

# 유전알고리즘을 이용한 전력계통 안정화 장치의 강인한 $H_{\infty}$ 최적 튜닝

論 文
49A-3-1

## A Robust $H_{\infty}$ Optimal Tuning of Power System Stabilizer using Genetic Algorithm

鄭亨煥\* · 李浚柝\*\* · 李丁必\*\*\* · 韓吉萬§

(Hyeng-Hwan Chung · Joon-Tark Lee · Jeong-Phil Lee · Gill-Man Han)

**Abstract** - In this paper, a robust  $H_{\infty}$  optimal tuning problem of 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. The objective function of the optimization problem is the  $H_{\infty}$ -norm of a closed loop system. The constraint of the optimization problem are based on the stability of the controller, limits on the values of the parameters and the desired damping of the dominant oscillation mode. It is shown that the proposed  $H_{\infty}$  PSS tuned using genetic algorithm is more robust than conventional PSS.

**Key Words** : Power System Stabilizer(PSS), Objective Function,  $H_{\infty}$ -norm, Genetic Algorithm

### 1. 서 론

전력계통 계획에 있어서 안정도 문제는 매우 중요한 문제로 인식되고 있고, 그 중에 시스템 동작점에서의 미소신호 안정도는 대단히 중요한 문제이다. 1960년대 이후부터 싸이리스터를 내장한 고속여자계통을 채용하는 것이 일반화되면서 과도 안정도는 향상되었지만, 고속의 여자 응답은 시스템의 제동(Damping)에 역효과를 나타내며 미소신호 안정도에는 악영향을 끼친다. 전력계통에 전기 기계적인 모드와 연결된 저주파 진동은 종종 긴시간 주기 동안 지속되며, 어떤 경우에는 전력전송을 제한시키기도 한다. 따라서 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)는 동기회전자의 저주파 진동을 억제하기 위하여 발전기 여자 조절에 의해 전체 시스템의 안정도를 향상시키기 위한 효율적인 수단으로서 현대 전력계통에 광범위하게 사용되고 있으며, 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1-12].

1969년 deMello와 Concordia[1]에 의해서 저주파 진동에 PSS의 효과에 대한 연구를 기점으로 해서, PSS를 설계하기 위해 고유치 기법[2], 극배치 기법[3], 최적 제어기법[4] 등이 제안되었다. 그러나 이러한 기법은 고전적인 선형 시스템 이론을 이용하였으며, 제어기 설계 단계에서 모델의 불확실성을 고려하지 않고, 동작점 부근의 선형화된 모델을 이용하여 제어기를 설계하였기 때문에 불확실성이 많이 존재하는 전력계

통에서는 정확한 제어 목적을 달성 할 수 없다. 즉 강인성의 결핍을 들 수 있다. 이를 위해 퍼지논리[5], 인공 신경 회로망[6], 적응제어[7] 등과 같은 진보적인 제어 설계방법들에 관한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 이러한 접근들은 복잡한 계산과 긴 처리 시간 등을 필요로 하거나 강인하지 않을 수 있다. 따라서, 최근에는 제어기 설계 단계에서 모델의 불확실성을 취급할 수 있는 강인 제어기법 중에 최적  $H_{\infty}$ 제어 이론이 보조 여자 제어기를 설계하는데 사용되고 있다[8-10]. 이 제어 문제는 플랜트 파라미터들의 변동에 대한 시스템의 감도를 최소화하는 것이다. 그럼으로써 페루프의 최대 강인성을 획득하는 것이다. 일반적으로 기존의 PSS의 차수는 2차계 또는 3차계로서 구조가 간단하여 실제 계통에 많이 사용되고 있다. 그러나, 최적  $H_{\infty}$ 제어기는 플랜트의 차수보다 매우 높은 차수를 가지기 때문에, 만일  $H_{\infty}$ 제어기를 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 제동 요소를 향상시키는 방법을 개발할 필요가 있다. 따라서, 본 논문에서는  $H_{\infty}$ 제어 이론[13-17]에 기초하여 PSS의 최적 파라미터를 선정하는 방법을 제시 하고자 한다. 그러나,  $H_{\infty}$ 최적문제를 직접적으로 취급하기는 매우 어렵기 때문에 이러한 문제를 취급하기 위하여 탐색알고리즘을 도입하였다. 기존의 경사(Gradient)에 기초한 탐색알고리즘과 같은 대부분의 탐색 알고리즘은 미분 가능한 파라미터 공간을 필요로 하고, 탐색결과는 국부 최적에 빠질 가능성이 크므로  $H_{\infty}$ 최적문제를 취급하는데 적절하지 않다. 최근 전역적인 최적화 탐색을 위하여 유전알고리즘[18-19]이 도입되었다. 유전알고리즘은 파라미터 공간을 엔코딩 되어진 이진 스트링의 집단으로부터 자연선택과 자연유전

\* 正 會 員 : 東亞大 電氣工學科 教授 · 工博  
\*\* 正 會 員 : 東亞大 電氣工學科 副教授 · 工博  
\*\*\* 正 會 員 : 東亞大 電氣工學科 博士課程  
§ 準 會 員 : 東亞大 電氣工學科 碩士課程  
接受日字 : 1999年 7月 6日  
最終完了 : 2000年 2月 23日

의 매커니즘에 바탕을 둔 연산자들을 이용한다. 이것은 복제, 교차, 돌연변이와 같은 자연 유전연산자를 이용한 전역적인 병렬 탐색알고리즘이다. 각 세대에서, 서로 다른 영역의 파라미터공간을 탐색하고, 향상된 성능을 발견할 수 있는 가능성이 높은 지역을 직접적으로 탐색한다. 또한 유전알고리즘은 파라미터 공간에서 동시에 많은 점들을 평가하기 때문에 전역적인 해에 수렴할 가능성이 더욱 높다. 특히, 미분가능이나 연속성이 있는 탐색공간을 필요로 하지 않으므로, 국부적인 최적해가 많이 존재하는  $H_\infty$  최적화 문제를 취급하는데 매우 적합하다.

