

원전 증기 발생기 수위 제어를 위한 자기 동조 제어기 설계

Design of Pole-assignment Self-tuning Controller for Steam Generator Water Level in Nuclear Power Plants

최병재, 노희천, 김병국
(Byung-Jae Choi, Hee-Cheon No, Byung Kook Kim)

Abstract : This paper discusses the maintenance of the water level of steam generators at its programmed value. The process, the water level of a steam generator, has the nonminimum phase property. So, it causes a reverse dynamics called a swell and shrink phenomenon. This phenomenon is severe in a low power condition below 15 %, in turn makes the start-up of the power plant too difficult. The control algorithm used here incorporates a pole-assignment scheme into the minimum variance strategy and we use a parallel adaptation algorithm for the parameter estimation, which is robust to noises. As a result, the total control system can keep the water level constant during full power by locating closed-loop poles appropriately, although the process has the characteristics of high complexity and nonlinearity. Also, the extra perturbation signals are added to the input signal such that the control system guarantee persistently exciting. In order to confirm the control performance of a proposed pole-assignment self-tuning controller we perform a computer simulation in full power range.

Keywords: 증기 발생기, 비최소 위상, 병렬 적응 알고리즘, 극점 지정, 자기 동조 적응 제어기

1. 서론

원자력 발전소의 주요 설비중의 하나인 증기 발생기는 전 출력 범위에 걸쳐서 원하는 수위가 유지되어야 된다. 만약 수위가 너무 높으면 터빈으로 나가는 증기에 습분이 동반되어 터빈의 손상을 초래하게 되고, 그와는 반대로 너무 낮으면 증기발생기내의 전열관이 노출될 위험성은 물론 급수 배관에서 열충격(water hammer)이 일어날 위험성마저 존재한다. 그러므로 증기발생기의 수위제어는 충분한 원자로 냉각과 터빈 손상 방지의 측면에서 매우 중요한 요소이다. 그러나 증기 발생기는 수축과 팽창이라는 고유의 특성이 존재하며, 이러한 비최소 위상 특성은 20% 이하의 저출력 운전에서 더욱 심각하다. 뿐만 아니라 증기발생기의 수위 계통은 매우 복잡하고 비선형성을 나타내는 시변 시스템이기 때문에 플랜트(증기발생기 수위 계통)에 관한 정확한 지식은 물론 수학적 모델링마저도 어렵게 만들고 있다. 이러한 여러 가지 요인들의 복합 작용 때문에 원자력 발전소의 전 출력 범위에서 증기 발생기 수위 제어를 완전 자동화하기는 매우 어렵다. 특히, 이러한 비최소 위상 특성과 복잡성은 저출력에서 더욱 심각하게 나타난다. 따라서 전 출력 범위에 걸쳐서 고정된 이득을 사용하는 PID 형태의 고전 제어기로는 저출력에서 고출력까지의 전 출력 범위에 걸쳐서 원하는 제어 성능을 얻을 수 없다. 그 결과 현재 많은 발전소에서는 저출력 운전의 경우 능숙한 운전원에 의한 수동 조작에 의존하고 있다. 이는 원자력 발전소의 기동을 어렵게 만드는 요인이 되어 원자력 발전의 안전성 및 경제성에도 직결되므로 매우 중요한 문제이다.

디지털 마이크로 프로세서의 눈부신 발전에 힘입어, 증기 발생기 수위제어를 위한 적응 제어기 도입 연구가 E. Irving[1]에 의해 처음으로 발표된 이래 많은 사람들에 의해 연구가 진행되고 있다([2], [3]).

본 논문에서는 특별한 형태의 성능 지수를 가지는 일반화된 Minimum Variance 기법에 극점 지정 알고리즘을 추가

한 자기동조 제어기를 설계한다([4], [5]). 어떤 경우에도 안전성이 보장되어야 하므로 극점 지정 방식을 도입하고, 제어 대상 플랜트의 특성 변화에 적절히 적응시키기 위하여 적응 제어기의 일종인 자기 동조 알고리즘을 구현한다. 자기동조 제어계통의 기본적인 구조는 그림 1과 같다[6]. 또한 본 논문에서 사용한 성능 지수는 플랜트의 입력, 출력 그리고 설정치는 물론 부하 외란 항으로 구성되어 있으므로 플랜트의 매개변수들이 성능 지수의 매개변수들과 독립적으로 추정될 수 있다. 이것은 정상상태 오차와 외란을 제거하면서 페루프의 극점들을 원하는 위치로 옮길 수 있도록 매개변수들을 추정할 수 있음을 의미한다.

일반적으로 극점지정 제어기법은 강인하고 신뢰성 있는 제어기 설계 수단을 제공한다. 매개변수를 추정하는 방법으로는 계산양은 다소 많지만 잡음에 강인한 병렬 알고리즘을 사용한다. 기존에는 직렬-병렬 알고리즘을 사용해서 미지 플랜트의 매개변수를 추정하였으나, 이 방법은 알고리즘 자체가 잡음에 강인하지 않기 때문에 실제 플랜트에 적용할 때 수렴을 보장할 수 없다.

