

유전 알고리즘을 이용한 개선된 QFT의 루프 형성법 및 원전 증기발생기 수위제어계의 설계

(An Improved Loop Shaping Approach of QFT using Genetic Algorithm and
a Design of Steam Generator Water Level Control System in Nuclear Power Station)

김주식*, 김민환**, 유정웅***

(Ju-Sik Kim, Min-Hwan Kim, Jeong-Woong Ryu)

요 약

원자력발전소의 증기발생기 수위제어계는 과도상태뿐만 아니라 정상운전 시에도 제어계 설계에 사용된 모델링이나, 이론의 적용이 매우 어려운 계통이다. 따라서 기존의 제어방법으로는 안정성에 대한 의문이 제기되어 많은 연구가 이루어지고 있다. 이러한 문제점에 입각하여 본 연구에서는 유전 알고리즘을 이용한 개선된 루프 형성법을 제안하고, 이 방법을 QFT에 적용하여 제어성능을 향상시킬 수 있는 제어계를 설계하였다. 그리고 시뮬레이션 결과로부터 안정성과 효과적인 제어성능을 얻었다.

Abstract

The steam generator water level control system in a nuclear power station has difficulty in its mathematical modeling and theoretical application in both a transient and steady state operation. Therefore, the stability problem of the conventional control methods brings many researches interests to th various methods of a system design in recent years. In this study, an improved loop shaping approach is proposed by applying the genetic algorithm to QFT(Quantitative Feedback Theory) in designing a control system in order to the performance of the system. And the effects of the proposed method are shown by the simulation results.

1. 서 론

현재 운전 3호기 준공으로 국내 원자력발전설비는

원자력발전소에서 운전정지에 큰 영향을 미치는 것 중의 하나가 증기발생기이다. 증기발생기의 수위는 항상 일정해야 하지만, 저출력에서는 주급수량과 증기량의 오차가 크고, 증기덱프밸브의 잦은 개폐로 1978년 국내에 원전이 도입된 후 20년만에 1천 202만[kW]에 이르렀다. 원자력발전이 우리 나라 발전량의 40% 정도를 담당하고 있는 시점에서 원자로의 불시 정지는 직접 손실뿐만 아니라 전력계통에도 영향을 주어 산업체 등에 적지 않은 손실을 미치고 있다.

* 정회원 : 충북대학교 전기공학과
** 정회원 : 충북대학교 전기공학과 박사과정수료
*** 정회원 : 충북대학교 전기공학과 교수
접수일자 : 1998. 8. 13.

인하여 수위의 팽창(Swell) 및 수축(Shrink)현상이 나타난다. 따라서 증기발생기의 수위제어계는 평형상태에서 크게 벗어나지 않도록 주급수량을 조절하고, 정상운전 뿐만 아니라 저출력 과도상태운전 시에도 안정된 제어효과를 얻어야 한다[1-3].

본 연구에서 위와 같은 문제점 해결을 위해 도입한 QFT(Quantitative Feedback Theory)는 플랜트 불확실성 또는 외란에 대해 강인성을 보장할 수 있는 설계방법으로 I. M. Horowitz에 의해 제안되었다 [4, 5]. QFT를 이용한 설계과정에서 루프 형성(Loop Shaping)은 기준시간응답에 대응하는 주파수응답의 경계 조건에 맞는 공칭루프 전달함수를 식별하는 과정이다. 기존 QFT 설계방법에서 사용된 루프 형성 알고리즘은 주어진 경계조건에 적합하도록 영점과 극점을 계속적으로 추가해 가는 절충(Trade-offs)법을 시작으로 그 개선 방식들 그리고 경계조건들을 시간 영역으로 변환하여 시스템 식별방법을 이용하는 기법들이 제안되었다[4-7]. 그러나 이 기법들에는 반복연산을 계속적으로 수행해야 하거나, 변환 상 오차에 의해서 적절치 못한 전달함수를 식별하는 문제가 발생할 수 있다. 따라서 루프형성과정의 개선에 관한 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 QFT를 이용한 폐환제어계의 설계 절차에 의해 원자력발전소 증기발생기의 수위제어계를 재구성하고, QFT의 루프 형성과정에 유전 알고리즘을 이용한 개선된 루프 형성법을 제안하여 고정제어기를 갖는 수위제어계를 설계하였다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 증기발생기를 수학적 모델을 기술하였고, 3장에서는 유전 알고리즘을 이용한 개선된 QFT의 루프 형성법을 제안하였다. 4장에서는 제안된 방법을 이용하여 수위제어계를 설계하였으며, 5장에서는 시뮬레이션 결과를 기술하였다. 그리고 6장에서 결론을 맺는다.

