

가변구조 적응 제어이론에 의한 원자로 부하추종 출력제어에 관한 연구

A Study on the Variable Structure Adaptive Control Systems for a Nuclear Power Reactor

전	희	영	고	려	대	학	고	전	기	공	학	과	교	수
박	국	택	고	려	대	학	고	전	기	공	학	과	교	수
권	상	하	동	양	공	업	전	문	대	학	원	기	과	전
박	근	영 *	고	려	대	학	고	전	기	공	학	과	교	수

ABSTRACT

This paper describes a general method for the design of Variable Structure Model-Following Control Systems (VSMFC). This design concept is developed using the theory of variable structure systems and slide mode.

The feasibility and the advantages of the method are illustrated by applying it to a 1000 MWe Boiling Water Reactor. The control is studied in the range of 85 - 90 % of rated power for load-following control.

A set of 12 nonlinear differential eq. are used to simulate the total plant. A 6th order linear model has been developed from these equations at 85% of rated power.

The obtained controller is shown by simulations to be able to compensate for a plant parameter variation over a wide power range.

이 논문은 모델 추종 선형제어계(LMFC)로 극복할 수 있다. 그러나 LMFC도 모델의 파라미터가 변동이 심할 때는 유용한 방법이 되지 못하고 모델 추종 적응제어계(AMFC)로 대응하고 있다.<sup>1)</sup>

AMFC는 여러가지 측면으로 연구되어 오고 있지만 실제 계통에 적용할 때 안정도와 수렴속도가 큰 문제점으로 등장하며 이를 극복하기 위한 방법으로 VSMFC를 생각하게 되었다.<sup>2) - 5)</sup>

VSMFC는 SISO 계통에 대한 많은 연구가 이루어지고 있으나 MIMO 계통에 대한 연구발표가 거의 없는 상태이며 여기서는 MIMO 계통에 대한 VSMFC를 고찰한다.

사태연구로 택한 비등경수형원자로는 12개의 비선형미분방정식으로 등부심이 주어지고 6차 계의 수학적모델을 설정한다. VSMFC 이론에 의거 시뮬레이션 모델과 시뮬레이션 기준모델을 따라가게끔 제어편차를 구하고 실제 물리적 시스템에 제어 입력을 가해 원자로 출력이 부하추종을 원활하게 하도록 조사를 하는 것이 본 논문의 목적이다.

1. 서론

본 논문은 가변구조 모델 추종 적응 제어계(Variable Structure Model-Following Control System : VSMFC)

설계의 한 방법을 연구하고 이를 비등경수형 원자로에 적용하여 이론의 유효성을 제시하는 것이다. 선형최적제어이론(Linear Optimal Control)을 실제 다변수 계에 적용하려면 평가지표를 설정하는데 많은 어려움이 있으며

2. 가변구조 모델추종 적응 제어이론

가변구조계는 스위칭 표면에 슬라이드 모드가 있는 것으로 슬라이딩 모드중에는 채환계통이 파라미터변동이나 입력잡음에 영향을 매우 적게 받는다. VSS이론에 의한 AMFC를 설계하면 모델-모델 오차의 과도 응답을 임의로 설계할 수 있다.<sup>3)</sup> 모델추종 적응 제어시스템의 상태방정식은 식(1)과 같이 나타낸다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_m &= A_m X_m + B_m u_m \\ \dot{X}_p &= A_p X_p + B_p u_p \end{aligned} \quad (1)$$

상태편차 벡터는 식(2)-(3)과 같다.

$$\dot{e}(t) = X_m(t) - X_p(t) \quad (2)$$

$$\dot{e}(t) = A_m e(t) + [A_m - A_p(t)] X_p(t) + B_m u_m(t) - B_p u_p(t) \quad (3)$$

여기서  $A_p, B_p$ 의 파라미터는 미지의 값 혹은 시변이며 단지 파라미터 값의 변화범위를 알고 있다.

스위칭 표면은 (4)(5)식과 같이 나타낸다.

$$S = Ge = 0 \quad (4)$$

$$\dot{S} = G\dot{e} = G[A_m e(t) + (A_m - A_p)X_p + B_m u_m - B_p u_p] = 0 \quad (5)$$

(4)식이 이루어지기 위해서  $S > 0$  영역에 있을 때는  $S < 0$  영역으로,  $S < 0$  영역에 있을 때는  $S > 0$  영역으로  $S$ 의 값이 변화하도록  $U_p$ 의 값이 가변구조를 가져야 하며, 이 스위칭로직이 무한사이클로 일어나면  $U_p$ 의 값은 거의 진동하는 제어입력 이 되고 결국  $S$ 가  $S=0$ 의 스위칭초평면에 머무르게 되어 상태편차가 0에 수렴하여 모델 추종이 이루어진다.