따라서 본 논문에서는  $H_\infty$  제어 이론에 기초하여 PSS의 최적 파라미터를 선정하기 위해 전역적인 탐색에 강인한 유전알고리즘을 이용하는 방법을 제안하였다. 최적화 문제의 목적함수는 외란에서 출력으로 가는 페루프의  $H_\infty$ -놈이 되며, 제약조건은 제어기의 안정성, PSS 파라미터의 상·하한값, 주요 동요 모드(Dominant oscillation mode)의 제동 등을 이용하였다. 1개의 진상 보상기를 가지는 PSS와 2개의 진상 보상기를 가지는 PSS의 각각의 경우에 대하여 최적 파라미터 선정방법에 관하여 논하고, 1기 무한대 모선에 적용한 결과를 시뮬레이션을 통하여 다양한 외란이 발생하였을 경우와 계통의 파라미터가 변동한 경우에 대하여, 종래의 설계방식인 Yu의 보상기 설계 이론[4]에 의한 파라미터 선정방법과 외란 억제 성능과 강인성에 대하여 비교, 고찰함으로써, 제안한 설계방법이 기존의 설계 방법보다 전력계통의 안정도 향상에 크게 기여함을 보이고자 한다.

2. 안정도 해석을 위한 선형화 모델[4]

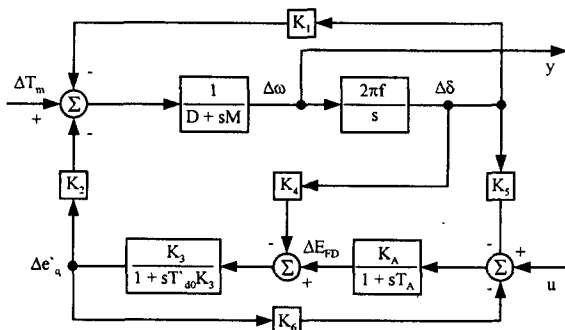


그림 1 선형화된 계통 모델  
Fig. 1 Linearized power system model

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

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

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X(t) &= AX(t) + BU(t) \\ Y(t) &= CX(t) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$A = \begin{bmatrix} -\frac{D}{M} & -\frac{K_1}{M} & -\frac{K_2}{M} & 0 \\ 2\pi f & 0 & 0 & 0 \\ 0 & -\frac{K_4}{T_{do'}} & -\frac{1}{T_{do'} K_3} & -\frac{1}{T_{do'}} \\ 0 & -\frac{K_A K_5}{T_A} & -\frac{K_A K_6}{T_A} & -\frac{1}{T_A} \end{bmatrix}$$

$$B = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & \frac{K_A}{T_A} \end{bmatrix}$$

$$C = [1 \ 0 \ 0 \ 0]$$

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

이다.

3.  $H_\infty$  제어 혼합 감도 문제

$H_\infty$  표준문제라는 것은 제어기  $K(s)$ 가 플랜트  $P(s)$ 를 안정하게 한다는 조건하에서, 외부 입력 변수  $w$ 에서 출력  $z$ 로 의 전달 함수  $F(P, K)$ 의  $H_\infty$ 놈을 최소화시키는 제어기  $K(s)$ 를 구하는 것이다. 이것은 식 (2)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{Minimize } \|F(P, K)\|_\infty \quad (2)$$

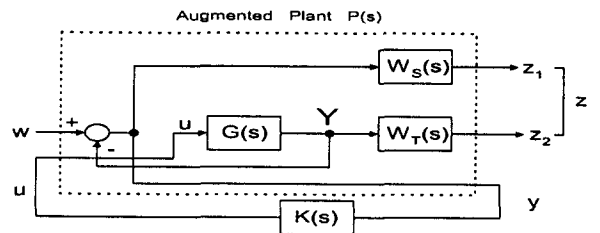


그림 2 가중함수를 갖는 페루프 시스템  
Fig. 2 Closed loop system with weighted functions

실제로  $H_\infty$  제어를 설계하기 위해서는 그림 2와 같이 특이값 루프 정형 방법을 이용하여 식 (3)을 만족하는 외란 억제 성능과 식 (4)를 만족하는 모델의 불확실성에 의한 강인 안정성을 고려하여야 한다.

$$\|S(j\omega)W_S(j\omega)\|_\infty < 1 \quad (3)$$

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

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

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

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

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  $H_\infty$ -norm을 최소화하는 제어기를 설계는 것이 된다.

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

#### 4. 유전 알고리즘(Genetic Algorithms : GA)

유전알고리즘은 자연선택과 진화적인 유전학의 메카니즘을 토대로 한 확률적인 최적화 알고리즘으로서 1962년 Holland 에 의해 처음으로 도입되었고, 이후 Goldberg 등에 의해 광범위하게 연구되었다. 유전 알고리즘은 함수 최적화 문제, 영상 처리문제, 시스템 식별 문제등 수학과 공학분야에 많이 응용되었고, 그 효율성이 입증되어 왔다. 기존의 경사(gradient)에 기초한 탐색알고리즘과 달리 유전알고리즘은 미분 가능성과 연속성과 같은 탐색공간을 필요로 하지 않으며, 다수의 극대점을 병렬로 탐색하므로 다중의 탐색 공간에서 발생하는 국부적인 최소점에 빠질 확률이 적다. 유전 알고리즘은 일정한 개수의 후보 해집단을 유지하면서 반복적인 절차를 갖는다. 새로운 집단을 생성하기 위해서 각각의 세대에서 3가지의 기본적인 유전연산자 즉, 복제(Reproduction), 교차(Crossover), 돌연변이(Mutation)가 실행되며, 적절히 선택된 적합도(Fitness) 함수로부터 집단의 문자열(String)이 평가되고, 적자생존의 원리에 기초하여 더 나은 후보 해 집단이 얻어진다. 일반적으로 유전 알고리즘의 대략적인 동작은 다음과 같다.

##### 4.1 파라미터의 부호화(Coding)

유전알고리즘은 문자열 집단으로서 동작한다. 그러므로 최적화 문제를 풀기 위하여, 최적화 하고자 하는 파라미터 벡터들은 부호 없는 2진 문자열로 부호화 되어진다. 만일 최적점 탐색에 있어 한 파라미터 값에 요구되는 정밀도가  $p(x_i)$ 라면, 그 파라미터에 할당되어야 할 문자열의 비트수  $l_i$ 는 식 (8)과 같다.

$$l_i \geq \log_2 \left( \frac{x_i^{\max} - x_i^{\min}}{p(x_i)} + 1 \right) \quad (8)$$

##### 4.2 적합도(Fitness)

적합도는 각 세대에서의 문자열들이 평가기준에 얼마나 적합한지를 평가하는 것이다. 적자생존의 원리에 의해 적합도 값이 높을수록 다음 세대에 자손으로 분포할 가능성이 더욱 높다. 본 논문에서 최적화의 기준이 되는 목적함수(Objective function)는  $H_\infty$ -norm이 되므로, 목적함수 최소화 문제를 적합도 값이 최대화 되는 문제로 변환하기 위해서 적합도 함수는 목적함수의 역수가 된다.

