

적용모델 추종제어를 이용한 가압경수형 원자로의 부하추종제어

Load Follow Control in Pressurized Water Reactor Using Adaptive Model Following Control

박	상	희	연세대학교 전기공학과
김	낙	고	건국대학교 전기공학과
이	기	서	공운대학 전기공학과

1. 서론

우리나라는 현재 원자력 발전소가 기저 부하 발전소로 운전되고 있으나, 1990년대에는 원자력 발전량이 총 발전량의 약 40% 선에 이를 것으로 전망된다. 따라서 원자력 발전량이 총 발전량의 40% 선을 넘게되면 정상상태 제어뿐만 아니라 출력준위를 조절하는 부하 추종제어도 병행 해야만 한다.<sup>1)</sup>

PWR형 원자로에 대한 부하 추종제어를 하기 위하여 Yang<sup>2)</sup>은 2차 두우프를 포함한 가압 경수형 원자로의 모델을 제시하고 최적제어 이론을 이용한 서어보 제어기와 선형모델 추종제어기를 제안 하였다.

원자로의 제어에 최적제어 이론을 적용하는대는 평가함수에 실제 설계 목표를 나타내기가 어렵고, 원자로 파라미터 값을 정확히 알기가 곤란하며 또한 시간에 따라 서서히 변화하기 때문에 직접 적용하는대는 어려운 점이 있다.

이러한 파라미터 변화에 대한 문제를 해결하기 위하여 Sinh<sup>3)</sup>은 Lyapunov<sup>4)</sup>제2방법을 이용하여 리액터만을 대상으로 기존모델 적응제어 방식을 제시 하였다.

본 논문에서는 원자로의 증기발생기의 동특성을 고려한 최적부하 추종제어기를<sup>5)</sup>기존 모델로 하고 Popov의 초안정도론<sup>6)</sup>이용한 신호합성 병렬구조 적응 모델 추종제어 시스템을 설계하고 2200 Mwth인 가압 경수형 원자로에 적용하여 컴퓨터 시뮬레이션으로 얻은 결과를 분석함으로써 이 설계방법의 유용성을 조사하고 또 실제 개통에서의 적용 가능성을 제시 하고저 한다.

2. 적용모델 추종제어 이론

가압 경수형 원자로의 부하 추종 제어를 하기 위하여 병렬구조 적용모델 추종제어 시스템을 사용한다. 병렬구조 적용모델 추종제어 시스템의 구성 방법은 파라미터 적응법과 신호합성법<sup>7)</sup>의 두가지가 있다. 파라미터 적응법은 비교적 많은수의 파라미터를 조정해야하고 또한 계산 량도 많아지는 단점이 있다. 그림1은 신호합성 방법을 이용한 병렬구조 적용모델 추종제어 시스템의 블록선도 이다. 이 방법은 플랜트의 입력변수를 조정하여 주는 방법으로서 구성하

기가 간단하다.

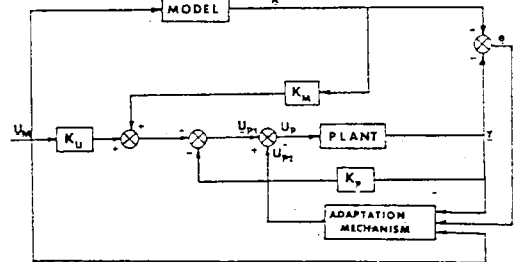


그림1. 신호합성법을 이용한 병렬구조 적응모델 추종제어 시스템

그림1의 신호합성법을 이용한 병렬구조 적응 제어 시스템의 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{X} &= AmX + BmUm \\ Y &= ApY + BpUp1 + BpUp2 \\ e &= X - Y \\ Up1 &= -KpY + KmX + KuUm \\ Up2 &= \Delta Kp(e, t)y + \Delta Ku(e, t)Um \end{aligned} \quad (1)$$

