

H_∞ 최적 제어기법을 이용한 전력계통의 안정화에 관한 연구

허 동렬*, 왕 용필*, 이 정필*, 정 형환*
* 동아대학교 전기공학과

A Study on Power System Stabilization using H_∞ Optimal Control Method

D. R. Hur*, Y. P. Wang*, J. P. Lee*, H. H. Chung*
* Dept. of Electrical Engineering at DongA Univ.

Abstract - In this paper, we are considered various possible disturbance conditions in order to design controller. H_∞ optimal controller is successfully designed to control in such as situations. To do this, we are determined weighting function and design parameter γ to method of trial and error by Glover-Doyle algorithm. To compare with H_∞-PSS and conventional-PSS which is applied in nominal system and load variations, the dynamic characteristics of H_∞-PSS controller was verified which has a good response.

으로 취급될 것이다. 일반적인 발전기 모델을 가진 1기 무한모선의 블록선도는 그림 2와 같다.

1. 서 론

전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer)는 저주파 진동을 막는데 주요한 역할을 담당하고 있고, 발전기 제어계통 안정도에 관하여 중요한 부분을 차지하고 있다. deMello와 Concordia[1]의 연구로부터 전력계통 안정화 장치를 향상시키기 위하여 많은 노력이 이루어져 왔다. 즉, 고유치 기법을 이용한 방법, 선형 최적기법[2], 적응제어[3], 인공지능 신경회로망[4] 등 다양한 방법이 제안되었다. 하지만, 이러한 제어기법들의 단점 중에 하나가 불확실성을 고려하지 않은 고정된 선형화 모델을 이용하여 제어를 설계하였기 때문에, 계통내의 파라메타 변동과 같은 불확실성이 존재하는 경우에는 정확한 제어 목적을 달성할 수가 없다.

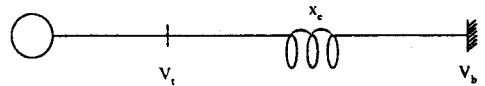


그림 1 1기 무한대 모선 계통

따라서 이러한 모델의 불확실성에도 불구하고 시스템 응답을 안정하고 플랜트의 매개변수들의 차이에 따른 강인성을 보장하며, 갑작스런 부하 변동시 안정된 응답을 확보하기 위해서 강인한 제어기가 절대적으로 요구된다.

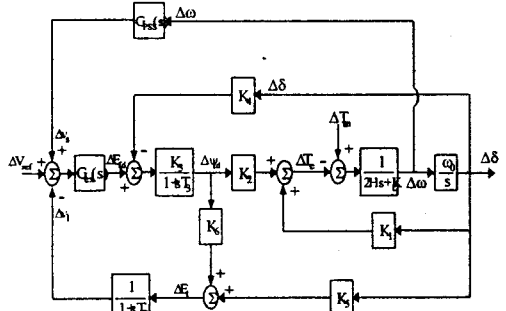


그림 2 PSS를 포함한 선형화된 계통 모델

이를 위하여 본 연구에서는 제어기 설계시 미리 플랜트의 가능한 외란 조건을 고려하고, 그와 같은 상황에서도 적절히 제어 할 수 있는 제어기 형태를 제시해 주는 H_∞ 최적 제어기를 설계하였다. 가중치 선택에서는 Glover와 Doyle[5-6] 알고리즘을 이용하여 시행착오(trial and error)적인 방법으로 적절한 가중치 함수(weighting function)와 설계 파라메타 γ 를 선정하였다. 그리고 H_∞-PSS와 고전적인 PSS를 정상상태와 부하변동에 적용하여 H_∞-PSS 제어기 동특성이 우수함을 입증한다.

여기서 상태변수 $x = [\Delta\omega \ \Delta\delta \ \Delta\psi \ \Delta\theta \ \Delta v_1]^T$ 이고, $\Delta\omega$ 는 PSS 제어기의 입력신호이고, Δv_s 는 시스템 제어신호이다. 외부외란은 $d = [\Delta V_{ref}]$ 이다. 파라메타 $K_1 \sim K_6$ 은 참고문헌 1에서 주어졌다.

시뮬레이션에서 사용한 시스템 파라메타는 표 1과 같다.

