

Optimal Design of Power System Stabilizer Using IA-QFT

鄭亨煥* · 李丁必** · 鄭文圭*** · 周秀元*

(Hyeng-Hwan Chung · Jeong-Phil Lee · Mun-Kyu Chung · Soo-Won Joo)

Abstract - In this paper, optimal tuning problem of power system stabilizer using IA-QFT is investigated to improve power system dynamic stability in spite of parameter variation and disturbance uncertainties. The most important feature of QFT is that it is able to deal with the design problem of complicated uncertain plants. However, loop shaping is currently performed in computer aided design environments manually and it is usually a trial and error procedure. It is difficult to design a controller to satisfy all specifications manually. To solve this problem, a study of design automation using IA needs to be taken into account. The robustness of the proposed controller has been investigated on a single machine infinite bus model. The results are shown that the proposed PSS using IA-QFT is more robust than conventional PSS.

Key Words : Quantitative Feedback Theory(QFT), Loop Shaping, Immune Algorithm(IA), Robustness, Power System Stabilizer(PSS)

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. 따라서 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer : PSS)는 동기회전자의 저주파 진동을 억제 위하여 발전기 여자 조절에 의해 전체 시스템의 안정도를 향상시키기 위한 효율적인 수단으로서 이에 대한 연구가 활발하게 이루어지고 있다[1-3].

1969년 deMello와 Concordia[4]에 의해서 저주파 진동에 PSS의 효과에 대한 연구를 기점으로 해서, PSS를 설계하기 위해 고유치 기법[5], 극배치 기법[6], 최적 제어기법[7] 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 발전조건, 전송조건, 또는 부하조건에 따라 동작조건이 지속적으로 변하고 있다. 이러한 동작 환경의 변화는 전력시스템에 대한 수학적

인 표현과 실제 전력계통의 물리적인 구조간에 차이를 발생시킨다. 이러한 계통의 변동에 대응하고자 하는 노력의 일환으로 W. Gu[8] 등은 자기 동조 제어기법을 이용하여 각 동작점을 추적하는 방식을 제안하였고, 최근에는 퍼지논리[9], 적응제어[10] 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.

이러한 문제점을 해결하기 위하여 본 논문에서 도입된 Quantitative Feedback Theory(QFT)[11-17]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 설계 과정은 주파수 영역에서 수행되며, 이 과정에서 가장 중요한 부분을 차지하고 있는 루프 정형(Loop shaping)은 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-

* 正 會 員 : 東亞大 電氣電子컴퓨터 工學部 教授

** 正 會 員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 博士科程 修了

*** 正 會 員 : 韓國電力公社

接受日字 : 2002年 4月 29日

最終完了 : 2002年 7月 18日

convexity 문제이므로 기존의 경사(gradient)에 기초한 최적화 기법들은 정확한 최적해를 찾을 수 없다. 따라서 본 논문에서는 파라미터 변동과 외란 불확실성이 많이 존재하는 전력계통에 대하여 QFT에 기초하여 기존의 lead/lag 형태의 구조가 고정된 강인한 PSS의 파라미터를 최적화 하기 위하여 인간의 면역 체계를 모의한 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)[18-20]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 적용하여 고유치 해석을 수행하여 제동비(damping ratio) 향상을 비교 고찰하였고, 비선형 시뮬레이션을 통하여 다양한 외란이 발생하였을 경우에 외란 억제 성능과 강인성에 대하여 고찰하였으며, 제안한 PSS의 설계가 기존의 설계방식보다 효율적이며 전력계통 안정도 및 강인성 향상에 크게 기여함을 보이고자 한다.

2. 전력시스템의 수학적 모델

2.1 동기 및 여자 시스템 모델

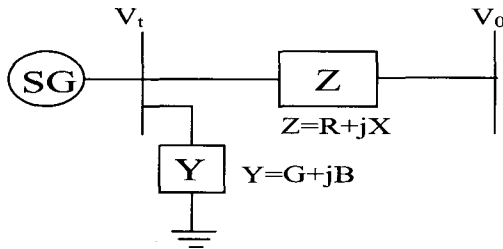


그림 1 1기 무한대 모선의 전력 시스템
Fig. 1 A one machine infinite bus power system

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 [7] 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, ω 는 각속도, ω_b 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 d 축 전류, q 축 전류이며,

v_d , v_q 는 각각 발전기의 d 축 전압, q 축 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 계자전압, T_{do}' 는 발전기 d 축 과도 시정수, x_d 는 발전기 d 축 동기 리액턴스, x_d' 는 발전기 d 축 과도 리액턴스를 나타낸다.

본 연구에서 사용된 여자 시스템은 IEEE Type-ST1 이며, 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 발전기 단자의 기준전압, v_t 는 발전기 단자전압, T_A 는 여자 시스템의 시정수, K_A 는 여자 시스템의 이득, u 는 제어 입력이며, $v = (v_d^2 + v_q^2)^{1/2}$ 이고, $v_d = x_q i_q$, $v_q = E_q' - x_d' i_d$ 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.

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} \mathbf{X}(t) &= \mathbf{A}\mathbf{X}(t) + \mathbf{B}\mathbf{U}(t) \\ \mathbf{Y}(t) &= \mathbf{C}\mathbf{X}(t) \end{aligned} \quad (6)$$

2.2 전력 시스템 안정화 장치의 구조

본 논문에서 고찰하고자 하는 PSS의 구조는 회전자 속도를 입력으로 사용하는 PSS이다. 그림 2는 2개의 진상 보상이 연결된 형태의 PSS이며 전달 함수는 식 (7)과 같다.