2. 원자력발전소 증기발생기 모델

Westinghouse사의 증기발생기는 입력변수로 주급수량, 증기량, 1차측 냉매온도와 주급수온도를 고려한 857[MW]급 모델로서 그림 1과 같은 다중입력 단일출력 관계를 갖는 계통이다[1-3].

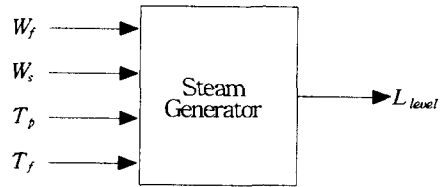


그림 1. Westinghouse 증기발생기 모델
Fig. 1. Westinghouse steam generator model

그리고 이 시스템을 전달함수 관계로 표현하면 다음과 같다.

$$L_{level}(s) = [P_1(s) P_2(s) P_3(s) P_4(s)] \begin{bmatrix} W_j(s) \\ W_s(s) \\ T_p(s) \\ T_f(s) \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, $L_{level}(s)$, $W_j(s)$, $W_s(s)$, $T_p(s)$, $T_f(s)$ 는 각각 라플라스 변환된 수위[%], 주급수량[kg/sec], 증기량[kg/sec], 1차측 냉매온도[K]와 주급수온도[K]를 나타내고, $P_1(s)$, $P_2(s)$, $P_3(s)$, $P_4(s)$ 는 각각 $W_j(s)$, $W_s(s)$, $T_p(s)$ 와 $T_f(s)$ 에 의한 수위변화를 나타낸 것으로 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$P_1(s) = \frac{k_1}{s} + \frac{k_2 \omega_{n1}^2}{s^2 + 2\xi_1 \omega_{n1} s + \omega_{n1}^2} \quad (2)$$

$$P_2(s) = -\frac{k_1}{s} + \frac{0.05k_3}{s + 0.05} \quad (3)$$

$$P_3(s) = \left\{ \frac{k_4(a-b)s}{(s+a)(s+b)} - \frac{ck_5}{s+c} \right\} \exp(-ds) \quad (4)$$

$$P_4(s) = \frac{k_6 \omega_{n2}^2}{s^2 + 2\xi_2 \omega_{n2} s + \omega_{n2}^2} \quad (5)$$

여기서, 각각의 계수값은

$$k_1 = 1.1 \times 10^{-4}$$

$$k_2 = -0.012097 \exp(-0.09067p_d) - 0.001$$

$$t_{p1} = 196.37 \exp(-0.1245p_d) + 30$$

$$\xi_1 = 0.1985 \exp(0.03p_d)$$

$$\omega_{n1} = \frac{\pi}{t_{p1} \sqrt{1 - \xi_1^2}}$$

$$k_3 = 0.0196 \exp(-0.0735p_d) + 0.007$$

유전 알고리즘을 이용한 개선된 QFT의 루프 형성법 및 원전 증기발생기 수위제어계의 설계

$$k_4 = \begin{cases} 1.17 \times 10^{-5} p_i^3 - 6 \times 10^{-4} p_i^2, & p_i \leq 25 \\ + 0.01 p_i + 0.0223 & \\ 0.0801 - 0.0004(p_i - 25), & p_i > 25 \end{cases}$$

$$k_5 = \begin{cases} -2 \times 10^{-7} p_i^3 + 1.1 \times 10^{-5} p_i^2, & p_i \leq 50 \\ + 2.7 \times 10^{-4} p_i + 0.0041 & \\ 2.58 \times 10^{-4}(p_i - 50) + 0.0201, & p_i > 50 \end{cases}$$

