

# 전력계통의 안정도 향상을 위한 강인한 GA-QFT 제어기 설계

論 文

50A-4-6

## Design of Robust GA-QFT Controller for Enhancement of Power System Stability

鄭亨煥\* · 李丁必\*\* · 許東烈\*\* · 金昌賢\*\*\*

(Hyeng-Hwan Chung · Jeong-Phil Lee · Dong-Ryol Hur · Chang-Hyun Kim)

**Abstract** - In this paper, design problem of QFT-PSS using Genetic Algorithm(GA) is investigated for power systems with parameter variation and disturbance uncertainties. A robust controller for uncertain power systems can be designed automatically such that the cost of feedback is minimized and all robust stability and performance specifications are satisfied. It is shown that the proposed design method not only automates loop shaping but also improves design quality and improves the quality with a reduced order controller. The robustness of the proposed controller has been investigated on a single machine infinite bus model. The results are shown that the proposed QFT-PSS using GA is more robust than conventional PSS.

**Key Words** : Quantitative Feedback Theory(QFT), Loop Shaping, Genetic algorithm(GA), Robustness, Power System Stabilizer(PSS)

### 1. 서 론

지난 수십 년 간 전력계통의 저주파 진동의 불안정성에 관한 문제는 매우 중요한 문제로 인식되어 왔다. 전력계통에 전기 기계적인 모드와 연결된 저주파 진동은 긴 시간 주기동안 지속되며, 어떤 경우에는 전력전송을 제한시키기도 한다. 그러한 저주파 진동을 억제하기 위한 효과적인 대책 방법은 자동 전압 조절기의 전압 기준 입력에 보조 신호를 주입하는 피드백 제어를 가지는 발전기를 설치하는 것이다. 이러한 장치를 전력 계통 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)라 하고, 현대 전력계통에 광범위하게 사용되고 있으며 이에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다.[1~3]

기존의 lead/lag 형태의 PSS는 제어기의 이득이 고정되어 있고, 그 구조가 간단하며 제어기 구현이 용이하므로 현대 전력계통에 가장 보편적으로 사용되고 있다. 전력계통의 동특성을 향상시키기 위해서는 이러한 PSS의 파라미터를 튜닝할 필요가 있는데, Hanson[4]은 전력계통의 응답특성을 개선하기 위하여 조속기 및 전압 조정기 등 발전기 제어부의 이득상수를 조정하여 계통의 안정도 향상에 기여하였으나 시행착오 방법으로 이득상수를 구하여 발전기를 제어하였기에 체계적인 접근 방법을 제시하지는 못하였다. Demello[5]는 전력계통의 안정화 장치의 위상보상을 통하여 저주파 영역에서의 제동 토크를 증대시키도록 PSS 파라미터를 결정하는 방법을 제시하였으나 고차의 PSS 파라미터 선정에는 적용이 어려웠

다. K. Bollinger[6]등은 위상 보상회로의 시정수에 따른 근계적을 구하여 PSS의 계수를 구하는 방법, R. J. Fleming[7]등은 동요모드의 고유치를 지정하는 극배치 방법, O. H. Abdalla[8]등은 고유치의 감도를 이용하는 방법 등을 제안하였다. P. Kunder[9]등에 의한 미소신호 안정도 해석과 위상 보상법의 개발은 PSS설계에 중요한 전기를 제공하였다. 그러나 이러한 기법들은 고전적인 선형 시스템 이론을 이용하였으며, 제어기 설계 단계에서 모델의 불확실성을 고려하지 않고, 동작점 부근의 선형화 된 모델을 이용하여 제어기를 설계하였기 때문에 불확실성이 많이 존재하는 전력계통에서는 정확한 제어 목적을 달성 할 수 없다. 일반적으로 전력계통의 특성은 지속적으로 변하고 있기 때문에 튜닝이 매우 힘들다. 따라서 이러한 계통의 변동에 대응하고자 하는 노력의 일환으로 W. Gu[10]등은 자기 동조 제어기법을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였고, 최근에는 퍼지논리[11], 적응제어[12] 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.

전력계통은 발전과 부하 패턴의 변화 뿐 아니라 전송망의 변동 때문에 동작조건이 지속적으로 변하고 있다. 따라서 전력시스템에는 그에 상응하는 미소 신호 동특성에 큰 변동이 존재하게 된다. 이것은 미소 신호 선형화 된 전력시스템 모델에서 파라미터 불확실성으로 표현 될 수 있다. 최근 강인 제어 분야의 진보로 인하여 시스템의 파라미터 변동에도 불구하고 이론적으로 성능이 우수하며 고정된 이득을 가지는 전력 계통 안정화 장치의 설계를 위하여 제어기 설계 단계에서 모델의 불확실성을 취급할 수 있는 강인 제어기법에 관한 연구[13]가 활발하게 진행되고 있는 실정이지만  $H_{\infty}$  이론과

\* 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 博士課程

\*\*\* 準 會 員 : 東亞大 電氣工學科 碩士課程

接受日字 : 2001年 2月 26日

最終完了 : 2001年 3月 29日

같은 현대 강인제어 이론은 수학적인 치밀성을 갖는 대신 norm의 사용으로 인해 과도설계(over-design)의 문제와 설계한 제어기가 복잡하여 실제 온라인(on-line) 제어 문제에 적용하기 어려우며 나아가서 시간지연의 문제를 포함하고 있다

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서 도입된 Quantitative Feedback Theory(QFT)[14~20]는 고전제어 이론을 근거로 하여 Horowitz에 의해 개발되었으며, 이 기법은 구조적 불확실성과 비 구조적 불확실성을 동시에 취급할 수 있으며, 플랜트에 존재하는 불확실성과 외란에도 불구하고 적절한 시스템 성능 사양을 달성할 수 있도록 피드백의 사용을 강조하는 매우 실제적인 설계 방법이다. QFT는 최근 미국과 이스라엘을 중심으로 활발한 연구가 이루어지고 있는 강인제어 기법중의 하나이며, 비행 제어, 미사일 제어, 콤팩트 디스크 메커니즘 등 다양한 공학적 적용이 시도되어 왔다.

QFT 설계의 가장 기본적인 개념은 페루프 시스템의 설계 사양과 플랜트 불확실성을 공칭 시스템의 개루프 전달함수의 강인 안정도 경계와 성능 경계로 변환하는 것이다. 그리고 이러한 경계를 만족하도록 이득-위상(gain-phase) 루프 정형(Loop Shaping) 기법을 이용하여 제어기를 설계하는 것이다. 이때 설계 과정은 주파수 영역에서 수행되며, 이 과정에서 가장 중요한 부분을 차지하고 있는 루프 정형은 기준 시간 응답에 대응하는 주파수 응답의 경계 조건을 니콜스(Nichols) 선도에 표현하고, 이러한 조건에 맞는 공칭 루프 전달함수를 식별하는 과정이다. 기존 QFT 설계 방법에서 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 된다. 이러한 문제를 해결하고, QFT 제어기 설계를 향상시키기 위하여 설계 자동화에 대한 연구가 절실히 필요한 실정으로 최근 QFT의 설계자동화에 관한 연구가 진행되어왔다. 그러나, QFT설계에서 루프 정형 문제는 비 선형적이고 non-convexity 문제이므로 기존의 경사(gradient)에 기초한 최적화 기법들은 정확한 최적해를 찾을 수 없다. 따라서 본 논문은 다목적 전역적 최적화 기법인 유전 알고리즘을 사용하여 QFT의 설계자동화 문제를 다루고자 한다.