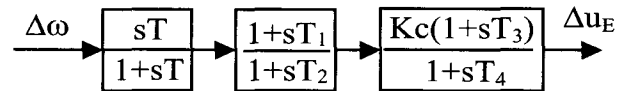


그림 2 PSS의 구조를 나타내는 블록선도
Fig. 2 Block diagram of PSS

$$PSS(s) = \frac{\Delta u_E}{\Delta \omega} = \left(\frac{sT}{1+sT} \right) \left(\frac{1+sT_1}{1+sT_2} \right) \left(\frac{K_C(1+sT_3)}{(1+sT_4)} \right) \quad (7)$$

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

3. QFT 제어 이론

QFT는 고전제어 이론을 근거로 하여 Horowitz에 의해 창안되었으며, 이것은 지정된 플랜트에 존재하는 불확실성 또

는 외란에 대하여 강인한 제어성을 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 제어성을 만족하는 제어기의 전달함수 $K(s)$ 를 구하는 것이다.

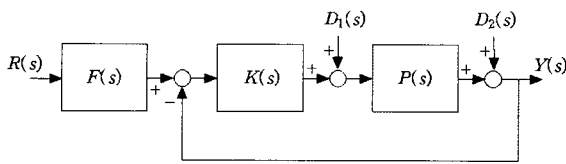


그림 3 피드백 제어 시스템
Fig. 3 Feedback control system

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.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq \gamma, \text{ for all } P(s) \in \mathbb{P} \quad (8)$$

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

$$\left| \frac{P(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq |d(\omega)| \text{ for all } P(s) \in \mathbb{P} \quad (10)$$

여기서 $\gamma, a(\omega), b(\omega), d(\omega)$ 는 안정도 성능 사양으로, 각각 강인 안정도 영유, 하한 추종성능경계, 상한 추종성능경계, 외란 억제 성능경계이다. 식 (8)은 강인 안정도 성능 사양이며, 식 (9)는 추종성능 경계사양, 식 (10)은 외란 억제 경계를 나타내는 성능 사양이다, 그리고 $L(s)=K(s)P(s)$ 이며 개루프 전달함수이며, \mathbb{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 (8)~(10)과 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. 지금껏 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[14]을 도입하여 QFT 경계를 계산하였다.

주어진 페루프 시스템의 설계 사양과 플랜트 불확실성을 QFT경계로 변환하고 나면 이를 니콜스 선도 상에 나타내 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 전달함수가 각각의 주파수에서 그에 상응하는 QFT경계 상에 놓여 있으면 최적의 QFT설계가 달성된다[11].

4. IA를 이용한 QFT설계

4.1 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)

IA의 기본이 되는 두 가지의 면역 시스템 이론은 소매틱 이론(somatic theory)과 네트워크 가설(network hypothesis)이다. 소매틱 이론은 면역계의 다양한 항체 생성 능력을 설명하는 이론이며, 네트워크 가설은 면역계의 자기 조절 능력을 설명하는 이론이다. 본 절에서는 소매틱 이론과 네트워크 가설을 기초로 한 면역계의 항체(antibody) 생성 세포와 자기 조절 기구를 실현하는 IA 수행방법에 대해서 설명한다[18]. 이 알고리즘을 최적화 문제의 해 탐색 알고리즘과 대응시켜 보면 항원(antigen)은 최적화 문제의 제약 조건과 목적 함수이며, 항체가 최적화 문제의 해가 되며 항원과 항체의 친화도(affinity)가 해의 적합도 값에 해당된다.

IA 각각의 계산절차는 다음과 같이 요약된다.

STEP 1> 항원의 인식 : 목적함수와 제약 조건 등을 항원으로 하고 이를 입력 데이터로 한다. 이는 최적화 문제를 정의하는 단계이다.

STEP 2> 초기 항체집단의 생성 : 최초의 과정에서 유효한 항체를 무작위로 발생시켜 이들 중 우수한 항체들을 기억 세포로 저장한다. 본 논문에서는 PSS의 파라미터들이 항체로 표현된다.

STEP 3> 친화도 계산 : 항원과 항체 v 의 친화도 ax_v 와 항체 v 와 항체 w 의 친화도 $ay_{v,w}$ 를 계산한다. 이는 다음 단계에서 행하는 기억 세포로의 분화를 위한 척도가 된다.

면역계에서는 항체와 항원 또는 항체와 항체가 서로 결합하고 반응함에 따라 항체의 생성을 스스로 조절하며 다양한 항체를 생성하는데, 이들의 결합력은 친화도에 의해 추측이 가능하며 친화성은 항체의 유사성의 척도가 된다. 이러한 친화도의 계산을 통하여 다양성의 계산이 가능하다. 여기서는 두 가지의 친화도 계산이 수행된다. 하나는 항체와 항원사이의 관계를 나타내기 위한 것으로서 목적함수와 해와의 결합정도를 알 수 있다. 다른 하나는 항체와 항체사이의 관련정도를 나타내기 위한 것으로서 항체들 상호간의 다양성이 평가될 수 있다. 항체 v 와 항체 w 사이의 친화도는 식 (11)과 같이 정의된다.

$$ay_{v,w} = \frac{1}{(1+E(2))} \tag{11}$$

여기서, $E(2)$ 는 항체 i 와 항체 j 만의 정보 엔트로피이다. 이 친화도의 값은 0에서 1의 값을 가지며 $E(2)$ 의 값이 0이 되면 항체 i 와 항체 j 의 유전자가 완전히 일치함을 나타낸다.

