

전력계통의 저주파 진동 억제를 위한 강인한 QFT 제어기 설계

정형환* · 이정필* · 김상효* · 정문규* · 안병철**

Design of Robust QFT Controller to Damp Low Frequency Oscillations of Power System

H-H Chung* · J-P Lee* · S-H Kim* · M-K Chung* · B-C An**

Key words : Quantitative feedback theory(QFT), Nichols chart (니콜스 차트), Power system stabilizer(PSS : 전력계통 안정화 장치), Loop shaping (루프 정형), Robustness(강인성)

Abstract

Quantitative Feedback Theory (QFT) has been used to design a robust power system stabilizer(PSS) to improve transient and dynamic stabilities of a power system. This design technique is basically accomplished in frequency domain. The most important feature of QFT is that it is able to deal with the design problem of complicated uncertain plants. A basic idea in QFT design is the translation of closed-loop frequency-domain specifications into Nichols chart domains specifying the allowable range of the nominal open-loop response and then to design a controller by using the gain-phase loop shaping technique. This paper introduces a new algorithm to compute QFT bounds more efficiently.

The proposed QFT design method ensures a satisfactory performance of the PSS under a wide range of power system operating conditions.

1. 서 론

최근 전력 수요의 급증으로 전력계통의 규모가 대형화 복잡화되고 있는 가운데 발전소 용지 선정의 어려움으로 인하여 송전선로가 장거리화 되는 등 전력계통의 안정도를 악화시키는 요인이 매년

증가되고 있는 실정이다. 전력시스템의 운용 도중에 발생하는 안정도 문제중에 시스템의 동작점 주변에서 발생하는 미소신호 안정도(Small-signal stability)는 대단히 중요한 문제로 인식되고 있다. 전력계통에 전기 기계적인 모드와 연결된 저주파 진동은 종종 긴 시간 주기 동안 지속되며, 어떤 경

* 동아대학교 전기 전자 컴퓨터공학부(원고접수일 : 2001년 2월)
** 부산 울산 지방 중소기업청

우에는 전력전송 용량을 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 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다¹¹⁻¹³⁾. 그 가운데 특히 종래의 lead/lag형태의 PSS는 제어기의 구조가 간단하고 유용성이 있으며 그 구현이 쉽기 때문에 현대 전력계통에 가장 보편적으로 사용되고 있다.

1969년 deMello와 Concordia¹⁴⁾에 의해서 저주파 진동에 PSS의 효과에 대한 연구를 기점으로 해서, PSS를 설계하기 위해 고유치 기법¹⁵⁾, 극배치 기법¹⁶⁾, 최적 제어기법¹⁷⁾ 등이 제안되었다. 이와 같이 PSS 설계를 위한 기존의 선형 제어 설계 방법은 선형 시불변 시스템으로 형식화된 모델을 필요로 한다. 그러나 이러한 기법들은 제어기 설계 단계에서 모델의 불확실성을 고려하지 않고, 동작점 부근의 선형화된 모델을 이용하여 제어기를 설계하였기 때문에 불확실성이 많이 존재하는 전력계통에서는 정확한 제어 목적을 달성할 수 없다. 즉 강인성의 결핍을 들 수 있다.

전력계통의 가장 중요한 특징중의 하나는 발전 조건, 전송조건, 또는 부하조건에 따라 동작조건이 지속적으로 변하고 있다. 이러한 동작 환경의 변화는 전력시스템에 대한 수학적인 표현과 실제 전력계통의 물리적인 구조간에 차이를 발생시킨다. 이것은 미소 신호 선형화된 전력시스템 모델에서 파라미터 불확실성으로 표현될 수 있다. 이러한 계통의 변동에 대응하고자 하는 노력의 일환으로 W. Gu¹⁸⁾등은 자기 동조 제어기법을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였고, 최근에는 퍼지논리¹⁹⁾, 적응제어¹⁰⁾ 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 파

라미터를 가지는 전력 계통 안정화 장치의 설계를 위하여 최근에는 제어기 설계 단계에서 모델의 불확실성을 취급할 수 있는 강인 제어기법 중에 최적 H_{∞} 제어 이론이 보조 여자 제어기를 설계하는데 사용되고 있다¹¹⁾. 그러나 H_{∞} 이론과 같은 현대 강인제어 이론은 수학적인 치밀성을 갖는 대신 Norm)의 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)¹¹²⁻¹⁵¹⁾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. QFT 설계의 가장 기본적인 개념은 폐루프 시스템의 설계사양과 플랜트 불확실성을 공칭 시스템의 개루프 전달함수의 강인 안정도 경계와 성능 경계로 변환하는 것이다. 그리고 이러한 경계를 만족하도록 이득-위상(Gain-phase)루프정형(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.

QFT는 최근 미국과 이스라엘을 중심으로 활발한 연구가 이루어지고 있는 강인 제어 기법중의 하나이며, 비행 제어, 미사일 제어, 콤팩트 디스크 메커니즘 등 다양한 공학적 적용이 시도되어 왔다. 그러나 국내에서 이에 관한 연구는 매우 미진한 실정에 있고, 특히 불확실성이 많이 존재하는 전력시스템에 대한 QFT제어기 설계 방법 및 해석에 관한 연구가 절실히 요구되는 실정에 와있다.

