

발전기 제어계 동특성 시험 및 수리모형 수립

오 태규 문 영환 최 경선

한국전기연구소

권 태원* 류 승헌*

한국전력공사 기술연구원*

Testing and Modeling of Generator Control Systems for Stability Studies

Tae-Kyoo Oh Young-Ihwan Moon Kyung-sun Choi

Tae-Won Kwon* Seung-Heon Lyu*

KERI

KEPCO*

ABSTRACT - The dynamic characteristics and mathematical models of the KEPCO's generator control systems have been derived by on-line tests. Measuring the responses for small disturbances in the inputs, the parameters of governing systems, excitaton systems, and power system stabilizers have been determined. An overview of the field tests, parameter identification, and model verification is presented.

1. 서 론

전력의 안정적/지속적인 공급을 위해 전력회사는 계통계획 및 운용단계에서 안전을 기하고 있다. 이를위해 항상 외란에 대한 계통의 동특성을 면밀히 분석하여 최우선적으로 과도 및 정태안정도가 유지되도록 대책을 강구하고 있다. 다양한 제어 장치가 설치된 현대의 전력계통에서 발전기 제어계는 외란발생 즉시 정상회복을 위해 작동하며 따라서 실제에 가까운 이들의 모델링과 파라메타의 선정은 안정도 해석을 위해 필수적이다. 한편 정확한 계통의 동특성 해석을 위해 많은 시뮬레이션 프로그램들이 개발되어 상용화되어 있는 바 이를 충분히 활용하기 위해서는 정밀한 발전기 및 제어시스템에 대한 모델 확보가 절실히 요구되고 있다. 그러나 대부분의 발전기 제작자들은 이들에 관한 충분한 데이터를 제공하고 있지않으며, 또한 시운전시의 Setting 조정과 운전 및 보수등의 원인으로 원래의 특성과 다른경우도 적지않다. 따라서 발전기 제정수 및 제어시스템 정수들을 시험을 통해 얻기 위해 많은 연구들이 행해지고 있다. [1, 2, 3] 발전기 제어계 모델링에 필요한 시험을 하는데는 IEEE/ASME Test Code가 중요한 참고가 되었다.[4,5]

본 연구에서는 우리나라의 계통안정도 해석에 필요한 100MW 이상의 중요한 발전기들의 제어계 즉, 전압조정기(AVR), 여자기, 조속기, 안정화장치(PSS) 등의 동특성을 실제 운전 중인 상태에서 측정하여 모델들을 작성하고 있다. 이를 위하여 기존의 발전기 도면과 자료들을 수집/분석하여 예상전달함수와 모델을 작성하고 필요한 측정점을 선정한 다음 발전소 현장에서 관련 제어계를 시험하였다. 즉, 운전 중인 발전기의 운전 조작에 의해 입력신호를 필요량만큼 발생시켜 블록별로 입·출력 전압파형을 측정/기록/분석함으로써 관련 시정수 및 GAIN들을 추정하였다. 이를위해 Pattern Search method, Least Squares method, Recursive Least Squares method 등이 사용되었다.

실제의 전달함수로 표현된 발전기 제어계 모델들은 IEEE 모델 [6,7] 및 상용화된 프로그램 (PSS/E)[8]에 내장된 모델로

모델추약기법을 통해 변환하였다. 작성된 발전기 여자기계 및 조속기-터빈계는 발전기 제정수를 포함하여 STEP 입력에 대한 응답특성을 시뮬레이션 검증하였다. 아울러 Bode Diagram을 통해 각 발전기 동적 안정성을 고쳐, 파라메타들의 Tuning을 검토하였다.

2. 발전기 제어계 동특성 시험

일반적으로 각 발전기들은 그림1과 같은 제어계들로 구성 되어, 여자기 시스템은 발전기 단자전압과 역률 및 전류크기를 조정하며, 조속기는 터빈에 공급되는 증기량을 제어한다. 본 절에서는 조속기와 여자기시스템에서의 전기적 신호와 관련된 제어계의 동특성 시험에 대해 기술한다. 측정장비로는 FLUKE 1752A Data Acquisition System 과 Dynamic Signal Analyzer, 멀티테스터 등을 사용하였다.