적용제어 기구는 초안정도를 만족 시켜주는 조건하에 모델과 플랜트의 상태오차가  $e(t) = 0$  이 되도록 하는 적응신호  $\Delta Kp(t, e)$ 와  $\Delta Ku(t, e)$ 를 만들어 준다. 따라서 적응기구는 두 부분으로 나누어 구성 할수 있다. 즉 일 반화된 오차  $V = De$ 를 발생시켜 주는 부분과 다음과 같은 적응신호를 발생시켜 주는 부분으로 나눌수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta Kp(t, e) &= \Delta Kp(t, v) = \psi(v(\tau), t), \quad \tau \leq t \\ \Delta Ku(t, e) &= \Delta Ku(t, v) = \psi(v(\tau), t), \quad \tau \leq t \end{aligned} \quad (2)$$

병렬구조 적응 모델 추종제어 시스템의 적응신호를 구하기 위하여 다음식과 같이 오차에 관한 등가식으로 표시할수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{e} &= (Am - BpKm)e + Bpw1 \\ V &= De \\ w &= -w_1 = [\psi(v(\tau), t) - Bp^+(Am - Ap) \\ &+ Km - Kp]X + [\psi(v(\tau), t) - BpBm \\ &- Km]Um \end{aligned} \quad (3)$$

등가계의 일반화된 상태오차가 0 이되기 위해서 Popov의 초안정도 이론을 이용하면 다음과

같다.

Popov의 초안정 이론은 첫째 비선형 피이드백 부분이 Popov의 적분 부등식을 만족시켜야 한다.

$$\int_0^t v^T(t)w(t)dt > -\gamma \quad (4)$$

둘째로는 비선형 피이드백 부분이 적분부등식을 만족할때 다음과 같은 선형 전함정보 전달함수가 완전양의실수(Strictly Positive Real)가 되어야 한다.

$$Z(s) = (sI - A_m + A_p K_m)^{-1} B_p \quad (5)$$

위의 식이 완전 양의실수가 되려면  $(A_m - B_p K_m)$ 이 Hurwitz행렬이 되어야 하고 D가 다음과 같은 식을 만족해야 한다.

$$D = B_p^T P$$

여기서 P는 다음과 같은 Lyapunov 방정식을 만족시키는 정칙 행렬이다.

$$(A_m - B_p K_m)^T P + P(A_m - B_p K_m) = -H \quad (6)$$

이상과 같은 조건을 만족하는 D와  $\Delta K_p, \Delta K_u$ 를 결정하여 주면 적응 모델 추종제어 시스템은 언제나 초안정 하다.

### 3. 가압 경수형 원자로의 수학적 모델

가압경수형 원자로는 1차 투우프의 2차 투우프로 구성되어 있다. 1차 투우프의 가압 냉각수 노심에서의 핵분열에 의해 발생된 에너지를 증기 발생기로 전달하며, 증기 발생기에서는 상호 열교환에 의해 증기가 발생되고 이 증기가 터빈에서 단일팽창 하면서 터빈을 회전시키면 동축에 연결된 발전기가 회전하게 되어 전력을 발생한다.

증기 발생기 및 터빈을 포함한 가압 경수형 원자로 모델은 11차 비선형 방정식으로 주어 지는데, 이를 정격출력의 50% 평형상태 근방에서 Taylor급수에 의해 선형화한 모델은 다음과 같다.<sup>9)</sup>

$$\begin{aligned} \dot{X}_1 &= X_{11} \\ \dot{X}_2 &= 200X_1 - 4063X_2 - 6.25X_3 \\ \dot{X}_3 &= 87.43X_1 + 0.03366X_2 - 3608X_3 - 2.549X_4 \\ \dot{X}_4 &= 1.42X_1 + 0.00055X_2 + 0.0537X_3 - 2.13X_4 \\ &\quad + 2.029X_5 \\ \dot{X}_5 &= 1.42X_1 + 0.00055X_2 + 0.0537X_3 + 1.928X_4 \\ &\quad - 2.029X_5 \\ \dot{X}_6 &= -315X_5 - 665X_6 + 98X_7 \\ \dot{X}_7 &= 2.391X_5 + 2.391X_6 - 6.694X_7 + 3.425X_8 \\ \dot{X}_8 &= 3.353X_7 - 5625X_8 - 68.19X_9 + 0.129U_1 \\ \dot{X}_9 &= -7095X_8 - 1263X_9 + 1.04U_2 \\ \dot{X}_{10} &= -0.5X_{10} + 5U_3 \\ \dot{X}_{11} &= -2.0X_{11} + 2.0U_1 \end{aligned} \quad (7)$$

