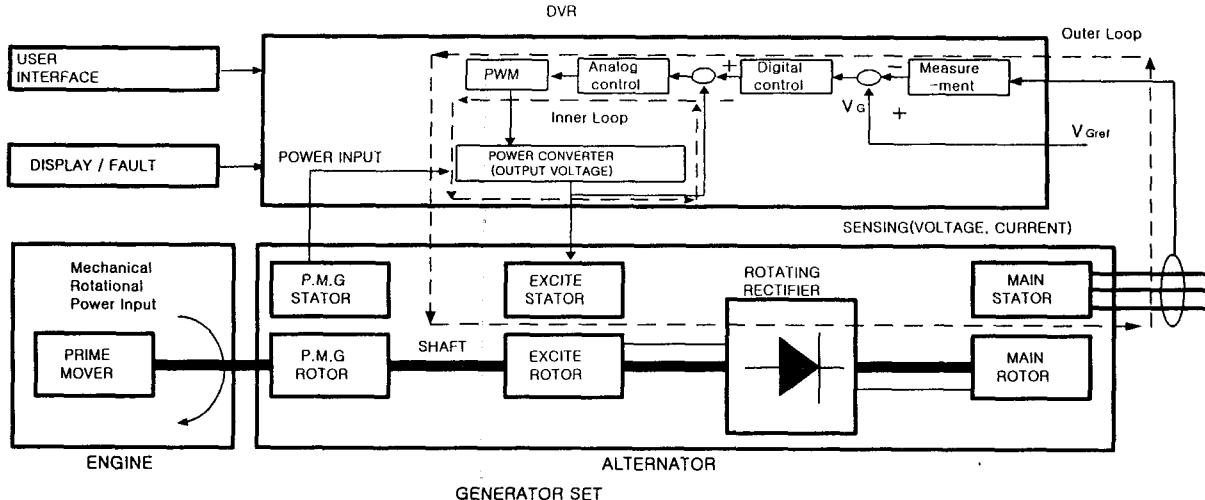


그림 2 동기발전기 내부 및 여자기 구조

파수 측정장치, 정속도를 유지하기 위한 Governor로 구성되어 있고, 전기 계통부분은 유기 기전력이 발생하는 Alternator 부분과 발생한 전압을 제어신호로 바꾸어주는 전압 측정장치, 정전압 및 무효전력 부분을 제어하기 위한 DVR로 나뉘어져 있다.

그림 2는 동기발전기 내부 및 여자기 구조이다. 브러쉬리스 동기발전기용 컨버터는 P.M.G에서 여자기의 입력전원을 받는다. DVR 전압제어를 위한 내부루프는 컨버터의 출력전압 안정성과 우수한 제어성능을 위하여 아날로그 제어하고, 외부루프는 동기발전기의 출력전압제어 및 다기능화를 위하여 디지털제어로 구성하였다.

기존 아날로그방식의 3상 정류 방식은 출력전압을 정류기와 필터를 거쳐 비교전압으로 사용한다.

그러나 전압 맥동 및 필터의 시정수로 인하여 순간적인 전압 변동에는 시간지연 때문에 응답특성이 나쁘다.

그러나 디지털 제어방식은 Park's 변환 방식을 이용하여 3상 전압을 2상 변환하고 정현파의 교류전압을 직류 레벨로 변환시킴으로써 전압이 변동할 때 필터에 의한 시간지연이 없으므로 응답특성이 개선된다.

여기서 발전기 고정자 전압, 전류의 궤환신호는 Park's 변환식에 의하여 다음과 같이 나타낸다.<sup>[4],[5]</sup>

$$\tilde{V}_G = (V_{Gd} + j V_{Gq})/\sqrt{2}$$

$$V_{Gd} = V_{Ga}, \quad V_{Gq} = (V_{Gc} - V_{Gb})/\sqrt{3}$$

$$V_G = \sqrt{V_{Gd}^2 + V_{Gq}^2} \text{ [rms]} \quad (1)$$

$$\tilde{I}_G = (I_{Gd} + j I_{Gq})/\sqrt{2}$$

$$I_{Gd} = I_{Ga}, \quad I_{Gq} = (I_{Gc} - I_{Gb})/\sqrt{3}$$

$$I_G = \sqrt{I_{Gd}^2 + I_{Gq}^2} \text{ [rms]} \quad (2)$$

$\tilde{V}_G$  : 발전기 상전압 실효치 (복소 전압)