슬라이딩 모션은 (4)식의 스위칭표면상 한점에서 상태궤적을 따르는 방향으로 일어나며 상태는 유한시간 동안 슬라이딩을 일으킨다. 슬라이딩 모션이 일어날 조건은 다음식으로 표시된다.

$$S \cdot \dot{S} < 0 \quad (6)$$

SISO에서는  $S$ 가 scalar 이기 때문에  $G$  행렬은  $[1 \times n]$ 차원이고  $G$ 의 원소는 과도상태편차 응답이 원하는 응답이 되게끔 경해주면 되나 MIMO에서는  $S$ 와  $U_p$ 가  $[r \times 1]$ 차원의 벡터이기 때문에  $S$ 와  $U_p$ 가 1대1 대응관계를 이루기 위해 (5)식에서  $GB_p$ 가 단위행렬이 되어야 한다. 그래서  $G$ 를 (7)식과 같이 하고 (5)식에 대입하면 (8)식이 된다.

$$G = (GB_p)^{-1} G \quad (7)$$

$$\dot{S} = G A_m e + G(A_m - A_p)X_p + G B_m u_m - U_p \quad (8)$$

(8)식에서  $U_p$ 에 관해 정리하면 (9)식이 된다.

$$U_p = G A_m e + G(A_m - A_p)X_p + G B_m u_m - \dot{S} \quad (9)$$

여기서 슬라이딩 모션이 일어날 조건인 (6)식으로 부터  $S$ 와  $\dot{S}$ 는 반대부호가 되므로  $-\dot{S}$  대신  $\alpha S$ 를 대입하면 (10)식이 된다.

$$U_p = G_e e + G_p X_p + G_m u_m + \alpha S \quad (10)$$

여기서  $\alpha$ 는 임종의 weighting 값이고,  $G_e, G_p, G_m$  행렬은  $A_p, B_p$ 의 파라미터 변화에 의해 영향을 받지 않을 때는 (11)식과 같이 된다.

$$G_e = G A_m, \quad G_p = G(A_m - A_p), \quad G_m = G B_m \quad (11)$$

그리고  $G_e, G_p, G_m$  행렬이  $A_p, B_p$ 의 파라미터 변

화에 의해 영향을 받을 때는 파라미터 변화 범위의 최대값의 절대치에  $S$ 값의 부호에 따라  $S$ 의 정로직을 바꾸는 (12)식이 된다.

$$U_p = [\text{sgn}(S)] [G_e e + G_p X_p + G_m u_m] + \alpha S \quad (12)$$

### 3. 원자로 예의 적용

비동계수형 원자로 (BWR)의 동특성은 식(13)와 같은 12개의 비선형 방정식으로 모델링된다.

$$\begin{aligned} \dot{X}_p(t) &= f(X_p, u_p) \\ \dot{Y}_p(t) &= C X_p(t) \end{aligned} \quad (13)$$

본 연구에서는 원하는 출력상태 조건을 얻으려는 제어입력을 기준으로 파악한다. 출력 조건들은 원자로의 출력준위에 따라 다르다.

$$f(X_p^*, u_p^*) = 0 \quad (14)$$

원식의 해를 구하면 다음과 같다.

$$u_p^* = F_u(L), \quad X_p^* = F_x(L), \quad Y_p^* = F_y(L) \quad (15)$$

여기서  $L$ 은 원자로의 출력 요구 준위이며  $u_p^*, X_p^*, Y_p^*$ 들은 제어, 상태 및 출력 벡터들의 기준치를 나타낸다.  $U_p^*$ 는 원자로의 출력 요구에 따라 정해지며 따라서 피이드 포워드 제어특성을 갖게 된다.

제어계통의 설계목적은 출력요구  $L$ 이 변할 때 상태벡터  $X_p(t)$ 를 기준치  $X_p^*(t)$ 에 일치시키는 것이다.  $L$ 이 변하면 실제입력  $U_p(t)$ 는  $U_p^*(t)$ 와 차이가 생기며 이것을 보정하기 위한 피이드백 입력을 구해야 하며 본 논문에서는 이 입력을 최적제어 대신 가변구조 모델추종 제어를 통해서 구하고자 한다.