본 논문에서는 전력계통에서 주어지는 불확실한 외란과 파라미터 불확실성 대하여 주어진 성능 사양을 만족하며 최소 대역폭을 가지는 저차의 강

인한 QFT제어기를 설계하는 방법을 정식화하였다. 그리고 제어기의 설계과정에서 페루프 사양이 주어지면 이 사양을 니콜스 선도 상에 QFT경계로 변환해야 하는데, 지금껏 QFT 경계는 대부분 니콜스 차트상에서 플랜트 템플레이트(Templates)를 수동으로 그려감으로써 계산해 왔다. 그러나 이러한 방법은 매우 번거롭고 까다로운 작업이다. 따라서 본 논문에서는 최근 개발된 이차 부등식으로 주어지는 수치적인 알고리즘을 도입하여 정식화하였으며 이를 이용하여 QFT 경계를 계산하였으며, 루프 정형 알고리즘을 이용하여 강인한 QFT 제어기를 설계하였다.

제한한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 1기 무한대 모선에 적용한 결과를 비 선형 시뮬레이션을 통하여 다양한 외란이 발생하였을 경우에 외란 억제 성능과 강인성에 대하여 고찰하였으며, 제한한 PSS의 설계가 기존의 설계방식¹⁷⁾보다 효율적이며 전력계통 안정도 향상에 크게 기여함을 보이고자 한다.

2. 전력시스템의 수학적 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 1기 무한대 모선의 전력 시스템의 모델은 Fig. 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.

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

$$\frac{d}{dt}\delta = \omega_0(\omega - 1) \quad (2)$$

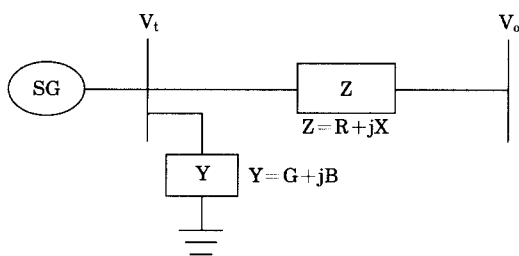


Fig. 1 one machine infinite bus power system

여기서, ω 는 각속도, ω_0 는 기준 각속도, δ 는 회전자 각, 발전기의 기계적 입력전력 P_m 은 일정하다고 가정하고, 전기적 출력전력 P_e 는 식 (3)과 같이 표현된다.

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

여기서, i_d, i_q 는 각각 발전기의 d축 전류, q축 전류이며, v_d, v_q 는 각각 발전기의 d축 전압, q축 전압이다.

그리고 발전기 내부 전압 e'_q 에 대한 방정식은 식 (4)와 같다.

$$\frac{d}{dt}e'_q = (E_{fd} - (x_d - x'_d)i_d - E'_q)/T_{do'} \quad (4)$$

여기서, E_{fd} 는 발전기의 제자전압, $T_{do'}$ 는 발전기 d축 과도 시정수, x_d 는 발전기 d축 동기리액턴스, x_q 는 발전기 q축 과도 리액턴스를 나타낸다.

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

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

여기서, V_{ref} 는 발전기단자의 기준전압, v_t 는 발전기 단자전압, T_A 는 여자 시스템의 시정수, K_A 는 여자 시스템의 이득, u 는 제어입력이며, $v_t = (v_d^2 + v_q^2)^{1/2}$, $v_d = x_q i_q$, $v_q = e'_q - x'_d i_d$ 로 나타낼 수 있다.

식 (1)~(5)를 기초로 하여 동작점 부근에서 선형화 하는 방법은 문헌 [4][7]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,

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

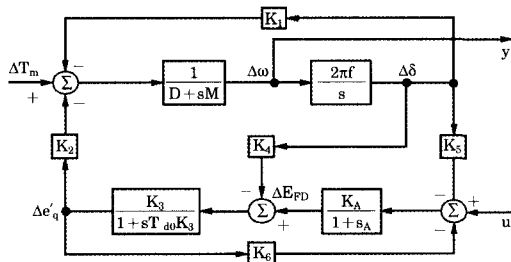


Fig. 2 Linearized power system model

$$B = \left[0 \ 0 \ 0 \ \frac{K_A}{T_A} \right]^T$$

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

$$X(t) = [\Delta\omega, \Delta\delta, \Delta e'_q, \Delta E_{FD}]^T$$

이다.

Fig. 2는 동기 및 여자기 모델을 종합한 블록 선도를 나타내고 있다. 이 모델은 기계적 토크 입력 T_m 을 고정시킨 후 평형 상태에서 선형화 한 것이다. 일반적으로 전력 시스템의 안정도 해석에 사용되며, 특히 저주파수 진동을 해석하기 위한 모델이다.

Fig. 2에서 $K_1 \sim K_6$ 는 전력계통의 선형화 계수, D 는 발전기 제동계수, M 은 발전기 관성계수, f 는 주파수를 나타내며 Δ 는 미소 변동분을 의미한다. 또한 y 는 시스템의 출력으로써 PSS의 입력신호가 되며 본 논문에서는 $\Delta\omega$ 를 이용하였다. u 는 제어 입력으로 PSS의 출력신호이다.