2장에서는 제어 대상 플랜트의 수학적 모델링과 매개변수 추정에 대하여 설명한다. 또한 여기서는 매개변수 추정의 안정성을 보장하기 위한 방안에 대해서도 설명한다. 3장에서는 극점 지정 방식의 자기 동조형 적응 제어기에 관하여

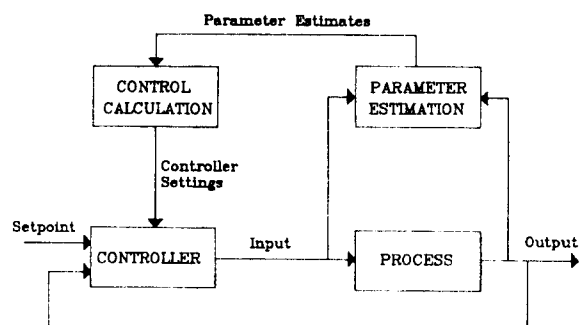


그림 1. 자기동조 제어계통의 구조.
Fig. 1. The structure of self-tuning control system.

접수일자 : 1996. 3. 30., 수정완료 : 1996. 9. 16.
최병재, 김병국 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과
노희천 : 한국과학기술원 원자력공학과

서술한다. 여기서는 적분기를 사용하지 않으면서도 정상상태 오차를 제거하는 방법이 설명된다. 4장에서는 설계한 적응 제어기를 사용하여 증기 발생기의 수위 제어를 모의 실험하는 내용을 자세히 설명한다. 전출력 범위 중에서도 저출력 운전의 경우 자동화가 어려우므로 여기서는 15%의 저출력 운전의 경우에 대해서만 모의 실험을 수행한다. 계속해서 5장에서는 설계한 제어기와 이를 사용한 모의 실험 결과 등에 대하여 결론을 내린다.

II. 플랜트 모델링 및 매개변수 추정

2.1 플랜트 모델링

대부분의 적응제어 알고리즘에서는 제어대상 플랜트의 선형화가 필요하며, 일반적인 이산형 플랜트 모델은 다음의 형태를 취한다.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-d}B(q^{-1})u(t) + q^{-d_1}D(q^{-1})v(t) + C(q^{-1})\xi(t) + \delta \quad (1)$$

여기서 $y(t)$, $u(t)$, 그리고 $v(t)$ 는 각각 플랜트의 출력과 입력 그리고 측정 가능한 부하외란을 나타낸다. $\xi(t)$ 는 측정할 수는 없지만 플랜트의 동작을 방해하는 평균이 0인 임의의 잡음 신호이고, δ 는 플랜트의 offset이다. 그리고 d 와 d_1 은 각각 $u(t)$, $v(t)$ 와 관련된 시간지연을 나타낸다. q^{-1} 은 $q^{-1}y(t) = y(t-1)$ 을 의미하는 일종의 연산자이다. 또한, 다항식 $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $C(q^{-1})$, 그리고 $D(q^{-1})$ 는 다음과 같이 정의된다.

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= a_0 - a_1q^{-1} - \dots - a_{nA}q^{-nA} \\ B(q^{-1}) &= b_0 + b_1q^{-1} + \dots + b_{nB}q^{-nB} \\ C(q^{-1}) &= c_0 + c_1q^{-1} + \dots + c_{nC}q^{-nC} \\ D(q^{-1}) &= d_0 + d_1q^{-1} + \dots + d_{nD}q^{-nD} \end{aligned} \quad (2)$$

위의 (2)는 다음의 조건을 만족한다.

- ① nA , nB , nC , 그리고 nD 는 이미 알고있는 양의 정수이다.
- ② d 와 d_1 은 알고있는 시간지연 상수로 샘플링 주기의 정수배로 표현된다.
- ③ 모델의 매개변수인 a_i , b_i , c_i , 그리고 d_i 는 미지의 값이다.
- ④ $a_0 = c_0 = 1$, $b_0 \neq 0$, 그리고 $d_0 \neq 0$.
- ⑤ $C(q^{-1})$ 은 안정한 다항식이다.
- ⑥ $\epsilon[\xi(t)|F_{t-1}] = 0$, $\epsilon[\xi^2(t)|F_{t-1}] = \sigma^2$

여기서 F_t 는 시간 t 까지의 출력수열에 의해 생성된 sigma algebra이고 ϵ 는 기대치 연산을 나타낸다.

2.2 매개변수 추정

매개변수 추정을 위한 여러 가지 방법 중에서 직렬-병렬 적응 알고리즘은 잡음이 존재할 때 강인하지 않다. 따라서, 여기서는 병렬 적응 알고리즘을 사용하여 적응 제어기에서 필요로 하는 매개변수들을 추정한다. 그 구조는 그림 2과 같다.

그림 2에서 $\hat{O}(q^{-1}) = 1 + \hat{o}_1q^{-1} + \dots + \hat{o}_{nA}q^{-nA}$ 이고 PAA는 매개 변수 적응 알고리즘(Parameter Adaptation Algorithm)을 의미한다.

