

$H_\infty$  Control Synthesis for Robust Control of a Turbo-Generator

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

**Abstract** - This paper presented to design a robust turbo-generator control system using  $H_\infty$  control synthesis for improving small-signal stability. Application study of  $H_\infty$  control synthesis is more appropriate in this system since a turbo-generator system is usually operated under circumstance of unmeasurable modelling uncertainty and external disturbance. The  $H_\infty$  control theory was briefly reviewed for good understanding and the reasonable 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** : robustness, uncertainties, Hamiltonian matrix, Riccati equation, dynamic stability

## 1. 서 론

터빈발전기의 견실성 제어는 전력계통운용에서 동태안정도 향상의 문제와 직결된 문제로써 전력계통이 복잡해지고 대형화되는 현재의 추세에 비추어 그 중요성이 강조되고 보다 고품질의 신뢰성이 높은 양질의 전력공급을 요구하는 수용자를 위해서도 해결해야 할 중요한 과제이다. 특히, 최근에 설치되는 발전기의 제어시스템은 과도안정도를 향상시키기 위하여 속응성이 뛰어난 정지형(static type) 여자방식을 많이 채택하고, 여자의 이득을 높이는 결과로 시스템의 과도 응답속도는 매우 빨라져 과도안정도는 향상되는 효과를 얻는 반면에 동태 안정도(dynamic stability)는 오히려 악화될 우려가 있어 그 채택에서 신중을 기해야 한다. 동태 안정도 문제는 근본적으로 미소 크기의 에너지 불균형 현상에서 기인한 것으로 안정도가 깨져 대형사고로 진전되기 직전의 문제로써 에너지 불수급의 원인이 되는 외란이 유입시 발전기 회전축에서 발생하는 부하각의 미분방정식에 의해 결정된다. 즉, 2차 특성방정식으로 표현되는 동요방정식에서 자연진동주파수와 제동계수의 크기를 지배하고 있는 발전기계통의 동기화 토-크와 제동 토-크의 크기에 의해서 결정되어 진다. 앞서 언급한 정지형(static) 여자방식의 채택은 동기화 토-크(synchronizing torque)는 증가시킬 수 있으나 제동 토-크(damping torque)는 오히려 부(negative)의 상태를 증가시켜 제동력을 보다 약화시켜 동태 안정도를 저

하시키는 원인이 된다. 그러나, 정(positive)의 제동 토-크는 외란 발생시에 그 에너지를 흡수하는 효과를 가져와 회전축의 진동을 억제시키고 동요를 방지하여 시스템을 안정화시킨다. 따라서, 항상正的 제동계수를 가짐이 이러한 측면에서 바람직하지만 발전기계통의 물리적인 제약조건에 의해 현실적으로는 매우 제한적이고 전력계통이 운전 상태에 따라 매우 유동적일 수밖에 없다. 그리하여, 이러한 제약 조건을 극복하고 동태안정도를 향상시킬 목적으로 최근에는 전력계통에 제동 안정화 장치(Power System Stabilizer; PSS)가 별도로 설치되고 있는 실정이다. 그러나, 모든 발전기에서 이 PSS의 설치는 바람직스럽지 못하고 상정된 운전모드에서 시스템의 안정도 해석을 통해서 불안정 모드에 가까운 발전기들만에 대하여 PSS를 설치함이 바람직한 것으로 보고되고 있다. 이와 같은 배경에서 견실성을 갖도록 동태안정도 문제를 개선하려는 많은 연구가 진행되어 왔으며, 적응 제어이론에 근거한 자기동조기(Self-tuning Regulator)의 적용 연구가 그 주류를 이룬다[4,5].

$H_\infty$  제어이론은 1980년대 초반 G. Zames에 의해 처음 소개된 이후 1988년 K.Glover와 J.C. Doyle에 의해 구체적인 완성을 보게 되었으며, 그 기본적인 개념은 시스템의 파라미터 변동을 포함한 모델링 불확실성에서 기인한 모델링 오차와 운전중에 외부적 요인으로 발생하는 여러 종류의 외란 유입시에 그 영향을 최대한 억제하여 제어시스템이 안정성을 보장하여 원하는 제어성능을 만족스럽게 얻을 수 있어 견실성이 우수한 제어기법으로 그 유용성이 널리 입증되고 있다. 전력계통에 연계된 터빈발전기 시스템은 전형적인 비선형 시스템으로 운전 모드에 따라 파라미터 변화가 많아 모델링 오차가 매우 큰 시스템이며, 복잡한 부속 시스템을 보유하고 대형 전력계통과도 직접 연계되어 운전됨으로써 외란 요소가 매우 많은 시스템중의 하나이다. 국내에서도  $H_\infty$  제어기법의 응용에 관한 많은 연구가 진행되어 왔으며, 분야별 광활한 만한 연구성과를 얻은 것으로 보고 되고 있

\* 正 會 員 : 湖 南 大 工 大 電 氣 工 學 科 助 教 授 · 博 士 修 了

\*\* 正 會 員 : 忠 南 大 工 大 電 氣 工 學 科 教 授 · 工 博

接 受 日 字 : 1999年 2月 25日

最 終 完 了 : 1999年 3月 29日

다[12,13]. 그러나, 비교적 많은 불확실성을 내포하고 있는 터-빈 발전기의 제어 시스템에 대한 적용연구는 보고되지 않고 있다.