3. QFT 제어 이론

3.1 기본 이론

QFT는 고전제어 이론을 근거로 하여 Horowitz에 의해 창안되었으며, 이것은 지정된 플랜트에 존재하는 불확실성 또는 외란에 대하여 강인한 제어 성능을 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.

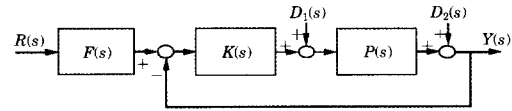


Fig. 3 Feedback control system

QFT의 기본적인 설계 방식은 폐루프 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 기법을 이용하여 제어기를 설계하는 것이다. 따라서, QFT는 Fig. 3과 같은 피드백 제어 시스템에 적용된 주파수 영역의 설계 이론이며, 주어진 제어성능을 만족하는 제어기의 전달함수 $k(s)$ 를 구하는 것이다.

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 폐루프 강인 안정도 사양과 강인 성능 사양에 의해 결정되는 폐루프 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.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq \gamma, \forall P(s) \in \mathbb{P} \quad (7)$$

$$|a(\omega)| \leq \left| \frac{F(j\omega)L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq |b(j\omega)|, \forall P(s) \in \mathbb{P} \quad (8)$$

$$\left| \frac{P(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq |d(\omega)|, \forall P(s) \in \mathbb{P} \quad (9)$$

여기서 γ , $a(\omega)$, $b(\omega)$, $d(\omega)$ 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 $L(s)=K(s)P(s)$ 로 개루프 전달함수이며, \mathbb{P} 는 불확실성 플랜트 집합을 나타낸다.

QFT를 이용해서 성능 사양에 맞는 제어기를 설계할 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 선도 상에 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 알고리즘을¹⁵⁾ 도입하여 QFT 경계를 계산하였다.

3.2 QFT경계 계산 알고리즘

제어기 $K(s)$ 를 포함한 몇 가지 성능 사양 함수를 $\mathcal{F}(s)$ 라 하고, 성능 가중치를 $W(s)$, 플랜트 전달함수 집합을 \mathbb{P} , 공칭 플랜트를 $P_0(s)$ 라고 한다. 지정된 주파수 ω 에서 공칭루프 $P_0(s)K(s)$ 에 대한 QFT 경계는 식 (10)을 만족하는 복소수 집합이 된다.

$$\begin{aligned} |\mathcal{F}(j\omega)| &\leq W(j\omega), \forall P(j\omega) \in \mathbb{P}_\omega \\ P_0(j\omega)K(j\omega) &\in P_0(j\omega)K_\omega \end{aligned} \quad (10)$$

즉, K_ω 는 대수 구속조건 $|\mathcal{F}(j\omega)| \leq W(j\omega)$ 을 만족하도록 하는 제어기의 이득과 위상의 집합이다.

QFT경계를 계산하는데 사용되는 알고리즘은 2

차 부등식(Quadratic inequality)라고 하는 알고리즘에 기초한다. QFT 경계를 계산하는데 2차 부등식을 어떻게 사용하는지 알기 위해서 $\mathcal{F}(s)$ 를 다음과 같은 페루프 감도 함수 $S(s)=(1+P(s)K(s))^{-1}$ 의 예를 들어서 설명하기로 한다.

\mathbb{P}_ω 에 대한 감도 감소 사양은 식 (11)과 같다.

$$\left| \frac{1}{1+P(j\omega)K(j\omega)} \right| \leq W(j\omega), \forall P \in \mathbb{P}_\omega \quad (11)$$

여기서 $K(s)$ 와 $P(s)$ 를 극좌표 형식으로 변환하면 식 (12)와 같다.

$$K(j\omega) = k(\omega)e^{j\theta(\omega)}, P(j\omega) = P_i(\omega)e^{j\phi_i(\omega)}, i=1, \dots, n \quad (12)$$

식 (12)를 식 (11)에 대입하면 식 (13)과 같다.

$$\left| \frac{1}{1+p_i(\omega)k(\omega)e^{j(\theta(\omega)+\phi_i(\omega))}} \right| \leq W(\omega) \quad (13)$$

이 부등식 양변을 제곱하면 식 (14)와 같다.

$$\frac{1}{p_i^2(\omega)k^2(\omega) + 2p_i(\omega)k(\omega)\cos(\phi_i(\omega)+\theta(\omega)) + 1} \leq W^2(\omega) \quad (14)$$

식 (14)를 2차 부등식형태로 정리하면 식 (15)와 같다.

$$\begin{aligned} p_i^2(\omega)k^2(\omega) + 2p_i(\omega)\cos(\phi_i(\omega)+\theta(\omega))k(\omega) + 1 \\ - \frac{1}{W^2(\omega)} \geq 0, i=1, \dots, n \end{aligned} \quad (15)$$

식 (15)에서 알려지지 않는 파라미터는 복소수 $k(\omega)e^{j\theta}$ 이며, 이것은 $\theta \in [0, 2\pi]$ 에 대하여 원이 된다. 이러한 원들을 모아놓은 곡선이 경계 $B(\omega)$ 가 된다. 식 (11)에서 사용된 감도 감소 사양대신 상보 감도(Complementary sensitivity) 또는 제어 비용(Control effort)과 같은 성능 사양들이 2차 부등식형태로 변환되어 질 수 있다. 따라서 이러한 2차 부등식에 대한 표준 형태는 식 (16)과 같이 정의할 수 있다.