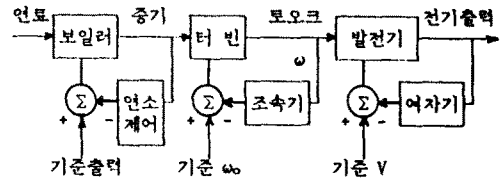


그림1 발전기의 주요 제어시스템

2.1 실측 시험

1) 시험조건

ON-LINE시험과 OFF-LINE 시험으로 나뉘는데 ON-LINE의 경우 발전기가 계통에 연결되어 운전 중인 상태에서 여러가지의 유효/무효전력 부하상태로 시험하는것이 타당하며 반면에, OFF-LINE시험은 발전기가 정지된 상태에서 입력에 대한 출력을 측정하여 PCB의 전달함수를 구할 수 있다.

2) 시험방법

입출력 신호의 크기에 따라 Large Signal Analysis 와 Small Signal Analysis로 구분된다. Large Signal Analysis는 부하 또는 송전선의 일부를 투입/차단하여 발전기 속도조정을 과 조속기 Rate 한계등을 구하고 발전기 제어계 응답을 검출.

모델 검증에 이용한다. Small Signal Analysis에는 시간응답시험과 주파수응답시험이 있다:

- 시간응답시험: 입력신호점에 Step을 준 다음 시스템의 임출력을 측정, 측정이 쉽고 모델검증이 용이한 장점
- 주파수응답시험: 입력신호점에 주파수변화가 가능한 정현파 신호를 주고 시스템의 임·출력을 측정, 보다 쉽고 정확한 모델링이 가능

2.2 여자기 시스템 동특성 시험

일반적으로 여자기 시스템은 그림2와 같은 구조를 가지고 있으며 주여자기 직류전원 공급방식에 따라 DC여자방식 - AC여자방식 - STATIC여자방식으로 구분된다. 주 여자기의 전압은 발전기 단자전압이 일정하도록 전압조정기(AVR)가 제어된다. 측정되는 제어신호들은 DC전압이며 필요에 따라 OP-Amp 감압기가 사용되었고 잡음이 심한 DC여자방식의 경우 멀티메터코더를 이용 측정하였다.

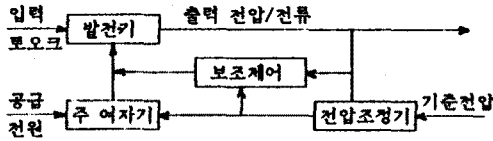


그림2 여자기 시스템의 구조

AVR 동특성 시험을 위해 발전기는 설정된 부하를 유지하고 단자전압은 정격으로 유지한다. 다음, FLUKE DAS system에 측정점들을 연결한 다음 시험전 운전상태와 각 측정점의 신호를 확인, 기록한다. 측정전압은 발전기 단자전압, 기준전압, AVR 임·출력 전압, Antihunting 방지회로 출력전압 또는 Lead/Lag 회로의 임·출력 전압, 여자전압 등이다. AVR 입력신호의 변화를 얻기 위하여 단자전압 Setting을 기준 정격전압의 5X정도 급격히 증가시킨 후 정상상태가 될 때까지 (2분 정도) 측정점 전압들을 측정장비로 기록한다. 다음, 원래의 기준 정격전압으로 급격히 감압시켜 정상상태가 될 때까지 측정장비로 기록한다. 같은 요령으로 정격전압의 5X정도 단자전압 Setting을 감소시켜 측정하고 원 상태로 복귀시켜 측정한다.

2.3 조속기/PSS의 동특성 시험

그림1에 나타난 것과 같이 조속기 외란에 대해 발전기 기준속도와 설정된 출력을 유지하기 위하여 응동하여 터빈의 제어밸브를 제어하는데, 입력의 변화를 얻기위해 출력 Setting을 출력의 5% 가량 급격히 증가/감소시켜 정상상태가 될 때까지 필요한 항목을 측정/기록한다. 전력계통안정화장치(PSS)는 발전기 속도변화 또는 출력변화에 대해 응동하여 계통의 동요를 감소시키도록 보조신호를 여자기의 AVR에 주는데, 시험방법은 조속기 시험과 거의 동일하다. 조속기의 경우 측정전압은 발전기 속도편차, Setting출력 변화, 제어밸브의 임·출력 및 위치 등이며, PSS의 경우는 Lead/Lag, Notch Filter, Wash-out 등의 기능블록별로 임·출력 전압을 측정한다.

여건이 허락하는 경우는 발전소의 송출 송전선로중 1회선을 차단/연결하여 조속기 및 PSS의 동특성을 시험하였다.

3. 실측 분석

3.1 분석 이론

현장시험에서 얻은 데이터를 분석하여 원하는 모델의 정

수를 구하기위해 그림3과 같이 입력 u_k , 출력 y_k 를 갖는 시스템에 대해 파라메타 추정을 하게된다. 분석에는 시행착오법(Pattern Search Method), 최소자승법(Least Squares Method), 반복최소자승법(Recursive Least Squares Method) 등이 사용되었는데 후자의 두 방법을 간단히 서술한다.