(1) 로 부터 다음 식이 유도된다.

$$y(t) = \theta^T \phi(t-1) \quad (3)$$

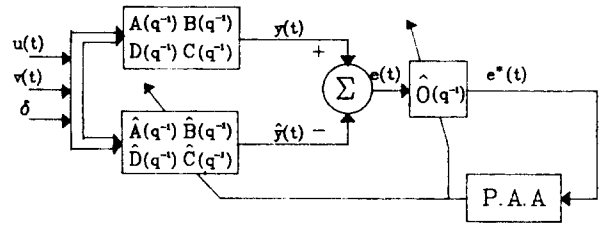


그림 2. 병렬 적응 알고리즘의 구조.

Fig. 2. The structure of parallel adaptation algorithm.

여기서,

$$\begin{aligned} \theta^T &= [\theta_a^T \ \theta_b^T \ \theta_d^T \ \theta_c^T], \\ \theta_a^T &= [a_1 \ a_2 \ \dots \ a_{nA}] \\ \theta_b^T &= [b_0 \ b_1 \ \dots \ b_{nB}] \\ \theta_d^T &= [d_0 \ d_1 \ \dots \ d_{nD}] \\ \theta_c^T &= [c_0 \ c_1 \ \dots \ c_{nC} \ \delta] \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \phi^T(t-1) &= [\phi_y^T(t-1) \ \phi_u^T(t-d) \ \phi_v^T(t-d_1) \ \phi_\xi^T(t)] \\ \phi_y^T(t-1) &= [y(t-1) \ y(t-2) \ \dots \ y(t-nA)] \\ \phi_u^T(t-d) &= [u(t-d) \ u(t-d-1) \ \dots \ u(t-d-nB)] \\ \phi_v^T(t-d_1) &= [v(t-d_1) \ v(t-d_1-1) \ \dots \ v(t-d_1-nD)] \\ \phi_\xi^T(t) &= [\xi(t) \ \xi(t-1) \ \dots \ \xi(t-nC) \ 1]. \end{aligned} \quad (5)$$

그리고 그림 2로부터 다음의 식이 유도된다.

$$\hat{A}(q^{-1})\hat{y}(t) = q^{-d}\hat{B}(q^{-1})u(t) + q^{-d_1}\hat{D}(q^{-1})v(t) + \hat{C}(q^{-1})\xi(t) + \hat{\delta} \quad (6)$$

위의 (6)은 다음과 같이 다시 쓸 수 있다.

$$\hat{y}(t) = \hat{\theta}^T \hat{\phi}(t-1) \quad (7)$$

여기서,

$$\hat{\theta}^T(t) = [\hat{\theta}_a^T(t) \ \hat{\theta}_b^T(t) \ \hat{\theta}_d^T(t) \ \hat{\theta}_c^T(t)] \quad (8)$$

$$\hat{\phi}^T(t-1) = [\hat{\phi}_y^T(t-1) \ \hat{\phi}_u^T(t-d) \ \hat{\phi}_v^T(t-d_1) \ \hat{\phi}_\xi^T(t)]. \quad (9)$$

이제, 그림 2로부터 $e(t)$ 는 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{aligned} e(t) &= y(t) - \hat{y}(t) \\ &= \sum_{i=1}^{nA} a_i e(t-i) + (\theta - \hat{\theta}(t))^T \hat{\phi}(t-1) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\therefore e(t) = \frac{1}{A(q^{-1})} (\theta - \hat{\theta}(t))^T \hat{\phi}(t-1) \quad (11)$$

앞의 (10)에서 $(\frac{1}{A(q^{-1})} - \frac{\lambda}{2})$ 가 positive real 임을 보장할 수 없다. 여기서 $\lambda = \max_{0 < t < \infty} [\lambda_2(t)]$ 이고, $\lambda_2(t)$ 는 (17)에서 사용되는 가변망라계수이다. 이제 매개변수 추정의 안정성을 보증하기 위하여 새로운 다항식 $\hat{O}(q^{-1})$ 을 도입한다. 이때 filtered 오차는 다음의 식으로 표현된다.

$$\begin{aligned} e^*(t) &= \hat{O}(q^{-1})e(t) \\ &= \frac{\hat{O}(q^{-1})}{A(q^{-1})} (\theta - \hat{\theta}(t))^T \hat{\phi}(t-1) \end{aligned} \quad (12)$$

만약 다항식 $\hat{O}(q^{-1})$ 의 매개변수들을 다항식 $A(q^{-1})$ 의 매개변수들과 같도록 추정한다면 다음 (13)가 유도되므로 매개변수 추정의 안정성이 보증된다.

$$e^*(t) = (\theta_e - \hat{\theta}_e(t-1))^T \hat{\Phi}_e(t-1) \quad (13)$$

여기서,

$$\begin{aligned} \theta_e^T &= [\theta^T \ a_1 \ \dots \ a_{nA}], \\ \hat{\theta}_e^T(t) &= [\hat{\theta}^T(t) \ -\hat{o}_1 \ \dots \ -\hat{o}_{nA}], \\ \hat{\Phi}_e^T(t-1) &= [\hat{\Phi}^T(t-1) \ e(t-1) \ \dots \ e(t-nA)]. \end{aligned} \quad (14)$$

(13)을 다시 쓰면 다음의 매개변수 추정 알고리즘을 얻는다.