$$g_i(k, \theta) \triangleq a_i(\theta)k^2 + b_i(\theta)k + c_i(\omega) \geq 0, i=1, \dots, n \quad (16)$$

식 (16)은 QFT경계 $P_0(j\omega)K_\omega$ 에 관계하며, K_ω 는

식 (17)과 같다.

$$K_{\omega} = \bigcap_{i=1, \dots, n} K_{\omega}^i \quad (17)$$

여기서, $K_{\omega}^i = \{k e^{i\theta} : p_i(k, \theta) \geq 0\}$

$P_0(j\omega)K_{\omega}^i$ 는 식 (15)에서 i 번째 2차 구속조건에 관계되는 QFT경계라고 한다. 전형적으로 K_{ω} 는 $[0, 2\pi]$ 의 범위내에서 주어진 제어기의 위상 θ 각각의 간격별로 계산된다. $\theta = [0, 2\pi]$ 내의 위상각 간격에 대하여 식 (18)을 정의한다.

$$K_{\omega, \theta} = \{k \geq 0 : p_i(k, \theta) \geq 0, i = 1, \dots, n\} \quad (18)$$

여기서, $K_{\omega, \theta}^i = \{k \geq 0 : p_i(k, \theta) \geq 0\}$ 이며 식 (19)와 (20)을 만족한다.

$$K_{\omega, \theta} = \bigcap_{i=1, \dots, n} K_{\omega, \theta}^i, K_{\omega} = \bigcup_{\theta \in [0, 2\pi]} K_{\omega, \theta} \quad (19)$$

$$K_{\omega, \theta} = \bigcup_{\theta \in [0, 2\pi]} \bigcap_{i=1, \dots, n} K_{\omega, \theta}^i \quad (20)$$

지정된 간격 ω 와 θ 에 대하여 QFT경계 $P_0(j\omega)K_{\omega, \theta}^i$ 는 2차 부등식 $g_i(k, \theta) = 0$ 의 실수근을 고찰함으로써 계산된다. 이러한 근들은 $K_{\omega, \theta}^i$ 의 경계로 정의되며, 포물선 $g_i(k, \theta) = 0$ 의 방향은 $P_0(j\omega)K_{\omega, \theta}^i$ 를 나타낸다.

전형적으로 QFT경계를 계산하기 위한 알고리즘은 다음과 같이 요약될 수 있다.

Step 1. 적절한 주파수 간격 $\Omega \in R$ 과 제어기 위상 간격 $\Theta \subset [0, 2\pi]$ 을 설정한다.

Step 2. 지정한 주파수 간격으로 ω 를 선택한다. ($\omega \in \Omega$)

Step 3. 지정한 위상각 간격으로 θ 를 선택한다. ($\theta \in \Theta$)

Step 4. 플랜트 집합 \mathbb{P}_{ω} 의 모든 점들에 대하여 식 (16)에 주어진 $g_i(k, \theta) = 0$ 의 계수를 평가한다.

Step 5. $g_i(k, \theta) = 0, i = 1, \dots, n$ 의 근을 평가한다.

Step 6. QFT 경계 $K_{\omega, \theta}^i$ 를 계산한다.

Step 7. $\bigcap K_{\omega, \theta}^i$ 로부터 $K_{\omega, \theta}$ 를 계산한다.

Step 8. 모든 위상에 대하여 Step 3—Step 8을 반복한다.

Step 9. $\bigcup K_{\omega, \theta}$ 로부터 K_{ω} 를 계산한다.

Step 10. 모든 주파수 Ω 에 대하여 Step 2—

Step 10을 반복한다.

3. 3 QFT제어기 설계 절차

주어진 페루프 시스템의 설계 사양과 플랜트 불확실성을 QFT경계로 변환하고 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 공칭 개루프 전달 함수가 각각의 주파수에서 그에 상응하는 QFT경계 상에 놓여 있으면 최적의 QFT설계가 달성된다^[12].

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 $\omega_k (k=1, \dots, h)$ 을 선택하고 복소 평면 상에 모든 주파수 ω_k 에 대하여 플랜트 집합 $P(i\omega)$ 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.

3. 4 QFT를 이용한 PSS설계

본 장에서는 전력계통의 안정도 향상을 위한 PSS의 설계를 위하여 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 Fig. 2를 기초로 하여 식 (21)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 시스템의 입력은 기준전압 ΔV_{ref} 이고, 피드백 되어져 제어기로 들어가는 출력은 회전자 각속도 $\Delta\omega$ 이다.

$$P(s) = \frac{\Delta\omega}{\Delta V_{ref}} = \frac{n_1 s}{(s+d_2)(s+d_3)(s^2+d_1s+d_4)} \quad (21)$$

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 변동으로 인하여 동작조건이 지속적으로 변하고 있기 때문에 전력 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 (22)와 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} 0.4 \leq P_e \leq 1.2 \\ -0.2 \leq Q_e \leq 0.2 \\ 0.6 \leq X_e \leq 1.1 \end{aligned} \quad (22)$$

위와 같이 불확실성을 나타내는 파라미터들의 범위를 이용하여 일련의 주파수 ω_k 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 (23), (24)와 같이 두었다.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 1.3 \quad (23)$$

$$\left| \frac{P(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 0.025 \quad (24)$$