본 논문에서는 이와 같은 점에 착안하여 전실성이 우수한  $H_\infty$  제어기법을 적용하여 터-빈 발전기 제어 시스템을 설계하여 그 성능을 분석하여 기존 시스템에 비하여 제동효과는 물론 안정도를 향상시키는 바람직한 연구결과를 얻을 수 있는 새로운 설계기법으로 제시하고자 한다. 여자기 시스템은 본 연구목적에 부합되게 정지형(static type)을 대상으로 모델링을 하였으며, 설계된 결과는 기존의 Lead/Lag 필터로 구성된 PSS를 사용한 경우와 그 성능을 비교 분석하였다.

## 2. 터-빈 발전기의 모델링

### 2.1 概要

터-빈발전기는 보일러에 의해 생산된 가열증기의 열에너지를 이용하여 증기 터-빈을 회전시켜 발전기에서 전력수요자들이 편리하게 사용할 전기에너지를 얻기 위한 에너지 변환장치이다. 제어시스템 관점에서 열에너지 생산원인 보일러는 기계, 전기에너지 변환장치인 터-빈 발전기의 시정수에 비하여 매우 커서 동태 안정도 문제에서 그 역할은 무시할 수가 있다. 또한, 일반적으로 터-빈의 응답 시정수도 발전기에 비하여 큰 편이나 동요방정식의 제동비를 지배하고 있는 수하(Droop) 요소가 가버너의 입력으로 사용되므로 본 모델링에 포함시켜 문제를 접근하는 것이 보편타당하다. 따라서, 본 논문에서 고려되는 대상 플랜트는 터-빈의 입력장치인 조속기에서부터 전력계통의 정전압원으로 간주되는 무한대 모선까지로 한정한다. 이 영역의 전체 시스템 구성과 제어 특성도는 그림 1과 같이 다소 복잡하게 구성되어 있으나 본 전실성 제어 문제를 다루기 위한 모델설정은 다음의 가정과 조건하에 간략화 된 모델을 사용한다.

- (1) 터-빈은 고압 및 중저압으로 구성된 단일재생 증기터빈은 유효 시정수를 갖는 단일 터빈으로 가정한다.
- (2) 조속기의 시정수는 비교적 짧으므로 Droop 특성만을 고려한다.
- (3) 발전기의 회전자는 증기터-빈의 원통형의 비철극기로 고정자 및 회전자의 모든 제동권선의 영향은 무시한다. 또한, 과도기간중 계자회로의 포화현상은 무시한다.
- (4) 발전기의 기본모델은 Park방정식[1,2]을 기준하며, 연구목적에 부합되게 공극의 유기전압 기준모델을 사용하고 수식의 유도과정은 참고문헌을 참조하여 생략한다.
- (5) 여자는 정지형(static)을 기준하되 자기회로의 포화특성과 시간지연만을 고려한다.

### 2.2 선형화한 터-빈 발전기의 모델

여자를 포함한 터-빈 발전기는 전형적인 비선형 시스템이며, 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.

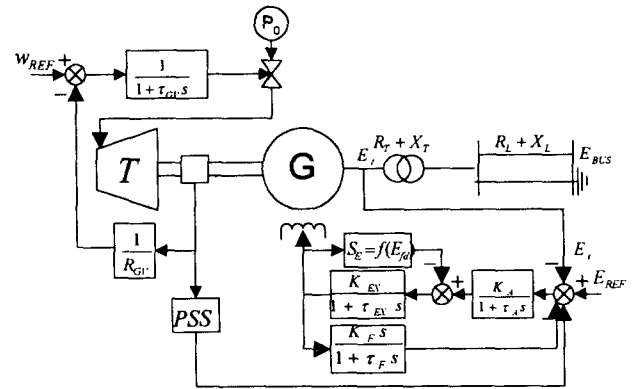


그림 1 기 무한대 모선 터-빈 발전기의 시스템 선도  
Fig. 1 System diagram of a turbo-generator for the infinite bus

$$p\Delta T_m = \frac{1}{\tau_T} (P_0 \Delta U_{GV} - \frac{1}{R_{GV}} \Delta w_r - \Delta T_m) \quad (1)$$

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

$$\Delta T_e = K_1 \Delta \delta + K_2 \Delta E'_q \quad (3)$$

$$p\Delta \delta = w_r \Delta w_r \quad (4)$$

$$p\Delta E'_q = -\frac{K_4}{\tau_{d0}} \Delta \delta - \frac{1}{K_3 \tau_{d0}} \Delta E'_q + \frac{1}{\tau_{d0}} \Delta E_{fd} \quad (5)$$

$$p\Delta E_{fd} = \frac{K_e}{\tau_e} \Delta U_{VR} - \frac{K_e}{\tau_e} \Delta E_t - \frac{1}{\tau_e} \Delta E_{fd} \quad (6)$$

$$\Delta E_t = K_5 \Delta \delta + K_6 \Delta E'_q \quad (7)$$

$$P_{d0} = T_{d0} = \frac{E_{d0}' E_{B0}}{X_T} \sin \delta_0 \quad (8)$$

여기서, 모든 계량은 Per Unit 값으로 변환된 값이고 각 계수는 다음과 같이 정의하고 각 변수의 정의는 참고문헌[1]을 참조한다.

