

IA를 이용한  $H_\infty$ -PSS의 최적 설계에 관한 연구

이정필 · 허동렬 · 김창현 · 정형환  
 동아대학교 전기공학과

A Study on Optimal Design of  $H_\infty$ -PSS using IA

Jeong-Phil Lee · Dong-Ryol Hur · Chang-Hyun Kim · Hyeng-Hwan Chung  
 Dept. of Electrical Engineering Dong-A University

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

1. 서 론

전력시스템의 운용 도중에 발생하는 안정도 문제중에 시스템의 동작점 주변에서 발생하는 미소 신호 안정도(Small-signal stability)는 대단히 중요한 문제로 인식되고 있다. 따라서 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)는 동기회회전자의 저주파 진동을 억제 위하여 발전기 여자 조절에 의해 전체 시스템의 안정도를 향상시키기 위한 효율적인 수단으로서 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 그 가운데 특히 종래의 lead/lag형태의 PSS는 제어기의 구조가 간단하고 유용성이 있으며 그 구현이 쉽기 때문에 현대 전력계통에 가장 보편적으로 사용되고 있다.

전력시스템의 가장 중요한 특징중의 하나는 발전조건, 전송조건, 또는 부하조건에 따라 동작조건이 지속적으로 변화하고 있다. 이러한 동작 환경의 변화는 전력시스템에 대한 수학적 표현과 실제 전력계통의 물리적인 구조간에 차이를 발생시킨다. 이것은 미소 신호 선형화 된 전력시스템 모델에서 파라미터 불확실성으로 표현 될 수 있다. 이러한 계통의 변동에 대응하고자 하는 노력의 일환으로 W. Gu 등은 자기 동조 제어기법을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였고, 최근에는 퍼지논리, 적응제어 등과 같은 진보적인 제어 설계 방법들에 관한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이러한 기법들의 사용에는 구조가 다양하고 설계방법이 복잡하며, 또한 실시간 계산이 필요하게 되어 실제 전력시스템에는 적용이 쉽지 않고 고도의 전문성이 요구되는 실정이다.

최근 강인제어 분야의 진보로 인하여 시스템의 파라미터 변동에도 불구하고 이론적으로 성능이 우수하며 고정된 제어기 구조와 고정된 제어기 파라미터를 가지는 전력 계통 안정화 장치의 설계를 위하여 최근에는 제어기 설계 단계에서 모델의 불확실성을 취급할 수 있는 강인 제어기법 중에 최적  $H_\infty$  제어 이론이 보조 여자 제어기를 설계하는데 사용되고 있다. 그러나, 일반적으로 PSS의 차수는 2차 또는 3차이지만 최적  $H_\infty$  제어기는 플랜트의 차수보다 매우 높은 차수를 가진다. 그러므로,  $H_\infty$  제어기를 사용하고자 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 제동 요소를 향상시킬 수 있는 강인한 제어기 설계 방법을 개발할 필요가 있다. 따라서 본 논문에서는 인간의 면역 체계를 모방한 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)을 이용하여 구조가 고정된 최적  $H_\infty$

-PSS의 설계 방법을 제시하였다. 종래의 방법에 의한 PSS와 제안한 방법에 의한  $H_\infty$ -PSS를 각각 적용하여 정상 부하 및 중 부하시에 단락이 발생한 경우에 대한 비 선형 시뮬레이션을 통하여 동특성과 강인성을 비교 고찰하였다.

2.  $H_\infty$  제어 혼합 감도 문제

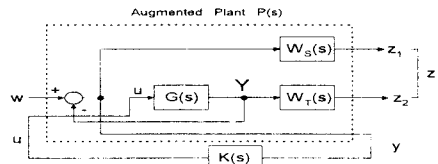


그림 1 가중함수를 갖는 페루프 시스템

$H_\infty$  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  $H_\infty$ -norm을 최소화시키는 제어기  $K(s)$ 를 구하는 것이다. 실제로  $H_\infty$  제어기를 설계하기 위해서는 그림 1과 같이 특이값 루프 정형 방법을 이용하여 식 (1)을 만족하는 외란역제 성능과 식 (2)를 만족하는 모델의 불확실성에 의한 강인 안정성을 고려하여야 한다.

