

다변수 발전설비 모델에 대한 비간섭 제어기법 적용 연구

Application of decoupling control method to the multivariable generating system

洪錫教* · 金東和**

(Suk-Kyo Hong · Dong-Hwa Kim)

요 약

본 논문에서는 상태궤환에 의한 다변수 시스템의 비간섭 제어기법을 2입력 2출력 터보 발전기 시스템에 적용하는 문제를 연구하였다. 시뮬레이션 결과 터보 발전기 시스템은 정준형으로 비간섭 될 수 있었고 궤환이득에 의해 임의로 극 배치함으로써 시스템이 주파수 또는 부하변화에 관계없이 비간섭 되고 안정한 제어가 될 수 있음을 보였다.

Abstract

In this paper, application of decoupling control method of multivariable system by state feedback to turbo-generating system with 2-input and 2-output is studied. The results of simulation shows that turbo-generating system is canonically decoupled, and can be controlled against the change of load or frequency by feedback gain.

1. 서 론

최근의 터보-발전기와 같은 다변수 제어 시스템에서는 간섭 전달함수에 의해 루프간의 간섭 현상이 복잡하게 일어나므로 안정성 판별, 설계, 해석 등이 대단히 어렵게 된다¹⁾⁻³⁾. 따라서 불필

요한 이들 상호변수간의 간섭을 배제시켜 간단히 제어기를 설계하고 해석하는 문제는 구조가 복잡한 다변수 시스템에서는 대단히 중요하다. 이러한 다변수 시스템을 단일 입·출력 시스템으로 나누어 단일 입·출력 시스템에서 연구된 기법들을 이용하고자 하는 연구는 시간영역과 주파수 영역에서 많은 사람들에 의해 이루어졌으며^{4),5)} 주파수 영역에서의 INA⁶⁾, CL⁷⁾ 법과 같은 기법은 증부하지거나 주파수가 변하면 대각화가 이루어지지 않아 간섭현상은 일어나게 된다. 특히 증부하지 않

*正會員：亞洲大 工大 制御工學科 教授 · 工博

**正會員：韓國原子力 研究所 前任技術員 · 工博

接受日字：1991年 6月 1日

두부하용으로 주로 운전되고 있는 터보-발전기에서는 부하 계통의 변화에 대해 주파수 변화가 심하고 따라서 일정부하에서 설계된 제어기라 할지라도 경부하 또는 중부하에서는 간섭작용이 변하여 1차측에 가해지는 응력은 커지게 된다.

본 연구에서는 Falb와 Wolovich⁸⁾가 제시한 다변수 시스템의 비간섭 필요충분조건을 이용해 터보-발전기를 정준형으로 비간섭시켜 여하한 부하변화상태에 대해서도 여자기와 가버너 루프 사이의 간섭을 줄여 가버너 제어시 출력에는 각 속도에만 영향을 미치고 단자전압에는 영향을 주지 않도록 하여 터빈에 대한 기계적 응력을 감소 시키는 물론 단자 전압을 여자기 회로를 이용해 제어하여 계통외란에 대한 안정성을 증가시키도록 하고자 한다.

2. 터보-발전기 제어방식 및 문제점

2.1 제어방식

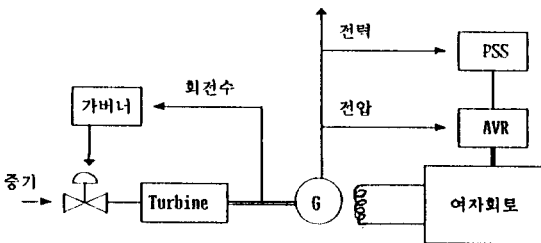


그림 1. 발전기의 고전 제어방식

Fig. 1. Conventional control system of turbo-generator

그림 1 은 종래의 터보-발전기 제어기법을 나타낸 것으로 대부분 발전기의 여자회로를 조절하여 단자전압을 제어하고(AVR), 가버너를 조작하여 증기량을 조절하므로써 발전기 동기속도를 일정히 유지하는 제어방식이다. 즉 AVR 및 가버너의 제어장치는 아날로그 PID제어기를 이용한 개별제어 방식을 채택하고 있고 과도상태시의 전압과 출력은 계통 안전제어장치(Power System

Stabilizer)에 의해 제어된다. 따라서 부하변동에 따라 단자전압 및 위상등의 변화가 크게 일어난다^{15), 16)}.