그리고 항원과 항체 v 와의 친화도는 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ax_v = opt_v \tag{12}$$

여기서, opt_v 는 항체의 평가치로서 항원과 항체 v 와의 결합 강도를 나타내며, ax_v 는 친화도로서 적합도에 상응한다. 본 논문에서와 같이 평가치의 최소값 탐색 문제의 경우에는 식 (12)는 식 (13)과 같이 된다.

$$ax_v = \frac{1}{(1+opt_v)} \tag{13}$$

STEP 4> 기억 세포로의 분화 : STEP 3>에서 구한 항원과의 친화도가 높은 항체를 기억 세포에 추가한다. 기억 세포의 수에는 제한이 있으므로 추가하는 세포에 현재 보존 중인 기억 세포 중에서 항체간의 친화도가 가장 높은 항체를 소멸시키고 새로이 분화된 친화도가 높은 항체를 추가한다.

STEP 5> 항체 생성의 촉진과 억제 : 차세대에 남는 항체 i 의 기대치 e_i 를 식 (14)에 의해 계산하고, 기대치가 낮은 항체를 소멸시킨다.

$$e_i = \frac{ax_i}{c_i} \tag{14}$$

여기서, c_i 는 항체의 농도로서 식 (15)와 같이 구해진다.

$$c_i = \frac{\text{항체 } i\text{와 같은 친화도를 가진 항체의 수}}{\text{항체의 총수 } N} \tag{15}$$

식 (15)에 의하면 항원과 항체의 친화도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 높고, 농도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서, 면역 체계는 친화도가 높은 항체의 생산을 촉진하며 면역계 전체에 차지하는 배합이 높은 항체의 생성을 억제하는 면역계에 있어서 다양성의 조절기구로 작용한다.

STEP 6> 항체의 생성 : STEP 5>에서 소멸된 항체에 대

신하는 새로운 항체를 무작위로 생성한다. 다음에 STEP 5>에 남아있는 항체와 새로이 생성된 항체에 대하여 무작위로 쌍(pair)들을 선택, 이들에 교차 조작을 실시, 차세대에 남는 항체를 증식한다. 게다가 증식된 항체에 대하여 미리 설정된 돌연 변이 확률, 돌연 변이 조작법에 의해 유전자를 변화시키고 STEP 3>으로 돌아간다. 이 순서에 의해 무한의 항원에 대응하는 항체를 생성할 수 있다. 단, 교차, 돌연변이 조작법 및 그 확률은 임의로 설정한다.

이러한 IA의 동작에 있어서 STEP 6>은 소매틱 이론에 기초한 유전자의 재구성에 의한 항체의 생성에 대응되며, STEP 5>는 네트워크 가설에 기초한 항체의 생성 조절에 대응된다. 또한 IA의 특징으로서는 다양한 항체의 생성기구와 자기 조절 기구에 의해 다양한 항체를 생성할 수 있고, 항원과의 친화도가 높은 항체를 보다 많이 남기는 항체 생성기구에 의해 유효한 항체를 대량으로 생성하여 그 근방의 병렬 탐색이 가능하게 되며, 최적해를 고속으로 구할 수 있다. 또한 STEP 2>와 STEP 4>에 의해 과거에 배제한 항원에 대응하는 항체를 재빨리 생성하기 때문에 시스템의 초기 상태에 비해 최적해가 고속으로 구해지는 것이 기대 된다.

4.2. IA-QFT를 이용한 PSS파라미터의 최적화

본 장에서는 기존의 lead/lag 형태로 구조가 고정된 PSS의 파라미터를 최적화하기 위하여 IA-QFT를 이용한 새로운 접근 방법을 제안한다. 일반적으로 QFT제어기의 설계과정은 주어진 경계 조건들을 만족하도록 영점과 극점을 계속적으로 추가해 가는 수동적인 방법으로 수많은 시행착오적인 절차를 거쳐야 하는 실정이었다. 본 논문에서는 IA를 이용한 루프 정형을 통하여 주어진 QFT경계와 공칭플랜트에 대하여 모든 QFT경계와 페루프 공칭 시스템의 안정도가 만족되며 주어진 성능 지수가 최소화되도록 하는 lead/lag 형태의 PSS의 파라미터를 최적화 하는 것이다. 이러한 접근은 개루프 전달 함수가 각각의 주파수에서 그에 상응하는 QFT 경계상에 놓여 있을 때 최적의 PSS설계 파라미터가 된다.

