

Power System Stabilizer Design of a Turbo-Generator using LQG/LTR Control Synthesis

鄭大源* · 金建中**
(Dae-Won Chung · Kern-Joong Kim)

Abstract - This paper presented to design the power system stabilizer(PSS) for a turbo-generator system using LQG/LTR control synthesis for improving small-signal stability. Application study of LQG/LTR control synthesis is more appropriate in this system since a turbo-generator system is usually operated under circumstance of unmeasurable uncertainties and external disturbance. The LQG/LTR control theory was briefly reviewed for good understanding and the reasonable design approach. The design results are simulated for a case study and to check the system performance in comparison with currently operating lead-lag filtered PSS performance.

Key Words : LQG/LTR control, Riccati equation, power system stabilizer, loop transfer recovery

1. 서 론

오늘날 전력계통이 점차 복잡해지고 대형화되면서 전력계통의 안정화문제는 신뢰성이 높은 양질의 전력공급 문제와 함께 중요한 당면 과제이다. 특히, 최근에 설치되는 발전기의 제어시스템은 과도안정도를 향상시키기 위하여 속응성이 뛰어난 정지형(static type) 여자방식을 많이 채택하여 여자기의 이득을 높이는 결과로써 과도 응답속도는 매우 빨라져 과도 안정도는 향상시키는 반면에 동태 안정도(dynamic stability)는 오히려 악화될 우려가 있어 그 채택에서 보완수단을 강구해야 한다. 동태 안정도 문제는 근본적으로 발전기 회전축에서 발생하는 미소 크기의 에너지 불균형 현상에서 기인한 것으로 에너지 불균형의 원인이 되는 외란 유입시에 동기발전기에서 탈조현상 없이 동기상태를 계속 유지여하에 달려있다. 즉, 외부요인에 의해 동요발생 시에 적절한 보상회로를 통하여 정 제동력을 갖도록 하여 다시 운전평점으로 복귀하여 안정성을 되찾도록 하여야 한다.

지난 1960년대부터 전력계통의 동태안정도를 향상시키고 정(Positive)의 제동효과를 높이기 위하여 전력계통 안정화장치(Power System Stabilizer, PSS)를 여자기의 보조장치로써 많이 채택하고 있다. 이는 시불변 선형시스템의 제어원리에 따라 입력변수인 계통주파수(혹은 동기속도)의 편차량의 크기에 따라 동작하고, 그 파라미터는 운전점을 중심으로 현장에서 동조를 통해 조정된다. 그러나, 전력계통은 그 특성상 정상운전 중에도 부하와 전체계통 및 개별 발전기의 상태에 따라 운전 상태점과 운전조건이 많이 변화하여 동태응답특성

(Dynamic Characteristics)도 변한다. 기존의 lead-lag 필터형 PSS는 이러한 운전환경 변화에 적절히 능동적으로 대처하지 못하며 경우에 따라서는 오히려 정(positive)의 제동효과를 기대하기 어려울 때도 있다. 이러한 문제점을 개선하려는 많은 연구가 진행되어 왔으며 지금까지는 적응제어 이론에 근거한 자기동조방식(STR)의 제어기법이 그 주류를 이루고 있다[4,5]. 그러나, 이 PSS는 모든 발전기에 반드시 설치하는 것은 바람직하지 않고 상정된 운전모드에서 시스템의 고유치 해석을 통해서 불안정 모드에 가까운 발전기들만에 대하여 PSS를 설치함이 바람직한 것으로 보고되고 있다.

1960년대 후반 최적제어이론에 기반을 둔 LQ 제어기법은 기존의 선형 입출력신호에 의존한 제어특성에서 탈피하여 각 상태변수의 정보를 이용하여 보다 성능이 우수한 제어기를 설계할 수 있는 기법으로 평가되어왔다. 그러나, 이 LQ 제어기의 설계에 있어 목적함수에 포함되어 있는 가중치 행렬의 선정방법이 비체계적일 뿐만 아니라 제어시스템의 성능과 모델링 오차에 대한 견실성과 안정도의 문제를 설계시에 직접 반영할 수 없다는 한계점을 안고 있었다. 특히, 가중치 행렬이 시스템의 성능에 커다란 영향을 미치고 있음에도 그 값을 설정함에는 체계적이지 못하는 문제를 극복하고자 1980년대 초에 Doyle과 Stein에 의해 제시된 LQG/LTR (Linear Quadratic Gaussian with Loop Transfer Recovery)의 제어 이론은 이 가중행렬이 상호간에 어떤 특별한 조건이 될 때 안정도 여유가 높은 LQR의 장점을 그대로 얻을 수 있다는 사실을 발견하였다. 그 결과 직접 측정할 수 없는 상태함수를 칼만 필터 이론에 근거한 최적 관측기의 설계가 가능한 LQG의 장점을 모두 갖도록 할 수 있는 새로운 LQG의 설계법으로 제시하였다[13]. 즉, 기존의 LQG 제어기법을 개선하여 주파수별 바람직한 제어루-프 형상을 미리 설계에 반영하도록 하여 견실성의 문제와 안정도의 문제를 동시에 해결함과 동시에 다변수 제어 시스템을 보다 조직적으로 설계할 수 있는 제어기법이다.

