

센서고장에 대해 보전성을 갖는 터어보-발전기 시스템의 강인제어기 설계

Robust Controller Design of Turbo-Generating System with Integrity to Sensor Failure

金 東 和*·洪 錫 教**
(Dong-Hwa Kim · Suk-Kyo Hong)

요 약

본 논문에서는 계장제어 터어보 발전기 시스템에 대한 강인제어 문제가 연구되었다. Riccati형 행렬 방정식과 상태궤환을 이용해 센서 고장시 고장된 루프에 관계없이 2입력 2출력터어보-발전기 시스템이 안정하게 제어될 수 있는 방법을 제안하고 보전성을 갖지 않는 경우와 시뮬레이션을 통해 이를 비교 입증하였다. 그 결과 보전성을 고려하지 않고 설계된 이득에 의한 폐 루프 시스템은 고장에 대해 매우 불안정한 응답을 보인 반면 제안된 기법에 의해 보전성을 갖도록 설계한 이득에 의한 폐 루프 시스템에서는 고장에 관계없이 안정한 응답을 나타내어 구조가 복잡한 다변수 시스템의 강인 제어에 응용될 수 있음을 잘 입증하고 있었다.

Abstract

In this paper, Robust control scheme of turbo-generating systems with integrity against arbitrary sensor loop failure in feedback loop is suggested based on the Riccati type matrix equation and state feedback.

The results of simulation to the actual turbo-generator represents unstable response in the closed system by nonintegrity gain F but have the satisfactory response to sensor failures in the closed system by integrity gain K .

This robust controller design technique will be applicated in the complicated multivariable system in the future.

*正會員：한국원자력연구소 선임기술원

**正會員：아주대 공대 제어공학과 교수

接受日字：1991年 4月 4日

1. 서 론

최근 많은 센서 및 액츄에이터로 구성된 계장제어 터어보 발전기 설비와 같은 대형 제어 시스템은 자동화에 따른 제어변수의 증가가 불가피하게 되어 다변수 제어계의 채택이 필수가 되고 있다.

다변수 시스템에서 제어 시스템 특성에 영향을 주는 것은 플랜트 전달함수 및 제어기 이득 외에 한 루프의 센서 또는 액츄에이터와 같은 계장설비 고장으로 고장루프에 의해 건전한 루프가 영향을 받아 불안정한 응답이 일어남은 물론 시스템의 해석 및 설계가 어렵게 된다.^{1) ~4)}

이와같은 루프고장에 대해 강인성을 가질 수 있는 시스템을 설계하고자 하는 연구는 주로 주파수 영역에서의 역 나이퀴스트 배열법(INA)⁵⁾, 근궤적법(GL)⁶⁾, 궤환차 방식⁷⁾, 직접적인 나이퀴스트 배열법(DNA)등으로 대부분이 전달함수가 그리는 궤적에 의해 전달함수 행렬의 대각화 정도 및 안정도등을 판단하는 기법이다. 이들 기법은 입·출력수가 같은 경우는 제어기설계가 쉽기 때문에 최근까지 많이 응용되고 있으나^{3) 4) 8)} 설계과정에서 전달함수의 역을 취하여야 하므로 입·출력수가 다른 경우는 전달함수를 대각화하기 위해 시스템의 특성에 부합되는 매개 행렬을 다시 만들어야 한다는 번거로움이였다. 뿐만 아니라 입·출력수가 다른 경우의 설계의 어려운 액츄에이터 고장시 보전성에 대한 검토 불가능주파수 변화에 따른 보전성유지의 어려움등 문제점이 많다.

본 연구에서는 이러한 문제점에 착안하여 속응 운전에 따른 주파수 및 부하변화가 심한 계장제어 터어보 발전기 계통에서 액츄에이터 또는 센서와 같은 계장설비 고장시 한개의 신호 경로 고장에 의해 건전한 다른 루프가 영향을 받아 전 시스템 응답이 불안정하지 않고 강인한 제어가 될 수 있는 방법을 Riccati형 행렬 방정식과 상태궤환을 이용해 얻고 이를 시뮬레이션을 통해 입증하고자 한다.

2. 터어보-발전기 모델 및 제어방식

2.1 상태변수 모델

본 연구에서 사용된 모델은 증기 유속과 여자기 설정 전압을 입력으로 하고 부하각과 단자전압을 출력으로 하는 2입력2 출력 시스템으로 이에 대한 브럭도는 그림1과 같다.