한편 최근의 전기식 고속 여자계를 이용하는 경우는 제어지연 효과는 개선시킬 수 있으나 발전기 출력은 가버너에 의해 제어되므로 전압과 출력 모두 안정한 제어를 위해서는 여자기와 가버너를 함께 제어하는 것이 보통이다. 따라서 부하변화시 가버너 조작에 의해 전기적 출력과 열 수력계통 사이의 간섭현상은 남게 된다.

2.2 종래 제어방법의 문제점

고전 제어기법의 문제점은 발전기의 전기적 특성과 회전자의 기계적인 동특성 사이에 강한 간섭현상이 있어 계자회로를 일정하게 설정했음에도 불구하고 증기유속 변화에 따라 회전자 각속도는 물론 단자전압이 심하게 변하게 된다. 따라서 1차측의 열 수력 계통에 강한 기계적 응력을 주게 되어 수명단축 및 시스템 외란의 원인이 되고 있다.

이러한 여자기와 가버너 루프 사이의 간섭은 부하가 증가 하면 더욱 커져 대형화 되어가는 최근의 전력 계통에서는 중요한 문제가 될 수 있다.

또한 경부하에서는 여자제어의 효과가 감소하므로 가버너 조절을 빨리하여 제어효과를 증가시키게 되는데 이러한 빈번한 가버너 조작은 단자전압의 진동 및 터보 계통에 대한 응력의 원인이 된다.

특히 속용 여자방식을 채택하는 최근의 제어계는 감도가 예민하게 되고 AVR의 이득이 커져 전력계통 동요시 제동효과 저하의 원인이 된다. 따라서 PSS를 채택하여 제동감소 억제 효과를 갖도록 하므로 기계적 동특성과 전기적 출력 사이의 간섭에 의해 역시 터빈 계통에 과도한 응력을 주게 된다.

3. 상태궤환에 의한 비간섭 제어

3.1 비간섭 제어를 위한 상태변수 모델

상태궤환을 이용해 제어방법을 개선하기위한

상태변수 모델식과 그 유도과정은 참고문헌¹²⁾을 인용하고 블록다이어그램만을 나타내면 그림 2와 같다.

여기서 입력은 증기유속과 여자기 설정전압, 출력은 부하각과 단자전압으로 하는 2 입력 2 출력 시스템이 된다.

여기서 미소변위를 δ 로 나타내고 상태변수를 $x_1 = \delta \phi_{fd}$ =계자쇄교자속, $x_2 = \delta \phi_d$ =직축 쇄교자속, $x_3 = \delta \phi_{kd}$ =뎀퍼쇄교자속, $x_4 = \delta \phi_q$ =횡축 쇄교자속, $x_5 = \delta e_a$ =단자전압, $x_6 = \delta e_{fd}$ =계자전압, $x_7 = \delta T_m$ =기계적인 토오크, $x_8 = \delta \omega$ =각속도[rad/sec], $x_9 = \delta \phi$ =부하각으로 정하면 입·출력 변수는 각각 $u = [\delta E_r, \delta T_m]^T$, $y = [\delta e_a, \delta \phi]^T$ 이 된다.

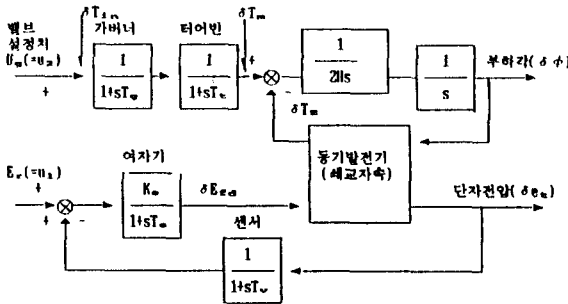


그림 2. 터어보-발전기 제어계 상세도

Fig. 2 Detail diagram of control system in turbo-generator

3.2 상태궤환에 의한 비 간섭화

비간섭 제어는 입·출력수가 같은 경우와 다른 경우로 나누어 생각 할 수 있는데 후자의 경우 비간섭 제어 법칙이 존재하기 위한 필요 충분조건은 보상기를 이용해 입·출력 수가 같은 경우로 변환 할 수 있으므로^{10), 11)} 본 연구에서는 입·출력수가 같은 경우만을 고려한다.