* 正 會 員 : 湖南大 電氣工學科 助教授

** 正 會 員 : 忠南大 電氣工學科 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 3月 10日

最終完了 : 1999年 7月 7日

본 논문은 대형 전력계통에 연계된 터-빈발전기 시스템이 전형적인 비선형 시스템으로 운전 모드에 따라 파라미터 변화가 많아 모델링 오차가 매우 큰 시스템이며, 복잡한 부속 시스템을 보유하여 대형 전력계통과도 직접 연계되어 운전됨으로써 항상 외란 요소가 매우 많은 상황이나, 실제 설계에 사용된 PSS 설계 파라미터나 현장에서 Tuning한 운전 파라미터들이 계통의 운전 상태를 모두 반영할 수 없어 많은 불확실성이 내재된 상태에서 운용되고 있어 보다 견실성이 요구되는 점에 착안하여 이러한 문제를 극복하여 보다 우수한 견실성능을 갖는 새로운 PSS 제어기 설계를 시도하였다. 본 연구에서는 그 목적에 부합되게 발전기의 여자기 시스템은 정지형(static type)을 대상으로 모델링을 하였으며 기존의 Lead-Lag 필터로 구성된 PSS를 사용한 경우와 그 성능을 비교 분석하였다.

2. 1대의 발전기와 무한대 모선의 모델링

2.1 개요

터-빈발전기는 보일러에 의해 만들어진 가열증기의 열에너지로 터-빈을 회전시켜 발전기에서 전기에너지를 얻기 위한 에너지 변환장치이다. 제어 시스템의 관점에서 보면 보일러의 열량변화 시정수와 터-빈의 기계적 시정수는 발전기와 전력계통의 전기적 시정수에 비하여 매우 커서 동태 안정도 문제에서 그 역할은 무시할 수가 있다. 따라서, 본 논문에서 고려되는 대상 플랜트는 발전기의 기계적 입력에서부터 전력계통의 정전압원으로 간주되는 무한대 모선까지로 한정한다. 이 영역의 전체 시스템 구성은 다소 복잡하게 구성되어 있으나, 본 PSS 제어기 설계 문제를 다루기 위한 모델설정은 다음의 가정과 조건하에 간략화 된 모델을 사용한다.

- 증기터-빈 입력은 동태안정도 문제에서는 일정한 크기를 갖는 상수입력으로 가정하며, 입력크기의 변화량은 외란으로 가정한다.
- 발전기의 회전자는 증기 터-빈의 원동형의 비철극기로 가정하며 고정자 및 회전자의 모든 제동권선의 영향은 무시한다. 또한, 과도기간중 계자회로의 포화현상은 무시한다.
- 발전기의 기본모델은 Park방정식[1,2]에 기초하여 2축을 기준으로 공극의 유기전압(e'_q) 기준모델을 사용하고 수식의 유도과정은 참고문헌[1]을 참조하여 생략한다.
- 여자는 정지형(static type) Thyristor AVR을 기준하였으며, 자기회로의 포화특성과 시간지연 현상은 미소신호의 안정도 문제에서는 고려치 않는다.

2.2 선형화한 터-빈 발전기의 모델

여자를 포함한 터-빈 발전기는 전형적인 비선형 시스템이며, 선형 제어시스템의 설계에 적용하기 위해서는 섭동의 원리(Perturbation theory) [8]를 이용하여 적절한 선형화 형태로 변환해야 한다. 선형화한 수학적 모델은 참고문헌[1,2,6]으로부터 다음과 같이 정리된다.

$$p\Delta w_r = \frac{1}{2H} (-K_D \Delta w_r - \Delta T_e + \Delta T_m) \tag{1}$$

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta e'_q \tag{2}$$

$$p\Delta \delta = w_r \Delta w_r \tag{3}$$

$$p\Delta e'_q = -\frac{K_4}{T_{\Delta 0}} \Delta \delta - \frac{1}{K_3 T_{\Delta 0}} \Delta e'_q + \frac{1}{T_{\Delta 0}} \Delta e_{fd} \tag{4}$$

$$\Delta e_{fd} = G_{ex}(s) (\Delta U_t - \Delta v_t), \quad G_{ex}(s) = K_A \tag{5}$$

$$p\Delta v_t = \frac{K_5}{T_r} \Delta \delta + \frac{K_6}{T_r} \Delta e'_q - \frac{1}{T_r} \Delta v_t \tag{6}$$

$$P_{\Delta 0} = T_{\Delta 0} = \frac{e_{q0}' e_{\Delta 0}}{X_T} \sin \delta_0 \tag{7}$$

여기서 모든 계량은 Per Unit 값이며, 각 변수의 정의는 참고문헌[1]을 참조하고, 각 계수는 다음의 정의로부터 얻는 값이다. $X_T = X_d + X_l + X_l'$ 는 발전기를 포함한 선로의 등가 임피던스를, $X_e = X_l + X_l'$ 는 선로의 등가 임피던스를, $R_T = R_d + R_l + R_l'$ 는 발전기를 포함한 모든 선로의 등가 저항을, $R_e = R_l + R_l'$ 는 선로의 등가 저항을 나타낸다. 또한,

$$p = \frac{d}{dt}, \quad K_1 = \left. \frac{\partial T_e}{\partial \delta} \right|_{e'_q = const}, \quad K_2 = \left. \frac{\partial T_e}{\partial e'_q} \right|_{\delta = const}$$

$$K_3 = \frac{X_d' + X_e}{X_d + X_e}, \quad K_4 = \left. \frac{\partial e'_q}{\partial \delta} \right|_{e_q = const}, \quad K_5 = \left. \frac{\partial e_t}{\partial \delta} \right|_{e'_q = const}$$

$$K_6 = \left. \frac{\partial e_t}{\partial e'_q} \right|_{\delta = const}, \quad \Delta$$
 는 평행점에서의 미소변위를 의미한다.

