

QFT와 유전 알고리즘을 이용한 발전소 조속기 속도제어계의 설계

(A Design of Speed Control Systems for the Governor in Power Station
using QFT and Genetic Algorithm)

김주식*, 유정웅**

(Ju-Sik Kim • Jeong-Woong Ryu)

요 약

본 연구에서 고려된 발전소 조속기의 속도제어계는 레귤레이터(PID 제어기), 액츄에이터와 터빈으로 구성되어 있다. 이 계통에 파라미터 불확실성과 외란이 고려되면, PID 제어만으로는 만족한 제어성능을 얻지 못할 수도 있다. 따라서 플랜트 불확실성과 외란에 대해 요구된 계통의 제어성능을 얻을 수 있는 설계기법의 도입이 필요하다. 본 연구에서는 발전설비의 안정된 운전을 위한 설계기법으로 QFT를 이용하였으며, QFT의 루프형성 근사화기법에 유전 알고리즘을 도입하여 개루프 전달함수의 계수를 식별하는 방법을 제안하였다. 그리고 이 기법을 이용해서 발전소 조속기의 속도제어계를 설계하였다.

Abstract

Speed control systems of the governor in power station used in this study is organized by the regulator (PID controller), actuator and turbine. Considering parameter uncertainties and disturbances in this system, the performance may not be achieved by the PID control. Therefore, a design technique is necessary that accomplish the desired system performance tolerance in despite of plant uncertainty and disturbances. In this study, we used QFT(Quantitative Feedback Theory) to provide stable operation in power plant and presented the genetic algorithm for loop shaping approximation technique of QFT. And we designed speed control systems for the governor using the above approach.

1. 서 론

최근 다른 산업공정에서와 마찬가지로 발전소에서
도 관련기술의 발달로 현대제어이론을 이용한 제어

*정회원 : 충북대학교 전기공학과 박사과정수로

접수일자 : 1998. 2. 24

**정회원 : 충북대학교 전기공학과 교수

기법에 관한 연구가 활발하게 이루어지고 있다. 일반적으로 발전설비의 조속기는 PID 제어기로 구성된 레귤레이터와 전기적 신호를 기계적 신호로 변환하는 액츄에이터, 그리고 터빈으로 구성되어 있다. 그러나 이 발전계통은 서보모터 제어용 유압계통의 비선형성과 계통 자체의 특성변화와 같은 불확실성 등으로 인해서 PID 제어만으로는 원하는 성능을 얻지 못할 수도 있으며, 동조에도 많은 어려움이 따른다. 따라서 계통에 불확실성 또는 외란이 존재할 때, 계통의 성능오차허용도 내에서 제어성능을 보장할 수 있는 제어기법의 도입이 필요하다[1, 2].

QFT(Quantitative Feedback Theory)는 플랜트에 존재하는 불확실성 또는 외란에 대해 강인성을 보장할 수 있는 설계방법으로 I. Horowitz에 의해 제안되었다. 이 QFT를 이용하는 제어기법은 모든 설계절차가 주파수영역에서 수행되며, 설계과정에서 가장 중요한 부분을 차지하고 있는 루프형성(Loop Shaping)은 기준시간응답에 대응하는 주파수응답의 경계조건을 Nichols 선도에 표현하고, 이러한 조건에 맞는 루프응답을 형성한 후 개루프 전달함수를 결정하는 방법이다[3, 4].

기존 QFT의 루프형성기법은 주어진 경계조건에 적합하도록 영점과 극점을 계속적으로 추가해 가는 시행착오(Trade-offs)법과 그 개선방식 그리고 시스템 식별방법을 이용하는 기법들이 제안되었다[3~7]. 그러나 이 기법들에는 반복연산의 수행, 오차 및 식별할 전달함수의 차수결정에 대한 해를 제공하지 못하는 문제점이 존재한다.