이를 벡터 행렬식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{X}(t) = AX(t) + BU(t) \quad (8)$$

### 4. 최적 부하 추종제어 시스템을 기존 모델로 한 적응 모델 추종제어 시스템의 설계

가압 경수형 원자로에 대한 부하 추종제어를 하기 위하여 그림2와 같은 최적부하 추종제어 시스템을 선택하고 가압 경수형 원자로를 선형 시분변 시스템으로 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + BU(t) \\ Y(t) &= CX(t) \end{aligned} \quad (9)$$

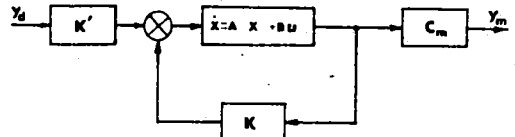


그림2. 최적부하 추종제어 시스템

이때 제어변수는 1차 냉각제 노심 평균온도 Tw, 증기발생기의 유체질량 Mf 및 드로틀 밸브의 열림정도 Cv로 선정하고 입력을 제어봉 구동을 위한 전기 신호 Ur, 급수유량 Wfv와 드로틀 밸브를 움직이는 전기신호 Uv로 선정한다. 따라서 입력 변수와 제어변수가 차원이 같을때는 다음과 같이 입력을 결정하여 주면 그림2에서 요구부하 Yd와 제어변수 Yn이 같아지게 된다.

$$U = -KX(t) + K'Yd \quad (10)$$

여기서,  $K' = (C(-A+BK)^{-1}B)^{-1}$   
K의 값은 잘 알려진 선형 최적제어 이론을 이용하여 계산한다. K의 값은 평가함수 J가 최소가 되도록 하는 값을 갖도록 하기 위하여 다음과 같은 Riccati 방정식의 해를 구하여 결정한다.

$$\begin{aligned} J &= \int_0^t [Y^T(t)QY(t) + U^T R U(t) + X^T(t)P X(t)] dt \\ 0 &= A^T P + P A - P B R^{-1} B^T P + Q \\ K &= R^{-1} B^T P \end{aligned} \quad (11)$$

K의 값이 결정되면 10식과 11식을 8식에 대입하여 다음과 같은 선형 최적부하 추종제어 모델을 얻는다.

$$\begin{aligned} \dot{X}(t) &= AX(t) + BU(t) \\ &= AX(t) + B[-KX(t) + (C(-A+BK)^{-1}B)^{-1}Yd] \\ &= AmX(t) + BmYd \end{aligned} \quad (12)$$

최적부하 추종제어 시스템을 기존모델로 하여 선형모델 추종제어 시스템을 1단계 제어기로 구성하고 파라미터 변화에 대해서도 언제나 오차가 0이 되게 보장해주는 적응계를 구성하기 위하여 적응모델추종제어 시스템을 2단계 제어기로 구성한다. 플랜트는

$$Y = A_p Y + B_p U_{p1} + B_p U_{p2} \quad (13)$$

여기서,  $U_{p1} = -K_p Y + K_m X + K_u U$   
 $U_{p2} = \Delta K_p(e, t)Y + \Delta K_u(e, t)Yd$

적응신호  $\Delta K_p(v, t)$ 와  $\Delta K_u(v, t)$ 를 다음과 같이 비례 적분항으로 구성하면 적응기구(Adaptation Mechanism)를 간단히 할수있다.