##### 4.3 복제(Reproduction)

복제 연산자는 적합도가 높은 문자열을 선택하는 유전 연산자로서, 복제의 방식은 여러 가지가 있지만 일반적으로 룰

렛 휠 선택방법(Roulette wheel selection)을 사용한다.

##### 4.4 교차(Crossover)

교차 연산자는 확률적인 방법에 의해 선택된 2개의 문자열 중에 일부분을 교환하여 새로운 문자열을 발생시키는 역할을 한다. 이 연산자는 현재 집단에서 문자열간의 상호 정보를 교환하여, 존재하는 정보보다 더 많은 정보를 제공하는 역할을 한다.

##### 4.5 돌연변이(Mutation)

돌연변이 연산자는 문자열의 비트(bit)가 갑작스런 형태 변화로 새로운 형질이 발생하게 되는 현상을 말하며, 문자열중에 임의의 비트가 0에서 1로 또는 1에서 0으로 바뀐다. 복제와 교차 연산자 만으로는 그 집단의 특정한 문자열에 대해서 점점 동질화되어 몇 세대 후에는 최적해가 아닌 조기수렴 현상이 발생하게 된다. 따라서 돌연변이 연산자는 조기수렴 현상을 방지하는 역할을 하며, 탐색공간을 확장시키는 역할을 한다.

유전 파라미터 교차율(Pc), 돌연변이율(Pm), 집단의 개수(PI)의 적절한 선택은 유전 알고리즘이 전역적인 최적해의 수렴에 많은 영향을 미친다. 즉 교차율과 집단의 개수를 크게 하면 수렴속도는 매우 빨라지지만 계산 시간이 커지는 단점이 생긴다. 반면에 돌연변이율을 크게 하면 유전 알고리즘이 국부 최적에 빠져있지 않게 하지만 돌연변이율은 고유적으로 랜덤 탐색 연산자이기 때문 중요한 형질을 잃게되어 랜덤 탐색이 되어진다. 그러므로 교차율, 돌연변이율, 그리고 집단 개수의 선택에는 약간의 절충 (trade-off) 관계가 있다.

#### 5. 유전 알고리즘을 이용한 $H_\infty$ -PSS 의 최적 설계

본 장에서는 전력 계통 전체의 강인성을 향상시키며, 구조가 고정된 전력계통 안정화 장치의 최적 파라미터를 선정하기 위하여 유전알고리즘을 이용한 새로운 설계 방법을 제시한다. 제안하는 방법의 목적은 기존에 설치되어 있는 PSS의 하드웨어를 교체하지 않고, 파라미터의 재 설정만으로 전기 기계적인 진동에 대하여 강인한 제동을 얻을 수 있도록 하는 것이다. 그러므로 외란 억제와 강인 안정성을 동시에 고려한 제어기를 설계하기 위해 가중함수를 포함한 확장된 계통모델은 그림 3과 같다.

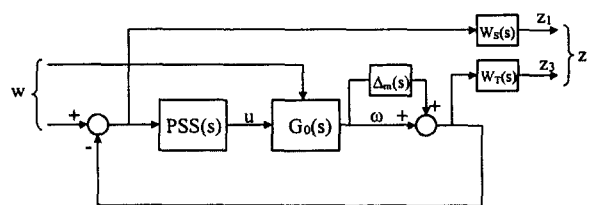


그림 3 가중함수를 포함한 확장된 계통 모델  
Fig. 3 Augmented system model including weighted function

가중함수가 포함된 확장 행렬을 상태공간 방정식으로 나타내면 식 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u \end{aligned} \quad (9)$$

그리고 제어기 PSS(s)는 다음과 같이 상태공간 방정식으로 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_k &= A_kx_k + B_ku_k \\ y_k &= C_kx_k + D_ku_k \end{aligned} \quad (10)$$

위의 식 (9)와 (10)을 이용하여, 제어기를 포함한 외부 입력 w에서 조절되는 출력 z로의 페루프 전달함수는 식 (11)과 같다.

$$T_{zw} = F(P, K) =: \begin{bmatrix} A_{cl} & B_{cl} \\ C_{cl} & D_{cl} \end{bmatrix} \quad (11)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_{cl} &= \begin{bmatrix} A + B_2D_kC_2 & B_2C_k \\ B_k(I + D_{22})C_2 & A_k + B_kD_{22}C_k \end{bmatrix} \\ B_{cl} &= \begin{bmatrix} B_1 + B_2D_kD_{21} \\ B_k(I + D_{22}D_k)D_{21} \end{bmatrix} \\ C_{cl} &= \begin{bmatrix} C_1 + D_{12}D_kC_2 & D_{12}C_k \end{bmatrix} \\ D_{cl} &= \begin{bmatrix} D_{11} + D_{12}D_kD_{21} \end{bmatrix} \end{aligned}$$

유전 알고리즘을 이용하여 1개의 진상 보상기를 가지는 PSS와 2개의 진상 보상기를 가지는 PSS의 최적 파라미터를 선정하기 위하여, PSS를 포함한 페루프 시스템의 불확실성과 예측치 못한 외란에 대하여 강인성을 극대화 되도록 외부 입력 w에서 z로의 전달함수  $T_{zw}$ 의  $H_\infty$ -norm을 최소화시키는 문제로써 목적함수를 식 (12)과 같이 두었다.

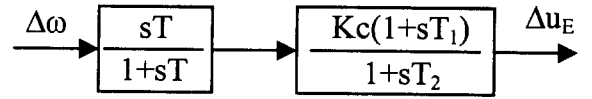
$$\text{Min } (J = \|T_{zw}\|_\infty) \quad (12)$$

그리고 최적화를 위해 사용되어진 구속조건은 식 (13)과 같다.

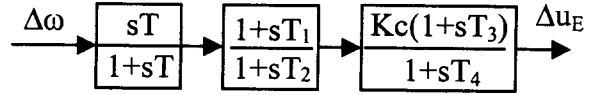
$$\begin{aligned} \psi_i &\geq \psi_0 \\ \gamma_i^{\min} &\leq p_i \leq \gamma_i^{\max} \end{aligned} \quad (13)$$

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.

1개의 진상 보상기를 가지는 경우와 2개의 진상 보상기를 가지는 기존의 PSS의 구조는 그림 4와 같이 블록선도로 나타낼 수 있다.