먼저 QFT를 적용하기 위해 전력시스템에 대한 전달함수는 식 (16)과 같이 나타낼 수 있다. 여기서 시스템의 입력은 기준전압 ΔV_{ref} 이고, 피드백 되어져 제어기로 들어가는 출력은 회전자 각속도 $\Delta \omega$ 이다.

$$P(s) = \frac{\Delta \omega}{\Delta V_{ref}} = \frac{n_1 s}{(s+d_2)(s+d_3)(s^2+d_1s+d_4)} \tag{16}$$

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 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 (17)과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} 0.4 \leq P_e \leq 1.2 \\ -0.2 \leq Q_e \leq 0.2 \\ 0.6 \leq X_e \leq 1.1 \end{aligned} \quad (17)$$

위와 같이 불확실성을 나타내는 파라미터들의 범위를 이용하여 일련의 주파수 ω_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 (18), (19)와 같이 두었다.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 1.3 \quad (18)$$

$$\left| \frac{P(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 0.025 \quad (19)$$

먼저 식 (18), (19)와 같은 사양을 이용하여 이차 부등식을 이용한 수치적인 알고리즘을 이용하여 QFT경계를 계산한다. 그리고 나서 제어기의 구조를 결정해야 하는데 본 논문에서는 제어기의 구조는 그림 2와 같고 식 (7)과 같다. 여기서 최적화 하고자 하는 파라미터는 $K_C, T, T_1, T_2, T_3, T_4$ 가 되며, 항체의 구조는 그림 4와 같다.

IA에서의 최적해는 식 (12)와 같이 항체의 평가치로서 항원과 항체의 결합강도를 나타내는 opt_v 를 최대화하는 문제이지만 IA-QFT를 이용한 PSS의 파라미터를 최적화하는 문제는 평가치의 최소값 탐색의 문제가 되므로 항원과 항체의 친화도는 식 (13)을 이용하여 식 (20)을 최소화하는 문제로 설정하였다.

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

여기서, $\gamma_0, \gamma_i (i=0, 1, \dots, h)$ 는 가중치 요소이며, J_{sta}, J_{bi}, J_{hg} 는 각각 안정도 지수, 경계지수, 고 주파수 이득 지수이다.

Antibody 1	K_C	T	T_1	T_2	T_3	T_4
Antibody 2	K_C	T	T_1	T_2	T_3	T_4
⋮						
Antibody n	K_C	T	T_1	T_2	T_3	T_4

그림 4 항체의 구조
Fig. 4 Structure of antibody

4.2.2. 안정도 지수

폐루프 시스템의 안정도를 보장하기 위해서 안정도 비용함수도 시스템의 사양에 포함이 되는데 이것은 시스템의 고유치를 구함으로써 평가 할 수 있는데, 여기서는 전기 기계적 모드의 제동 비(damping ratio) ζ 를 이용하여 평가 할 수 있다. 그 비용함수는 식 (21)과 같으며 안정도 지수라고 정의한다.

$$J_{sta} = 1/\zeta \quad (21)$$

4.2.3. 경계 지수

일반적으로 QFT경계는 매우 복잡하고, 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 IA의 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 (22)와 같이 정의된다.

$$J_{bi} = \begin{cases} 0 & \omega_i \text{에서 QFT 경계가 만족될 경우 } i=1,2,\dots,h \\ 1 & \text{경계가 만족 되지 않는 경우} \end{cases} \quad (22)$$

4.2.4. 고 주파수 이득 지수

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. 공칭 플랜트가 고정되어 있기 때문에 이것은 식 (23)와 같이 주어지는 제어기의 고 주파수 이득과 등가이다.

$$J_{hg} = b_r/a_m \quad (23)$$

여기서, a_m 은 제어기의 분모의 최고차항의 계수, b_r 은 분자의 최고차항의 계수이다.

전력계통에 적용된 IA-QFT PSS의 최적 파라미터 선정 과정은 그림 5와 같이 요약할 수 있다.

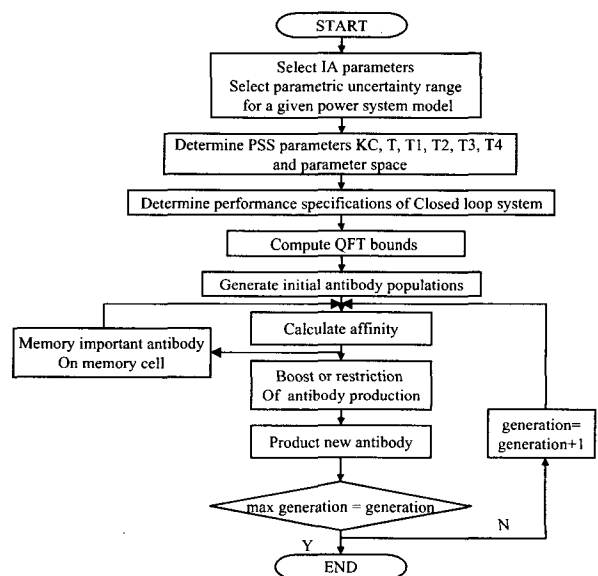


그림 5 IA-QFT를 이용한 PSS 최적 파라미터 선정을 위한 흐름도

Fig. 5 Flow chart for optimal parameter selection of PSS using IA-QFT

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 전력 시스템의 불확실성과 다양한 외란에도 불구하고 저주파 진동을 효율적으로 억제할 수 있는 강인한 PSS의 최적 파라미터를 선정하기 위하여 설계하기 위하여 IA-QFT를 이용하는 방법을 제시하였다. 제안한 IA-QFT PSS의 외란 억제 성능과 강인성을 검증하기 위하여 1기 무한대 모선계통의 시스템 운용조건을 정상 부하시, 중 부하시에 대하여 각각 V_{ref} 가 0.1[p.u.]만큼 증가한 경우와, 3상 단락이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 통하여 기존의 제어방식(Conventional PSS)[7]과 동특성을 비교 고찰하였다.