일반적으로 QFT경계는 매우 복잡하고, Non-convex 형태이다. 몇몇 특수한 템플레이트를 제외하고 QFT경계의 해석적인 표현은 매우 힘들다. 본 논문에서의 접근은 QFT 경계는 니콜스 차트상에서의 수동적인 계산이 아니라 3.2절에서 주어진 이차 부등식 형태의 수치적인 알고리즘을 이용하여 식 (23), (24)와 같은 사양을 QFT경계로 변환한다. 주어진 페루프 시스템의 설계 사양과 플랜트 불확실성을 QFT경계로 변환하고 나면 이를 니콜스 선도 상에 나타내고 루프 정형 방법을 이용하여 이 경계를 만족하도록 공칭 개루프 전달함수 $L_0(s)$ 를 식별해야 하는데, 공칭 루프 전달 함수가 공칭 페루프 안정도가 달성되고, QFT경계 내에 놓여있게 되면 설계가 끝나게 된다

4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 QFT를 이용하여 전력 시스템의 불확실성과 다양한 외란에도 불구하고 저주파 진동을 효율적으로 억제할 수 있는 강인한 PSS를 설계하는 방법을 제시하였다. 제안한 QFT제어기의 외란 억제 성능과 강인성을 검증하기 위하여 1기 무한대 모선계통에 대해 다양한 부하변동이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 통하여 기존의 제어기 설계방식(Conventional PSS : CPSS)^[7]과 동특성을 비교 고찰하였다.

본 논문에서 사용한 1기 무한대 모선계통의 경우 동기기, 여자기 및 선로 정수와 시스템의 초기 상태는 Table 1과 같으며, QFT제어기의 최적 설계를 위해 사용되어진 경계계산은 3.2절에서 주어

Table 1 System parameters

발전기 정수	M=9.26, T _{do'} =7.76, X _{d'} =0.19,	D=0, X _d =0.973, X _q =0.55
여자기 정수	K _A =50,	T _A =0.05
선로 정수	R=-0.034, G=0.249	X=0.997, B=0.262
초기상태	P _{e0} =1.00, V _{e0} =1.05	Q _{e0} =0.015

진 2차 부등식에 기초한 수치적인 알고리즘을 이용하였다.

그리고 식 (23), (24)와 같이 주어진 강인 안정 사양과 외란 억제 성능 사양을 이용하여 구한 QFT 경계와, 결정된 루프 정형결과 $L_0(s)=P_0(s)K(s)$ 는 니콜스 선도 상에서 Fig. 4와 같이 나타났다.

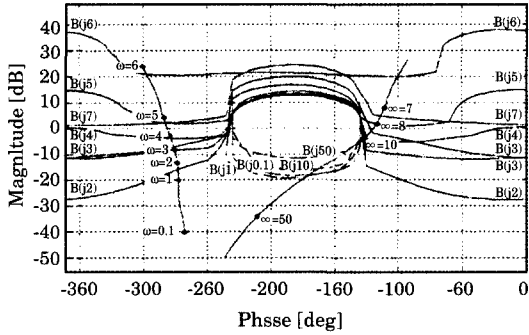


Fig. 4 QFT bounds and loop shaping result

제안한 방법을 이용하여 설계되어진 제어기는 식 (25)와 같다.

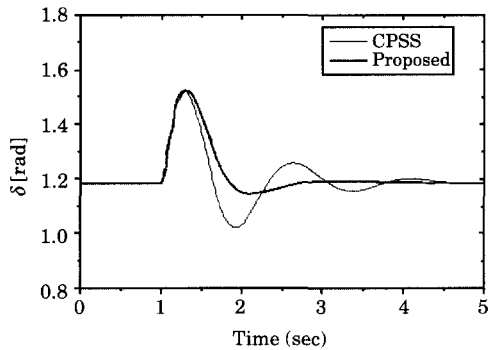
$$K(s) = \frac{369.89s^3 + 2022.38s^2 + 1091.13s + 103.01}{s^3 + 45.3057s^2 + 24.482s + 2.530} \quad (25)$$

Fig. 4에서 보여지듯이 각각의 주파수에서 모든 강인 안정도 사양과 성능사양이 만족되어 짐을 알 수 있다. 모든 주파수에서 개루프 전달함수는 QFT경계 위에 놓여있어 Horowitz에 의해 제시된 설계의 조건을 만족하고 있다.

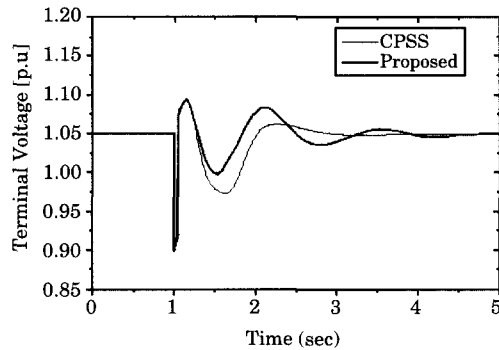
4. 1 정상 부하시

$$(P_{e0} = 1.0 \text{ (p. u.)}, Q_{e0} = 0.015 \text{ (p. u.)})$$

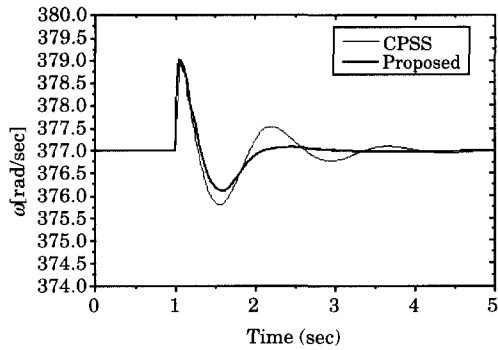
제안한 QFT제어기의 강인성을 평가하기 위해서 정상 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 먼