(a) PSS with one lead compensator



(b) PSS with two lead compensator

그림 4 PSS의 구조를 나타내는 블록선도

Fig. 4 Block diagram of PSS

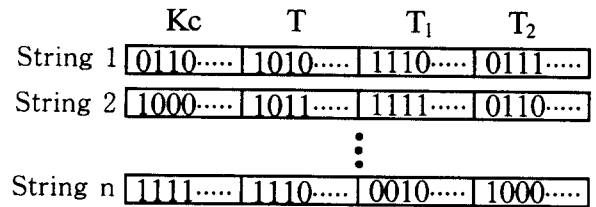
그림 4에 의하여 PSS를 전달함수 형태로 나타내면 각각 식 (14), 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다.

$$PSS1(s) = \frac{\Delta u_E}{\Delta \omega} = \left( \frac{sT}{1+sT} \right) \left( \frac{K_C(1+sT_1)}{(1+sT_2)} \right) \quad (14)$$

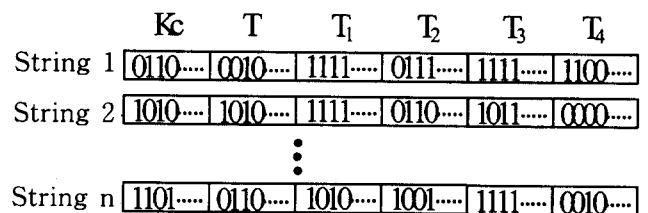
$$PSS2(s) = \frac{\Delta u_E}{\Delta \omega} = \left( \frac{sT}{1+sT} \right) \left( \frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left( \frac{K_C(1+sT_3)}{(1+sT_4)} \right) \quad (15)$$

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 1개의 진상 보상기를 가지는 경우는  $K_C, T, T_1, T_2$ 이고, 2개의 진상 보상기를 가지는 경우는  $K_C, T, T_1, T_2, T_3, T_4$ 가 되며, 유전 알고리즘을 이용하기 위해 각각의 파라미터들을 2진 문자열로 나타내면 그림 5와 같다.



(a) PSS with one lead compensator



(b) PSS with two lead compensator

그림 5 집단 구조

Fig. 5 Population structures

각각의 문자열에서 식 (12)를 만족하는 문자열을 선택하도록 하는 적합도 함수는 식 (16)과 같이 선정하였다.

$$Fitness = \frac{1}{\text{Min } \|T_{zw}\|_{\infty}} \quad (16)$$

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

**Step 0)** 주어진 플랜트에 대하여, 가중함수  $W_S(s)$ 와  $W_T(s)$ , 제어기 구조를 선정하고, 유전적인 파라미터  $P_c, P_m, P_f$ 을 적절히 선정한다.

**Step 1)** 제어기 파라미터 공간을 결정한다.

**Step 2)** 필요한 문자열의 길이를 계산한다.

**Step 3)** 랜덤하게 2진 문자열 집단을 발생한다.

**Step 4)** 실제 파라미터로 디코딩 하여 페루프 전달함수  $T_{zw}$ 의  $H_{\infty}$ -norm을 계산한다.

**Step 5)** 필요조건 및 구속조건을 체크하고 각 문자열에 대한 적합도를 계산한다.

**Step 6)** 탐색목표가 달성되거나 허용 가능한 세대가 달성 되면 멈추고, 아니면 계속한다.

**Step 7)** 유전알고리즘의 연산자(복제, 교차, 돌연변이)를 통하여 자손을 생성하고 **Step 4)**로 돌아간다.

### 6. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 1개의 진상 보상기를 가진 경우와 2개의 진상 보상기를 가진 경우에 대하여 강인한 PSS의 최적 설계를 위하여,  $H_{\infty}$  제어 이론에 기초하여 유전 알고리즘을 이용하였다. 본 논문에서 사용한 동기기, 여자기 및 선로정수와 계통 초기 상태는 표 1과 같다.

**표 1** 시스템 파라미터  
**Table 1** System parameters

발전기 정수	$M = 9.26, D = 0, T_{d0}' = 7.76$ $x_d = 0.973, x_d' = 0.19, x_q = 0.55$
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  $\Delta\delta$ 의 초기치를 0.1[p.u.]를 변화시킨 경우와 운전조건의 변화시 즉, 부하조건의 변화로 유효전력이  $P_{e0}=1.0$ [p.u.]에서  $P_{e0}=1.3$ [p.u.]으로 30% 증가한 증부하시에  $\Delta\delta$ 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 선정 방법과 제안한 방법을 비교하여 동특성을 고찰 하였다. 또한 제어기의 강인성을 검증하기 위해 선로정수가 주어진 조건에서 30% 증가한 경우와, 시스템의 관성정수가 주어진 조건에

서  $\pm 30\%$  변동한 경우에  $\Delta\delta$ 의 초기치를 0.1[p.u.]변화 시킨 경우에 대해서도 비교 고찰하였다. 제어기 설계를 위한 구속 조건인 계통 비는 25%로 두었고, 외란억제 및 강인 안정성을 위해 가중함수는 각각 식 (3), (4)를 만족하도록 식 (17)과 같이 선정하였다.

$$W_S = \frac{0.1s+8}{0.1s+0.4}, \quad W_T = \frac{1.8s+0.01}{0.1s+0.05} \quad (17)$$

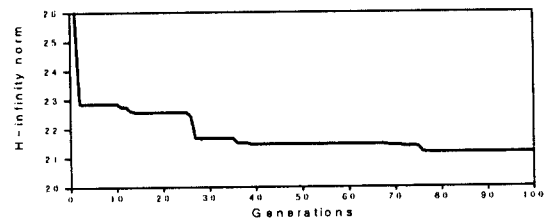
#### 6.1 1개의 진상 보상기를 가진 경우

본 논문에서 고찰하고자 하는 PSS의 구조는 회전자 속도를 입력으로 사용되는 PSS이다. 1개의 진상 보상기를 가지는 경우 PSS의 파라미터를 최적화 하기 위해 사용되어진 유전 알고리즘의 파라미터는 표 2와 같다.

**표 2** 유전 알고리즘 파라미터  
**Table 2** Genetic algorithm parameters

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

그림 6은 제안한 방법에 의한 최적화시 각 세대에 따른  $H_{\infty}$ norm의 수렴을 나타내고 있다. 그리고, Yu의 방법을 이용한 PSS와 제안한 유전알고리즘을 이용한 PSS의 최적 파라미터는 표 3과 같이 나타났다.