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

$$K_3 = \frac{X'_d + X_e}{X_d + X_e}, \quad K_4 = \frac{1}{K_3} \left. \frac{\partial E'_q}{\partial \delta} \right|_{E_{fd} = \text{const}}$$

$$K_5 = \left. \frac{\partial E_t}{\partial \delta} \right|_{E'_q = \text{const}}, \quad K_6 = \left. \frac{\partial E_t}{\partial E'_q} \right|_{\delta = \text{const}}$$

### 2.3 여자기 모델

여자는 발전기의 회전자에서 공극에 자속을 제공하기 위하여 자화회로, 자동전압조절기(AVR) 및 안정화회로로써 일반적으로 구성된다. 또한, 여자는 여자전압의 공급방법에 따라 그 형태와 특성에 매우 다른 모델이 제시되고 있다. 본 논문에서는 앞서 언급한 대로 비교적 응답속도가 빠르며 제동력이 약한 정지형 방식모델을 기준하였다. 참고로 그림 1의 하단부분에서 동기기에서 사용되고 있는 일반적인 여자의 블록선도를 보이고 있다.

### 3. $H_\infty$ 制御理論의 整理와 接近

#### 3.1 $H_\infty$ 제어의 개념과 시스템 방정식

$H_\infty$  제어이론은 모델링 오차를 포함한 미지의 외란에 대하여 모든 주파수 영역에서 전달함수의  $\infty$ -노름(norm)을 일정한 크기로 제한하여 시스템응답에서 안정성과 견실성을 보장하여 만족스러운 제어성능을 얻도록 하는 제어시스템의 설계기법이다. 이 이론의 초기개념은 크기가 각기 다른 외란을 비롯한 모델의 불확실성에 대하여 주파수별 제어목적의 성능요건을 달리하여 외란 억제효과를 얻을 수 있는 주파수별 민감도 측정에서부터 출발하였다. 그후 컴퓨터의 발달과 함께 이론의 발전을 거듭하여 1988년경에 그 완성을 본 후 그 적용성에 관한 많은 연구가 발표되고 있다.

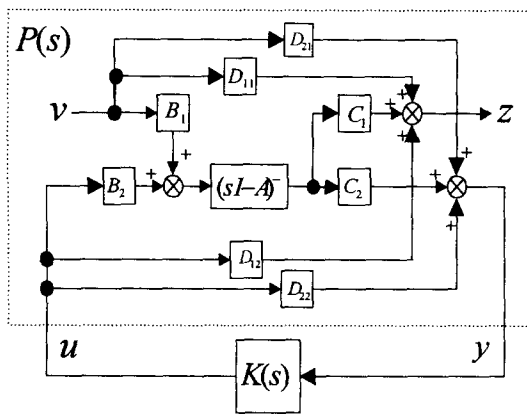


그림 2 일반적인 제어시스템의 구조  
Fig. 2 Structure of general control system

그림 2와 같이 구성된 일반적 플랜트와 제어시스템에 대하여 시스템 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1v + B_2u \\ z &= C_1x + D_{11}v + D_{12}u \\ y &= C_2x + D_{21}v + D_{22}u \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $A, B_1, B_2, C_1, C_2, D_{11}, D_{12}, D_{21}, D_{22}$ 는 적절한 차원을 갖는 시스템 구조행렬이며,  $x, y, z, v, u$ 는 각각 상태변수, 플랜트 출력, 평가함수의 출력, 모든 외부입력신호 및 제어기 출력신호이다. 이 경우 제어기는 다음 식 (10)의 형태로 표현된다.

$$u = K(s)y \quad (10)$$

위 식 (9)를 전달함수의 형태로 나타내면,

$$\begin{aligned} \begin{bmatrix} z \\ y \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} C_1 \\ C_2 \end{bmatrix} (sI - A)^{-1} \begin{bmatrix} B_1 \\ B_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} D_{11} & D_{12} \\ D_{21} & D_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ u \end{bmatrix} \\ &= \begin{bmatrix} G_{11} & G_{12} \\ G_{21} & G_{22} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v \\ u \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (11)$$

로 정리된다.

식 (11)로부터 외부입력  $v$ 에 대한 평가함수의 출력  $z$ 의

전달함수는 식 (12)과 같은 선형분수형 행렬식을 얻는다.

$$\begin{aligned} T_{zv}(s) &= \frac{z(s)}{v(s)} \\ &= G_{11} + G_{12}K(s)(I - G_{22}K(s))^{-1}G_{21} \end{aligned} \quad (12)$$

이 경우 제어기의 전달함수는 식 (13)과 같다.

$$K(s) = C_k(sI - A_k)^{-1}B_k + D_k \quad (13)$$

#### 3.2 目的函数와 最適化

$H_\infty$  제어기 설계를 위한 성능평가기준인 목적함수는 아래 식 (14)으로 표현되고, 모든 주파수 영역에 대하여 전달함수의 노름(norm)을 일정한 크기로 구속한 신호(즉, 최악의 외란신호)  $v(j\omega)$ 에 대한 평가신호  $z(j\omega)$ 의 크기를 일정한 상한치 이내로 구속(Bound)하기 위한 전달함수의  $\infty$ -노름(norm) (즉,  $\|T_{zv}\|_\infty$ )을 최소화하는 문제이다. 즉, 다음 식 (14)가  $\|T_{zv}\|_\infty < \gamma$ 의 조건으로 구속하여 외란에 의한 영향이 최소화 되도록 함이 제어 성능의 목적함수이다.