그림1에서 동기기의 쇄교자속 및 전압에 대한 기본 방정식은 다음과 같다.^{9) 10)}

$$\delta\Phi_{fd} = X_{af}\delta i_{fd} + X_{ad}\delta i_{kd} - X_{ad}\delta i_a \dots\dots\dots(1)$$

$$\delta\Phi_d = X_{ad}\delta i_{ad} + X_{ad}\delta i_{kd} - X_a\delta i_a \dots\dots\dots(2)$$

$$\delta\Phi_{kd} = X_{ad}\delta i_{fd} + X_{kd}\delta i_{kd} - X_{ad}\delta i_a \dots\dots\dots(3)$$

$$\delta\Phi_q = X_{aq}\delta i_{kq} - X_q\delta i_q \dots\dots\dots(4)$$

$$\delta\Phi_{kq} = X_{kq}\delta i_{kq} - X_{aq}\delta i_q \dots\dots\dots(5)$$

$$\delta e_{fd} = \delta\Phi_{fd} + \omega R_{fd}\delta i_{fd} \dots\dots\dots(6)$$

$$\delta e_a = -\Phi_q \dots\dots\dots(7)$$

$$0 = \delta\Phi_{kd} + \omega R_{kd}\delta i_{kd} \dots\dots\dots(8)$$

$$\delta e_q = \delta\Phi_d \dots\dots\dots(8)$$

$$0 = \delta\Phi_{kq} + \omega R_{kq}\delta i_{kq} \dots\dots\dots(10)$$

여기서 Φ_{fd} 는 직축 계자자속, i_{fd} 는 직축 계자 전류, i_{kd} 는 직축제동권선 전류, i_a 는 전 직축 전류, Φ_a 는 직축 쇄교자속, Φ_s 는 횡축 쇄교자속, Φ_{kq} 는 횡축 제동권선 자속, i_{kq} 는 횡축 제동권선 전류, e_{fd} 는 직축 계자전압, R_{fd} 는 직축 계자 저항, e_a 는 직축 단자전압, R_{kd} 는 직축 제동권선 저항이고 x는 각각 그 첨자의 의미에 해당하는 리액턴스이다.

한편 식(2), (6), (8)에서

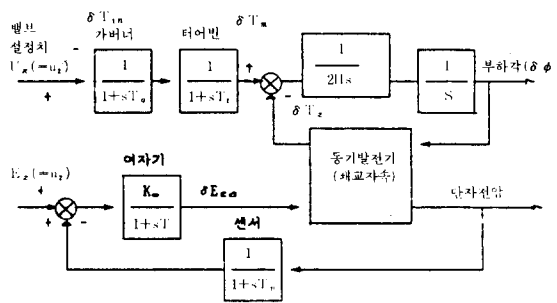


그림1. 터어보-발전기 제어계 상세도
Fig. 1. Detail diagram of control system in turbo-generator

$$\delta\phi_{fd} + \frac{R_{fd}}{R_{kd}} \delta\phi_{kd} = -\frac{\omega R_{fd}}{X_{kd}} \delta\phi_a + \delta e_{fd} - \frac{\omega R_{fd}}{X_{kd}} X_a \delta i_a - \frac{\omega_o}{T_D} e_{qo} \delta i_q + \frac{\omega_o}{T_D} \delta T_m \dots\dots\dots(18)$$

한편 속도와 부하각 사이의 관계는

$$\delta\phi = \delta\omega \dots\dots\dots(19)$$

여기서 상태변수를

$X_1 = \delta\phi_{fd} =$ 계자쇄교자속, $X_2 = \delta\phi_d =$ 직축 쇠교자속, $X_3 = \delta\phi_{kd} =$ 댐퍼쇄교자속, $X_4 = \delta\phi_q =$ 횡축 쇠교자속, $X_5 = \delta e_t =$ 단자전압, $X_6 = \delta e_{fd} =$ 계자전압, $X_7 = \delta T_m =$ 기계적인 토크, $X_8 = \delta\omega =$ 각속도 [rad/sec], $X_9 = \delta\phi =$ 부하각으로 정하고 입출력 변수를 각각 $u = [\delta E_r, \delta T_m]^T$, $y = [\delta e_t, \delta\phi]^T$ 로 놓으면 상태방정식 $\dot{x} = Ax + Bu$ 를 얻는다.

여기서 전기자 직축 리액턴스, 계자 리액턴스, 개방상태에서의 전기자 및 계자 리액턴스를 고려하면

$$T_{do}'' \delta\phi_{kd} = -\delta\phi_{kd} + \frac{X_{ao}}{X_{fo}} \delta\phi_{fd} - (X_d' - X_1) \delta i_a \dots\dots\dots(12)$$

$$T_{do}'' = [X_{kd} + \frac{X_{ao}}{X_{fo}} X_{fd}] \frac{1}{R_{fd}}$$

$$T_{kqo} = X_{kq}/R_{kq}$$

$$T_{do} = X_{af}/wR_{fd}$$

T_{do}'' 는 개방회로의 1차 과도 시상수 T_{do}'' 는 2차 과도 시상수이다.