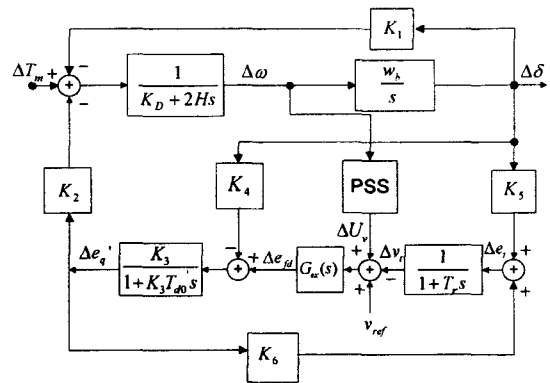


그림 1 선형화한 1기 무한대 모선의 블록선도
Fig. 1 Simplified and Linearized Block Diagram of a Generator to Infinite Bus

2.3 여자기 및 PSS 모델

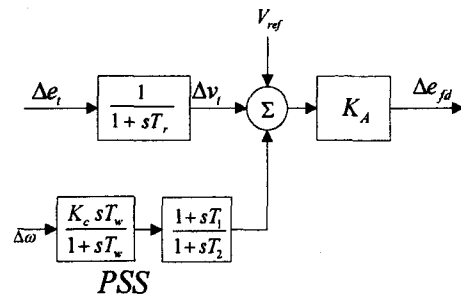


그림 2 PSS를 포함한 Thyristor형 여자기의 블록선도
Fig. 2 Thyristor Type 1 Excitation System with PSS

여자는 발전기 회전자의 공극에 전압유기를 위한 자속을 효율적으로 공급하는 자화회로, 자동전압조절기(AVR) 및 시스템 안정화회로로 일반적으로 구성된다. 또한, 여자전압의 공급방법에 따라 여자기의 형태와 특성에 매우 다른 모델이

제시된다. 본 논문은 앞서 언급한 대로 AVR은 비교적 응답 속도가 빠르며 제동력이 약한 정지형(static) 모델을 기준하였다. 위 그림 2에서 PSS를 포함한 정지형 Thyristor Type 여자의 블록선도를 보인다.

3. LQG/LTR 制御理論의 考察

3.1 LQG/LTR 제어이론의 개념

LQR/LTR은 최적 추정 및 최적 제어 이론에 기반을 둔 선형시스템 제어이론이다. 이는 다변수 제어를 위한 모든 상태변수의 측정이 불가능하므로 외란을 포함한 센서 잡음이 실제 혹은 가상적인 확률적 통계치를 구하고, 이 통계적인 확률정보로부터 칼만필터를 이용하여 상태변수를 추정하는 관측기 기능을 부여함으로써 모든 상태변수 정보를 갖음으로써 상태 피드백 제어가 가능하여 높은 안정도 여유를 갖는 LQR의 장점과 상태변수의 관측기능을 갖는 LQG의 장점을 모두 갖도록 하는 설계기법이다. 또한, LTR은 LQG 설계시 시스템의 성능에 커다란 영향을 주고 있는 가격함수의 가중행렬의 선정에서 기존의 비체계적인 시행착오법에서 벗어나 보다 체계적인 접근방법 즉, 시스템 성능과 모델링오차에 대한 안정도-견실성의 문제를 설계시에 직접 고려할 수 없는 문제를 개선하여 LQG의 가격함수에 있는 최소자승오차를 구하는 문제를 주파수별 전달함수의 루-프 형태의 문제로 해석하여 가격함수의 설계 파라미터를 선정하는 기법이다.

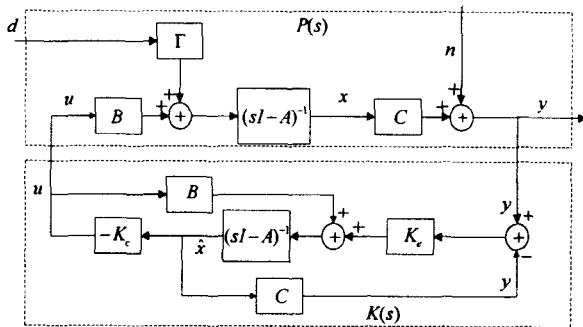


그림 3 LQG 제어 시스템의 구조도
Fig. 3 Structure of LQG

위 그림 3과 같이 구성된 일반적 플랜트와 제어시스템에 대하여 시스템 방정식은 다음과 같이 표현된다

$$\dot{x} = Ax + Bu + \Gamma d \tag{8a}$$

$$y = Cx + n \tag{8b}$$

여기서, A, B, C, Γ ,는 적절한 차원을 갖는 시스템행렬을, x, y 는 각각 상태변수와 플랜트 출력이며, d, n 은 식(9)와 같은 특성을 갖는 확률적 외란과 백색잡음을 갖는 잡음 신호를, τ 는 샘플링시간 간격을, $E\{\cdot\}$ 은 확률적 기대치를 의미한다.

$$E\{d(t)\} = 0, \tag{9a}$$

$$E\{n(t)\} = 0, \tag{9b}$$

$$E\{d(t)d(t+\tau)^T\} = Q_0\delta(t-\tau) \tag{9c}$$

$$E\{n(t)n(t+\tau)^T\} = R_0\delta(t-\tau) \tag{9d}$$

$$E\{d(t)n(t+\tau)^T\} = 0 \quad \forall t, \tau \geq 0 \tag{9e}$$

여기서, $\delta = \begin{cases} 1, & \text{if } i=j \\ 0, & \text{if } i \neq j \end{cases}$ (kronecker delta)를 나타낸다.

