

유전 알고리즘을 이용한 강인한 H_{∞} -QFT PSS 설계에 관한 연구

論文

52A-7-3

A Study on Design of Robust H_{∞} -QFT PSS Using Genetic Algorithm

鄭亨煥* · 李丁必** · 朴熙徹*** · 王龍泌**

(Hyeng-Hwan Chung · Jeong-Phil Lee · Hee-Chul Park · Yong-Peel Wang)

Abstract - In this paper, a new design method of H_{∞} -QFT PSS using genetic algorithm(GA) is proposed to efficiently damp low frequency oscillations despite the uncertainties and various disturbances of power systems. The selection method of evaluation function is proposed for selecting the robust PSS parameters. All QFT boundaries are satisfied automatically and H_{∞} -norm is minimized simultaneously without trial and error procedure. The eigenvalues and the damping ratio of dominant oscillation mode are investigated to evaluate performance of designed controller for one machine infinite bus system. A disturbance attenuation performance is investigated through singular value bode diagram of the system. Dynamic characteristics are considered to verify robustness of the proposed PSS by means of nonlinear simulations under various disturbances for various operating conditions. The results show that the proposed PSS is more robust than conventional PSS.

Key Words : Quantitative Feedback Theory(QFT), Loop Shaping, Genetic Algorithm(GA), H_{∞} -norm, Power System Stabilizer(PSS)

1. 서 론

전력시스템은 비선형적이고 시변요소들을 포함하는 매우 복잡한 시스템으로서 진동 불안정성(oscillatory instability)이라는 고유의 특성을 가지고 있다. 이러한 전력시스템의 불안정성을 해결하고 전력시스템의 안정도를 향상시키기 위하여 지난 수 십년 동안 여러 가지 방법이 연구되어져왔다. 대표적인 방법으로 크게 두 가지로 분류할 수 있는데, 먼저 초고압 직류송전(High Voltage Direct Current : HVDC)[1]방식과 정지형 무효전력 보상기(Static Var Compensator : SVC)[2], 사이리스터 제어 직렬 보상기(Thyristor Controlled Series Capacitor : TCSC)[3]등의 유연 송전 시스템(Flexible AC Transmission System : FACTS)과 같이 추가적인 장치의 개발과 설치에 관한 연구를 들 수 있는데, 이와 같은 추가적인 설비들을 이용한 여러 연구 결과들을 볼 때 매우 우수한 결과를 나타내고 있지만 경제적인 측면에서 볼 때 비용이 많이 든다는 단점이 있다. 다음으로 전력시스템 안정화장치(Power System Stabilizer : PSS)와 같이 여자시스템의 제동능력을 향상시키기 위한 보조여자제어(supplementary excitation control)방식을 들 수가 있다. 이를 위하여 고유치 기법[4], 극배치 기법[5], 최적제어 기법[6], 자기동조제어 기

법[7], 적응제어[8] 및 퍼지제어[9] 기법들을 이용한 방법들이 제안되었다. 또한 최근에는 강인성을 확보하기 위한 노력의 일환으로써 H_{∞} 제어기법 및 QFT제어기법을 이용한 PSS 설계방법에 관한 연구도 활발히 이루어지고 있다[10-12].

그 중에서 lead/lag 형태의 PSS는 그 구조가 간단하고 전력시스템의 안정도를 향상시키며 유용성이 있으며, 그 구현이 쉽기 때문에 현대 전력시스템에 가장 보편적으로 사용되고 있다. 이와 같이 추가적인 비용이 거의 들지 않고 기존에 설치되어 있는 PSS의 성능을 향상시키기 위해서 PSS의 구조가 lead/lag형태로 고정되어 있고 PSS의 파라미터만을 최적화 하는 방법에 관한 연구들이 진행되어 왔다. 이는 PSS의 구조를 간단하게 하고 구현이 용이하다는 점에서 관심의 대상이 되고 있고, 최근에는 이러한 구조가 고정된 PSS중에서도 강인성을 확보할 수 있도록 하는 파라미터들 선정하는 방법에 관한 연구가 활발히 진행 중에 있다[13-14].

본 논문에서는 전력시스템의 모델링 오차에도 불구하고 페루프 시스템이 안정성을 유지하면서 예측하지 못한 외란이나 측정 잡음에 대처할 수 있는 강인하고 성능이 우수한 제어기를 설계할 수 있는 H_{∞} 제어이론과 QFT제어이론을 이용하여 구조가 고정된 lead/lag형태를 갖는 PSS의 최적 파라미터를 선정하기 위해 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)[15]을 도입한 새로운 방법을 제안하였다. 기존의 방법에 의해 설계된 H_{∞} 제어기의 차수는 플랜트와 가중함수의 차수를 모두 포함하므로 매우 고차의 제어기가 된다. 일반적으로 전력시스템에 설치되어 운용중인 PSS는 주로 lead/lag 형태의 2차 내지 3차의 구조를 가지고 있지만 만일 H_{∞} 제어기를 사용하고자 한다면 그 제어기의 구현이 매우 힘들뿐만 아니라

* 正會員 : 東亞大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授 · 工博

** 正會員 : 東亞大 工大 情報技術研究所 特別研究員 · 工博

*** 正會員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 碩士

接受日字 : 2002年 8月 27日

最終完了 : 2003年 5月 13日

설치되어 있는 PSS를 새로운 고차의 제어기로 교체한다는 것은 실제적으로 매우 비현실적이다. 또한 기존 QFT 설계방법에서 사용된 루프정형 알고리즘들은 주어진 경계 조건들을 만족하도록 영점과 극점을 계속적으로 추가해 가는 수동적인 방법으로 수많은 시행착오적인 절차를 거쳐야 하는 실정이다. 이러한 방법으로는 모든 설계사양을 만족하는 제어기를 설계하기란 매우 힘든 문제가 되며 제어기의 차수 역시 상당히 커질 우려가 있다. 따라서 QFT 설계중의 루프 정형 과정을 시행착오적인 절차 없이 모든 설계사양을 만족시킬 수 있는 설계 방법을 개발할 필요가 있다.

P. S. Rao[11] 등은 기존의 QFT 절차중의 시스템 전달함수의 루프정형에 중점을 둔 것이 아니라 단지 강인안정도에 중점을 두었으며, 제어기 차수를 고정하고 주어진 구속조건을 만족하도록 비선형 프로그램과 simplex법을 이용하여 PSS의 파라미터를 결정하였다. 정형환[12] 등은 QFT 설계중에 유전 알고리즘을 도입하여 자동으로 QFT경계를 만족하는 PSS의 파라미터를 선정하는 방법을 제시 하였다. 이는 PSS설계에 QFT경계만을 고려한 것이지만 본 논문에서는 H_∞ 제어 설계 방법[16]과 QFT 제어기 설계방법[17]의 단점을 해결하고, 기존의 lead/lag 형태의 간단한 제어기 구조를 가지면서도 모든 QFT 경계를 만족하며 H_∞ 노미가 최소화되도록 하는 강인한 제어기를 자동적으로 설계할 수 있도록 GA를 이용한 H_∞ -QFT PSS를 설계하기 위한 새로운 접근 방법을 제안하였다. 따라서 제안하는 방법은 설계자가 PSS의 구조 및 차수를 임의로 선정할 수 있음으로 인하여 기존의 H_∞ 제어기의 설계문제에서 발생하는 제어기 차수가 커지는 문제를 해결할 수 있고, QFT 설계과정 중에 루프정형 과정을 시행착오적인 절차 없이 자동적으로 모든 QFT 경계조건을 만족할 수 있도록 하는 강인한 제어기 설계가 가능하다.