본 연구에서는 QFT의 루프형성에 의해 얻어진 개루프 전달함수의 결정을 위한 루프형성 근사화기법과 유전 알고리즘을 이용한 차수결정방법을 제안한다. 근사화기법은 각각의 주파수에서 크기와 위상이 복소평면의 허용영역에 놓이도록 개루프 전달함수를 결정하는 문제를 파라미터의 식별문제로 변환하는 것에 근거를 두고 있으며[8], 유전 알고리즘은 이 문제에서 설계된 개루프 전달함수의 차수결정 즉, 모델확인을 위해 사용하였다. 그리고 배압변과 수리계의 불확실성을 고려한 충주 제1수력발전소의 조속기 속도제어계에 QFT를 적용하고, 루프형성과정에

제안한 기법을 이용하여 강인 제어기를 설계하였다. 여기서, 설계를 위해 필요한 경계조건은 제작자가 제시한 응답특성과 안정조건 등을 고려하여 설정하였으며, 설계된 계통의 시간응답과 주파수응답특성으로부터 제안된 기법의 유용성을 보였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 충주 제1수력의 조속기를 수학적으로 모델링하였고, 3장에서는 QFT의 루프형성 근사화기법에 대해서 기술하였다. 4장에서는 유전 알고리즘을 이용한 모델확인방법에 대해서 고려하고, 5장에서는 조속기 속도제어계에 QFT를 적용하여 모의실험한 결과를 기술하였다. 그리고 6장에서 결론을 맺는다.

2. 발전소 조속기의 모델링

충주 제1수력 조속기 속도제어계의 기본구성은 그림 1과 같고, 액츄에이터 $G_{af}(s)$ 와 터빈 $G_{um}(s)$ 로 구성된 플랜트의 전달함수는 각각 다음과 같다[1, 2].

$$G_P(s) = G_{af}(s) \cdot G_{um}(s) \tag{1}$$

여기서,

$$G_{af}(s) = \frac{K_2 B(s)}{A(s) + K_2 K_3 B(s)}$$

$$G_{um}(s) = \frac{1 - T_w s}{0.5 T_w T_m s^2 + T_m s}$$

$$A(s) = MT_1 T_c T_s s^5 + \{(M + CT_1) T_s + MT_1 K_6\} T_c s^4 + \{(K_7 T_i + C) T_s + (M + CT_1) K_6\} T_c s^3 + \{(K_7 T_i + C) K_6 + K_7 T_s\} T_c s^2 + K_6 K_7 T_c s$$

$$B(s) = K_5 K_8$$

이다.

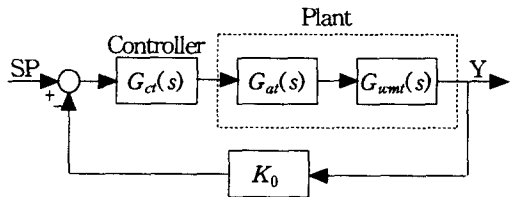


그림 1. 충주 수력발전소 조속기의 속도제어계
Fig. 1. Speed control systems of governor in Chungju hydraulic power station

표 1. 파라미터 값
Table 1. Parameter values

parameter of the plant	value
Speed detector K_0	1
Speed control gain K_1	20
Power amplifier K_2	0.02
Position detector K_3	10
Converter force K_5	0.99
Restoring ratio K_6	0.07
Spring Constant K_7	0.5
Conversion coefficient of servomotor stroke K_8	1.932×10^{-3}
Weight of converter moving element M	6.2×10^{-5}
Coefficient of viscosity C	2.49×10^{-2}
Time constant of converter position T_i	0.02
Time constant of distributing value T_s	0.01
Time constant of servomotor T_c	0.112
Water starting time T_w	1.51
Mechanical starting time T_m	8.63

그리고 각각의 파라미터의 값은 표 1에 나타내었고, 고려한 불확실성은 다음과 같은 범위에서 존재하며,

$$\begin{aligned} K_8 &\in [0.8 \times 1.932 \times 10^{-3}, 2 \times 1.932 \times 10^{-3}] \\ T_w &\in [0.755, 1.51] \\ T_c &\in [0.0896, 0.1344] \end{aligned} \quad (2)$$

플랜트의 공칭값은 다음으로 주어진다.

$$\begin{aligned} K_8 &= 2 \times 1.932 \times 10^{-3} \\ T_w &= 0.755 \\ T_c &= 0.1344 \end{aligned} \quad (3)$$

3. QFT의 루프형성 근사와기법

본 연구에서 이용한 루프형성기법은 루프 전달함수를 결정하는 문제를 식별문제로 변환한 것이다. 이 기법은 주파수응답에 의해서 형성된 입출력 데이터를 벡터형태로 변환한 다음, RLS(Recursive Least Square) 방법을 사용하여 루프 전달함수의 계수를 식별하는 방법이다[5].