3.2 최적 관측기(칼만필터)의 이득계산

위 식 (8)과 (9)로 주어진 확률적 선형 시스템의 최적관측기는 식 (10)으로 표현되는 추정치 오차의 공분산치를 최소화하는 목적함수로부터 구해진다.

$$J_0 = E\{\hat{x}^T \hat{x}\} \tag{10}$$

여기서, $\hat{x} = x - \hat{x}$ 즉, 상태변수의 Error covariance 이다. 행렬 (C, A) 가 검출가능(*)하다는 가정과 $BB^T = Q_0$ 이고 행렬 (A, Γ) 이 안정가능(**)하다는 가정하에 최적상태 추정의 동태 방정식은 다음과 같이 주어진다.

$$\dot{\hat{x}} = A\hat{x} + Bu + K_e(y - C\hat{x}) \tag{11}$$

여기서, \hat{x} 는 상태변수의 추정치를 뜻하며, 필터이득(K_e)은 식 (12)으로 주어진다. 이를 만족하기 위한 Riccati 대수 방정식은 식 (13)으로 주어지고, (Σ)이 Riccati 방정식의 해이다.

$$K_e = \Sigma C^T R_0^{-1} \tag{12}$$

$$A\Sigma + \Sigma A^T + \Gamma Q_0 \Gamma^T - \Sigma C^T R_0^{-1} C \Sigma = 0 \tag{13}$$

[주] : * (가검출성) : 상태변수의 모두가 가관측성이거나 일부 모드가 관측 불가능하여도 모두 안정된 모드인 경우.

** (가안정성) : 상태변수의 모두가 가제어성을 갖거나 일부 모드가 제어 불가능하여도 모두 안정된 모드인 경우.

3.3 상태귀환 보상기의 이득계산

식 (8)로 표현되는 선형 시스템의 상태 귀환 보상기의 제어 목적 함수는 식 (14)로 주어진다.

$$J = \lim_{T \rightarrow \infty} \frac{1}{2} E\left\{ \int_0^T (\hat{x}^T Q \hat{x} + u^T R u) dt \right\} \tag{14}$$

식 (14)으로 표현되는 목적함수는 LQR 설계 문제에서의 Hamilton-Jacobi-Bellman이론에 의해 Hamiltonian으로 표현하면 식 (15)과 같고 최적조건은 각 변수의 편미분이 영(0)이 되는 극한치를 가질 조건으로부터 (16)을 얻는다.

$$H(\hat{x}, \lambda, t) = \frac{1}{2} (\hat{x}^T Q \hat{x} + u^T R u) + \lambda^T (A \hat{x} + Bu) \tag{15}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\lambda} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -BR^{-1}B^T \\ -Q & -A^T \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \lambda \end{bmatrix} \tag{16}$$

여기서, λ 는 최적문제를 구하기 위해 도입된 매개변수이고, $\lambda = P\hat{x}$ 의 선형관계를 이용하여 식 (16)에 대입하고 $t \rightarrow \infty$ 이면 $\frac{dP}{dt} = 0$ 로부터 다음의 Riccati 대수 방정식(17)를 얻는다.

$$A^T P + PA + Q - PBR^{-1}B^T P = 0 \tag{17}$$

이로부터 최적 귀환보상기의 이득은 식 (18)을 얻고, 이 때 상태귀환 메모리스(Memoless) 보상기는 식 (19)으로 주어진다.

$$K_c = R^{-1}B^T P \tag{18}$$

$$u = -K_c \hat{x} \tag{19}$$

앞 식 (12)와 (18)의 결과를 이용하여 LQG 제어기의 시스템 방정식은 다음과 같이 얻는다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ u \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_k & B_k \\ C_k & D_k \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ y \end{bmatrix} \quad (20)$$

여기서, $A_k = A - BK_c - K_e C$, $B_k = K_e$, $D_k = 0$, $C_k = -K_c$ 이며, 이를 전달함수형태로 표현하면 식 (21)이 된다.

$$K(s) = \frac{u(s)}{y(s)} = C_k(sI - A_k)^{-1}B_k + D_k \quad (21)$$

3.4 Loop-Transfer Recovery 설계과정

LTR설계 과정은 크게 3가지로 구별된다. 우선 설계대상 플랜트에 임의의 기준입력이나 0-정상상태 오차를 갖도록 자유적분요소 ($\frac{1}{s}$)를 추가한다. 물론, 이미 이러한 성능을 얻을 수 있는 경우에는 이 과정은 불필요하다. 다음에는 목표 필터 루-프(TFL)를 설계하는 과정이다. 페루-프 전달함수의 주파수별 감도함수(sensitivity function)의 성능요건은 일반적으로 다음과 같이 요구된다. 즉, 제어목표치의 빠른 tracking 능력과 발생된 외란의 영향을 억제하기 위해서는 저주파수 대역에서의 이득이 일정한 크기 이상이 요구되며, 측정센서의 잡음을 비롯한 고주파수 대역의 이득은 일정한 크기 이하가 되도록 해야 한다. 그림 4에서 PSS 설계를 위한 주파수 대역별 바람직한 감도함수 및 전달함수의 목표치 필터의 이득선도를 보이고 있다. 앞의 식 (9d)에서 센서의 잡음을 $R_0 = \mu I$ 로 두면, 식 (12), (13)는 다음 식(22), (23)과 같이 변환된다.

