

H_{∞} 제어이론을 사용한 동기 발전기의 2-자유도 제어

김영수 · 김태준 · 이병하
인천대학교

Two-Degree-of Freedom Control of the Synchronous Generator Using H_{∞} Control Methods

Young-Su Kim · Tae-Joon Kim · Byung-Ha Lee
University of Incheon

Abstract - In this paper the control methods for the synchronous generator is designed based on the two-degree-of-freedom (TDOF) control methods which can satisfy the command following property and Robust control property at the same time. The power systems is reduced to one machine infinite-bus system. Robust stability of the proposed power system stabilizer is checked through the simulation considering the circumstance which can happen in real situation.

1. 서 론

최근 발전 계통의 안정적 운영을 위하여 전력계통안정기 (Power System Stabilizer, PSS) 및 동기 발전기 (Synchronous Generator)에 대한 연구가 많이 수행되어 왔다. 기존에 많이 쓰이는 전력계통 안정기의 설계방법으로는 여자의 입력과 전기자 토오크 사이의 지상을 보상하기 위한 보상회로와 고주파 필터를 통하여 저주파 영역에서 제동토크를 증대시키도록 전력계통안정기의 변수를 결정하는 방법[1]을 기본으로 최적제어이론을 이용하여 기존의 전력계통안정기의 변수를 최적화하는 기법[2,3], 시스템의 불안정에 영향을 미치는 전력계통의 고유치를 최적하게 원하는 위치로 오도록 하는 방법[4,5]등이 있다. 이러한 제어기법들은 고속의 여자계통(Excitation System)의 도입으로 불가피하게 발생하는 제동토크의 부족의 보상에 초점을 맞추고 있으며 통상적으로 특정한 동작점에 대하여 최적의 성능을 낼수 있는 제어기의 계수를 결정한다. 그리고 동기발전기의 전기적인 토오크는 회전자의 위상각에 비례하는 동기화토크 성분과 회전자 속도 변화에 비례하는 제동토크의 성분으로 분류된다. 전력계통의 안정도의 문제를 전기적인 토크 관점에서 보면 동기화 토크가 부족하여 동기탈조현상을 발생되고, 제동토크가 작아서 비교적 작은 외란에도 기계적인 진동을 감쇄시키는 능력이 결여되어 회전자 위상각, 전력, 전압의 저주파 진동이 지속된다. 전력계통을 구성하는 동기발전기,여자시스템,송전선로 등의 파라미터들은 그 정확한 값을 알기 힘들다. 따라서 제어기 설계시 사용하는 파라미터들은 항상 실제 값과 어느정도의 오차를 가지기 마련이다. 이러한 모델의 불확실성을 표현하는 수학적인 방법으로 파라미터 불확실성 표현법과 모델링되지 않는 동특성 표현법등이 있다.

H_{∞} 이론을 이용한 강인제어이론의 내용은 플랜트의 불확실성(uncertainty)을 섭동모델로 표현하고, 특정한 조건을 만족하는 모든 섭동에 대해서 안정화시킬수 있는 제어기를 찾는 것이다.[6,8,9] 그러나 강인성 제어계의 설계에서 H_{∞} 이론을 적용하는 방법으로 서로 보상관계에 있는 비구조적인 섭동과 출력단의 외란에 대한 고주파수 및 저주파수 영역에서 동시 최적화

문제를 다루고 있으나, 강인성은 보장되지만 기준신호에 대한 목표치 추종특성이 좋지 않은 결점을 가지고 있다.

따라서 본 논문에서는 H_{∞} 제어이론에 의한 강인안정성과 목표추종성능이 동시에 가능한 2자유도 제어기법을 제안하여 동기발전기의 강인제어계를 구성한다. [10] 먼저 시스템의 제어플랜트를 모델링을 하고 상태변수(동기토크각의변동($\Delta\delta$), 동기각속도의변동($\Delta\omega$), 발전기 내부전압 변동($\Delta e'_q$), 발전기의 여자전압 변동(ΔE_{FD}))를 구성하고, 외부로부터 들어오는 외란에 대한 가중함수를 설정·조절하여 외란·진동억제성능을 개선하기 위하여 이상적인 1관성계응답을 이용하여 피드백 보상제어기를 구성하여 보다 건설한 2자유도제어계를 설계한다.