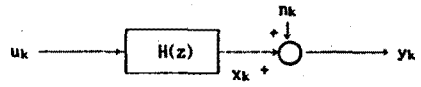


그림3 입력 u_k , 출력 y_k 를 갖는 시스템 $H(z)$

그림3의 SISO 시스템에서 z-변환을 이용하면

$$\frac{x(z)}{u(z)} = H(z) = \frac{a_0 + a_1z^{-1} + \dots + a_nz^{-n}}{b_0 + b_1z^{-1} + \dots + b_nz^{-n}} \quad (1)$$

로 입출력 관계가 주어지며 잡음(n_k)는 white Gaussian으로 가정하면 다음과 같이 쓸 수있다.

$$y_k = \sum_{i=0}^n a_i u_{k-i} - \sum_{i=1}^n b_i y_{k-i} + v_k = \phi_k^T \theta + v_k \quad (2)$$

여기서

$$\phi_k^T = [u_k \ u_{k-1} \ \dots \ u_{k-n} \ -y_{k-1} \ -y_{k-2} \ \dots \ -y_{k-n}] \quad (3)$$

$$v_k = n_k + \sum_{i=0}^n b_i n_{k-i} \quad (4)$$

(2)식에 대해 p set의 입출력 데이터를 고려하면

$$y_p = [A_p] \theta + v_p \quad (5)$$

여기서

$$[A_p] = \begin{bmatrix} u_k & u_{k-1} & \dots & u_{k-n} & -y_{k-1} & -y_{k-2} & \dots & -y_{k-n} \\ u_{k+1} & u_k & \dots & u_{k-n+1} & -y_k & -y_{k-1} & \dots & -y_{k-n+1} \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ u_{k+p-1} & u_{k+p-2} & \dots & u_{k+p-n-1} & \dots & \dots & \dots & -y_{k+p-n-1} \end{bmatrix}$$

$$y_p = [y_k \ y_{k+1} \ \dots \ y_{k+p-1}]^T$$

p set의 입출력 데이터로부터 구한 θ 의 추정치를 $\hat{\theta}_p$ 라하면 출력벡터의 최적추정치는 다음과 같이 표현된다.

$$\hat{y}_p = [A_p] \hat{\theta}_p \quad (6)$$

파라메타 추정오차 벡터는

$$\tilde{\theta}_p = \theta - \hat{\theta}_p \quad (7)$$

출력 오차 벡터는

$$\tilde{y}_p = y_p - \hat{y}_p \quad (8)$$

로 정의된다. 여기서 식 (5), (6), (7)을 (8)식에 대입하면

$$\tilde{y}_p = [A_p] \tilde{\theta}_p + v_p \quad (9)$$

\tilde{y}_p 를 '벡터식오차'라 부르며 이를 최소화하는 $\hat{\theta}_p$ 를 구한다.

$$\begin{aligned} \text{최소화 : } J &= \tilde{y}_p^T \tilde{y}_p \\ &= (y_p - \hat{y}_p)^T (y_p - \hat{y}_p) \end{aligned} \quad (10)$$

(6)식의 \hat{y}_p 를 대입하면

$$J = y_p^T y_p - y_p^T [A_p] \hat{\theta}_p - \hat{\theta}_p^T [A_p]^T y_p + \hat{\theta}_p^T [A_p]^T [A_p] \hat{\theta}_p \quad (11)$$

J를 최소화하려면 $\frac{\partial J}{\partial \hat{\theta}_p} = 0$:

$$\hat{\theta}_p = ([A_p]^T [A_p])^{-1} [A_p]^T y_p \quad (12)$$

(12)식을 Recursive Form으로 조정하면

$$\hat{\theta}_{p+1} = \hat{\theta}_p + ([A_{p+1}]^T [A_{p+1}])^{-1} \phi_{k+p} (y_{k+p} - \phi_{k+p}^T \hat{\theta}_p) \quad (13)$$

(12)식을 최소자승법, (13)식을 반복최소자승법이라 한다.