$$K_e = \frac{1}{\mu} \Sigma C^T \quad (22)$$

$$A\Sigma + \Sigma A^T + \Gamma Q_0 \Gamma^T - \frac{1}{\mu} \Sigma C^T C \Sigma = 0 \quad (23)$$

또한, 목표 필터루-프의 전달함수는 다음 식 (24)를 얻는다.

$$G_F(s) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} C(sI - A)^{-1}K_e \quad (24)$$

이 경우 페루-프 감도함수 및 여감도함수는 각각 식 (25),

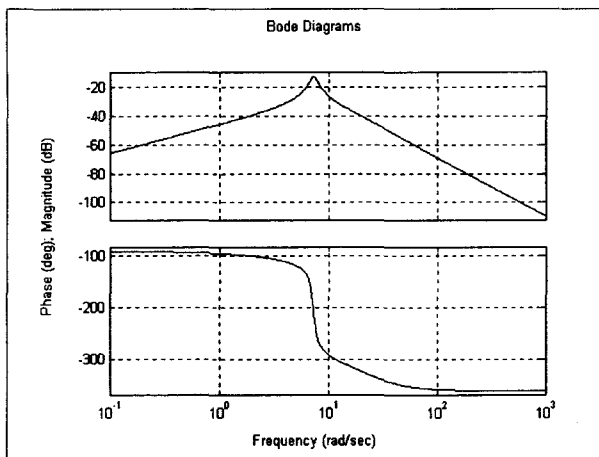


그림 4 μ 값 변화에 따른 감도함수의 주파수 응답특성
Fig. 4 Frequency Response of Sensitivity Function due to μ value changes

(26)과 같으며, 결국 이러한 성능조건과 견실성 조건을 만족시키는 K_e 를 결정하는 문제이다.

$$S_F = [I + G_F(s)]^{-1} \quad (25)$$

$$C_F(s) = [I + G_F(s)]^{-1}G_F(s) \quad (26)$$

이는 칼만필터의 구조와 전적으로 동일한 것으로 설계 파라미터 K_e 를 결정하기 위해 식 (23)으로 주어진 칼만필터의 Riccati 방정식의 해를 구하는 것과 같다. 이는 곧 식 (24)는 식 (27)과 동가화된다.

$$-G_F(s) = \frac{1}{\sqrt{\mu}} C(sI - A)^{-1}\Gamma \quad (27)$$

따라서, 바람직한 목표치 필터루-프의 설계는 적절한 μ, Γ 를 선택하는 문제로서 Γ 는 바람직한 루-프의 형상이 되도록 선정하고, μ 는 요구되는 대역폭 혹은 교차 주파수를 만족하도록 선정한다. 즉, 주파수 응답이 원하는 설계목적에 알맞도록 외란 입력 행렬인 Γ 로써 루-프 형상을 조정하고, 다음에 μ 값을 적절히 조정하여 루-프 형상을 위아래로 조정하면서 요구되는 대역폭을 선택한다. 마지막으로 루-프전달회복(LTR)을 위한 단계로써 TFL과정에서 보상된 루-프의 전달함수를 회복하는 과정이다. 이는 LQR 과정의 목적함수의 가중행렬을 다음과 같이 $Q = C^T C$, $R = \rho I$ 로 두고 $\rho \rightarrow 0$ 인 대수 Riccati 방정식의 해를 구한다. 이때 식(17)은 다음 식 (28)와 같이 변환되고, 귀환보상기 이득의 식 (18)는 식 (29)와 같이 변환된다.

$$A^T P + PA + C^T C - \frac{1}{\rho} P B B^T P = 0 \quad (28)$$

$$K_c = \frac{1}{\rho} B^T P \quad (29)$$

식 (23)의 Riccati 방정식은 ρ 의 극한 조건에서(단, 최소위상 플랜트의 가정하에) $\lim_{\rho \rightarrow 0} C^T C - (\frac{1}{\sqrt{\rho}} P B)(\frac{1}{\sqrt{\rho}} B^T P) \rightarrow 0$ 이 되어 위 식(29)와 조합하면 식 (30)의 관계를 얻는다.

$$(\frac{1}{\sqrt{\rho}} K_c)^T (\frac{1}{\sqrt{\rho}} K_c) \rightarrow C^T C \quad (30)$$

즉, $\lim_{\rho \rightarrow 0} (\sqrt{\rho} K_c) \rightarrow UC$ 을 얻는다. (단, $U^T U = D$) 이 결과는 LQG 설계문제가 안정도 여유 확보가 쉬운 LQR의 문제로 귀착되어 설계의 유연성을 가짐을 뜻한다.

4. LQG/LTR 제어 시스템의設計

4.1 설계사양과 시스템 방정식 설정

PSS의 설계를 위해서는 전력계통의 동태 안정화 문제를 다루어야 하고 이는 식 (1)의 동요 방정식(swing equation)에 근거한 특성방정식의 고유치 위치 설정문제로 정의된다. 따라서, 평가지표로 고려되는 출력평가함수는 부하각의 크기변화량이며, 제어 에너지를 최소화하는 제어 시스템의 일반적 요건에 따라 제어기 출력신호(즉, 제어 입력량)의 크기도 선정한다. 따라서, PSS의 설계 사양은 다음과 같이 정의한다.