우선 식(13)를 식(14)의 기준값에 대해서 선형화시키면 식(15)와 같다.

$$\begin{aligned} \delta X_p(t) &= A_p(t) \delta X_p(t) + B_p(t) \delta u_p(t) \\ \delta Y_p(t) &= C \delta X_p \end{aligned} \quad (16)$$

$$\begin{aligned} \delta X_{pi} &\approx \frac{x_i - x_i^*}{x_i^*}, \quad \delta u_{pj} \approx \frac{u_{pj} - u_{pj}^*}{u_{pj}^*}, \quad \delta Y_{pj} \approx \frac{y_{pj} - y_{pj}^*}{y_{pj}^*} \\ A_{pij} &\approx \frac{x_{ij}^*}{x_i^*} \left[ \frac{\partial f_i}{\partial x_{ij}} \right]_{x_p^*, u_p^*}, \quad B_{ij} \approx \frac{u_{ij}^*}{x_i^*} \left[ \frac{\partial f_i}{\partial u_{ij}} \right]_{x_p^*, u_p^*} \end{aligned} \quad (17)$$

식(17)과 같이 상태, 제어 및 출력섭동 벡터들을 정의한 것은 행렬  $A_p$  및  $B_p$ 의 출력준위에 대한 의존도를 감소시키므로서 넓은 출력범위에 걸쳐 원활하게 제어하기 위함이다. 출력준위 85%에서 구한 계통행렬들은 식(18)과 같다.

$$A_p = \begin{bmatrix} -7.3 & 13. & -22.08 & 0. & -61.92 & 0. \\ 0.1 & -0.1 & 0. & 0. & 0. & 0. \\ 0.099 & 0. & -0.2 & 0. & 0. & 0.102 \\ 0. & 0. & 0. & 10. & 0. & 21.415 \\ 0. & 0. & 1.821 & 0.536 & -4.563 & -1.431 \\ 0. & 0. & 0.048 & -0.024 & 0. & -0.024 \end{bmatrix}$$

$$B_p = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ -1.738 & 23.487 \\ 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (18)$$

$A_p$  행렬의 원소중  $A_p(1,5)$ 는 원자로의 보이드함의 계수를 포함하고 있으며 이것이 출력준위와 관계가 변한다. 또한 전반적으로 원자로의 동특성은 출력보장진동기와 말기의 특성이 다르다. 따라서 원자로의 특성이 달라지더라도 안정화 모델을 추종하도록 다음 제어하면 좋은 제어 특성을 얻을 수 있다.

2점의 가변구조 모델추종근음 제어 이론을 적용하기 위해서 선형모델동특성은 원자로 출력의 큰 오버슈트가 없이 빠른 시간 안에 원점으로 수렴하도록 고유치가  $(-4.05, -10, -13.1, -0.1, -0.1, -0.66)$ 을 갖도록 식(18)의 프랜트 모델에 극점배치 방법에 의해서 식(19)로 모델로 만들었다.

$$\begin{aligned} \delta \dot{X}_m &= A_m \delta X_m + B_m \delta U_m \\ \delta U_m &= -K \delta X_m \end{aligned} \quad (19)$$

여기서,

$$A_m = \begin{bmatrix} -13 & 13 & -22.08 & 0 & -61.72 & 0 \\ 0.1 & -0.1 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0.099 & 0 & -0.2 & 0 & 0 & 0.102 \\ 0 & 0 & 0 & -10 & 0 & 21.415 \\ 0 & 0 & 3.82 & 0.536 & -4.563 & -1.431 \\ 0 & 0 & 0.048 & -0.024 & 0 & -0.024 \end{bmatrix}$$

$$B_m = \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 0 \\ 0 & 23.487 \\ -1.738 & 0 \\ 0 & 0 \end{bmatrix}$$

$$K = \begin{bmatrix} -0.61E-3 & -0.61E-3 & -0.26E-3 & 0.28E-3 & 0.48E-3 & -0.49E0 \\ -0.67E-3 & -0.66E-3 & -0.26E-3 & 0.28E-3 & 0.48E-3 & -0.49E0 \end{bmatrix}$$

원자로 상의 일부는 측정할수 없으므로 감소관측자를 이용해서 상태섭동 벡터를 추종한다.