본 논문에서 사용한 1기 무한대 모선계통의 경우 동기기, 여자기 및 선로 정수와 시스템의 초기 상태는 문헌[3]에 주어져 있으며, PSS의 최적 파라미터를 선정하기 위해 사용되어진 IA의 파라미터는 표 1과 같다. 제안한 방법을 이용하여 최적화 되어진 PSS의 파라미터는 각각 $K_C=20.0605$, $T=9.9891$, $T_1=3.7546$, $T_2=1.7670$, $T_3=0.1924$, $T_4=0.0197$ 에 수렴하였다.

표 1 IA 파라미터
Table 1 IA parameters

Generations number	Antibody number	Crossover rate	Mutation rate
100	100	0.85	0.01

그리고 식 (18), (19)와 같이 주어진 강인 안정 사양과 외란 억제 성능 사양을 이용하여 구한 QFT경계와, 설계되어진 제어기를 이용하여 결정된 루프 정형결과 $L_0(s) = P_0(s)PSS(s)$ 는 니콜스 선도 상에서 그림 6과 같이 나타났다.

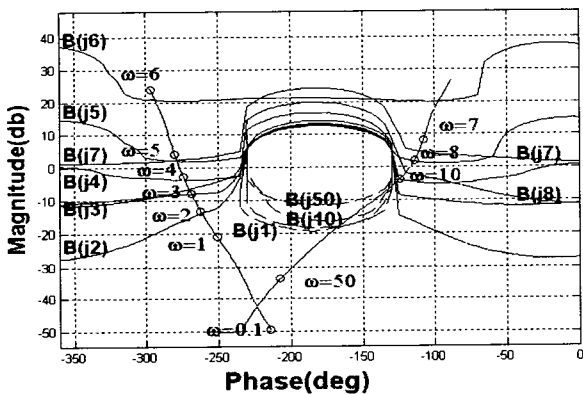


그림 6 QFT 경계와 루프 정형 결과
Fig. 6 QFT bounds and loop shaping result

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 ($P_{d0}=1.0[p.u.]$ $Q_{d0}=0.015[p.u.]$)

제안한 IA-QFT PSS의 저주파 진동의 해석을 위하여 고유치 해석을 수행하였으며 시스템의 기계적 모드의 제동비 (damping ratio) 향상에 대하여 고찰하였다. 또한 강인성을 평가하기 위해서 정상 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 표 2는 정상 부하시 PSS가 없는 경우, 기존의 PSS를 가지는 경우 및 제안한 PSS를 가지는 경우에 대한 고유치 해석결과를 나타내었다. 전력 시스템의 저주파 진동은 일반적으로 기계적인 모드의 제동이 부족하기 때문으로서 기계적인 모드의 제동비를 고찰하기 위하여 시스템의 고유치를 $\lambda = \alpha + j\omega$ 라고 정의하면 백분율로서 제동비는 식 (24)와 같이 정의된다.

$$\xi = -\frac{\alpha}{\sqrt{(\alpha^2 + \omega^2)}} \times 100\% \quad (24)$$

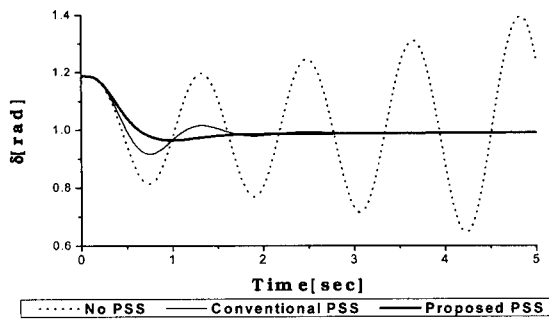
표 2에서 제어기가 없는 경우 기계적인 모드는 $0.29510 \pm j4.9596$ 로써 제동비는 -5.94% 이며, 기존의 PSS의 경우는 $-1.5162 \pm j4.9004$ 로써 제동비는 29.6% 이며, 제안한 PSS의 경우 $-2.5942 \pm j2.8516$ 로써 67.3% 로써 기존의 PSS보다 제동비가 약 2.3배 향상되었다.

표 2 정상 부하시의 고유치
Table 2 Eigenvalues in normal load

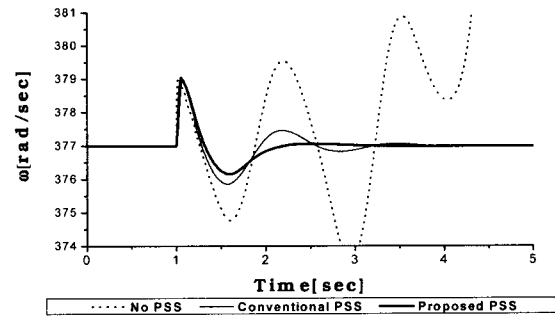
No PSS	Conventional PSS	Proposed PSS
$0.29510 \pm j4.9596$	$-1.5162 \pm j4.9004$	$-2.5942 \pm j2.8516$
$-10.3930 \pm j3.2837$	$-8.7241 \pm j7.9904$	$-5.8401 \pm j11.4423$
	-29.2377	-54.0234
	-0.3471	-0.1010
	-10.4635	-0.6302

그림 7은 V_{ref} 가 0.1[p.u.]만큼 증가하였을 경우 기존의 PSS 경우와 제안한 IA-QFT PSS를 이용한 경우에 대하여 발전기 위상각, 각속도 및 단자전압의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 IA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 발전기의 위상각 및 각속도의 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.

