

## 5KW 축약 발전기를 대상으로한 PSS 파라미터 정정 연구

임익현\* 류호선\* 김경철\*\* 김세웅\*\*  
 \* 전력연구원 \*\* 홍익대학교 전기공학과

### A Study of the PSS Parameter setting for 5Kw Motor-Generator Set

Ik-Hyun Lim\* Ho-Seon Ryu\* Kyung-Chul Kim\*\* Sae-yong Kim\*\*  
 \* kepri \*\* Dept of Electrical Eng Hong-Ik Univ

**Abstract** - This paper presents an application of power system stabilizer for a 5Kw Motor-Generator Set. The power system which was consisted of 5Kw Motor-Generator Set, Excitation system, Governor system and PSS was used for the performance test. The method by changing the PSS gain to allocate properly pole-zero positions was used for setting PSS parameter value. The result of the experiment was satisfactory.

#### 1. 서 론

최근 전력수요의 증가와 더불어 전력계통이 대형화됨에 따라 정상적인 운전상태에서 부하변동이나 선로상태의 변화등 계통조건이 변화했을 때 특정 발전기에 얼마간의 동요현상이 발생되었다. 이 현상은 발전기의 기계적 모드에 제동토크 성분이 부족하기 때문이며 전력계통에 발생하는 저주파 동요의 감소는 안정성 유지 측면에서 매우 중요한 연구과제로 부각되어 왔다. 그러므로, 전력계통의 안정도 문제를 개선하기 위한 전력 계통 안정화장치 (Power System Stabilizer, PSS)는 동기회전자의 동요에 부가적인 댐핑을 제공하도록 발전기 여자를 조정함으로써 안정도를 넓히도록 1960년대 후반부터 연구가 활발하게 진행되고 있으며, 그 결과 적절한 제어기를 디자인하기 위한 Root locus, Eigenvalue techniques, Pole Placement, Adaptive, Robust, Fuzzy, Genetic Algorithm등 많은 종류의 제어기들이 발표된바 있다.

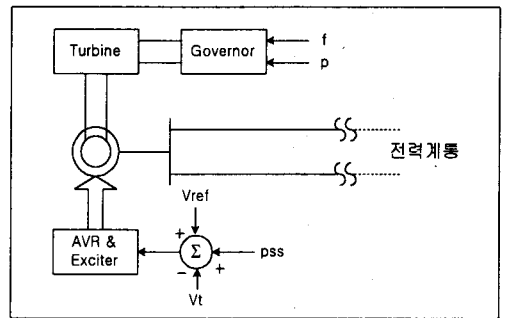
본 논문에서는 PSS의 기존 정정 방법중 가장 많이 사용되고 있는 극좌표 이동 법을 이용한 파라미터 선정 기법을 소개한다. 축약모델인 5Kw 전동/발전기(Motor/Generator Set)를 제어대상으로 하여 계통에 연결되어 운전중일 때를 고려한 것이다. 신규개발 제작한 DSP(Digital Signal Processor)를 이용한 PSS Hardware와 아날로그 정지형 여자시스템을 이용하여 전체 시스템을 구성하였다. PSS입력은 발전기 출력 전력을 입력으로 하였으며, 여자시스템은 실측시험으로 하여 모델과 정수를 구했으며, 이를 이용하여 적절한 PSS 파라미터를 선정하기 위해서 정상운전상태에서 시스템 정수를 구하고 상태방정식을 세워서 고유동요모드를 계산하여 설정된 댐핑계수가 되도록 PSS파라미터를 선정하는 기법을 사용했다. PSS효과를 검증하기 위해 발전기 단자전압의 기준치에 스텝 신호를 가하여 동요현상 및 시스템의 응답특성을 알아 보았다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 전력 시스템 모의 장치 구성

본 논문에서 사용한 전력계통 모의 장치는 [그림 1]에 나타나 있다. 발전/전동기는 발전소의 발전기와 터빈을 모의하기 위하여 설치되었다. 실제 발전소를 모의 하

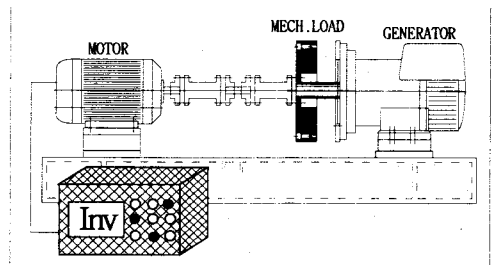
기 위하여 터빈 부를 담당하는 전동기는 벡터 인버터가 전동기를 제어하여 주파수 가변이 가능하도록 하였으며 인버터의 기준제어 신호는 조속기 제어를 담당하는 DSP 마이크로 프로세서가 이용되었다. 발전기 단자전압의 제어는 아날로그 발전기 여자시스템을 사용하였다.



