

# 정상운전시 상태 및 제어벡터 가변을 고려한 원자력 발전설비의 최적제어

(Optimal Control of Nuclear Power Plant under Considering State  
and Control Vector in Normal Operation)

金東和\*  
(Dong-Hwa Kim)

## 요 약

본 논문에서는 원자력 발전소 정상 운전시 제어 및 상태벡터 가변을 고려한 최적제어 문제가 연구되었다. 제어기 설계시 제어 및 상태벡터가 변하는 경우를 고려하여 제어기를 구성하고 운전중 상태 및 제어벡터 가변에 따라 변하는 제어기의 최적이득을 정한정 및 양한정 행렬을 이용해 구함으로서 운전중의 부하변화 및 외란에 대해 실질적인 최적제어가 되도록 하였다.

시뮬레이션 결과 정상상태의 부하변화에 대해서는 제어목적에 맞게 잘 추종하고 있었고 원자로 입·출구 및 가압기 계통의 외란에 대해서는 정상상태시의 부하변화와 같은 응답특성을 갖으나 적은 외란에 대해서도 부하가 크게 변하는 효과를 갖는 응답특성을 보이고 있어 외란이 시스템 전반에 미치는 영향이 매우 큼을 보이고 있다.

## Abstract

In this paper, it was studied for nuclear power plant to optimal control under considering the variation of control vector and state vector in normal operation. The variable control and state vector was considered in the design procedure for optimal controller and the actual optimal gain to the load change during the operation is acquired using the positive semi-definite matrix and positive definite matrix.

The results of simulation shows that the controller follow-up the load change in the normal states and the response of the disturbance of hot leg or cold leg has the same characteristic curve in the normal state but the small disturbances has such a effect as the big load change and give a big effect to the whole system.

## 1. 서 론

최근 제한된 에너지 자원에 비해 전력수요가 급격히 증가함에 따라 원자력 에너지에 대한 발전설비의 중요성이 인식되어 그 수요 및 용량이 급격히 증가하고 따라서 이들의 제어 및 운용방

법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있는 실정이다.<sup>1)~3)</sup>

이들 원자력 발전설비에 대한 제어방법은 1960년대까지는 주로 고전적인 제어기법인 PID 제어기를 많이 이용하여 왔으나<sup>4)~7)</sup> 설비의 대형화에 따른 안전성, 신뢰성, 경제성 측면에서 제어에 상당한 제약이 따르게 되었다.<sup>6)~9)</sup>

한편 1960년대초 R. E Kalman이 현대제어이론

\* 正會員：大田産業大學校  
接受日字：1994年 2月 24日

을 발표한 후로는 이들 현대 제어기법들을 이용해 제어를 설계하여 왔으나 정확한 모델링에 대한 검토가 요구되어 실제의 플랜트를 효과적으로 제어하기 위해서 연구하기 보다는 주로 제어 이론 측면에서 연구가 수행되게 되었다.

뿐만아니라 이들 제어기법들은 확정적 모델하에서 모든 변수들을 취급하므로 주요 에너지원인 증기자의 물리적 거동특성이 운전중 변함으로써 발생하는 상태 또는 제어벡터의 가변은 고려치 않고 있어 실질적으로 제어기 설계시는 제한된 특성만이 반영된다.

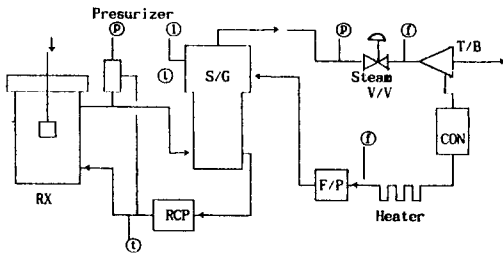
한편 최근에는 퍼지추론과 같은 비선형 기법을 이용해<sup>19), 20)</sup> 수학적 모델의 복잡성을 피하고 지적제어를 적용하고자 하는 연구도 이루어지고는 있으나 이들 모두 운전중의 증성자 거동특성은 반영되지 않고 있다.