$$a = \begin{cases} 0.0195 p_i + 0.0846, & p_i \leq 10 \\ 0.0107 p_i + 0.1725, & 10 < p_i \leq 15 \\ 0.0082 p_i + 0.21, & 15 < p_i \leq 20 \\ 0.0125 p_i + 0.124, & p_i > 20 \end{cases}$$

$$b = \frac{a}{10}$$

$$c = \begin{cases} 0.001 p_i, & p_i \leq 5 \\ 0.399 p_i - 1.99, & 5 < p_i \leq 10 \\ 2.0, & p_i > 10 \end{cases}$$

$$d = 2$$

$$k_6 = 4.43 \times 10^{-4} \exp(0.0348 p_i)$$

$$t_{re} = 195 \exp(-0.16 p_i) + 22$$

$$\zeta_2 = \begin{cases} 0.535 \exp(-0.16 p_i), & p_i \leq 15 \\ 0.172, & p_i > 15 \end{cases}$$

$$\omega_{n2} = \frac{\pi}{t_{re} \sqrt{1 - \zeta_2^2}}$$

이고, p_i 은 고려하는 출력[%FP]을 나타낸다.

3. 유전 알고리즘을 이용한 개선된 QFT의 루프 형성법

본 연구에서 QFT에 의한 증기발생기 수위제어계의 설계과정에 적용한 유전 알고리즘을 이용한 개선된 루프 형성법의 동작원리는 다음과 같다.

먼저 문제에 대한 해를 염색체로 표현해야 한다. 본 연구에서의 루프 형성법은 루프 전달함수를 결정하는 문제를 식별할 계수벡터의 파라미터를 구하는 문제로 변환한 것이므로 변수값인 분모와 분자의 파라미터 수를 이진 문자열로 표현하였다.

유전 연산자에서 재생산은 각각의 스트링이 가지는 적합도에 따라 그 스트링을 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 하지만 새로운 개체를 생성하지는 못한다. 따라서 다른 구조

를 갖는 개체들을 탐구하기 위해 교배 연산자가 사용된다. 교배는 세 단계로 수행되며 먼저 선택 연산자에 의해 개체군에서 두 개의 부모개체가 선택된다. 다음으로 이 둘이 염색체 교환을 일으키기 위한 교배위치가 무작위로 결정된다. 마지막으로 교배위치를 기준으로 두 염색체간에 유전자 값이 교환되어 새로운 두 개의 자식개체가 생성된다.

돌연변이 연산자는 이진 스트링을 염색체로 사용하는 유전 알고리즘의 경우, 각각의 비트에 대해 돌연변이 확률에 따라 0은 1로 1은 0으로 변경하는 연산자이다.

위의 연산에 의해서 생성된 각 개체들에 대한 QFT의 루프 형성법은 다음과 같다. 주파수 응답으로 주어진 경계조건들로부터 루프 전달함수를 식별하기 위해 다음과 같은 $L_o(s)$ 를 고려하자.

$$L_o(s) = \frac{b_m s^m + b_{m-1} s^{m-1} + \dots + b_1 s + b_0}{s^n + a_{n-1} s^{n-1} + \dots + a_1 s + a_0} \quad (6)$$

주파수 ω_i 에서 $L_o(s)$ 의 크기와 위상을 A_i 와 Φ_i 로 놓으면 식 (6)은 다음과 같이 표현된다.

$$L_o(j\omega_i) = \frac{b_m (j\omega_i)^m + b_{m-1} (j\omega_i)^{m-1} + \dots + b_0}{(j\omega_i)^n + a_{n-1} (j\omega_i)^{n-1} + \dots + a_0} = A_i \exp(j\Phi_i) \triangleq M_i + jN_i \quad (7)$$

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

식 (7)을 실수부와 허수부로 구분, 정리하여 벡터 식으로 표현하면 다음과 같다.