$$\hat{\theta}_e(t) = \hat{\theta}_e(t-1) + P_e(t-1) \hat{\Phi}_e(t-1) e^*(t) \quad (15)$$

$$\begin{aligned} e^*(t) &= (\theta_e - \hat{\theta}_e(t))^T \hat{\Phi}_e(t-1) \\ &= \frac{y(t) - \hat{\theta}_e^T(t-1) \hat{\Phi}_e(t-1)}{1 + \hat{\Phi}_e^T(t-1) P_e(t-1) \hat{\Phi}_e(t-1)} \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} P_e^{-1}(t) &= \lambda_1(t-1) P_e^{-1}(t-1) \\ &\quad + \lambda_2(t-1) \hat{\Phi}_e(t-1) \hat{\Phi}_e^T(t-1) \end{aligned} \quad (17)$$

여기서 $P_e(t)$ 는 Positive definite covariance matrix이고 $\lambda_1(t)$, $\lambda_2(t)$ 는 가변 망각 계수이다. 매개변수 추정오차, $\hat{\theta}_e(t) = \theta_e - \hat{\theta}_e(t)$, 를 정의하면 (15)은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\hat{\theta}_e(t) = (1 - K(t) \hat{\Phi}_e^T(t-1)) \hat{\theta}_e(t-1) \quad (18)$$

$$K(t-1) = \frac{P_e(t-1) \hat{\Phi}_e(t-1)}{1 + \hat{\Phi}_e^T(t-1) P_e(t-1) \hat{\Phi}_e(t-1)} \quad (19)$$

행렬 $P_e(t)$ 는 추정된 매개변수의 정확도에 관한 정보를 가지고 있다. 즉, 행렬 $P_e(t)$ 의 대각요소의 크기는 이에 대응되는 $\hat{\theta}_e(t)$ 의 추정 매개변수의 변화정도를 나타낸다. 예를 들어 요소 $P_e(1,1)$ 이 충분히 작은 값이면, 추정 매개변수 a_1 이 거의 정확한 값으로 추정되었음을 의미한다. 그러므로 초기상태에서 어떤 입, 출력자료도 이용할 수 없을 경우에는 행렬 $\hat{\theta}_e(t)$ 와 $P_e(t)$ 의 초기 값을 결정하는 문제가 매우 중요하다. 여기서는 플랜트를 미지의 시스템으로 가정하기 때문에 행렬 $P_e(t)$ 의 초기치 $P_e(0)$ 는 큰 대각 요소를 갖는 단위 행렬로 설정한다. 즉,

$$P_e(0) = \gamma I \quad (20)$$

여기서 I 는 단위행렬이고 γ 는 임의의 큰 값이다. 보통 γ 는 100 혹은 1,000을 사용한다.

반복계산의 횟수가 증가함에 따라 행렬 $P_e(t)$ 의 각 요소의 크기는 감소하고 추정되는 매개변수들은 일정한 값으로 수렴해간다. 만약 미지의 플랜트가 시불변 시스템이라면 이는 바람직한 현상이다. 그러나 플랜트의 매개변수가 수시로 변하는 시변 시스템이라면 행렬 $P_e(t)$ 의 값은 매개변수가 변하는 순간마다 큰 값으로 설정되어 가능한 한 빨리 새로운 매개변수를 추정할 수 있어야 된다.

망각계수 방법을 사용해서 행렬 $P_e(t)$ 의 각 요소들의 크기를 변화시킬 수 있으며, 여기서는 가변 망각계수 방법을 사용한다. 망각계수 λ 가 1이면 정상적인 알고리즘이 적용되고, λ 가 감소하면 행렬 $P_e(t)$ 의 각 요소들의 크기는 반복계산의 순간마다 증가하게 된다. 그래서 과거에 추정했던 매개변수의 값들을 빨리 망각하고 새로운 값으로 추정해간다. (17)에서 $\lambda_2(t-1) = 1$, 그리고 $\lambda_1(t-1) = \lambda(t-1)$ 로 두

고 $\lambda(t)$ 는 다음 식을 만족하도록 선택한다.

$$\begin{aligned} \text{tr}(P_e(t)) &= \frac{1}{\lambda(t-1)} \text{tr}(P_e(t-1)) \\ &\quad - \frac{P_e(t-1) \hat{\Phi}_e(t-1) \hat{\Phi}_e^T(t-1) P_e(t-1)}{\lambda(t-1) + \hat{\Phi}_e^T(t-1) P_e(t-1) \hat{\Phi}_e(t-1)} \end{aligned} \quad (21)$$

여기서 tr 은 행렬의 trace를 의미한다.