시스템에서 상태방정식이

$$S_0; \dot{x} = Ax + Bu \tag{1a}$$

$$y = Cx \tag{1b}$$

로 주어지는 선형 다변수 시스템을 생각한다. 여

기서 $x \in R^n$, $u \in R^m$, $y \in R^m$ 이고 시스템은 가제어 가관측이다. 이때 제어법칙

$$u = Fx + Gv \tag{2}$$

를 이용하면 폐 루프 시스템 S_f 는

$$S_f; \dot{x} = (A + BF)\bar{x} + BGv \tag{3a}$$

$$y = Cx \tag{3b}$$

이 되고, F, G는 각각 $F \in R^{m \times n}$, $G \in R^{m \times m}$ 의 차원을 갖는다.

여기서 다음과 같은 정의를 도입한다⁶⁾.

[정의 1] 음이 아닌 정수 d_i 를

$$d_i = \min \{k; CA^k B \neq 0, k \in 0, \dots, n-1\} \\ = n-1 \{CA^k B = 0, \text{ all } k\} \tag{4}$$

로 정의하고 이를 비간섭지수라 한다⁶⁾. 식(4)에서 C_i 는 C의 i 차행이다.

여기서 Cayley-Hamilton정리를 이용하면 식(3)의 전달함수 행렬 H의 전개식은 시스템 파라메터를 a_0, \dots, a_{n-1} 라 하면

$$H = C(sI - A - BF)^{-1} \cdot BG \\ = \{(s^{n-1} + a_{n-1}s^{n-2} + \dots + a_1)CBG \\ + (s^{n-1} + a_{n-1}s^{n-2} + \dots + a_2)C(A + BF)BG \\ + \dots + C(A + BF)^{n-1}BG\} \\ \div (s^n + a_{n-1}s^{n-1} + \dots + a_0)$$

이고 정리1에 의해 $C_iA, C_iAB, \dots, C_iA^{d_i-1}B$ 는 영이고 $C_iA^{d_i}B$ 는 영이 아니므로 전달함수 전개식은

$$C_i(A + BF)^k B = 0 \quad k \in (0, \dots, d_i - 1) \\ = C_iA^{d_i}B, \quad k = d_i \\ = C_iA^{d_i}(A + BF)^{k-d_i}B, \\ k \in (d_i + 1, \dots, n-1) \tag{5}$$

이 된다. 이때 비간섭된 시스템의 폐 루프 미분 방정식은 비간섭 지수의 정의에 의해

$$y_i^{d_i+1}(t) = M_i y_i^{d_i}(t) + M_{i, d_i-1} y_i^{d_i-1}(t) + \dots + M_{i, 0} y_i(t) \\ + N_{i, d_i-1} v_i^{d_i-1}(t) + \dots + N_{i, 0} v_i(t) \\ = \left[\sum_{k=0}^{d_i} M_{ik} C_i A^k \right] x(t) + \left[\sum_{k=0}^{d_i} N_{ik} v_i(t) \right] \tag{6}$$

이 된다. 또 β_i 는 $O_i \times 1$, γ_i 는 $O_i \times (d_i + 1)$ 의 차수이다.

\bar{C} 행렬은

$$\bar{C} = \begin{bmatrix} C_1 & 0 & \dots & 0 & 0 \\ 0 & C_2 & \dots & 0 & 0 \\ \vdots & \vdots & \ddots & \vdots & \vdots \\ 0 & 0 & \dots & c_m & 0 \end{bmatrix}, \quad C_i = [1 \ 0 \ \dots \ 0]$$

이고 C_i 의 차수는 $1 \times n_i$ 가 된다. 여기서 n_i 는 부 시스템의 차수이고 d_i 는 비간섭 지수, O_i 는 부 시스템의 영점수에 해당하고 이들 사이의 관계식은²²⁾

$$O_i = n_i - d_i - 1 \quad (19)$$

이 된다. 이때 얻어지는 변환행렬의 구성은

$$p_i = \{ \theta; \theta(A+BF)^i(BG)^k = 0 \} \quad (20)$$

$$j = 0, \dots, n-1, \quad k = 1, \dots, m, \quad k \neq j$$

로 정의되는 p_i 의 차수를 계산하여 얻는다. 또 C_i 는 C 행렬의 i 차 행이다.