본 논문에서는 PWR시스템의 모델을 이용해 운전중 증성자의 거동특성에 따른 제어 및 상태 벡터 가변을 고려한 제어를 설계하고 10%~100%부하변화 및 외란시의 최적제어 가능성을 시뮬레이션 하고자 한다.

## 2. 시스템 모델

### 1) 모델링의 접근

그림 2.1의 가압경수로(PWR) 발전설비는 리액터, 증기발생기, 터빈, 보충수와 같은 시스템으로 구성되어 있으므로 이 유체계의 동특성은 유체의 질량, 운동량, 에너지와 같은 유체의 특성에 밀접한 관계가 있는 함수로 기술할 수 있다.



①: 압력계 ②: 온도계 ③: 유량계 ④: 유량계  
RX: 리액터 RCP: 순환펌프 F/P: 급수펌프 CON: 응축기 S/G: 증기발생기

그림 1. 시스템 블록 다이어그램  
Fig. 1. System block diagram

### 2) 증성자 운동 모델

증성자 운동 모델을 기술하면 다음과 같다.

$$\frac{dn(t)}{dt} = \frac{\delta k - \beta t}{\Lambda} n(t) + \sum_{i=1}^6 \lambda_i C_i (m=1-3) \quad (2.1)$$

$$\frac{dC_i}{dt} = \frac{\beta_i}{\Lambda} n - \lambda_i C_i \quad (2.2)$$

이 모델에서 사용된 지발 증성자 선행그룹의 수  $C_i$ 는 보통 6개의 그룹을 이용하나 복잡성을 줄이기 위해 3개만을 이용하였다.

### 3) 리액터 열 수력 동특성

리액터 열 수력 계통에 대해서는 다음 평형 방정식을 이용한다.

$$F_{f1} \frac{dT_{f1}}{dt} = k_1 V_0 - a_{f12} (T_{f1} - T_{f2}) \quad (2.3)$$

$$F_{f2} \frac{dT_{f2}}{dt} = k_2 V_0 + a_{f12} (T_{f1} - T_{f2}) - a_{f2w} (T_{f2} - T_w) \quad (2.4)$$

$$W_w \frac{dT_w}{dt} = k_3 V_0 + a_{f2w} (T_{f2} - T_w) - R_c C_p (T_w - T_{wi}) \quad (2.5)$$

### 4) 1차 유체계 체적

리액터의 상부체적 Plenum에 대한 모델식은

$$\tau_{v0} \frac{dT_{v0}}{dt} = (1 - \tau_b) T_{v0} + \tau_b T_2 - T_{v0} \quad (2.6)$$

리액터 출구 및 입구에 대해 각각

$$\tau_{hl} \frac{dT_{hl}}{dt} = T_{v0} - T_{hl} \quad (2.7)$$

$$\tau_{cl} \frac{dT_{vi}}{dt} = T_{cl} - T_{vi} \quad (2.8)$$

$$\tau_{vi} \frac{dT_{wi}}{dt} = T_{vi} - T_{wi} \quad (2.9)$$

### 5) 증기 발생기

증기 발생기의 1차계 보일러 구역 및 유체의 이동특성에 대한 방정식은

$$S_{pb} \frac{dT_{pb}}{dt} = (HC_p)_{pb} (T_{hl} - T_{be}) - a_{psb} (T_{pb} - T_s) \quad (2.10)$$

$$\tau_{sp} \frac{dT_3}{dt} = T_{hl} - T_3 \quad (2.11)$$

$$\frac{\tau_4}{2} \frac{dT_4}{dt} = T_{pb} - T_4 \quad (2.12)$$

$$T_{be} = 2T_4 - T_3$$

1차 예열기 계통 및 유체의 이동시간에 대해서는

$$W_{pp} \frac{dT_{pp}}{dt} = W_{pp}(T_{be} - T_{cl}) - a_{psp}(T_{pp} - T_{sp}) \quad (2.13)$$