본 논문에서는 파라미터 변동과 외란 불확실성이 많이 존재하는 전력계통에 대하여 QFT에 기초하여 구조가 고정된 강인한 PSS의 설계를 위하여 전역적인 탐색에 강인한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)[21~22]을 이용하는 새로운 접근 방법을 제안하였다. 제안한 설계방식은 불확실한 플랜트에 대해서 피드백 비용이 최소화되며 모든 강인 안정도 사양과 성능 사양이 만족되도록 수동적인 루프정형 절차 없이 자동적으로 수행될 수 있을 뿐만 아니라 제어기의 구조와 차수를 설계자의 임의로 설정할 수 있고 제어기 설계의 성능을 향상시킬 수 있다.

제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 1기 무한대 모선에 적용한 결과를 비 선형 시뮬레이션을 통하여 다양한 외란이 발생하였을 경우에 외란 억제 성능과 강인성에 대하여 고찰하였으며, 제안한 PSS의 설계가 기존의 설계방식[1]보다 효율적이며 전력계통 안정도 향상에 크게 기여함을 보이고자 한다.

## 2. 전력시스템의 수학적 모델[1]

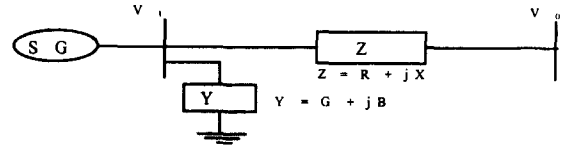


그림 1 1기 무한대 모선의 전력 시스템

Fig. 1 A one machine infinite bus power system

본 연구에서 고찰하고자 하는 1기 무한대 모선의 전력 시스템의 모델은 그림 1과 같고, 발전기는 전기 기계적인 동요 방정식(swing equation)과 발전기 내부 전압 방정식으로 구성된 3차 모델로 표현하였다. 발전기의 동요 방정식은 식 (1)~(2)와 같다.

$$\frac{d}{dt} \omega = (P_m - P_e - D(\omega - 1)) / M \quad (1)$$

$$\frac{d}{dt} \delta = \omega_b(\omega - 1) \quad (2)$$

여기서,  $P_m$ 은 일정하다고 가정하고,  $P_e$ 는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$P_e = v_d i_d + v_q i_q \quad (3)$$

그리고 발전기 내부 전압에 대한 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{d}{dt} E_q' = (E_{fd} - (x_d - x_d') i_d - E_q') / T_{do}' \quad (4)$$

본 연구에서 사용된 여자 시스템은 IEEE Type-ST1이며, 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} E_{fd} = (K_A (V_{ref} - v + u) - E_{fd}) / T_A \quad (5)$$

여기서,  $v = (v_d^2 + v_q^2)^{1/2}$ 이며,  $v_d = x_q i_q$ ,  $v_q = E_q' - x_d' i_d$ 이다. 식 (1)~(5)를 기초로 하여 동작점 부근에서 선형화 하는 방법은 문헌 [1]에서 상세히 기술되어 있으며, 식(6)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} X(t) &= AX(t) + BU(t) \\ Y(t) &= CX(t) \end{aligned} \quad (6)$$

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.

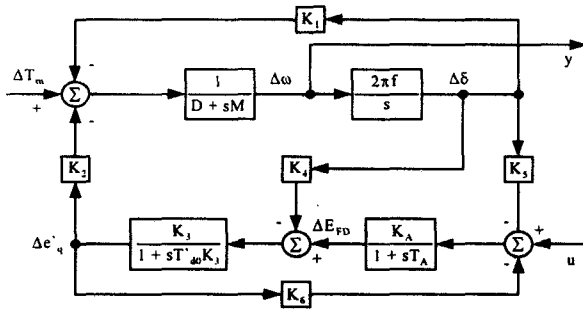


그림 2 선형화 된 전력계통 모델  
Fig. 2 Linearized power system model

그림 2는 동기 및 여자기 모델을 종합한 블록선도를 나타내고 있다. 이 모델은 기계적 입력을 고정시킨 후 평형 상태에서 선형화 한 것이다. 일반적으로 전력 시스템의 안정도 해석에 사용되며, 특히 저주파수 진동을 해석하기 위한 모델이다.

### 3. QFT 제어 이론

QFT는 고전제어 이론을 근거로 하여 Horowitz에 의해 창안되었으며, 이것은 지정된 플랜트에 존재하는 불확실성 또는 외란에 대하여 강인한 제어성능을 보장하기 위해 니콜스 차트(Nichols chart)를 이용한 주파수 영역에서의 강인한 제어기 설계 방법이다. QFT의 주요 목적은 외부 외란과 플랜트 불확실성이 존재하는 불확실한 플랜트에 대하여 주어진 성능 사양을 만족하며 최소 대역폭을 가지는 저차의 제어기를 설계하는 것이다.

QFT의 기본적인 설계 방식은 페루프 시스템의 설계 사양과 플랜트 불확실성의 설계 사양을 공칭 시스템의 개루프 전달 함수에서의 강인 안정도 경계와 강인 성능 경계로 변환하고, 조합된 경계 조건들과 플랜트의 파라미터에 포함된 불확실성의 집합에 근거하여 루프정형(loop shaping)기법을 이용하여 제어기를 설계하는 것이다. 따라서, QFT는 그림 3과 같은 피드백 제어 시스템에 적용된 주파수 영역의 설계 이론이며, 주어진 제어성능을 만족하는 제어기의 전달함수  $K(s)$ 를 구하는 것이다.

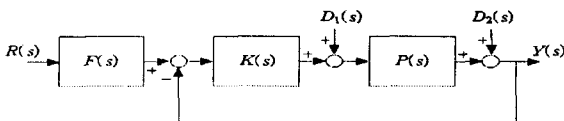


그림 3 피드백 제어 시스템  
Fig. 3 Feedback control system

여기서,  $P(s)$ 는 불확실성을 포함한 플랜트를 나타내고,  $K(s)$ 는 제어기이며  $F(s)$ 는 입력 필터(pre-filter)이다. 일반적으로 QFT설계 절차는 두 가지 단계를 가지게 되는데, 먼저 페루프 강인 안정도 사양과 강인 성능 사양에 의해 결정되는 페루프 시스템의 불확실성과 노이즈를 적절한 수준으로 감소시키기 위한 제어기  $K(s)$ 를 설계하는 것과, 적절한 주파수 응답을 얻을 수 있도록 하는 필터  $F(s)$ 를 설계하는 것이다. 이때 제어기  $K(s)$ 는 플랜트의 불확실성 때문에 발생하는 출력  $Y(s)$ 의 변동이 적절하게 정의된 영역 내에 존재하도록 하고, 외부 외란  $D_1(s), D_2(s)$ 의 영향을 가능한 억제하도록 설계되어야 한다. 일반적으로 피드백 제어계의 설계에서 사양들은 시간 영역에서의 경계조건으로 주어지지만 QFT의 설계 방식은 주파수 영역에서 수행되므로 시간 영역에서 주어진 설계 사양을 주파수 영역의 경계 조건으로 변환해야 한다.

