

유전알고리즘을 이용한 H_∞ 전력 계통 안정화 장치의 최적 설계

한길만, 이정필, 정현화, 정형환
 동아대학교 전기공학과

Optimal design of H_∞ power system stabilizer using genetic algorithm

G. M. Han, J. P. Lee, H. H. Chung, H. H. Chung
 Dept. of Electrical Engineering Dong-A University

Abstract - In this paper, a robust H_∞ optimal design problem under a structure-specified PSS is investigated for power systems with parameter variation and disturbance uncertainties. Genetic algorithm is employed for optimization method of PSS parameters. It is shown that the proposed H_∞ PSS tuned using genetic algorithm is more robust than conventional PSS.

1. 서 론

현대 전력계통에서 발전여자 시스템은 고속 전압 조정기와 뒤집/앞집 PSS 의 형태를 갖는 보조 여자 제어기로 구성된다. PSS의 파라미터를 얻는 종래의 기법들은 주로 상 보상 기법, 극배치 기법 등이 제안되었다. [1] 이러한 기법들은 동작점 부근의 선형화된 모델을 이용하여 제어를 설계 하였기 때문에 불확실성이 많이 존재하는 전력계통에서는 정확한 제어 목적을 달성할 수가 없다. 이를 위하여 최근에 최적 H_∞ 제어 이론이 보조 여자 제어를 설계하는데 사용되고 있다. [2][3] 그러나, 일반적으로 PSS의 차수는 2차이지만 최적 H_∞ 제어기는 플랜트의 차수보다 매우 높은 차수를 가진다. 그러므로, H_∞ 제어를 사용 하고자 한다면, 모든 현존하는 PSS를 새로운 고차의 보조 여자 제어기로 대체하여야만 하는 문제가 발생한다. 이것은 실제적인 문제에 있어서는 매우 비효율적이다. 그러므로 설치되어 있는 PSS의 구조를 변화시키지 않고 계통 요소를 향상시킬 수 있는 강인한 제어기 설계 방법을 개발할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 유전알고리즘[4][5]을 이용하여 구조가 고정된 최적 H_∞ -PSS의 파라미터를 결정하였다. 종래의 방법에 의한 PSS와 제안한 방법에 의한 PSS를 각각 적용하여 시뮬레이션한 경우에 대한 동특성과 강인성을 비교 고찰 하였다.

2. 안정도 해석을 위한 선형화 모델(1)

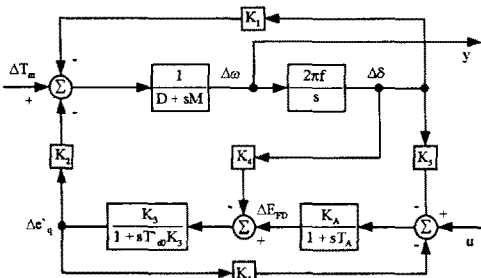


그림 1 안정도 해석을 위한 선형화 된 모델

동기 발전기와 여자의 비선형 모델을 동작점 부근에서 선형화한 1기 무한대 모선의 모형은 그림 1과 같다. 여기서, ω 는 각속도, δ 는 회전자각, e_q' 는 발전기 횡축 자속에 비례하는 전압, E_{FD} 는 유기기전력, Δ 는 편차, $K_1 \sim K_6$ 는 전력계통의 선형화 계수를 나타낸다

그림 1을 기초로 한 1기 무한대 모선의 상태 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} X(t) = AX(t) + BU(t)$$

$$Y(t) = CX(t) \tag{1}$$

여기서, 상태변수는 $X(t) = [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta e_q', \Delta E_{FD}]$ 이다.

3. H_∞ 제어 혼합 감도 문제

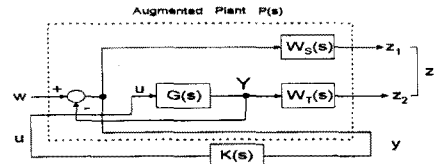


그림 2 가중함수를 갖는 페루프 시스템

H_∞ 표준문제라는 것은 제어기 $K(s)$ 가 플랜트 $P(s)$ 를 안정하게 한다는 조건하에서, 외부 입력 변수 w 에서 출력 z 로의 전달 함수 $F(P, K)$ 의 H_∞ -norm을 최소화시키는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 것이다. 실제로 H_∞ 제어를 설계하기 위해서는 그림 2와 같이 특이값 루프 정형 방법을 이용하여 식 (3)을 만족하는 외란억제 성능과 식 (4)을 만족하는 모델의 불확실성에 의한 강인 안정성을 고려하여야 한다.