2. H_{∞} 제어이론과 2-자유도계 구조

2.1 H_{∞} 제어이론

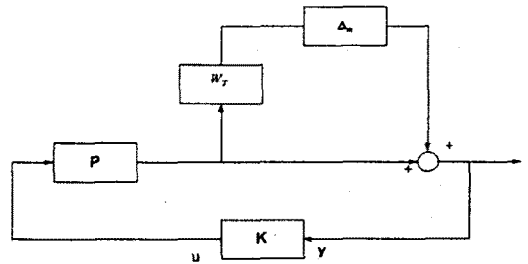


그림 1. 건설제어계

제어대상 $P(s)$ 와 보상기 $K(s)$ 가 그림 1과 같은 피드백 제어계에서 $P(s)$ 는 승법적 변동으로 표현된다고 하자.

$$P(s) = (1 + \Delta_m(s) W_T(s)) P(s) \quad (1)$$

여기서 $|\Delta_m(j\omega)| < 1, \forall \omega$

$P(s)$ 의 불안정극수는 $P(s)$ 의 불안정극수와 변동하지 않는 범위에서 임의의 변동을 한다고 가정하자. 그 경우 그에 따른 임의의 변동에 대하여 폐루프계가 안정한 경우 건설안정하고 그러기 위한 필요충분조건은 다음과 같다.

$$|T(j\omega)| < |\Delta_m W_T(j\omega)|^{-1}, \forall \omega \quad (2)$$

$$T(s) = \frac{P(s)K(s)}{1 + P(s)K(s)} \quad (3)$$

식 (2)의 조건을 $H_\infty norm$ 을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\|W_T T\|_\infty < 1 \quad (4)$$

식 (4)의 조건을 만족하는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 것이 H_∞ 제어문제이다.

2.2 2-자유도계의 설계

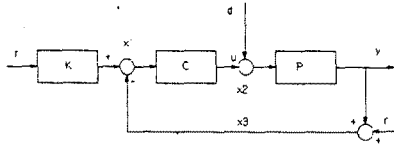


그림2. 2-자유도제어계(I)

[그림2]에서 하나의 제어계에 대하여 목표치 γ 로부터 제어량 y 로의 전달함수를 $H_{y\gamma}$, 외란 d 로부터 제어량 y 로의 전달함수를 $H_{y\gamma}$ 이라 하자.

$$\begin{aligned} H_{y\gamma} &= \frac{CPK}{1+CP} \\ H_{y\gamma} &= \frac{P}{1+CP} \\ H_{y\gamma} &= \frac{CP}{1+CP} \end{aligned} \quad (5)$$

이때 이들 전달함수 중 몇 개를 독립적으로 설정할 수 있으나 하는 것이 자유도의 개념이다. 여기서 K 는 $H_{y\gamma}$ 이외의 다른 전달함수에 영향을 끼치지 않으므로 $H_{y\gamma}$ 를 먼저 결정한 후 K 를 변화시키기에 따라 $H_{y\gamma}$ 을 독립적으로 조정하는 것이 가능하다. 그러나 $H_{y\gamma}$ 와 $H_{y\gamma}$ 를 독립적으로 설정하는 것은 불가능하다. 따라서 [그림2]의 제어계는 2자유도 제어계이다. 이와 같은 2자유도 제어계를 설계하는 경우 보통 C 는 시스템의 내부안정성을 확보할 수 있도록 설계하고 K 는 정상상태오차와 속응성과 같은 목표치 추종능력을 향상시킬 수 있도록 설정한다. 이 구조에서 피드백 제어기 C 와 플랜트 P 를 기약분해(Coprime Factorization)하면 다음과 같이 된다.

$$P = N_P D_P^{-1}, \quad C = N_C D_C^{-1} \quad (6)$$

식(6)를 이용하여 γ, d, n 으로부터 x_1, x_2, x_3 로의 전달함수를 구하면 다음과 같은 수식으로 전개가 가능하다.

$$\begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \frac{1}{N_P N_C + D_P D_C} \begin{bmatrix} D_P D_C K & -N_P D_C & -D_P D_C \\ D_P N_C & D_P D_C & -D_P N_C \\ N_P N_C & N_P D_C & D_P D_C \end{bmatrix} \begin{bmatrix} r \\ d \\ n \end{bmatrix} \quad (7)$$

식(7)의 9개 전달함수가 모두 안정하다면 이 시스템은 내부안정이라고 말한다. 내부안정조건을 만족하는 피드백 제어기 C 를 구할 수 있다면 이 시스템은 안정화되어 있다고 할 수 있다. 피드포워드 제어기는 식(5)에서 γ 로부터 y 로의 전달함수에만 포함되어 있으므로 이 제어기는 다음과 같은 조건만을 만족하면 된다.

$$K \in RH_\infty \quad (8)$$

(그림2)의 2자유도 제어계를 등가변환하면 (그림3)와 같이 된다. 마찬가지로 K_1 은 목표치 추종능력을, K_2 는 내부안정성을 담당하게 설계한다.