$$\frac{\tau_{sp}}{2} \frac{dt_5}{dt} = T_{be} - T_5 \quad (2.14)$$

$$\frac{\tau_{vi}}{2} \frac{dT_6}{dt} = T_{pp} - T_6 \quad (2.15)$$

$$T_{cl} = 2T_6 - T_5 \quad (2.16)$$

2차 예열기 및 유체의 이동시간에 대한 에너지 균형 방정식은

$$S_{sp} \frac{dT_{sp}}{dt} = a_{psp}(T_{pp} - T_{sp}) - H_{fw}(h_{fo} - h_{pw}) \quad (2.17)$$

$$\frac{\tau_p}{2} \frac{dh_{pe1}}{dt} = h_{ps} - h_{pe1} \quad (2.18)$$

$$\tau_p \frac{dT_{pe2}}{dt} = h_{fw} - h_{pe2} \quad (2.19)$$

$$h_{fo} = 2h_{pe1} - h_{pe2} \quad (2.20)$$

2차 보일링 구역에 대한 열 균형 방정식은 다음과 같다.

$$S_b \frac{dT_s}{dt} = a_{psb}(T_{pb} - T_s) + (h_{fo} \frac{h_f v_g - h_s v_f}{v_g} - W_{fw}) - (h_s - \frac{h_f v_g - h_s v_f}{v_g}) W_s \quad (2.21)$$

발전 시스템에서 보충수 유속과 증기 유속과의 관계는

$$\frac{dh_{fw}}{dt} = T_s - W_{fw} \quad (2.22)$$

### 6) 2차계통

발전 시스템의 2차 계통은 증기 발생기 2차, 고압 및 저압 터어빈, 응축기, 보충수 계통 및 기타 부속설비로 되어 구성되어 있고 출력과 증기 량과의 관계는 다음과 같이 주어진다.

$$W_s = -k_1 + k_2 Q_6 + k_3 Q_6 \quad (2.23)$$

여기서  $Q_6$ 는 터어빈 출력의 정상분이고  $k_1$ ,  $k_2$ ,  $k_3$ 는 각각의 계수이다. 또 증기발생기 2차에 공급되는 보충수 온도  $T_{fwd}$ 와 부하변화 즉, 터어빈 출력과의 관계는

$$T_{fwd} = c_1 + Q_6 [c_2 + Q_6 (-c_3 + c_4 Q_6)] \quad (2.24)$$

로 기술된다.

한편 터어빈 부하변화에 따른 보충수의 공급현상은 유체관성에 의해 온도 지연특성을 고려해 다음과 같이 주어진다.

$$\tau_{fwt} \frac{dT_{fwt}}{dt} = T_{fwd} - T_{fwt} \quad (2.25)$$

## 3. 최적 제어기 설계

최적 제어를 설계하기 위해 선형 시스템을 나타내면

$$\dot{x}(t) = Ax(t) + Bu(t) \quad (3.1)$$

$$y(t) = Cx(t)$$

이고 이때 최적제어시 필요한 평가 함수는

$$J = \int_0^{\infty} [x^T(t)Qx(t) + u^T(t)Ru(t)] dt \quad (3.2)$$

여기서  $Q$ 는 대칭이고 음이 아닌 정한정 상태 가중행렬이고  $R$ 은 양의 정한정 가중행렬이다.

요구되는 상태벡터와 제어벡터가 영이 아닌 경우의 평가함수는

$$J = \int_0^{\infty} [x - x_s]^T Q (x - x_s) + (u - u_s)^T R (u - u_s)] dt \quad (3.3)$$

로 주어지고  $x_s$ ,  $u_s$ 는 각각 운전중 요구되는 상태 벡터와 제어벡터의 정상치를 나타낸다.

이때 적용되어야 할 Hamiltonian은

$$H = 1/2(x - x_s)^T Q (x - x_s) + R(u - u_s) + \mathcal{L}^T (Ax + Bu) \quad (3.4)$$

이 되고 Lagrange multiplier  $\mathcal{L}$ 는

$$d\mathcal{L}/dt = - \frac{\partial H}{\partial x} = -Q(x - x_s) - A^T \mathcal{L} \quad (3.5)$$

로 주어진다. 플랜트의 제한조건을 Lagrange multiplier에 의한 최적화 과정에 적용하면

$$\frac{\partial H}{\partial x} = R(u_s - u_s) + B^T \mathcal{L} = 0 \quad (3.6)$$