$$\begin{aligned} \Delta K_p(v, t) &= (F_v(G_y)^T dt + F'v(G_y)^T + \Delta K_p(0)) \\ \Delta K_u(v, t) &= (M_v(NUM)^T dt + M'v(NUM)^T + \Delta K_u(0)) \end{aligned} \quad (14)$$

여기서  $F, G, M, N > 0$   $F', M' \geq 0$   
적분비례 적응기구를 사용하면 피이드백 블록이 언제나 Popov의 적분 부등식을 만족시켜 주며 적분항은 적응기구의 기억장치 역할을 해 주고 비례항은 적응 과정의 초기에 오차를 감소 시켜 주는 과도항 역할을 한다.<sup>10)</sup>

비선형 피이드백 블록이 위와같이 Popov의 적분 부등식을 만족할때 등가 선형부분의 전달행렬  $Z(s) = D(sI - A_m + B_p K_m)^{-1} B_p$ 가 완전양의 실수가 되도록 하는 D행렬을 결정 해주면 구성된 가압 경수형 원자로의 적응모델 추종제어 시스템은 언제나 초안정하다.<sup>11)</sup>

그림3은 비례적분 적응법칙을 사용한 가압경수형 원자로의 적응 모델 추종제어 시스템을 나타낸다.

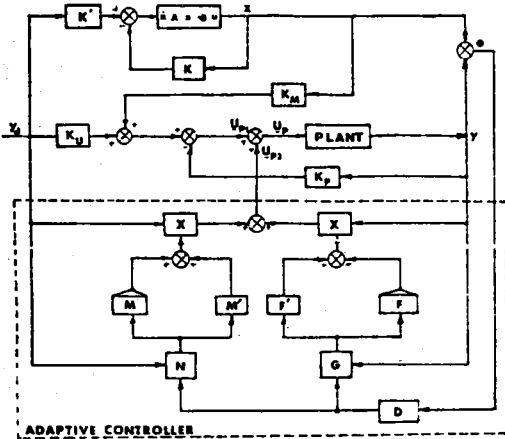


그림3. 비례적분 적응법칙을 이용한 가압경수형 원자로의 적응모델 추종제어 시스템

5. 시뮬레이션 및 결과 고찰

시뮬레이션 실험은 4장의 적응모델 추종제어 시스템에 적용하였으며 원자로의 구조만 알뿐 파라미터 값을 정확히 알지 못하는 것으로 하기 위하여 파라미터 진제를 10% 증가(Ap형탑\*1.1) 시키고, 다양한 부하수요에 추종할수 있는것을 보이기 위하여 2200Mwth 가압 경수형 원자로의 정격 출력 50% 에서 10% 부하가 증가 할때와 10%씩 증가와 감소를 계단상으로 반복 할때 선형모델 추종제어(LMFC)만에 의한 응답특성과 적응모델 추종제어 시스템(AMFC)의 동특성을 비교하였다.

그림4-a는 제어봉 증가위치에 대한 기준모델(1)과 파라미터를 10% 증가 시켰을때 LMFC의 응답(2)을 나타낸다. 그림4-b는 제어봉 증가위치에 대한 기준모델과 LMFC와의 응답 오차(1)와 AMFC의 비례 적분항의 이득을 변화 시켰을때 기준 모델과의 오차(2,3,4)를 나타낸다.

그림5-a는 원자로 출력 태발에 대한 기준모델(1)과 파라미터를 10% 증가시켰을 때 LMFC의 응답(2)을 나타낸다. 그림5-b는 원자로 출력 태발에 대한 기준모델과 LMFC와의 응답 오차(1)와 AMFC의 비례 적분항의 이득을 변화 시켰을때 기준 모델과의 오차(2,3,4)를 나타낸다.

그림6-a는 부하수요가 100초 마다10%씩 계단상으로 증감변화 할때 기준모델과 LMFC와의 제어봉 증가위치 오차(e1), 원자로 출력 태발 오차(e2), 핵연료 평균온도오차(e3)를 나타낸다.