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

$$\|T(j\omega)W_T(j\omega)\|_\infty < 1 \tag{2}$$

여기서,  $S(s)$ 와  $T(s)$ 는 각각 시스템의 감도함수와 상보 감도함수이며 식 (3), 식 (4)와 같다.

$$S(s) = (I + P(s)K(s))^{-1} \tag{3}$$

$$T(s) = P(s)K(s)(I + P(s)K(s))^{-1} \tag{4}$$

감도함수  $S(s)$ 와 상보감도함수  $T(s)$ 를 동시에 고려한 문제를 혼합감도 문제라 하며, 식 (5)과 같이 외부 입력 변수  $w$ 에서 출력  $z$ 로의 전달 함수  $F(P, K)$ 의  $H_\infty$ -norm을 최소화하는 제어기를 설계는 것이 된다.

$$\min_{K(s)} \left\| \begin{matrix} W_S(j\omega) S(j\omega) \\ W_T(j\omega) T(j\omega) \end{matrix} \right\|_\infty \tag{5}$$

가중함수를 포함한 확장된 행렬을 상태공간 방정식으로 나타내면 식 (6)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u \end{aligned} \tag{6}$$

그리고 제어기  $K(s)$ 는 다음과 같이 상태공간 방정식으로 식 (7)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_k &= A_k x_k + B_k u_k \\ y_k &= C_k x_k + D_k u_k \end{aligned} \quad (7)$$

위의 식 (6)과 식 (7)을 이용하여, 제어기를 포함한 외부 입력  $w$ 에서 조절되는 출력  $z$ 로의 페루프 전달함수는 식 (8)과 같다.

$$T_{zw} = F(P, K) =: \begin{bmatrix} A_{cl} & B_{cl} \\ C_{cl} & D_{cl} \end{bmatrix} \quad (8)$$

여기서,

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

페루프 시스템의 불확실성과 예측치 못한 외란에 대하여 강인성을 극대화시키기 위하여 외부 입력  $w$ 에서  $z$ 로의 전달함수  $T_{zw}$ 의  $H_\infty$ -norm을 최소화시키는 문제로써 평가함수를 식 (9)와 같이 둔다.

$$\text{Min } (J = \|T_{zw}\|_\infty) \quad (9)$$

### 3. 면역 알고리즘 (Immune Algorithm)

면역 알고리즘의 기본이 되는 두 가지의 면역 시스템 이론은 소매틱 이론 (somatic theory)과 네트워크 가설 (network hypothesis)이다. 소매틱 이론은 면역계의 다양한 항체 생성 능력을 설명하는 이론이며, 네트워크 가설은 면역계의 자기 조절 능력을 설명하는 이론이다. 이 알고리즘을 최적화 문제의 해 탐색 알고리즘과 대응시켜 보면 항원 (antigen)은 최적화 문제의 제약 조건과 목적 함수이며, 항체 (antibody)가 최적화 문제의 해가 되며 항원과 항체의 친화도 (affinity)가 해의 적합도 (fitness) 값에 해당된다.

IA의 특징으로서 다양한 항체의 생성기구와 자기 조절 기구에 의해 다양한 항체를 생성할 수 있고, 항원과의 친화도가 높은 항체를 보다 많이 남기는 항체 생성기구에 의해 유효한 항체를 대량으로 생성하여 그 근방의 병렬 탐색이 가능하게 되며, 최적해를 고속으로 구할 수 있다. 또한 과거에 배제한 항원에 대응하는 항체를 재빨리 생성하기 때문에 시스템의 초기 상태에 비해 최적해가 고속으로 구해지는 것이 기대 된다. 그러므로 IA는 기억학습 기구와 다양성이 있는 항체를 유지함으로써 인하여 초기 수렴문제를 해결 가능하고, 고속으로 해를 구할 수 있을 것으로 기대된다. 면역 알고리즘의 계산 절차는 그림 2와 같이 나타낼 수 있다.