또 식(2), (3)과 식(12)에서

$$T_{do}'' \delta\phi_d - T_{kd} - \frac{X_{ao}}{X_{fo}} \delta\phi_{fd} = -\delta\phi_d \frac{X_{ao}}{X_{fo}} \delta\phi_{fd} - X_d' - \delta i_d - X_d' \delta i_d - (X_d' - X_e) T_{kd} \delta i_d \dots\dots\dots(13)$$

이 된다. 여기서 X_d' 는 1차 과도 직축 리액턴스이다.

제동권선에 대한 횡축분 자속은 식(4), (10)에서

$$T_{kqo} \delta\phi_q = -\delta\phi_q - X_q \delta i_q - (T_{kq} X_{aq} + T_{kqo} X_1) \delta i_q \dots\dots\dots(14)$$

이 된다. 한편 발전기 단자전압 e_t , 직축분 e_d , 횡축분 e_q 개방회로의 단자전압 e_t , 직축분 e_{do} , 횡축분 e_{qo} , 전압오차 검출기의 시상수 T_v , 여자기 이득 K_e , 여자기 시상수 T_e 사이에는 다음이 성립한다.

$$T_v \delta e_t = -\delta e_t - \frac{e_{do}}{e_{to}} \delta\phi_d + \frac{e_{qo}}{e_{to}} \delta\phi_q \dots\dots\dots(15)$$

$$\frac{T_e X_{ao}}{R_{fd}} \delta e_{fd} = -\frac{X_{ao}}{wR_{fd}} \delta e_{fd} - K_e \delta e_t + K_e \delta E_r \dots\dots\dots(16)$$

또 입력 동력 방정식과 토크 평형은 가버너 시상수를 T_q , 기계적인 토크를 T_m 라 하면

$$T_q \delta T_m = -\delta T_m + \delta T_m \dots\dots\dots(17)$$

이 되고 기계적 및 전기적 토크 사이의 차이를 고려하면

$$\frac{2H}{T_D} \delta\omega = -\delta\omega + \frac{\omega_o}{T_D} i_d \delta\phi_q - \frac{\omega_o}{T_D} i_{qo} \delta\phi_d - \frac{\omega_o}{T_D} e_{do} \delta i_d$$

2.2 제어방식

종래의 발전기 제어방식의 대부분은 발전기 여자회로를 조절하여 단자전압을 제어하고 가버너를 조작하여 증기량을 조절함으로써 발전기 동기속도를 일정히 유지하는 방식이다. 즉 AVR 및 가버너 제어장치는 아나로그 PID 제어 방식으로 개별제어방식을 채택하고 있다. 이러한 단일루프 제어기법에서는 각각의 루프이득을 계환 시켜 여자기 및 가버너 제어를 수행하게 됨으로 각각의 루프 상호간에 간섭 현상이 일어나고 1차측의 열수력 계통에 대한 요구조건을 무시하여 기계적 응력 및 시스템 외란은 물론 수명단축의 원인이 되고 있다.

특히 여자기와 가버너 루프 사이의 간섭은 부하가 증가하면 더욱 커지고 한 개 루프의 센서 또는 액츄에이터 고장시는 간섭에 의해 시스템 외란이 되어 이들 고장에 대해 보전성을 갖도록 하는게 안정운전의 필수적 요인이 되고 있다.

3. 센서 고장에 대한 강인제어기 설계

Riccati형 방정식의 반정정(positive semi-definite) 해¹⁴⁾를 이용해 강인성을 갖는 계환시스템의 설계 문제를 고찰한다. 따라서 일반화된 Riccati형 방정식의 반정정(positive semidefinite) 해의 존재조건에 대한 검토가 필요하다.

여기서 다음과 같은 선형 다변수 시스템을 생각한다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + Bu \\ y &= Cx \end{aligned} \quad \dots\dots\dots(20)$$

단 $x \in \mathbb{R}^n, u \in \mathbb{R}^m, A \in \mathbb{R}^{n \times n}, B \in \mathbb{R}^{n \times m}, C \in \mathbb{R}^{r \times n}$ 이고 다음과 같은 조건을 가정한다.

- a) A, B는 가제어이며
- b) A는 점근안정이다.