실제조건에 의해 얻어진 주파수응답으로부터 루프형성 근사화기법을 얻기 위해 종속보상기와 플랜트의 전달함수를 조합한 다음과 같은 루프 전달함수 $L_0(s)$ 를 고려하자.

$$L_0(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (4)$$

여기서, $n \geq m$ 이다. 임의의 주파수 ω_i 에서 $L_0(s)$ 의 크기와 위상을 A_i 와 Φ_i 로 놓으면 식 (4)는 다음과 같이 표현된다.

$$\begin{aligned} L_0(j\omega_i) &= \frac{b_m(j\omega_i)^m + b_{m-1}(j\omega_i)^{m-1} + \dots + b_0}{(j\omega_i)^n + a_{n-1}(j\omega_i)^{n-1} + \dots + a_0} \\ &= A_i \exp(j\Phi_i) = M_i + jN_i \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, $M_i = A_i \cos \Phi_i$, $N_i = A_i \sin \Phi_i$ 이고, 아래첨자 i 는 ω 의 i 번째를 나타낸다.

식 (5)를 실수부와 허수부로 구분, 정리하여 벡터 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$y_{Ri} = X_{Ri} \theta \quad (6)$$

$$y_{Ii} = X_{Ii} \theta \quad (7)$$

여기서 $X_{Ri} \in R^{m+n+1}$, y_{Ri} 와 y_{Ii} 는 각각 스칼라값이고, 실수부벡터, 허수부벡터 $X_{Ii} \in R^{m+n+1}$, 계수벡터 $\theta \in R^{m+n+1}$ 를 다음과 같이 정의하면,

$$X_{Ri} = [P_{Ri} : Z_{Ri}] \quad (8)$$

$$X_{Ii} = [P_{Ii} : Z_{Ii}] \quad (9)$$

$$\theta = [a_{n-1} \ a_{n-2} \ \dots \ a_0 : b_m \ b_{m-1} \ \dots \ b_0]^T \quad (10)$$

이고, y_{Ri} , y_{Ii} , $P_{Ri} \in R^n$, $P_{Ii} \in R^n$, $Z_{Ri} \in R^{m+1}$, $Z_{Ii} \in R^{m+1}$ 는 각각 다음과 같이 정리된다.

[경우 1] $n = 2p + 1$, $m = 2q + 1$ 인 경우

$$P_{Ri} = [\alpha \omega_i^{n-1} M_i \ \alpha \omega_i^{n-2} N_i \ \beta \omega_i^{n-3} M_i \ \dots \ M_i]$$

$$P_{Ii} = [\alpha \omega_i^{n-1} N_i \ \beta \omega_i^{n-2} M_i \ \beta \omega_i^{n-3} N_i \ \dots \ N_i]$$

$$Z_{Ri} = [0 \ \delta \omega_i^{m-1} \ 0 \ \gamma \omega_i^{m-3} \ \dots \ -1]$$

$$Z_{Ii} = [\delta \omega_i^m \ 0 \ \gamma \omega_i^{m-2} \ 0 \ \dots \ 0]$$

$$y_{Ri} = \alpha \omega_i^n N_i$$

$$y_{Ii} = \beta \omega_i^n M_i$$

- i) $n=2(2p'+1)-1, m=2(2q'+1)-1$ 이면,
 $\alpha=1, \beta=-1, \gamma=1, \delta=-1$ 이다.
- ii) $n=2(2p'+1)-1, m=4(q'+1)-1$ 이면,
 $\alpha=1, \beta=-1, \gamma=-1, \delta=1$ 이다.
- iii) $n=4(p'+1)-1, m=2(2q'+1)-1$ 이면,
 $\alpha=-1, \beta=1, \gamma=1, \delta=-1$ 이다.
- iv) $n=4(p'+1)-1, m=4(q'+1)-1$ 이면,
 $\alpha=-1, \beta=1, \gamma=-1, \delta=1$ 이다.

여기서, $n, m, p, q, p', q' = 0, 1, 2, \dots$ 이다.