**그림 6** 각 세대에 따른  $H_{\infty}$  norm

**Fig. 6**  $H_{\infty}$  norm of each generation

**표 3** Yu의 방법과 제안한 방법을 이용한 PSS의 최적 파라미터

**Table 3** Optimal parameters of PSS using Yu and Proposed method

	$K_C$	$T$	$T_1$	$T_2$
Yu	7.0900	3.0000	0.6850	0.1000
Proposed	13.1325	6.9962	0.5069	0.0892

정상 부하시 및 부하 변동시에 대하여 Yu의 방법을 이용한 경우보다 제안한 방법을 이용하였을 경우에 페루프 전달함수 ( $T_{zw}$ )의  $H_{\infty}$ norm은 표 4와 같이 최소화시킬 수 있었다. 그리고 외란 억제 능력에 대한 해석을 위하여 외부외란  $\Delta v_{ref}$ 로부터 출력  $\Delta\omega$ 로의 페루프 전달함수의 특이값 보드 (bode)선도를 그림 7에 나타내었다. 시스템의 주요 동요 모드

는 약 5rad/sec 즉, 0.8Hz 부근에 존재하는데, 제안한 PSS는 종래의 PSS보다 주요 동요 모드에서의 피크치가 낮아졌다. 따라서 제안한 PSS는 종래의 PSS보다 시스템의 진동을 더욱 억제할 수 있음을 알 수 있다.

표 4 페루프 시스템 ( $T_{zw}$ )의  $H_\infty$  놈

Table 4  $H_\infty$  norm of the closed loop system ( $T_{zw}$ )

	Yu	Proposed
정상 부하시	23.8390	21.1716
중 부하시	33.5638	26.0327
선로정수변동	31.5620	25.0382

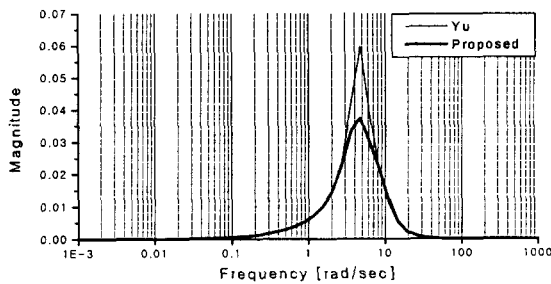


그림 7  $G_0(s)(I+G_0(s)PSS(s))^{-1}$ 의 특이값 보드 선도

Fig. 7 Singular-value bode plots of  $G_0(s)(I+G_0(s)PSS(s))^{-1}$

그리고 강인 안정성을 검증하기 위하여 다양한 동작조건에서의 제동비를 비교 고찰하였다. 이러한 제동비는 특정한 진동모드의 감쇠율의 척도로써 사용되어진다. 시스템의 고유치를  $\lambda = \alpha + j\omega$ 라고 정의하면, 백분율로써 제동비는 식 (18)과 같이 정의된다.

$$\xi = \frac{-\alpha}{\sqrt{\alpha^2 + \omega^2}} \times 100\% \quad (18)$$

다양한 동작조건에 대한 주요 동요 모드의 제동비는 표 5와 같으며, 각각에 대한 주요 동요 모드의 제동 비는 Yu의 방법보다 높아졌다.

표 5 주요 동요 모드의 제동 비(%)

Table 5 Damping ratio of dominant oscillation mode (%)

	Yu	Proposed
정상 부하시	25.17	37.22
중 부하시	21.27	34.62
선로정수변동	16.73	28.76

그림 8은 정상 부하시 동특성 응답을 나타내고 있고, 그림 9는 중 부하시 ( $P_{\omega 0}=1.3$ )의 동특성 응답을 나타내고 있다. 결과로부터 제안한 PSS는 Yu의 방법보다 초기 언더슈터(Undershoot)와 오버슈터(Overshoot)가 작고 정정시간(settling time)이 빠르므로 우수한 제어기임을 알 수 있다.

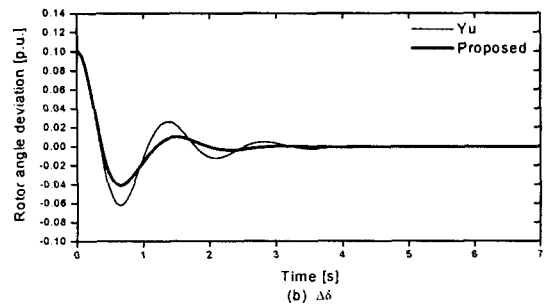
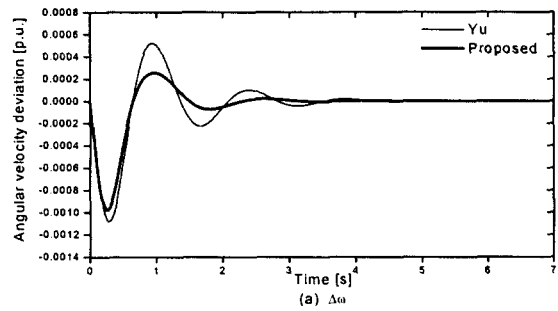


그림 8 정상부하시의 동특성 응답의 비교 ( $P_{\omega 0}=1.0$ )

Fig. 8 Comparison of Dynamics response at nominal operation conditons

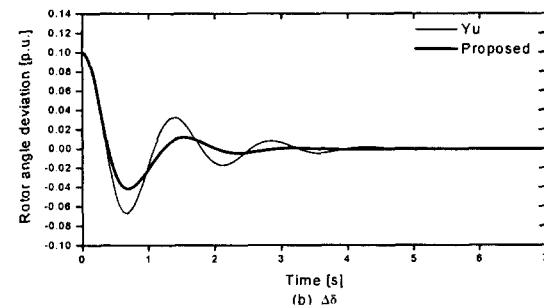
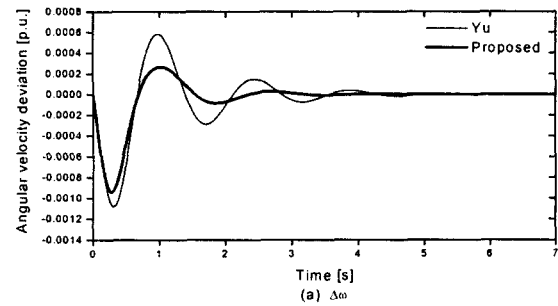


그림 9 중 부하시의 동특성 응답의 비교 ( $P_{\omega 0}=1.3$ )

Fig. 9 Comparison of dynamics response at heavy load

그림 10과 11은 계통의 모델링 오차에 대하여 제안한 PSS의 강인성을 검증하기 위하여 계통의 선로정수가 30% 증가한 경우와 동기 발전기의 관성정수가  $\pm 30\%$ 변동한 경우에  $\Delta\delta=0.1$ [p.u.]로 변화시킬 경우에 대한 동특성 응답을 나타내고 있다. 그림 10에서 선로 정수가 변동한 경우에는 종래의 방법은 정정시간이 매우 길어 졌으나 제안한 PSS의 경우는 상대적으로 큰 차이 없이 우수한 응답을 얻을 수 있었다. 그리고 그림 11에서 관성정수가 변동한 경우에 있어서도 제안

한 PSS는 종래의 방법보다 파라미터 변동에 대해 저주파 진동은 억제하는데 매우 우수한 제어 성능과 강인성을 보였다.