식(20)에 상태궤환 법칙

$$u = Kx \quad \dots\dots\dots(21)$$

을 이용하면 폐 루프 시스템은

$$\dot{x} = (A + BK)x \quad \dots\dots\dots(22)$$

한편 루프가 고장난 경우를 고려한 궤환 시스템은

$$\dot{x} = (A + BLK)x, \quad L \in L_{set} \quad \dots\dots\dots(23)$$

이 되고 임의의 스위칭 행렬 $L \in L_{set}$ (고장시 $L_i = 0$, 건전시 $L_i = 1$)에 대해 시스템 행렬 $A + BLK$ 가 점근 안정하기 위한 궤환이득 행렬 K를 정하는 문제에 대해서 고찰한다. 단, $L_i = 0$ ($i=1, \dots, r$)이 되는 경우 즉 $L = 0_{n \times n}$ 이 되는 경우는 제외한다.

이때 식(23)의 시스템 극이 허수축을 포함하지 않는 좌반평면에 존재하기 위한 이득 K를 결정하는데 필요한 다음과 같은 Riccati형 행렬 방정식을 생각한다. 즉

$$PA + A^T P + PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad \dots\dots\dots(24)$$

단 $P \in \mathbb{R}^{n \times n}, Q \in \mathbb{R}^{n \times n}, R \in \mathbb{R}^{r \times r}$

- c) $Q \geq 0, R > 0$

의 조건이 주어지면 Q, R, 에 대해서 실 유리함수 행렬 $H(s)$ 는

$$H(s) = R - B^T(-sI - A^T)^{-1}Q(sI - A)^{-1}B \quad (25)$$

로 정의되고 $H(s)$ 가 허수축상의 극 이외의 전체의 s에 대해서 반정일때

- d) $H(j\omega) \geq 0, a.e. \omega \in \mathbb{R}$

이다. ¹³⁾ 여기서 A는 점근안정이므로 허수축상에 극은 존재하지 않는다. 이때 대수 방정식(25)에 대응하는 미분 방정식

$$-P = PA + A^T P + PBR^{-1}B^T P + Q \quad \dots\dots\dots(26)$$

$$P(0) = P_0$$

을 생각하고 이의 해를 $P(t; P_0)$ 라 하면 조건 a)-d)가 성립할때 임의의 $P_0 \leq 0$ 에 대해 미분

방정식 (6)의 해 $P(t, P_0)$ 가 $-\infty < t \leq 0$ 에서 존재하고, 다음 성질이 있다. ¹³⁾

1) $P(t; P_0)$ 는 $t \leq 0$ 에 대해서 실 대칭 반정 (real symmetric positive semi-definite)이다.

2) $P(t; P_0)$ 는 $t \leq 0$ 에 대해서 균일한 유계 (uniformly bounded)를 갖는다.

3) 특히 $P_0 = 0_{n \times n}$ 일때 해 $P(t; 0)$ 는 임의의 $t \leq 0$ 에 대해서 실대칭 반정이고 t의 감소에 대해 단조 비감소(monotone nondecreasing)이다. 즉 $Q \geq 0, P_0 = 0 \Leftrightarrow P(t_1) \leq P(t_2), 0 \geq t_1 \geq t_2 > t_0$ 가 된다. 단 $P_0 \in \mathbb{R}^{n \times n}$ 이다.

여기서 다음정리가 유도된다.

[정리 1] 조건 a)-d)가 성립할 때 Riccati형 대수 방정식 (26)의 실 대칭 반정해가 존재한다. Q가 정정이면 실 대칭 정정해가 존재한다. (증명은 참고문헌 15참조)

이때 구성되는 폐 루프 시스템에 대해서 조건 a)-d)가 성립하고 Riccati형 대수 방정식(24)에 대해 $P = \lim_{t \rightarrow \infty} P(t; 0)$ 라 하면 이의 실 대칭 반정정해 P_0 가 존재하므로 이 해를 이용한 상태궤환 제어법칙은

$$K = -B^T P_0 \quad \dots\dots\dots(27)$$

이 되고 폐 루프 시스템 S_1 는 그림2와 같이

$$S_1 : x(A - BB^T P_0)x \quad \dots\dots\dots(28)$$

이 된다. 이때 폐 루프 시스템의 전달함수 행렬 $G(s)$ 는

$$G(s) = -K(sI - A)^{-1}B = -B^T P(sI - A)^{-1}B \quad \dots\dots\dots(29)$$

이 된다. 여기서 다음과 같은 정리를 도입한다.

[정리 2] 조건 a)-d)가 성립하면 시스템 S_1 에 대해서 다음 성질이 성립한다.

