

자기동조 적응제어를 이용한 여자제어기 설계에 관한 연구

유현호* 이상근 김준현

(한전) (한전기술) (한양대)

A Study on the Design of Excitation Controller
using Self Tuning Adaptive Control

Yoo, Hyun Ho Lee, Sang Keun Kim, Joon Hyun

(KEPCO) (KOPEC) (HANYANG UNIV.)

ABSTRACT

This paper presents a design method of synchronous generator excitation controller using self-tuning PID algorithm.

Controller parameter is determined by using adaptive control theory in order to maintain optimal operation of generator under the various operating conditions.

To determine the optimal parameter of controller, minimum variance algorithm using the recursive least-square(RLS) identification method is adopted and the difference between the speed deviation with weighted factor and voltage deviation is used as the input signal of adaptive controller, which provides good damping and conversion characteristics.

The results tested on a single machine infinite bus system verify that the proposed controller has better dynamic performances than conventional controller.

1. 서론

최근 원자력 발전소와 같은 대용량 발전설비가 지역적으로 편차와 힘에 따라 전력계통의 계획 및 운용에 안정도 유지문제가 크게 대두되고 있다.

이러한 전력계통의 안정도 향상을 위해 동기발전기의 동특성 개선기법이 다양하게 연구되어 왔는데, 그 중에서 여자제어를 이용한 연구가 집중적으로 이루어져왔다(1,2,3).

그러나 전력계통이 대규모 복잡화 힘에 따라 특정 운전점에서 적용되던 고정이득을 갖는 여자제어기는 만족할 만한 제동특성을 얻을수 없으므로, 다양한 운전점에 대해서 여자제어기의 성능이 항상 최상의 상태로 유지되도록 제어기의 파라미터를 온라인으로 자동 조절하는 자기동조 제어방식이 주로 연구되고 있다(5,6,7).

그러나 이러한 제어이론을 이용하여 구성된 제어기의 구조는 PID구조에 비하여 매우 복잡하므로 산업 프로세서에 직접 적용하기에는 여러가지 문제들이 발생한다.

본 논문에서는 PID와 같은 간단한 구조를 가지면서 계통을 정밀하게 제어할수 있는 자기동조 제어기의 특성을 그대로 유지하도록 하기 위하여, PID구조를 갖는 자기동조 제어기를 구성하여 광범위 하고 복잡한 전력계통에 대해서도 안정적이며 효율적인 제어성능을 유지하도록 하였다.

또한 적응제어 이론에 대해 순환형 최소자승법을 이용하여 제어기 파라미터를 추정하였고, 추정된 파라미터를 이용하여 최소분산 알고리즘에 의해 제어식을 구함으로써 계통에

외란이 가해지더라도 원하는 출력을 얻을 수 있도록 하였으며, 각속도 편차에 가중인자를 적용한 것과 단자전압 편차와의 차를 제어기 입력변수로 사용하여 발전기의 계동특성 및 수렴특성을 개선함으로써 최적운전이 이루어 지도록 하였고, 동기발전기는 Park의 3차 모델을 사용하였다.

이러한 기법을 1기 무한대 모선계통에 적용하여 동기발전기의 전기적 출력, 동요각 등의 동특성을 전산기 시뮬레이션을 통해 구해서 기존의 여자제어기를 적용한 경우와 비교함으로써 효용성을 입증하였다.

2. 계통의 수식화

전력계통의 동특성을 해석하는데 이용한 동기발전기의 모델은 park 3차모델을 사용하였고, 이모델을 선형화된 상태방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{X} = A_c X + B_c U \tag{2.1}$$

$$Y = C_c X \tag{2.2}$$

여기서,

X: 상태변수 벡터

U: 제어변수 벡터

Y: 출력변수 벡터

A_c, B_c, C_c: 계통정수 벡터

식 (2.1)과 식 (2.2)를 Z변환하여 차분방정식으로 나타내면 다음과 같다.

$$X_{k+1} = A_d X_k + B_d U_k \tag{2.3}$$

$$Y_k = C_d X_k \tag{2.4}$$

여기서,

A_d = e^{A_cT}

B_d = A_c⁻¹ (e^{A_cT} - I) B_c

C_d = C_c

T: sample interval

I: identity matrix

3. 자기동조 PID제어 알고리즘

자기동조 PID 제어 알고리즘을 이용한 여자제어기의 구성도를 나타내면 그림 1과 같다.