$$y_{Ri} = x_{Ri} \theta \quad (8)$$

$$y_{Ii} = x_{Ii} \theta \quad (9)$$

여기서, y_{Ri} 와 y_{Ii} 는 스칼라값이고, $x_{Ri} \in R^{m+n+1}$, $x_{Ii} \in R^{m+n+1}$, $\theta \in R^{m+n+1}$ 를 다음으로 정의하면,

$$x_{Ri} = [P_{Ri} : Z_{Ri}], \quad x_{Ii} = [P_{Ii} : Z_{Ii}],$$

$$\theta = [a_{n-1} \ a_{n-2} \ \dots \ a_1 \ a_0 : b_m \ b_{m-1} \ \dots \ b_1 \ b_0]^T$$

$P_{Ri} \in R^n$, $P_{Li} \in R^n$, $Z_{Ri} \in R^{m+1}$, $Z_{Li} \in R^{m+1}$, y_{Ri} , y_{Li} 는 각각 다음 네 가지의 부연으로 정리되고, $n \geq m$, $n, m, p, q, p', q' = 0, 1, 2, \dots$ 이다.

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

$$P_{Ri} = [\alpha \omega_i^{n-1} M_i \alpha \omega_i^{n-2} N_i \beta \omega_i^{n-3} M_i \beta \omega_i^{n-4} N_i \dots M_i]$$

$$P_{Li} = [\alpha \omega_i^{n-1} N_i \beta \omega_i^{n-2} M_i \beta \omega_i^{n-3} N_i \alpha \omega_i^{n-4} M_i \dots N_i]$$

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

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

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

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

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

[부연 2] $n = 2p + 1$ 이고, $m = 2(q + 1)$ 인 경우

$$P_{Ri} = [\alpha \omega_i^{n-1} M_i \alpha \omega_i^{n-2} N_i \beta \omega_i^{n-3} M_i \beta \omega_i^{n-4} N_i \dots M_i]$$

$$P_{Li} = [\alpha \omega_i^{n-1} N_i \beta \omega_i^{n-2} M_i \beta \omega_i^{n-3} N_i \alpha \omega_i^{n-4} M_i \dots N_i]$$

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

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

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

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

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

[부연 3] $n = 2(p + 1)$ 이고, $m = 2q + 1$ 인 경우

$$P_{Ri} = [\beta \omega_i^{n-1} N_i \alpha \omega_i^{n-2} M_i \alpha \omega_i^{n-3} N_i \beta \omega_i^{n-4} M_i \dots M_i]$$

$$P_{Li} = [\alpha \omega_i^{n-1} M_i \alpha \omega_i^{n-2} N_i \beta \omega_i^{n-3} M_i \beta \omega_i^{n-4} N_i \dots N_i]$$

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

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

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

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

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

[부연 4] $n = 2(p + 1)$ 이고, $m = 2(q + 1)$ 인 경우

$$P_{Ri} = [\beta \omega_i^{n-1} N_i \alpha \omega_i^{n-2} M_i \alpha \omega_i^{n-3} N_i \beta \omega_i^{n-4} M_i \dots M_i]$$

$$P_{Li} = [\alpha \omega_i^{n-1} M_i \alpha \omega_i^{n-2} N_i \beta \omega_i^{n-3} M_i \beta \omega_i^{n-4} N_i \dots N_i]$$

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

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

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

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

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

그리고 X_i 와 y_i 를 다음과 같이 정의하면,

$$X_i = \exp(K \cdot i) \cdot (x_{Ri} + x_{Li}) \tag{10}$$

$$y_i = \exp(K \cdot i) \cdot (y_{Ri} + y_{Li}) \tag{11}$$

여기서, $\exp(K \cdot i)$ 는 가중치이고, $0 \leq K < 1$ 이다. 식 (8)~(11)로부터 다음과 같은 관계식을 얻을 수 있다.

유전 알고리즘을 이용한 개선된 QFT의 루프 형성법 및 원전 증기발생기 수위제어계의 설계

$$y_i = X_i \theta \quad (12)$$

식 (12)로부터 θ 의 ω_i 에 대한 i 번째 식별값 $\hat{\theta}_i$ 를 다음과 같은 최소자승형태의 식으로 표현할 수 있다.

$$\hat{\theta}_i = \left[\sum_{j=1}^N X_j^T X_j \right]^{-1} \left[\sum_{j=1}^N X_j^T y_j \right] \quad (13)$$

그러나 식 (13)은 식별할 전달함수가 고차이거나, 넓은 주파수 영역을 고려하면 $\det \left[\sum_{j=1}^N X_j^T X_j \right] = 0$ 가 될 수 있으므로 다음과 같은 순환형의 사용이 필요하다.