한편 식(2)와 식(18)로 얻어지는 입력에 의해

$$\begin{aligned} \bar{x} &= \{A + B(F + GK_b Z)\}x + BGw \\ &= \bar{A}\bar{x} + \bar{B}w \end{aligned} \quad (21)$$

이 된다. 식(21)에서 임의로 극 배치 가능한 수는 적분형 비간섭 시스템에서 영점에 있는 극수와 같으므로 $F^* = F + GK_b Z$ 로 놓고 또 적당한 입력이득을 얻기 위해 G_b 를 이용하면 주어진 시스템에 대한 보상기는

$$F = -GK_b Z + F^* \quad (22)$$

$$G = (B^*)^{-1}G_b \quad (23)$$

가 된다. 여기서

$$G_b = \begin{bmatrix} g_1 & & 0 \\ & \ddots & \\ 0 & & g_m \end{bmatrix}$$

이다. 이와같이 해서 구성된 시스템은 그림 3과 같다.

한편 k_b 행렬의 이득은

$$k_i^T = \begin{bmatrix} (L_i B_i)^T \\ \vdots \\ (L_m B_i)^T \end{bmatrix} R$$

로 계산되고 L_i 는 Leverrier알고리즘에 의해 정의

되는 정방행렬, R 은 요구하는 전달함수 행렬 계수와 Leverrier알고리즘에 의해 결정되는 열 행렬이다.

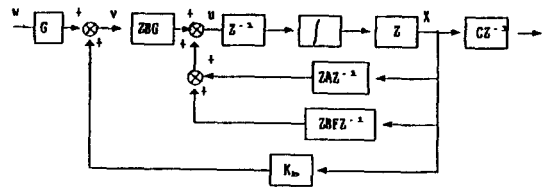


그림 3. 정준형 비간섭 시스템의 구조

Fig. 3. Structure of canonically decoupling system

4. 시뮬레이션 및 고찰

4.1 주어진 시스템의 간섭현상

간섭현상을 검토하기 위해 행렬 A, B, C 값을 이용하여 전달함수 $G(s)$ 를 구해보면

$$G_{11}(s) = (1.93 \times 10^2 s^6 + 4.26 \times 10^4 s^5 + 2.22 \times 10^6 s^4 + 4.47 \times 10^7 s^3 + 4.82 \times 10^8 s^2 + 4.9 \times 10^9 s + 6.7 \times 10^{10}) / D(s)$$

$$G_{12}(s) = (9.34 \times 10^2 s^5 - 3.69 \times 10^4 s^4 - 2.16 \times 10^7 s^3 - 9.59 \times 10^8 s^2 - 1.05 \times 10^{10} s - 8.18 \times 10^9) / D(s)$$

$$G_{21}(s) = (-9.81 \times 10^2 s^5 - 3.13 \times 10^5 s^4 - 3.26 \times 10^7 s^3 - 1.29 \times 10^9 s^2 - 1.92 \times 10^{10} s + 1.86 \times 10^{11}) / D(s)$$

$$G_{22}(s) = (8.98 \times 10^4 s^5 + 1.1 \times 10^7 s^4 + 6.44 \times 10^8 s^3 + 1.9 \times 10^{10} s^2 + 2.74 \times 10^4 s + 1.45 \times 10^{12}) / D(s)$$

$$D(s) = 4.17 \times 10^4 s^7 + 2.59 \times 10^6 s^6 + 8.81 \times 10^7 s^5 + 1.7 \times 10^9 s^4 + 2.05 \times 10^{10} s^3 + 1.86 \times 10^{11} s^2 + 1.22 \times 10^{12} s + 3.21 \times 10^{12}$$

가 되고 이때 A 행렬의 고유치는

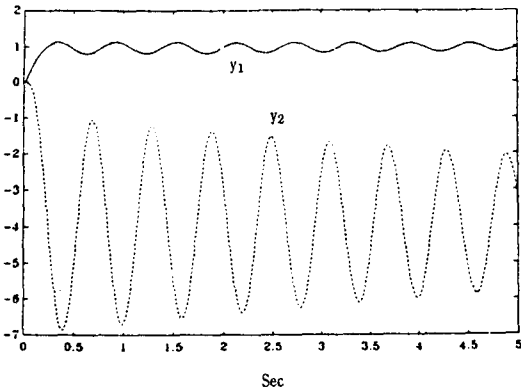
$$\delta_{1,2} = 0.06 \pm j15.88, \quad \delta_{3,4} = 0.1 \pm j10.47, \quad \delta_5 = -13.5,$$

$$\delta_{6,7} = -33.88 \pm j1.02, \quad \delta_8 = -29.6, \quad \delta_9 = -5.0$$

