

QFT를 이용한 전력 계통 안정화 장치 설계

이정필 · 정현화 · 김창현 · 정형환
 동아대학교 전기공학과

Design of Power System Stabilizer using QFT

J. P. Lee, H. H. Chung, C. H. Kim, H. H. Chung
 Dept. of Electrical Eng., Dong-A University.

Abstract - In this paper, QFT robust control strategy is proposed to improve stability of power systems in the presence of parametric uncertainty. The basic idea in QFT is to convert design specifications of a closed loop system and plant uncertainties into robust stability and performance bounds on the open loop transmission of the nominal system and then to design a controller by using the gain-phase loop shaping technique. The robustness of the QFT controller has been investigated on a single machine infinite bus model by nonlinear simulations.

1. 서 론

현대 전력계통에서 발전자 시스템은 고속 전압 조정기와 lead/lag PSS의 형태를 갖는 보조 여자 제어기로 구성된다. 일반적으로 PSS를 설계하기 위한 기존의 기법들은 주로 상 보상 기법, 극배치 기법 등이 제안되었다[1,2]. 이러한 기법들은 동작점 부근의 선형화된 모델에 의하여 제어기를 설계하였기 때문에 불확실성이 많이 존재하는 전력계통에서는 정확한 제어 목적을 달성할 수가 없다. 이를 위하여 최근 전력 계통 안정화 장치의 설계를 위하여 제어기 설계 단계에서 모델의 불확실성을 취급할 수 있는 강인 제어기법에 관한 연구[3]가 활발하게 진행되고 있는 실정이지만 H_∞ 이론과 같은 현대 강인제어 이론은 수학적인 치밀성을 갖는 대신 놈(norm)의 사용으로 인해 과도설계(over-design)의 문제와 설계한 제어기가 복잡하여 실제 온라인(on-line) 제어 문제에 적용하기 어려우며 나아가서 시간 지연의 문제를 포함하고 있다. 따라서 이러한 문제점을 해결하고자 고전제어 이론을 근거로 하여 Horowitz[4]에 의해 제안된 주파수 영역에서의 강인 제어 설계 방법인 QFT(Quantitative Feedback Theory)[5,6]를 도입하였다. QFT는 전력계통에 존재하는 불확실성과 외부 외란에 대하여 강인한 제어성능을 보장하기 위해 니콜스 차트를 이용한 주파수 영역에서의 강인한 제어기 설계 방법이다.

본 논문에서는 전력 계통의 저주파 진동의 억제를 위해 QFT를 이용한 강인한 제어기 설계방법을 제시하였고, 제안한 제어기의 강인성을 검증하기 위하여 1기 무한대 모선계통에 적용하여 비선형 시뮬레이션을 수행하였다.

2. 전력시스템의 수학적 모델

본 논문에서 사용한 모델 계통은 1기 무한대 모선 계통으로써 그림 1과 같다. 그림 1은 동기기 및 여자기 모델을 종합한 블록선도를 나타내고 있다.

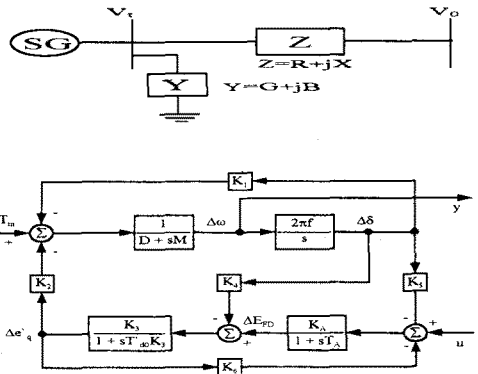


그림 1 1기 무한대 모선 계통

이 모델은 기계적 입력을 고정시킨 후 평형 상태에서 선형화한 것이다. 일반적으로 전력 시스템의 안정도 해석에 사용되며, 특히 저주파수 진동을 해석하기 위한 모델이다. 그림에서 ω 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 1을 기초로 한 1기 무한대 모선의 상태 방정식은 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

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

여기서,

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

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

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

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

3. QFT 제어 이론

QFT는 Horowitz에 의해 창안되었으며, 이것은 지정된 플랜트에 존재하는 불확실성에 대하여 강인한 제어 성능을 보장하기 위해 니콜스 차트를 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 2와 같은 피드백 제어 시스템에 적용된 주파수 영역의 설계 이론이며, 주어진 제어 성능을 만족하는 제어기의 전달함수를 구하는 것이다.