가 되고 여기서 제어벡터는

$$u_s = u_s - R^{-1} B^T \mathcal{L} \quad (3.7)$$

가 된다. 페 루프 최적제어에 대한 해를 얻기 위해

$$\mathcal{L} = Px - \theta \quad (3.8)$$

라 하면

$$dPx/dt - Pdx/dt - \theta = -Q(x - x_s) - A^T Px + A^T \theta$$

(3.9)

이고 식(3.3)에 식(3.10)을 대입하면

$$dx/dt = Ax + B(u_s - R^{-1}B^T Q) \quad (3.10)$$

가 되어 결국 Q의 해를 대입하면

$$dx/dt = Ax + Bu_s - Bu^{-1}B^T Px + BR^{-1}B^T \theta \quad (3.11)$$

가 된다.

이 식을 식(3.9)에 대입하면

$$dPx/dt - d\theta/dt = -Q(x - x_s) - A^T Px + A^T \theta - PAx - PBu_s + PBu_s + PBR^{-1}B^T Px - PBR^{-1}B^T \theta \quad (3.12)$$

로 주어지는데 이것은 모든 x에 대해 만족되므로 x를 포함한 항과 x를 포함하지 않는 항으로 구분하면 각각

$$\begin{aligned} dp/dt &= -Q - A^T P - PA + PBR^{-1}B^T P \\ d\theta/dt &= -Qx_s - A^T \theta - PBu_s + PBR^{-1}B^T \theta \end{aligned} \quad (3.13)$$

과 같다.

P행렬에 대한 식(3.12)에 해는 선형레귤레이터 해에 필요한 행렬 Riccati의 해이고 시스템 행렬 A, B와 가중행렬 Q, R에 의존한다. 식(3.13)은  $\theta$ 를 영으로 놓고 해를 얻을 수 있고  $\theta$ 의 정상상태 값  $\theta_s$ 는

$$\theta_s = (PBR^{-1}B^T - A^T)^{-1}(Qx_s - PBu_s) \quad (3.14)$$

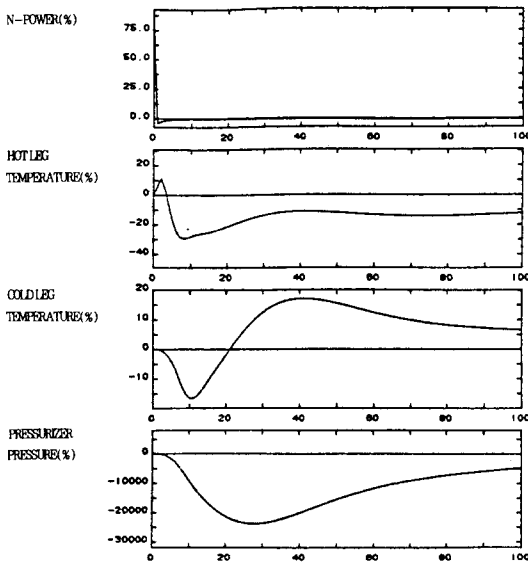


그림 2. 90% 출력에서 10% 계단응답 감소시 최적제어기를 갖는 PWR시스템의 폐 루프 응답  
Fig. 2. Closed loop response of PWR system with optimal controller to 10% step decrease in 90% power

으로 놓을 수 있으므로 최적제어 벡터는

$$\begin{aligned} u_0 &= u_s - R^{-1}B^T(P_s x - \theta) \\ &= u_s - k_c x + \theta_c \end{aligned} \quad (3.15)$$

이 되고 여기서 제어기 이득  $k_c$ 는

$$\begin{aligned} k_c &= R^{-1}B^T \theta_s \\ \theta_c &= R^{-1}B^T \theta_s \end{aligned} \quad (3.16)$$

이다.

이와같이 해서 얻어진 제어 시스템에 중요한 역할을 하는 귀환이득 행렬  $k_c$ 는 부하변화시의 상태 및 제어벡터를 고려해 Riccati행렬 방정식(3.13)의 가중행렬 Q, R에 대한 평가함수를 최소화해 얻어지게 되어 항상 최적값이 된다.