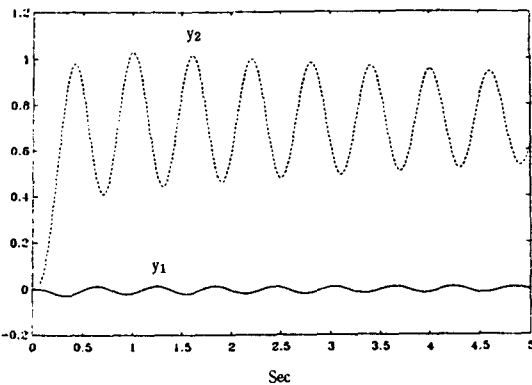
이 된다. 전달함수와 고유치에서 알 수 있는 바와 같이 간섭전달함수 $G_{21}(s), G_{12}(s)$ 가 존재하여 간섭 현상은 크고 양의고유치를 가져 응답은 불안정하게 됨을 알 수 있다.

여기서 입력 변수를 여자 전압 조정기 설정치(u_1)와 증기유속(u_2), 출력 변수를 단자전압(y_1), 부

하각(y_2)으로 하고 하고 개 루프 상태에서 응답을 구한 것이 그림 4이다. 그림 4(a)은 계단입력에 대한 응답특성으로 u_1 입력에 대해 출력 y_1 은 1을 중심



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



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

그림 4. 주어진 시스템의 계단응답 특성

그림 4. The characteristics of step response of the given system

으로 진동하는 응답을 보이고 있고 y_2 는 최대 -6.8 값까지 진동하는 응답을 나타내어 입력 u_1 에 대한 출력 u_2 의 간섭현상이 대단히 큼을 알 수 있다.

또 입력 u_2 에 대한 응답특성은 출력 y_2 가 0.8을 중심으로 진동하고 있고 y_1 은 비교적 적은 간섭 현상을 보이고 있어 u_1 에 대한 u_2 의 간섭현상이 문제점으로 지적될 수 있음을 알 수 있다.

4.2 적분형 비간섭 시스템

한편 비간섭지수의 정의에 의해 주어진 터어보-발전기 모델에 대한 비간섭 지수는 $d_1=2$ 가 되고 F^*, G^* 는 각각

$$F^* = \begin{bmatrix} -9.99 \times 10^2 & 4.50 \times 10^3 & -4.92 \times 10 & -6.28 \times 10^3 \\ -2.15 \times 10 & 4.97 \times 10 & -4.21 \times 10^{-1} & 4.84 \times 10 \\ -5.32 \times 10^3 & -4.38 & 9.65 \times 10^{-1} & -6.35 \times 10 & 8.535 \times 10^2 \\ 0 & -1.41 \times 10^{-1} & -1.07 & -7.12 \times 10^{-1} & 2.70 \times 10 \end{bmatrix}$$

$$G^* = \begin{bmatrix} -5.16 \times 10^{-31} & 0 \\ 0 & 3.61 \times 10^{-3} \end{bmatrix}$$

이 된다. 이 F^*, G^* 을 이용해 변환시킨 시스템은

$$G_{11}(s) = (s^6 + 215 s^5 + 1.01 \times 10^{10} s^4 + 1.38 s^3) / D(s), \\ G_{12}(s) = G_{21}(s) = O / D(s), G_{22}(s) = (s^6 + 215 s^5 + 1.01 \times 10^{10} s^4 + 1.38 \times 10^5 s^3) / D(s), D(s) = s^9 + 215 \times 10^2 s^8 + 1.01 \times 10^4 s^7 + 1.38 \times 10^5 s^6$$

로 적분형이 되고 고유치는 $\sigma_1 = -155, \sigma_2 = -32.3, \sigma_3 = 0, \sigma_{4,5} = 0, \sigma_{6,7} = 0, \sigma_8 = 0, \sigma_9 = -27.2$ 으로 시스템은 불안정하게 된다. 즉 상태제한에 의해 이루어진 폐 루프 시스템은 간섭전달 함수가 영이 되어 간섭현상은 없어졌으나 응답에 영향을 주는 전달함수 $G(s)_{11}, G(s)_{22}$ 가 $1/s^3$ 의 형태를 하게 되므로 응답은 불안정 하게 된다.