[그림 1] 전력 시스템 모의 장치

##### 2.1.1 발전/전동기

발전소의 발전기, 터빈, 보일러 부분을 담당하기 위하여 모의 5KW 발전/전동기가 사용되었다. 발전/전동기는 [그림 2]와 같이 구성되어 있고 터빈처럼 관성정수를 크게 하기 위하여 플라이휠이 가변으로 설치될 수 있게 되어 있으며 전동기는 벡터 인버터로 구동되어 주파수 가변이 가능하여 조속기에서 발전기의 주파수와 부하를 제어하고 있다.

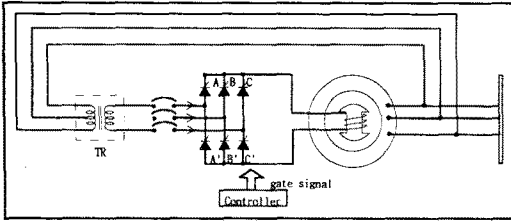


[그림 2] 발전/전동기

##### 2.1.2 발전기 여자시스템

시험장치에 설치된 직접여자 형태의 정지형 여자제어 시스템은 [그림 3]에서 보는 바와 같이 발전기 단자 부로부터 여자 변압기를 통하여 여자전원을 공급받으며, 제어 정류기에 의해서 제어된다. 일부 보조 모선으로부터 변압기를 사용하여 공급받을 수도 있으나 주로 동기 발전기의 단자로부터 여자용 전원을 인가 받고 있다. 여자 변압기를 통하여 여자 전원을 공급받음으로서 발전기의 응답속도가 상당히 빠르다(100ms이하). 제어 방법은 자동제어와 수동제어로 구분되어 있으며 정상 운전 상태

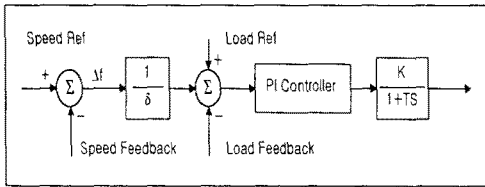
에서는 자동제어로 운전된다. 자동제어를 위해서는 변성기(PT)와 변류기(CT)를 통하여 단자 전압과 부하 보상 캐환신호를 입력받아 자동제어 설정기와 비교하여 발전기 단자전압을 제어하여 발전기의 무효전력을 제어하도록 동작된다.



[그림 3] 발전기 여자시스템

### 2.1.3 조속기 시스템

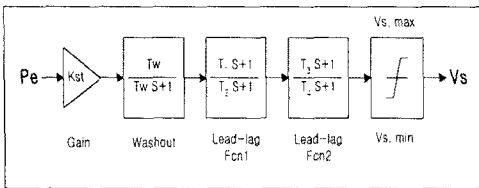
조속기는 DSP를 이용하였으며 제어 입력으로는 발전기의 주파수 및 유효전력을 받고 있다. [그림 4]에서와 같이 발전기를 계통에 병입시키기 전에는 발전기의 주파수를 60Hz로 유지할 수 있게 주파수 기준신호 설정치에 의하여 제어된 후 발전기가 자동병입 장치에 의해 계통과 연계된 후에는 유효전력 제어 부에서 사용자가 원하는 만큼의 전력량을 계통에 공급할 수 있게 설계되어 있다.



[그림 4] 조속기 제어 블록선도

### 2.1.4 PSS 시스템

PSS의 기본적인 역할은 회전자각의 동요에 의한 댐핑효과를 주는 것이다. 전형적인 PSS의 전달함수 블록도는 (그림 5)와 같다.