- 1) 시스템 S_1 는 안정하다. 즉

$$\text{Re} \sigma_i(A - BB^T P_0) < 0, i=1, 2, \dots, n \quad \dots\dots(30)$$

- 2) $G^*(j\omega) + G(j\omega) \geq G^*(j\omega)RG(j\omega) > 0,$

$$(-\infty, +\infty) \quad \dots\dots\dots(31)$$

단 $G(s)$ 는

$$G(s) = B^T P_0(sI - A)^{-1}B \quad \dots\dots\dots(32)$$

로 정의되는 루프 전달함수이다. (증명 참고문헌 15참조)

즉 시스템 S_1 는 점근안정인 것을 알 수 있고 조건 a)-d)가 성립할때 루프 전달함수는

strictly positive real임을 알 수 있다.

한편 이때 구성되는 환송차 행렬(return difference matrix)은

$$T(s) = I + G \\ = I + B^T P (sI - A)^{-1} B \dots\dots\dots(33)$$

이 되어

$$\inf_{\omega \in \mathbb{R}} \{T(j\omega) + T^*(j\omega)\} > 0 \dots\dots\dots(34)$$

과 같이 된다. 이것은 시스템의 환송차 행렬이 Strictly positive real임을 의미하고 따라서 보전성을 갖기 위한 조건을 만족하는 시스템이 된다. 즉 그림 2와 같이 K를 잡으면 시스템 S₁는 궤환부분 고장에도 불구하고 보전성을 갖는다.

4. 시뮬레이션 및 고찰

식(23)로 주어진 시스템이 센서 또는 액추에이터 고장에 대해 강인성을 갖도록 식(24)의 Riccati형 행렬방정식에 의해 궤환이득 K를 설계하고 보전성을 고려하지 않고 설계한 궤환이득 F를 적용한 경우와 비교 고찰한다.

식(24)에서

$$R = \begin{bmatrix} 300 & 0 \\ 0 & 300 \end{bmatrix}$$

로 했을 때 얻어지는 강인성 이득 K는

$$K = \begin{bmatrix} -0.55 & 0.02 & -0.05 & -0.67 & 0.21 \\ 6.6 & -0.55 & 0.58 & 8.3 & -2.55 \\ -0.01 & 0.33 & 0.044 & -0.65 \\ 0.07 & -3.94 & -0.36 & 8.4 \end{bmatrix}$$

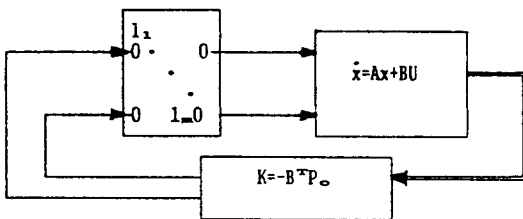


그림2. 센서 또는 액추에이터 고장에 대해 강인성을 갖는 상태궤환 시스템
Fig. 2. State feedback system with robustness to actuator or sensor failure

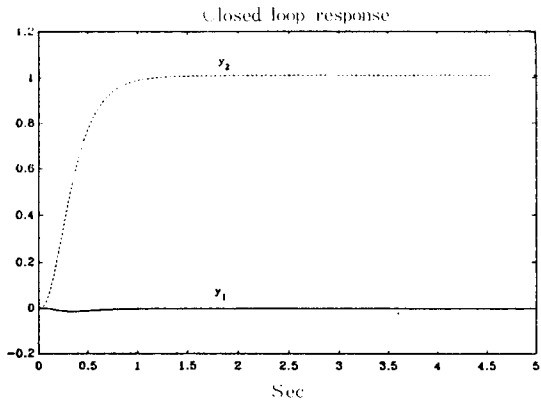
가 되고 보전성을 고려하지 않고 설계한 이득 F는

$$F = \begin{bmatrix} 923 & -4070 & 3.4 & 5580 & 4711 \\ 21.5 & -40 & 0.4 & 2.7 & 0 \\ 3.9 & -0.196 & 6.14 & -793 \\ 0.14 & -1.3 & 0.64 & -17 \end{bmatrix}$$

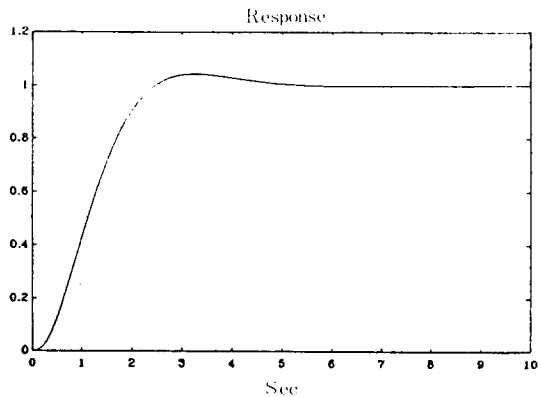
이다. 이들 값과 루프 1 및 루프2 고장시 스위칭 행렬

$$L_1 = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad L_2 = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

을 이용해 터어보-발전기 모델에서 시뮬레이션 한 결과가 그림3-8에 있다.



