

전력 계통 안정화 제어를 위한 이산시간 제어기 설계

박 영 문, 현 승 호*
서울대학교 공과대학 전기공학과

A Study on digital Controller for Power System Stabilization

Young Moon, Park Seung Ho, Hyun
Department of Electrical Engineering, Seoul National University

ABSTRACT

A new algorithm for self-tuning digital controller is proposed. The system to be controlled is identified on line in auto-regressive-moving-average(ARMA) form via recursive least mean square method. The control law is obtained from the minimization of an objective function. The proposed objective function is similar to that of Generalized Minimum Variance(GMV) method but modified to lessen the overshoot and to avoid numerical divergence problem. This algorithm is applied to the power system stabilization and the comparison of the proposed method with a conventional power system stabilizer(PSS) is presented.

I. 서 론

전력계통을 안정하게 유지하는 것은 계통의 효율적인 운용과 신뢰성에 있어 매우 중요한 문제의 하나이며, 이를 위한 많은 연구가 이루어져왔다.

1970년대 이후 전력계통 안정화 장치(Power System Stabilizer: PSS)의 각 정수를 선정하는 연구가 발표되었는데 이들은 주로 1기 무한모선에 적용될 수 있는 이론들로 근 제적 법이나 고유치 지정법 등이 이용되었다. 80년대 이후 이들을 다기계통에 적용할 수 있는 이론들이 제안되었고 최적화기법을 이용한 최적 계수선정에 관한 이론이 발표되었다. 그러나 이러한 방법들은 제어 대상 시스템을 알고있어야 하고 계수를 선정 하는데 많은 노력이 필요하다.

한편, 80년대 이후 적응제어이론을 이용한 자기동조 제어기(Self-tuning regulator: STR)개발에 관한 연구가 진행되어왔다. 이 방법은 제어대상 시스템에 대한 인식과 제어가 같이 이루어지므로 시변성을 갖는 시스템이나 동작점이 바뀌는 경우에도 적절한 제어가 이루어질 수 있다.

본 논문은 STR 방법을 적용한 발전기의 안정화 제어기에 관한 알고리즘을 제시한다. 본 논문의 제어기는 동기발전기의 위상 편차($\Delta\omega$)를 입력으로하고 여자기에 대한 보조입력을 출력한다. 기존의 PSS 계수선정 방법과 비교한 결과를 제시한다.

II. 본 론

1. 제어 대상의 인식.

본 논문에서는 제어 대상을 ARMA 모형으로 인식하며, 시스템 인식에 있어 다음과 같은 제약조건을 둔다.

- i) 현재로부터 L 시간 전까지의 데이터만을 고려한다.
 - ii) 추정 계수가 급격히 변하지 않도록 한다.
- 위의 i)항은 과거의 불필요한 데이터를 배제하여 오차의 누적을 줄이기 위함이고 ii)항은 추정 계수가 발산함을 막기 위한 것이다.

선형시스템의 k 시간 출력은 다음과 같이 추정될 수 있다.

$$y'(k) = \sum_{i=1}^N a_i(k-1) \cdot y(k-i+1) + \sum_{i=1}^M b_i(k-1) \cdot u(k-i+1)$$

$a_i(k-i), b_i(k-1)$: k-1 시간에서의 계수 추정치
 $y'(k)$: k 시간에서의 출력 추정치
 $u(i)$: i 시간의 입력

계수 벡터를 다음과 같이 정의하면,

$$\theta(k-1) = [a_1(k-1), \dots, a_N(k-1), b_1(k-1), \dots, b_M(k-1)]^T$$

다음의 목적함수를 최소로 하는 $\theta(k-1)$ 가 구하고자하는 대상 시스템의 ARMA 모형 계수이다.

$$J(k-1) = \sum_{i=1}^{k-1} (y(i+1) - y'(i+1/k-1))^2 \quad (1)$$

$y'(i+1/k-1)$: $\theta(k-1)$ 로서 추정한 i 시간의 출력.