제안하는 방법에 의해 설계된 제어기의 성능평가를 위해 고유치 및 주요 동요모드의 제동비(damping ratio)를 기존의 설계방법과 비교, 고찰하였다. 그리고 페루프 시스템의 특이 값 보드 선도를 통하여 외란 억제 성능을 비교, 검토하였다. 또한 제안한 PSS설계 방식의 강인성을 검증하기 위하여 다양한 동작조건에 대하여 외란이 발생한 경우에 대하여 1기 무한대 모선 계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 행하였으며, 기존의 PSS를 설치한 경우[18]와 제어기의 동요억제 효과 및 강인성에 대하여 비교·검토하였다.

2. 전력시스템의 수학적 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 1기 무한대 모선의 전력시스템의 모델은 그림 1과 같다.

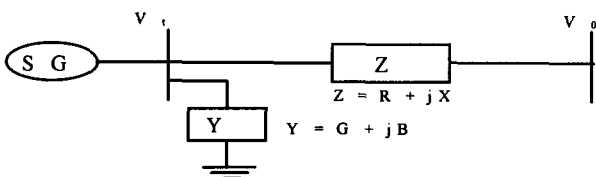


그림 1 1기 무한대 모선의 전력 시스템
Fig. 1 A one machine infinite bus power system

2.1 동기기 및 여자기 모델

그림 2는 동기기 및 여자기 모델을 종합한 블록선도를 나타내고 있다. 이 모델은 기계적 입력을 고정시킨 후 평형 상태에서 선형화한 것이다. 일반적으로 전력 시스템의 안정도 해석에 사용되며, 특히 저주파수 진동을 해석하기 위한 모델이다. 그림에서 w 는 각속도, δ 는 회전각, 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.

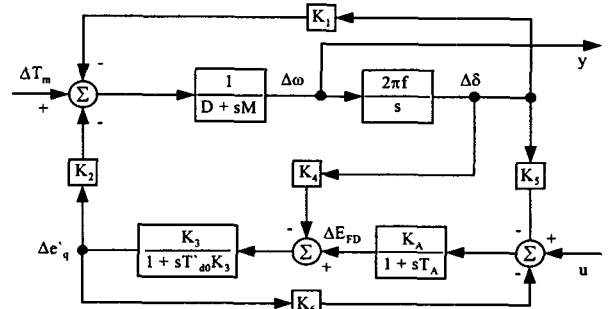


그림 2 선형화 된 계통 모델
Fig. 2 Linearized power system model

그림 2를 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,

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

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

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

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

2.2 전력 시스템 안정화 장치의 구조

본 논문에서 고찰하고자 하는 PSS의 구조는 회전자 속도를 입력으로 사용하는 PSS이다. 그림 3은 2개의 진상 보상기가 연결된 형태의 PSS이며 전달 함수는 식 (2)과 같다.

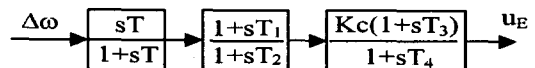


그림 3 PSS의 구조를 나타내는 블록선도
Fig. 3 Block diagram of PSS

$$K(s) = \frac{u_E}{\Delta w} = \left(\frac{sT}{1+sT} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left(\frac{K_C(1+sT_3)}{(1+sT_4)} \right) \quad (2)$$

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

3. GA를 이용한 H_∞ -QFT PSS의 최적 설계

일반적으로 QFT설계 과정은 주로 QFT경계를 만족할 때까지 극점과 영점을 추가하는 과정으로 시행착오적인 수동적 방법으로 설계가 수행되어 왔는데, 이러한 방법으로는 모든 설계사양을 만족하는 제어를 설계하기가 힘들뿐만 아니라 제어기의 차수 또한 매우 높아질 수도 있다. 또한 H_∞ 제어 설계방법은 강인한 제어를 제공하지만 제어기의 차수가 매우 높아짐으로 인하여 제어기 구현이 힘들고, 설치되어 있는 기존의 PSS를 대체하여야 하는 문제점이 있다. 이러한 단점을 극복하기 위해 QFT의 모든 경계조건을 만족하고 동시에 H_∞ 노름을 최소화하는 구조가 지정된 형태의 PSS 파라미터를 자동으로 최적화 할 수 있도록 GA를 이용하였다.

3.1 QFT 제어 이론

주어진 페루프 시스템의 설계 사양과 플랜트 불확실성을 QFT경계로 변환[19]하고 나면 이를 니콜스 선도 상에 나타내고 이 경계를 만족하도록 공칭 개루프 전달함수 $L_0(s)$ 를 식별해야 하는데 이 과정을 루프 정형이라 한다. 일반적으로 루프 정형 알고리즘들은 주어진 QFT경계 조건을 만족하도록 극점과 영점을 계속적으로 추가해 가는 수동적인 방법으로 시행착오적인 방법에 의존해 왔다. 이때 그림 4와 같이 공칭 개루프 전달 함수가 각각의 주파수에서 그에 상응하는 QFT 경계 상에 놓여 있으면 최적의 QFT설계가 달성된다[20].

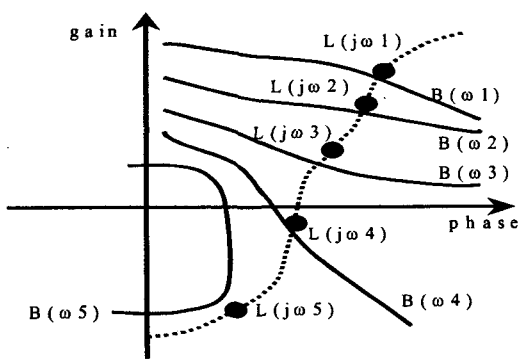


그림 4. QFT 경계와 설계된 루프 전달함수
Fig. 4. QFT boundaries and loop transfer function

QFT 설계 절차는 다음과 같이 요약 될 수 있다.

STEP 1. 플랜트의 템플레이트 발생. - 주어진 불확실성을 포함한 플랜트 $G(s) \in G$ 에 대하여, 플랜트의 특성과 사양에 따라서 일련의 주파수 $w_i (i = 1, \dots, h)$ 을 선택하고 복소 평면상에 모든 주파수 w_i 에 대하여 플랜트 집합 $G(jw_i)$ 의 값을

계산한다. 이 플랜트 집합을 플랜트 템플레이트라 한다.