QFT를 이용한 제어기 설계를 위해서는 일반적으로 다음과 같은 세 가지 사양을 필요로 하게 된다.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq \gamma, \quad \text{for all } P(s) \in \mathbf{P} \quad (7)$$

$$|a(\omega)| \leq \left| \frac{F(j\omega)L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq |b(j\omega)| \quad \text{for all } P(s) \in \mathbf{P} \quad (8)$$

$$\left| \frac{P(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq |d(\omega)| \quad \text{for all } P(s) \in \mathbf{P} \quad (9)$$

여기서  $\gamma, a(\omega), b(\omega), d(\omega)$ 는 안정도 성능 사양으로, 각각 강인 안정도 여유, 하한 추종성능경계, 상한 추종성능 경계, 외란 억제 성능경계이다. 식 (7)은 강인 안정도 성능 사양이며, 식 (8)은 추종성능 경계사양, 식 (9)는 외란 억제 경계를 나타내는 성능 사양이다, 그리고  $L(s)=K(s)P(s)$ 이며 개루프 전달함수이며,  $\mathbf{P}$ 는 불확실성 플랜트 집합을 나타낸다.

QFT를 이용해서 성능 사양에 맞는 제어기를 설계 할 때 플랜트의 불확실성의 범위를 설정할 필요가 있다. 주어진 임의의 한 주파수에서 가능한 플랜트 불확실성을 나타내는 파라미터의 변동에 대한 주파수 응답을 플랜트 템플레이트(Template)라고 한다. 플랜트 템플레이트는 플랜트 불확실성의 영역에 대해 주어진 각각의 주파수에서 크기와 위상을 구하고 이것을 니콜스 선도로 사상시킴으로써 구할 수 있다. QFT를 이용한 강인 제어기의 설계과정의 두 번째 단계로서 식 (7)~(9)와 같이 페루프 사양이 주어지면 니콜스 선도에 공칭 시스템의 개루프 전달함수의 강인 안정도 경계와 성능경계로 변환해야 한다. 이러한 영역을 QFT 경계(QFT bounds)라고 한다. 지금까지 QFT 경계는 니콜스 차트상에서 플랜트 템플레이트를 수동으로 그려감으로써 계산해 왔다. 그러나 이러한 방법은 매우 번거롭고 까다로운 작업이다. 따라서 본 논문에서는 최근 개발된 이차 부등식으로 주어지는 수치적인 알고리즘[17]을 도입하여 QFT 경계를 계산하였다.

주어진 페루프 시스템의 설계 사양과 플랜트 불확실성을 QFT경계로 변환하고 나면 이를 니콜스 선도에 나타내고 이 경계를 만족하도록 공칭 개루프 전달함수  $L_0(s)$ 를 식별해야 하는데 이 과정을 루프 정형이라 한다. 일반적으로 루

프 정형 알고리즘들은 주어진 QFT경계 조건을 만족하도록 극점과 영점을 계속적으로 추가해 가는 수동적인 방법으로 시행착오적인 방법에 의존해 왔다. 이때 공칭 개루프 전달 함수가 각각의 주파수에서 그에 상응하는 QFT경계 상에 놓여 있으면 최적의 QFT설계가 달성된다[14].

QFT 설계 절차는 다음과 같이 요약 될 수 있다.

**STEP 1. 플랜트의 템플레이트 발생.** - 주어진 불확실성을 포함한 플랜트  $P(s) \in \mathbb{P}$ 에 대하여, 플랜트의 특성과 사양에 따라서 일련의 주파수  $\omega_i (i=1, \dots, k)$ 을 선택하고 복소 평면상에 모든 주파수  $\omega_i$ 에 대하여 플랜트 집합  $P(j\omega_i)$ 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 경계 중에 가장 나쁜 경계를 QFT경계로 선정한다. 이렇게 되면 모든  $P(s) \in \mathbb{P}$ 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.

## 4. GA를 이용한 QFT설계

### 4.1 유전 알고리즘[21, 22]

유전알고리즘은 자연선택과 진화적인 유전학의 메커니즘을 토대로 한 확률적인 최적화 알고리즘으로서 1962년 Holland에 의해 처음으로 도입되었고, 이후 Goldberg[21] 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 해 집단을 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 알고리즘은 최적화 하고자 하는 파라미터들을 2진 문자열로 표현하여 사용하였으나 높은 정밀도가 요구되어 지는 경우 문자열의 길이는 매우 길어지고 이와 같은 문제점 때문에 많은 연산시간과 기억용량이 필요하며 이는

수렴속도를 저하시키는 하나의 원인이 된다. 따라서 본 논문에서와 같이 QFT의 루프정형 문제의 경우 파라미터의 공간이 매우 크게되어 2진 문자열로 표현하는데는 한계가 있다. 따라서 본 연구에서는 파라미터를 유한 길이로 코딩하는 절차가 필요 없이 변수 그 자체로 최적화하는 실 변수 유전 알고리즘을 이용하였다. 실 변수로 코딩되어진 염색체의 구성은 각 개체의 문자열을 변수의 상·하한치 내에서 랜덤하게 발생시켜 탐색할 각각의 변수를 실제 값으로 구성한다. 이 실 변수 유전 알고리즘은 변수의 코딩 절차 없이 실 변수로 최적화함으로써 코딩 시간을 감소하고 정확성을 유지 할 수 있다.

### 4.2 문제의 정식화

본 논문에서 고찰되는 설계 자동화 문제는 3장에서 논의된 QFT설계 절차 중의 STEP 3에 나타난 QFT의 루프 정형과정이다. 일반적으로 이 과정은 현재까지 수동적으로 설계가 수행되어 왔는데 본 논문에서는 GA를 이용한 루프 정형을 통하여 주어진 QFT경계와 공칭플랜트에 대하여 모든 QFT경계와 페루프 공칭 시스템의 안정도가 만족되며 주어진 성능 지수가 최소화되는 제어기를 자동으로 설계하는 것이다. 이러한 접근은 개루프 전달 함수가 각각의 주파수에서 그에 상응하는 QFT 경계상에 놓여있을 때 최적의 QFT설계가 달성된다.

#### 4.2.1. 제어기의 차수

일반적으로 제어기의 차수는 될 수 있으면 적을수록 좋은데 제어기 차수가 적을수록 고차의 제어기보다는 계산부담이 적고 구현하기가 쉽기 때문이다. 모든 설계 사양을 만족하면서 가능하면 낮은 제어기를 설계하기 위해 제어기 차수 또한 설계 사양에 포함이 된다. 본 연구에서는 직접적으로 제어기 설계가 이루어지므로 최적화 문제가 매우 단순해 질 수 있는데, 설계를 위해서는 먼저 식 (10)과 같은 구조를 가지는 제어기의 차수를 미리 지정할 수 있다. 따라서 제어기의 차수는 매우 낮아 질 수 있다. 일반적으로  $a_m$ 은 1로 고정한다. 설계되는 제어기는 최소 위상이며 안정해야 하므로 본 논문에서 전달함수  $G(s)$ 의 모든 계수는 양수가 되도록 제한하고 있다. 이것은 다항식이 음의 실수근을 가지기 위한 필요 조건이 된다.