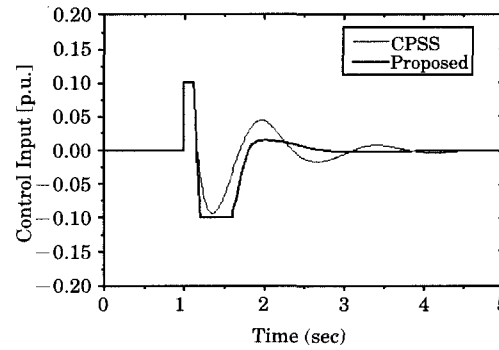
(a) Rotor angle



(c) Terminal voltage



(b) Angular velocity



(d) Control input

Fig. 5 Responses to three-phase fault in normal load

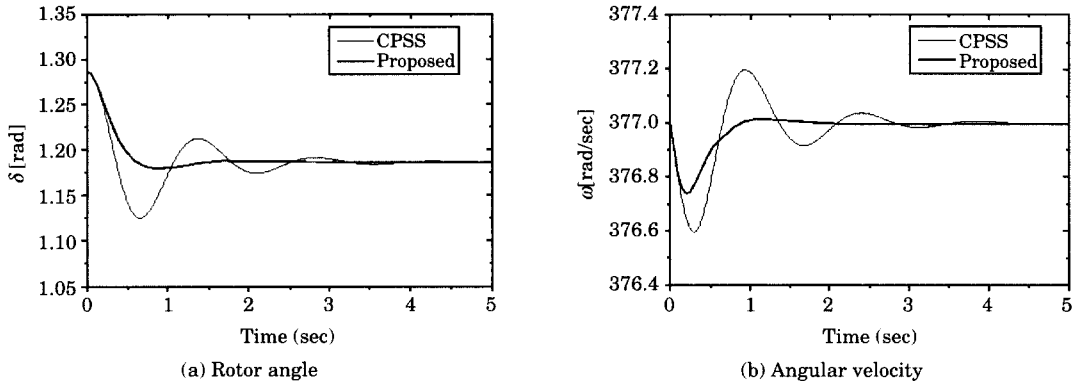


Fig. 6 Responses to increasing rotor angle in normal load

저 Fig. 5는 정상 부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우에 대해 발전기 각속도 (Angular velocity), 회전자각(Rotor angle), 단자 전압(Terminal voltage)의 동특성 응답과 제어입력을 나타내었다. 이때 PSS의 입력 신호는 $-0.1 [p.u.] \leq u \leq 0.1 [p.u.]$ 로 제한하였다 제안한 QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다. Fig. 6은 발전기의 초기 회전자각을 0.1[rad] 만큼 변동 시켰을 경우 CPSS의 경우와 제안한 QFT 제어기를 이용한 경우에 대하여 발전기 각속도 및 회전자각의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 발전기의 각속도 및 회전자각의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈트 면에서도 기존의 PSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

4.2 중 부하시

$$(P_{e0}=1.2 [p.u.], Q_{e0}=0.2 [p.u.])$$

제안한 QFT제어기의 강인성을 평가하기 위해서 중 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 7은 중 부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에

서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경 없이 제거되는 경우에 대해 발전기 각속도, 회전자각, 단자 전압의 동특성 응답과 제어입력을 나타내었다. 이때 PSS의 입력 신호는 $-0.1 [p.u.] \leq u \leq 0.1 [p.u.]$ 로 제한하였다 제안한 QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

Fig. 8은 발전기의 초기 회전자각을 0.1[rad] 만큼 변동 시켰을 경우 CPSS의 경우와 제안한 QFT 제어기를 이용한 경우에 대하여 발전기 각속도 및 회전자각의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 발전기의 각속도 및 회전자각의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈트 면에서도 기존의 PSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

4.3 경 부하시

$$(P_{e0}=0.7 [p.u.], Q_{e0}=0.015 [p.u.])$$

제안한 QFT제어기의 강인성을 평가하기 위해서 경 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. Fig. 9는 경 부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성