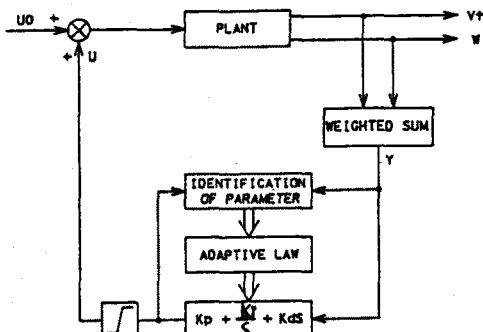


그림1. 자기동조 PID 여자제어기 구성도

3.1 자기동조 적응제어이론

식 (2.1)의 발전기 모델이 식 (3.1)과 같은 형태를 갖는다고 가정하자.

$$A(q^{-1})y(t) = q^{-k}B(q^{-1})u(t) + \xi(t) \quad (3.1)$$

여기서, $y(t)$: 발전기 출력변수
 $u(t)$: 발전기 입력변수
 q : 단위시간 지연연산자

$$A(q^{-1}) : 1 + a_1q^{-1} + a_2q^{-2} + a_3q^{-3} \quad (3.2)$$

$$B(q^{-1}) : b_0 + b_1q^{-1} + b_2q^{-2} \quad (3.3)$$

$\xi(t)$: noise

다항식 $A(q^{-1}), B(q^{-1})$ 는 서로素이고 계수 a_1, a_2, a_3 와 b_0, b_1, b_2 는 추정해야 할 매개변수이다.

다음에, 제어입력 $u(t)$ 를 구하기 위하여 식 (3.4)와 같이 보조출력 $\phi(t)$ 를 정의한다.

$$\phi(t) = P(q^{-1})y(t) + Q(q^{-1})u(t-k) - R(q^{-1})w(t-k) \quad (3.4)$$

여기에서 $Q(q^{-1})$ 및 $R(q^{-1})$ 은 q^{-1} 에 대한 다항식이고, $P(q^{-1})$ 은 q^{-1} 의 유리함수로서 식 (3.5)와 같이 정의된다.

$$P(q^{-1}) = \frac{P_n(q^{-1})}{P_d(q^{-1})} \quad (3.5)$$

식 (3.4)의 보조출력의 분산이 최소화 되도록 하는 최소 분산기법을 이용하여 제어입력을 구하기 위해, Diophantine 방정식인 식 (3.6)과 같은 관계식을 도입한다.

$$\frac{P_n(q^{-1})}{P_d(q^{-1})} = E(q^{-1})A(q^{-1}) + \frac{q^{-k}F(q^{-1})}{P_d(q^{-1})} \quad (3.6)$$

식 (3.1), (3.4) 및 (3.6)으로부터 다음과 같은 식을 구할 수 있다.

$$\phi(t+k) = \frac{F(q^{-1})}{P_d(q^{-1})} y(t) + [E(q^{-1})B(q^{-1}) + Q(q^{-1})]u(t) - R(q^{-1})w(t) + E(q^{-1})\xi(t+k) \quad (3.7)$$

식 (3.7)의 예측모델은

$$\hat{\phi}(t+k|t) = \phi^*(t+k|t) + \hat{\phi}(t+k|t) \quad (3.8)$$

와 같이 표현할 수 있고, $\phi^*(t+k|t)$ 는 시점 t 에서 $t+k$ 의 추정모델을 나타내고, $\hat{\phi}(t+k|t)$ 는 추정모델과 예측모델과의 오차이며, 이때의 k 단 예측치는

$$\phi^*(t+k|t) = \frac{F(q^{-1})}{P_d(q^{-1})} y(t) + [E(q^{-1})B(q^{-1}) + Q(q^{-1})]u(t) - R(q^{-1})w(t) \quad (3.9)$$

이고, 이 경우에 제어칙은 식 (3.9)의 $\phi^*(t+k|t)$ 가 영이 되는 $u(t)$ 이다. 따라서 제어칙은 다음과 같이 구해진다.

$$u(t) = \frac{R(q^{-1})w(t) - F(q^{-1})y(t)/P_d(q^{-1})}{E(q^{-1})B(q^{-1}) + Q(q^{-1})} \quad (3.10)$$

식 (3.2)와 (3.3)의 다항식 $A(q^{-1}), B(q^{-1})$ 가 미지이므로 예측모델의 식 (3.7)을 사용하여 자기동조 제어기의 제어칙을 구성해야 한다.