(a) k를 이용한 폐 루프 응답



(b) F를 이용한 폐 루프 응답

그림3. 정상상태시 K, F에 의한 폐 루프 시스템의 계단응답
Fig. 3. Step response of the closed loop system by K, F in normal state

그림3은 정상상태시 K, F의 응답특성을 검토하기 위해 시뮬레이션 한 결과로 모두 안정함을 알 수 있다.

한편 그림4(a)는 조작단 루프1 고장시 강인성 이득 K를 이용하여 폐 루프로 한 경우의 입력 $v_1=1, v_2=0$ 에 대한 계단응답이고 그림 4(b)는 입력 $v_1=0, v_2=1$ 에 대한 응답특성으로 모두 안정한 결과임을 알 수 있다.

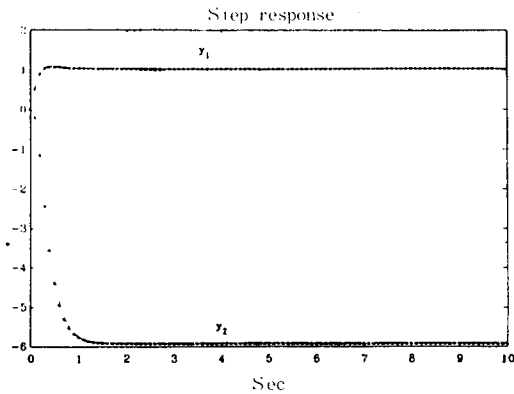
이에 반해 보전성을 고려하지 않고 설계한 F를 이용한 시스템에서는 그림5와 같이 $v_1=0, v_2=1$ 에 대해 감도특성이 매우 미약함(6×10^{-4})

을 보이고 있다.

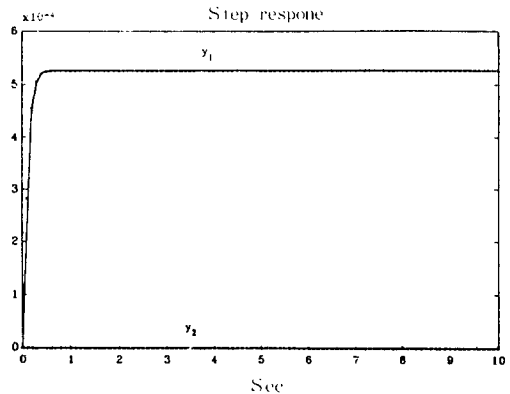
또 그림 6(a)는 루프 2 고장시 보전성 이득 K를 적용한 시스템의 $v_1=1, v_2=0$ 에 대한 응답이고 그림 6(b)는 $v_1=0, v_2=1$ 에 대한 응답으로 입력 $v_1=0, v_2=1$ 또는 $v_1=1, v_2=0$ 인 경우 모두에 대해 진동현상은 다소 있으나 안정한 응답을 보이고 있다.

그러나 루프 2 고장시 F이득을 이용한 시스템에서는 그림7과 같이 극히 불안정하여 제어 불가능한 결과를 나타내고 있다.