III. 극점지정 적응 제어기 설계

3.1 제어입력 계산

지금까지 미지의 다항식 $A(q^{-1})$, $B(q^{-1})$, $C(q^{-1})$, 그리고 $D(q^{-1})$ 에 관한 정보를 얻었다. 이제 제어입력 $u(t)$ 를 결정하기 위하여 전체 시스템의 극점을 바람직한 위치로 옮길 수 있는 극점지정방식의 자기동조 제어기를 설계한다. 여기서는 2장에서 얻은 추정 시스템을 사용한다. 먼저 일반화된 성능 지수와 하나의 항등식을 각각 (22) 및 (23)와 같이 정의한다.

$$J = \epsilon [(P(q^{-1})y(t+d) - R(q^{-1})u(t) + Q(q^{-1})u(t) - S(q^{-1})v(t-d_1+d))^2] \quad (22)$$

$$P(q^{-1})C(q^{-1}) = A(q^{-1})F(q^{-1}) + q^{-d}G(q^{-1}) \quad (23)$$

여기서,

$$\begin{aligned} P(q^{-1}) &= p_0 + p_1q^{-1} + \dots + p_{nP}q^{-nP} \\ R(q^{-1}) &= r_0 + r_1q^{-1} + \dots + r_{nR}q^{-nR} \\ Q(q^{-1}) &= q_0 + q_1q^{-1} + \dots + q_{nQ}q^{-nQ} \\ S(q^{-1}) &= s_0 + s_1q^{-1} + \dots + s_{nS}q^{-nS} \\ F(q^{-1}) &= f_0 + f_1q^{-1} + \dots + f_{nF}q^{-nF} \\ G(q^{-1}) &= g_0 + g_1q^{-1} + \dots + g_{nG}q^{-nG} \\ nF &= d-1 \\ nG &= \max(nA-1, nP+nC-d). \end{aligned} \quad (24)$$

여기서 $u(t)$ 는 설정치를 나타낸다. (1)의 양변에 좌측에서 F 를 곱한 후 (23)에 대입하여 정리하면 다음의 (25)가 유도된다.

$$C[Py^*(t+d|t)] = Gy(t) + FBu(t) + FDv(t-d_1+d) + F(1)\delta \quad (25)$$

여기서,

$$\begin{aligned} Py^*(t+d|t) &= Py(t+d) - F\xi(t+d) \\ &= Py(t+d) - w(t+d) \\ &= \epsilon [Py^*(t+d|t) | F_t] \\ &= \epsilon [(Py(t+d) - F\xi(t+d)) | F_t] \\ &= \epsilon [Py(t+d) | F_t]. \end{aligned} \quad (26)$$

또한 $w(t+d) = F\xi(t+d)$ 는 $i \geq 0$ 인 경우에 $u(t-i)$, $v(t-i)$, $w(t-i)$, 그리고 $y(t-i)$ 와 관련이 없으므로 이들 식들을 (22)에 대입한 후 성능 지수를 최소화시키는 제어입력 $u(t)$ 를 구하면 다음과 같다.

$$\frac{\partial J}{\partial u(t)} = 0$$

$$\therefore Gy(t) + Hu(t) - Tv(t-d_1+d) - Eu(t) + F(1)\delta = 0 \quad (27)$$

여기서,

$$\begin{aligned} H(q^{-1}) &= C(q^{-1})Q(q^{-1}) + F(q^{-1})B(q^{-1}) \\ T(q^{-1}) &= C(q^{-1})S(q^{-1}) - F(q^{-1})D(q^{-1}) \\ E(q^{-1}) &= C(q^{-1})R(q^{-1}). \end{aligned} \quad (28)$$

3.2 극점지정 방식의 적용을 위한 전체 시스템 해석

이제 극점지정방식을 적용하기 위하여 전체 시스템의 응

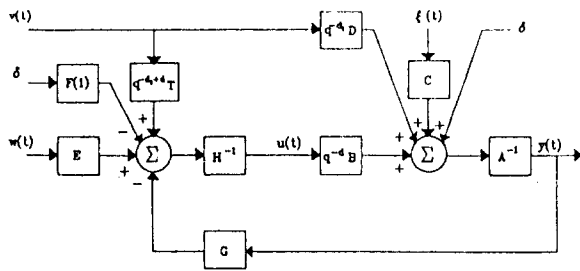


그림 3. 전체 시스템의 구조.
Fig. 3. The structure of overall system.

답특성을 고찰한다. 전체 시스템의 구조는 그림 3과 같다. 그림 3으로 부터 Mason의 규칙을 사용하면 다음의 식을 얻을 수 있다.

$$\frac{y(t)}{w(t)} = \frac{a^{-d}CRB}{C(QA+PB)} \quad (29)$$

$$\frac{y(t)}{v(t)} = \frac{a^{-d}C(DQ+BS)}{C(QA+PB)} \quad (30)$$

$$\frac{y(t)}{\xi(t)} = \frac{C(CQ+FB)}{C(QA+PB)} \quad (31)$$

$$\frac{y(t)}{\delta} = \frac{CQ}{C(QA+PB)} \quad (32)$$

오차 다항식 $C(q^{-1})$ 는 안정한 다항식이라고 가정했으므로 서로 상쇄시킬 수 있다. 그러므로 전체 시스템의 표현 식은 (33)로 주어진다.

$$y(t) = \frac{RB}{QA+PB} w(t-d) + \frac{DQ+BS}{QA+PB} v(t-d_1) + \frac{CQ+FB}{QA+PB} \xi(t) + \frac{Q}{QA+PB} \delta \quad (33)$$

(33)는 전체 시스템의 성능이 (22)의 성능 지수에서 나타난 다항식 P, Q, R, 그리고 S에 의해 어떻게 영향받는지 잘 표현하고 있다. 따라서 이 식으로 부터 다항식 P, Q, R, 그리고 S를 선택할 수 있다.