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

여기서, $K_i \in R^{n+m+1}$, ε_i , $P_i \in R^{(n+m+1) \times (n+m+1)}$ 는 각각 다음과 같다.

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

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

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

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

$$f = \frac{1}{1 + \frac{1}{N} \left[\sum_{i=1}^N \lambda e_{A_i} + (1-\lambda) e_{\theta_i} \right] \left(1 + \frac{p_n}{N} \right)} \quad (15)$$

여기서, $e_{A_i} = |A_i - \hat{A}_i|$, $e_{\theta_i} = |\theta_i - \hat{\theta}_i|$ 이고, λ , \hat{A}_i , $\hat{\theta}_i$ 와 p_n 은 각각 가중값, 식별된 전달함수의 크기, 위상응답과 계수벡터의 파라미터 수이다.

그리고 표준화된 적합함수 즉, 스케일링 방법을 다음과 같이 고려하였다.

$$f' = f - \min(f) \quad (16)$$

4. 증기발생기 수위제어계의 설계

QFT의 적용을 위해 증기발생기 수위제어계를 그림 2와 같이 재구성하면, 식 (1)과 그림 2의 확장 모델로부터 W_s , T_p , T_f 를 외란의 형태로 간주할 수 있다. 그러면 플랜트의 불확실성은 $P_1(s)$ 에서만 고려할 수 있게 된다. 그리고 주급수량에 대한 수위 변화의 관계식 (2)의 $P_1(s)$ 는 저출력 5~20[%FP]의 범위에서 구간 플랜트의 형태를 가지므로 다음 식과 같이 표현할 수 있다.

$$P_1(s) = \frac{b_{p0}s^2 + b_{p1}s + b_{p2}}{s(s^2 + a_{p1}s + a_{p0})} \quad (17)$$

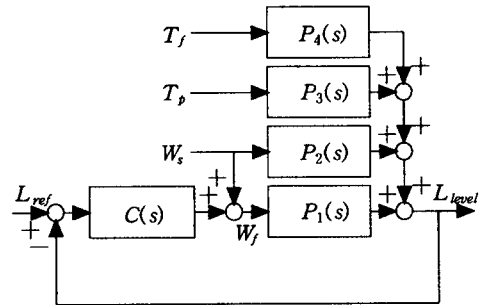


그림 2. QFT 적용을 위한 수위제어계
Fig. 2. Water level control systems to apply QFT

여기서, 각각의 계수값과 공칭모델의 전달함수는 다음과 같다.

$$a_{p0} \in [5.6882 \times 10^{-4}, 5.3013 \times 10^{-3}]$$

$$a_{p1} \in [1.1001 \times 10^{-2}, 5.2670 \times 10^{-2}]$$

$$b_{p0} \in [6.2570 \times 10^{-8}, 5.8315 \times 10^{-7}]$$

$$b_{p1} \in [-9.9672 \times 10^{-6}, -3.7316 \times 10^{-6}]$$

$$b_{p2} = 1.1 \times 10^{-4}$$

$$P_{1o}(s) = \frac{1.1 \times 10^{-4} s^2 - 3.73 \times 10^{-6} s + 6.26 \times 10^{-8}}{s(s^2 + 1.1001 \times 10^{-2} s + 5.6882 \times 10^{-4})}$$

그리고 설계를 위한 안정조건과 추적경계조건은 각각 다음과 같다.

$$\left| \frac{L(j\omega)}{1+L(j\omega)} \right| \leq 4 \text{ [dB] , for } \omega \geq 10^{-4} \quad (18)$$

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

여기서, $L(j\omega) = C(j\omega)P_1(j\omega)$ 이고, $B_L(\omega)$, $B_U(\omega)$ 는 기존 PI 수위제어계의 주파수응답결과를 기준으로 선정하였으며[1], 그 값은 표 1과 같다.