[그림 5] PSS 전달함수 블록도

이득  $K_{ST}$ 는 댐핑토크가 최대가 되도록 조절한다. PSS는 동요가 없을 때는 출력이 없도록 고주파수 필터인 Washout 회로가 쓰인다. 소내 동요 주파수는 1 - 2 Hz 정도이고, 외부 시스템의 동요는 0.2 - 1 Hz 이므로 시정수  $T_w$ 는 1 - 10 sec로 하면 적당하다. PSS의 출력은 발전기 단자전압의 허용 범위 내에서 조절되도록 상하한선을 두어야 하는데 보통 단자전압의  $\pm 0.1$  pu로 한다. PSS는 여자기 시스템의 빠른 응답특성을 통하여 댐핑토크를 주므로 이에 대한 위상지연을 보상해야 한다.

### 2.2 전력계통 안정화장치 파라미터 설정방법

발전기 정수와 여자시스템의 전달함수를 이용하여 전력계통 안정화 장치의 파라미터 값을 설정 할 수가 있다. 미소 신호의 변화에 대한 응답은  $\Delta$ 로 표시하나 편의상 생략하기로 한다. 전기-기계적 토크 변화에 대한

회전자각의 변화는

$$\frac{2H}{\omega_o} \frac{d^2\delta}{dt^2} + \frac{D}{\omega_o} \frac{d\delta}{dt} + K_1\delta = 0$$

으로 되며, 여기서

$\delta$  = 회전자각 (rad)

$H$  = 관성정수 (sec)

$D$  = 전기적 댐핑계수 (pu)

$\omega_o$  = 시스템 동기각속도 = 377 (rad/s)

$K_1 = \frac{dP_e}{d\delta} |_{\delta_o}$  = 동기화 계수

$P_e$  = 전기적 출력 (pu)

내부기전력은 계자전압의 크기에 따라 변화하므로 계자의 자속쇄교수는 고정되어 있지 않다. 전기적 출력  $P_e$ 는 회전자각  $\delta$ 와 내부기전력  $E$ 에 비례한다.

$$P_e = K_1\delta + K_2E$$

여기서,  $K_2 = \frac{P_e}{E} |_{\delta=0}$  으로 정의된다.

내부기전력  $E$ 는 계자전압  $V_f$ 와 회전자각  $\delta$ 에 비례한다.

$$E = \frac{K_3}{1 + K_3 T' d o s} (V_f - K_4 \delta)$$

여기서,  $T' d o$  = d축 무부하 과도 시정수 (sec).

$K_3 = \lim_{V_f \rightarrow 0} E |_{\delta=0}$ ,  $K_4 = -\frac{1}{K_3} \lim_{V_f \rightarrow 0} E |_{V_f=0}$  = 감자계수

이다.

여자가기 있는 경우는, 발전기 단자전압  $V_t$ 는 회전자각  $\delta$ 와 내부기전력  $E$ 에 비례한다.

$$V_t = \frac{1}{1 + T_R s} (K_5 \delta + K_6 E)$$

여기서,  $T_R$  = 단자전압 필터 지연 시정수 (sec).

$K_5 = \frac{V_t}{\delta} |_{E=0}$ ,  $K_6 = \frac{V_t}{E} |_{\delta=0}$  으로 정의된다.

여자기 시스템에 의한 동기화 토크계수  $K_S$ 는  $K_S = \frac{P_e}{\delta} |_E$  이고, 댐핑 토크계수  $K_D$ 는  $K_D = \frac{P_e}{\omega_r}$  으

로 나타낸다. 전력 시스템의 운전조건에 따라 상수  $K_1$  부터  $K_6$ 는 변화하지만, 일반적으로  $K_S$ 는 커지고  $K_D$ 는 작아져서 전력 시스템에 댐핑토크가 모자라서 계통에 외란이 발생했을 경우 고유진동 주파수가 오래 지속된다.

PSS 설계기법은 다양하지만, 본 논문에서는 목적함수를 댐핑감쇄계수  $\zeta$ 로 정하여 설정 값에 맞도록 PSS 이득  $K_{ST}$ 를 결정하는 고전적인 극좌표 이동법 중의 하나로 선택했다. 정상 상태의 시스템 조건으로부터 발전기 단자전압, 전류, 내부기전력 값을 계산한다. 이로부터 시스템 파라메타  $K_1$  부터  $K_6$  까지를 구할 수 있다.