$V_a, V_b, V_c$  : a, b, c 상전압

$V_{Gd}$  : d축 상전압,  $V_{Gq}$  : q축 상전압

$V_G$  : 발전기출력 실효전압

$\tilde{I}_G$  : 발전기 상전류 실효치 (복소 전류)

$I_a, I_b, I_c$  : a, b, c 상전류

$I_{Gd}$  : d축 상전류,  $I_{Gq}$  : q축 상전류

$I_G$  : 발전기출력 실효전류

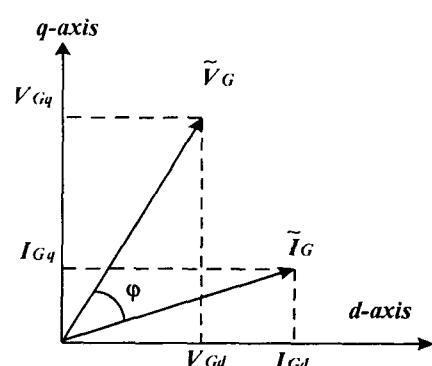


그림 3 d, q 축의 표현

또한, 동기발전기의 위상각( $\sin \varphi, \cos \varphi$ )은 직교 좌표계에서의 전압과 전류로부터 계산된다.

$$\sin \varphi = \frac{I_{Gq} V_{Gd} - I_{Gd} V_{Gq}}{V_G I_G}$$

$$\cos \varphi = \frac{I_{Gd} V_{Gd} + I_{Gq} V_{Gq}}{V_G I_G}$$

따라서 피상전력(  $S$  ), 유효전력(  $P$  ), 무효전력(  $Q$  )은 다음과 같이 나타낸다.

$$S = 3 V_G I_G \quad (3)$$

$$P = 3 V_G I_G \cos \varphi \quad (4)$$

$$Q = 3 V_G I_G \sin \varphi \quad (5)$$

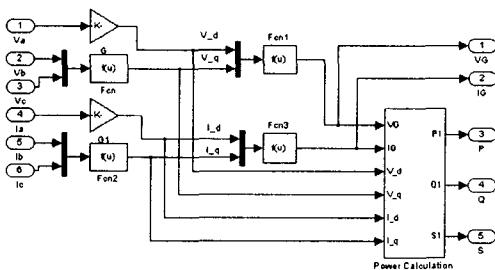


그림 4 측정 시스템 블록

그림 4는 측정 시스템 블록으로 식 (1)~(5)로부터 계산된 동기발전기 위상각과 피상, 유효, 무효전력에 대한 시뮬레이션 시스템 블록이다.

그림 5는 100[kVA], PF=0.8 부하인가시 시뮬레이션 결과 과정으로 출력 전압, 전류는 각각  $V_{out}=220[V]$ ,  $I_{out}=152.4[A]$ 로 나타난다.

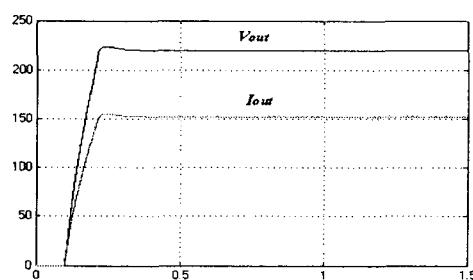


그림 5 Park's 변환에 의해 측정된 전압, 전류

그림 6는 Park's 변환에 의해 측정된 출력전력으로, 피상, 유효, 무효 성분에 대한 시뮬레이션 결과 피상전력(  $S$  ) = 100[kVA], 유효전력(  $P$  ) = 80[kW], 무효전력(  $Q$  ) = 60[kVar] 으로 각각 나타난다.