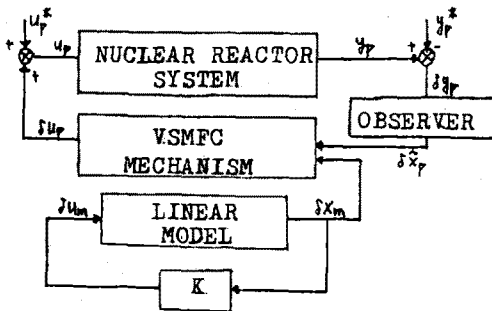


그림 1 제어계의 블록선도  
Fig. 1 The block diagram of control system

$$Q = \begin{bmatrix} 1 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 \end{bmatrix} \quad (20)$$

$$G = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & -0.58 & 0 \\ 0.04 & 0 & 0 & 0.04 & 0 & 0 \end{bmatrix} \quad (21)$$

$$G_e = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -1.624 & -0.309 & 2.626 & 0.824 \\ -0.554 & 0.554 & -0.94 & -0.406 & 2.6 & 0.912 \end{bmatrix} \quad (22)$$

$$G_m = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \quad (23)$$

$$G_f = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0.08 & 0 \end{bmatrix} \quad (24)$$

$$\alpha = 10. \quad (25)$$

4. 결과

원자로 출력이 정격치의 85%에서 90%로 변함에 따라 보이드함의 계수가 변해  $A_p(1,5)$ 행렬의 원소가 -61.92에서 -60.0으로 변하게 된다. (20)-(25)식의 값들을 이용하여 6개의 선형기준 모델미분방정식과 6개의 선형프랜트 모델 RUN-GE-KUTTA법으로 컴퓨터 시뮬레이션하고 이로부터 구한 제어보장벡터를 정격제어값에 가감해 실제 시스템인 12개의 비선형미분방정식을 해석하여 원자로 출력이 기대하는 값으로 변하는 것을 관찰했다.

결과는 (그림2)-(그림4)와 같다.

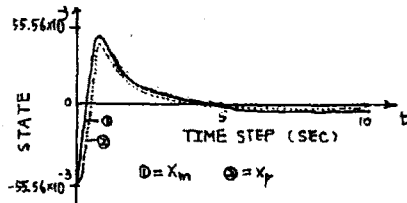


그림2. 모델과 프랜트의 상태섭동 벡터  
Fig.2 reactor Power Perturbation of Model and Nuclear Reactor



그림3. 모델과 프랜트의 원자로 출력섭동 편차  
Fig.3. Perturbation Error of the Reactor Power between the Model and the Plant

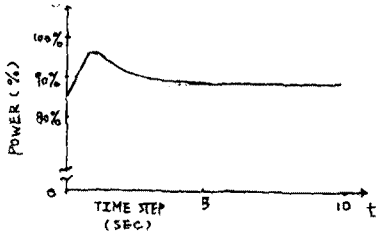


그림4. 원자로 시스템의 출력  
Fig.4 output of power of nuclear reactor system.

6) S.H.Kwon, "A Study on the Variable Structure Model-following Control Systems", DYJC Research Reports Vol.6, pp.139-153(1984)  
7) G.T.Park, "The Design of an Optimal Control Systems for a Nuclear Power Reactor", KOREA U. Phd. Thesis(1980)

### 5. 결 론

AMFC 에 VSS이론을 결합한 VSMFC 이론을 MIMO 계통에 적용하는 방법을 고찰하고 원자로 부하추종출력제어에 적용하여 다음의 결론을 얻었다.

- (1) (7) 행렬을 (7) 식과 같이 함으로서 S와  $U_p$  벡터가 1대1 대응관계를 이루어 MIMO 계통에 VSMFC를 원활히 적용할 수 있게되었다.
- (2) 슬라이딩 모션이 일어난 조건을 이용해서 (10) 식처럼 S의 값을 제어입력에 가함으로서 모델추종을 보다 적절히 할 수 있었다.
- (3) (그림2) 예서와 같이 매우 빠른 시간에(약 5초) 상태성동 벡터가 0으로 수렴한다.
- (4) (그림3) 예서와 같이 상태편차의 수렴속도가 빠르다.
- (5) (그림4) 예서와 같이 실제원자로 출력이 정거치의 85%에서 90%로 추종하는 동안 약 5%의 오우버슈트를 나타내며 원하는 출력을 잘 얻을 수 있다.

### 6. 참고문헌

- 1) K.K.Young, "Design of Variable Structure Model-Following Control Systems" IEEE AC-23, pp.1079-1085 (1978)
- 2) V.I.Utkin, "Variable Structure with Sliding Mode; A Survey", IEEE AC-22, pp.212-222(1977)
- 3) K.K.Young, "Asymptotic Stability of Model Reference System with Variable Structure Control", IEEE AC-22, pp.279-281(1977)
- 4) U.Itkis, "Control Systems of Variable Structure", John Wiley(1976)
- 5) A.S.I.Zinober, "Multivariable Variable-structure Adaptive Model-Following Control Systems", IEEE. Proc. Vol.129, pp.6-12(1982)