(1) 식에서 $\phi(i)$ 를 다음과 같이 정의하면

$$\phi(i) = [y(i), \dots, y(i-N+1), u(i), \dots, u(i-M+1)]^T$$

$$y'(i+1/k-1) = \phi(i)\theta(k-1) \quad (2)$$

(2)식을 (1) 식에 대입하면

$$J(k-1) = \sum_{i=1}^{k-1} (y(i+1) - \phi(i)\theta(k-1))^2 \quad (1-1)$$

이제 (1-1) 식이 위의 제약조건을 만족하도록 변형하면

$$J'(k-1) = \sum_{i=k-L}^{k-1} (y(i+1) - \phi(i)\theta(k-1))^2 \quad (1-2)$$

$$(\theta(k-1) - \theta(k-2))^T W (\theta(k-1) - \theta(k-2))$$

여기서 W는 계수 행렬이다.

식 (1-2)가 최소가 되는 $\theta(k-1)$ 을 구하면 다음과 같다.

$$\theta(k-1) = F(k-1) \cdot \left[\sum_{i=k-L}^{k-1} \phi(i) \cdot y(i+1) + W \cdot \theta(k-2) \right] \quad (3)$$

$$F(k-1) = \left(\sum_{i=k-L}^{k-1} \phi(i)\phi(i)^T + W \right)^{-1}$$

새로운 데이터 $\phi(k)$ 와 $y(k+1)$ 이 추가되었다면 Matrix Inverse Lemma 를 이용하여 다음과 같은 결과를 얻는다.

$$\theta(k) = \theta(k-1) + F(k) \cdot [\phi(k) \cdot e(k) - \phi(k-L) \cdot e_0(k) + W \cdot e_h(k)] \quad (4)$$

$$F(k) = F' + \frac{F' \cdot \phi(k-L) \cdot \phi(k-L)^T \cdot F'}{1 - \phi(k-L)^T \cdot F' \cdot \phi(k-L)}$$

$$F' = F(k-1) \cdot \frac{F(k-1) \cdot \phi(k) \cdot \phi(k) \cdot F(k-1)}{1 + \phi(k) \cdot F(k-1) \cdot \phi(k)}$$

$$e(k) = y(k+1) - \phi(k) \cdot \theta(k)$$

$$e_0(k) = y(k-L+1) - \phi(k-L) \cdot \theta(k-L)$$

$$e_h(k) = \theta(k-1) - \theta(k-2)$$

$$F(0) = W$$

2. 제어 규칙 (Control Law) 의 유도

최소 편차 방법(Minimum Variance Method: MV)에 의한 목적함수는 다음과 같다.

$$J(k) = (y(k+1) - y_d)^2 \quad (5)$$

y_d : 정상상태에서의 출력의 목표값

(5)식에서 $y(k+1)$ 은 $u(k)$ 의 함수로 표현될 수 있으므로 이 식의 값을 최소로 하는 $u(k)$ 를 구할 수 있다. 이 방법은 일종의 One Step Optimal Control이며 제어가 이루어진 바로 다음 순간에 출력이 목표값에 이르도록 하고 계산이 매우 간편하다는 장점을 지닌다. 그러나 이 방법은 다음과 같은 불안정한 요소를 가지고 있다.

- i) 한 번의 제어량 출력을 목적으로 보내기 위해 매우 큰 제어량을 필요로 한다.
- ii) 측정주기 중간에서 시스템의 출력이나 내부상태가 고려되지 않는다.

i)의 경우 제어량의 상, 하한치를 정하는 방법이 있으나, 제어신호에 제한이 가해지면 출력의 목표값에 대한 오차가 발생하고 이에의해 다시 큰 제어량이 필요하여 결국 감쇠효과가 나 빠진다.

ii)의 문제는 제어주기를 가능한 한 작게 하여 피할 수 있으나 대부분의 제어시스템은 적절한 제어주기가 정해지므로 불가피한 경우도 있다.

i)의 문제에 대해서는 Generalized MV(GMV) 방법이 이미 제안되었으며 그에대한 안정성도 제시되어있다. GMV 방법에 의한 목적함수는 다음과 같다.