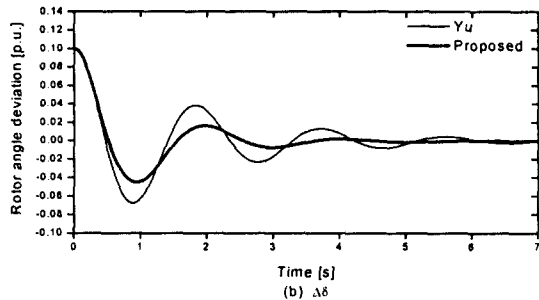
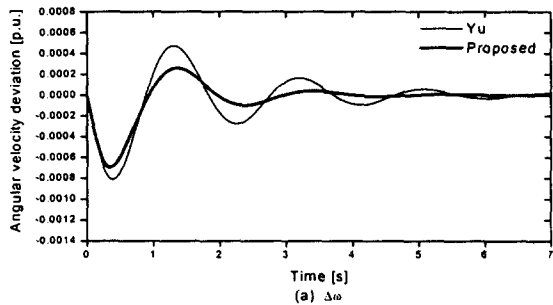
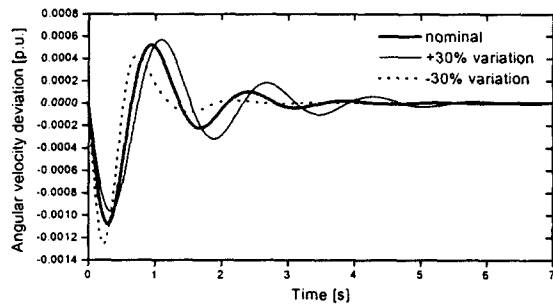
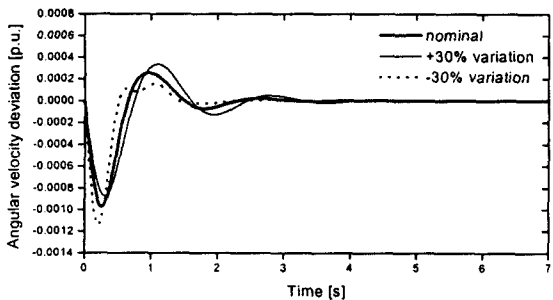


그림 10 선로정수 30% 변동시 동특성 응답의 비교  
Fig. 10 Comparison of dynamic response at 30% variation of line parameter



(a) Response of  $\Delta\omega$  using Yu's PSS



(b) Response of  $\Delta\omega$  using proposed PSS

그림 11 관성정수  $\pm 30\%$  변동시 동특성 응답의 비교  
Fig. 11 Comparison of dynamics response with inertia constants changed

## 6.2 2개의 진상 보상기를 가진 경우

2개의 진상 보상기를 가지는 경우 PSS의 파라미터를 최적화 하기 위해 사용되어진 유전 알고리즘의 파라미터는 표 6 과 같다.

표 6 유전 알고리즘 파라미터  
Table 6 Genetic algorithm parameters

문자열 길이	집단의 크기	교차율( $P_c$ )	돌연변이율( $P_m$ )
90	30	0.85	0.01

그림 12는 제안한 방법에 의한 최적화시 각 세대에 따른  $H_\infty$ -norm의 수렴을 나타내고 있다. 그리고, Yu의 방법과 유전 알고리즘을 이용한 PSS의 최적파라미터는 표 7과 같이 나타났다

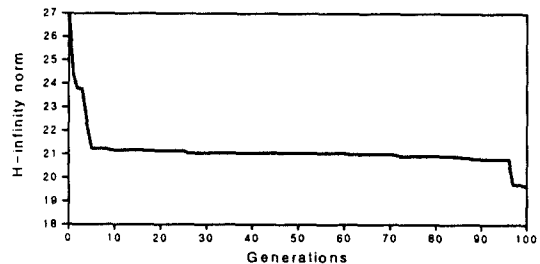


그림 12 각 세대에 따른  $H_\infty$  norm

Fig. 12  $H_\infty$  norm of each generation

표 7 Yu의 방법과 제안한 방법을 이용한 PSS의 최적 파라미터

Table 7 Optimal parameters of PSS using Yu and Proposed method

	$K_C$	$T$	$T_1$	$T_2$	$T_3$	$T_4$
Yu	20.0000	3.0000	0.1250	0.0500	0.1250	0.0500
Proposed	32.9510	9.0903	3.3074	2.4587	0.2051	0.01

정상 부하시 및 부하 변동시에 대하여 Yu의 방법을 이용한 경우보다 제안한 방법을 이용하였을 경우에 페루프 전달함수( $T_{zw}$ )의  $H_\infty$ -norm은 표 8과 같이 최소화시킬 수 있었다. 그리고 외란억제 능력에 대한 해석을 위하여 외부외란  $\Delta v_{ref}$ 로 부터 출력  $\Delta\omega$ 로의 페루프 전달함수의 특이값 보드(bode) 선도를 그림 13에 나타내었다. 시스템의 주요 동요 모드는 약 5rad/sec 즉, 0.8Hz 부근에 존재하므로, 제안한 PSS는 종래의 PSS보다 주요 동요 모드에서의 피크치가 더욱 낮아졌다. 따라서 제안한 PSS는 종래의 PSS보다 시스템의 진동을 더욱 억제할 수 있음을 알 수 있다. 또한 강인성의 검증을 위한 각각에 대한 주요 동요 모드의 제동 비는 표 9와 같이 Yu의 방법보다 높아졌다.