3.2 실측 결과분석 (B 화력 #1)

1) 여자기계 모델 분석

B 화력 발전소의 여자기계는 IEEE 분류에서 STATIC 형 이고 도면의 분석결과 예상 모델 및 전달함수 전달함수는 그림 4와 같이 표현된다. 측정항목 요약하면

- CH 1 : 단자 전압, Vr
- CH 2 : 교류 탐지 신호 출력
- CH 3 : 교류 동요방지(Antihunting)회로 출력
- CH 4 : 계자 전압, Vf
- CH 5 : 직류 탐지 신호 출력
- CH 6 : 직류 동요 방지회로 출력

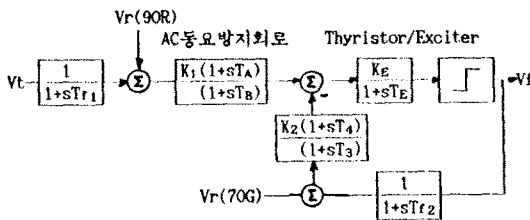


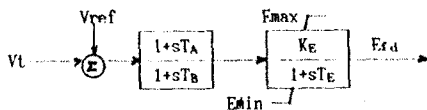
그림 4. 여자기계 전달함수 블록도

첫번째 전달함수 블록도인 교류동요방지회로를 주어진 데이터로 분석한 결과를 정리하면,

Parameter	K ₁	T _A	T _B
-	14	0.1초	0.7초

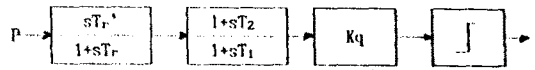
교류동요방지회로는 PULSE AMPLIFIER를 거쳐 THYRISTOR/EXCITER 에 입력 된다. 제작처에서 제공한 Pulse Amplifier의 Gain 은 K_E = 12이다. Thyristor/Exciter의 Gain은 1.0 으로 하고 제작처에서 제공한 그림4의 시정수 T_E=0.012sec 및 전압 조정기 Limits 값 Vr,max=5.96, Vr,min = -4.86을 사용하였다.

PSS/E Program에 적합한 모델중의 하나는 SEXS (Simplified Excitation System)이다. 즉,



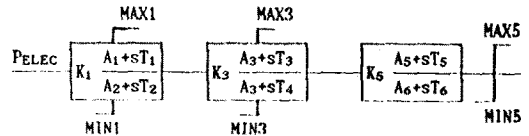
2) PSS 모델 분석

도면 분석결과 예상 PSS 모델과 시정수를 요약하면,



시정수	1호기	2호기	설계값
T _r	4.8	4.2	5.6
T _r '	5.6	5.1	5.6
T ₁	0.09	0.09	0.05
T ₂	0.06	0.05	0.1
K _q	0.55	0.53	0.4
Limits	±10DVC (±0.125PU)	±10DVC (±0.125PU)	±0.05

PSS/E Program에 적합한 Model 중의 하나는 IVOST(IVO stabiliser model)이다. 즉,



3) Governor 모델 분석

터빈을 제외한 조속기계의 기능용 전달함수 블록도도 나타내고 분석결과를 요약한다.

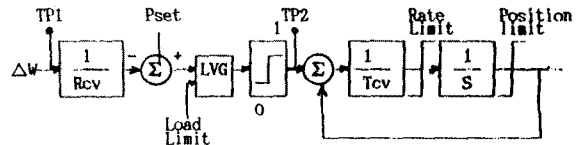


그림 5. 조속기계 예상 전달함수 블록도.

	1 호기	2 호기	설계값	비고
Rcv	0.054	0.059	0.05	.025-0.07
Tcv	0.08	0.08	0.1	
Rate Limit	.	.	0.01, 0.032	
Position Limit	1, 0	1, 0	1, 0	

PSS/E Program에 적합한 Model은 IEEE1(IEEE Type1모델)이다.

4. 모델 검증 및 파라메타 Tuning

4.1 모델 검증

1) 여자기 모델

여자기제어계의 Gain과 시정수 그리고 안전성 여부를 검토하기 위하여 AVR의 조정기준치에 0.1 p.u.의 Step 변화를 주어 여자전압(Efd 1151)와 발전기 단자전압 (Et 1151)의 응답을 그림 6과같이 시뮬레이션하였다 (Open Circuit Setpoint Step Test).

2) 조속기 모델

조속기-터빈계의 계정수 그리고 안전성 여부를 검토하기 위하여 부하의 0.1 p.u.의 Step 변화에 대한 회전자속도 (SPD 1151)와 기계적출력 (PM 1151)의 응답을 그림 7과같이 시뮬레이션하였다.