$$G(s) = \frac{b_r s^r + \dots + b_1 s + b_0}{a_m s^m + \dots + a_1 s + a_0} \quad (10)$$

#### 4.2.2. 공칭 플랜트의 안정도

페루프 시스템의 안정도를 보장하기 위해서 안정도 비용함수도 시스템의 사양에 포함이 되는데 이것은 특성 방정식의 근을 구함으로써 평가 할 수 있다. 그 비용함수는 식 (11)과 같으며 안정도 지수라고 정의한다.

$$J_{sta} = \begin{cases} 0 & \text{if stable} \\ 1 & \text{if unstable} \end{cases} \quad (11)$$

#### 4.2.3. QFT경계 조건

일반적으로 QFT경계는 매우 복잡하고, Non-convex형태

이다. 몇몇 특수한 템플레이트를 제외하고 QFT경계의 해석적인 표현은 매우 힘들다. 본 논문에서의 접근은 QFT 경계는 니콜스 차트상에서의 수동적인 계산이 아니라 이차 부등식 형태의 수치적인 알고리즘을 이용하여 경계가 계산된다. 루프 정형을 위해서 본 논문에서 도입된 GA의 특징은 이 수치적인 경계를 직접적으로 사용할 수 있다는 것이다. 각각의 주파수에서 개루프 전달함수  $L(j\omega_i)$ 의 이득과 위상이 계산되고 그 다음 이 주파수에서 QFT경계가 만족되는지 체크하기 위해서 경계지수는 식 (12)와 같이 정의된다.

$$J_{bi} = \begin{cases} 0 & \text{if the QFT bound at } \omega_i \text{ is satisfied} \\ 1 & \text{otherwise} \end{cases} \quad i=1,2,\dots,h \quad (12)$$

#### 4.2.4. 고 주파수 이득(High Frequency Gain)

고 주파수 센서 잡음과 모델링 되지 않은 고 주파수 동특성 또는 고조파를 피하기 위해 고 주파수에서 루프 전달함수  $L(S) = K(s)P(s)$ 의 이득을 감소시키기 위하여 고 주파수 이득 지수가 포함되어 진다. 고 주파수 이득이 크게되면 액츄에이트(actuator)의 포화현상이 발생하며 불안정하기 쉽다. 최소화되어 지는 비용함수는 개루프 전달함수  $L(s)$ 의 고 주파수 계인이 되며 식 (13)과 같이 정의된다.

$$\lim_{s \rightarrow \infty} s^q L(s) \quad (13)$$

여기서 q는 전달함수  $L(s)$ 의 상대 차수이다. 이것을 QFT에서 피드백 비용(feedback cost)이라고도 한다. 공칭 플랜트가 고정되어 있기 때문에 이것은 식 (14)와 같이 주어지는 제어기의 고 주파수 이득과 등가이다.

$$J_{hg} = b_r/a_m \quad (14)$$

#### 4.3. GA-QFT를 이용한 PSS설계

본 장에서는 전력계통의 안정도 향상을 위한 PSS의 설계를 위하여 GA-QFT를 이용한 방법을 제시한다. 본 논문에서의 설계 목적은 플랜트에 존재하는 불확실성과 외란에도 불구하고 모든 페루프 사양이 만족되며 피드백 비용이 가능한 한 적은 강인한 제어기를 설계하는 것이다. 본 연구에서는 필터의 설계는 고려하지 않았다. 먼저 QFT를 적용하기 위해 전력시스템에 대한 전달함수는 그림 2를 기초로 하여 식 (15)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 시스템의 입력은 기준전압  $\Delta V_{ref}$ 이고, 피드백 되어져 제어기로 들어가는 출력은 회전자 각속도  $\Delta\omega$ 이다.

$$P(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta V_{ref}} = \frac{n_1 s}{(s+d_2)(s+d_3)(s^2+d_1s+d_4)} \quad (15)$$

여기서, 파라미터  $n_1, d_1, d_2, d_3, d_4$ 값은 전력 시스템의 동작 조건에 따라 변하는 값이다.

전력계통은 발전과 부하 패턴의 변화 뿐 아니라 전송망의 변동 때문에 동작조건이 지속적으로 변하고 있기 때문에 전

력 시스템에는 그에 상응하는 미소 신호 동특성에 큰 변동이 존재하게 된다. 이것은 미소 신호 선형화 된 전력 시스템 모델에서 파라미터 불확실성으로 표현 될 수 있다. 본 연구에서 사용되어진 전력 시스템의 파라미터의 불확실성의 범위는 유효전력  $P_e$ , 무효전력  $Q_e$ , 선로 임피던스  $X_e$ 를 식 (16)과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} 0.4 \leq P_e \leq 1.2 \\ -0.2 \leq Q_e \leq 0.2 \\ 0.6 \leq X_e \leq 1.1 \end{aligned} \quad (16)$$

위와 같이 불확실성을 나타내는 파라미터들의 범위를 이용하여 일련의 주파수  $\omega_i$ 에 대한 플랜트 템플레이트를 구하고, 안정한 공칭플랜트를 임의로 선정한다. 일단 공칭플랜트를 선정하고 나면 QFT제어기 설계를 위하여 강인 성능 사양과 외란 억제 성능 사양에 대한 QFT경계를 계산해야 한다. 본 연구에서 사용된 강인 안정 사양과 외란 억제 성능 사양은 식 (17), (18)과 같이 두었다.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 1.3 \quad (17)$$

$$\left| \frac{P(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 0.025 \quad (18)$$

먼저 식 (17), (18)과 같은 사양을 이용하여 이차 부등식을 이용한 수치적인 알고리즘을 이용하여 QFT경계를 계산한다. 그리고 나서 제어기의 차수를 결정해야 하는데 본 논문에서는 제어기의 차수를 3차로 지정하여 구조는 식 (19)와 같이 두었다.

$$K(s) = \frac{b_3 s^3 + b_2 s^2 + b_1 s}{a_3 s^3 + a_2 s^2 + a_1 s + a_0} \quad (19)$$

식 (19)에서 최적화 하고자 하는 파라미터는  $a_3, a_2, a_1, a_0, b_3, b_2, b_1$ 이지만 여기서는  $a_3=1$ 로 두었기 때문에 최적화 하고자 하는 파라미터는 6개가 된다. GA를 이용하기 위해서 모든 설계 파라미터들은 염색체 형태로써 실수 문자열로써 코딩되어 진다. 이 설계 파라미터의 범위 선택은 GA를 이용한 루프 정형최적화 문제에 있어 중요한 문제이다. 이것은 탐색공간의 크기를 결정해 준다. 그리고 설계하고자 하는 제어기는 안정하고 최소 위상의 제어기를 필요로 하기 때문에 모든 파라미터들은 모두 양수가 되도록 하였다. 제어기 계수에 대한 선행적인 정보가 없기 때문에 모든 파라미터의 공간은 매우 큰 범위가 선택되었다. 즉 각각의 파라미터들은  $p_i \in [0.001, 10^5]$ 의 범위를 선택하였다. 이러한 파라미터공간은 GA에서의 염색체 형태로 코딩하기에 너무 큰 범위가 된다. 따라서 이러한 파라미터들을 로그 공간으로 변환시키게 되면 새로운 파라미터 공간은  $\bar{p}_i \in [-3, 5]$ 가 된다. 이렇게 함으로서 GA의 성능에 영향을 미치게 되는데 수렴속

도와 정밀도면에서 우수한 성능을 나타낼 수 있다. QFT 제어기의 파라미터를 최적화하는데 필요한 해집단의 구조는 그림4와 같이 제어기의 분자항과 분모항을 하나의 문자열로 구성하였다.