다항식 P와 Q는 전체 시스템의 특성 방정식을 결정한다. 이런 사실로부터 다항식 P와 Q는 전체 시스템의 극점이 원하는 위치에 있도록 선택한다.

$$QA + PB = A^* \quad (34)$$

여기서, 다항식 P와 Q의 차수는 모두 $n-1$ 이고, n 은 다항식 A 및 B의 차수 중에서 큰 값을 나타낸다. 그리고 다항식 $A^*(q^{-1})$ 는 전체 시스템의 원하는 극점을 가지고 있는 다음과 같은 다항식이다.

$$A^*(q^{-1}) = a_0^* + a_1^*q^{-1} + \dots + a_{nA}^*q^{-nA}, \quad nA^* \leq (2nA-1) \quad (35)$$

표준 다항식 $R(q^{-1})$ 은 정상상태에서의 (29)의 이득이 1이 되도록 즉, 정상상태의 오차가 0이 되도록 선택한다. 따라서, 정상상태 오차를 없애기 위하여 별도의 적분기를 사용하지 않는다.

$$R(q^{-1})|_{q=1} = \frac{A^*(q^{-1})}{B(q^{-1})}|_{q=1} \quad (36)$$

외란 다항식 $S(q^{-1})$ 의 선택은 정상상태 및 feedforward 제어의 동적 특성에 영향을 미친다. 부하 외란에 의한 정상상태 오차를 없애기 위해서 다항식 $S(q^{-1})$ 는 (30)의 이득

을 1이 되도록 선택한다. 즉, $S(q^{-1})$ 는 정상상태에서 부하 외란을 제거시키도록 선택된다.

$$(D(q^{-1})Q(q^{-1}) + B(q^{-1})S(q^{-1}))|_{q=1} = 0 \quad (37)$$

즉,

$$S(q^{-1})|_{q=1} = -\frac{D(q^{-1})Q(q^{-1})}{B(q^{-1})}|_{q=1} \quad (38)$$

IV. 시뮬레이션

4.1 제어 대상 플랜트

실제 증기발생기 모델은 매우 복잡할 뿐만 아니라 비선형 효과를 지니고 있다. 따라서 여기서는 다음의 라플라스 전달함수로 표현되는 선형 모델을 가정한다[1].

$$y(s) = \left(\frac{G_1}{s} - \frac{G_2}{1+\tau_2 s} \right) (u(s) - v(s)) + \frac{G_3 s}{\tau_1^{-2} + 4\pi^2 T^{-2} + 2\tau_1^{-1} s + s^2} u(s) \quad (39)$$

여기서, s 는 주파수 영역에서의 라플라스 변수를 나타내고, $u(s)$ 는 급수변화율, $v(s)$ 는 증기흐름변화율, 그리고 $y(s)$ 는 수위 변화율을 나타낸다.

출력변화에 대응하는 증기발생기의 매개변수 값들은 표 1과 같다. $G_2 - G_1\tau_2 > 0$ 일 경우에 (39)의 영점은 양의 값 즉, 비최소 위상 특성을 갖는다. 표 1에서 출력이 15% 일 때의 값들을 (39)에 대입하면 시스템의 영점에 불안정한 근이 존재한다.

표 1. 출력변화에 따른 매개변수의 변화치.

Table 1. Values of plant parameters corresponding to power variation.

P/Pn(%)	G ₁	G ₂	G ₃	τ ₁	τ ₂	T	v(Kg/s)
15	0.058	4.46	0.226	26.3	21.5	60.5	180.8
30	0.058	1.83	0.310	43.4	4.5	17.7	381.7
100	0.058	0.47	0.105	28.6	3.4	11.7	1435

컴퓨터 시뮬레이션을 위해서 (39)은 Euler 공식 등을 사용하여 이산 모델로 변형시킬 수 있다. 예를 들어, 15% 출력에 대한 이산 모델은 다음의 다항식을 갖는다.

$$\begin{aligned} A(q^{-1}) &= 1 - 3.877q^{-1} + 5.648q^{-2} \\ &\quad - 3.663q^{-3} + 0.893q^{-4} \\ B(q^{-1}) &= 0.077 - 0.228q^{-1} \\ &\quad + 0.224q^{-2} - 0.073q^{-3} \\ C(q^{-1}) &= 0.149 - 0.440q^{-1} \\ &\quad + 0.433q^{-2} - 0.142q^{-3} \\ d = d_1 &= 1 \end{aligned} \quad (40)$$

전체 시스템의 극점을 원하는 위치에 있게 하는 다항식 $A^*(q^{-1})$ 은 다음과 같이 설정한다.

$$A^*(q^{-1}) = 1 - 6.150q^{-1} + 16.195q^{-2} - 23.669q^{-3} + 20.737q^{-4} - 10.890q^{-5} + 3.174q^{-6} - 0.396q^{-7} \quad (41)$$

그리고 $P_e(0)$ 과 $\lambda(0)$ 을 제외한 모든 초기치는 영으로 설정한다.