STEP 2. QFT 경계 계산. - 플랜트 집합중에 임의의 플랜트를 선택하여 이를 공칭 플랜트로 선정한다. 그리고 각각의 주파수에 대하여 플랜트 템플레이트에 대한 강인 안정도 사양과 성능 사양을 결합하여 공칭 플랜트에 대한 안정도 여유와 성능 경계를 계산한다. 각각의 주파수에서 계산된 경계중에 가장 나쁜 경계를 QFT경계로 선정한다. 이렇게 되면 모든 $G(s) \in G$ 에 대한 페루프 시스템의 사양이 개루프 공칭의 경우에 대한 사양으로 변환된다.

STEP 3. QFT 제어기에 대한 루프 정형. - 모든 주파수 범위에서 QFT경계 조건이 만족되고 페루프 공칭 시스템이 안정할 때까지 루프 정형 방법을 이용하여 니콜스 선도상에 QFT 제어기를 설계한다.

STEP 4. 필터 $F(s)$ 설계. - 주파수 영역의 성능 사양을 만족시키도록 필터 $F(s)$ 를 설계한다.

3.2 H_∞ 제어기 설계

일반적인 H_∞ 제어 설계 문제는 제어기 $K(s)$ 가 플랜트 $G(s)$ 를 안정하게 한다는 조건하에서, 외부 외란 w 에서 출력 z 로의 전달 함수의 H_∞ -노름을 최소화시키는 제어기 $K(s)$ 를 구하는 것이다. 그림 5는 가중함수 $W_s(s)$ 와 $W_T(s)$ 를 포함한 시스템의 블록선도를 나타낸다.

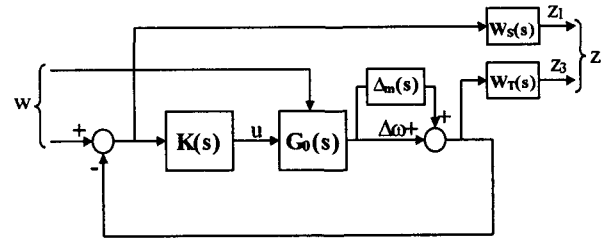


그림 5. 가중함수를 포함한 확장된 시스템
Fig. 5. Augmented system with weighted functions

그림 5를 기초로 하여 가중함수가 포함된 확장 행렬을 상태공간 방정식으로 나타내면 식 (3)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + B_1w + B_2u \\ z &= C_1x + D_{11}w + D_{12}u \\ y &= C_2x + D_{21}w + D_{22}u \end{aligned} \quad (3)$$

구조가 지정된 제어기 $K(s)$ 는 다음과 같이 상태공간 방정식으로 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_k &= A_k x_k + B_k u_k \\ y_k &= C_k x_k + D_k u_k \end{aligned} \quad (4)$$

위의 식 (3)과 (4)를 이용하여, 제어기를 포함한 외부 입력 w 에서 조절되는 출력 z 로의 페루프 전달함수는 식 (5)와 같다.

$$F_i(P, K) = \begin{Bmatrix} A_{ci} & B_{ci} \\ C_{ci} & D_{ci} \end{Bmatrix} \quad (5)$$

여기서,

$$A_{ci} = \begin{bmatrix} A + B_2 D_k C_2 & B_2 C_k \\ B_k (I + D_{22}) C_2 & A_k + B_k D_{22} C_k \end{bmatrix}$$

$$B_{ci} = \begin{bmatrix} B_1 + B_2 D_k D_{21} \\ B_k (I + D_{22} D_k) D_{21} \end{bmatrix}$$

$$C_{ci} = \begin{bmatrix} C_1 + D_{12} D_k C_2 & D_{12} C_k \end{bmatrix}$$

$$D_{ci} = \begin{bmatrix} D_{11} + D_{12} D_k D_{21} \end{bmatrix}$$

본 연구에서는 제어기 $K(s)$ 의 구조가 지정되므로 QFT 경계가 만족되는 제어기 중에서 외부 입력 w 에서 z 로의 전달함수 $F_i(P, K)$ 의 H_∞ -norm이 가장 최소화되는 제어기를 선택하는 문제로써 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\text{minimize } \| F_i(P, K) \|_\infty \quad (6)$$

3.3 GA를 이용한 H_∞ -QFT PSS의 최적 설계방법

PSS의 최적 설계를 위해 GA를 적용하기 위해서는 먼저 제어기의 구조와 차수를 지정하고, 최적화 되어지는 파라미터를 선정하여 탐색공간을 설정한 후 이를 염색체로 표현하여야 한다. GA를 이용하여 최적해를 탐색하는 경우 상대적으로 환경에 잘 적응하는 개체를 평가하기 위한 수단으로서 평가함수를 선정해야 하는데 이는 최적화의 목적이 무엇이나에 따라 달라지게 된다. 본 논문에서 고찰되는 최적화 문제는 QFT제어기 설계 과정에서 나타나는 루프정형 과정으로, 주어진 QFT경계를 모두 만족함과 동시에 외부 외란에서 출력으로의 전달함수에 대한 H_∞ norm을 최소화하도록 하는 제어기를 자동적으로 설계하는 문제이다.

3.3.1 제어기의 구조 및 염색체의 구조

PSS의 최적 설계를 위해서 먼저 주어진 모든 설계 사양을 만족하는 제어기를 설계하기 위해서 제어기의 차수와 구조를 결정해야 한다. 이때 제어기의 차수는 될 수 있으면 적을수록 좋은데 제어기의 차수가 적을수록 고차의 제어기보다는 계산부담이 적고 구현하기가 쉽기 때문이다. 본 논문에서 고찰하고자 하는 PSS의 구조는 기존의 lead/lag형태의 구조로써 2.2절의 그림 2와 같고, 이를 전달함수 형태로 나타내면 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 본 논문에서 최적화 하고자 하는 파라미터는 $K_C, T, T_1, T_2, T_3, T_4$ 가 되며, 제어기의 구조와 차수가 결정이 되어지면 GA를 이용하기 위해서 최적화 대상이 되는 파라미터의 탐색공간을 설정하고 이를 염색체로 구성하면 그림 6과 같다. 그림 6에서 나타난 염색체는 파라미터를 2진수의 유한 길이로 코딩하는 절차가 필요 없이 변수 그 자체로 최적화 하는 실 변수 GA를 이용하였다. 이 실 변수 GA는 변수의 코딩 절차 없이 실 변수로 최적화 함으로

써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지할 수 있다. 실 변수로 코딩되어진 염색체의 구성은 각 개체의 문자열을 변수의 상·하한치 내에서 랜덤 하게 발생시켜 탐색할 각각의 변수를 실제 값으로 구성한다. 그리고 복제, 교차, 돌연변이 연산을 통하여 최적화의 목적이 달성될 때까지 반복한다