$$\|S(j\omega)W_S(j\omega)\|_\infty < 1 \tag{3}$$

$$\|T(j\omega)W_T(j\omega)\|_\infty < 1 \tag{4}$$

여기서, $S(s)$ 와 $T(s)$ 는 각각 시스템의 감도함수와 상보 감도함수이며 식(5), 식(6)과 같다.

$$S(s) = (I + P(s)K(s))^{-1} \tag{5}$$

$$T(s) = P(s)K(s)(I + P(s)K(s))^{-1} \tag{6}$$

감도함수 $S(s)$ 와 상보감도함수 $T(s)$ 를 동시에 고려한 문제를 혼합감도 문제라 하며, 식 (7)과 같이 외부 입력 변수 w 에서 출력 z 로의 전달 함수 $F(P, K)$ 의 H_∞ -norm을 최소화하는 제어를 설계는 것이 된다.

$$\min_{K(s)} \left\| \begin{matrix} W_S(j\omega) S(j\omega) \\ W_T(j\omega) T(j\omega) \end{matrix} \right\|_{\infty} \quad (7)$$

가중함수를 포함한 확장된 행렬을 상태공간 방정식으로 나타내면 식 (8)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1 w + B_2 u \\ z &= C_1 x + D_{11} w + D_{12} u \\ y &= C_2 x + D_{21} w + D_{22} u \end{aligned} \quad (8)$$

그리고 제어기 $K(s)$ 는 다음과 같이 상태공간 방정식으로 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_k &= A_k x_k + B_{1k} u_k \\ y_k &= C_k x_k + D_{k2} u_k \end{aligned} \quad (9)$$

위의 식 (8)과 식 (9)를 이용하여, 제어기를 포함한 외부 입력 w 에서 조절되는 출력 z 로의 폐루프 전달함수는 식 (10)과 같다.

$$T_{zw} = F(P, K) = \begin{bmatrix} A_{cl} & B_{cl} \\ C_{cl} & D_{cl} \end{bmatrix} \quad (10)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_{cl} &= \begin{bmatrix} A + B_2 D_k C_2 & B_2 C_k \\ B_k (I + D_{22}) C_2 & A_k + B_k D_{22} C_k \end{bmatrix} \\ B_{cl} &= \begin{bmatrix} B_1 + B_2 D_k D_{21} \\ B_k (I + D_{22}) D_{21} \end{bmatrix} \\ C_{cl} &= \begin{bmatrix} C_1 + D_{12} D_k C_2 & D_{12} C_k \end{bmatrix} \\ D_{cl} &= \begin{bmatrix} D_{11} + D_{12} D_k D_{21} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

폐루프 시스템의 불확실성과 예측치 못한 외란에 대하여 강인성을 극대화 시키기 위하여 외부 입력 w 에서 z 로의 전달함수 T_{zw} 의 H_{∞} -norm을 최소화시키는 문제로써 평가함수를 식 (11)과 같이 둔다.

$$\text{Min } (J = \|T_{zw}\|_{\infty}) \quad (11)$$

4. 유전 알고리즘을 이용한 H_{∞} -PSS의 최적 설계

유전알고리즘을 이용하여 전력계통 안정화 장치의 최적 파라미터를 구하기 위하여 목적함수는 PSS를 포함한 w 에서 z 로의 폐루프 전달함수의 H_{∞} -norm을 이용하였다. 최적화에서 사용되어진 구속조건은 식 (12)와 같다.

$$\begin{aligned} \varphi_i &\geq \varphi_0 \\ \gamma_i^{\min} &\leq b_i \leq \gamma_i^{\max} \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, φ_i 는 폐루프의 i 번째 제동비, φ_0 는 최소 제동비, γ_i^{\min} 는 파라미터 b_i 의 최소값, γ_i^{\max} 는 파라미터 b_i 의 최대값이다.

종래의 앞섬-뒤집 PSS의 구조는 그림 3과 같이 블록 선도로 나타낼 수 있다. 그림 3에 의하여 종래의 PSS를 전달함수 형태로 나타내면 식 (13)와 같이 나타낼 수 있다.