4.2 시뮬레이션 결과

20% 이상의 고출력에서는 기존의 비례-적분 제어를 사용해서도 원하는 제어성능을 얻을 수 있다. 따라서 본 논문

에서는 15%의 저출력을 중심으로 시뮬레이션을 수행한다. 그림 4와 그림 5는 부하외란인 증기흐름의 계단형 증감에 따른 수위응답과 급수 응답을 나타낸다. 실제의 경우 수위 설정치나 증기량의 증감은 ramp 함수 형태로 수행되지만 본 논문에서는 극한 상황에서도 적절히 대처할 수 있음을 보이기 위하여 step 함수 형태로 변화시킨다. 즉, 설계한 제어기의 주목적은 수위 설정치나 증기량의 계단형 변화에 대하여 제어 신호의 과도한 변동 없이 증기 발생기의 수위를 설정치로 유지시키는 것이다. 실제 플랜트에 적용할 때의 제어신호는 공압 밸브의 개폐 양이 되므로 순간적으로 큰 변화를 일으키는 신호에는 적절히 대응할 수 없다. 따라서 제어신호의 과도한 변동은 모의 실험에서는 가능하지만 실제 적용할 경우에는 거의 불가능한 동작이므로 원하는 제어 성능을 기대할 수가 없다. 그림들에서 잘 나타나 있듯이 증기발생기의 수위 계통은 동작 초기에 비최소 위상의 특성을 나타내지만 적응 제어기에서 만들어진 적절한 제어 입력에 의해 곧 그 현상은 줄어들고 수위는 원하는 설정치로 유지된다. 또한 제어 대상 플랜트로 입력되는 제어 신호도 급격한 변화 없이 완만하게 움직이므로 실제로 적용할 경우에도 제어 성능은 크게 저하되지 않을 것이다.

그리고 각종 매개변수들도 적절히 추정됨을 확인할 수 있었다. 뿐만 아니라 매개변수 추정 알고리즘의 안정성 문제에서 언급했듯이 모의 실험에서도 $(-\hat{a}_i)$ 은 $(\hat{\sigma}_i)$ 과 같은 값으로 추정되었다. 또한 제어대상 플랜트의 특성 변화에 따른 covariance 행렬의 대각 요소들의 응답 특성과 망각 계수의 응답 특성도 우수함을 확인하였다.

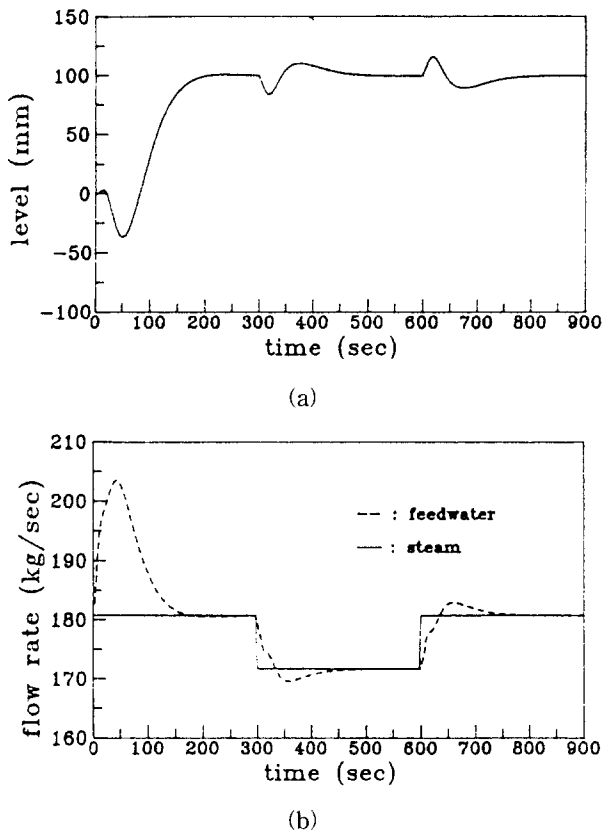


그림 4. 증기량의 계단형감소에 따른 수위 및 급수 응답. (a) 수위 응답. (b) 급수 응답.
 Fig. 4. Responses on the step decrease (5% of 15% power) of the steam flow. (a) Response of the water level, (b) Response of the flow rate.