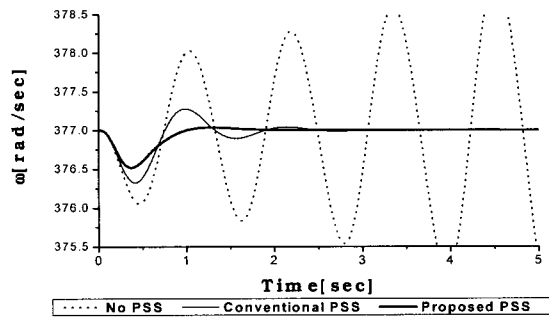
그림 8은 정상 부하시 1초 후에 무한대 모선 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경없이 제거되는 경우에 대해 발전기 각속도, 위상각, 단자전압의 동특성 응답과 제어입력을 나타내었다. 이때 PSS의 입력 신호는 $-0.1[p.u.] \leq u \leq 0.1[p.u.]$ 로 제한하였다 제안한 IA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.



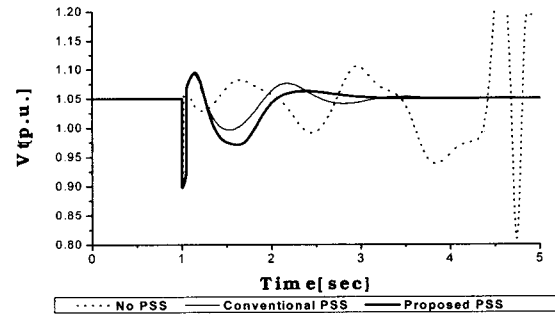
(a) Rotor angle



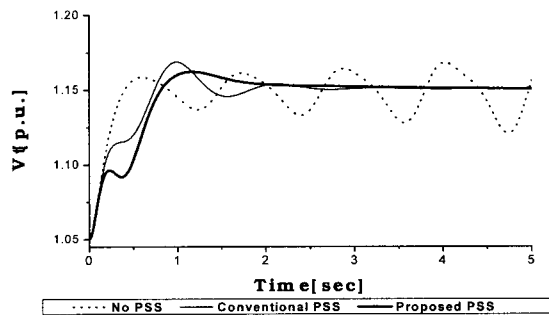
(b) Angular velocity



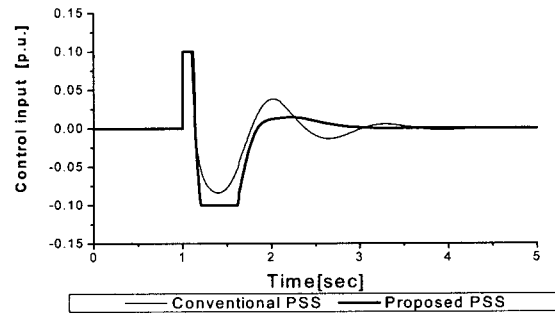
(b) Angular velocity



(c) Terminal voltage



(c) Terminal voltage



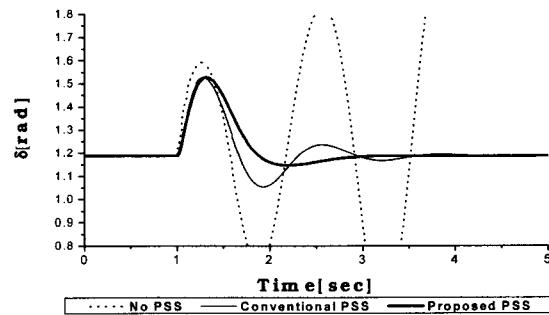
(d) Control input

그림 7 정상 부하시 V_{ref} 가 0.1[p.u.] 증가시 동특성 응답

Fig. 7 Responses to 0.1[p.u.] increment of V_{ref} in normal loadX

그림 8 정상 부하시 3상 단락 발생시 동특성 응답

Fig. 8 Responses to three-phase fault in normal load



(a) Rotor angle

5.2 중 부하시 ($P_{d0} = 1.2[p.u.]$, $Q_{d0} = 0.2[p.u.]$)

제안한 IA-QFT PSS의 저주파 진동의 해석을 위하여 고유치 해석을 수행하였으며 시스템의 기계적 모드의 제동비 향상에 대하여 고찰하였다. 또한 강인성을 평가하기 위해서 중 부하시 두 가지의 서로 다른 외란이 발생한 경우에 대하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다. 먼저 표 3은 정상 부하시 PSS가 없는 경우, 기존의 PSS를 가지는 경우 및 제안한 PSS를 가지는 경우에 대한 고유치 해석결과를 나타내었다. 전력 시스템의 저주파 진동은 일반적으로 기계적인 모드의 제동이 부족하기 때문으로서 기계적인 모드의 제동비를 고찰하기 위하여 식 (24)를 이용하여 제동비를 계산하였다.