표 1. 시스템 파라메타와 PSS 파라메타

System parameter	$x_d = 1.81$	$x_q = 1.76$	$x_d' = 0.03$
	$x_e = 0.4$	$K_D = 0.0$	$H = 3.0$
PSS parameter	$T_3 = 1.91$	$T_R = 0.02$	$G_{ex}(s) = 200$
	$v_t = 1.0$	$P = 0.9$	$Q = 0.3$
	$\delta = 79.13$		
	$K_{stab} = 9.5$	$T_w = 1.4$	$T_1 = 0.154$
	$T_2 = 0.033$		

2. System Model

본 연구에서 고찰하고자 하는 대표적인 전력 계통 모델은 그림 1과 같은 1기 무한대 모선 계통이다. 이 시스템은 회로망을 무한대 모선으로 축약하였기 때문에 자체적으로 불확실성을 많이 내포하고 있다. 본 연구에서는 무한모선에서 무시한 동적인 요소를 플랜트에서 외란

3. H_∞ 제어기 설계

3.1 H_∞ 제어이론

H_∞이론에서 성능척도인 H_∞-norm은 주파수 영역에서 다음과 같이 정의 된다.

$$\|G\|_{\infty} = \sup_w \bar{\sigma}_{\max}[G(jw)] \quad (3)$$

여기서 $\bar{\sigma}_{\max}[G(jw)]$ 는 $G(jw)$ 의 최대 특이치를 의미한다.

표준 문제를 나타내는 블록선도는 다음 그림3과 같다.

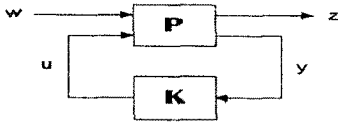


그림 3. H_{∞} 표준문제 블록선도

그림 3은 표준문제를 나타내는 블록선도이며 w, u, z, y 는 벡터치인 신호들이다. 여기서 w 는 외부입력신호이고, u 는 제어입력, y 는 측정출력, z 는 오차신호이다. 그리고 전달함수 P 는 가중함수를 포함하는 일반적인 플랜트를 나타내며, K 는 제어를 나타낸다. 여기서 P 는 다음과 같이 표현된다.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} \quad (4)$$

그림 3에 의해서 다음 관계식으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} z &= P_{11}w + P_{12}u \\ y &= P_{21}w + P_{22}u \\ u &= Ky \end{aligned} \quad (5)$$

식 (5)를 연립하여 u 와 y 를 소거하여 풀면 다음과 같다.

$$z = [P_{11} + P_{12}K(I - P_{22}K)^{-1}P_{21}]w \quad (6)$$

식 (6)은 외부 입력 변수 w 에서 z 로의 전달함수이며, 이를 P 와 K 에 대한 선형 분수 변환(Linear Fractional Transformation : LFT) $F(P, K)$ 라고 한다. 식(6)은 다음 식으로 간단히 나타낼 수 있다.

$$z = F(P, K)w \quad (7)$$

즉, H_{∞} 표준 문제라는 것은 제어기 K 가 플랜트 P 를 안정하게 한다는 조건하에서 w 에서 z 로의 전달 행렬 $F(P, K)$ 의 H_{∞} -norm을 최소화 시키는 유한 진분수 형태의 유리함수(real rational proper)형태의 제어기 K 를 구하는 것이다.

$$\gamma_{\text{opt}} = \min_{\text{stabilizing } K} \|F(P, K)\|_{\infty} \quad (8)$$

3.2 H_{∞} 제어기 설계

일반적으로 외란 및 추적 성능을 만족시키기 위하여 저주파수에서는 루프이득이 크게 유지할 필요가 있고, 반면, 고주파수에서는 주파수 잡음 및 불확실성을 제거하기 위해 루프 이득을 작게 유지할 필요가 있다. 중간 주파수역에서는 안정도 여유조건(stability margin requirement)을 만족시키도록 이득을 조절하여야 한다.

실제 적용에 있어서는 특이값 루프정형(Singular value loop shaping) 방법을 이용하여 외란의 영향과 모델의 불확실성에 의한 영향을 고려한다. 실제 피드백 제어 시스템은 다음 그림 4와 같다.

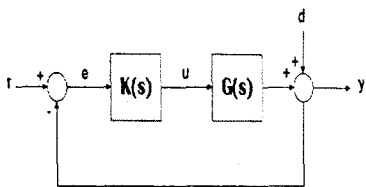


그림 4 피드백 제어 시스템

가) 외란 억제 효과

감도함수 $S(s)$ 는 외란 d 로부터 출력 y 로의 전달 함수를 나타내며, $S(s)$ 의 특이치는 외란의 억제 정도를 낸다. 일반적으로 외란은 저주파수 영역에서 한정되어 있으므로 외란 d 가 출력 y 에 영향이 최소화 되도록 저주파수 영역에서 감도함수 $S(s)$ 의 H_{∞} -norm을 최소화함으로써 루프를 안정화하는 제어기 K 를 설계할 수 있다.

$$\text{minimize } \|S\|_{\infty} \quad (12)$$

그러나 외란이 에너지를 갖는 주파수역 외에서 감도를 최소화하는 것은 불필요한 잡음 증폭을 일으킬 수 있으며, 충분한 안정도 여유를 갖지 못하게 된다. 따라서 외란이 에너지를 갖는 저주파수 역에서 안정하며, 최소위상인 전달함수 $W_e(s)$ 를 가중 시킴으로써 외란에 대한 감도를 최소화 한다.