PSS 설치전의 시스템의 고유치 값을 구한 후, 그 중에서 회전자각의 동요를 주도하는 고유치가 정해지면,

$$\lambda_{osc} = \sigma \pm j \omega_d$$

이로부터 댐핑감쇄계수  $\zeta$ , 고유동요 주파수  $\omega_n$ , 동기화 토크계수  $K_S$ , 댐핑 토크계수  $K_D$ 를 계산한다.

$$\zeta = \frac{-\sigma}{\sqrt{\sigma^2 + \omega_d^2}}$$

$$\omega_n = \sqrt{1 - \zeta^2} \quad (\text{rad/s})$$

$$K_S = \frac{2H \omega_n^2}{\omega_o}$$

$$K_D = 2\sqrt{K_S 2H \omega_o}$$

설정된 댐핑 토크계수가 구해질 때까지 이득을 변화시키면서 계산을 반복한다. 고유동요 주파수  $\omega_n$  (rad/s)

혹은  $f_n = \frac{\omega_n}{2\pi}$  (Hz) 가 구해지면, PSS의 시정수  $T_w$

는  $\frac{1}{f_n}$  (sec) 보다 조금 더큰 상수로 하면 된다.

위상지연 보상은 여자기 시스템, 발전기, 외부 전력 시스템 상태를 포함한 위상지연을 계산하여 보상한다. 즉, 회전자각에 대한 위상지연 함수를 구한다.

$$\frac{Te}{\delta} |_{\omega, \text{ due to } egp} = K_{ST, \min} \angle \phi_{lag}$$

여기서, e = excitation system  
g = generator  
p = power system 를 표시한다.

PSS의 Lead-Lag 보상은  $\phi_{lag}$  만큼 진상으로 해야 한다. 간단한 회로 구성은, 다음과 같다.

$$\frac{E_o}{E_i} = \frac{1+aTs}{1+Ts}$$

$\omega_m$  은 기하학적 평균 주파수로 이때 최대 진상 위상  $\phi_m$  이 된다. 효과적인 보상이 되기 위해서는  $30^\circ < \phi_m < 60^\circ$  이거나  $5 < a < 20$  의 범위 내에 있게 한다.

$$\log \omega_m = \frac{1}{2} \left[ \log \frac{1}{aT} + \log \frac{1}{T} \right]$$

$$\phi_m = \text{ang} \frac{1+j\omega_m aT}{1+j\omega_m T} = \tan^{-1} \omega_m aT - \tan^{-1} \omega_m T$$

으로 부터 시정수 aT와 T를 구할 수 있다. 일반적으로  $\omega_m = \omega_n$  으로 하고, 위상지연  $\phi_{lag}$  에서  $\phi_m$  을 선택하면 단계 n 이 정해진다.

$$a = \frac{1 + \sin \phi_m}{1 - \sin \phi_m}$$

$$T = \frac{1}{\omega_n \sqrt{a}}$$

PSS에 의한 동기화 및 댐핑 토크계수를 구하여 고유 중요 주파수, 댐핑 감쇄계수등을 구한다. 먼저  $s = \lambda_{oc} = \sigma + j\omega$  를 대입하여 전달함수 블록도에서 전기적 토크 Te를  $\delta$  함수로 구한다.

$$Te = \text{Re}[Te] + \text{Im}[Te]$$

무효분  $\text{Im}[Te]$  은 다시 속도에 의한 성분  $j\omega$ , 과 회전자각에 의한 성분  $\delta$  로 나누어 계산하면 동기화 토크계수  $K_S$ 와 댐핑 토크계수  $K_D$ 가 구해진다. 즉,

$$j\delta = j \frac{\omega_o}{s} \omega,$$

$$(\sigma + j\omega)\delta = j\omega_o \omega,$$

$$j\delta = j \frac{\omega_o}{\omega} \omega_r - \frac{\sigma}{\omega} \delta$$

$$Te |_{PSS} = \text{Re}[Te] + \text{Im}[Te] \times \left( -\frac{\sigma}{\omega} + j \frac{\omega_o}{\omega} \right) = K_S + jK_D$$