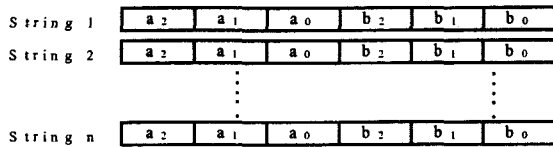


그림 4 해 집단의 구조  
Fig. 4 Structure of population

GA를 이용한 QFT 설계를 위해서는 식 (20)과 같이 주어지는 목적함수를 최소화하는 문제가 되며, 4.2절에서 식 (11)와 같은 안정도 지수, 식 (12)과 같은 경제지수, 식 (14)와 같은 고주파수 이득 지수를 반영해야 한다.

$$Min(J = J_{hg} + \sum_{i=1}^h \gamma_i J_{bi} + \gamma_0 J_{sta}) \quad (20)$$

여기서,  $\gamma_0, \gamma_i (i=0,1,\dots,h)$ 는 가중치 요소이다.

그리고 해집단의 각 문자열을 평가하기 위해 사용된 적합도 함수는 식 (21)과 같이 선정하였다.

$$Fitness = \frac{1}{J_{hg} + \sum_{i=1}^h \gamma_i J_{bi} + \gamma_0 J_{sta}} \quad (21)$$

전력계통에 적용된 GA-QFT 제어기의 최적설계과정은 그림 5와 같이 요약할 수 있다.

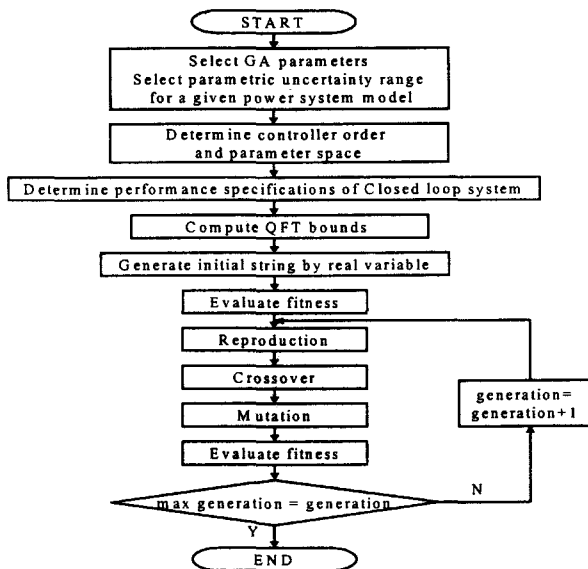


그림 5 GA-QFT 제어기의 최적 설계를 위한 흐름도  
Fig. 5 Flow chart for optimal design of GA-QFT controller

### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 QFT를 이용하여 전력 시스템의 불확실성과 다양한 외란에도 불구하고 저주파 진동을 효율적으로 억제할 수 있는 강인한 PSS를 설계하기 위하여 GA를 이용하는 방법을 제시하였다. 제안한 GA-QFT제어기의 외란 억제 성능과 강인성을 검증하기 위하여 1기 무한대 모선계통에 대해 다양한 부하변동이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 통하여 기존의 제어방식(Conventional PSS : CPSS) [1]과 동특성을 비교 고찰하였다.

본 논문에서 사용한 1기 무한대 모선계통의 경우 동기기, 여자기 및 선로 정수와 시스템의 초기 상태는 표 1과 같으며, QFT제어기의 최적 설계를 위해 사용되어진 유전 알고리즘의 파라미터는 표 2와 같다. 여기서 사용된 GA는 이진수 문자열로 코딩하지 않고 실변수형 코딩방식을 이용하였으며, 토너먼트 선택 (Tournament Selection) 방법과 다음 세대에 우수한 개체를 보존하는 엘리티스트 선택(Elitist Selection)을 이용하였다.

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	$P_{e0} = 1.00, Q_{e0} = 0.015$ $V_{t0} = 1.05$

표 2 유전 알고리즘 파라미터

Table 2 Genetic algorithm parameters

Generations number	Population size	Crossover rate	Mutation rate
200	200	0.85	0.01

그림 6은 제안한 방법에 의한 최적화시 각 세대에 따른 적합도의 수렴과정을 나타내었다. 제안한 방법을 이용하여 설계되어진 제어기는 식 (22)와 같다.

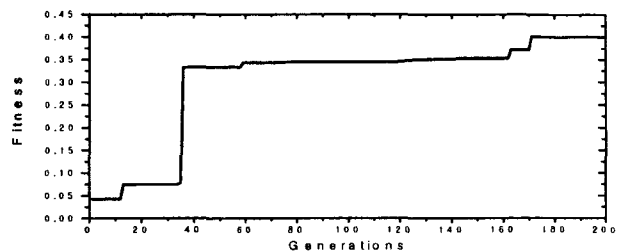


그림 6 각 세대에 따른 적합도  
Fig. 6 Fitness of each generation

$$K(s) = \frac{317.1s^3 + 1540s^2 + 537s}{s^3 + 36.57s^2 + 13.94s + 0.04785} \quad (22)$$

그리고 식 (17), (18)과 같이 주어진 강인 안정 사양과 외란 억제 성능 사양을 이용하여 구한 QFT경계와, 설계되어진 제어기를 이용하여 결정된 루프 정형결과  $L_0(s) = P_0(s)$   $K(s)$ 는 니콜스 선도 상에서 그림 7과 같이 나타났다.

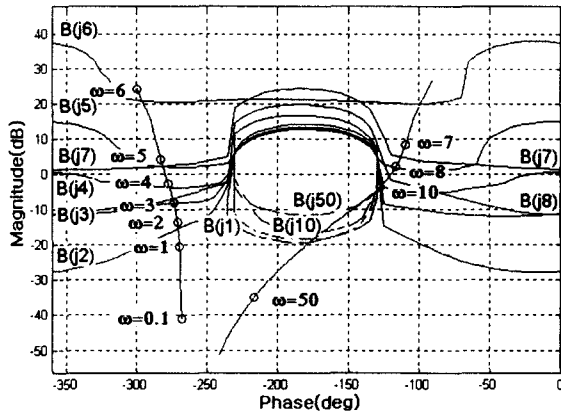


그림 7 QFT 경계와 루프 정형 결과  
Fig. 7 QFT bounds and loop shaping result

여기서  $B(j \cdot)$ 는 각각의 주파수에 대한 QFT경계를 나타낸다. 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.