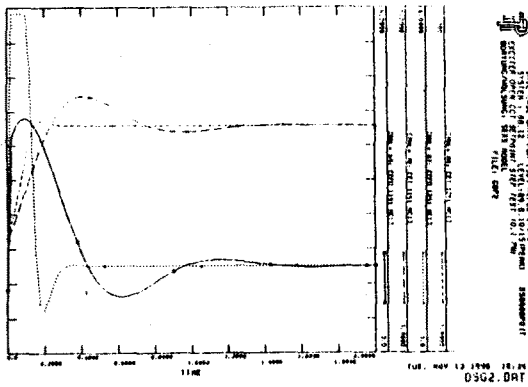


그림6 화력발전기 여자계의 Step 응답 특성

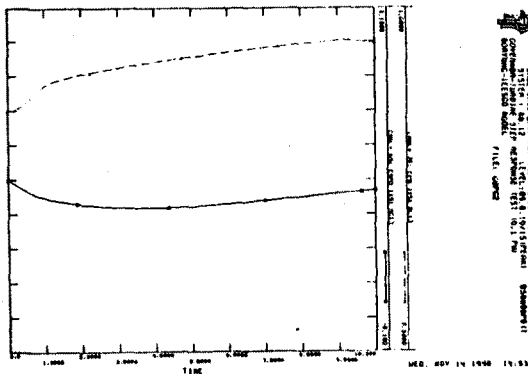


그림7 화력발전기 조속기-터빈계의 Step 응답 특성

5. 결 론

발전기 제어계의 자료수집/분석 및 동특성 시험을 통하여 안정도 해석을 위한 주요 발전기들의 계정수들을 산정하였다. 앞으로 산출된 파라미터들의 검증 및 보완, 그리고 데이터베이스화 등의 과제가 남아있으며 보다 정확한 모델확립을 위해 추후로도 계속적인 노력과 수정작업이 필요하다.

참 고 문 헌

- [1] F.P. de Mello, et al, "Determination of Synchronous Machine Electrical Characteristics by Test," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-102, Dec. 1983, pp 3810-3815.
- [2] T. Sugiyama, et al, "Measurements of Synchronous Machine Parameters Under Operating Condition," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-101, No. 4, April 1982, pp 895-904.
- [3] M.J. Gibbard and Q.H. Kaan, "Identification of Excitation System Parameters," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-94, No. 4, July/Aug. 1975, pp 1201-1207.
- [4] IEEE Std. 421.A - 1978, "IEEE Guide for Identification, Testing, and Evaluation of the Dynamic Performance of Excitation Control Systems"
- [5] ANSI/ASME PTC 20.1 - 1977 (R1982), "Speed and Load Governing Systems of Steam Turbine Generator Units"
- [6] IEEE Committee Report, "Excitation System Models for Power System Stability Studies," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-100, No.2, Feb. 1981, pp 494-509.
- [7] IEEE Committee Report, "Governor Models for Steam and Hydro Turbines in Power system Studies," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-92, No.6, Nov./Dec. 1973, pp 1904-1915.
- [8] "PSS/E Power System Simulator Program - Operation Manual," Power Technologies Inc., 1987.

4.2 여자계 제어계 파라메타 Tuning

여자계 Tuning의 목적은 충분히 큰 Crossover 주파수 (ω_c) 를 제공하고 (전압조정 Loop의 응답은 ω_c 에 반비례하므로), 안정한 제어가 되도록 f_c 에서 최소의 위상지연을 갖게함과 동시에 정상상태에서의 Gain을 충분히 높혀 무부하와 전부하 간의 전압오차가 1%도 정도가 되도록 한다. 그림8과 같은 개방된 발전기회로의 전압조정 Loop를 고려한다.

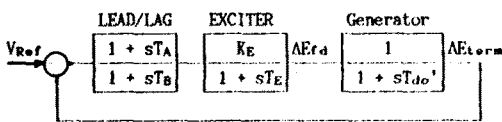


그림8 개방된 발전기회로의 전압조정 Loop

- 앞에서 구한 β 화력의 여자계 모델로부터
- 과도 Gain 감소: $T_A/T_B = 0.1/0.7 = 0.143$
 - 과도 Gain : $K_o = (T_A/T_B) * K_E = 0.143 * 168 = 24.0$
 - Crossover Freq.: $\omega_c = K_o/T_{do}' = 24/5.8 = 4.138$
 - $1/T_E = 1/0.012 = 83.3$ (ω_c 보다 크므로 무난)
 - $1/T_A = 1/0.1 = 10$ (ω_c 보다 크므로 LEAD/LAG Filter의 LAG 영향이 ω_c 에서 남아있음: $T_A=1, T_B=10$ 이 바람직)