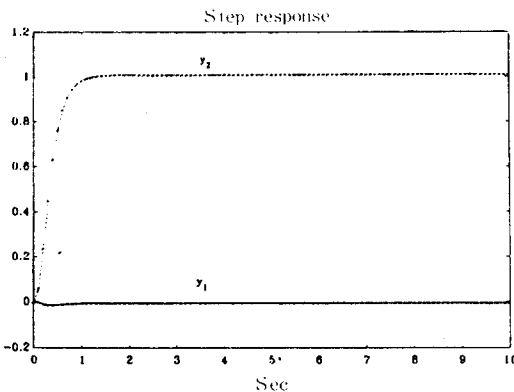
한편 센서고장시 K를 이용한 시스템에서 초



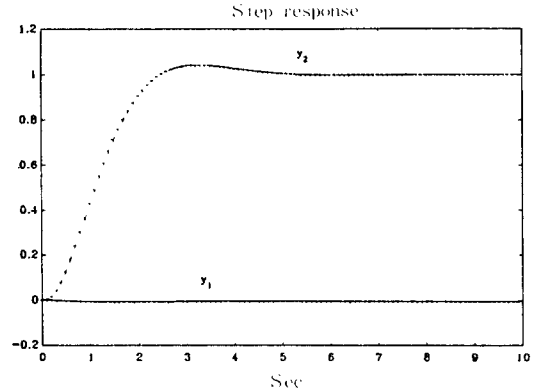
(a) $v_1=1, v_2=0$



(a) $v_1=1, v_2=0$



(b) $v_1=0, v_2=1$



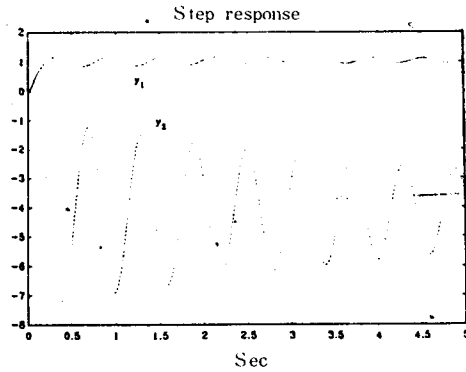
(b) $v_1=0, v_2=1$

그림4. 센서루프1 고장시 궤환행렬 K에 의한 폐 루프 시스템의 계단응답

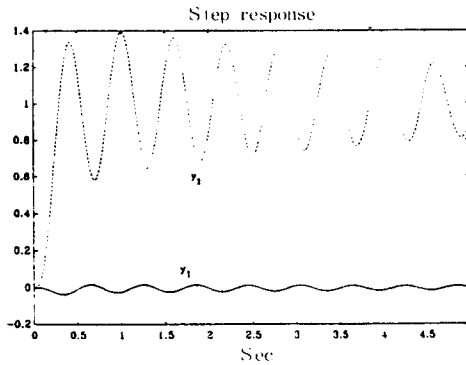
Fig. 4. Step response of the closed loop system with K-feedback gain to No.1 failure of sensor loop.

그림5. 센서루프1 고장시 궤환행렬 F에 의한 폐 루프 시스템의 계단응답

Fig. 5. Step response of the closed loop system with F-feedback gain to No.1 failure of sensor loop.



(a) $v_1=1, v_2=0$



(b) $v_1=0, v_2=1$

그림6. 센서루프 2 고장시 귀환행렬 K에 의한 폐 루프 시스템의 계단응답

Fig. 6. Step response of the closed loop system with K-feedback gain to No. 2 failure of sensor loop.

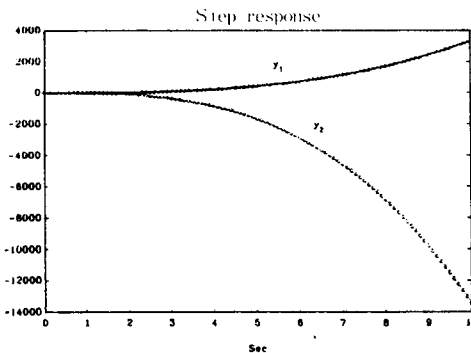
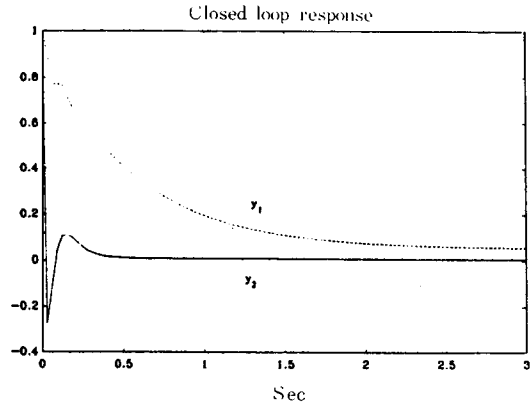
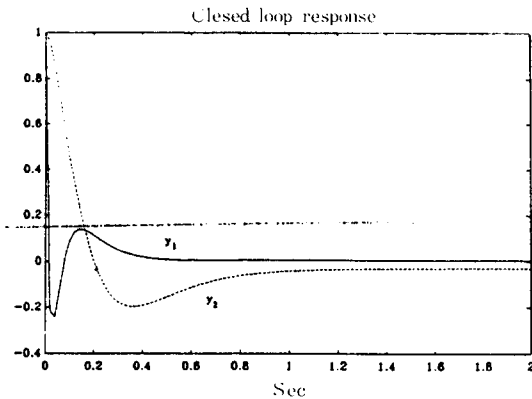


그림7. 센서루프 2 고장시 귀환행렬 F에 의한 폐 루프 시스템의 계단응답

Fig. 7. Step response of the closed loop system with F-feedback gain to No. 2 failure of sensor loop.