표 8 페루프 시스템 ( $T_{zw}$ )의  $H_\infty$  놈

Table 8  $H_\infty$  norm of the closed loop system ( $T_{zw}$ )

	Yu	Proposed
정상 부하시	22.7946	19.6370
중 부하시	29.0800	21.3680
선로정수변동	24.4725	20.6770

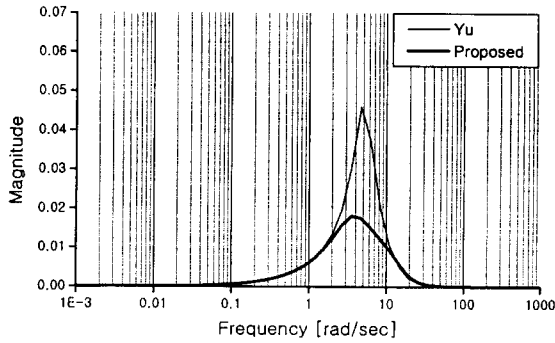


그림 13  $G_0(s)(I+G_0(s)PSS(s))^{-1}$ 의 특이값 보드 선도

Fig. 13 Singular-value bode plots of

$$G_0(s)(I+G_0(s)PSS(s))^{-1}$$

표 9 주요 동요 모드의 제동 비(%)

Table 9 Damping ratio of dominant oscillation mode (%)

	Yu	Proposed
정상 부하시	29.56	48.93
중 부하시	27.46	45.63
선로정수변동	30.83	50.181

그림 14는 정상 부하시 동특성 응답을 나타내고 있고, 그림 15는 중 부하시 ( $P_{e0}=1.3$ )의 동특성 응답을 나타내고 있다. 결과로부터 제안한 PSS는 Yu의 방법보다 초기 언더슈터(Undershoot)와 오버슈터(Overshoot)가 작고 정정시간(settling time)이 빠르므로 우수한 성능을 나타내고 있음을 알 수 있다. 그림 16과 17은 계통의 모델링 오차에 대하여 제안한 PSS의 강인성을 검증하기 위하여 계통의 선로정수가 30% 증가한 경우와 동기 발전기의 관성정수가  $\pm 30\%$  변동한 경우에  $\Delta\delta=0.1$ [p.u.]로 변화시킬 경우에 대한 동특성 응답을 나타내고 있다. 그림 16에서 선로 정수가 변동한 경우에는 종래의 PSS보다 제안한 PSS가 우수한 동특성을 보이고 있음을 알 수 있고, 그림 17에서 관성정수가 변동한 경우에 있어서도 관성정수가 증가한 경우에 종래의 PSS는 정정시간이 길어졌으나, 제안한 PSS의 경우는 정정시간이 상대적으로 큰 차이 없이 우수한 응답을 얻을 수 있었다. 따라서 제안한 PSS는 종래의 방식보다 파라미터 변동에 대해 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어 성능과 강인성을 보였다.

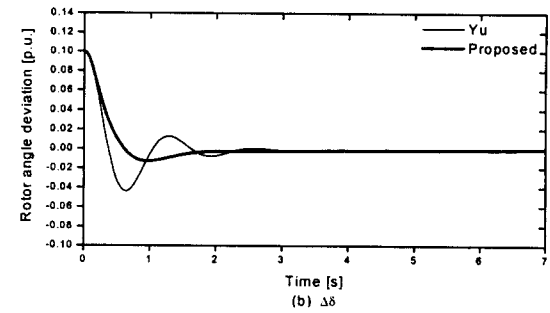
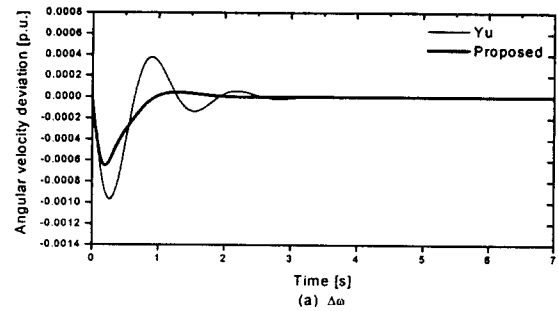


그림 14 정상부하시의 동특성 응답의 비교 ( $P_{e0}=1.0$ )

Fig. 14 Comparison of Dynamics response at nominal operation conditions

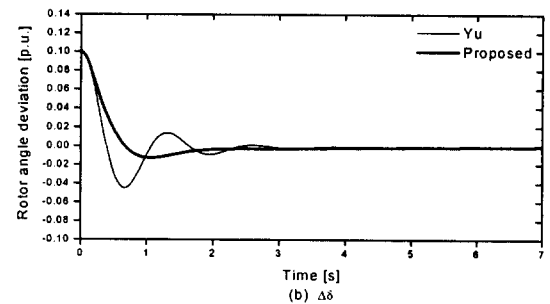
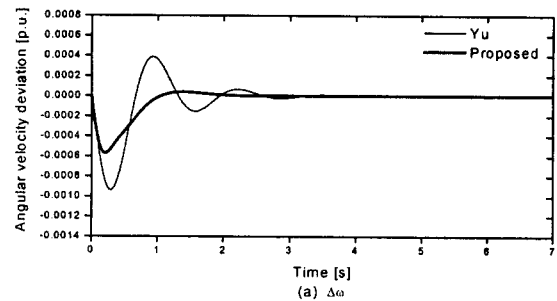
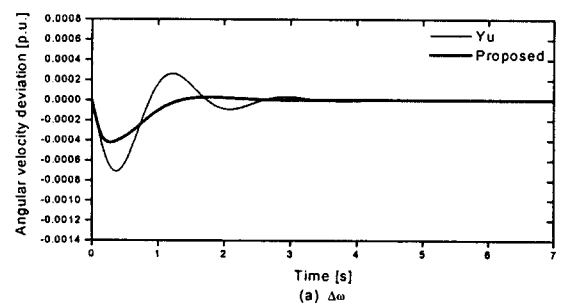


그림 15 중 부하시의 동특성 응답의 비교 ( $P_{e0}=1.3$ )

Fig. 15 Comparison of dynamics response at heavy load





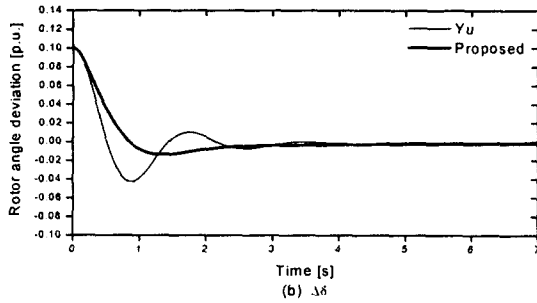
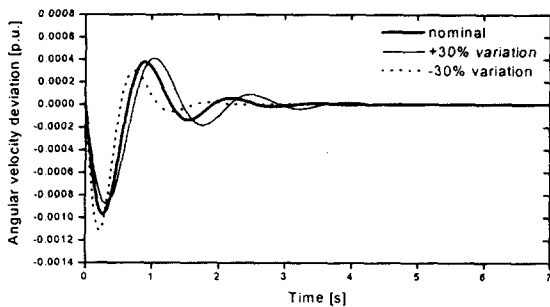
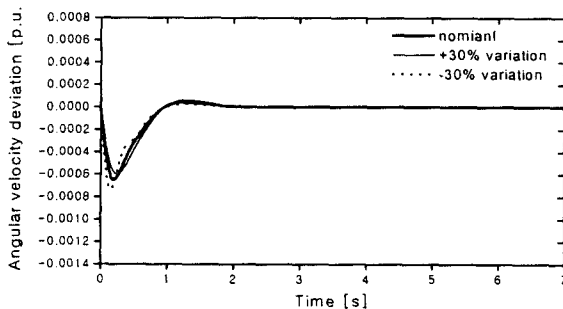