[경우 2] $n=2p+1, m=2q$ 인 경우

$$P_{Ri} = [\alpha\omega_i^{n-1}M_i \ \alpha\omega_i^{n-2}N_i \ \beta\omega_i^{n-3}M_i \ \dots \ M_i]$$

$$P_{\bar{i}} = [\alpha\omega_i^{n-1}N_i \ \beta\omega_i^{n-2}M_i \ \beta\omega_i^{n-3}N_i \ \dots \ N_i]$$

$$Z_{Ri} = [\gamma\omega_i^m \ 0 \ \delta\omega_i^{m-2} \ 0 \ \dots \ -1]$$

$$Z_{\bar{i}} = [0 \ \delta\omega_i^{m-1} \ 0 \ \gamma\omega_i^{m-3} \ \dots \ 0]$$

$$y_{Ri} = \alpha\omega_i^n N_i$$

$$y_{\bar{i}} = \beta\omega_i^n M_i$$

- i) $n=2(2p'+1)-1, m=2(2q'+1)$ 이면,
 $\alpha=1, \beta=-1, \gamma=1, \delta=-1$ 이다.
- ii) $n=2(2p'+1)-1, m=4q'$ 이면,
 $\alpha=1, \beta=-1, \gamma=-1, \delta=1$ 이다.
- iii) $n=4(p'+1)-1, m=2(2q'+1)$ 이면,
 $\alpha=-1, \beta=1, \gamma=1, \delta=-1$ 이다.
- iv) $n=4(p'+1)-1, m=4q'$ 이면,
 $\alpha=-1, \beta=1, \gamma=-1, \delta=1$ 이다.

여기서, $n, m, p, q, p', q' = 0, 1, 2, \dots$ 이다.

[경우 3] $n=2p, m=2q+1$ 인 경우

$$P_{Ri} = [\beta\omega_i^{n-1}N_i \ \alpha\omega_i^{n-2}M_i \ \alpha\omega_i^{n-3}N_i \ \dots \ M_i]$$

$$P_{\bar{i}} = [\alpha\omega_i^{n-1}M_i \ \alpha\omega_i^{n-2}N_i \ \beta\omega_i^{n-3}M_i \ \dots \ N_i]$$

$$Z_{Ri} = [0 \ \delta\omega_i^{m-1} \ 0 \ \gamma\omega_i^{m-3} \ \dots \ -1]$$

$$Z_{\bar{i}} = [\delta\omega_i^m \ 0 \ \gamma\omega_i^{m-2} \ 0 \ \dots \ 0]$$

$$y_{Ri} = \alpha\omega_i^n M_i$$

$$y_{\bar{i}} = \alpha\omega_i^n N_i$$

- i) $n=2(2p'+1), m=2(2q'+1)-1$ 이면,
 $\alpha=1, \beta=-1, \gamma=1, \delta=-1$ 이다.

- ii) $n=2(2p'+1), m=4(q'+1)-1$ 이면,
 $\alpha=1, \beta=-1, \gamma=-1, \delta=1$ 이다.
 - iii) $n=4p', m=2(2q'+1)-1$ 이면,
 $\alpha=-1, \beta=1, \gamma=1, \delta=-1$ 이다.
 - iv) $n=4p', m=4(q'+1)-1$ 이면,
 $\alpha=-1, \beta=1, \gamma=-1, \delta=1$ 이다.
- 여기서, $n, m, p, q, p', q' = 0, 1, 2, \dots$ 이다.

[경우 4] $n=2p, m=2q$ 인 경우

$$P_{Ri} = [\beta\omega_i^{n-1}N_i \ \alpha\omega_i^{n-2}M_i \ \alpha\omega_i^{n-3}N_i \ \dots \ M_i]$$

$$P_{\bar{i}} = [\alpha\omega_i^{n-1}M_i \ \alpha\omega_i^{n-2}N_i \ \beta\omega_i^{n-3}M_i \ \dots \ N_i]$$

$$Z_{Ri} = [\gamma\omega_i^m \ 0 \ \delta\omega_i^{m-2} \ 0 \ \dots \ -1]$$

$$Z_{\bar{i}} = [0 \ \delta\omega_i^{m-1} \ 0 \ \gamma\omega_i^{m-3} \ \dots \ 0]$$