### 5.1 정상 부하시 ( $P_{e0} = 1.0$ [p.u.] $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.]

제안한 GA-QFT제어기의 강인성을 평가하기 위해서 정상 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 그림 8은 발전기의 초기 위상각을 0.1[rad] 만큼 변동 시켰을 경우 CPSS의 경우와 제안한 GA-QFT 제어기를 이용한 경우에 대하여 발전기 각속도 및 위상각의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 GA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 발전기의 각속도 및 위상각의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈터 면에서도 기존의 PSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

그림 9는 정상 부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경없이 제거되는 경우에 대해 발전기 각속도, 위상각, 단자 전압의 동특성 응답과 제어입력을 나타내었다. 이때 PSS의 입력 신호는  $-0.1$ [p.u.]  $\leq u \leq 0.1$ [p.u.]로 제한하였다. 제안한 GA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 정정 시간

또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

### 5.2 중 부하시 ( $P_{e0} = 1.2$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.2$ [p.u.]

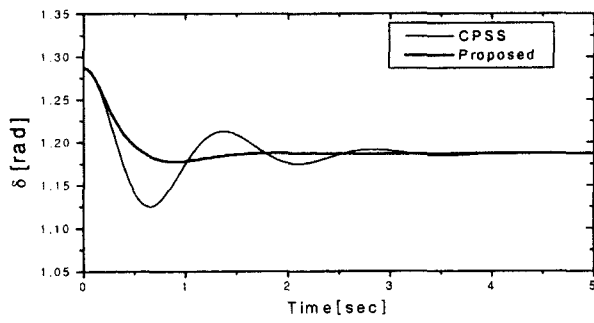
제안한 GA-QFT제어기의 강인성을 평가하기 위해서 중 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 그림 10은 발전기의 초기 위상각을 0.1[rad] 만큼 변동 시켰을 경우 CPSS의 경우와 제안한 GA-QFT 제어기를 이용한 경우에 대하여 발전기 각속도 및 위상각의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 GA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 발전기의 각속도 및 위상각의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈터 면에서도 기존의 PSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

그림 11은 중 부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경없이 제거되는 경우에 대해 발전기 각속도, 위상각, 단자 전압의 동특성 응답과 제어입력을 나타내었다. 이때 PSS의 입력 신호는  $-0.1$ [p.u.]  $\leq u \leq 0.1$ [p.u.]로 제한하였다. 제안한 GA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

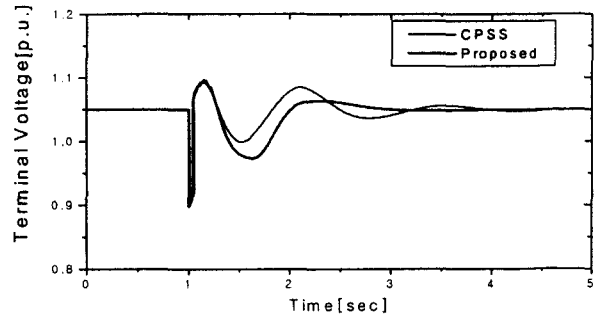
### 5.3 경 부하시 ( $P_{e0} = 0.7$ [p.u.], $Q_{e0} = 0.015$ [p.u.]

제안한 GA-QFT제어기의 강인성을 평가하기 위해서 경 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 그림 12는 발전기의 초기 위상각을 0.1[rad] 만큼 변동 시켰을 경우 CPSS의 경우와 제안한 GA-QFT 제어기를 이용한 경우에 대하여 발전기 각속도 및 위상각의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 GA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 발전기의 각속도 및 위상각의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈터 면에서도 기존의 PSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

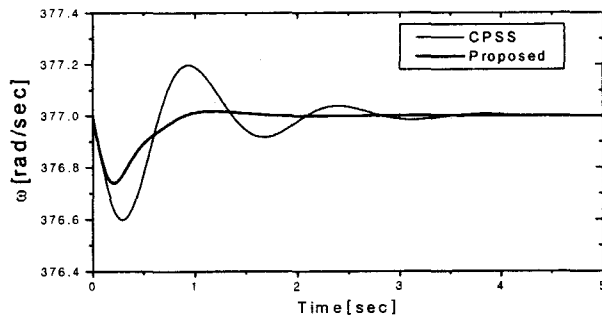
그림 13은 경 부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경없이 제거되는 경우에 대해 발전기 각속도, 위상각, 단자 전압의 동특성 응답과 제어입력을 나타내었다. 이때 PSS의 입력 신호는  $-0.1$ [p.u.]  $\leq u \leq 0.1$ [p.u.]로 제한하였다. 제안한 GA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.



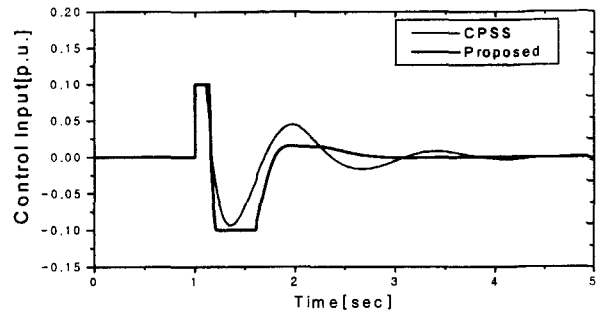
(a) Rotor angle



(c) Terminal voltage



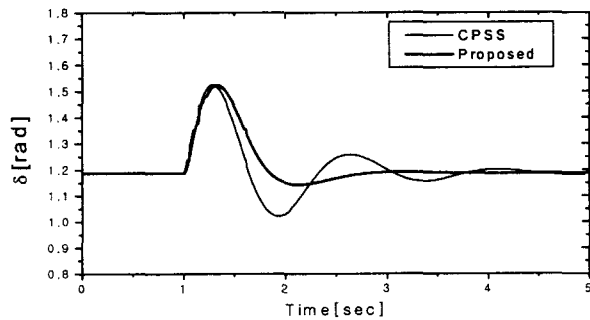
(b) Angular velocity



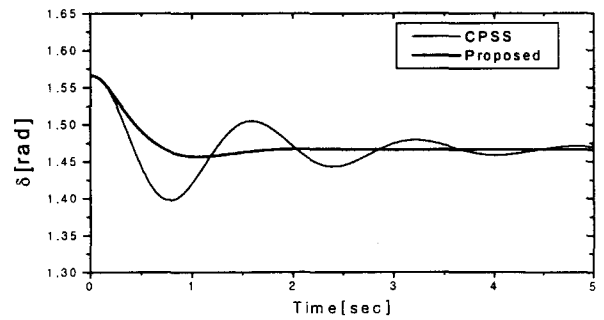
(d) Control input

그림 8 정상 부하시 위상각을 증가한 경우의 응답  
Fig. 8 Responses to increasing rotor angle in normal load

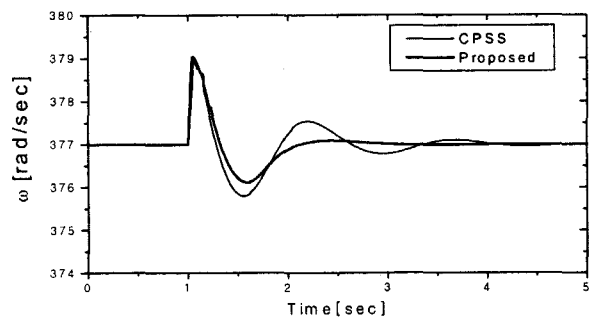
그림 9 정상 부하시 3상 단락 발생시 동특성 응답  
Fig. 9 Responses to three-phase fault in normal load