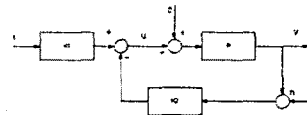


그림3. 2-자유도 제어계(II)

3. 동기발전기의 모델링

본 논문에서 대상으로 하고 있는 발전 계통은 그림 4와 그림5에서와 같은 기계적 입력을 고정시킨 상태 ($\Delta T_m = 0$)에서 선형화된 1기 무한 모선의 4차의 전력계통이다. 이는 대기 전력계통을 축약 과정을 통하여 구성된 모의 전력계통이다.

편의상 각속도의 변위값 $\Delta\omega$ 를 시스템의 출력으로 정의하였고, PSS의 출력은 여자기(Exciter)의 보조 입력 단자를 통하여 입력된다. 그림 4에 나타난 블록 다이어그램을 상태 방정식으로 표시하면 다음과 같다.

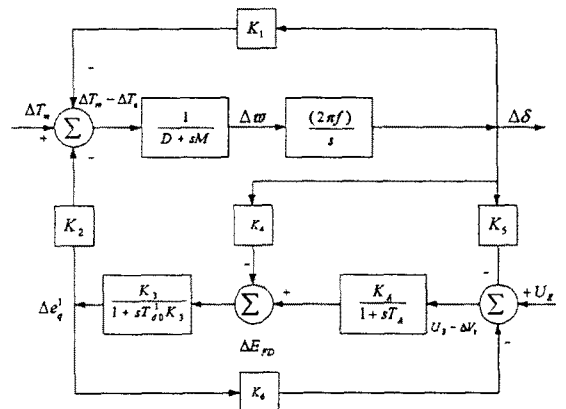


그림4. 저주파진동해석을 위한 전달함수 다이어그램

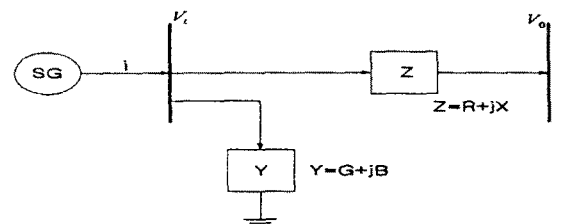


그림 5. 1기-무한 모선의 전력계통 시스템

그림4와 같은 1기 무한 모선에 연결된 발전기 시스템의 상태방정식은 다음과 같다.

$$X = Ax + Br + B_d \zeta_a \quad (10)$$

$$y = Cx$$

여기서 정의된 상태변수 X_1, X_2, X_3, X_4 는 각각 $\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta e_q, \Delta E_{FD}$ 로 정의된다.

$$\begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 0 & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ \omega_d & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T_{do}} & -\frac{1}{T_{do}} & \frac{1}{T_{do}} \\ 0 & -\frac{K_A K_5}{T_A} & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix} u \quad (11)$$

$$y = [1 \ 0 \ 0 \ 0] \begin{bmatrix} X_1 \\ X_2 \\ X_3 \\ X_4 \end{bmatrix} \quad (12)$$

4. Simulation 과 결과분석

본 논문에서 사용한 동작점의 값은 참고문헌의 선로상태와 동작조건을 이용하여 정하였으며, 그 값은,

$$M=9.26, D=0, T_{do}=7.76, x_d=0.973,$$

$$x_q=0.55, x_d'=0.19, K_A=50, T_A=0.05$$

$$K_1=0.5758, K_2=0.9738, K_3=0.6584$$

$$K_4=0.5266, K_5=-0.0494, K_6=0.8450$$

따라서, 이 경우 (식13)을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$A_p = \begin{bmatrix} 0 & -0.0622 & -0.1052 & 0 \\ 377 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -0.0679 & -0.1957 & 0.1289 \\ 0 & 49.3876 & -845.0022 & -20 \end{bmatrix} \quad (13)$$

$$B_p = [0 \ 0 \ 0 \ 1000]$$

이를 일반화 플랜트에 적용하여 제어기를 구해보면,

$$K(S) = \frac{-0.0000058 S^5 - 0.03577 S^4 + 1.129 S^3}{10^{-11} * 0.1 S^7 + 10^{-6} * 0.1 S^6 + 0.000048528 S^5} \\ * \frac{24.1711 S^2 + 140.58411 S^1}{0.01117250 S^4 + 1.36160 S^3 + 0.75062425 S^2} \\ * \frac{1.40342515}{0.007384 S^1 + 0.000014211}$$

제시된 전력계통안정화기의 안정성과 목표추종성능을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 모의실험을 행하였다. [7]비교를 위하여 동일한 조건으로 H_∞ 제어기법의 제어기로 PSS를 구성하여 같은 컴퓨터 시뮬레이션을 행하였다.