$$y_{Ri} = \alpha\omega_i^n M_i$$

$$y_{\bar{i}} = \alpha\omega_i^n N_i$$

- i) $n=2(2p'+1), m=2(2q'+1)$ 이면,
 $\alpha=1, \beta=-1, \gamma=1, \delta=-1$ 이다.
- ii) $n=2(2p'+1), m=4q'$ 이면,
 $\alpha=1, \beta=-1, \gamma=-1, \delta=1$ 이다.
- iii) $n=4p', m=2(2q'+1)$ 이면,
 $\alpha=-1, \beta=1, \gamma=1, \delta=-1$ 이다.
- iv) $n=4p', m=4q'$ 이면,
 $\alpha=-1, \beta=1, \gamma=-1, \delta=1$ 이다.

여기서, $n, m, p, q, p', q' = 0, 1, 2, \dots$ 이다.

위에서 얻은 데이터에 의해서 루프 전달함수의 계수 벡터 θ 를 식별하기 위해 $X_i \in R^{m+n+1}$ 와 y_i 를 다음과 같이 정의하면,

$$X_i = \exp(ki) \cdot (X_{Ri} + X_{\bar{i}}) \tag{11}$$

$$y_i = \exp(ki) \cdot (y_{Ri} + y_{\bar{i}}) \tag{12}$$

여기서, $\exp(ki)$ 는 가중치이고, $0 \leq k < 1$ 이다.

식 (6), (7), (11)과 (12)로부터 θ 의 i 번째 식별값 $\hat{\theta}_i$ 를 다음과 같은 최소자승형태의 식으로 표현할 수 있다 [9].

$$\hat{\theta}_i = \left[\sum_{i=1}^N X_i^T X_i \right]^{-1} \left[\sum_{i=1}^N X_i^T y_i \right] \tag{13}$$

그러나 식 (13)에서 식별할 루프 전달함수가 고차이면, $\left| \left[\sum_{i=1}^N X_i^T X_i \right] \right| \neq 0$ 가 될 수 있으므로 다음과 같은 순환형의 사용이 필요하다.

$$\hat{\theta}_i = \hat{\theta}_{i-1} + K_i \varepsilon_i \tag{14}$$

$$K_i = P_i X_i^T \tag{15}$$

$$\varepsilon_i = y_i - X_i \hat{\theta}_{i-1} \tag{16}$$

여기서, $P_i \in R^{(n+m+1) \times (n+m+1)}$ 와 $K_i \in R^{n+m+1}$ 는

$$P_i = P_{i-1} - \frac{P_{i-1} X_i^T X_i P_{i-1}}{1 + X_i P_{i-1} X_i^T}$$

$$K_i = \frac{P_{i-1} X_i^T}{1 + X_i P_{i-1} X_i^T}$$

이고, ε_i 는 i 번째 추정오차이다[10].

4. 유전 알고리즘에 의한 모델확인

모델확인의 목적은 식별된 모델에 대한 주관적, 객관적 기준을 만족하도록 하는 것과 요구된 모델 정확도의 한계 내에서 최소의 가능한 복잡성의 모델을 얻는 것이다. 따라서 모델의 차수결정과 관련된 테스트는 파라미터화 된 모델의 모든 식별에 관련하고, 확률적 판정 기준은 관점의 수를 고려하여 개선되어야 할 것이다[11]. 본 연구에서는 위의 개선을 위해 유전 알고리즘을 이용하였으며, 제안한 모델확인의 동작원리는 다음과 같이 설명할 수 있다.

먼저 문제에 대한 해를 염색체로 표현해야 한다. 본 연구에서 각 개체에 대한 루프형성기법은 주파수 응답 한계조건들로부터 루프 전달함수를 결정하는 문제를 식별할 계수벡터의 파라미터를 구하는 문제로 변환한 것으로 변수값을 이진 문자열로 표현하였다.