먼저 식 (3.4)에서 시점 t 에서 신호 $Q(q^{-1})u(t-k)$ 와 $R(q^{-1})w(t-k)$ 는 알수있는 값이므로, $\phi(t)$ 를 예측하는 문제는 단순히 $\phi_y(t) = P(q^{-1})y(t)$ 를 예측하는 문제로 된다. 따라서 식 (3.1)과 (3.6)으로부터

$$\phi_y(t+k) = \frac{F(q^{-1})}{P_d(q^{-1})} y(t) + E(q^{-1})B(q^{-1})u(t) + E\xi(t+k) \quad (3.11)$$

과 같은 보조출력을 구할 수 있고, 이때 필터된 출력 $y_f(t)$ 를 다음과 같이 정의한다.

$$y_f(t) = \frac{y(t)}{P_d(q^{-1})} \quad (3.12)$$

이 때 $G(q^{-1}) = E(q^{-1})B(q^{-1})$ 이라 가정하여 이것을 식 (3.11)에 대입하면

$$\phi_y(t+k) = F(q^{-1})y_f(t) + G(q^{-1})u(t) + \xi(t+k) \quad (3.13)$$

를 구할 수 있다. 여기서 $\xi(t+k)$ 는 잡음 $\xi(t)$ 의 이동평균이다.

여기서 $F(q^{-1})$ 와 $G(q^{-1})$ 의 추정치는 최소자승법을 사용하여 얻을 수 있다. 따라서 다항식 $F(q^{-1})$ 와 $G(q^{-1})$ 의 k 단 예측치를 나타내면

$$\hat{\phi}_y(t) = X^T(t-k)\theta(t) \quad (3.14)$$

$$X^T(t) = [y_f(t-k), y_f(t-k-1), y_f(t-k-2); u(t-k), u(t-k-1)] \quad (3.15)$$

$$\theta^T(t) = [f_0(t), f_1(t), f_2(t); g_0(t), g_1(t)] \quad (3.16)$$

과 같이 되고, 이 경우 미지의 매개변수 θ 는 다음과 같이 축차형태로 추정될 수 있다.

$$\hat{\theta}(t) = \hat{\theta}(t-1) + P(t)X(t-k)[y_f(t) - \hat{\phi}_y(t-1)] \quad (3.17)$$

$$P(t) = \frac{1}{\mu} \left[P(t-1) - \frac{P(t-1)X(t-k)X^T(t-k)P(t-1)}{\mu + X^T(t-k)P(t-1)X(t-k)} \right] \quad (3.18)$$

따라서, $G(q^{-1})=E(q^{-1})B(q^{-1})$ 와 $F(q^{-1}), G(q^{-1})$ 을 식 (3.10)에 대입하면 식 (3.19)와 같은 자기동조 제어기의 제어식을 구할 수 있다.

$$u(t) = \frac{R(q^{-1})w(t) - F(q^{-1})y(t)/Pa(q^{-1})}{G(q^{-1}) + Q(q^{-1})} \quad (3.19)$$

3.2 PID 구조를 갖는 자기동조 제어기

제어하고자 하는 이산시스템을 설정한 후 이를 제어하기 위해 연속시간형 PID 제어기 구조로부터 이산시간형 PID 구조를 유도하면 식 (3.20)과 같이 된다.

$$u(t) = K_p \left[1 + \frac{T_s}{T_i} \frac{1}{1 - q^{-1}} + \frac{T_d}{T_s} (1 - q^{-1}) \right] e(t) \quad (3.20)$$

여기서, T_s 는 샘플구간이다. 식 (3.20)의 제어입력은 플랜트에 가해지기 때문에 위치형(position form)이라고 할 수 있고, 제어입력의 1단 변화분 $\Delta u(t) = (u(t) - u(t-1))$ 은 속도형(velocity form)으로서 식(3.20)은 다음과 같이 된다.

$$\Delta u(t) = K_p \left[1 - q^{-1} + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s} (1 - 2q^{-1} + q^{-2}) \right] e(t) \quad (3.21)$$

$$\text{여기서, } e(t) = w(t) - y(t) \quad (3.22)$$

목표치가 크게 변할 경우에 입력의 변화를 감소시키기 위해서 목표치 $w(t)$ 를 미분항에서 제외해야 한다. 이때 $e(t) = y(t)$ 가 되어 $yr(t)$ 는 $y(t)$ 를 필터링한 것이라면 속도형 PID제어기는

$$\Delta u(t) = K_p \left[e(t) - e(t-1) + \frac{T_s}{T_i} e(t) + \frac{T_d}{T_s} (-yr(t) + 2yr(t-1) - yr(t-2)) \right] \quad (3.23)$$

와 같이 되고, 이를 정리하면 식 (3.24)와 같이 된다.

$$\Delta u(t) = K_p \left[\left[\left(1 + \frac{T_s}{T_i} - q^{-1} \right) w(t) - \left(1 + \frac{T_s}{T_i} + \frac{T_d}{T_s} \right) (-1 + 2q^{-1} - q^{-2}) yr(t) \right] \right] \quad (3.24)$$