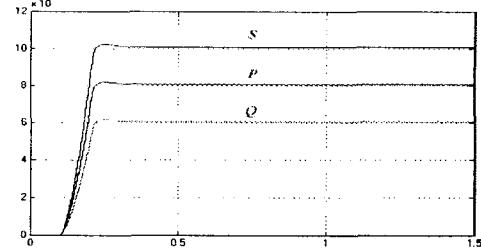


그림 6 Park's 변환에 의해 측정된 출력전력

여자기용 Buck 컨버터 설계사양은 다음과 같다.  
입력 : 단상AC 180~240[V], 250~300[Hz]  
출력 : 75[V<sub>DC</sub>], 3[A]  
단시간 최대전압 : 150[V<sub>DC</sub>] 7.5[A](1분)

표 1 Buck 컨버터 파라미터

$f_s$	100[kHz]	스위칭 주파수
$V_i$	310[V <sub>DC</sub> ]	입력전압
$L$	2.93[mH]	인덕터
$C$	960[uF]	출력 캐패시터
$r_c$	0.5[ $\Omega$ ]	캐패시터의 ESR
$R$	25[ $\Omega$ ]	여자기의 권선 저항
$L_i$	50[mH]	여자기의 권선 인덕턴스
$r_i$	0.1[ $\Omega$ ]	인덕터 권선 저항

Matlab Simulink에서는 샘플링시간에 의한 방대한 데이터량 때문에 컨버터의 고주파영역의 특성과 동기발전기의 저주파영역의 특성을 동시에 확인하기가 어렵다. 따라서 Buck 컨버터를 평균화 모델 하여 연속시간 함수로 해석함으로서 특성을 확인하였다.

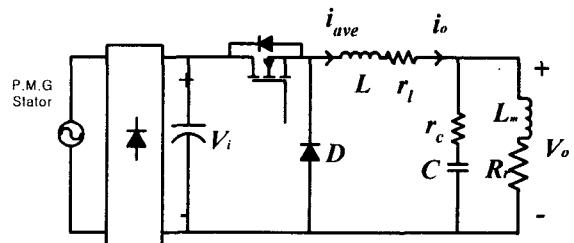


그림 7 Buck 컨버터로 구성된 여자시스템

그림 7은 Buck 컨버터의 회로도이다. 인덕터( $L$ )의 전압 방정식으로부터 Buck 컨버터의 개루프 제어전달 함수 특성은 식 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$i_{ave} = i_o, sL i_o + r_i i_o = D \hat{v}_i + V_i \hat{d} - \hat{v}_o$$

$$G_d(s) = \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} \Big|_{v_i=0},$$

$$sL \hat{i}_o + r_i \hat{i}_o = V_i \hat{d} - \hat{v}_o$$

$$\hat{i}_o = \frac{\hat{v}_o}{Z}$$

$$\text{단) } Z = (r_c + \frac{1}{sC}) \parallel (R + sL)$$

$$\therefore \frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = V_i \frac{Z}{sL + r_i + Z} \quad (6)$$

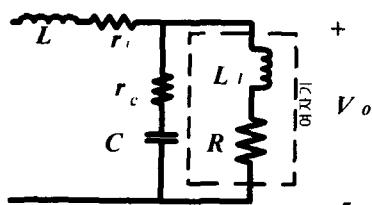


그림 8 기생성분을 포함한 부하

그림 8은 기생성분을 포함한 부하이고, Buck 컨버터 제어 전달함수는 식(7)과 같다.

$$\frac{\hat{v}_o(s)}{\hat{d}(s)} = V_i \frac{A s^2 + B s + D}{E s^3 + F s^2 + G s + H} \quad (7)$$

$$A = C r_c L, \quad B = L_i + C r_c R, \quad D = R, \quad E = L L_i C$$

$$F = r_i L_i C + L R C + L C r_c + C r_c L_i$$

$$G = r_c R C + r_i r_c C + L + L_i + C r_c R$$

$$H = R + r_i$$

위에서 구한 제어 전달함수를 Matlab Simulink를 사용 주파수 및 위상 특성을 보드선도로 도시하면 그림 9와 같다. 이때 저주파 이득이 50[dB]이고, 위상여유가 3.64°이다.