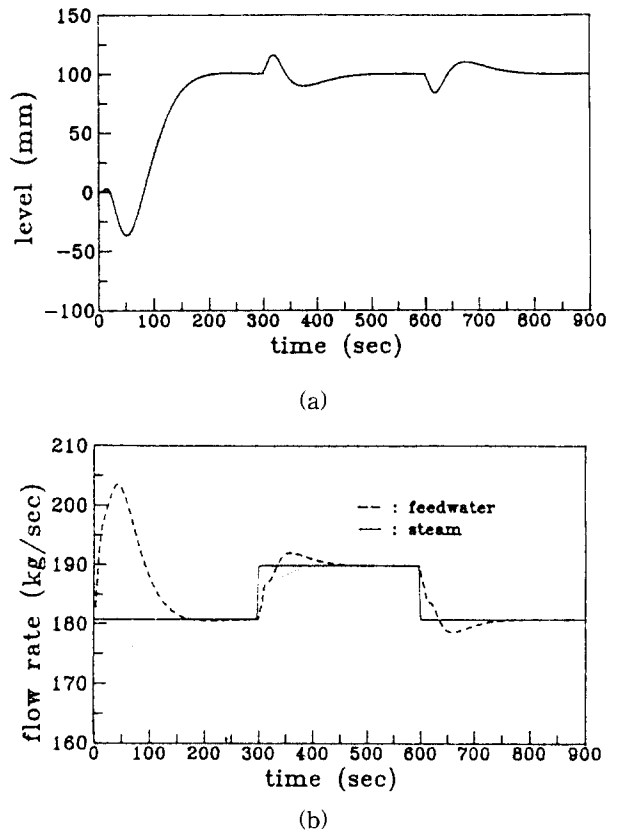


그림 5. 증기량의 계단형증가에 따른 수위 및 급수 응답. (a) 수위 응답. (b) 급수 응답.
 Fig. 5. Responses on the step increase (5% of 15% power) of the steam flow. (a) Response of the water level. (b) Response of the flow rate.

V. 결론

본 논문에서는 15%의 저출력에서 원자력 발전소 증기발생기 수위를 적절히 제어하기 위하여 극점지정 자기 동조형 적응제어기를 설계하였으며, 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 성능을 확인하였다.

제어입력 신호를 계산하기 위한 성능 지수에는 플랜트 입력 및 출력신호, 그리고 설정치 신호는 물론 부하 외란의 신호도 포함시켰다. 특히 측정 가능한 부하 외란 신호를 feedforward 항으로 인가하여 전체 시스템의 제어 성능을 향상시켰다. 매개변수 추정방법으로는 잡음에 강인한 병렬 적응 알고리즘을 사용하였으며, 추정의 안정성을 보장하기 위한 기법을 추가하였다. 또한 정상상태 오차를 없애기 위하여 적분기를 사용하는 대신에 하나의 상수만을 사용함으로써 계산 양을 대폭 줄일 수 있었다. 뿐만 아니라 전체 시스템의 극점을 임의의 원하는 위치에 설정시키는 극점 지정 방식을 사용하여 어떤 출력조건에서도 전체 시스템은 항상 안정하도록 하였다. 추가로 매개변수가 올바른 값으로 추정되기 전에 제어기가 작동하는 것을 방지하기 위하여 적절한 시간 간격 이내에서 추정오차가 미리 정한 제한치 이내에 존재할 경우에만 적응 제어기가 작동되도록 하였다. 결과적으로 본 논문에서 설계한 극점지정 방식의 자기 동조형 적응 제어기는 동적 특성이 변하는 플랜트에서 효과적인 제어 수단을 제공하였다.

참고문헌

[1] E. Irving, et al., "Toward efficient full automatic

- operation of the PWR steam generator with water level adaptive control," *BNES, London, Boiler Dynamic and Control in Nuclear Power Stations*, pp. 309-329, 1980.
- [2] B. -J. Choi, *A study on Pole-assignment Self-tuning Control for Steam Generator Water Level*, KAIST, Master Thesis, 1989.
- [3] G. -T. Park, "Self-tuning control application to a nuclear power plant," *Int. J. Control*, vol. 43, no. 6, pp. 1823-1840, 1986.
- [4] A. Y. Allidina, et al., "Generalized self-tuning controller with pole-assignment," *Proc. IEE*, vol. 127, no. 1, pp. 13-18, 1980.
- [5] K. Z. Karam. et al., "An implicit pole-assignment self-tuning regulator," *Optimal Control Applications & Methods*, vol. 7, pp. 127-134, 1986.
- [6] K. J. Astrom, and B. Wittenmark, *Computer Controlled Systems: Theory and Design*, Prentice-Hall, INC., 1984.
- [7] G. C. Goodwin, and K. S. Sin, *Adaptive Filtering Prediction and Control*, Prentice-Hall, INC., 1984.
- [8] 한전기술연구원, 보일러 계수 추정에 의한 최적 보일러 제어기 개발(1), KRC-90I-J03, 한국전력공사 기술연구원, 1993.
- [9] 한전기술안전지원실, 증기발생기 수위제어 및 보호계통 개선, 한국전력공사 기술안전지원실, 1987.
- [10] 문병희, "원전 S/G Water Level 제어계통 디지털화 및 적용연구," 한국전력공사 기술연구원('93 종합연구 발표자료), pp. 79-105, 1993.



최 병 재

1987년 경북대학교 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 석사(1989). 1989년 ~ 1995년 전력연구원 인공지능연구실. 1993년 ~ 현재 한국과학기술원 박사 과정. 1995년 ~ 현재 중경공업전문대학 전자과 교수. 관심분야는 지능제어

및 응용, 강인제어등.

노 회 천

1976년 서울대학교 원자핵공학과 졸업. MIT 박사(1983). 1983년 ~ 현재 한국과학기술원 원자력공학과 교수. 관심분야는 이상 유동, 원자로 안전, 계측 및 제어 등.

김 병 국

1975년 서울대학교 전자공학과 졸업. 한국과학기술원 박사(1981). 1981년 ~ 1986년 우진계기(주) 연구실장. 1982년 ~ 1984년 Univ. of Michigan 방문연구. 1986년 ~ 현재 한국과학기술원 전기및전자공학과 부교수. 관심분야는 로보틱스, 컴퓨터 공정제어, 고신뢰도 제어, 지능제어, 강인제어등.