그림6에서의 피드백 구조를 갖는 H_∞ 제어기의 동기토크각의 출력은 완만하게 수렴하나, 그림7에서는 2-자유도계의 H_∞ 제어기의 동기토크각의 출력은 빠르게 수렴함을 알 수 있다.

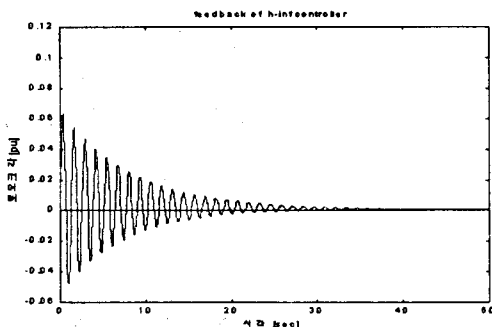


그림6. 피드백 구조를 갖는 H_∞ 제어기의 동기토크각의 출력

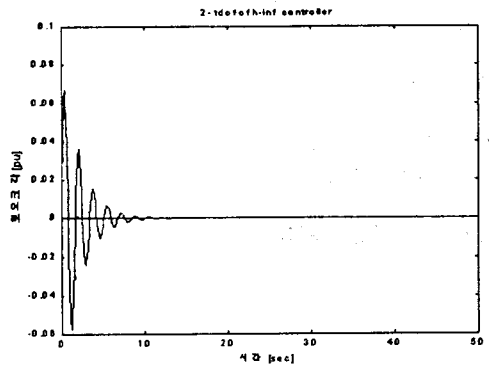


그림7. 2-자유도계의 동기토크각의 출력

5. 결론

본 논문에서는 강인제어의 한 분류로써 H_∞ 제어기법을 이용하여 설계된 제어기로 2-자유도계를 구성하여 PSS를 설계하였다. 기존의 H_∞ 제어기법을 이용한 피드백구조의 PSS와 모의실험을 통하여 토크 외란에 대하여 양호한 강인성을 나타냄과 목표추종성능이 양호하게 나타남을 알 수 있었다. 계속적으로 여러 가지 상황의 모델내의 계수변화를 통하여 2-자유도계의 특성을 연구하여야 하고, 여러 가지 2-자유도계의 구조를 연구하여 적용되어야 할 것이다.

(참고 문헌)

- [1] F.P.deMello, C.Concordia, "Concept of Synchronous Machine Stability as Affected by Excitation control", IEEE Trans. on PAS, Vol. 88, 1969.
- [2] Y. Yu, K. Vongsuriya and L.N.Wedmen, "Application of an Optimal Control Theory to a Power system", IEEE Trans.on.PAS.Vol.89, No.1, pp.55-62, 1970.
- [3] Ali Feliachi, Xianofan Zhang et. al, "Power system Stabilizers Design Using Optimal Reduced Order Models, Part II : Design", IEEE Trans on Power System, Vol. 3, No. 4, pp.1676-1684, 1988.
- [4] H. A. Moussa, Y. Yu, "Optimal Power System Stabilization Through Excitation and/or Governor Control", IEEE Trans PAS Vol. 91, pp.1166-1174, 1972.
- [5] T. L. Hwang, S. C. Chen, T. Y Hwang, W. T. Yang, "Power System Output Feedback stabilizer Design Via Optimal Subeigenstructure Assignment", IEEE Trans Power System Vol. 6, No. 3, 1991.
- [6] J. C. Doyle, B. A. Francis and A. R Tannebaum, Feedback Control Theory, Maxwell Macmillan, New York, 1992.
- [7] R.Y. Chiang and M.G. Safonov, The Robust control Toolbox for Matlab, The MathWork, Inc
- [8] B. R. Barmish, New Tools for Robustness of linear Systems, Maxwell Macmillan, New York, 1994.k, MA, 1992.
- [9] Zhou, k, Doyle, J.C. and Glover, K., Robust optimal control, Prentice Hall, 1996.
- [10] Yoichi hori, "Control of 2-Inertia System only by a PID Controller," Trans.IEE-Japan, Vol.115-D No1, pp.86~87, 1995.