$$J_{GMV}(k) = (y(k+1) - y_d)^2 + q(u(k) + u_d)^2 \quad (5-1)$$

u_d : 정상상태의 제어량
 q : 계수

또는

$$J_{GMV2}(k) = (y(k+1) - y_d)^2 + q(u(k) + u(k-1))^2 \quad (5-2)$$

본 논문에서는 (5-1)식을 이용하며 여기에 Model Reference 방식을 추가한다. 즉, 목표값에 여유도를 주어 목표값에서 여유도 비율만큼의 차를 주기 목표값으로 설정한다. 이를 식으로 표현하면,

$$y_{step}(k+1) = (y_d - y(k)) \cdot Mg + y(k) \quad (6-1)$$

Mg : 여유도 (0 ≤ Mg < 1)

ii)의 단점을 보완하는 한 방법으로 본 논문에서는 제어주기 중간에 대상시스템의 출력을 실측하였다. 따라서 인식된 대상시스템 모형은 전주기 모형과 반주기 모형 두 가지가 있으며 목적함수에도 이들 두 모형이 동시에 고려된다.

$$y(k+1) = \sum_{i=1}^N A_i(k) \cdot y(k-i+1) + \sum_{i=1}^M B_i(k) \cdot u(k-i+1) \quad (7-1)$$

전주기 모형

$$y(k+1/2) = \sum_{i=1}^N a_i(k) \cdot y(k-(i-1)/2) + \sum_{i=1}^M b_i(k) \cdot u(k-[(i-1)/2]) \quad (7-2)$$

반주기 모형

[·] : 가우스 기호

목적함수에서 반주기 모형의 주기 목표값은 제어주기 중간에 대상시스템의 출력이 직선에 가깝도록 정하였다.

$$y_{step}(k+1/2) = (y(k) + y_{step}(k+1))/2 \quad (6-2)$$

식 (6-1), (6-2), (7-1), (7-2) 와 (5-1)을 결합하면 다음과 같다.

$$J_{proposed}(k) = w_1 \cdot (y(k+1) - y_{step}(k+1))^2 + w_2 \cdot (y(k+1/2) - y_{step}(k+1/2))^2 + w_3 \cdot (u_d - u(k))^2 \quad (8)$$

w_1, w_2, w_3 : 가중 계수

(8)식으로부터 $u(k)$ 를 구하면,

$$u(k) = \{ w_1 \cdot b_1 \cdot y_{step}(k+1) + w_2 \cdot (b_1 + b_2) \cdot y_{step}(k+1/2) + w_3 \cdot u_d - (w_1 \cdot b_1 \cdot \sum_{i=1}^N A_i \cdot y(k-i+1) + w_1 \cdot b_1 \cdot \sum_{i=2}^M B_i \cdot u(k-i+1) + w_2 \cdot (b_1 + b_2) \cdot \sum_{i=1}^N a_i \cdot y(k-(i-1)/2) + w_2 \cdot (b_1 + b_2) \cdot \sum_{i=3}^M b_i \cdot u(k-[(i-1)/2])) / (w_1 \cdot B_1 + w_2 \cdot (b_1 + b_2) + w_3) \quad (9)$$

III. 모의 실험

본 논문에서 제안된 제어 알고리즘은 전력계통 안정화를 위한 제어기로 구현되었다. 적용된 계통을 살펴보면 다음과 같다.

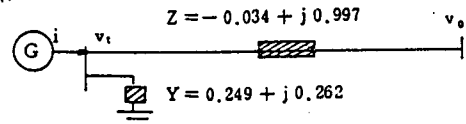


그림 1. 적용된 1기 무한모선

상태 변수 $X = (\omega, \delta, e_q', e_{fd})$

방정식

$$\left. \begin{aligned} \frac{d\delta}{dt} &= \omega_b \cdot (\omega - 1) \\ \frac{d\omega}{dt} &= (P_m - P_g)/M \\ \frac{de_q'}{dt} &= [e_{fd} - e_q' - (x_d/x_d') \cdot (-1) \cdot (e_q' - V_t \cdot \cos(\delta - \theta))] / T_{d0}' \\ \frac{de_{fd}}{dt} &= [K_A (V_{ref} - V_t + u_e) - e_{fd}] / T_A \\ P_g &= \frac{V_t \cdot e_q' \cdot \sin(\delta - \theta)}{x_d'} + \frac{(x_d' - x_q')^2 \cdot V_t \cdot \sin 2(\delta - \theta)}{2x_d' x_q'} \end{aligned} \right\} (10)$$

(10)의 상태방정식을 선형화하여 동작점에 대한 편차방정식을 작성하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\Delta X}(t) &= A \cdot \Delta X(t) + B \cdot \Delta u(t) \\ \Delta y(t) &= C \cdot \Delta X(t) \end{aligned}$$

본 논문에 대한 비교 대상은 Yu[4]가 제안한 보상기법에 의한 PSS 계수 선정법을 택하였다.