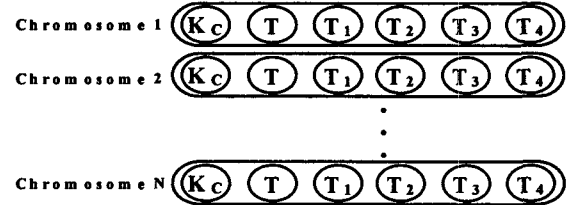


그림 6 해 집단의 구조

Fig. 6 Construction of solution population

3.3.2 PSS설계를 위한 평가함수 선정

본 연구에서 최적화문제는 QFT의 모든 경계조건을 만족하고 H_∞ norm을 최소화하는 것이므로 GA의 평가함수에는 QFT경계와 H_∞ norm이 포함되어져야 한다. 따라서 QFT의 경계를 구하기 위해서는 먼저 전력 시스템의 파라미터 불확실성의 범위를 선정하고 강인 성능사양과 외란억제 성능사양에 따라서 경계를 계산해야 한다. 따라서 연구에서 선정한 전력 시스템의 파라미터 불확실성의 범위는 유효전력 P_e , 무효전력 Q_e , 선로 임피던스 X 를 식 (7)과 같이 설정하였다.

$$0.4 \leq P_e \leq 1.2$$

$$-0.2 \leq Q_e \leq 0.2$$

$$0.6 \leq X \leq 1.1 \quad (7)$$

식 (7)과 같이 불확실성을 나타내는 파라미터들의 범위를 이용하여 일련의 주파수 w_i 에 대한 플랜트 템플레이트 (Templates)를 구하고 안정한 공칭 플랜트를 임의로 선정한다. 일단 공칭 플랜트를 선정하고 나면 QFT 설계를 위하여 강인 성능 사양과 외란 억제 성능 사양에 대한 경계를 계산해야 한다. 본 연구에서 사용된 강인 안정사양과 외란 억제 성능 사양은 식 (8), (9)와 같다.

$$\left| \frac{L(jw)}{1 + L(jw)} \right| \leq 1.4 \quad (8)$$

$$\left| \frac{P(jw)}{1 + L(jw)} \right| \leq 0.025 \quad (9)$$

식 (8), (9)와 같이 주어진 사양을 이용하여 이차 부등식을 이용한 수치적인 알고리즘을 이용하여 QFT경계를 계산한다. 이때 계산된 경계가 GA의 평가함수에 포함되어야 하는데 이를 경계지수(bound index) J_{bi} 라고 정의한다. 이는 이산 주파수 w_i 에서 QFT의 경계가 만족하는지를 평가하게 된다. 각각의 주파수에서 경계가 만족되면 J_{bi} 는 0의 값을 가지게 되며 경계가 만족되지 않는 주파수에서는 J_{bi} 는 1의 값을 가진다.

GA를 이용하여 페루프 시스템의 불확실성과 예측치 못한

외란에 대하여 강인성을 극대화 되도록 외부 입력 w 에서 z 로의 전달함수 $F_1(P, K)$ 의 H_∞ -norm을 최소화시키는 문제로서 H_∞ -norm을 평가 함수에 반영하여야 하는데 이를 H_∞ 성능 지수 J_{himf} 라고 정의하며 식 (10)을 평가함수에 반영한다.

$$J_{himf} = \| F_1(P, K) \|_\infty \quad (10)$$

다음으로 페루프 시스템의 안정도를 평가하기 위하여 안정도 지수 J_{sta} 를 평가함수에 반영한다. 이것은 페루프 시스템의 특성방정식의 근을 구하여 쉽게 판별할 수 있으며 페루프 시스템이 안정하면 J_{sta} 가 0의 값을 가지고 불안정하면 J_{sta} 가 1의 값을 가진다. 그리고 제어기의 이득 값이 커지지 않도록 이득지수 J_{hg} 도 평가함수에 포함하는데 본 연구에서 J_{hg} 는 PSS의 이득 값 K_c 로 설정하였다. 따라서 GA를 이용한 H_∞ -QFT 제어기의 파라미터를 최적화하기 위해서는 식 (11)과 같이 주어지는 평가함수를 최소화하는 문제로 변환할 수 있다.

$$Min(J = \alpha J_{himf} + \beta J_{hg} + \gamma_0 J_{sta} + \sum_{i=1}^h \gamma_i J_{bi}) \quad (11)$$

여기서, $\alpha, \beta, \gamma_0, \gamma(i=1, 2, \dots, h)$ 는 가중치 요소이다. 해 집단의 각 문자열을 평가하기 위해 사용된 적합도 함수는 식 (12)와 같이 선정하였다.

$$Fitness = \frac{1}{\alpha J_{himf} + \beta J_{hg} + \gamma_0 J_{sta} + \sum_{i=1}^h \gamma_i J_{bi}} \quad (12)$$

전력계통에 적용된 H_∞ -QFT PSS의 최적 설계과정은 그림 7과 같이 요약할 수 있다.

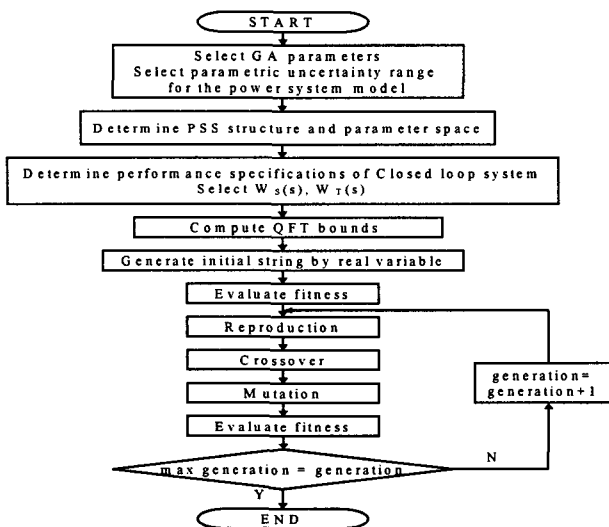


그림 7 GA를 이용한 PSS파라미터 최적화 알고리즘
Fig. 7 The algorithm for optimization of PSS parameters using GA

4.시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 기존의 lead/lag형태의 간단한 제어기 구조를 가지면서도 모든 QFT 경계조건을 만족하며 H_∞ norm을 최소화하는 강인한 제어기를 설계할 수 있도록 GA를 이용한 H_∞ -QFT PSS를 설계하는 새로운 접근 방법을 제안하였다. 제안한 설계 기법의 평가를 위해 고유치 해석을 통하여 주요 동요 모드의 계동비의 향상효과를 검토하였고, 주파수 영역에서 시스템의 특이값 보드 선도를 통하여 외란억제 성능을 고찰하였다. 제안한 PSS의 외란 억제 성능과 강인성을 검증하기 위하여 1기 무한대 모선계통에 대해 다양한 동작조건 즉, 정상 부하시, 중 부하시, 경 부하시에 대하여 다양한 외란이 발행한 경우와 단락이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 통하여 기존의 제어방식(Conventional PSS : CPSS)[18]과 동특성을 비교 고찰하였다.