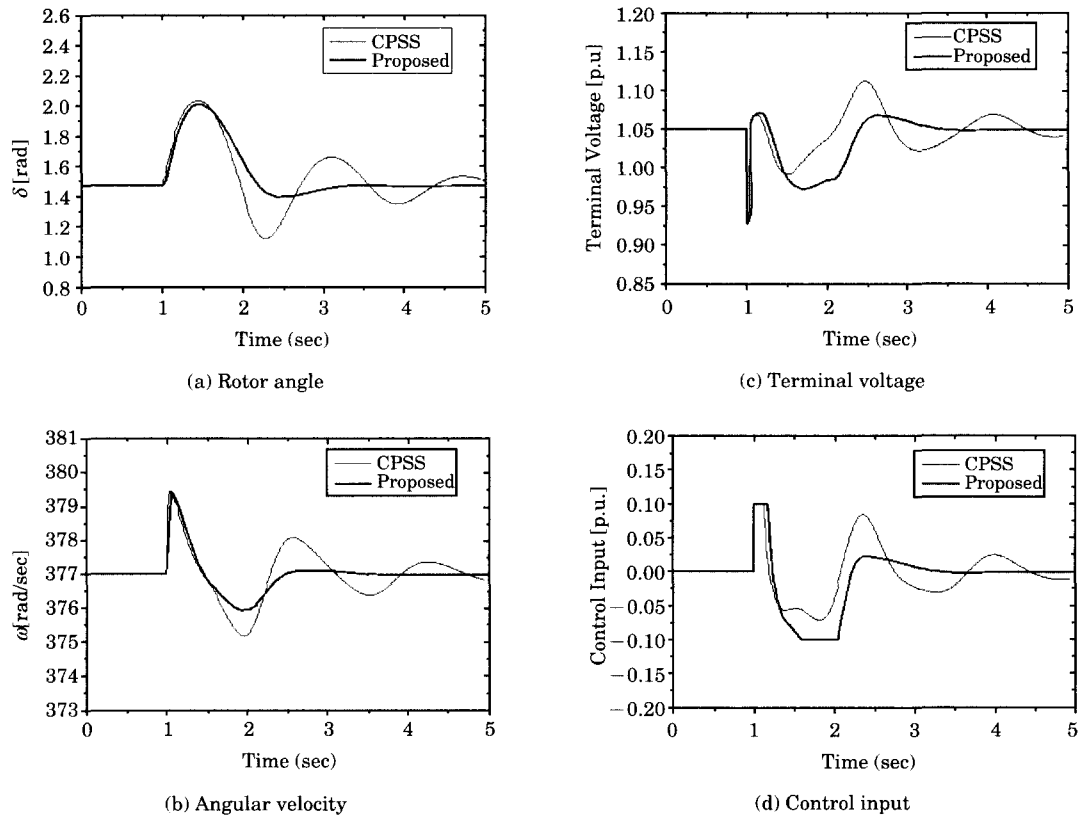


Fig. 7 Responses to three-phase fault in heavy load

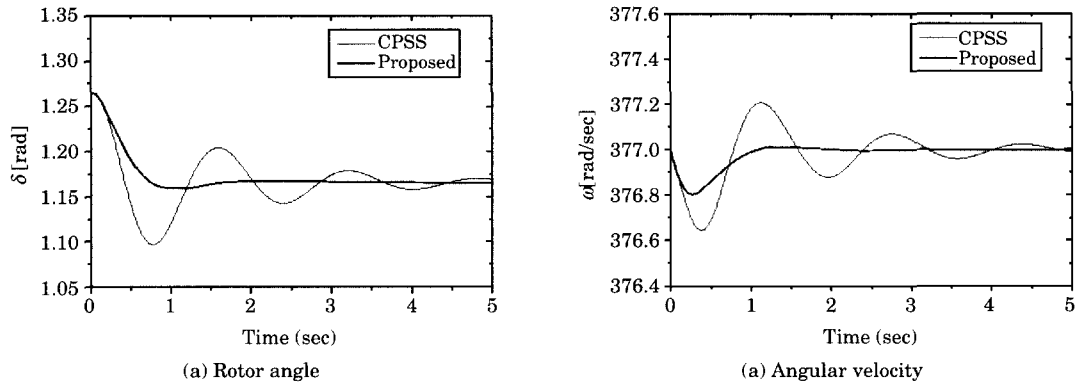


Fig. 8 Responses to increasing rotor angle in heavy load

변경 없이 제거되는 경우에 대해 발전기 각속도, 회전자가, 단자 전압의 동특성 응답과 제어입력을 나타 내었다. 이때 PSS의 입력 신호는 $-0.1[p.u] \leq u \leq 0.1[p.u.]$ 로 제한하였다 제안한 QFT의 경우