표 1. 추적경계조건
Table 1. Tracking bounds for design

ω [rad/sec]	$B_L(\omega)$ [dB]	$B_U(\omega)$ [dB]
1.00×10^{-3}	-1.32×10^{-1}	-1.55×10^{-2}
5.43×10^{-3}	-2.82×10^{-1}	-2.54×10^{-1}
1.53×10^{-2}	-9.27×10^0	3.46×10^0
3.24×10^{-2}	-1.60×10^1	-5.72×10^0
5.18×10^{-2}	-2.14×10^1	-1.26×10^1
⋮	⋮	⋮

표 1의 조건에 의해서 선정된 증기발생기 수위제어계의 주파수응답 경계조건과 이 조건들로부터 결정된 루프형성의 결과 즉, $L_O(s) = C(s)P_{i_o}(s)$ 의 응답조건들은 그림 3과 같다. 이 데이터를 이용하여 $L_O(s)$ 를 식별한다.

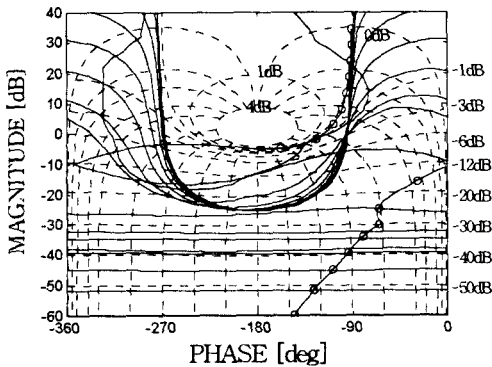


그림 3. 루프형성조건
Fig. 3. Loop shaping bounds

표 2는 본 연구의 유전 알고리즘에 사용된 제어 파라미터와 루프 형성법을 위한 초기조건 그리고 3절의 방법에 의해서 추정된 계수백터의 파라미터 수를 나타낸다. 그리고 제안된 방법에 의해 식별된 공

칭루프와 제어기의 전달함수는 다음과 같다.

$$L_O(s) = \frac{0.011s^4 + 4.47 \times 10^{-4}s^3 + 9.69 \times 10^{-5}s^2 - 3.55 \times 10^{-6}s + 6.74 \times 10^{-8}}{s^6 + 2.13s^5 + 2.52 \times 10^{-1}s^4 + 2.62 \times 10^{-2}s^3 + 3.77 \times 10^{-4}s^2 + 1.28 \times 10^{-5}s} \quad (20)$$

$$C(s) = \frac{100s^2 + 7.4583s + 1.0770}{s^3 + 2.1145s^2 + 0.22772s + 0.022505} \quad (21)$$

표 2. 제어 파라미터, 초기조건과 식별된 차수
Table 2. Control parameter, initial condition and identified order

parameter	value
generation	100
population	30
crossover probability	0.97
mutate probability	0.05
chromosome	3bit
region	$10^{-4} \leq \omega \leq 10^{-1}$
number of data N	100
weighting factor K	0.5
weighting factor λ	0.4
numerator part	5
denominator part	6

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

그림 4와 5는 설계된 제어기에 의한 계통의 주파수응답과 시간응답을 나타낸 것이다. 그림 4로부터 식 (18), (19)와 표 1에서 고려한 안정조건과 추적경계조건이 만족되고 있음을 알 수 있고, 그림 5로부터 설계된 제어계가 5~20[%FP]의 구간에서 기준 입력에 대해 안정된 수렴성을 보이고 있음을 알 수 있다.

제안된 방법의 실제 응용성을 보이기 위한 시뮬레이션으로, 본 연구에서는 다음의 경우에 대해서만 그 결과를 나타내었다. 기준수위 50%에 대해 환경으로 7,000[sec]까지는 10[%FP] 운전, 7,000~8,500[sec]에서는 10~30[%FP] 램프운전, 8,500[sec]이상에서는 30[%FP] 운전구간으로 가정하였으며, 운전구간 중에서 각 입력변수에 대해 $\pm 10\%$ DC 바이어스와 정현파 외란을 고려하였다. 출력변화에 따른 증기량, 1차 측 냉매온도 및 주급수온도의 입력변수 값은 표 3과 같다.