본 논문에서 사용한 1기 무한대 모선 계통의 경우 동기기, 여자기 및 선로 정수와 시스템의 초기 상태는 문헌[18]과 같으며, H_∞ -QFT PSS의 최적 설계를 위해 사용되어진 GA의 파라미터는 표 1과 같다. 여기서 사용된 GA는 이진수 문자열로 코딩하지 않고 실 변수형 코딩방식을 이용하였으며, 토너먼트 선택 방법과 다음 세대에 우수한 개체를 보존하는 엘리트리스트 선택을 이용하였다.

표 1 유전 알고리즘 파라미터
Table 1 Genetic algorithm parameters

| Generations number | Population size | Crossover rate | Mutation rate |
|--------------------|-----------------|----------------|---------------|
| 100 | 100 | 0.85 | 0.01 |

1기 무한대 모선계통의 고유치 분포는 표 2와 같다. 1기 무한대 모선 계통의 모드 중에서 0.2951±j4.9596 모드가 주요 동요 모드로써 이것은 불안정모드를 나타내고 있다. 이 주요 동요 모드의 주파수는 약 0.8Hz 정도에서 발생함을 알 수 있다.

표 2 개루프 시스템의 고유치
Table 2 Eigenvalues of open loop system

| eigenvalues | damping ratio | Freq. (rad/sec) |
|------------------|---------------|-----------------|
| 0.2951±j4.9596 | -0.0594 | 4.97 |
| -10.3930±j3.2837 | 0.954 | 10.9 |

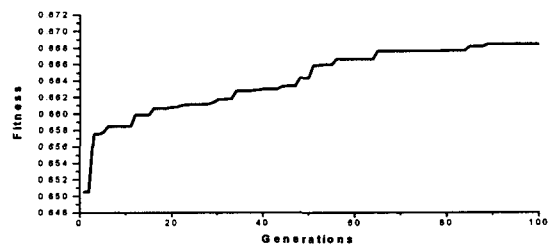


그림 8 각 세대별 적합도
Fig. 8 Fitness of each generation

그림 8은 제안한 방법에 의한 최적화시 각 세대에 따른 적합도의 수렴과정을 나타내었다. 기존의 방법을 이용한 경우 PSS의 파라미터는 $K_c=20.0, T=3, T_1=0.125, T_2=0.05, T_3=0.125, T_4=0.05$ 이며, 제안한 방법을 이용하여 설계되어진 PSS의 최적 파라미터는 $K_c=30.7213, T=11.0548, T_1=3.8376, T_2=2.6377, T_3=0.2153, T_4=0.0123$ 이다.

그리고 식 (8), (9)와 같이 주어진 강인 안정 사양과 외란 억제 성능 사양을 이용하여 구한 QFT경계와, 설계되어진 제어기를 이용하여 결정된 루프 정형결과 $L_0(s) = G_0(s)K(s)$ 는 니콜스 선도 상에서 그림 9와 같이 나타났다. 그림에서 보여지듯이 각각의 주파수에서 모든 강인 안정도 사양과 성능사양이 만족되어 짐을 알 수 있다. 모든 주파수에서 개루프 전달함수는 QFT경계선상에 놓여있어 Horowitz에 의해 제시된 바와 같이 최적 설계의 조건을 만족하고 있다. 외란 억제 능력에 대한 해석을 위하여 페루프 전달함수 $G_0(s)(I + G_0(s)K(s))^{-1}$ 의 특이값 보드(bode)선도를 그림 10에 나타내었다. 시스템의 주요 동요 모드는 약 5[rad/sec] 즉, 0.8[Hz] 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.

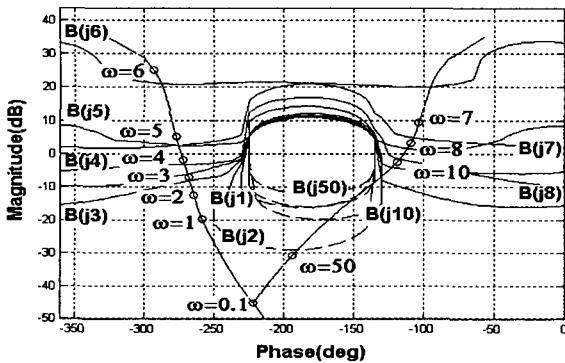


그림 9 QFT 경계와 루프 정형 결과
Fig. 9 QFT bounds and loop shaping result

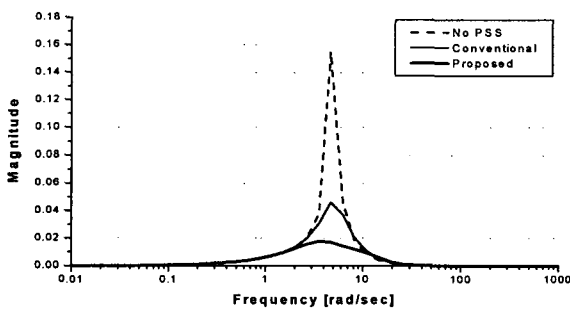


그림 10 $G_0(s)(I + G_0(s)K(s))^{-1}$ 의 특이값 보드 선도
Fig. 10 Singular-value bode plots of $G_0(s)(I + G_0(s)K(s))^{-1}$

제안하는 방법에 의해 설계된 제어기의 성능 평가를 위해 제어기가 없는 개루프의 고유치, 기존의 PSS를 가진 페루프의 고유치 및 제안한 PSS를 가진 페루프의 고유치를 그림

11에 나타내어 비교하여 나타내었으며 주요 동요 모드의 추이를 나타내고 있다. 표 3은 각각의 경우에 대한 주요동요모드의 고유치 및 제동비를 나타내었다. 표 3에서 PSS가 없는 경우 시스템은 불안정한 모드를 보이고 있으나 기존의 PSS 및 제안한 PSS는 이 시스템을 안정화시키는데 매우 효율적임을 알 수 있다. 제안한 PSS가 기존의 PSS보다 제동비가 약 2배 이상 향상되었음을 확인할 수 있고 전력시스템의 안정도 향상에 더욱 효율적임을 알 수 있다.

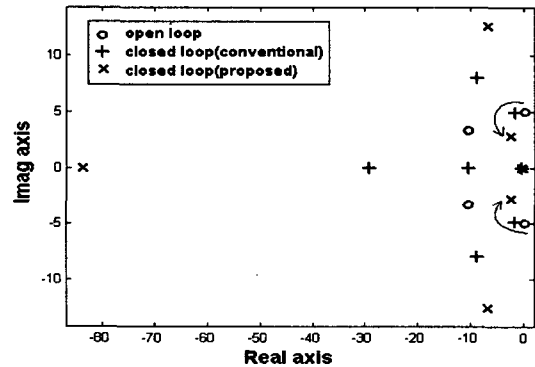


그림 11 개루프와 페루프의 고유치
Fig. 11 Open and closed loop eigenvalues

표 3 주요 동요 모드의 고유치 및 제동비
Table 3 Eigenvalues and damping ratio of dominant mode

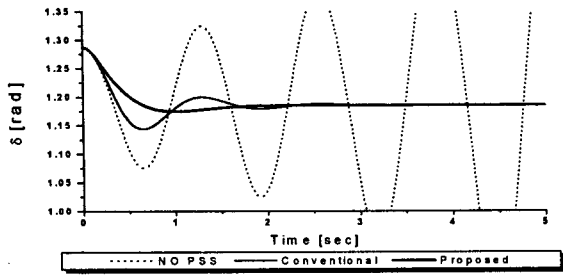
| | eigenvalues | damping ratio |
|----------------------------|-----------------|---------------|
| open loop | 0.2951+j4.9596 | -0.0594 |
| closed loop (conventional) | -1.5162+j4.9004 | 0.296 |
| closed loop (proposed) | -2.3663+j2.7948 | 0.646 |