- ㉠ 일정한 크기의 계단입력과 외란에 대하여 0-정상상태의 오차를 유지하고,
- ㉡ 모델링 오차에 대하여 다음과 같은 안정도와 견실성의

설계 사양을 만족시키는 최대 대역폭을 갖는 시스템을 설계한다.

$$\text{즉, } \sigma_{\max}\{E(j\omega)\} < 0.2w \quad (31)$$

이를 위하여 주어진 플랜트의 시스템 방정식을 정리하면 다음과 같다.

① 외란 입력신호
 $[d_1 \ d_2 \ n_1]' = [\Delta P_m \ \Delta e_{20} \ \theta_1]'$ (32)

여기서, θ_1 는 측정 센서의 0-평균의 표준 공분산치이다.

② 상태 방정식 : $\frac{dx}{dt} = A_s x + B_s \mu + \Gamma d$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta e'_{q'} \\ \Delta v_i \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{K_D}{2H} & -\frac{K_1}{2H} & -\frac{K_2}{2H} & 0 \\ w_b & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_3}{T_{d0}'} & -\frac{1}{K_3 T_{d0}'} & \frac{1}{T_{d0}'} \\ 0 & \frac{K_5}{T_r} & \frac{K_6}{T_r} & -\frac{1}{T_r} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta e'_{q'} \\ \Delta v_i \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_r} \\ 0 \end{bmatrix} [\Delta U_i] + \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 1 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \end{bmatrix} \quad (33)$$

여기서, 상태행렬의 계수는 식 (1) - (8)로부터 얻는다.

③ 플랜트 출력 방정식 : $y = C_s x + n$

$$[\Delta w_r] = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta e'_{q'} \\ \Delta v_i \end{bmatrix} + [\theta_1] \quad (34)$$

④ 설계모델 플랜트의 설정

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (35)$$

$$y = Cx$$

여기서, $A = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ B_p & A_p \end{bmatrix}$, $B = \begin{bmatrix} I \\ 0 \end{bmatrix}$, $C = [0 \ C_p]$, $x(t) = \begin{bmatrix} u_p(t) \\ x_p(t) \end{bmatrix}$

4.2 LQG/LTR의 주요 설계결과

본 설계의 수행을 위해서는 Riccati 방정식의 해를 구해야 하므로 수계산은 거의 불가능하다. 그림 5에서 제어기 설계용 프로그램의 흐름도를 보인다. 또한, 그림 4에서 감도함수의 주파수 응답 특성을 보인다. 모델링 오차에 대한 안정도와 견실성 조건을 만족시키는 설계 파라미터는 $R_0 = \mu I$ 의 가정된 센서 잡음으로부터 $\mu = 0.05$ 를 구하여 식(22), (23)에 대입하여 이 가정된 값이 견실성조건을 만족하는지를 검사한다. 또한, 표 2의 플랜트 조건으로부터 구한 설계결과의 주요 내용을 표 1에서 보인다. $\rho \rightarrow 0$ 로 접근함에 따라 Loop Recovery 특성을 보이고, 이 것이 적절한 제어기 설계 파라미터의 결과이다. 따라서, 식 (20)으로 표현한 제어기 상태행렬 결과식은 다음과 같다.

$$A_k = \begin{bmatrix} -2.0187 & -0.1092 & -0.1236 & 0 \\ 377.0000 & 0 & 0 & 0 \\ 221.4355 & -1.4497 & -2.4695 & -26.2436 \\ 5.9512 & -7.3125 & 20.8391 & -50.0000 \end{bmatrix}$$

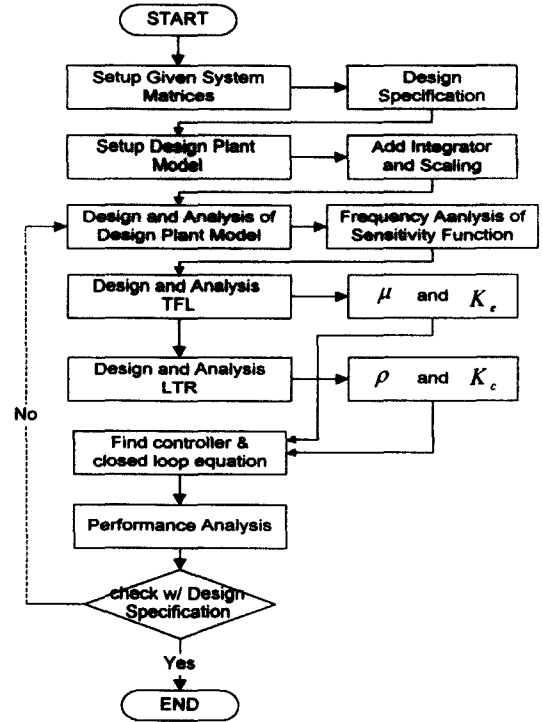


그림 5 LQG/LTR 설계 프로그램 흐름도
 Fig. 5 Design Flow chart of LQG/LTR

표 1 ρ 값의 변화에 따른 LQG/LTR 보상기의 고유치, K_e , K_c 값의 변화
 Table 1 Eigen Values, Estimator Gains and Regulator Gains due to ρ Changes