유전 연산자에서 재생산은 각각의 문자열이 가지는 적합도에 따라 그 문자열을 복제하는 과정이다. 본 연구에서는 최상위의 두 개체는 항상 다음 세대에 유전자를 전달하고 최하위의 개체는 도태되는 엘리트 선택방법을 채택한다. 재생산 과정은 탐색 방향을 적합도가 가장 높은 개체 쪽으로 향하게 하지

만 새로운 개체를 생성하지는 못한다. 따라서 다른 구조를 갖는 개체들을 탐구하기 위해 교배연산자와 개체군의 다양성을 유지하는데 중요한 역할을 하는 돌연변이 연산자가 사용된다.

식 (14)로부터 얻은 각각의 개체에 대한 최적화를 위한 적합함수는 각 개체의 적합도를 평가하는 기반이다. 본 연구에서는 적합함수를 주파수응답의 크기와 위상에 대한 오차와 식별한 파라미터 수를 함께 고려하고, 항상 양수의 값을 유지하도록 하기 위해서 다음과 같이 정의하였다.

$$F = \frac{1}{1 + F_e} \tag{17}$$

여기서,

$$F_e = \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N (|A_i - \hat{A}_i| + |\phi_i - \hat{\phi}_i|) \right] \left(1 + \frac{\rho}{N} \right)$$

이고, \hat{A}_i , $\hat{\phi}_i$ 와 ρ 는 각각 식별된 전달함수의 크기, 위상응답과 계수벡터의 파라미터 수이다.

그리고 본 연구에서의 유전 알고리즘 수행순서는 다음과 같다.

- 1) 세대수, 집단수, 교차 확률, 돌연변이 확률, 비트수, 범위설정, 적합함수를 문제 고유의 특성에 맞게 선택한다.
- 2) 초기치 임의의 집단을 발생시킨다.
- 3) 유전 알고리즘의 적합함수 계산, 선택, 교차, 돌연변이를 수행한다.

for $i = 1$: generation

{각 개체에 대한 루프형성 근사화기법의 수행, 적합함수의 계산}

{엘리티즘을 이용해 최상위의 두 개체를 선택하여 새로운 집단에 유지}

{적합도를 양의 값을 유지하도록 스케일링}

{스케일링된 적합도를 근거로 한 두 부모개체의 선택}

{선택된 부모개체로부터 교차연산을 수행}

{엘리티즘을 이용해서 선택한 두 개체에는 영향을 주지 않도록 돌연변이 수행}

end

4) 설정한 세대수에 도달하거나 $F = F - \min(F)$ 의 값이 0이 되면 하나의 값에 수렴하기 때문에 종료되고, 계수벡터의 파라미터 수와 식별값을 결정한다.

5. 모의실험

QFT에 의한 조속기 속도제어계의 설계를 위해서는 설계사양을 정의하여야 한다. 설계사양으로서의 안정조건과 추적한계조건은 각각 다음과 같다.

$$M(\omega) = \left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 3 \text{ [dB]} \quad (18)$$

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

여기서, $L(j\omega)$ 는 개루프 주파수 전달함수이고, 상·하한계조건 $u(\omega)$ 와 $l(\omega)$ 는 표 2와 같다.

표 2. 추적한계조건
Table 2. Tracking bounds for design

ω	0.01	0.05	0.1	0.5	1.0
$l(\omega)$ [dB]	-0.0280	-4.3658	-11.056	-34.431	-45.640
$u(\omega)$ [dB]	1.6092	2.4651	-1.7487	-19.513	-29.026

식 (2)의 불확실성을 도식화한 템플릿, 식 (18)과 (19) 그리고 충주 제1수력의 제작자가 제시한 기준 응답특성을 고려하여 선정된 조속기 속도제어계의 최종 경계조건은 그림 2와 같다.

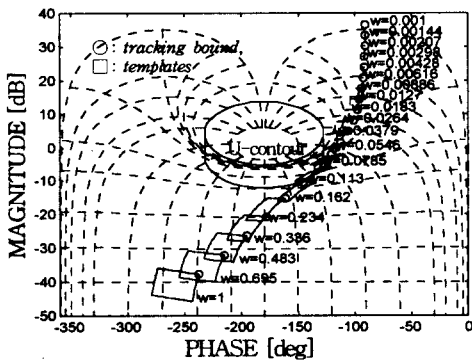


그림 2. 루프형성 경계조건
Fig. 2. Loop shaping bounds on Nichols chart

그림 2의 경계조건들로부터 $L_0(s)$ 를 얻기 위해서 3장과 4장의 알고리즘을 적용한다. 여기서 공칭값은 식 (3)의 값으로 주어지며, 유전 알고리즘에서 사용된 제어 파라미터와 이 기법에 의해서 추정된 계수벡터의 파라미터 수는 표 3과 같다.