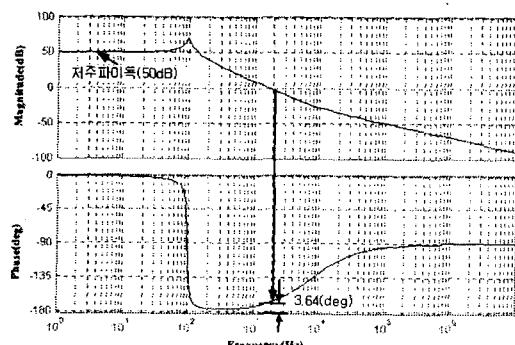


그림 9 Buck 컨버터의 제어 전달함수  $G_d(s)$  특성

실제적으로, PWM( $1/V_m$ )과 Sensor( $A_c$ )을 포함한 루프이득은 그림 10에 나타내었다.

이때 저주파 영역에서의 이득이 약 15.8[dB]이고, 위상 여유가 3°인 것을 확인하였다.

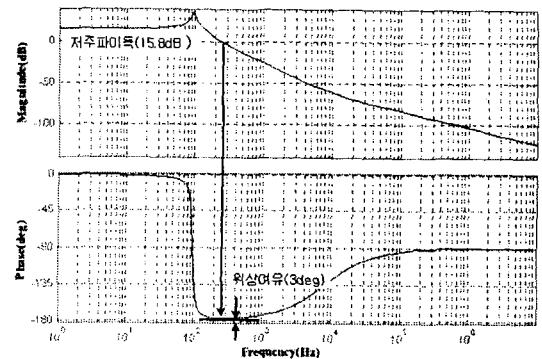


그림 10  $G_d(s) A_c / V_m$ 의 루프이득

따라서, Buck 컨버터의 출력전압 안정화를 위하여 케환회로를 부가해야 한다.(그림14)

이러한 케환 회로를 포함한 Buck 컨버터 시스템의 안정도 및 우수한 제어성능개선은 제어 회로 내의 오차 증폭기로 보상한다. 따라서 보상회로 설계방법<sup>[5][6]</sup>에 의하여 Type 4 형의 3-Pole, 2-Zero의 제어기로 구성된 오차증폭기의 전달함수는 식(8)로 표현된다. 이 오차증폭기의 주파수 및 위상특성에 대한 보드선도는 그림 11과 같다.

$$A(s) = \frac{1.42 \times 10^4 (1 + 2.02 \times 10^{-3}s)^2}{s(1 + 1.9 \times 10^{-5}s)(1 + 5.24 \times 10^{-7}s)} \quad (8)$$

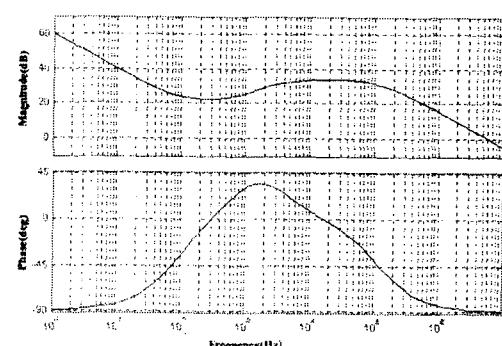


그림 11 오차 증폭기의 전달함수  $A(s)$  특성

그림 11은 오차 증폭기의 주파수 및 위상특성이다. 보드선도 해석을 통하여 얻어진 제어 전달함수  $G_d(s)$ , 오차 증폭기의 보상회로  $A(s)$ 와 비교기의 이득  $1/V_m$

을 가지고, Buck 컨버터의 루프 이득을 식 (9)와 같이 구할 수 있다.