(a) 센서루프 고장시



(b) 정상태시

그림8. 귀환행렬 K에 의한 폐 루프 시스템의 초기치 $x_1(1=, \dots, 9)$ 에 대한 응답

Fig. 8. Response to initial value $x_1=1$ of closed loop system with K-feedback gain

표 1. 각 시스템의 고유치

Table. 1. Eigenvalue

$\sigma(A+BK)$	
$\sigma(A+BL_1K)$	$\sigma(A+BL_2K)$
-106 + j15.9	-106 + j15.8
-106 - j15.9	-106 - j15.8
-22.7 + j73.6	-0.82 + j9.6
-22.7 - j73.6	-0.81 - j9.6
-34.9 + j75.6	-10
-34.9 - j75.6	-33.7 - j9.3
-0.1 + j0.02	-33.7 - j9.3
-0.1 - j0.02	-29.8
-2.11	-5.0

기치 $x_1(i=1, \dots, 9)$ 에 대한 응답특성을 검토하기 위해 시뮬레이션 한 결과를 그림 8에 나타냈다. 역시 안정한 응답특성임을 알 수 있다. 또 고장시 K를 이용한 시스템의 고유치는 표1과 같이 모두 마이너스 값을 가져 고장에 관계없이 시스템은 안정함을 잘 입증하고 있다.

이상의 결과는 v_2 입력은 증기유속으로 이의 검출단 또는 조작단 고장은 조작 불가능하고 V_1 입력은 여자기 입력으로 이 루프 고장은 증기제어 루프 고장에 비해 시스템에 미치는 영향이 다소 적게 된다는 일반적인 통설과도 잘 부합됨을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 Riccati형 행렬방정식과 상태궤환을 이용해 센서 또는 액추에이터 고장에 대해 강인성을 갖는 터보-발전기 시스템의 제어기 설계 문제를 고찰하였다.

센서 또는 액추에이터와 같은 계장설비 고장시 강인성을 고려하지 않고 설계된 궤환이득 F를 이용한 시스템에서는 한 루프의 센서 고장에 대해 대단히 불안정한 응답특성을 보인 반면 본 논문에서 제시된 기법에 의해 설계한 강인성 이득 K를 적용한 시스템에서는 정상상태와 다름없이 고장에 대해 안정한 응답을 나타내어 많은 센서와 액추에이터로 구성된 계장 제어 다변수 시스템에 적용할 수 있음을 잘 입증하고 있다.

또한 조작단이나 검출단의 고장외에 송전계통의 절단 또는 외란에 대해서도 Riccati형 행렬의 파라미터에 의해 광범위하게 이득을 결정할 수 있어 INA, DNA, CL방법에 비해 훨씬 강인하고 자유도가 큰 시스템을 구성할 수 있음은 물론 액추에이터 고장에 대해서도 보전성을 갖는 시스템을 설계할 수 있다.

참 고 문 헌

1) J.C. Doyle and G.Stein, "Multivariable feedback

design," vol. AC-26, no.1, pp.681-691, 1981.

2) A.G.J. Macfarlane, "A survey of some recent in linear multivariable feedback theory," Automatica, vol.8, pp.415-492, 1972.

3) "MVPACK user's manual," AECL Report.

4) H.H. Rosenbrock, "Computer-aided control system design," Academic press, 1974

5) H. H. Rosenbrock, "Design of multivariable control systems using the Inverse Nyquist Array," Proc IEE, vol.116, no.11, pp.1927-1936, 1969.

6) J. J. Belletrutti and A. G. J. Macfarlane, "Characteristic loci techniques in multivariable control system design," Proc. IEE, vol.118, no. 9 pp. 1291-1297, 1971.

7) M.G. Safonov and A. J. Laub, "Feedback properties of multivariable systems : The role and use of the return difference matrix," IEEE vol. AC-26, no.1, pp.47-65, 1982.

8) Y. Arkun, B. Manousiouthakis and A. Palazoglu, "Computer-aided analysis and design of robust multivariable control systems for chemical processes," Computers and Chemical Engineering vol. 9, no.1, pp. 27-59, 1985.

9) K. Otuka, "Multivariable optimal control for generator excitation and governor systems," JIEE Trans, vol. 104-B, no.11, pp.31-38, 1984.

10) E.J. Davison, "The optimal output feedback control of a synchronous machine," IEE vol, PAS-90, no. 4, pp.2123-2134, 1971.

11) J. Ackermann, "Robustness against sensor failures," Automatica, vol.20 pp.211-215, 1984.

12) T. Fuji and E. Shimemura, "Integrity against arbitrary feedback loop failure in linear multivariable system Automatica," vol.24, pp.765-772, 1988

13) S. Kodama and N.Suda, "Matrix theory for system control," Society of Instrument and Control Engineers, 1978.

14) N. Kawasaki and E. Shimemura, "Determining quadratic weighing matrices to locate poles in a specified region," Automatica vol.19, no.5, pp. 557-560, 1983.

15) 김동화, "상태궤환을 이용한 터보 발전기 시스템의 비간섭 강인제어기설계," 아주대학교 박사학위논문, 1991.2.