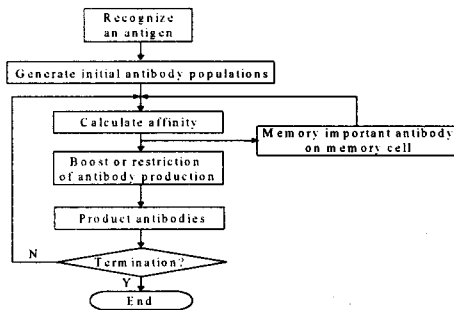


그림 2. 면역 알고리즘의 흐름도

### 4. 안정도 해석을 위한 선형화 모델

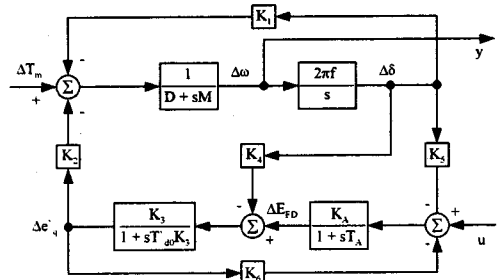


그림 3 안정도 해석을 위한 선형화 된 모델

동기 발전기와 여자기의 비선형 모델을 동작점 부근에서 선형화한 1기 무한대 모선의 모형은 그림 3과 같다. 여기서,  $\omega$ 는 각속도,  $\delta$ 는 회전각,  $e_q'$ 는 발전기 횡축 자속에 비례하는 전압,  $E_{FD}$ 는 유기기전력,  $\Delta$ 는 편차,  $K_1 \sim K_6$ 는 전력계통의 선형화 계수를 나타낸다.

그림 3을 기초로 한 1기 무한대 모선의 상태 방정식은 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X(t) &= AX(t) + BU(t) \\ Y(t) &= CX(t) \end{aligned} \quad (10)$$

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

### 5. 면역 알고리즘을 이용한 $H_\infty$ -PSS의 최적 설계

면역 알고리즘을 이용하여 전력계통 안정화 장치의 최적 파라미터를 구하기 위하여 목적함수는 PSS를 포함한  $w$ 에서  $z$ 로의 페루프 전달함수의  $H_\infty$ -norm을 이용하였다. 최적화에서 사용되어진 구속조건은 식 (11)과 같다.

$$\begin{aligned} \Psi_i &\geq \Psi_0 \\ \gamma_i^{\min} &\leq p_i \leq \gamma_i^{\max} \end{aligned} \quad (11)$$

여기서,  $\Psi_i$ 는 페루프의  $i$  번째 제동비,  $\Psi_0$ 는 최소 제동비,  $\gamma_i^{\min}$ 는 파라미터  $p_i$ 의 최소값,  $\gamma_i^{\max}$ 는 파라미터  $p_i$ 의 최대값이다.

종래의 lead/lag 형태를 갖는 PSS의 구조는 그림 4와 같이 블록선도로 나타낼 수 있다. 그림 4에 의하여 종래의 PSS를 전달함수 형태로 나타내면 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta\omega \rightarrow \frac{sT}{1+sT} \rightarrow \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \rightarrow \frac{K_C(1+sT_3)}{1+sT_4} \rightarrow \Delta u_E$$

그림 4 PSS의 구조

$$PSS(s) = \frac{\Delta u_E}{\Delta\omega} = \left( \frac{sT}{1+sT} \right) \left( \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left( \frac{K_C(1+sT_3)}{1+sT_4} \right) \quad (12)$$

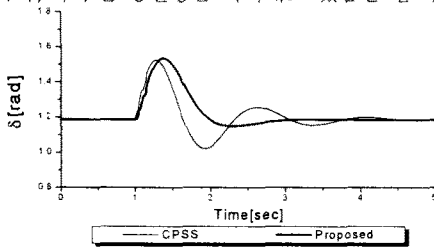
여기서,  $K_C$ 는 PSS의 이득이고,  $T$ 는 washout 시정수,  $T_1 \sim T_4$ 는 PSS의 특성을 결정하는 시정수이다.

본 논문에서 최적화 하고자 하는 파라미터는  $K_C$ ,  $T_1, T_2, T_3, T_4$ 가 되며, 최적의 파라미터들 선택하도록 하기 위해 본 논문에서 사용된 적합도 함수는 식 (13)과 같이 선정하였다.