#### 4. 시뮬레이션 및 고찰

##### 4.1 부하 감소시의 응답 특성

그림 2, 3은 그림 1의 발전설비에 관련이론을 적용하여 부하 감소시의 제어계통의 응답특성을 검토하기 위해 시뮬레이션한 결과이다.

그림 2는 90% 원자로 출력에서 10% 원자로 출력을 감소시켰을 때 원자로 출구 및 입구측 온도, 가압기 압력의 변화 상태 등을 나타낸 것이다. 90% 원자로 출력에서 10%의 계단응답을 변화시킨 것은 초기치 90%의 원자로 출력 상태에서 10%로 계단응답을 변화시킨 것이므로 그림 2의 맨 윗 그림과 같이 초기의 과도 상태를 거쳐 정상상태로 돌아가게 된다. 이때 제어기는 원자로 출력이 감소한 만큼 전기적 부하, 가압기 압력 및 레벨, 보충수 량 등을 제어하나 보충수의 유체적인 특성에 따라 부하가 감소한 만큼 급격히 제어될 수 없으므로 원자로 출구측 온도가 순간적으로 증가했다가 정상상태로 되는 특성을 갖게 된다.

또 원자로 입구측 온도는 부하감소에 대해 보충수 온도가 급격히 감소될 수 없으므로 그림과 같이 지연특성을 갖고 원자로내의 유체적 특성을 포함한 유체계의 체적(volume)이 커진 상태에서 출구측의 온도가 영향을 받으므로 그 만큼 과도 상태도 커지는 특성을 갖는다.

이때 가압기는 유체적인 특성상 그림과 같은 지연특성을 갖고 10%의 감소값으로 제어된다.

그림 4에서 85%의 원자로 출력에서 10%계단 응답으로 감소시킨 것은 원자로의 초기치를 85%로 하고 10%로 원자로 출력을 증가시킨 것이므로 응답곡선은 그림 2와 같으나 과도상태 및 곡선의 커브가 더욱 커졌음을 알 수 있다.

#### 4.2 부하 증가시의 응답특성

그림 4, 5는 85%의 부하로 운전시 부하를 10%로 증가시키는 경우 각 제어계통의 응답특성을 나타낸 것으로 가압기 압력, 원자로 입·출구측의 온도 특성이 부하를 감소시킨 그림 2, 3의 경우와 반대로 나타나고 있다.

이때의 각부의 지연 및 과도현상은 감소시와 같은 원인으로 분석할 수 있다.

#### 4.3 외란특성

그림 6, 7은 원자로 입·출구측의 외란에 대한 결과로 그림 6은 출구측의 온도가 감소한 경우의 외란특성이고, 그림 7은 입구측의 온도가 증가한 경우에 대한 결과이다.

100%의 원자로 출력상태에서 원자로 출력측

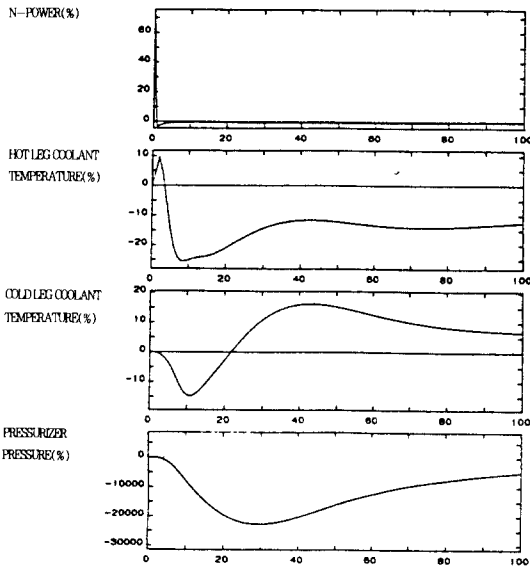


그림 3. 75% 출력에서 10% 계단응답 감소시 최적제어기를 갖는 PWR시스템의 페 루프 응답  
Fig. 3. Closed loop response of PWR system with optimal controller to 10% step decrease in 75% power