표 3. 입력변수의 값
Table 3. Initial conditions of input variable

Power[%FP]	W_i [kg/sec]	T_b [K]	T_f [K]
10	33.30	568.1	318.2
15	52.51	569.8	348.6
20	76.65	571.5	399.3
25	102.30	573.2	432.7
30	125.28	574.9	444.2

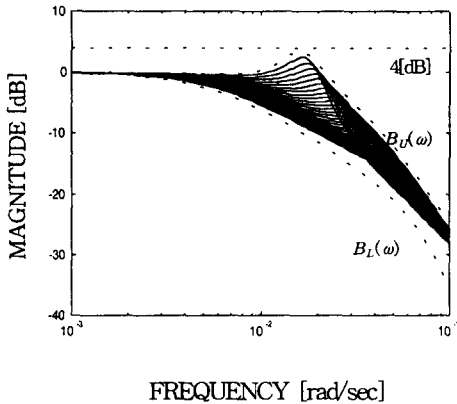


그림 4. 설계된 계통의 주파수응답
Fig. 4. Frequency responses of designed system

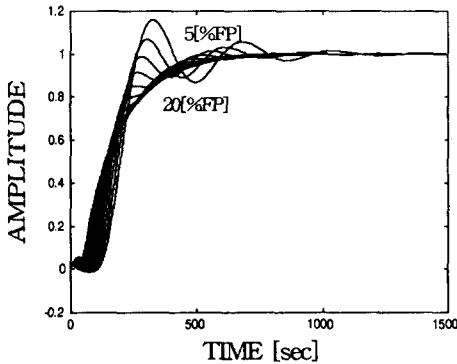
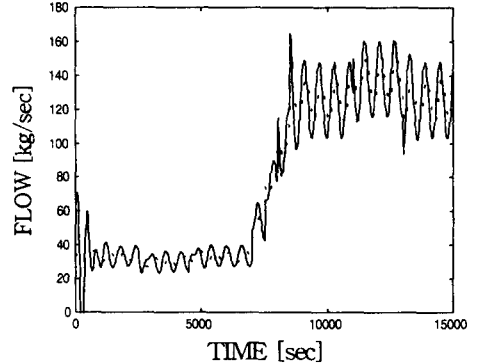


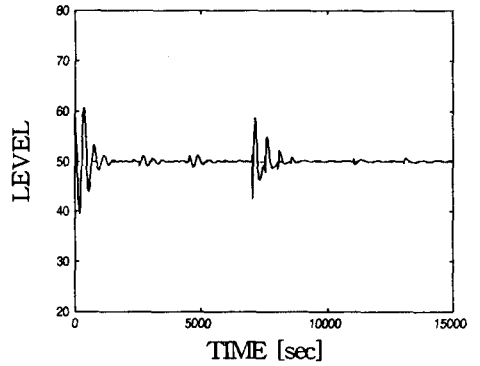
그림 5. 설계된 계통의 시간응답
Fig. 5. Time responses of designed system

그림 6과 7은 위의 시뮬레이션 환경 하에서 기존 PI 수위제어계[1]와 제안된 제어계의 수위변화의 관계를 각각 나타낸 것이다. 이 그림들로부터 제안된 수위제어계가 기존 수위제어계 보다 일정수위를 유

지할 뿐만 아니라 외란에 대해 강인한 특성을 나타낼 수 있다. 그리고 주급수량의 조절에 있어서도 안정된 평형상태를 유지함을 알 수 있다.