$$T(s) = G_d(s)A(s) \frac{1}{V_m} A_c \quad (9)$$

$V_m$ : 삼각파 Peak 전압,  $A_c$ : Sensor 이득

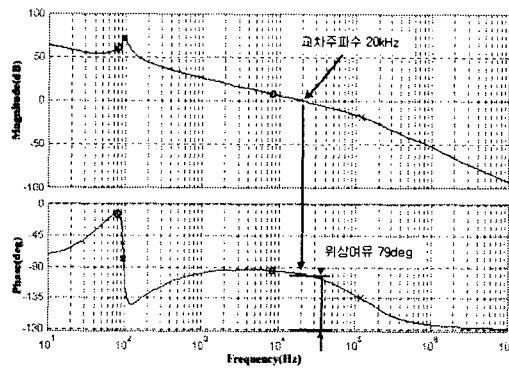


그림 12 보상된 Buck 컨버터의 루프이득  $T(s)$

그림 12로부터 교차 주파수는  $20[\text{kHz}]$ ( $f_s/5$ ), 위상여유는 약  $79^\circ$ 이다. 일반적으로 위상여유가  $45^\circ$  이상일 때 안정하므로 설계된 Buck 컨버터의 제어시스템은 매우 안정하다.

컨버터의 제어성능향상과 발전기의 다기능화를 위하여 그림 13의 Hybrid형으로 구성하였다. 컨버터는 아날로그 방식으로, 발전기 출력은 디지털방식으로 제어로 하였다.

제어주기는 Sample and Hold를 사용하여  $2[\text{ms}]$ 로 하였고, 발전기 출력전압 제어는 Park's 변환을 이용하여 전압을 측정한 후 궤환신호로 사용하였다.

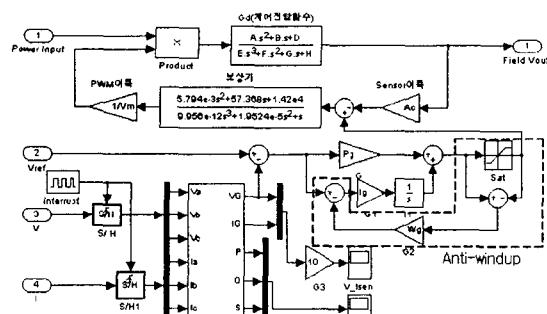


그림 13 DVR 내부 시스템 블록

Over shoot 발생시 적분기에 의한 windup현상을 방지하기 위하여 그림 13과 같이 Anti-windup 알고리즘을 추가하였다.

다 기능화를 위하여 디지털 제어기에서 유효전력, 무효전력, 피상전력을 계산함으로써 부하분담 및 사용자

인터페이스를 할 수 있도록 알고리즘을 구성하였다.

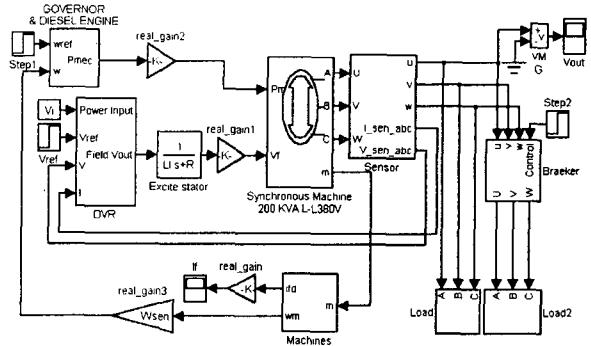


그림 14 발전기 전체 시스템 블록

그림 15은 출력전압 응답특성을 나타내고, 부하 인가후 약  $0.2[\text{sec}]$ 후에 정상상태를 유지함을 볼 수 있다.

그림 16은 발전기 출력전압을 나타내며 부하 인가시 시간지연 없이 출력전압을 추종하는 것을 볼 수 있다.