$$J = \text{Min} \|T_{zv}\|_\infty \quad (14)$$

$$\Rightarrow \text{Find } \sup_w \sigma_{\max}(T_{zv}(j\omega)) \leq \gamma$$

여기서,  $\sigma_{\max}$ 는  $\|T_{zv}\|_\infty$ 의 singular value 중 최대치를 의미하며, 각 주파수별  $\infty$ -노름을 직접 구할 수 없으므로  $\sigma_{\max}$ 의 상한치(Supremum)을 대신하여 찾는다. 또한,  $\gamma$ 는 정의 값을 갖는 임의의 상수이다. 이러한 조건을 만족시키기 위한 제어기의 필요조건은 크게 두 가지로 요약된다. 우선은 제어기가 플랜트에 관한 필요하고 충분한 정보를 가져야 하고 이 정보를 바탕으로 최적의 메모리스 보상기(memoryless compensator)을 결정해야 한다. 이는 곧 관측기 형태를 갖는 최적 보상기 설계문제로 귀착되어, 최적화 제어이론에 근거한 관측기와 보상기를 설계하는 문제로써 이를 만족하는 최적해를 구해야 하는데 이는 관측기와 보상기 선정에 필요한 두 개의 선형 리카치(Riccati) 대수방정식을 푸는 문제이다. 따라서, 두 개의 리카치 대수 방정식을 해밀토니안 행렬 형태로(Hamiltonian Matrix) 표현하면 식 (15)으로 표현된다[3,9].

$$\begin{aligned} Ric(H_\infty) &= Ric \begin{bmatrix} A - B_2 \tilde{D}_{12} D_{12}' C_1 & \gamma^{-2} B_1 B_1' - B_2 \tilde{D}_{12} B_2' \\ - \tilde{C}_1' \tilde{C}_1 & -(A - B_2 \tilde{D}_{12} D_{12}' C_1)' \end{bmatrix} \\ Ric(J_\infty) &= Ric \begin{bmatrix} (A - B_1 D_{21}' \tilde{D}_{21} C_2)' & \gamma^{-2} C_1' C_1 - C_2' \tilde{D}_{21} C_2 \\ - \tilde{B}_1 \tilde{B}_1' & -(A - B_1 D_{21}' \tilde{D}_{21} C_2) \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (15)$$

여기서,  $Ric(\cdot)$ 는 Riccati 대수방정식의 해밀토니안 행렬(Hamiltonian Matrix)을 뜻하며, 약어로 표현된 각 행렬은 아래와 같으며, '은 각 행렬요소의 전치행렬을 뜻한다.

$$\tilde{B}_1 = B_1(I - D_{21}'(D_{21}D_{21}')^{-1}D_{21}), \quad \tilde{D}_{12} = (D_{12}'D_{12})^{-1},$$

$$\tilde{D}_{21} = (D_{21}D_{21}')^{-1}, \quad \tilde{C}_1 = (I - D_{12}(D_{12}'D_{12})^{-1}D_{12}')C_1$$

이러한 문제를 안정화시킬 최적 보상기와 관측기가 존재할 필요충분조건은 아래 식 (16)과 같다.

$$X_\infty = Ric(H_\infty) \geq 0$$

$$Y_\infty = Ric(J_\infty) \geq 0 \tag{16}$$

$$\rho(X_\infty Y_\infty) < \gamma^2$$

여기서,  $X_\infty, Y_\infty$  는 보상기와 관측기의 대수 Riccati 방정식의 해이며,  $\rho(X_\infty Y_\infty) = \lambda_{\max}(X_\infty Y_\infty)$ 는 두 해의 스펙트럴 (Spectral) 반경으로  $X_\infty Y_\infty$ 행렬의 최대 고유치와 같다. 이결과는 최적화 문제에서 대두되는 해가 존재할 충분조건이며, 이 해를 구하는 방법은 해밀토니안 행렬의 고유치와 고유벡터를 이용한 Invariant Subspace 법을 비롯한 몇 가지 방법이 사용되며 참고문헌[11]을 참조한다. 특히, 위 식 (16)의 세 번째 조건은 보상기와 관측기의 리카치 방정식의 해사이에 존재하는 구속에 제약조건이다. 관측기는 칼만필터 이론을 적용하여 구하여 그 결과는 식 (17)과 같다.

$$\hat{\dot{x}} = A\hat{x} + B_1\hat{v} + B_2u + Z_\infty K_e(\gamma - \hat{y}) \tag{17}$$

여기서,  $\hat{x}, \hat{v}$ 는 각각 상태변수와 외란의 추정치를 뜻하고  $K_e = -(Y_\infty C_2' + B_1 D_{21}') (D_{21} D_{21}')^{-1}$ 는 칼만필터(Kalman Filter)[10] 이득(gain)이며,  $Z_\infty = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1}$ 은 제어기에서 플랜트에 유입되는 외란의 추정( $\hat{v} = \gamma^{-2} B_1' X_\infty \hat{x}$ )을 위한 필요조건이며, 수렴조건은  $I - \gamma^{-2} X_\infty Y_\infty > 0$ 이다. 이 조건으로부터 위 식(16)의 세 번째의 필요조건이 된다. 상태 추정에 의한 출력은  $\hat{y} = C_2 \hat{x} + \gamma^{-2} D_{21} B_1' X_\infty \hat{x}$ 이며, 최적 보상기의 이득(gain)은 상태 추정 결과로부터 다음 식 (18)으로 얻어진다.