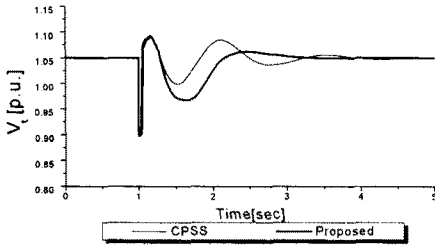
$$\text{Fitness} = \frac{1}{\text{Min} \|T_{zw}\|_{\infty}} \quad (13)$$

## 6. 시뮬레이션 결과 및 고찰

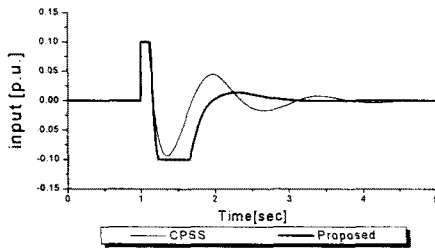
본 논문에서는 면역 알고리즘을 이용하여 강인한  $H_{\infty}$ -PSS의 최적 설계방법을 제시하였다. 제안한 제어기의 강인성을 검증하기 위하여 본 논문에서는 정상 부하시 및 중 부하시의 각각에 대하여 1초후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50(ms)동안 지속되다가 계통 구성 변경없이 제거되는 경우에 대하여 발전기 회전자 각, 단자 전압의 동특성 응답과 제어 입력에 대해 종래의 Yu의 보상기 설계 이론(CPSS)에 의한 파라미터 선정 방법과 제안한 방법을 비교 고찰하였다. 이때 PSS의 입력 신호는  $-0.1[\text{p.u.}] \leq u \leq 0.1[\text{p.u.}]$ 로 제한하였다. 그림 5는 정상 부하시 동특성 응답을 나타내고 있고, 그림 6은 중 부하시의 동특성 응답을 나타내고 있다. 그림 5와 그림 6의 결과로부터 제안한 설계방식이 CPSS에 의한 방법보다 부하변동에 대하여 외란 억제 능력이 우수하며, 우수한 강인성을 나타내고 있음을 알 수 있다.



(a) Rotor angle



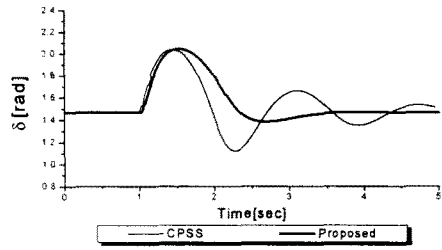
(b) Terminal voltage



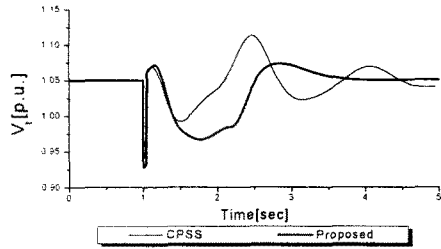
(c) Control input

그림 5 정상부하시의 동특성 응답

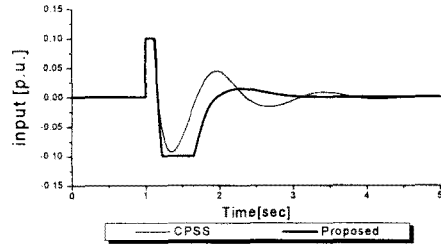
$$(P_{cl} = 1.0[\text{p.u.}], Q_{cl} = 0.015[\text{p.u.}])$$



(a) Rotor angle



(b) Terminal voltage



(c) Control input

그림 6 중 부하시의 동특성 응답

$$(P_{cl} = 1.2[\text{p.u.}], Q_{cl} = 0.2[\text{p.u.}])$$

## 7. 결론

본 논문에서는 전력계통의 저주파 진동을 억제하기 위한 전력계통 안정화 장치의 구조를 변화시키지 않고 제어 요소를 향상시킬 수 있는 강인한 제어기 설계 방법을 제안하였다. 평가함수인  $H_{\infty}$ norm을 최소화하기 위하여 최적화 알고리즘으로서 면역 알고리즘을 이용하였다. 제안한 설계 방식은 최적  $H_{\infty}$ 제어기법을 이용한 보조 여자 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.

### (참고문헌)

- [1] Y. N. Yu, "Electric power system dynamics", ACADEMIC PRESS, 1983
- [2] R. Asgharian, "A robust  $H_{\infty}$  power system stabilizer with no adverse effect on shaft torsional modes", IEEE Trans. on energy conversion, Vol. 9 No. 3, 475-481, 1994.
- [3] D. Dasgupta, "Artificial immune systems and their applications", Springer-Verlag, 1999
- [4] 이정필, 정문규, 정형환, 이광우, "면역 알고리즘을 이용한 전력계통 안정화 장치의 최적 파라미터선정", 전력 계통 연구회 춘계 학술 발표회 논문집, pp.73-76, 2000