4.3 정준형 비간섭 시스템

시스템을 안정하게 비간섭 시키기 위해 변환행렬 Z 를 이용하면 \bar{A} 는

$$\bar{A} = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 35.7 & 160 & 0.12 & -155 & 0 & 1.2 & -0.43 & 0 & 0 \\ 6.2 & 2.7 & 0 & 0 & -27.2 & -1.0 & 0.16 & 0 & 0 \\ \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots & \dots \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & -1.5 & 0 & 0 & -3.2 \end{bmatrix}$$

이 된다. 즉, 변환행렬 Z 에 의해 주어진 시스템 행렬은 정준형으로 변환된다. 위의 행렬에서 각 부 시스템의 영점과 간섭 지수와의 정의

$$\beta_i = n_i - d_i - 1$$

에 의해 첫번째 부 시스템에서는 -155, -27.7에 2개의 영점이, 두번째 부시스템에서는 -3.2에 1개의 영점이 존재하고 있음을 알 수 있다.

이들 영점을 상쇄시키고 극을 $s_1 = -10, s_{2,3} = -1 \pm j1$ 로 설정하여 그림 5와 같은 원하는 응답이 얻어지도록 하면 각각의 부 시스템에 대한 전달함수는

$$G(s)_{11} = \frac{(s+155)(s+27.7)}{(s+155)(s+27.7)(s^2+2s+2)(s+10)}$$

$$G(s)_{22} = \frac{(s+3.2)}{(s+3.2)(s^2+2s-2)(s+10)}$$

이 된다. $G(s)_{11}$ 에서는 2개의 영점을 $G(s)_{22}$ 에서는 1개의 영점을 상쇄시켜야 하므로 결국 최적응답을 얻을 수 있는 계수는 $a_2=12, a_1=22, a_0=20$ 이 되어 정준형으로 변환된 시스템에서 극을 옮기기 위해 필요한 게환이득 K_b 는

$$K_b = \begin{bmatrix} 20 & 22 & 12 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 20 & 22 & 12 & 0 \end{bmatrix}$$

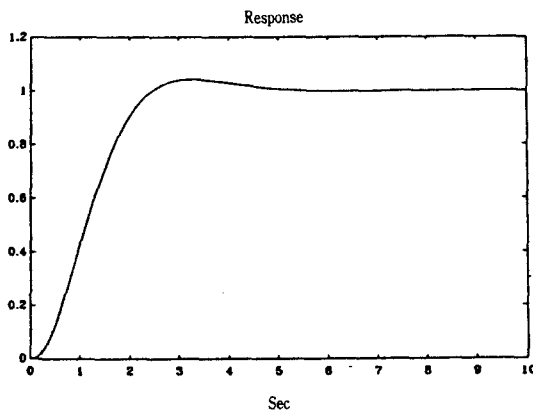


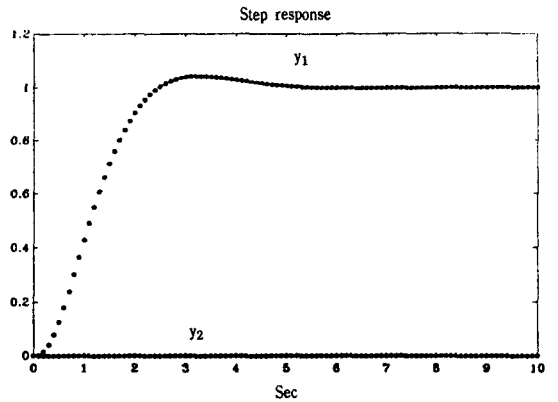
그림 5. 원하는 비간섭 시스템의 계단응답
그림 5. The desired step response.