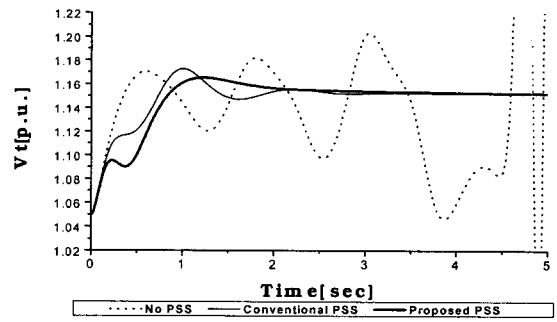
표 3에서 제어기가 없는 경우 기계적인 모드는 $0.54900 \pm j4.4029$ 로써 제동비는 $-12.4[\%]$ 이며, 기존의 PSS의 경우는 $-1.2009 \pm j4.3223$ 로써 제동비는 $26.8[\%]$ 이며, 제안한 PSS의 경우 $-2.2507 \pm j2.5082$ 로써 $66.8[\%]$ 로써 기존의 PSS보다 제동비가 약 2.5배 향상되었다.

표 3 중 부하시의 고유치

Table 3 Eigenvalues in heavy load

No PSS	Conventional PSS	Proposed PSS
$0.5490 \pm j4.4029$	$-1.2009 \pm j4.3223$	$-2.2507 \pm j2.5082$
$-10.6468 \pm j3.4515$	$-8.8449 \pm j8.4643$	$-6.0498 \pm j11.7109$
	-29.5970	-54.2667
	-0.3512	-0.1012
	-10.4893	-0.6542

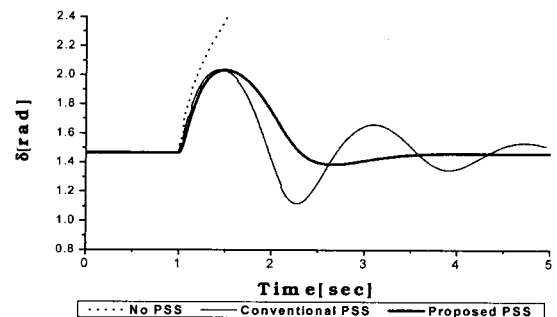
그림 9는 V_{ref} 가 0.1[p.u.]만큼 증가하였을 경우 기존의 PSS 경우와 제안한 IA-QFT PSS를 이용한 경우에 대하여 발전기 위상각, 각속도 및 단차전압의 동특성 응답을 나타내고 있다. 제안한 IA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 발전기의 위상각 및 각속도의 최대 편차량이 감소하였다. 그리고 오버슈터 면에서도 기존의 PSS보다 현저히 감소하였고 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.



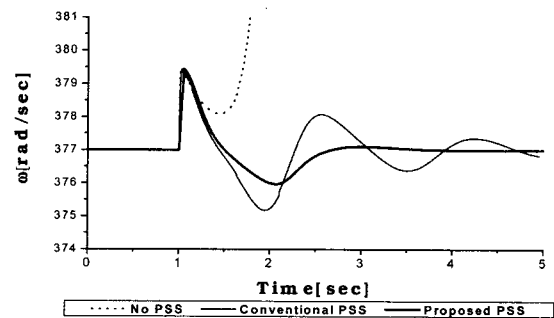
(c) Terminal voltage

그림 9 중부하시 V_{ref} 가 0.1[p.u.] 증가시 동특성 응답

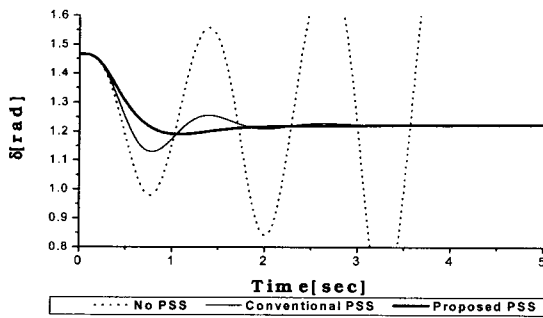
Fig. 9 Responses to 0.1[p.u.] increment of V_{ref} in heavy load



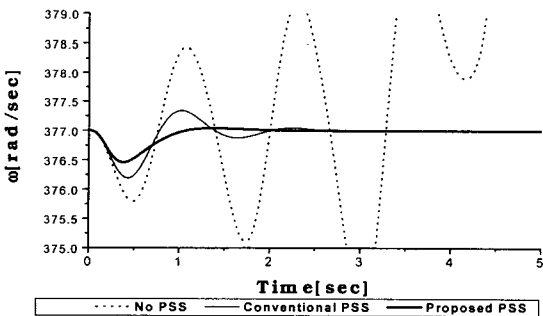
(a) Rotor angle



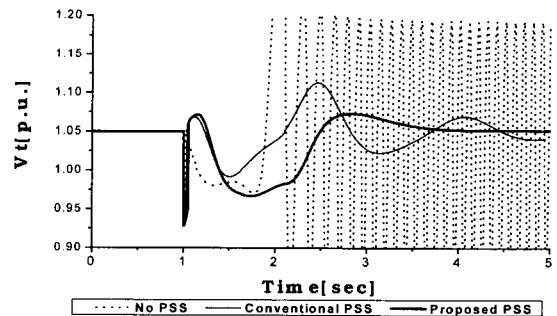
(b) Angular velocity



(a) Rotor angle

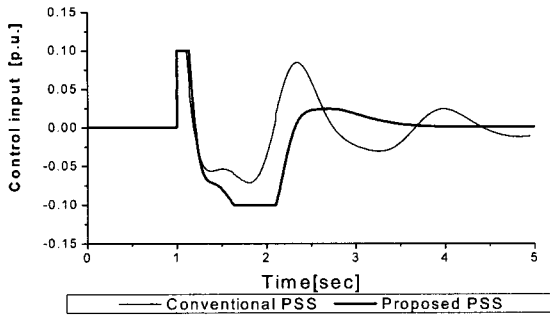


(b) Angular velocity



(c) Terminal voltage

참 고 문 헌



(d) Control input

그림 10 중 부하시 3상 단락 발생시 동특성 응답
Fig. 10 Responses to three-phase fault in heavy load