사용된 PSS의 블록 선도는 다음과 같다.

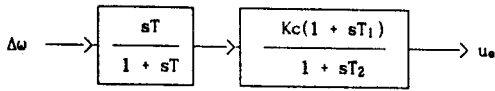


그림 2. PSS의 블록 다이어그램

발전기 제 정수 및 PSS의 파라미터는 다음과 같다.

발전기 : $M = 9.26$ $T_{d0} = 7.76$ $D = 0$
 $x_d = 0.973$ $x_d' = 0.19$ $x_q = 0.55$

여자기 : $K_A = 50$ $T_A = 0.05$

기타정수 : $K_1 = 0.5441$ $K_2 = 1.2067$ $K_3 = 0.6584$
 $K_4 = 0.6981$ $K_5 = -0.0955$ $K_6 = 0.8159$

PSS 정수 : $T = 3.0$ $T_1 = 0.685$ $T_2 = 0.1$ $K_c = 7.09$

본 모의 실험은 발전기 내부의 변화로 인해 상태변수에 임펄스가 가해진 경우 이를 안정화하는 것이다. 여기서는 두 번째 상태변수인 $\Delta\delta$ 가 초기값을 갖는 것으로 가정한다.

1. 대상 시스템을 알지 못할 때

본 절에서는 제어기가 제어 대상에 대해 차수(dimension)만을 알고있는 상태에서 발생한 변화에 대한 제어실험으로 ARMA 모형의 초기값은 B_i, b_i 를 제외한 모든 값이 0으로 두었다. $B_i(0), b_i(0)$ 는 최초의 제어량을 발생하기 위해 매우 작은 값으로 가정하였다. 결과에 대하여 기존의 PSS와 비교하였다. 다음의 그림 3,4는 각각 각속도 및 위상각 편차의 궤적을 나타낸다.

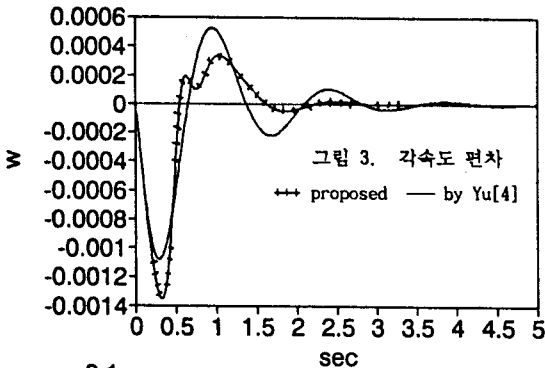


그림 3. 각속도 편차
 +++ proposed — by Yu[4]

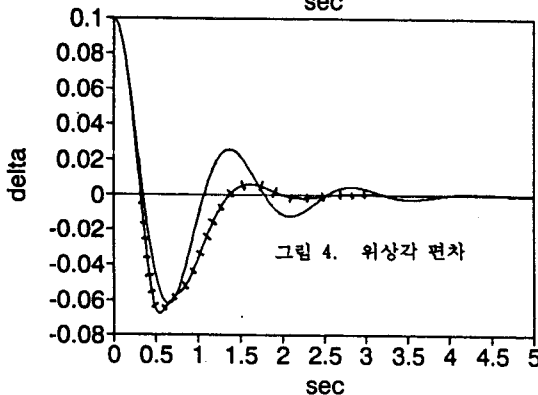


그림 4. 위상각 편차

2. 대상 시스템을 알고 있을 때

본 절에서는 제어기가 대상 시스템에 대한 인식과정을 거친 후 발생한 변화에 대해서 제안된 제어규칙이 어떤 효과를 갖는지를 기존의 PSS와 비교하여 본다.

다음 그림 5,6에 각속도 및 위상각 편차를 제시한다.