그림 16 선로정수 30% 변동시 동특성 응답의 비교  
 Fig. 16 Comparison of dynamic response at 30% variation of line parameters



(a) Response of  $\Delta\omega$  using Yu's PSS



(b) Response of  $\Delta\omega$  using proposed PSS

그림 17 관성정수  $\pm 30\%$  변동시 동특성 응답의 비교  
 Fig. 17 Comparison of dynamics response with inertia constants changed

### 7. 결론

본 논문에서는 전력계통의 저주파 진동을 억제하기 위한 전력계통 안정화 장치의 구조를 변화시키지 않고 계통 요소를 향상시킬 수 있는 강인한 제어기 설계 방법을 제시하였다. 평가함수인  $H_\infty$ -norm을 최소화하기 위하여 최적화 알고리즘으로서 유전 알고리즘을 이용하였다. 1개의 진상 보상기를 가지는 경우와 2개의 진상 보상기를 가지는 경우에 대하여 각각 최적 파라미터를 결정하였으며, 다양한 외란이 발생한 경우와 선로파라미터 변동 및 동기기의 관성정수가 변동한 경우에 대하여 동특성 응답과 강인성을 고찰하였다. 주요한

결과는 다음과 같다.

- ① 유전알고리즘의 도입으로 인하여 국부적인 최적해가 많이 존재하는  $H_\infty$  최적화 문제를 쉽게 최적화 할 수 있었다.
- ② 제안한 설계 방식은 기존의 최적  $H_\infty$  제어 기법을 이용한 보조 여자제어기를 설계한 경우에 비해 제어기의 차수를 매우 감소시킬 수 있었다.
- ③ 다양한 외란이 발생한 경우에 제안한 설계 방식은 종래의 Yu의 방법보다 외란억제 능력이 우수함을 알 수 있었다.
- ④ 계통 내의 파라미터 변동과 같은 불확실성이 존재하는 경우에 있어서도 제안한 PSS는 강인성이 우수함을 알 수 있었다.

따라서, 본 논문에서 제안된 PSS는 다양한 부하의 변동 및 계통내의 불확실성이 존재하는 경우에 대해서도 매우 강한 제어기임을 확인 할 수 있었다.

### 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] P. Kundur, D. C. Lee and H. M. Zein El-Din, "Power system stabilizers for thermal unit : Analytical techniques and on-site validation", IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-1, pp. 81-95, 1981
- [3] H. Othman, J. J. Sanchez-Gasca, M. A. Kale and J. H. Chow, "On the design of robust power system stabilizers", Proceedings of the 28th conference on decision and control, Tampa, Florida, pp. 1853-1857, 1989
- [4] Y. N. Yu, "Electric power system dynamics", ACADEMIC PRESS 1983
- [5] M. Hassan, O. P. Malik and G. S. Hope, " A fuzzy logic based stabilizer for a synchronous machine", IEEE Trans. EC, Vol. 6, No.3, pp. 407-413, 1991
- [6] Y. Y Tsu and C. R. Chen, "Tuning of power system stabilizers using an artificial neural network", IEEE trans. on EC, Vol 6, No. 4, pp. 612-619, 1991
- [7] C. X. Mao et al, "Studies of real-time adaptive optimal excitation controller and adaptive optimal power system stabilizer", IEEE Trans. on EC. Vol. 7, No. 3, pp. 498-605, 1992
- [8] R. Asgharian, "A robust  $H_\infty$  power system stabilizer with no adverse effect on shaft torsional modes", IEEE Trans. on EC, Vol. 9, No. 3, pp. 475-481, 1994
- [9] S. Chen, O. P. Malik, "  $H_\infty$  optimization-based power system stabiliser design", IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 2, pp. 179-184, 1995
- [10] F. K. Agbenyo, N. Yorino, H. Sasaki, " An Improved  $H_\infty$  power system stabilizer", T. IEE Japan, Vol. 116-

- B, No. 12, pp. 1470-1477, 1996
- [11] 정형환, 정동일, 주석민, "자기조정 퍼지 제어기에 의한 전력계통 안정화에 관한 연구", 한국퍼지 및 지능시스템 학회 논문지, Vol. 5, No. 2, pp. 58-69. 1995
- [12] 정형환, 주석민, 정동일, 김상효, 고희석, "전력계통의 안정화를 위한 퍼지 PID 제어기의 적용과 제어 특성", 대한전기학회 논문지, Vol. 47, No. 2, pp.143-149, 1998
- [13] K. Glover, J. C. Doyle, "state-space formulae for all stabilizing controllers that satisfy an  $H_\infty$ -norm bound and relations to risk sensitivity", Systems & Control Letters vol. 11, pp 167-172, 1988
- [14] J. C. Doyle, K. Glover, P. P. Khargonekar, "state-space solutions to standard  $H_2$  and  $H_\infty$  control problems", IEEE Trans., on AC, Vol. 34. No. 8, pp. 831-847, 1989
- [15] J. M. Maciejowski, "Multivariable feedback design", Addison-Wesley, 1989
- [16] R. Y. Chiang and M. G. Sofonov, "Robust control toolbox user's guide", The Maths works Inc., 1992
- [17] K. Zhou, "Essentials of robust control", Prentice-Hall, 1998
- [18] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithm in search optimization, and machine learning", Addison-Wesley, 1989
- [19] Z. Michalewicz, "Genetic Algorithm +data structure = Evolution program", Springer Verlag, 1992

## 저 자 소 개



정형환 (鄭亨煥)

1941년 1월 19일 생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동아대 공대 전기공학과 교수

Tel : 051-200-7733

E-mail : hhchong@mail.donga.ac.kr



이정필 (李丁必)

1971년 8월 19일 생. 1997년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중

Tel : 051-200-6747

E-mail : leejp@mail.taegu.net



이준탁 (李浚柝)

1956년 11월 21일 생. 1979년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1981년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년 8월~1998년 2월 일본 쓰꾸바대학교 객원 연구원. 현재 동아

대 전기공학과 부교수

Tel : 051-200-7740

E-mail : jtlee@mail.donga.ac.kr



한길만 (韓吉萬)

1972년 7월 3일 생. 1999년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정 재학 중

Tel : 051-200-6747

E-mail : d9135076@mail.donga.ac.kr