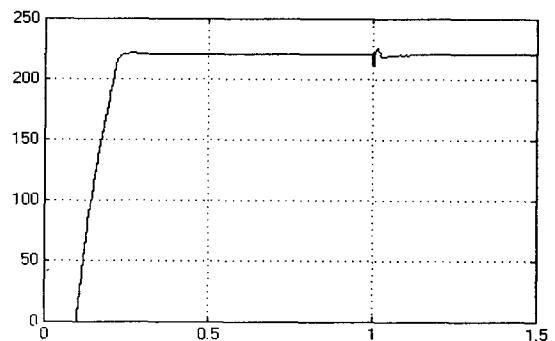


그림 15 25[%] 부하인가시 출력전압 응답특성

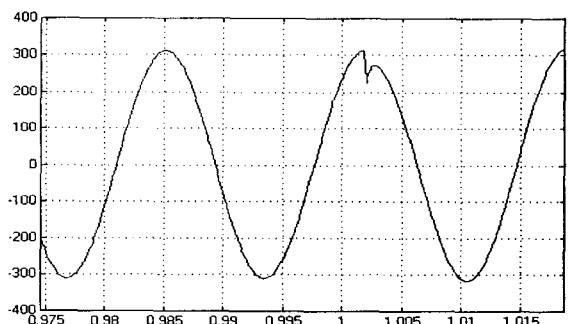


그림 16 25[%] 부하인가시 발전기 출력전압

발전기 사양 (Model 431PSL6204)

출력전압 380[V], 160[kW], 200[kVA], 0.8[P.F], 1800[rpm], 60[Hz], 3[Phase]

표 2 적용된 발전기의 파라미터

Rs	전기자 저항	0.046 Ω
Rr	회전자 저항	18.5 Ω
Xd	직축 동기 리액턴스	4.063 p.u
X'd	직축 과도 리액턴스	0.259 p.u
X''d	직축 초기 과도리액턴스	0.234 pu
X'q	종축 과도 리액턴스	1.998 pu
T'd	단락과도 시정수	0.062 sec
T''d	단락 초기 과도 시정수	0.013 sec
T'do	계자 시정수(직축과도 시정수)	1.46 sec
Ta	전기자 시정수	0.017 sec
Pole형상		salient
회전자극수		4극

### 3. 결 론

본 논문에서는 TCR 방식의 제어주기에 대한 문제점을 개선하기 위하여 DC-DC 컨버터 방식의 DVR을 사용하여 빠른 응답특성을 가지도록 설계하였다.

전력계산 및 디지털화로 다양한 기능의 개선으로 데이터 획득이 용이하고, 발전기 출력전압 제어로 부하 변동시에도 안정된 전원을 공급할 수 있음을 확인하였다.

기존의 전압 측정방식은 3상 정류방식이었으나 본 논문에서는 Park's 변환을 이용한 전압 측정법에 의하여 보다 정밀 제어 및 다양한 기능을 확보할 수 있음을 확인하였다.

향후 프로세서를 이용하여 디지털 제어와 전압 측정을 하고, 무효전력제어로 계통연계에 관한 시뮬레이션과 실험을 추가적으로 할 예정이다.

본 기술내용은 과학기술부 연구성과 지원사업의 지원에  
의하여 연구되었음 ( 2001.12.1 ~ 2002.11.30 )

### 참 고 문 헌

- [1] 정창용, Chopper형 디지털 AVR, 99년 기술이전품목, 한국 전기연구소, 1999.
- [2] Hong-Woo Rhew, Seung-Ki Sul, Min-Ho Park, "A new generator static excitation system using boost-buck chopper", IEEE IECON 22nd International Conference on , Volume: 2 , 1996 pp 1023 -1028
- [3] 林賈憲, “동기 발전기 디지털 여자 시스템 모델 및 성능 평가”, 전력전자학회 학술발표회, pp.117-162, 2002.
- [4] Gorislav Erceg, "Using digital signal processor for excitation system of brushless synchronous generator", IEEE, 1999
- [5] P. Kun역 "Power System Stability and control", McGraw-Hill, 1993.
- [6] 김희준 "스위칭 전원의 기본설계", 성안당, 2002.
- [7] Robert W. Erickson, "Fundamentals of Power Electronics", KAP 2001.
- [8] Hadi Saadat, "Power system Analysis", McGraw-Hill, 1999.
- [9] Vincent Del Tro, "Electric Power System", Prentice Hall, 1992.
- [10] IEEE Std 421.5-1992, "IEEE Recommended Practice for Excitation System Models for Power System Stability Studies", March 19, 1992.