4.1 정상 부하시

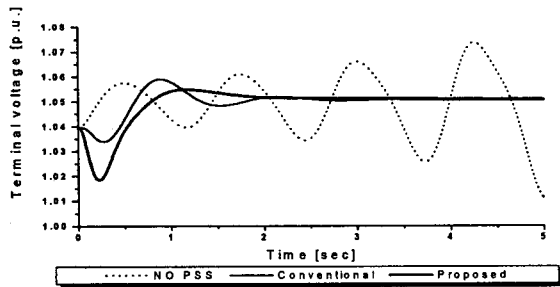
제안한 H_{∞} -QFT PSS의 외란 억제 성능과 강인성을 평가하기 위해서 정상부하시($P_{e0} = 1.0 [p.u.] Q_{e0} = 0.015 [p.u.]$)에 발전기의 초기 위상각 δ 가 변동한 경우, 모선에 단락이 발생한 경우에 대한 비선형 시뮬레이션을 수행하여 PSS가 없는 경우, 기존의 방법을 이용한 PSS를 설치한 경우, 및 제안한 PSS를 설치한 경우에 대하여 동특성 응답을 비교, 고찰하였다. 이때 PSS의 입력신호는 $-0.1 [p.u.] \leq u \leq 0.1 [p.u.]$ 로 제한하였다

그림 12는 정상 부하시 발전기의 초기 위상각을 0.1[rad]만큼 변동 시켰을 경우 PSS가 없는 경우, 기존의 방법을 이용한 PSS를 설치한 경우 및 제안한 PSS를 설치한 경우에 대한 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답을 나타내었다.

그림 13은 정상 부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우에 PSS가 없는 경우, 기존의 방법을 이용한 PSS를 설치한 경우 및 제안한 PSS를 설치한 경우에 대한 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답을 나타내었다.

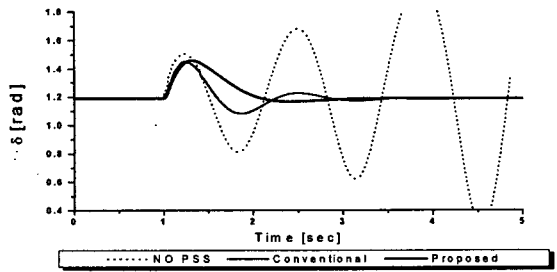


(a) Rotor angle

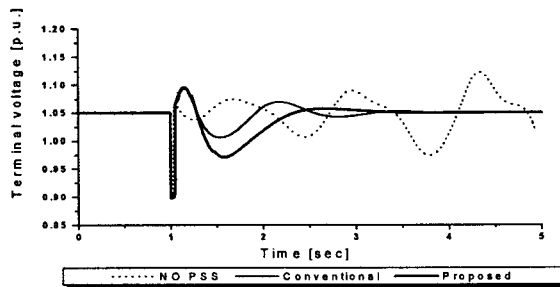


(b) Terminal voltage

그림 12 정상 부하시 위상각을 증가한 경우의 응답
Fig. 12 Responses to increasing rotor angle under normal load



(a) Rotor angle



(b) Terminal voltage

그림 13 정상 부하시 3상 단락 발생시 동특성 응답
Fig. 13 Responses to three-phase fault under normal load

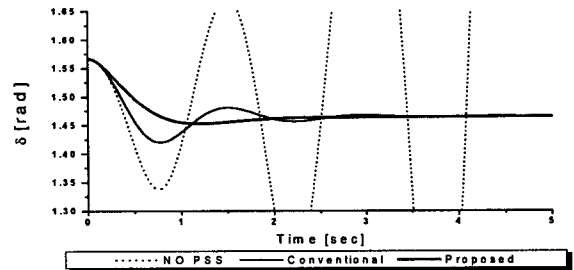
4.2 중 부하시

제안한 H_{∞} -QFT PSS의 외란 억제 성능과 강인성을 평가

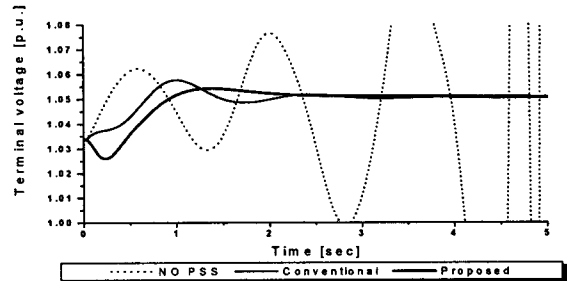
하기 위해서 중 부하시($P_{e0} = 1.2$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.2$ [p.u.])에 발전기의 초기 위상각 δ 가 변동한 경우, 모선에 단락이 발생한 경우에 대한 비선형 시뮬레이션을 수행하여 PSS가 없는 경우, 기존의 방법을 이용한 PSS를 설치한 경우, 및 제안한 PSS를 설치한 경우에 대하여 비교 고찰하였다. 이때 PSS의 입력 신호는 -0.1 [p.u.] $\leq u \leq 0.1$ [p.u.]로 제한하였다

그림 14는 중 부하시 발전기의 초기 위상각을 0.1[rad] 만큼 변동 시켰을 경우 PSS가 없는 경우, 기존의 방법을 이용한 PSS를 설치한 경우 및 제안한 PSS를 설치한 경우에 대한 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답을 나타내었다.

그림 15는 중 부하시 1초 후에 무한대 모선 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우에 PSS가 없는 경우, 기존의 방법을 이용한 PSS를 설치한 경우 및 제안한 PSS를 설치한 경우에 대한 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답을 나타내었다.