$$\bar{\sigma}[S(jw)] < |W_e^{-1}(jw)| \quad (13)$$

나) 강인 안정성 효과

$T(s)$ 는 제어 시스템의 안정도 여유, 즉 모델의 불확실성과 관련된 함수이다. 여기서는 승산형 섭동 모델을 고려하였기 때문에 다음의 조건이 만족하도록 설계한다.

$$\text{minimize } \|T(s)\|_{\infty} \quad (14)$$

모델 불확실성은 주로 고주파수 역에서 에너지를 가지기 때문에 승산형 섭동 모델의 크기에 대해서 주파수에 따른 경계치를 고려하기 위해 전달함수 W_u 를 가중시킨다.

$$\bar{\sigma}[T(jw)]_{\infty} < |W_u^{-1}(jw)| \quad (15)$$

다) 혼합 성능 조건

감도함수 $S(s)$ 와 상보감도함수 $T(s)$ 를 동시에 고려한 문제를 혼합감도문제라 하며, 선형 분수변환에 의해 외부입력 w 에서 외부출력 z 로의 전달함수는 다음과 같다.

$$F(P, K) = \begin{bmatrix} W_e(s)S(s) \\ W_u(s)T(s) \end{bmatrix} \quad (16)$$

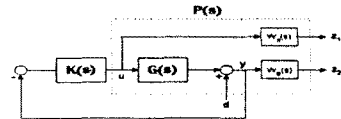


그림 5. 가중함수를 포함한 루프 시스템

본 논문에서 그림 5와 같이 특이값 루프 정형 방법에 의해 H_{∞} 제어기를 설계하면, 주파수 영역에서 가중된 감도함수 $S = (I + GK)^{-1}$ 와 상보감도함수 $T = K(I + GK)^{-1}$ 의 H_{∞} -norm을 최소화하는 제어기를 설계할 수 있다.

$$\min_{K(s)} \left\| \begin{bmatrix} W_e(jw)S(jw) \\ W_u(jw)T(jw) \end{bmatrix} \right\|_{\infty} \quad (17)$$

일반적으로 W_e 는 낮은 주파수에서 크게 하고 높은 주파수에서는 작게 하며, W_u 는 낮은 주파수에서 작게 하고 높은 주파수에서 크게 한다.

그림 5와 같이 G 와 K 를 정의하면 위의 선형 분수변환 식은 다음과 같이 된다.

$$\begin{aligned} P_{11} &= \begin{bmatrix} W_e \\ 0 \end{bmatrix}, & P_{12} &= \begin{bmatrix} -W_e G \\ W_e G \end{bmatrix}, \\ P_{21} &= [I], & P_{22} &= [-G] \end{aligned} \quad (18)$$

따라서 G 를 확장한 플랜트 P 의 전달함수는 다음과 같다.

$$P = \begin{bmatrix} P_{11} & P_{12} \\ P_{21} & P_{22} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} W_e & -W_e G \\ 0 & W_e G \\ I & -G \end{bmatrix} \quad (19)$$

상태 변수 영역에서 제어기 설계는 전달함수 $P(s)$ 를

상태 방정식으로 나타내고, 이에 대한 대수 Riccati방정식을 풀어서 원하는 제어기를 구한다.

4. 시뮬레이션 및 결과

시스템 출력에 외란의 영향을 최소화하기 위해 외란의 주파수 대역에서 감도함수의 특이값 $\sigma[S(j\omega)]$ 을 최소화하기 위해 가중함수 $W_e(s)$ 를 식(20)과 같이 선택하였다.

$$W_e = \frac{0.1s+15}{1.8s+15} \quad (20)$$

그리고, 모델화 되지 않은 불확실한 모델에 대한 시스템 강인성을 향상시키기 위해 높은 주파수 대역에서 상보감도함수 $\sigma[T(j\omega)]$ 를 최소화하기 위해 가중함수 $W_u(s)$ 를 다음과 같이 선택하였다.

$$W_u = \frac{s+100}{0.1s+100} \quad (21)$$

이러한 가중함수는 만족하는 응답특성이 얻어질 때까지 반복하여 선택하였다. 이에 의해 설계된 제어기 전달함수는 식(22)과 같다.

$$K(s) = \frac{3.09s^6 + 1.0 \times 10^7 s^5 + 1.06 \times 10^{10} s^4 + 6.07 \times 10^{11} s^3}{s^6 + 2.08 \times 10^3 s^5 + 1.80 \times 10^6 s^4 + 9.46 \times 10^8 s^3} \\ + \frac{1.01 \times 10^{13} s^2 + 4.55 \times 10^{13} s - 2.15 \times 10^{12}}{+ 2.39 \times 10^{11} s^2 + 1.92 \times 10^{12} s + 8.07 \times 10^8} \quad (22)$$

그림 6은 H_∞ -PSS(H-PSS)와 conventional-PSS(C-PSS)의 $G(I+GK)^{-1}$ 의 보드선도를 비교한 것이다. 그림에서와 같이 H-PSS가 C-PSS보다 좋은 감도특성을 보여주고 있다.