그림6-b는 그림6-a의 경우에 대해서  $G=0.0001, F=2.0, F'=0.01, M=1000, N=1.0, N'=0.01$  로 하였을 때 AMFC의 오차를 나타낸다. 10% 파라미터 변화에 대하여 제어봉 증가위치는 그림4-a에서와 같이 약 1.1%의 오차가 생기며 원자로의 출력태발은 그림5-a 에서와 같이 약 2.5%(50.6Mwth) 감소 한다. 설계된 적응모델 추종제어기의 응답특성은 그림4-b와 그림5-b에서와 같이 약 90초후 부하추종상태로 하였다. 또한 비례적분항의 이득을 변화 시키면

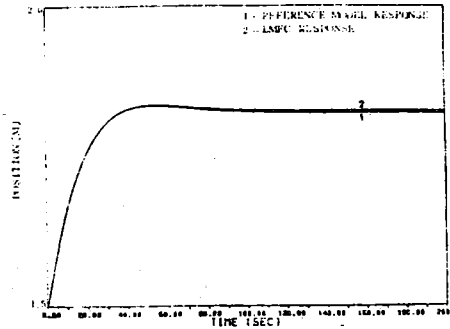


그림4-a. 제어봉 위치

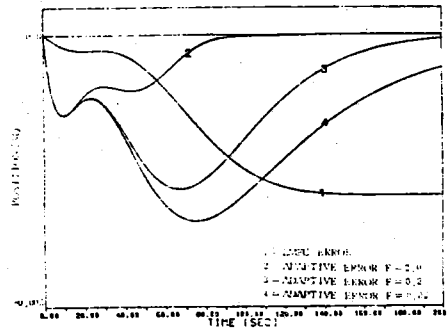


그림4-b. 모델과 플랜트의 제어봉 위치 오차

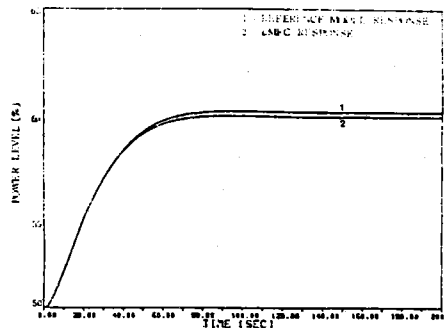


그림5-a. 원자로 출력 태발

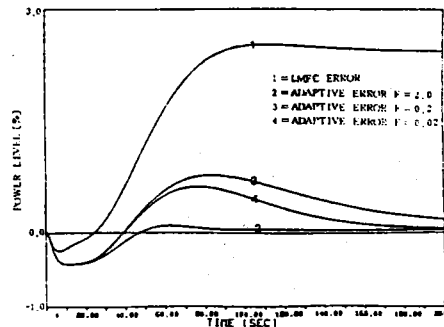


그림5-b. 모델과 플랜트의 원자로 출력태발 오차

그림4-b와 그림5-b에서와 같이 오차의 크기와 적응시간을 조정할수 있음을 알 수 있었다.