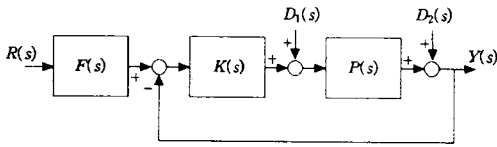


그림 2 피드백 제어 시스템

여기서, $P(s)$ 는 불확실성을 포함한 플랜트를 나타내고, $K(s)$ 는 제어기이며 $F(s)$ 는 입력 필터이다. 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(pre-filter) $F(s)$ 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 QFT를 이용한 제어기 설계를 위해서는 다음과 같은 세 가지 사양을 필요로 하게 된다.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq \gamma, \text{ for all } P(s) \in \mathcal{P} \quad (2)$$

$$|a(\omega)| \leq \left| \frac{F(j\omega)L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq |b(j\omega)| \text{ for all } P(s) \in \mathcal{P} \quad (3)$$

$$\left| \frac{P(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq |d(\omega)| \text{ for all } P(s) \in \mathcal{P} \quad (4)$$

위의 식 (2)은 강인 안정도 성능 사양이며, 식 (3)는 추종성능 경계사양, 식 (4)는 외란 억제 경계를 나타내는 성능 사양이다. 그리고 $L(s) = K(s)P(s)$ 이며 개루프 전달함수이며, \mathcal{P} 는 불확실성 플랜트 집합을 나타낸다. QFT 설계 절차는 다음과 같이 요약 될 수 있다.

① 플랜트의 템플레이트 발생. - 주어진 불확실성을 포함한 플랜트 $P(s) \in \mathcal{P}$ 에 대하여, 플랜트의 특성과 사양에 따라서 일련의 주파수 $\omega_i (i=1, 2, \dots, l)$ 을 선택하고 복소 평면상에 모든 주파수 ω_i 에 대하여 플랜트 집합 $\mathcal{P}(j\omega_i)$ 의 값을 계산한다. 이 플랜트 집합을 플랜트 템플레이트(templates)라 한다.

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 $P(s) \in \mathcal{P}$ 에 대한 페루프 시스템의 사양이 개루프 공칭의 경우에 대한 사양으로 변환된다.

③ QFT 제어기에 대한 루프 정형(loop shaping). 모든 주파수 범위에서 QFT경계 조건이 만족되고 페루프 공칭 시스템이 안정할 때 까지 루프 정형 방법을 이용하여 니콜스 선도상에 QFT 제어기를 설계한다.

④ 필터(pre-filter) $F(s)$ 설계. - 주파수 영역의 성능 사양을 만족 시키도록 필터 $F(s)$ 를 설계한다.

3. QFT를 이용한 PSS설계

본 장에서는 전력계통의 안정도 향상을 위한 PSS의 설계를 위하여 QFT를 이용한 방법을 제시한다. 본 연구에서는 필터의 설계는 고려하지 않았다. 먼저 QFT를 적용하기 위해 전력시스템에 대한 전달함수는 그림 1에 기초로 하여 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다. 여기서 시스템의 입력은 기준전압 ΔV_{ref} 이고, 피드백 되어져 제어기로 들어가는 출력은 회전자 각속도 $\Delta \omega$ 이다.

$$P(s) = \frac{\Delta \omega}{\Delta V_{ref}} = \frac{n_1 s}{(s+d_2)(s+d_3)(s^2+d_1s+d_4)} \quad (5)$$

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

본 연구에서 사용되어진 전력 시스템의 파라미터의 불확실성의 범위는 유효전력 P_e , 무효전력 Q_e , 선로 임피던스 X_e 를 다음과 같이 설정하였다.

$$\begin{aligned} 0.4 &\leq P_e \leq 1.2 \\ -0.2 &\leq Q_e \leq 0.2 \\ 0.6 &\leq X_e \leq 1.1 \end{aligned} \quad (6)$$

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 경계를 계산해야 한다. 본 연구에서 사용된 강인 안정 사양과 외란 억제 성능 사양은 다음과 같이 두었다.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 1.5 \quad (7)$$

$$\left| \frac{P(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 0.025 \quad (8)$$

위의 식과 같은 강인 안정 사양과 외란 억제 성능 사양을 이용한 주파수 응답계의 경계 조건을 이용하여 결정된 루프 정형결과 $L_0(s) = P_0(s)K(s)$ 는 니콜스 선도상에서 그림 3 같이 나타났다.

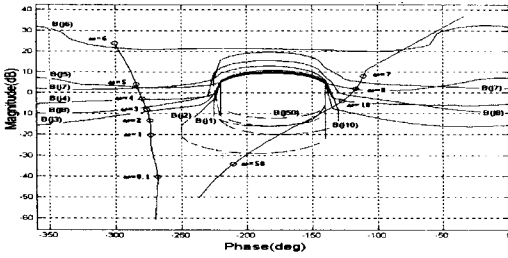


그림 3 QFT 경계와 루프 전달함수 $L_0(s)$

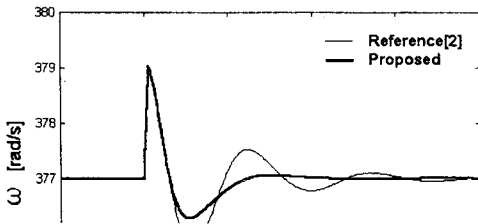
따라서, 설계되어진 제어기 $K(s)$ 의 전달함수는 다음과 같다.