$$u = -K_c \hat{x} \tag{18}$$

여기서,  $K_c = (D_{12}' D_{12})^{-1} (B_2' X_\infty + D_{12}' C_1)$ 은 최적보상기(LQR) 설계문제의 최적화 조건으로부터 얻어진다[9]. 위 과정에서 제시된  $K_c, K_e, Z_\infty, X_\infty, Y_\infty$ 의 유도 과정은 참고문헌 [3]에서 자세하게 찾을 수 있다. 이러한 모든 조건을 모두 만족해야 하는 제어기의 최종 결과식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\hat{x}} \\ \dot{\hat{y}} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A & -B_2 K_c \\ Z_\infty K_e C_2 & A_\infty \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} B_1 \\ Z_\infty K_e D_{21} \end{bmatrix} v \tag{19}$$

$$\begin{bmatrix} \dot{z} \\ \dot{y} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} C_1 & -D_{12} K_c \\ C_2 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{x} \\ \hat{y} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ D_{21} \end{bmatrix} v \tag{20}$$

여기서, 각 행렬요소는 다음과 같다.

$$A_\infty = A - B_2 K_c - Z_\infty K_e C_2 + \gamma^{-2} (B_1 B_1' - Z_\infty K_e D_{21} B_1') X_\infty$$

$$K_c = \tilde{D}_{12} (B_2' X_\infty + D_{12}' C_1) : \text{최적보상기 이득}$$

$$K_e = (Y_\infty C_2' + B_1 D_{21}') \tilde{D}_{21} : \text{최적관측기 이득}$$

$$Z_\infty = (I - \gamma^{-2} Y_\infty X_\infty)^{-1}$$

한편, 우리가 찾고있는 제어기의 상태방정식은 식 (17), (18), (19) 및 (20)을 정리하여 식 (21)를 얻는다.

$$K(t) = \begin{cases} \dot{\hat{x}} = A_k \hat{x} + B_k v \\ u = C_k \hat{x} + D_k v \end{cases} \tag{21}$$

이를 전달함수형태로 표현하면 식 (22)을 얻는다.

$$K(s) = \frac{u(s)}{y(s)} = C_k (sI - A_k)^{-1} B_k + D_k \tag{22}$$

여기서, 제어기의 시스템 행렬식은

$$A_k = A - B_2 K_c - Z_\infty K_e C_2 + \gamma^{-2} (B_1 B_1' - Z_\infty K_e D_{21} B_1') X_\infty$$

$$B_k = Z_\infty K_e, \quad C_k = -K_c \quad \text{및} \quad D_k = 0 \text{이다.}$$

### 3.3 $H_\infty$ 노름(norm)의 計算

전달함수  $T_{zw}(s)$ 의  $H_\infty$  노름은 주파수 함수로 표현하여  $\sup |T_{zw}(j\omega)|$ 로 정의되며, 일반적으로 이  $H_\infty$  노름을 직접 계산하기는 불가능한 것으로 알려져 있다. 대신에  $T_{zw}$ 의 최대 singular value ( $\sigma_{\max}[T_{zw}(j\omega)]$ )를 찾는 간접적인 방법을 사용한다. 이는 목적함수인  $T_{zw}$ 의  $H_\infty$  노름을 구하기 위해서는 성능지수의 최적조건을 구성하는 Riccati 대수방정식의 해가 존재해야 하는 필요조건에 따라 우선 해가 존재한다는 가정하에  $T_{zw}$ 의 Singular value를 임의로 선정하고 해당 Hamiltonian의 고유치를 구하여 점근적 안정조건인 허수-고유치를 갖지 않음을 검사하고 그 크기를 증감하면서 그 해를 갖을 조건을 만족하면서 최소값의 크기를 갖도록 하는 즉, 허용오차의 최대허용치의 수렴과정을 통해서 구해진다.

### 3.4 모델링 誤差와 外亂

일반적으로 플랜트의 수학적 모델링 과정에서 발생하는 모델링 오차는 파라미터의 추정과 부정확성에서 발생하는 파라미터 오차의 구조적인 불확실성과 전달함수(혹은 상태함수)의 차수의 부정확성 즉, 정규 모델(Nominal Model)에서 증감되어 나타나는 가산적 오차 (Additive Error)와 곱해지는 승산적 오차 (Multiplicative Error)로 분류되는 비구조적인 불확실성으로 생각할 수 있다. 이러한 불확실성과 오차의 결과는 전달함수의 차수와 파라미터 (혹은 상태전이행렬의 구조)의 변화와 극점, 영점의 변화 (혹은 고유치의 변화)를 가져온다. 그러나, 이러한 변화 후에도 시스템이 안정화 될 수 있다면 미소이득이론(small gain theorem)을 적용하여 시스템의 건전성은 보장된다[7,9]. 즉, 모델링 오차를 비롯한 모든 형태의 오차와 외란이 일정한 크기로 구속하고 Perturbation 이후에도 주파수 영역에서 나이퀴스트 안정적 요건을 만족시킬 수 있다면 전체 시스템의 안정성은 보장된