표 3. 제어 파라미터와 계수벡터의 파라미터의 수
Table 3. Control parameter and number of parameter in coefficient vector

parameter	value
generation	50
population	30
crossover probability	0.97
mutate probability	0.05
chromosome	5bit
number of numerator	5
number of denominator	10

그리고 루프형성 근사화기법의 수행을 위한 식 (11)과 (12)의 $k=0.5$ 이고, 주파수 $10^{-2} \leq \omega \leq 10^3$ 의 범위에서 100개의 데이터를 사용하였으며, 식별된 개루프 전달함수 $L_0(s)$ 는 다음과 같다.

$$L_0(s) = \frac{-2.802 \cdot 10^5 s^4 - 9.826 \cdot 10^7 s^3 - 5.796 \cdot 10^9 s^2 - 7.706 \cdot 10^{10} s + 1.125 \cdot 10^{11}}{s^{10} + 1.306 \cdot 10^3 s^9 + 4.901 \cdot 10^5 s^8 + 6.032 \cdot 10^7 s^7 + 3.209 \cdot 10^9 s^6 + 8.399 \cdot 10^{10} s^5 + 1.084 \cdot 10^{12} s^4 + 6.188 \cdot 10^{12} s^3 + 1.082 \cdot 10^{13} s^2 + 1.656 \cdot 10^{12} s} \quad (20)$$

그림 3은 최종 경계조건과 식별된 개루프 전달함수 $L_0(s)$ 의 주파수응답을 보여준다. 이 그림으로부터 경계조건에 부합한 전달함수가 추정되었음을 알 수 있다.

그림 1과 식 (20)으로부터 $L_0(s) = G_n(s) / G_d(s)$ 이므로 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_c(s) = \frac{G_n(s)}{G_d(s)} \quad (21)$$

여기서,

$$G_n(s) = 26.3s^6 + 1.1 \cdot 10^4 s^5 + 1.3 \cdot 10^6 s^4 + 6.6 \cdot 10^7 s^3 + 1.6 \cdot 10^9 s^2 + 1.6 \cdot 10^{10} s + 5.7 \cdot 10^{10}$$

$$G_d(s) = s^6 + 9.2 \cdot 10^2 s^5 + 1.4 \cdot 10^5 s^4 + 7.5 \cdot 10^6 s^3 + 1.9 \cdot 10^8 s^2 + 2.3 \cdot 10^9 s + 9.7 \cdot 10^9$$

이다.

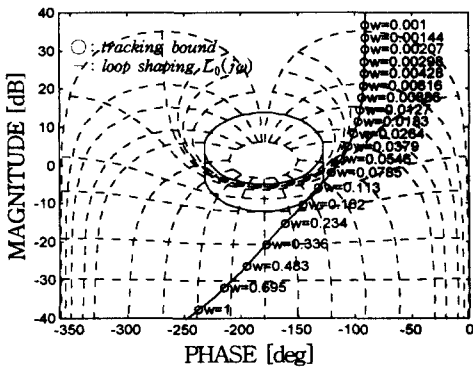


그림 3. Nichols 선도에서의 루프형성 $L_0(s)$
 Fig. 3. Loop shaping $L_0(s)$ on Nichols chart