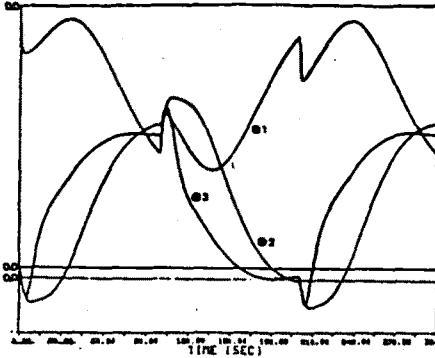


그림6-a. 계단상 변화 입력에 대한 선형모델 추종제어 시스템 상태 오차

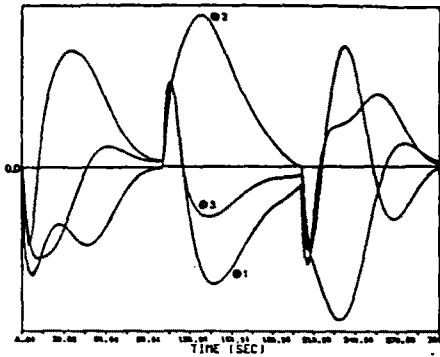


그림6-b. 계단상 변화 입력에 대한 적응모델 추종제어 시스템 상태 오차

그리고 그림6-a와 그림6-b에서와 같이 부하 수요가 계단상으로 변화할때 적응모델 추종 제어가 부하 수요 변화후 약 90초 부터 부하추종상태로 안정되어 기준모달을 잘 추종 하는 것을 확인 할 수 있었다.

#### 6. 결론

본 논문에서는 가압 경수형 원자로의 정상상태 및 부하 추종운전을 위하여 50% 출력 준위에 대한 선형화 모델을 이용한 최적부하 추종제어기를 1단계 제어기로 설계하고, 2단계 제어기를 신호합성 병렬구조 적응 모델 추종제어기를 설계하여 2200 Mwth인 가압 경수형 원자로에 적용 하여 시뮬레이션 하였다.

초안정도를 보장해주는 비례적분 적응기구를 사용함으로써 제어기의 구성을 간단히 할 수 있으며, 적응기구 이득 값을 조정하여 응답시간과 오차의 크기를 조정 할 수 있었다.

본 연구에서 제시한 적응 모델 추종제어기는 원자로의 파라미터 변화나 또는 파라미터 값을 알지 못할때라도 적응 기구를 통하여 응답특성을 개선하여 줌으로써 가압 경수형 원자로의 부하 추종제어에 실제 응용할 수 있는 가능성을 제시 하였으며, 앞으로 보다 간단한 기준모달을 이

용할 수 있는 방법과 적응 기구 이득을 결정 하기 위한 최적화 방법에 대한 연구가 계속 되어야 할 것이다.

#### 참고 문헌

1. R.L. Moore and F.C. Scheweppe, "Model Identification for Adaptive Control of Nuclear Power Plants", Automatica, Vol. 9, pp. 309-318, 1973.
2. Yang, T., "A Study of Load Change Control in PWRs Using the Methods of Linear Optimal Control", The Pennsylvania State Univ., Ph. D. Dissertation, Mar., 1983.
3. Sinha, N.K. and Stephen S.Y. Law, "Adaptive Nuclear Reactor Control without Explicit Identification" Journal of Cybenetics, Vol. 7, pp.23-35, 1977.
4. Kumpati S. Narendra, and Lena S. Valavani, "A Comparison of Lyapunov and Hyperstability Approaches to Adaptive Control of Continuous Systems", IEEE Trans. Automatic Control, Vol. AC-25, No.2, pp.243-247, 1980.
5. 김낙고, 박상희, "가압 경수형 원자로의 최적부하 추종제어에 관한 연구", 전기학회지, 제34권, 제12호, pp.491-497, 1985.
6. V.M. Popov, "Hyperstability of Control Systems", Springer-Verlag, 1973.
7. I.D. Landau., "Adaptive Control, The Model Reference Approach", Marcel Dekker, Inc., 1979.
8. Glasstone, S. and Sesonske, A., "Nuclear Reactor Engineering", 3/e, VNR Co., New York, pp.299-302, 1980.
9. Anderson, B.D.O. and Moor, J.B., "Linear Optimal Control", Prentice-Hall, Inc., 1971.
10. I.D. Landau, and B. Courtiol, "Design of Multivariable Adaptive Model Following Control Systems", Automatica, Vol. 10, pp.483-494, 1974.
11. S.D. Kraft and Edward T. Wall, "Experimental Microprocessor-Based Adaptive Control System", IEEE Control Systems Magazine, Vol. 6, No. 1, pp.35-39, 1986.
12. 권성하, "슬라이드 모우드를 이용한 적응모델 추종제어 계통의 설계", 고려대학교 전기공학부, 박사학위 논문, 1986.