ρ 값	고유치	K_e 값	K_c 값
1	1.0e+003 * -4.8862 ± 4.8862i 0.0000 -0.0500	1.0e+008 * 0.0001 0.0000 -3.8629 -0.0164	-7.4251 0.0454 0.0743 -0.0390
10^{-2}	1.0e+002 * -1.5358 ± 1.5555i -0.4996 -0.0001	1.0e+005 * 0.0031 0.0000 -3.8057 -0.4346	-7.4251 0.0454 0.0743 -0.0390
10^{-4}	-31.3183 -19.7930 -1.8512 ± 7.0761i	4.3909 0.0000 -77.9933 -33.0955	-7.4251 0.0454 0.0743 -0.0390
10^{-6}	-31.2294 -20.2025 -0.5048 ± 7.2325i	2.0187 0.0000 -16.4852 -5.9512	-7.4251 0.0454 0.0743 -0.0390

$$B_k = [2.0187 \ 0.0000 \ -16.4852 \ -5.9512]'$$

$$C_k = [-7.5026 \ 0.0460 \ 0.0749 \ -0.0393]$$

$$D_k = [0]$$

또한, 이 경우의 필터 이득과 보상기의 이득 및 고유치 값은 다음과 같다.

$$K_e = [2.0187 \ 0.0000 \ -16.4852 \ -5.9512]'$$

$$\Sigma = \begin{bmatrix} 0.0101 & 0.0000 & -0.0824 & -0.0298 \\ 0.0000 & 27.2929 & 6.6736 & -1.4345 \\ -0.0824 & 6.6736 & 2.308 & -0.1066 \\ -0.0298 & -1.4345 & -0.1066 & 0.1636 \end{bmatrix}$$

$$\lambda_e = [-31.2294 \ -20.2025 \ -0.5048 \pm 7.2325i]$$

$$K_c = [-7.4251 \ 0.0454 \ 0.0743 \ -0.0390]'$$

$$\lambda_c = [-31.2253 \ -20.2106 \ -0.5088 \pm 7.2326i]$$

5. 事例 研究 및 시뮬레이션 結果

본 연구의 유용성을 검증하기 위하여 설계된 결과를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 실시하였다. 이 실험에서 고려된 플랜트 모델의 정수 및 정상상태 운전 조건은 표 2에 나타낸 바와 같다. 상정된 외란 신호로서 플랜트 입력(터빈 출력)과 출력조건(모선전압)을 계단함수 형태로 인위적으로 인가하여 변화량을 고찰하였으며, 그림 6, 7에서 여가기의 입력변화가 없는 상태(즉, 수동운전)와 기존의 lead-lag 필터로 설계된 PSS와 LQG/LTR 제어기로 설계된 PSS의 성능을 비교하였다. 수동운전인 경우에는 동기 발전기가 불안정하여 탈조현상을 보이고 있으며, 기존의 lead-lag 필터형 PSS를 사용한 경우에는 제동력이 약하여 진동현상을 보이나, 제안된 LQG/LTR 제어기를 사용한 경우에는 진동후 곧 수렴하여 안정성이 뛰어난 것으로 평가되고 있다. 이들 각 경우에 대한 속도 편차량의 변화와, 부하각 편차량의 변화를 그림을 통하여 상호비교하였다. 이 두 그림으로부터 알 수 있듯이 외란 유입시에도 LQG/LTR 제어기에 의한 출력은 극히 미소의 변화 후에 곧 수렴하여 안정성을 되찾아 견실성이 매우 우수함을 발견할 수 있었다. 가역함수의 가중치의 크기는 LTR 구속 조건 범위 내에서 구속하였으며, 측정오차의 조건은 0-평균잡음에 5% 분산의 정확도를 갖는 계측기로 가정하였다.

표 2 플랜트 데이터와 운전 조건
Table 2 Plant Data and Initial Operating Values

Parameter Data	Initial Values
Generator Data	
$H=3.82, K_D=0.0026$	$P_0=1.0, \delta_0=80.5^\circ$
$w_b=2\pi f_b=377,$	$P_{d0}=0.9,$
$R_s=0.0037, X_d=1.75$	$Q_{d0}=0.3(\text{overexcited})$
$X_d'=0.285, X_q=1.68$	$e_{B0}=0.995 \angle 0^\circ,$
$X_q'=0.47, R_e=0.014$	$e_0=1.00 \angle 36^\circ$
$X_e=0.4448, X_f=0.1248$	$T_{d0}'=4\text{sec}$
$R_f=0.0064, K_A=200$	$K_1=1.591, K_2=1.5$
$T_r=0.02$	$K_3=0.333, K_4=1.8$
PSS Data	
$K_C=9.5, T_W=1.4$	$K_5=-0.12, K_6=0.3$
$T_1=0.154, T_2=0.033$	

(단, 모든 단위는 Per Unit 및 초(sec)이다)

6. 결 론

지금까지 단일 터빈 발전기계에 대하여 운전 중에 발

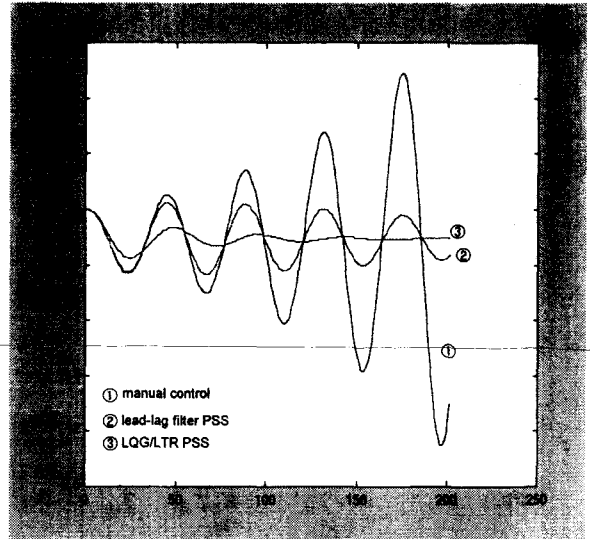


그림 6 계단함수의 외란(Δe_B)에 대한 속도 편차량 변화
Fig. 6 Speed deviation response for step function input of disturbances (Δe_B)