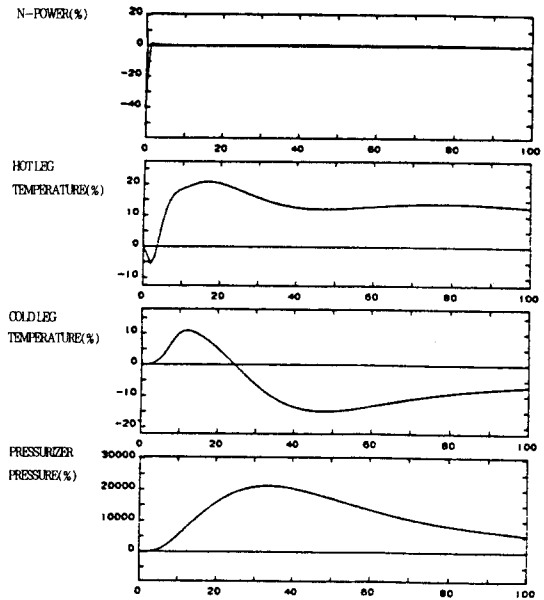


그림 4. 85% 출력에서 10% 계단응답 증가시 최적제어기를 갖는 PWR시스템의 페 루프 응답  
Fig. 4. Closed loop response of PWR system with optimal controller to 10% step increase in 85% power

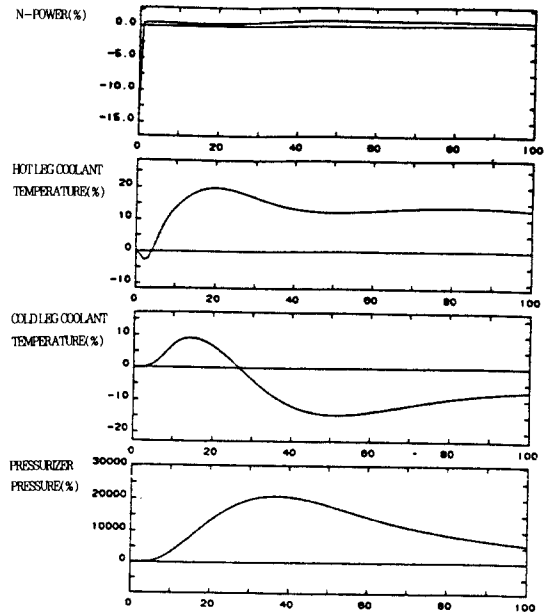


그림 5. 60% 출력에서 10% 계단응답 증가시 최적제어기를 갖는 PWR시스템의 페 루프 응답  
Fig. 5. Closed loop response of PWR system with optimal controller to 10% step increase in 60% power

의 온도가 5% 감소하므로 제어기는 원자로 출력을 이 비율만큼 감소시켜야 하므로 그림 6의 맨 윗 그림과 같이 되고, 또 출구측과 입구측의 특성은 유체적 특성으로 다소 차이가 발생하게 되며 따라서 가압기 압력도 감소하게 된다.

한편 그림 7은 원자로 입구측의 온도가 5%변한 경우 외란에 대한 결과로 그림 6과 반대의 현상을 보이고 있다.

이들 외란에 대한 특성은 그림 2, 3의 결과와 비교하여 증·감시의 곡선 변화상태가 서로 유사하나 외란의 경우는 적은 값임에도 불구하고 부하가 크게 변하는 그림 3의 경우와 같아 외란이 시스템에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

그림 8은 가압기의 압력이 어떤 원인에 의해 5% 변하는 경우 응답특성을 보인 결과로 압력이 감소하면 이 비율만큼 원자로 출력, 터어빈 부하도 감소시켜야 하므로 그림의 결과는 이러한 제어 목적을 잘 나타내고 있다고 볼 수 있다.