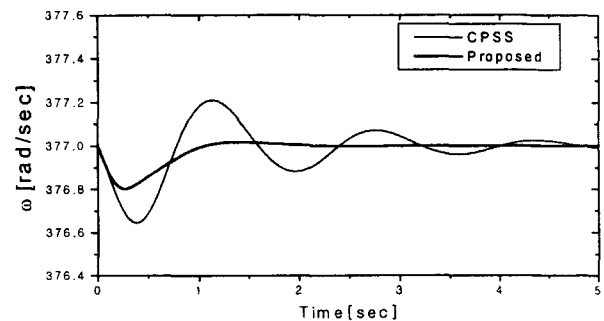
(a) Rotor angle



(a) Rotor angle



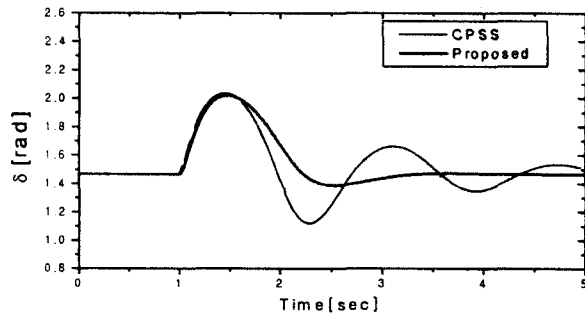
(b) Angular velocity



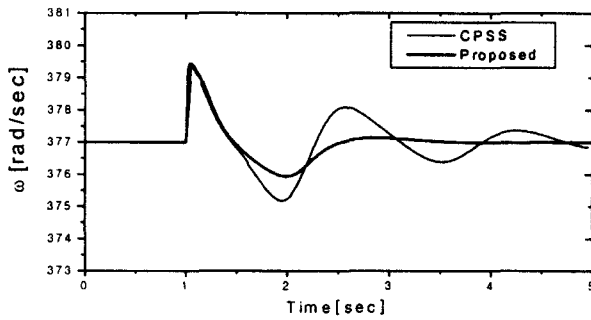
(b) Angular velocity

그림 10 중 부하시 위상각을 증가한 경우의 응답  
Fig. 10 Responses to increasing rotor angle in heavy load

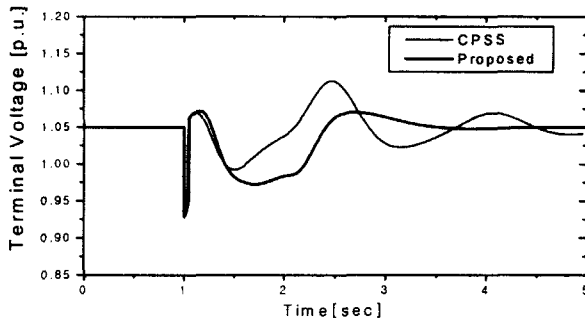




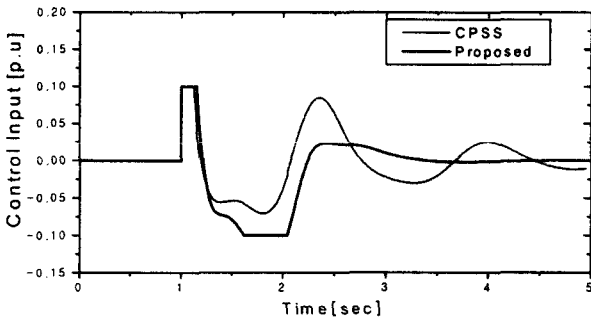
(a) Rotor angle



(b) Angular velocity

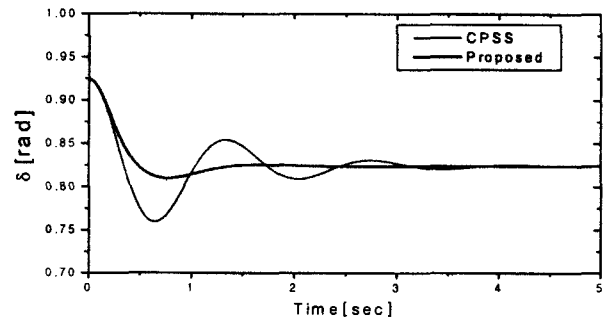


(c) Terminal voltage

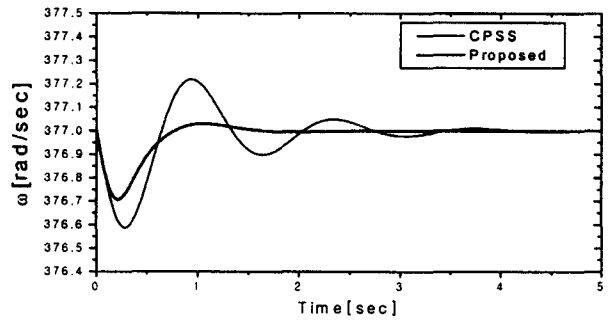


(d) Control input

그림 11 중 부하시 3상 단락 발생시 동특성 응답  
Fig. 11 Responses to three-phase fault in heavy load

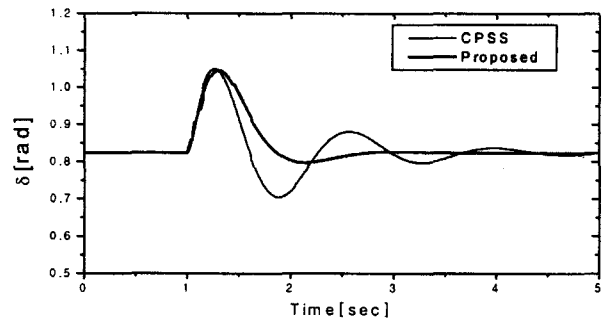


(a) Rotor angle

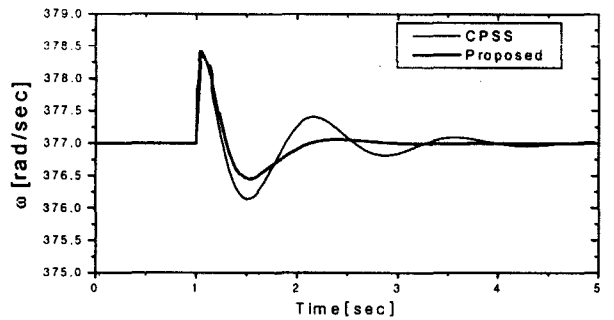


(b) Angular velocity

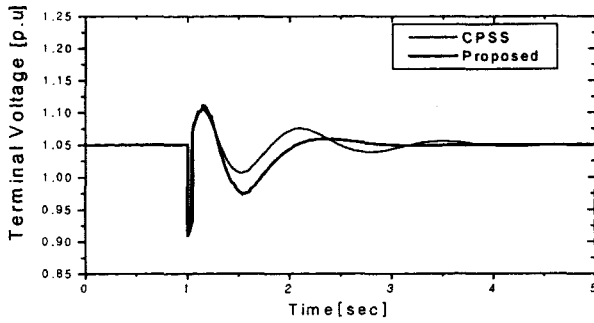
그림 12 경 부하시 위상각을 증가한 경우의 응답  
Fig. 12 Responses to increasing rotor angle in light load