이 된다. 따라서 극 배치까지 고려해 얻어지는 주어진 시스템에 대한 게환이득 F 는

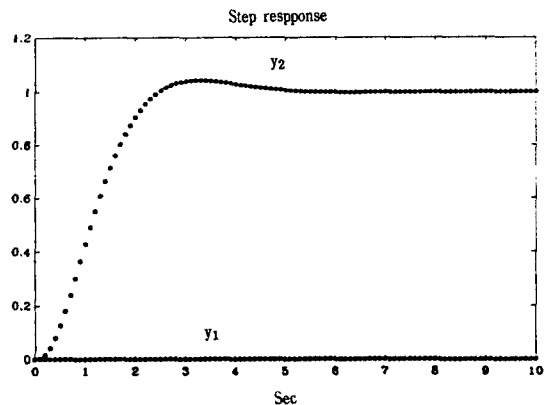
$$F = \begin{bmatrix} 923 & -4070 & 3.4 & 5580 & 4711 & 3.9 & -0.196 & 6.14 & -793 \\ 21.5 & -40 & 0.4 & -2.7 & 0 & 0.14 & -1.3 & 0.64 & -17 \end{bmatrix}$$

한편 이 게환행렬 F 를 이용한 시스템의 고유치는 $\sigma_1 = -155, \sigma_2 = -32.3, \sigma_{3,4} = -1 \pm j1.0, \sigma_{4,5} = -1 \pm j1.0, \sigma_7 = -10, \sigma_8 = -10, \sigma_9 = 27.7$ 가 되어 시스템은 안정하고 요구하는 응답을 얻기위한 고유치와 같음을 알 수 있다.

그림 6은 이 시스템을 이용해 시뮬레이션 한 결과로 그림 5의 응답곡선과 같음을 알 수 있다.



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



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

그림 6. 정준형 비간섭 시스템의 계단응답
그림 6. Step response of canonically decoupling system

그림에서 알 수 있는 바와 같이 입력의 종류에 관계없이 시스템은 비간섭된 응답을 보이고 있다. 즉 정준형으로 비간섭화 시키고 비간섭된 시스템을 적당히 선정환 이득행렬에 의해 극을 이동시킴으로써, 입·출력 수 만큼 시스템은 비간섭 제어를 할 수 있고 아울러 안정한 응답도 얻을 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 상태궤환을 이용한 터보-발전기 시스템의 강인 비간섭 문제를 고찰하였다. 터보-발전기의 응답특성은 입·출력 종류에 관계없이 변수간의 간섭현상이 심하게 일어나 일정하게 여자기를 설정했음에도 불구하고 중기유속의 변화에 대해 각속도 및 단자전압이 동시에 변하는 현상이 일어난다.

이와같이 간섭현상이 강한 시스템에 비간섭 기법을 적용하는 경우 쉽게 비간섭 시킬 수 없으므로 본 연구에서는 정준형으로 시스템을 비간섭 시키고 궤환이득 및 이득행렬을 이용해 극 배치 함으로써 만족스런 결과를 얻을 수 있었다.

향후 이와 유사한 다변수 시스템의 강인제어에 실질적으로 응용이 가능할 것으로 본다.

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 recents 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) 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.
- 7) 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.
- 8) P.L. Falb and W.A. Wolovich, "Decoupling in the design and synthesis of multivariable control systems," IEEE vol.AC-12, no.6, pp.651-659, 1967.
- 9) Henry, "Simplication and extension of the Falb-Wolovich decoupling theory," Int.J.Control, vol.25,n0.5,pp. 805-818, 1977.
- 10) S.Kamiyama and K.Furuta, "Decoupling by ristricted state feedback," IEEE vol,AC-19, no. pp.413-415, 1974
- 11) L.M.Silverman, "Decoupling with state feedback and compensation," IEEE vol, AC-15, pp.487-489, 1970.
- 12) A.S. Morse and W.M.Wonbam, "Decoupling and pole assignment by dynamic compensation," SIAM J. Control, vol.8, no-3, pp.317-337, 1970.
- 13) B.A.Stacey, "Multivariable control of a 3 fin toredo," ACC, pp.326-329, 1989.
- 14) M.Tsuju, "Approximate noninteractive power regulation of a coupled core reactor," IEEE vol, NS-20, no.3, pp.1835-1842, 1983.
- 15) E.J.Davison, "The optimal output feedback control of a synchronous machine," IEEE vol,PAS-90, no.4, pp.2123-2134, 1971.
- 16) K. Otuka, "Multivariable optimal control for generator excitation and governor systems," JIEE Trans, vol.104-B, no.11, pp.31-38, 1984.
- 17) 김동화, "상태궤환을 이용한 터보 발전기 시스템의 비간섭 강인제어기 설계," 아주대학교 박사학위 논문, 1991, 2.