그림 3 PSS의 구조

$$PSS(s) = \frac{u_E}{\Delta\omega} = \left(\frac{sT}{1+sT} \right) \left(\frac{K_C(1+sT_1)}{1+sT_2} \right) \quad (13)$$

여기서, K_C 는 PSS의 이득이고, T 는 washout 시정수, $T_1 \sim T_2$ 는 PSS의 특성을 결정하는 시정수이다.

본 논문에서 최적화 하고자 하는 파라미터는 K_C , T , T_1 , T_2 가 되며, 유전알고리즘을 이용하기 위해 각각의 파라미터들을 2진 문자열로 나타내면 그림 4와 같다.

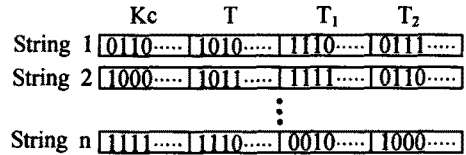


그림 4 부호화된 파라미터 집단

각각의 문자열을 식 (11)을 만족하는 문자열을 선택하도록 하는 적합도 함수는 식 (14)와 같이 선정하였다.

$$\text{Fitness} = \frac{1}{\text{Min } \|T_{zw}\|_{\infty}} \quad (14)$$

전력계통에 적용된 유전 알고리즘을 이용한 PSS의 파라미터를 최적화 하는 과정은 다음과 같이 요약할 수 있다.

- step 0) 주어진 플랜트 $G(s)$ 에 대하여, 가중함수 $W_S(s)$ 와 $W_T(s)$, 제어기 구조 $PSS(s)$ 를 선정하고, 유전알고리즘 파라미터 교차율(P_c), 돌연변이율(P_m), 집단수(P_l)를 적절히 선정한다.
- step 1) 상 보상기법 및 다른 구속조건을 통하여 제어기 파라미터 공간을 결정한다.
- step 2) 필요한 문자열 길이를 계산한다.
- step 3) 랜덤하게 2진 스트링의 집단을 발생한다.
- step 4) 실제 파라미터로 디코딩 하여 H_{∞} norm을 계산한다. 필요조건을 체크하고 각 문자열에 대한 적합도를 계산한다.
- step 5) 탐색목표가 달성되거나 허용 가능한 세대가 달성되면 멈추고, 아니면 계속한다.
- step 6) 유전알고리즘의 연산자 복제 교차 돌연변이를 통하여 자손을 생성하고 step 4)로 돌아간다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 강인한 PSS의 최적 설계를 위하여, H_{∞} 제어 이론에 기초하여 유전 알고리즘을 이용하였다. 본 논문에서 사용한 유전 알고리즘에 사용된 파라미터 값은 표 1과 같고, 동기기, 여자기 및 선로정수와 계통 초기 상태는 표 2와 같다.

표 1. 유전알고리즘 파라미터

문자열 길이	집단의 크기	교차율(P_c)	돌연변이율(P_m)
60	30	0.85	0.01

표 2. 시스템 파라미터

발전기 정수	M = 9.26, D = 0, T _{do'} = 7.76 x _d = 0.973, x _{d'} = 0.19, x _q = 0.5	
여자기 정수	K _A = 50,	T _A = 0.05
선로 정수	R = -0.034, X = 0.997, G = 0.249 B = 0.262	
초기상태	P _{e0} = 1.00 Q _{e0} = 0.0115 V _{t0} = 1.05	

본 논문에서는 정상 부하시 및 선로정수가 30% 변동시에 $\Delta\delta$ 의 초기치를 0.1[p.u.]를 변화시킨 경우로 계통 운용 조건을 설정하고, 각 운전점에서 선형화된 모델을 이용하여 종래의 Yu의 보상기 설계 이론에 의한 파라미터 선정방법과 제안한 방법을 비교하여 동특성을 고찰하였다. 외란억제 및 강인 안정성을 위해 가중합수는 각각 식 (3), (4)를 만족하도록 식 (15)와 같이 선정하였다.

$$W_s = \frac{0.1s+8}{0.1s+0.4}, \quad W_T = \frac{1.8s+0.01}{0.1s+0.05} \quad (15)$$

구속 조건인 최소 계동 비 ζ_0 는 25%로 두었다. 그림 5는 제안한 방법에 의한 최적화시 각 세대에 따른 H_∞ norm의 수렴을 나타내고 있다. 그리고, Yu의 방법과 유전알고리즘을 이용한 PSS의 최적 파라미터는 표3과 같이 나타났다.