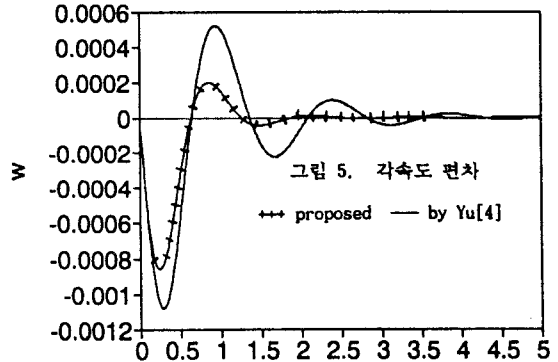


그림 5. 각속도 편차

+++ proposed — by Yu[4]

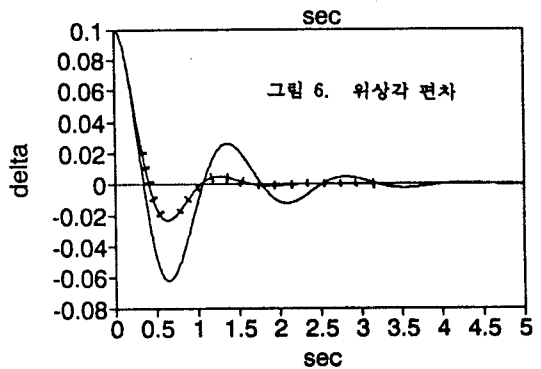


그림 6. 위상각 편차

V. 결론

전력 계통 안정화를 위한 이산시간 제어기 설계에 관한 알고리즘이 제시되었다. 제안된 알고리즘은 실시간으로 대상 시스템에 대한 인식이 동시에 수행되므로 기존의 PSS 계수 선정과 같은 복잡한 계산이 불필요한 반면 대상 시스템 인식 초기에 기존의 PSS에 비해 제어효과가 낮음을 보였다. 그러나 어느 정도 시간이 지난 후에는 기존의 방식에 못지않은 제어효과를 보여준다. 대상 시스템을 알고있는 경우에는 매우 우수한 결과를 나타냄으로서 제안된 목적함수가 효과적임을 알 수 있다.

그러나 제안된 목적함수는 여유도 및 계수를 갖고 있는데 모의실험을 통해 제어효과가 이들에 대하여 매우 민감함을 알 수 있었다. 따라서 이들의 최적치를 구하는 것은 앞으로 남은 연구과제이다.

V. 참고 문헌

- [1].Karl J.Astrom, B Wittenmark: Computer Controlled Systems:theory and design, Prentice-Hall, 1984.
- [2].T. Kailath: Linear Systems, Prentice-Hall, 1980.
- [3].Tsiliogiannis, C. A. Svoronos, S. A., Deterministic Convergency of a Clarke-Gawthrop Self-tuning Controller, Automatinca, Vol. 22, No. 2, 1986.
- [4].Y. N. Yu, Electric Power System Dynamics, Academic Press, N.Y., 1983.
- [5].A. Ghosh, G. Ledwich, O. P. Malik, and G. S. Hope: Power System Stabilizer Based on Adaptive Control Techniques, IEEE Trans. on Power Apparatus and Systems, vol. PAS-103, No. 8, 1984.
- [6].Shi-ji Chang, Y. S. Chow, O. P. Malik, G. S. Hope: An Adaptive Synchronous Machine Stabilizer, IEEE Trans. on Power Systems, vol. PWR-1, No. 3, 1986.
- [7].Pierre, D. A.:A Perspective on Adaptive Control of Power Systems, IEEE Trans. on Power Systems Vol. PWR-2, 1987.
- [8].Wenyan Gu, K. E. Bollinger: A Self-tuning Power System Stabilizer for Wide-range Synchronous Generator Operation, IEEE Trans on Power Systems, vol. PWR-4, No. 3, 1989.
- [9].J. Y. Fan, T. H. Ortmeier, R. Mukundan: Power System Stability Improvement with Multivariable Self-tuning Control, IEEE Trans. on Power Systems, Vol. PWR-5, No. 5, 1990.
- [10].T. L. Huang, T. Y. Hwang, W. T. Yang: Two-level Optimal Output Feedback Stabilizer Design, IEEE Trans. on Power Systems Vol. PWR-6, No. 3, 1991.
- [11]. 한국 전력 공사 기술 연구원 : 발전기 제어계 적정 파라미터 선정에 관한 연구 (최종 보고서), 1990.