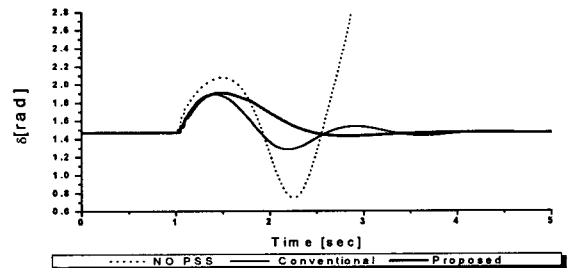


(a) Rotor angle

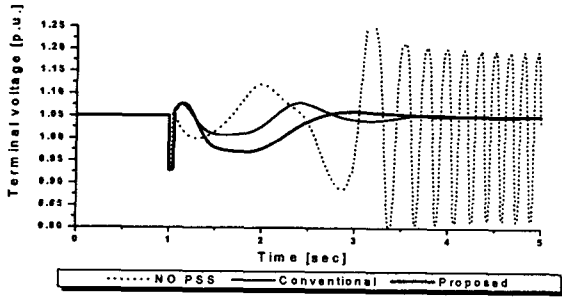


(b) Terminal voltage

그림 14. 중 부하시 위상각을 증가한 경우의 응답
Fig. 14. Responses to increasing rotor angle under heavy load



(a) Rotor angle



(b) Terminal voltage

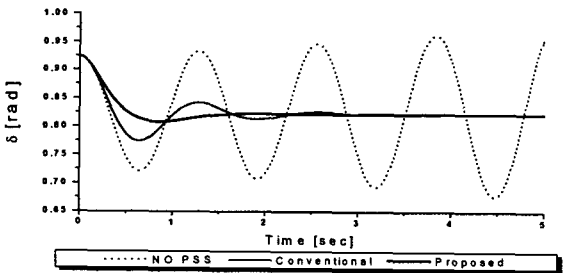
그림 15 중 부하시 3상 단락 발생시 동특성 응답

Fig. 15 Responses to three-phase fault under heavy load

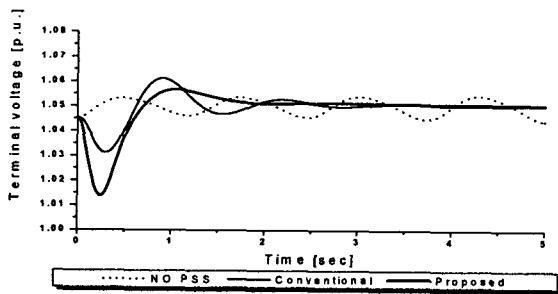
4.3 경 부하시

제안한 H_{∞} -QFT PSS의 외란 억제 성능과 강인성을 평가하기 위해서 경 부하시($P_{e0} = 0.7 [p.u.]$ $Q_{e0} = 0.015 [p.u.]$)에 발전기의 초기 위상각 δ 가 변동한 경우, 모선에 단락이 발생한 경우에 대한 비선형 시뮬레이션을 수행하여 PSS가 없는 경우, 기존의 방법을 이용한 PSS를 설치한 경우, 및 제안한 PSS를 설치한 경우에 대하여 비교 고찰하였다. 이때 PSS의 입력 신호는 $-0.1 [p.u.] \leq u \leq 0.1 [p.u.]$ 로 제한하였다.

그림 16은 경 부하시 발전기의 초기 위상각을 0.1[rad] 만큼 변동시켰을 경우 PSS가 없는 경우, 기존의 방법을 이용한 PSS를 설치한 경우 및 제안한 PSS를 설치한 경우에 대한 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답을 나타내었다.



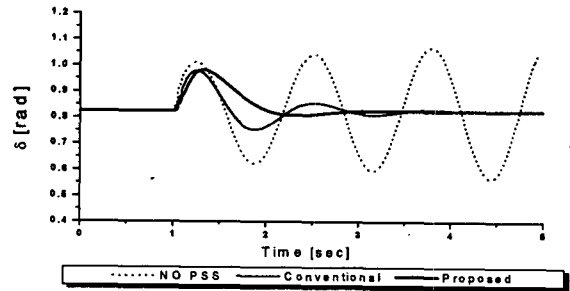
(a) Rotor angle



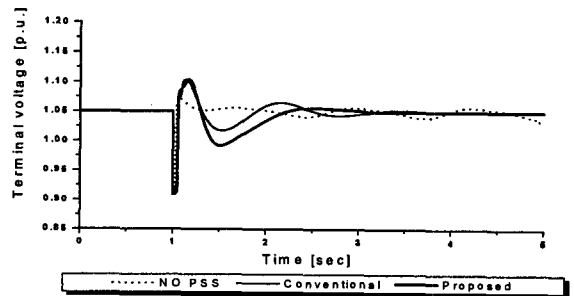
(b) Terminal voltage

그림 16 경 부하시 위상각을 증가한 경우의 응답

Fig. 16 Responses to increasing rotor angle under light load



(a) Rotor angle



(b) Terminal voltage

그림 17 경 부하시 3상 단락 발생시 동특성 응답

Fig. 17 Responses to three-phase fault under light load

그림 17은 경 부하시 1초 후에 무한대 모선 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우에 PSS가 없는 경우, 기존의 방법을 이용한 PSS를 설치한 경우 및 제안한 PSS를 설치한 경우에 대한 발전기의 위상각 및 단자전압에 대한 동특성 응답을 나타내었다.

제안한 H_{∞} -QFT 제어기의 외란억제 및 강인성을 검증하기 위하여 1기 무한대 모선 계통에 대하여 정상 부하시, 중 부하시 및 경 부하시에 대하여 회전자 각이 변동한 경우 및 단락이 발생한 경우에 대하여 시간영역 컴퓨터 시뮬레이션을 행하여 그림 12~17에 나타내었다. 그림 12는 정상 부하시 초기 회전자 각이 0.1[rad] 변동한 경우로써 PSS가 없는 경우는 불안정 모드로써 회전자 각 및 단자 전압이 발산하였고, 기존의 PSS를 가진 경우는 PSS가 없는 경우보다는 저주파 진동이 현저하게 감소하여 회전자각의 정정시간이 약 2.7초 정도를 나타내었다. 그리고 제안한 PSS를 가진 경우에는 정정시간이 약 1.5초로써 기존의 제어 방식보다 저주파 진동을 억제하는데 매우 효율적임을 확인할 수 있었다. 그림 13은 정상 부하시 3상 단락이 발생한 경우에 대한 동특성 응답을 나타낸 경우로써 PSS가 없는 경우 발산하였고 기존의 PSS를 가진 경우는 3.5초 이후에는 정상상태에 도달하였고 제안한 PSS를 가진 경우에는 2.5초 이후에 정상상태에 도달하여 저주파 진동이 현저하게 감소하였음을 확인할 수 있다. 따라서 정상 부하시 다양한 외란이 발생한 경우 제안한 PSS는 기존의 PSS보다 외란억제 성능이 뛰어나며 및 우수한 강인성을 나타내었으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 효율적임을 알 수 있다.