다. 결국,  $H_\infty$  설계 문제는 이와 같은 모든 외란의 크기를  $H_\infty$  평가함수의 구속조건이 되도록 한다. 문제는 이러한 모델링 오차와 외란을 실 설계에서 어떻게 반영하는가 하는 문제이다. 정상적 모델에서 파라미터(전달함수)의 변화는 정규 플랜트에 외란이 유입되는 것으로 간주할 수 있으며, 크기는 실제 측정이 불가능하므로 일정한 구속된 입력의 크기로 유입된다는 가정 하에 문제를 접근하고 그 구속된 크기가 가능한 클수록 전체 시스템의 견실성(Robustness)은 더욱 보장된다. 즉, 미지의 모델링 오차를 실제 유입되는 외란으로 가정하고 모든 경우에서 대해서 크기가 가장 큰 경우(즉, 최악의 외란 유입)에 대한 문제로 취급한다.

#### 4. $H_\infty$ 제어기의設計

##### 4.1 시스템 행렬 및 변수의設定

전력계통의 동태 안정화 문제는 앞서 언급한 바대로 앞식(2)의 동요방정식(swing equation)에 근거한 동특성 방정식의 고유치에 대한 복소평면에서의 위치 설정문제이다. 따라서, 평가지표로 고려되는 평가함수는 정상상태의 부하각 크기변화량이며, 제어 에너지량을 최소화하는 제어 시스템의 일반적 요건에 따라 제어기 출력신호(즉, 제어 입력량)의 크기도 선정한다. 이를 정리하여 시스템 방정식을 정리하면 다음과 같다.

① 평가함수 :  $z = [\Delta\delta \ \Delta U_{GV} \ \Delta U_{VR}]'$  (23)

② 외란입력:

$v = [d_1 \ d_2 \ n_1 \ n_2]'$  (24)

여기서,  $\theta_1, \theta_2$ 는 측정 센서의 0-평균의 표준 분산치이다.

③ 상태 방정식 :  $\frac{dx}{dt} = Ax + B_1v + B_2u$

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} a_{11} & a_{12} & 0 & 0 & 0 \\ a_{21} & a_{22} & a_{23} & a_{24} & 0 \\ 0 & a_{32} & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & a_{43} & a_{44} & a_{45} \\ 0 & 0 & a_{53} & a_{54} & a_{55} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_{11} & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & b_{52} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{GV} \\ \Delta U_{VR} \end{bmatrix} \quad (25)$$

여기서, 상태행렬의 계수는 식 (1) - (8)로부터 얻는다.

④ 평가함수 출력 방정식 :  $z = C_1x + D_{11}v + D_{12}u$

$$\begin{bmatrix} \Delta \delta \\ \Delta U_{GV} \\ \Delta U_{VR} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{GV} \\ \Delta U_{VR} \end{bmatrix} \quad (26)$$

⑤ 플랜트 출력 방정식 :  $y = C_2x + D_{21}v + D_{22}u$

$$\begin{bmatrix} \Delta w_r \\ \Delta E_t \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & K_5 & K_6 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta T_m \\ \Delta w_r \\ \Delta \delta \\ \Delta E'_q \\ \Delta E_{fd} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} d_1 \\ d_2 \\ n_1 \\ n_2 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \Delta U_{GV} \\ \Delta U_{VR} \end{bmatrix} \quad (27)$$

#### 4.2 최적 $\gamma$ 값 설정과 설계 결과

위와 같이 주어진 플랜트에 대하여  $H_\infty$  제어이론을 적용한 제어시스템의 설계는  $H_\infty$  노음의 구속 상수인 최적치  $\gamma$  를 찾아야 하므로 이를 수작업으로 계산하는 것은 거의 불가능하다. 따라서, 적절한 컴퓨터 프로그램을 활용하여 다음 그림 3에서 제어기 설계용 프로그램의 흐름도를 보인다. 설계 사용된 단위는 Per Unit 단위로써 실제 제어신호 값으로 사용되기 위해서는 입출력 신호의 크기에 알맞은 스케일링이 필요하기 때문에 적절한 가중치를 고려해야 한다. 이 단위 변환에 필요한 스케일링의 크기가 시스템의 성능에 큰 영향을 미치므로 특히 유의가 필요하다. 표 1로 주어진 실제 계통의 사례의 플랜트 조건으로부터 구한 설계의 결과는 표 2 와 같다. 한편, 식 (21)로 표현한 제어기의 구조와 행렬은 표 3과 같다.

표 1 플랜트 데이터와 운전조건  
Table 1 Plant Data and Initial Operating Values

Parameter Data (P.U)	Initial P.U Values
$H=3.82, K_D=0.0026$	$P_0=1.0,$
$w_s=2\pi f_s=377, R_{GV}=0.05$	$\delta_0=80.5^\circ$
$\tau_{GV}=0.0\text{sec}, \tau_T=11.0\text{sec}$	$P_0=800\text{MW}_e$
$R_d=0.0037, X_d=1.75$	$Q_0=13.7\text{MVar}$
$X'_d=0.285, X_q=1.68$	$E_{B0}=1.055\angle 0^\circ$
$X'_q=0.47, R_e=0.014$	$E_{A0}=1.026\angle 22.9^\circ$
$X_e=0.4448, X_t=0.1248$	$\tau_{d0}'=4\text{sec}$
$R_t=0.0064, \tau_e=0.05\text{sec},$	$\tau_{e0}'=0.54\text{sec}$
$K_e=200$	