그림 10은 중 부하시 1초 후에 무한대 모션 부근에서 3상 단락이 50[ms]동안 지속되다가 계통 구성 변경없이 제거되는 경우에 대해 발전기 위상각, 각속도, 단자 전압의 동특성 응답과 제어입력을 나타내었다. 이때 PSS의 입력 신호는 $-0.1[p.u.] \leq u \leq 0.1[p.u.]$ 로 제한하였다 제안한 IA-QFT의 경우가 기존의 PSS를 이용한 경우 보다 정정 시간 또한 우수하여 기존의 PSS보다 빠르게 정상 상태에 도달하였으며 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어성능을 보였다.

6. 결 론

본 논문에서는 IA-QFT를 이용하여 전력 시스템의 불확실성과 다양한 외란에도 불구하고 저주파 진동을 효율적으로 억제할 수 있는 강인한 PSS의 파라미터를 선정하는 방법을 제시하였다. 그리고 QFT제어기 설계 절차인 루프 정형과정에 IA를 도입함으로써 기존 QFT 설계 방법에서 사용된 수많은 시행착오적인 절차없이 모든 설계사양을 만족하도록 하는 PSS의 파라미터를 쉽게 최적화 하였을 뿐만 아니라 제어기의 성능을 향상시킬 수 있었다. 제안한 설계방법의 또 다른 장점으로서는 제어기의 구조와 제어기의 차수를 설계자의 임의로 설정할 수 있다는 점을 들 수 있다. 다양한 부하 변동시 고유치 해석을 통하여 기계적인 모드의 제동비 향상을 확인하였고, 비선형 전력시스템 모델을 이용한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 제안한 IA-QFT PSS의 강인성을 확인하였다. 따라서 제안한 IA-QFT를 이용한 PSS의 설계 방법은 기존의 설계 방법보다 광범위한 동작 조건하에서 저주파 진동을 억제하는 데 매우 우수한 제어성능과 강인성을 보였으며 전력계통의 안정도에 크게 기여함을 알 수 있었다.

장차 본 연구에 기초하여 다기계통의 적용방법과 설계대상 PSS의 입력 형식을 각속도 ω 이외의 two-input PSS설계 문제에 대한 연구가 필요할 것으로 사료된다.

감사의 글

이 논문은 2002학년도 동아대학교 학술연구비(공모과제) 지원에 의하여 연구되었음

- [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, 이정필, 정문규, 이광우, "유전알고리즘을 이용한 전력계통 안정화 장치의 강인한 최적 H_{∞} 튜닝", 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, No. 3 pp.85-94, 2000
- [3] 정형환, 이준탁, 이정필, 한길만, "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] 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.
- [12] I. M. Horowitz, "Quantitative Feedback Theory", IEE Proc., Vol. 129, No. 6, pp. 215-226, 1982.
- [13] I. M. Horowitz, "Survey of Quantitative Feedback Theory(QFT)", Int. J. Cont., Vol. 53, No. 2, pp. 255-291, 1991.
- [14] 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
- [15] C. H. Houpis, S. J. Rasmussen, "Quantitative feedback theory", Marcel dekker, Inc. 1999
- [16] O. Yaniv, "Quantitative feedback design of linear and

nonlinear control systems", Kluwer Academic Publishers, 1999

- [17] 이정필, 정현화, 김창현, 정형환, "QFT를 이용한 전력 계통 안정화 장치 설계", 대한전기학회 추계부문 학술대회 논문집, pp.187-189, 2000.
- [18] K. Mori, M. Tsukiyama, and T. Fukuda, "Immune algorithm with searching diversity and its application to resource allocation problem", T. IEE Japan, Vol. 113-C, No. 10, 1993
- [19] J. S. Chun, H. K. Jung and S. Y. Hahn, "A study on comparison of optimization performances between immune algorithm and other heuristic Algorithms, IEEE Trans. on Magnetics, Vol. 34, No. 5, 1998
- [20] D. Dasgupta, "Artificial immune systems and their applications", Springer-Verlag, 1999

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



정문규(鄭文圭)

1971년 11월 16일 생. 1998년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 현재 한국전력공사

Tel : (051) 200-6747

E-mail : d9134723@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 수료

Tel : (051) 200-6747

E-mail : leejp@mail.taegu.net



주수원(周秀元)

1942년 1월 28일 생. 1968년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1970년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1981년 동 대학원 전기공학과 수료(공학). 1993년 10월 -현재 동아대학교 전기공학과 교수

Tel. 051-200-7735

E-mail : wsjoo@daunet.donga.ac.kr