가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

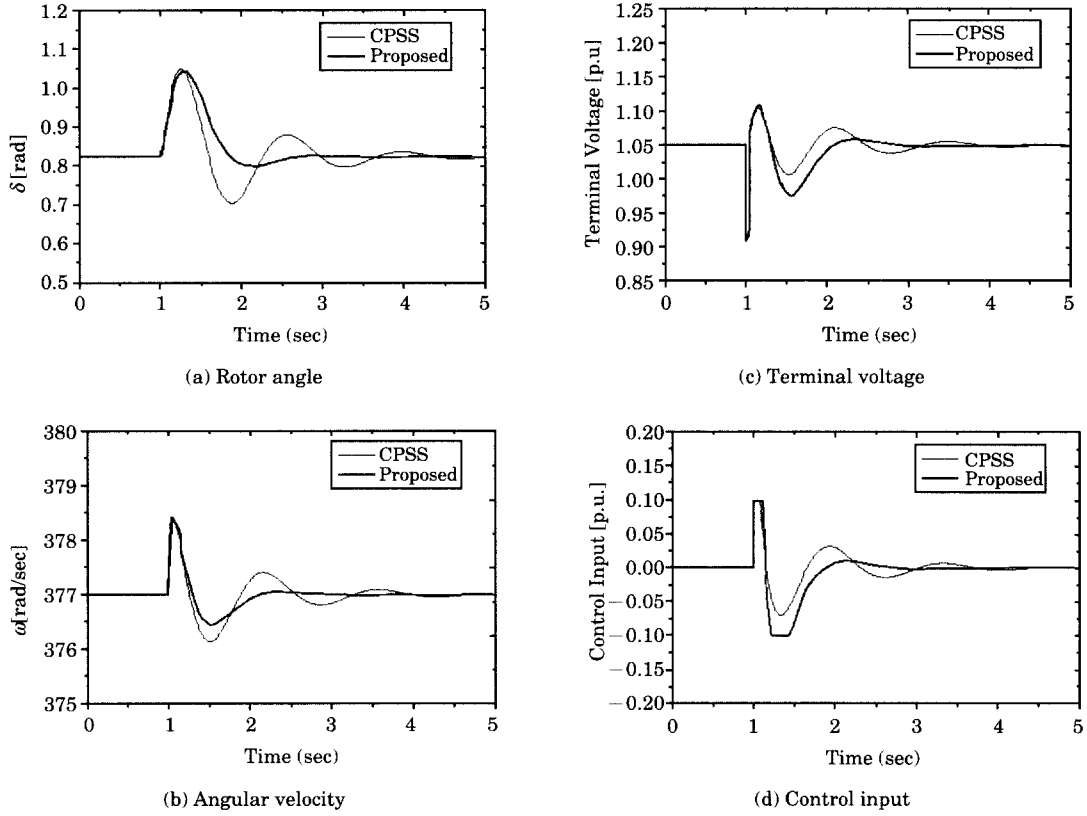


Fig. 9 Responses to three-phase fault in light load

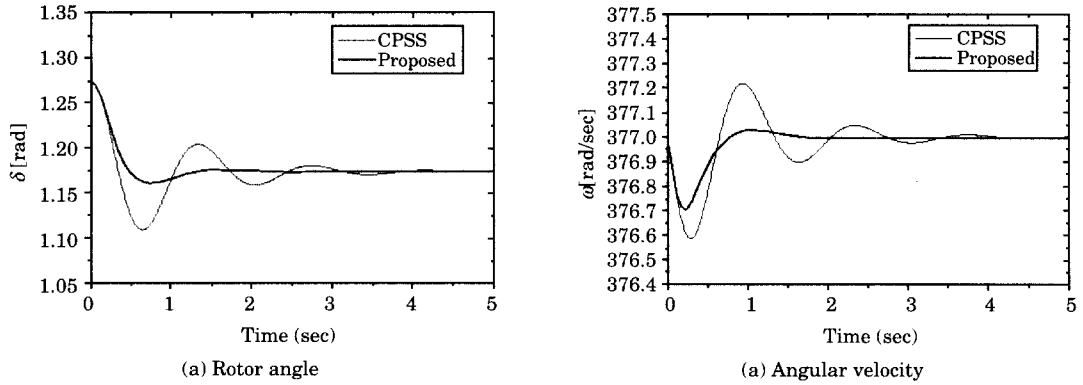


Fig. 10 Responses to increasing rotor angle in light load

Fig. 10은 발전기의 초기 회전자각을 0.1 [rad] 만큼 변동 시켰을 경우 CPSS의 경우와 제안한 QFT 제어기를 이용한 경우에 대하여 발전기 각속도 및 회전자각의 동특성 응답을 나타내고 있다.

제안한 QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우보다 발전기의 각속도 및 회전자각의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈트 면에서도 기존의 PSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수

하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어 성능을 보였다.

5. 결 론

본 논문에서는 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. 제안한 QFT를 이용함에 있어 전력계통에 존재하는 불확실성은 파라미터 불확실성으로 취급하였다. 다양한 부하 변동시 비선형 전력시스템 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 QFT제어기의 강인성을 확인하였다. 따라서 제안한 QFT제어기를 이용한 PSS설계 방법은 기존의 설계 방법보다 광범위한 동작 조건하에서 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어 성능과 강인성을 보였으며 전력계통의 안정도에 크게 기여함을 알 수 있었다.

참고문헌

[1] 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

[2] 정형환, 이준탁, 이정필, 한길만, "유전알고리즘을 이용한 전력계통 안정화 장치의 강인한 최적 H_∞ 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] 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

[5] 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

[6] 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

[7] Y. N. Yu, "Electric power system dynamics", *ACADEMIC PRESS* 1983

[8] 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

[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] 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

[11] R. Asgharian, "A robust H_∞ power system stabilizer with no adverse effect on shaft torsional modes", *IEEE Trans. on energy conversion*, Vol. 9 No. 3, pp.475~481. 1994.

[12] 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.

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

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

[15] 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

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 전기전자컴퓨터공학부 교수, 당학회 정회원



정문규(鄭文圭)

1971년 11월 16일 생. 1998년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중, 당학회 정회원



이정필(李丁必)

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



안병철(安秉喆)

1963년 6월 2일생. 1988년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 부산울산지방중소기업청 시험검사와 공업연구사, 당학회 정회원



김상효(金相孝)

1965년 8월 25일생. 1992년 동아대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동아대학교 부설 정보기술연구소 특별연구원, 당학회 회원