$$\omega_n = \sqrt{\frac{K_S \omega_o}{2H}} \quad (\text{rad/s})$$

$$\zeta = \frac{1}{2} \frac{K_D}{\sqrt{K_S 2H \omega_o}}$$

$$\omega_d = \omega_n \sqrt{1 - \zeta^2}$$

$$\sigma = -\zeta \omega_n$$

$$\lambda = \sigma \pm j\omega_d$$

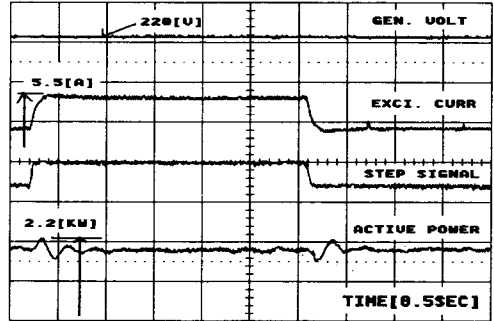
만일  $\zeta$ 가 설정치  $\zeta_{opt}$ 와 같으면 반복계산을 중단하고, 그렇지 않으면 이득  $K_{ST}$ 을 가감시켜 계산과정을 반복한다.

PSS의 모든 파라메타  $K_{ST}, T_W, T_1, T_2, n, V_{S, \max}, V_{S, \min}$ 이 정해지면 PSS 응답특성을 확인하기 위한 수단으로 Step Responses를 시뮬레이션 하여 단자전압 기준치와 기계적 토크 기준치를 10% 증감시켜 회전자 속도의 변화와 PSS 설치 전후의 고유치, 고유중요 주파수, 동기화 및 댐핑 토크 등을 비교 검토한다.

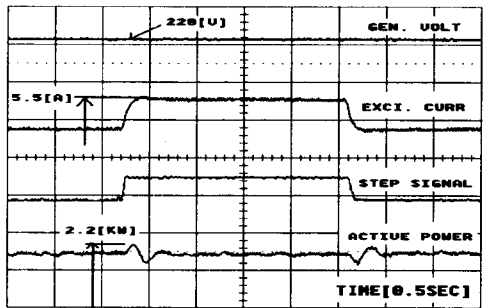
### 3. 시험 결과

2.2절에서 설정된 값을 이용하여 PSS시험을 실시하

였다. [그림 6]은 PSS를 OFF시킨 후 발전기 기준제어 신호에 스텝신호를 가한 후의 파형으로 여자전류의 갑작스런 증가로 발전기의 단자전압은 자동모드로 설정되어 있기 때문에 변동이 없지만 무효전력은 여자전류의 양만큼 변동이 발생하였고 유효전력은 동요가 발생한 후에 동요 분이 감소되어 원래의 셋팅값에 도달됨을 알 수 있었다. [그림 7]은 PSS 파라미터 선정값중 Gain을 10으로 한후 PSS를 ON했을 때의 파형으로 PSS를 사용하지 않을 때보다 주파수와 관련이 있는 유효전력분의 동요가 상당히 감소됨을 알 수 있다.



[그림 6] PSS가 OFF 일 때의 파형



[그림 7] PSS가 ON 일 때의 파형

## 4. 결 론

본 논문에서는 전력계통의 저주파 진동 및 외란시 동기 발전기의 여자시스템에 보조신호를 제공하여 소신호 안정도 개선에 사용되는 전력 계통 안정화 장치를 사용하여 동요분을 감소하였다. PSS 파라메타 선정기법은 다양하지만 본 논문에서는 고전적인 방법 중의 하나로써 설정된 댐핑계수를 목적함수로 한 극좌표 이동법을 사용했다. 여자기 제어시스템의 실측에 의한 상세 모델과 발전기 운전상태로부터 시스템 제정수를 구하고 적절한 PSS 파라메타를 선정한 제어기를 구성하여 전력연구원의 5KW 발전/전동기에 적용하여 계통에 병입된 동기발전기에 PSS를 실증 검증하여 전력계통의 동태 안정도에 대한 개념과 PSS 파라메타 선정기법을 이해하고 PSS 효과를 확인할 수 있었다.

### [참고 문헌]

- [1] P.M. Anderson and A.A. Fouad, "Power System Control and Stability", The Iowa State University Press, U.S.A., 1977.
- [2] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill Inc., 1994.
- [3] F.P. DeMello and C. Concordia, "Concepts of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation Control", IEEE Trans. on PAS, April 1969.
- [4] GE-Power System Energy Consulting Schenectady, NY, USA "Testing and Verification of the EX2000 Power System Stabilizer", August 29, 1997