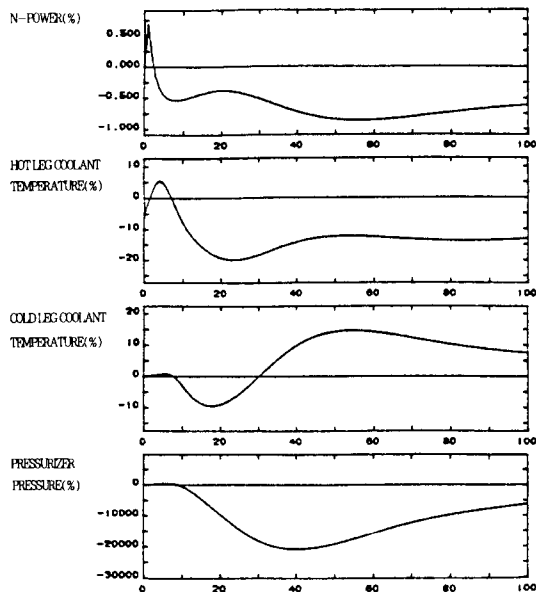


그림 6. 100% 출력에서 Hot leg의 5% 외란에 대해 최적제어기를 갖는 PWR시스템의 페 루프 응답

Fig. 6. Closed loop response of PWR system with optimal controller to 5% disturbance of Hot leg in 100% power

## 5. 결 론

본 논문에서는 원자력 발전 시스템의 모델을 이용해 정상운전시 중성자의 거동 특성 변화에 의한 제어 및 상태벡터 가변을 고려해 최적제어기를 설계하는 문제가 검토되었다.

운전중인 원자력 발전소의 수학적 모델은 중성자 운동방정식이 꼭 포함되고 운전중 부하변화에 대해 제어봉을 가변시키게 되므로 제어 및 상태벡터도 변하게 된다. 이와같은 시스템에 대해서 지금까지의 최적제어 연구는 주로 이들 변수를 항상 일정한 것으로 취급하여 제어기를 설계한 것으로 그 결과 운전중 상태 및 제어벡터 변화를 고려한 실질적인 최적제어 문제가 어려운 실정이었다.

본 논문에서는 운전중 변할 수 있는 벡터를 제어기 설계과정에서 고려해 제어기 최적이득을 구하여 실질적으로 최적제어 할 수 있는 문제를 고

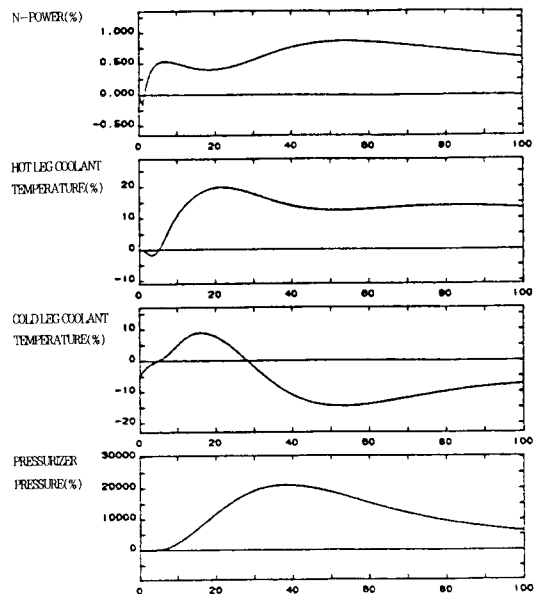


그림 7. 100% 출력에서 Cold leg의 5% 외란에 대해 최적제어기를 갖는 PWR시스템의 페 루프 응답

Fig. 7. Closed loop response of PWR system with optimal controller to 5% disturbance of Cold leg in 100% power

찰하고 시뮬레이션하였다.

시뮬레이션 결과 정상상태의 부하변화에 대해서는 유체적인 특성으로 가압기 압력, 원자로 입·출구측의 응답이 지연특성이 나타나고 있으나 전반적인 응답특성은 제어목적에 맞게 잘 추종하고 있었고 원자로 입·출구 및 가압기 계통의 외란에 대해서는 정상상태시의 부하변화와 같은 응답특성을 갖으나 적은 외란에 대해서도 부하가 크게 변하는 효과를 갖는 응답특성을 보이고 있어 외란이 시스템 전반에 미치는 영향이 매우 큼을 알 수 있다.