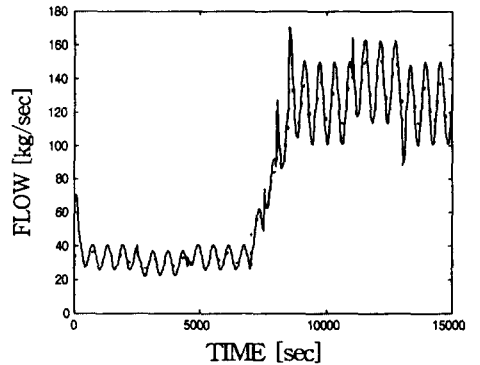


(a) feedwater flow rate



(b) water level

그림 6. PI 수위제어계
Fig. 6. PI water level control system



(a) feedwater flow rate

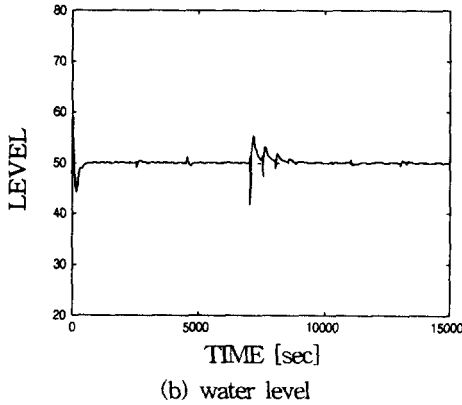


그림 7. 제안된 수위제어계
Fig. 7. Proposed water level control system

6. 결론

본 연구에서는 원자력발전소 증기발생기의 수위제어계를 설계하기 위해 QFT를 적용하고, 설계과정에 유전 알고리즘을 이용한 개선된 루프 형성법을 제안하여 제어기 이득 값의 별도 조정 없이 5~20[%fP] 구간에서 강인성을 보장하는 강인 제어기를 설계하였으며, 시뮬레이션 결과로부터 안정된 제어 효과와 성능을 얻었다.

본 연구의 결과들은 원자력발전소에서 운전 정지에 가장 큰 영향을 미치는 증기발생기의 수위제어계 뿐만 아니라 전체계통의 운전효율향상과 설비의 신뢰성을 보장하면서 다양한 동작조건에 대해 강인성을 보장할 수 있을 것으로 기대된다. 또한 제안된 루프 형성법은 불확실성과 외란을 갖는 계통에 대해 주어진 설계사양을 만족하는 강인제어기를 설계하는데 충분히 적용될 수 있을 것이다.

참 고 문 헌

- [1] 이윤준, "원자력발전소 증기발생기의 저출력 수위조절에 대한 연구", 공학박사학위논문, 서울대학교, 1991.
- [2] 이상정, "계층적제어구조를 이용한 원전제어계통 적용 기술개발에 관한 연구", 연구보고서, 한국원자력연구소, 1994.
- [3] 박기용, "증기발생기 수위제어를 위한 퍼지학습 제어시스템 개발에 관한 연구", 공학박사학위논문, 한국과학기술원, 1996.
- [4] I. M. Horowitz, Quantitative Feedback Design Theory

(QFT), OFT Pub., 1993.

- [5] I. M. Horowitz, "Survey of Quantitative Feedback Theory(QFT)", Int. J. Cont., Vol. 53, No. 2, pp. 255~291, 1991.
- [6] I. Horowitz, "Optimum Loop Transfer Function in Single-Loop Minimum Phase Feedback Systems", Int. J. Cont., Vol. 18, No. 1, pp. 97~113, 1973.
- [7] M. Sobhani and S. Jayasuriya, "An Algorithm for Computer-Aided Loop Shaping", 92'ACC, pp. 919~920, 1992.
- [8] D. Goldberg, Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning, Addison-Wesley Pub. Co., 1989.
- [9] K. Kristinsson and G. A. Dumont, "System Identification and Control Using Genetic Algorithm", IEEE Trans. on AMAC, Vol. 22, No. 5, pp. 1033~1046, 1992.
- [10] 김주식, 유정웅, "QFT와 유전 알고리즘을 이용한 발전소 조속기 속도제어계의 설계", 한국조명·전기설비학회 논문지, 제12권, 제2호, pp. 77~84, 1998.
- [11] J. S. Kim, M. H. Kim, D. G. Lee, C. K. Song and J. W. Ryu, "A Study on Improved Loop Shaping Approach of QFT and Model Validation", ICEE'98, Vol. 2, pp. 693~696, 1998.

◇ 저자소개 ◇

김 주 식 (金周植)

1971년 1월 23일생. 1992년 충북대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사).

김 민 환 (金珉煥)

1958년 9월 3일생. 1985년 충북대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1987년 동 대학원 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 박사과정 수료. 1988년~1993년 LG 생활시스템연구소 주임연구원. 1993년~현재 청주고등학교 교사

유 정 웅 (柳正雄)

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