표 3 최적의 제어기 행렬 데이터  
Table 3 Optimal Controller Matrix Data

행렬	제어기의 시스템 행렬 데이터
$A_k$	-0.4000 -19.400 0.0000 0.0000 -3.8000
	0.1000 -1.0000 -0.1000 -0.1000 2.1000
	0.0000 369.1 0.0000 0.0000 76.9000
	16.1000 1454.40 9.3000 -11.6000 -17.3000
	0.0000 2.1000 -7.300 20.0080 -58.6000
$B_k^T$	-0.4080 0.9879 7.9351 -3.6128 -2.0801
	3.7518 -2.0801 -76.9422 -4.6243 8.5510
$C_k$	-0.3319 -1.8159 -0.0003 0.0196 -0.0106
	0.5886 53.1104 0.3458 -0.4095 0.1966
$D_k$	0 0
	0 0

표 2 최적의 설계 결과 데이터  
Table 2 Optimal Designed Data and Conditions

항목	설계 결과	비고
$\gamma_{min}$	$\gamma_{min} = 3.19$ (iteration 횟수 : 12회)	최적치
$K_e^T$	-0.4080 0.9879 7.9350 -3.6128 -4.6243 3.7518 -2.0801 -76.9419 -2.080 18.5510	
$K_c$	0.3319 1.8159 0.0003 -0.0196 0.0106 -0.5886 -53.1104 -0.3458 0.4095 -0.1966	
$X_\infty$	0.0037 0.0200 0.0000 -0.0002 0.0001 0.0200 2.9457 0.0384 -0.0194 0.0087 0.0000 0.0384 0.0015 -0.0001 0.0000 -0.0002 -0.0194 -0.0001 0.0001 -0.0001 0.0001 0.0087 0.0000 -0.0001 0.0000	
$Y_\infty$	0.0013 -0.0002 -0.0272 -0.0060 0.0015 -0.0002 0.0004 0.0032 -0.0014 -0.0008 -0.0272 0.0032 0.5710 0.1286 -0.0308 -0.0060 -0.0014 0.1286 0.0442 -0.0018 0.0015 -0.0008 -0.0308 -0.0018 0.0034	

(T : 전치행렬을 뜻함)

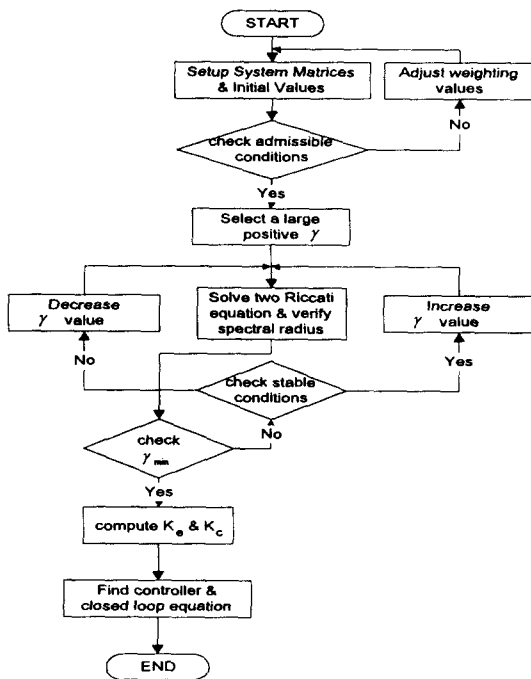


그림 3  $H_\infty$  제어기 설계의 프로그램 흐름도  
Fig. 3 Flow Chart for  $H_\infty$  Controller Design

5. 事例 研究 및 시뮬레이션 結果 考察

본 연구의 유용성을 검증하기 위하여 표의 2, 3의 설계된 결과를 이용하여 컴퓨터 모의실험을 실시하였다. 이 실험에서 고려된 플랜트 모델의 정수 및 정상상태 운전 조건은 표 1에 나타낸 바와 같다. 상정된 외란 조건신호로서 플랜트 입력(증기압)과 출력조건(모선전압)을 계단함수 형태로 인위적으로 인가하여 변화량을 고찰하였으며, 그림 4와 5에서 여

자의 입력변화가 없는 상태(즉, 수동운전)와 PSS로 제어한 경우 및  $H_\infty$  제어기로 제어한 경우에 대한 속도 편차량의 변화와, 부하각 편차량의 변화를 비교하였다. 그림 4와 5의 각각의 그림에서 보는 바와 같이 외란 유입시에도  $H_\infty$  제어기에 의한 부하각의 변화량은 극히 미소하여 저주파 진동이 매우 적어 현실성이 매우 우수함으로 발견할 수 있다. 또한, 속도 편차도 극히 적어 동요가 매우 적은 상태로 제어됨을 알 수 있다. 모의 실험에 사용된 두 외란신호의 크기는  $H_\infty$  노음의 구속 조건 범위 내에서 구속하였으며, 측정 오차의 조건은 0-평균잡음에 5% 분산의 정확도를 갖는 계측기로 가정하였으며, 이러한 가정은 실제보다 훨씬 보수적인 값이다.