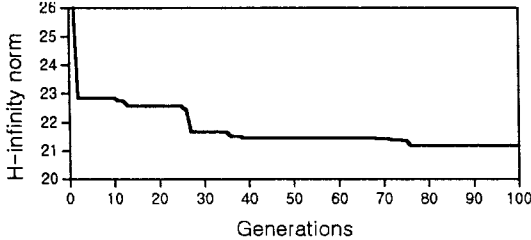


그림 5 각 세대에 따른 H_∞ norm

표 3. Yu 방법과 제안한 방법에 의한 PSS 파라미터

	K _C	T	T ₁	T ₂
Yu	7.0900	3.0000	0.6850	0.1000
Proposed	13.1325	6.9962	0.5069	0.0892

정상 부하시 및 선로 정수가 30% 변동시에 대하여 Yu의 방법과 제안한 방법을 이용하였을 경우에 페루프 전달함수의 H_∞ norm은 표4와 같이 낮아졌고, 각각에 대한 주요 동요 모드의 계동비는 표 5와 같이 높아짐을 알 수 있었다.

표 4. 페루프 시스템의 H_∞ norm

	Yu	Proposed
정상 부하시	23.8390	21.1716
선로정수변동	34.2350	26.2450

표 5. 주요 동요 모드의 계동비(%)

	Yu	Proposed
정상 부하시	25.17	37.22
선로정수변동	16.70	28.76

그림 6은 정상 부하시 동특성 응답을 나타내고 있고,

그림 7은 선로정수가 30% 변동 하였을 경우의 동특성 응답을 나타내고 있다.

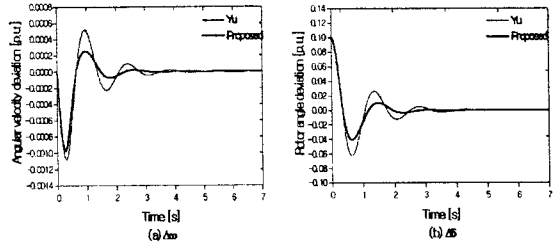


그림 6 정상부하시의 동특성 응답

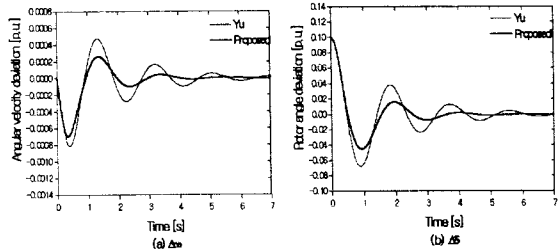


그림 7 30% 선로 파라미터 변동시의 동특성 응답

그림 6과 그림7의 결과로부터 제안한 설계방식이 Yu의 보상기 설계이론에 의한 방법보다 외란 억제 능력이 우수하며, 선로 정수의 변동시에도 우수한 강인성을 나타내고 있음을 알 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 전력계통의 저주파 진동을 억제하기 위한 전력계통 안정화 장치의 구조를 변화시키지 않고 계동 요소를 향상시킬 수 있는 강인한 제어기 설계 방법을 제안하였다. 평가함수인 H_∞ norm을 최소화하기 위하여 최적화 알고리즘으로서 유전 알고리즘을 이용하였다. 제안한 설계 방식은 최적 H_∞ 제어기법을 이용한 보조 제어기를 설계한 경우에 비해 제어기 차수를 매우 감소시킬 수 있었고, 시뮬레이션을 통하여 정상부하시의 외란 억제와 선로정수가 변동한 경우에 있어 제안한 PSS는 종래의 PSS 보다 강인함을 알 수 있었다.

(참고 문헌)

- [1] Y. N. Yu, "Electric power system dynamics", ACADEMIC PRESS, 1983
- [2] R. Asgharian, "A robust H_∞ power system stabilizer with no adverse effect on shaft torsional modes", IEEE Trans. on energy conversion, Vol. 9 No. 3, 475-481, 1994.
- [3] Huang Shu and Tongwen Chen, "Robust digital design of power system stabilizers", INT. J. Control., Vol. 70, No.2, 227-248, 1998.
- [4] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithm in search, optimization, and machine learning", Addison-Wesley Publishing Co. Inc. 1989
- [5] J. J. Buckley and Y. Hsuashi, "Fuzzy genetic Algorithm for optimization", Proc. of 1993 international joint conference of neural networks, pp. 725-728, 1993