$$K(s) = \frac{369.89s^3 + 2022.38s^2 + 1091.13s + 103.01}{s^3 + 45.31s^2 + 24.48s + 2.53} \quad (9)$$

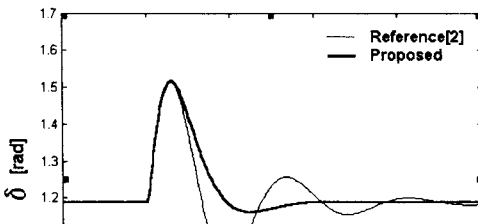
4. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 QFT를 이용하여 전력시스템의 불확실성과 다양한 외란에도 불구하고 저주파 진동을 효율적으로 억제할 수 있는 강인한 제어기를 설계하는 방법을 제시하였다. 제안한 제어기의 강인성을 입증하기 위하여 시스템 운용 조건을 변동한 상태에서 3상 단락이 발생하였을 경우에 있어서 비선형 시뮬레이션을 수행하였으며, 기존의 제어 방식과 비교하여 고찰하였다. 본 연구에서 사용된 동기기, 여자기 및 선로정수와 계통 초기 상태는 문헌[2]와 같다. 이때 PSS의 입력 신호는 $-0.12[\text{p.u.}] \leq u \leq 0.12[\text{p.u.}]$ 로 제한하였다.

그림 4는 정상 부하시에 무한대 모선근처에서 1초후에 3상 단락이 3[cycle]동안 지속한 후 계통의 구성 변경없이 제거되었을 경우에 대한 발전기의 각속도와 위상 각 변화를 나타내었다. 제안한 제어 방식이 종래의 제어 방식보다 초기 과도 응답특성과 정정시간 면에서 우수한 특성을 나타내었다.

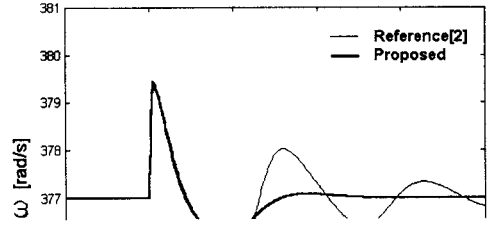


(a) Angular velocity

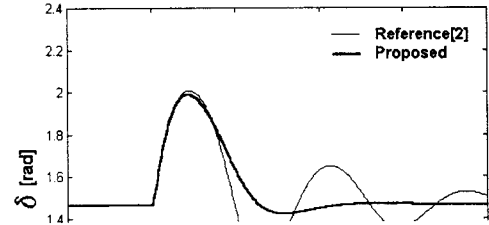


(b) Rotor angle

그림 4 정상 부하시 동특성 응답 ($P_{e0}=1.0[\text{p.u.}]$ $Q_{e0}=0.015[\text{p.u.}]$)



(a) Angular velocity



(b) Rotor angle

그림 5 부하 증가시 동특성 응답 ($P_{e0}=1.2[\text{p.u.}]$ $Q_{e0}=0.2[\text{p.u.}]$)

그림 5는 부하 변동시에 무한대 모선근처에서 1초후에 3상 단락이 3[cycle]동안 지속한 후 계통의 구성 변경없이 제거되었을 경우에 대한 발전기의 각속도와 위상 각 변화를 나타내었다. 제안한 제어 방식이 종래의 제어 방식보다 초기 과도 응답특성과 정정시간 면에서 우수한 특성을 나타내었다.

5. 결론

본 연구에서는 전력계통의 저주파 진동의 억제를 위하여 QFT를 이용한 강인한 PSS를 설계하였다. 다양한 부하 변동시에 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 동특성을 비교, 고찰함으로써 제안한 QFT 제어기의 유용성을 입증하였다. 따라서, 제안한 QFT 이용한 PSS설계 방법은 종래의 설계 방법보다 광범위한 동작 조건하에서 저주파 진동을 억제하는데 매우 우수한 제어 성능과 강인성을 보였으며, 전력계통 안정도에 크게 기여함을 알 수 있었다.

(참고문헌)

- [1] 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
- [2] Y. N. Yu, "Electric power system dynamic", Academic Press, 1983
- [3] 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, 475-481, 1994.
- [4] I. M. Horowitz, "Survey of Quantitative Feedback Theory(QFT)", Int. J. Cont., Vol. 53, No. 2, pp. 255~291, 1991.
- [5] C. H. Houpis, S. J. Rasmussen, "Quantitative feedback theory", Marcel Dekker, Inc. 1999
- [6] O. Yaniv, "Quantitative feedback design of linear and nonlinear control systems", Kluwer Academic Publishers, 1999