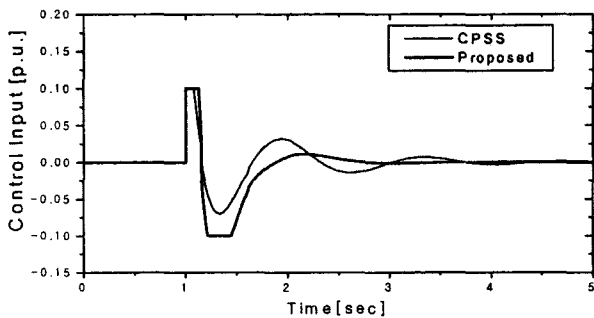
(a) Rotor angle



(b) Angular velocity



(c) Terminal voltage



(d) Control input

그림 13 경 부하시 3상 단락 발생시 동특성 응답  
Fig. 13 Responses to three-phase fault in light load

6. 결 론

본 논문에서는 GA-QFT를 이용하여 전력 시스템의 불확실성과 다양한 외란에도 불구하고 저주파 진동을 효율적으로 억제할 수 있는 강인한 PSS를 설계하는 방법을 제시하였다. QFT 경계계산은 니콜스 차트상에서 플랜트 템플레이트를 수동 조작함으로써 계산하지 않고 최근 개발된 수치적인 알고리즘을 도입하여 QFT 경계를 계산하였다. 그리고 QFT제어기 설계 절차인 루프 정형과정에 GA를 도입함으로써 기존 QFT 설계 방법에서 사용된 수많은 시행착오적인 절차 없이 모든 설계사양을 만족하는 제어기를 쉽게 설계하였을 뿐만 아니라 제어기의 성능을 향상시킬 수 있었다. 제한한 설계방법의 또 다른 장점으로는 제어기의 구조와 제어기의 차수를 설계자의 임의로 설정할 수 있다는 점을 들 수 있다. 다양한 부하 변동시 비선형 전력시스템 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 GA-QFT제어기의 강인성을 확인하였다. 따라서 제안한 GA-QFT제어기를 이용한 PSS설계 방법은 기존의 설계 방법보다 광범위한 동작 조건하에서 저주파 진동을 억제하는 데 매우 우수한 제어성과 강인성을 보였으며 전력계통의 안정도에 크게 기여함을 알 수 있었다.

감사의 글

이 논문은 2000학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모 과제)에 의하여 연구되었음

부 록

표기법

- $\delta$  : 발전기의 회전자 각 [rad]
- $\omega$  : 발전기의 각속도[rad/sec]
- $\omega_{ref}$  : 발전기의 기준 각속도[rad/sec]
- $D$  : 발전기의 제동 계수 [p.u]
- $M$  : 발전기의 관성 계수 [sec]
- $E_{fd}$  : 발전기의 계자 전압 [p.u]
- $E'_q$  : 발전기의 q축 과도 유효 기전력 [p.u.]
- $i_d$  : 발전기의 d축 전류 [p.u.]
- $i_q$  : 발전기의 q축 전류 [p.u.]
- $K_A$  : 여자시스템의 이득
- $T_A$  : 여자 시스템의 시정수[sec]
- $P_m$  : 발전기의 기계적 입력 전력 [p.u.]
- $P_e$  : 발전기의 전기적 출력 전력 [p.u.]
- $T_{d0}'$  : 발전기 d축 과도 시정수[sec]
- $u$  : 제어 입력[p.u.]
- $v$  : 발전기의 단자 전압 [p.u.]
- $v_d$  : 발전기 단자 전압의 d축 성분 [p.u.]
- $v_q$  : 발전기 단자 전압의 q축 성분 [p.u.]
- $V_{ref}$  : 발전기 단자 전압의 기준치 [p.u.]
- $x_d$  : 발전기의 d축 동기 리액턴스[p.u.]
- $x_d'$  : 발전기의 d축 과도 리액턴스[p.u.]
- $x_q$  : 발전기의 q축 동기 리액턴스[p.u.]
- $Y_L$  : 부하 어드미턴스 [p.u.]
- $Z$  : 전송 선로 임피던스 [p.u.]
- $K_1 \sim K_6$ : 전력계통의 선형화 계수
- $\Delta$  : 미소 변동분

참 고 문 헌

- [1] Y. N. Yu, "Electric power system dynamic", Academic Press, 1983
- [2] 정형환, 이준탁, 이정필, 한길만, "유전알고리즘을 이용한 전력계통 안정화 장치의 강인한 최적 H $\infty$  튜닝", 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, No. 3 pp.85-94, 2000
- [3] 정형환, 이정필, 정문규, 이광우, "면역알고리즘을 이용한 전력계통 안정화 장치의 최적 파라미터 선정", 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, No. 9, pp. 433-446, 2000
- [4] O. W. Hanson, C. J. Goodwin, P. L. Dandeno, "Influence of excitation and speed control parameters in stabilizing intersystem oscillations", IEEE Trans. on PAS. Vol. 87, No. 5, pp. 1306-1311, 1968
- [5] F. P. Demello, C. Concordia, "Concepts of synchronous machine stability as affected by excitation control",

IEEE Trans. on PAS, Vol. 88, No. 4, pp. 189-202, 1969

[6] K. Bollinger et al, "Power system stabilizer design using root-locus method", IEEE Trans. on PAS, Vol. 94, No. 5, pp. 1484-1488, 1975

[7] R. J. Fleming, M. A. Nohan and K. Pavatisam, "Selection of parameters of stabilizers in multimachine power system" IEEE Trans. on PAS, Vol. 100, No. 5, pp. 2329-2333, 1981

[8] O. H. Abdalla et al, "Coordinated stabilization of multimachine power systems", IEEE Trans.on PAS, Vol. 103, No. 3, pp. 483-491, 1984

[9] P. Kundur, M. Klein, G. J. Rogers and M. S. zywno, "Application of power system stabilizers for enhancement of overall system stability", IEEE Trans. on Power system, Vol. 4 No. 2, 1989

[10] 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

[11] 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

[12] 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

[13] 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, pp.475-481. 1994.

[14] 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.

[15] I. M. Horowitz, "Quantitative Feedback Theory", IEE Proc., Vol. 129, No. 6, pp. 215~226, 1982

[16] I. M. Horowitz, "Survey of Quantitative Feedback Theory(QFT)", Int. J. Cont., Vol. 53, No. 2, pp. 255~291, 1991.

[17] 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

[18] C. H. Houppis, S. J. Rasmussen, "Quantitative feedback theory", Marcel dekker, Inc. 1999

[19] O. Yaniv, "Quantitative feedback design of linear and nonlinear control systems", Kluwer Academic Publishers, 1999

[20] 이정필, 정현화, 김창현, 정형환, "QFT를 이용한 전력계통 안정화 장치 설계", 대한전기학회 추계부문 학술대회 논문집, pp.187-189, 2000.

[21] D. E. Goldberg, " Genetic Algorithms in search optimization & machine learning", Addison-Wesley publishing Co. Inc., 1989

[22] Z. Michalewicz, "Genetic algorithm + data structures = evolution program", second edition, Springer-Verlag, 1992

저 자 소 개



**정형환 (鄭亨煥)**  
 1941년 1월 19일 생. 1964년 연대 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



**허동열 (許東烈)**  
 1969년 11월 10일 생. 1995년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정  
 Tel : 051-200-6747  
 E-mail : a967650@mail.donga.ac.kr



**김창현 (金昌賢)**  
 1973년 11월 8일 생. 2000년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정 재학중  
 Tel : 051-200-6747  
 E-mail : dreamchkim@orgio.net