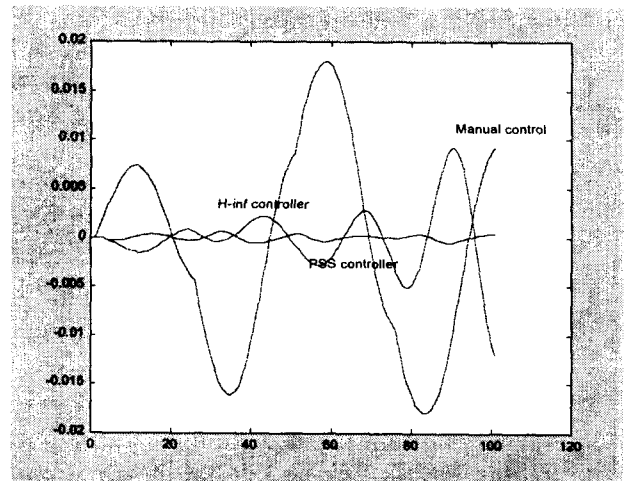


그림 4 단위 계단함수 (2 사이클)에 대한 속도편차 응답  
Fig. 4 Speed deviation response for unit step disturbances during 2 cycling

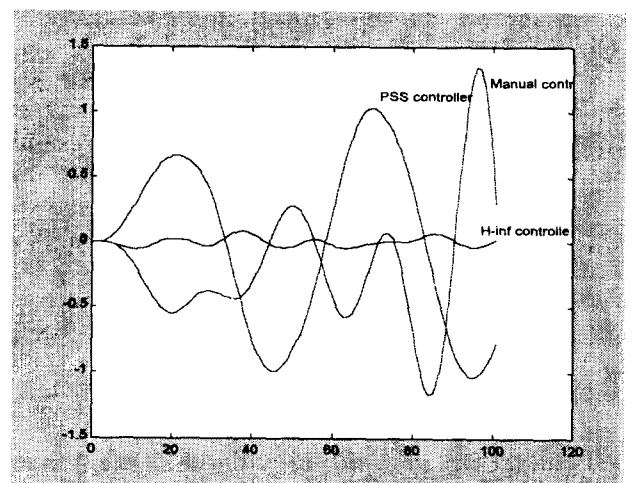


그림 5 단위 계단함수(2 사이클)에 대한 부하각 응답  
Fig. 5 Power angle deviation response for unit step disturbances during 2 cycling

6. 결 론

지금까지 단일 터-빈 발전기계통에 대하여 운전 중에 발생하는 모델링 오차를 포함한 크고 작은 미지의 외란한 입력에 대하여 동특성 안정도를 개선하고자  $H_\infty$  제어이론을 적용하였다. 본 연구의 과정과 시뮬레이션 결과를 통하여 종래의 Lead/Lag형태로 설계된 PSS를 사용한 경우에 비하여 우수한 견실성의 성능을 가져 동적 안정도가 매우 향상되는 점을 발견할 수 있었다. 즉, 동특성 안정도는 부하각의 편차 크기에 의해 결정되므로 동기기축에서 부하각의 편차량이 매우 적고 안정도가 향상된 바람직한 결과를 보인다. 이 결과는 터-빈 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) 계통 모션전압이 계단함수형태로 2짜이클에 걸쳐 급격히 변할 경우에 부하각의 변화와 단자전압의 변화량을 비교한 결과 종래의 PSS에 비하여 그 성능이 우수하다.
- (2) 여자기의 AVR 이득이 클수록  $H_\infty$  제어기의 성능이 우수하다.
- (3) 전력계통으로부터 외란이 항상 존재하는 터-빈 발전기의 견실성 제어를 위하여  $H_\infty$  제어이론을 응용할 경우 그 성능이 매우 우수하고, 이를 구현하기 위해서 기존의 측정센서와 시스템을 그대로 활용할 수 있고 On-Line으로 제어가 가능하여 제어기의 구현도 용이하다.

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  $H_\infty$  Control problem", IEEE Auto.& Control, vol. 38-N0. 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, pp 463-473, '88.
- [5] D. Xia, "Self-tuning Controller for Generator exciation control", IEEE PAS, Vol. PAS-102,N0.6, pp1877-1885, June, 1983.
- [6] IEEE Committee Report, "Dynamic Models for Steam and Hydro Turbines in Power System", IEEE, T-73, 89-0, 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", Presntice Hall, pp 53- 91, 1991.
- [9] Bahram Shahian and Michael Hassul, "Control System Design using MATLAB", Presntice 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 & II", CRC Press and IEEE Press, pp 595-606, 1996.
- [12] 황형진 외 3인, "유전알고리즘을 이용한 디젤 엔진의 최적연료주입 모델 추종형  $H_\infty$  제어 시스템 설계", 대한전기학회 논문지 제46권 7호, pp 1095-1101, '97. 7
- [12] 김진수의 2인, " $H_\infty$  필터를 이용한 2관성 공진계의 진동억제 제어", 대한전기학회 논문지 제 47권 4호, pp 466-473, 1998. 4.

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 한국 원자력연구소 선임연구원. 현재 호남대 공대 전기공학과 조교수

Tel : (062) 940-5494

E-mail : dwchung@honam.honam.ac.kr



김 건 중 (金建中)

1953년 2월 12일생. 1975년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1985년 동 대학원 전기 공학과 졸업(공학박사). 1977년 해군 제2사관 학교 교수. 현재 충남대 공대 전기공학과 교수

Tel : (042) 821-5659

E-mail : kjkim@eechungnam.ac.kr