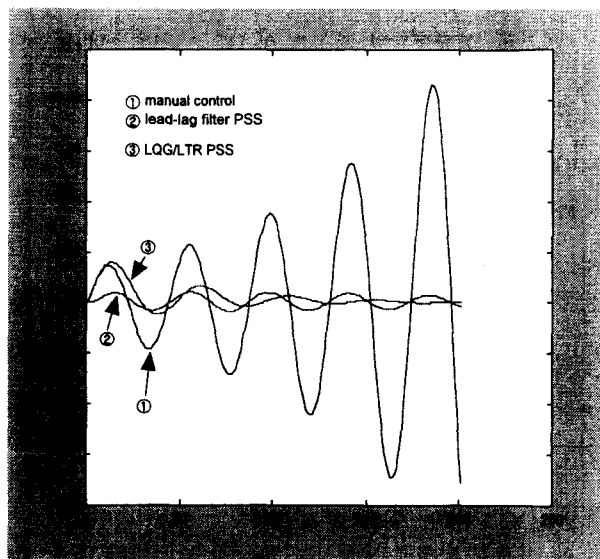


그림 7 계단함수의 외란(Δe_B)에 대한 부하각 편차량변화
Fig. 7 Power angle deviation response to step function input of disturbances (Δe_B)

생하는 모델링 오차를 포함한 크고 작은 미지의 외란한 입력에 대하여 동특성 안정도를 개선하고자 PSS 설계를 위하여 LQG/LTR 제어이론을 적용하였다. 본 연구의 과정과 시뮬레이션 결과를 통하여 종래의 Lead-Lag 필터로 설계된 PSS를 사용한 경우에 비하여 우수한 견실성의 성능을 가짐을 발견할 수 있었다. 즉, 동특성 안정도는 부하각 미분방정식에 의해 결정되므로 부하각의 편차 변화량이 매우 적고 곧 안정상태로 수렴하는 결과를 보인다. 이 결과는 터빈 발전기 시스템의 소신호 안정도 확보를 위한 바람직한 제어 시스템으로 제안될 충분한 가치가 있다. 또한, 본 연구를 통하여 다음과 같은 제어 특성을 얻을 수 있었다.

(1). 전력계통 전압을 가장 악조건(3산 단락)의 외란 신호인 단위계단 함수의 변화량을 인가하였을 경우 부하각의 변화와 단자전압의 변화량을 비교한 결과 종래의 PSS에 비하여 그 성능이 매우 우수하다.

(2) 외란이 항상 존재하는 터-빈 발전기 계통의 건설성 제어를 위해서 LQG/LTR 제어이론을 적용한 컴퓨터 제어방식이 이 분야에 새로운 제어방식으로 제안된다.

참 고 문 헌

[1] Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc, 1993.
 [2] P.M. Anderson., A.A. Faud, "Power System Control and Stability", Iowa State University Press, 1977.
 [3] J.C. Doyle, K, Glover, "State-Space Solution to standard H_2 and H_∞ Control problem", IEEE Autom. Control, Vol. 38 No. 8, pp. 831-847, 1989.
 [4] Q.H. Wu and B.W. Hogg, "Robust self-tuning regulator for a synchronous generator", IEE proc., Vol. 135, pp463-473, 1988.
 [5] D. Xia, "Self-tuning Controller for Generator excitation control", IEEE PAS, Vol. PAS-102, No. 6, 1877-1885, June, 1983.
 [6] IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System", IEEE, T-73 089-0, pp 1904-1915, Dec., 1972.
 [7] Bruce A. Francis, "Robust Control Theory", Springer-Verlag, pp. 81-104, 1993.
 [8] Ronald R. Mohler, "Nonlinear System Dynamics and Control", Prentice Hall, pp. 53- 91, 1991.
 [9] Bahram Shahian and Michael Hassul, "Control System Design using MATLAB", Prentice Hall, pp. 421- 448, 1993.
 [10] R. G. Brown and P.YC.Hwang, "Introduction to Random signals and Applied Kalman Filtering", John Wiley & Sons, pp. 190-311, 1997.
 [11] William S. Levine, "The Control Handbook Vol. I and II", CRC Press and IEEE Press, pp. 595-606, 1996.
 [12] 김종식, "선형제어시스템공학", 청문각, pp. 487-520, 1997.

저 자 소 개



정 대 원 (鄭大源)

1957년 8월 6일생. 1983년 부산대 공대 전기공학과 졸업. 1996년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 박사수료. 1982년 - 1990년 한국전력기술 선임기술원. 1990년- 1997년 한국원자력연구소 선임연구원. 1997년 3월 - 현재 호남대학교 공대 전기공학과 조교수
 Tel : (062) 940-5494
 E-mail : dwchung@honam.honam.ac.kr



김 건 중 (金建中)

1953년 2월 21일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사). 1977년 해군 제 2사관학교 교수. 현재 충남대 공대 전기공학과 교수
 Tel : (042) 821-5659
 E-mail : kjkim@ee.chungnam.ac.kr