본 연구 결과를 부하변화시의 부사추종성 등에 적용하면 향후 좋은 연구결과가 될 것으로 기대된다.

참 고 문 헌

1) Kazuo Monta, "Tome optimal digital computer control of nuclear reactors", J. Nuc Sci & Tec, vo. 3, no. 6, pp. 227~236, 1966.  
 2) K. Asatani, "Suboptiaml control of nuclear reactor with dis-

tributed parameters using singular perturbation theory", Nuc Sci & Eng, vo. 62, no. 9, pp. 19, 1977.  
 3) S. Mankin, "Application of linear optimal control technique to control of a Nuclear Reactor Plant", J. Nuc Sci & Tec, vo. 12, no. 12, pp. 27~731, 1975.  
 4) "석유화학 플랜트에 있어서의 모델예측 제어 패키지," 계장, vo. 31, no. 2, pp. 15~19, 1988.  
 5) S. Suzuki, "An autotuning method for control system parameters in nuclear power plants", Nuc. Tech, vo. 58, pp. 379~387, 1982.  
 6) K. Fukunish, "Noise source estimation of BWR power fluctuation by autogression", Nuc Sci & Tech, vo. 67, pp. 296~308, 1978.  
 7) K. Matsubara, "A multivariable autogressive model of the dynamics of a BWR", Nuc Sci & Eng, vo. 65, pp. 1~16, 1978.  
 8) B. R. Upadhyaya, "Multivariable signal analysis algorithms for process monitoring and parameter estimation in nuclear reactors", Ann. Nuc Engery, vo. 7, pp. 1~11, 1979.  
 9) M. Tsuj, "Approximate noninteractive power regulation of a coupled-core nuclear reactor" IEEE NS-20, pp. 1835~1842, 1983.  
 10) S. Mankin, "Application of linear optimal regulator technique control of a nuclear reactor plant", J. Nuc Sci & Tec. vo. 12, no. 12, pp. 727~734, 1975.  
 11) 김동화, "Computer aided multivariable control system design", 한국원자력연구소 연구보고서, 1986.  
 12) 김동화, "선형 레귤레이터 기법에 의한 원자력 발전소의 최적제어", 한국조명. 전기설비학회지, vol. 4, no. 4, pp. 61~67, 1990.

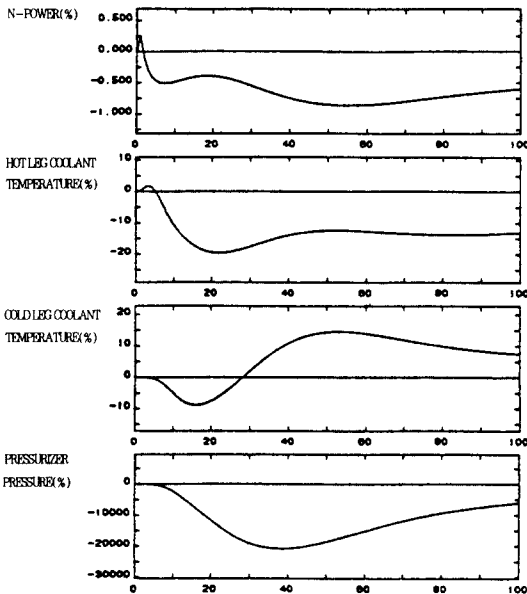


그림 8. 100% 출력에서 가압기의 5% 외란에 대해 최적제어기를 갖는 PWR 시스템의 폐 루프 응답  
 Fig. 8. Closed loop response of PWR system with optimal controller to 5% disturbance of pressurizer in 100% power

◇ 著者紹介 ◇



김 동 화 (金東和)

1949. 11. 15생. 1968. 2. 명지대 전기과 졸(학사). 1983. 2. 인하대 대학원 전기과 졸(석사). 1991. 2. 아주대 대학원 전자과 졸(공학박). 1927~1993. 3. 원자력연구소. 1985~1986. 캐나다 원자력연구소 연구. 1988. 미국 국립원자력연구소 (ANL). 1993. 3. 현재 대전산업대 제어계측과.