그림 14~15는 중 부하시에 대하여 초기 회전자 각이

0.1[rad] 만큼 변동한 경우 및 3상 단락이 발생한 경우에 대하여 동특성 응답을 나타내고 있으며, 그림 16~17은 경 부하 시에 대하여 초기 회전자 각이 0.1[rad] 만큼 변동한 경우 및 3상 단락이 발생한 경우에 대하여 동특성 응답을 나타내었다. 그림과 같이 제안한 PSS의 경우가 기존의 PSS 보다 저주파 진동을 억제하는데 매우 효율적임을 알 수 있고 다양한 동작조건에서 다양한 외란에 대하여 매우 우수한 강인성을 확보할 수 있음을 알 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 전력시스템의 불확실성과 다양한 외란에도 불구하고 저주파 진동을 효율적으로 억제할 수 있도록 GA를 이용하여 H_{∞} -QFT PSS를 설계할 수 있는 새로운 알고리즘을 제시하였다. QFT제어기 설계 절차인 루프 정형과정에 GA를 도입함으로써 기존 QFT 설계 방법에서 사용된 수많은 시행착오적인 절차없이 모든 설계사양을 만족하고 동시에 H_{∞} 값을 최소화 할 수 있도록 하는 PSS의 설계 알고리즘을 개발하였다. 그리고 제안한 제어기의 외란 억제 성능과 강인성을 검증하기 위하여 고유치 해석을 수행하였고, 특이값 보드선도를 통하여 주파수 영역에서의 해석을 행하였으며, 다양한 동작 조건하에 다양한 외란이 발생한 경우에 비선형 시뮬레이션을 통하여 기존의 설계 방법을 이용한 PSS와 동특성을 비교, 고찰하였다.

본 논문의 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

1. QFT 설계 절차 중의 루프 정형과정이 극점과 영점을 계속적으로 추가하는 시행착오적인 방식에서 탈피하여 GA를 도입함으로써 모든 QFT경계를 만족하도록 루프 정형이 자동적으로 수행되어 제어기를 쉽게 설계하였을 뿐만 아니라 제어기의 성능을 향상시킬 수 있었다.
2. H_{∞} 제어기의 강인한 성능에 비하여 제어기 차수가 커지는 단점을 해결하고 H_{∞} 값을 평가함수에 반영함으로써 설계된 제어기가 강인성을 유지할 수 있었다.
3. 주요 동요 모드에 대한 고유치 해석을 통해 주요 동요 모드가 기존의 설계 방식에 비해 현저한 향상을 보였고, 페루프 시스템의 특이값 보드 선도로부터 주요동요 모드의 외란 억제 성능이 매우 우수함을 알 수 있었다.
4. 제안한 PSS를 적용하여 다양한 동작 조건하에서 시뮬레이션을 수행한 결과 제안한 GA를 이용한 H_{∞} -QFT PSS 설계 방법은 기존의 설계 방법보다 광범위한 동작 조건하에서 저주파 진동을 억제하는 데 매우 우수한 제어성과 강인성을 보였으며 전력시스템의 안정도 향상에 크게 기여함을 알 수 있었다.
5. 제안한 설계 알고리즘의 또 다른 장점으로는 제어기의 구조와 제어기의 차수를 설계자의 임의로 설정할 수 있다는 점을 들 수 있다. 따라서 본 연구에서 제시한 설계 알고리즘은 다양한 공학적 응용 분야에 적용되어 PID파라미터 선정문제 및 제어기 구조를 임의로 선정하여 구조가 고정된 제어기 설계 파라미터를 선정하는데 많은 활용이 기대된다.

감사의 글

이 논문은 2002학년도 동아대학교 학술연구비(공모 과제) 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] E. N. Dyalynas and N. C. Loskolos, "Reliability modeling and evaluation of HVDC power transmission system," IEEE Trans. on Power System, Vol. 9, No. 2, pp872-878, (1994)
- [2] 손광명, 김동현, 이태기 장기수, 윤용범, 이진, "서대구 SVC 및 제어시스템 분석," 대한전기학회 논문지, Vol. 50, No. 7, pp. 37-44, 2001
- [3] 손광명, "전력 계통 동요 억제를 위한 TCSC의 제어," 서울대학교 박사학위 논문 (1996).
- [4] O. H. Abdalla, S. A. Hassan and N. T. Tweig, "Coordinated stabilization of multimachine power systems," IEEE Trans. on PAS, Vol. 103, No. 3, pp. 483-491 (1984).
- [5] J. H. Chow and J. J. Sanchez-Gasca, "Pole-placement designs of power system stabilizers," IEEE Trans. on power systems, Vol. 4, No. 1, pp. 271-277 (1989).
- [6] Y. N. Yu, K. Vongsuriya and L. N. Wedman, "Application of an optimal control theory to a power system," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-89, No. 1, pp. 55-62 (1970).
- [7] W. Gu. and K. E. Bollinger, "A self-tuning power system stabilizer for wide-range synchronous generator operation," IEEE Trans. on PWRS, Vol. 4, No. 3, pp. 1191-1199 (1989).
- [8] A. Ghandakly and P. Idowu, "Design of a model reference adaptive stabilizer for the exciter and governor loops of power generators," IEEE Trans. on Power Systems, Vol. 5, No. 3, pp. 887-893 (1990).
- [9] 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).
- [10] S. Chen and O. P. Malik, " H_{∞} optimization-based power system stabiliser design," IEE Proc.-Gener. Transm. Distrib., Vol. 142, No. 2, pp. 179-184 (1995).
- [11] P. S. Rao and I. Sen, "Robust tuning of power system stabilizers using QFT," IEEE Trans on control systems technology, Vol. 7. No. 4, pp. 478-486 (1999).
- [12] 정형환, 이정필, 허동렬, 김창현, "전력계통의 안정도 향상을 위한 강인한 GA-QFT제어기 설계," 대한전기학회 논문지, Vol. 50A. No. 4, pp. 197-207 (2001).

- [13] 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).
- [14] M. R. Khaldi, A. K. Sarkar, K. Y. Lee and Y. M. Park, "The modal performance measure for parameter optimization of power system stabilizers," IEEE Trans. on EC, Vol. 8, No. 4, pp. 660-666 (1993).
- [15] Z. Michalewicz, "Genetic algorithm + data structures = evolution program", second edition, Springer-Verlag, 1992
- [16] J. C. Doyle, K. Glover and P. P. Khargonekar, "state-space solutions to standard H_2 and H_∞ control problems," IEEE Trans., on AC, Vol. 34. No. 8, pp. 831-847 (1989).
- [17] C. H. Houpis, S. J. Rasmussen, "Quantitative feedback theory", Marcel dekker, Inc. 1999
- [18] Y. N. Yu, "Electric power system dynamics," ACADEMIC PRESS (1983).
- [19] J.M. Rodrigues, Y. Chait, C. V. Hollot, "An Efficient Algorithm for Computing QFT Bounds", Journal of Dynamic Systems, Measurement, and Control, Vol. 119, 1997
- [20] I. M. Horowitz, "Optimum loop transfer function in single-loop minimum-phase feedback systems," Int. J. Control, Vol. 18, No. 1, pp. 97~113 (1973).

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). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학)

Tel : (051) 200-6747

E-mail : leejp@mail.taegu.net



박희철(朴熙徹)

1975년 4월 5일생. 2000년 2월 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2003년 2월 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한전 전력연구원

Tel : (042) 865-5983

E-mail : hchpark@kepri.re.kr



왕용필(王龍泌)

1966년 8월 25일생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1999-2001년 뉴질랜드 Centebury University(Post-Doc.)

Tel : (051) 200-6747

E-mail : e948730@mail.donga.ac.kr