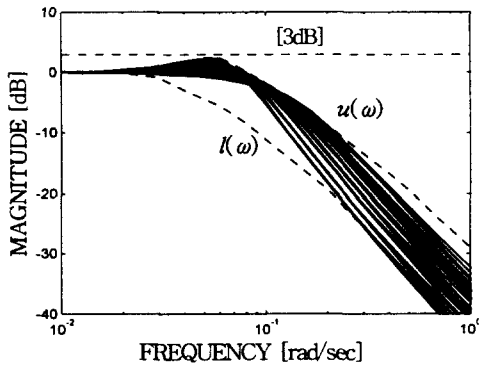


그림 4. 주파수응답
 Fig. 4. Frequency responses

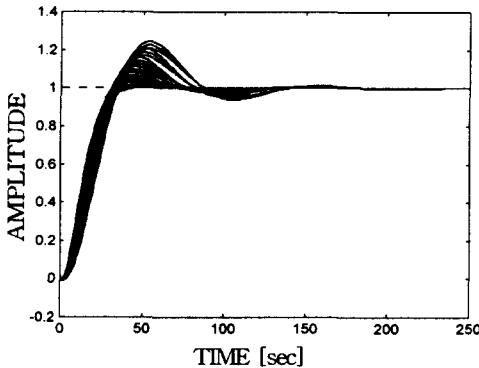


그림 5. 시간응답
 Fig. 5. Unit step responses

그림 4와 그림 5는 요구된 경계조건과 강인성을 만족하도록 설계된 충주 제1수력 조속기 속도제어계

의 파라미터 불확실성 전 범위에 대한 주파수응답과 시간응답을 보여준다. 그림 4로부터 설계된 제어기에 의한 전체 계통의 폐루프 주파수응답이 식 (18)과 (19) 그리고 표 2에서 고려한 안정조건과 추적경계조건을 만족하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 5로부터 설계된 속도제어계는 파라미터 불확실성 전 영역에 대해 150(sec)이내에서 수렴특성을 보이고 있음을 알 수 있다.

6. 결론

본 연구에서는 매개변수 불확실성을 고려한 발전소 조속기 속도제어계에 QFT를 적용하여 동조가 필요 없는 고정제어기를 설계하였으며, 모의실험을 통하여 경계조건을 만족하는 제어성능을 얻었다. 여기서, QFT의 루프형성 근사화기법에 유전 알고리즘을 도입하여 최적의 루프 전달함수를 식별하였으며, 기존의 루프형성기법에서 나타나는 반복연산과 변환오차 그리고 식별할 전달함수의 차수결정에 대한 문제점을 개선하였다.

제안된 기법을 QFT에 적용하여 실제 설계할 경우 계통의 운전효율 향상과 설비의 신뢰성을 보장하면서 다양한 동작조건에 대해 강인성을 보장하는 제어기 설계방식으로 유용하게 활용될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

- [1] 한국수자원공사, "온-라인 PID 자동 동조기 개발연구", 연구보고서, 한국수자원공사, 1993.
- [2] J. S. Kim, C. K. Song, M. H. Kim and J. W. Ryu, "A design of the hydro turbine speed controller using the quantitative feedback theory", ICEE'97, pp. 208~211, 1997.
- [3] I. Horowitz, Synthesis of Feedback Systems, Academic Press, New York, 1963.
- [4] I. Horowitz, Quantitative Feedback Theory (QFT), QFT Publications, 1993.
- [5] I. Horowitz, "Optimum Loop Transfer Function in Single-Loop Minimum Phase Feedback Systems", Int. J. Cont., Vol. 18, No. 1, pp. 97~113, 1973.
- [6] M. Sobhani and S. Jayasuriya, "An Algorithm for Computer - Aided Loop Shaping", 92'ACC, pp. 919~920, 1992.

- [7] F. N. Bailey and M. Kallel, "Loop Gain-Phase Shaping Techniques for Robust Multi-axis Coordinated Motion Control", 92'ACC, pp. 921~923, 1992.
- [8] J. S. Kim, C. K. Song, M. H. Kim, D. G. Lee and J. W. Ryu, "The Recursive Approximation Algorithm for Loop Shaping of QFT", ICEE'96, Vol. 2, pp. 1219~1222, 1996.
- [9] G. H. Golub and C. F. Van Loan, Matrix Computations, The J. Hopkins Univ. Press, 1996.
- [10] T. Soderstrom and P. Stoica, System Identification, Prentice-Hall Inc., 1989.
- [11] R. Johansson, System Modeling and Identification, Prentice-Hall Inc., 1993.
- [12] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Intelligence", IEEE Press, 1989

◇ 著 者 紹 介 ◇



김 주 식(金周植)

1971년 1월 23일생. 1992년 충북대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료.



유 정 응(柳正雄)

1941년 1월 20일생. 1965년 한양대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1987년 단국대학교 대학원 전자공학과 졸업(공학박사). 1979년~현재 충북대학교 공과대학

전기공학과 교수.