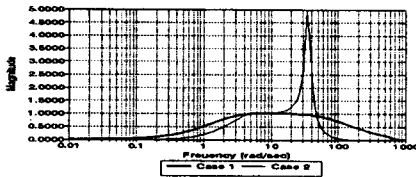
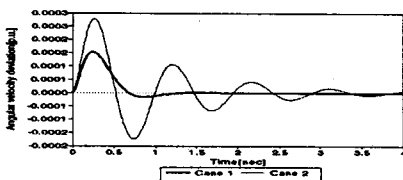


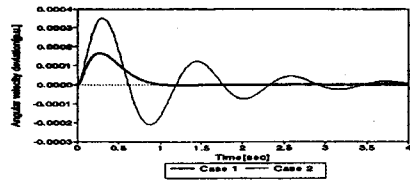
그림 6 $G(I+GK)^{-1}$ 의 보드선도

그림 7(a)는 정상 상태에서의 H_∞ -PSS(Case 1)와 C-PSS(Case 2)의 경우를 각속도 편차 응답특성을 보여주고 있고, 그림 7(b)는 전력 변동시에, 그림 7(c)는 제동계수 K_D 변동시에 Case 1과 Case 2의 경우에 대하여 각속도 편차 응답특성을 보였다. 외란은 ΔV_{ref} 에 0.01(p.u.)의 스텝을 지속적으로 증가하였다.

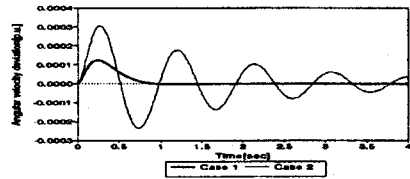
그림 7(a)에서와 같이 Case 1의 경우가 Case 2의 경우보다 우수한 동특성을 보여주고 있고, 그림 7(b), (c)에서와 같이 부하변동이 생겼을 때는, Case 2의 경우는 응답특성이 더 나빠졌음에도 불구하고 Case 1의 경우는 우수한 응답특성을 보여주고 있다.



(a) 정상 상태에서의 응답특성



(b) 전력변동시 응답특성($P=1.3875$, $Q=0.4625$)



(c) 제동계수 변동시 응답특성($K_D=-7.06$)

그림 7. 시스템의 각속도 편차 응답특성

5. 결 . 론

본 논문에서는 전력시스템의 안정화를 위하여 H_∞ 최적 제어기법을 이용하여 제어기를 설계하였고, 감도함수와 상보감도함수를 동시에 고려하여 시스템의 성능과 안정성을 동시에 만족하도록 설계하였다. 설계된 제어기가 고전적인 PSS보다 H_∞ -PSS가 우수한 감도특성을 보여 주었고, 정상상태 및 부하변동에 대하여 동특성이 우수한 응답을 보여 주었다.

앞으로 제어기의 차수가 고차화된 단점을 보완하고, 가중함수 선택을 시행착오적인 방법에서 탈피하여 최적화기법을 이용한다면 실제 시스템에서 아주 폭 넓게 사용되리라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] F. P. Demello and C. Concordia, "Concept of synchronous machine stability as affected by excitation control", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-88, No. 4, pp. 316-329, 1969
- [2] Y. N. Yu, "Electric power system dynamics", ACADEMIC PRESS, 1983
- [3] C. X. Mao et al, "Studies of real-time adaptive optimal excitation controller and adaptive optimal power system stabilizer", IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 7, No. 3, pp. 498-605, 1992
- [4] Y. Y. Tsu and C. R. Chen, "Tuning of Power System Stabilizers using an Artificial Neural Network", IEEE Trans. on Energy Conv., Vol. 6, No. 4, pp. 612-619, 1991
- [5] Huibert Kwakernaak, "Robust control and H_∞ -optimization Tutorial paper", Automatica, Vol. 29, No. 2, pp. 255-273, 1993
- [6] R. Y. Chiang and M. G. Sofonov, "Robust Control toolbox User Guide", The Math Works Inc., 1992
- [7] Y. N. Yu, "Electric power system dynamics", ACADEMIC PRESS, 1983
- [8] P. Kundur, "Power system stability and control", McGraw-Hill, Inc. 1994
- [9] Kemin Zhou, "Essentials of robust control", Prentice-Hall, 1998