따라서, 자기동조 제어기가 PID구조를 갖기 위해서는 제어기가 적분동작을 해야하므로 다항식 $F(q^{-1})$ 의 차수는 2가 되어야한다. 이때, 플랜트모델을 2차로 선택하여 다항식 $Pa(q^{-1})$ 를 식 (3.25)와 같이 차수가 1차라고 가정한다.

$$Pa(q^{-1}) = \frac{1 + q^{-1}Pa_1}{1 + Pa_1} \quad (3.25)$$

다항식 $R(q^{-1})$ 는 설계사 임의로 지정할 수 있으므로

$$R(q^{-1})w(t) = [f_0(t) - f_2(t) + (f_1(t) + 2f_2(t))q^{-1}]w(t) \quad (3.26)$$

로 두고, 또한, 다항식 $Q(q^{-1})$ 도 설계자가 임의로 지정할 수 있으므로 자기동조 제어기에 적분동작이 들어가도록 다음과 같이 선택한다.

$$G(q^{-1}) + Q(q^{-1}) = \frac{1 - q^{-1}}{\nu} \quad (3.27)$$

여기서 ν 는 자기동조 제어를 동조시키는데 편리한 수단을 제공하는 설계 파라미터이다. 식 (3.26)과 (3.27)을 식 (3.19)에 대입하면 식 (3.28)과 같은 PID 구조를 갖는 자기동조 제어기의 입력이 구해진다.

$$u(t) = \nu \left[(f_0(t) - f_2(t) + (f_1(t) + 2f_2(t))q^{-1})w(t) - [f_0(t) + f_1(t)q^{-1} + f_2(t)q^{-2}]yr(t) \right] \quad (3.28)$$

따라서, PID 제어기와 대응되는 식은 식 (3.24)와 식 (3.28)를 서로 비교함으로써 구할 수 있다.

$$K_p = \nu(f_1 + 2f_2) \quad (3.29)$$

$$T_d = \frac{\nu f_2 T_s}{K_p} \quad (3.30)$$

$$T_i = \frac{K_p T_s}{\nu(f_0 + f_1 + f_2)} \quad (3.31)$$

여기서, 계수 ν 는 PID 제어기의 이득 K_p 와 같은 효력을 갖는다. 이상에서 제시한 자기동조 PID 제어기를 흐름도로 나타내면 그림 2와 같다.

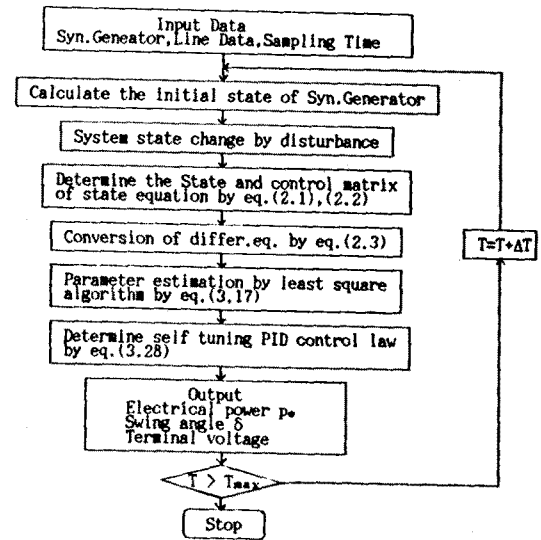


그림2. 흐름도

4. 사례연구

4.1 모델계통

시뮬레이션에 적용한 모델계통은 1기 무한대 모선계통으로서 그림 3과 같고, 데이터는 표 1과 같다.

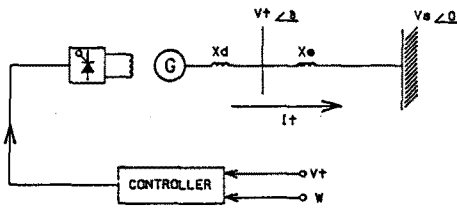


그림3. 1기무한대 모선 모델계통

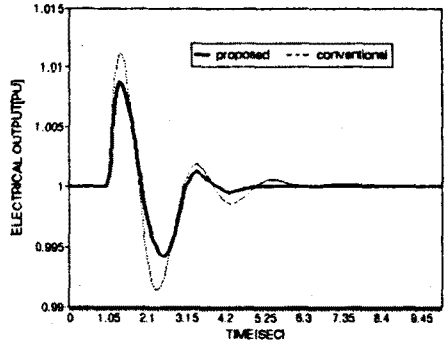


그림4.(b) 전기적 출력 특성

표1. 모델계통의 DATA

Gen Data	EX Data	PSS Data
$X_d=1.7$ p.u	$K_a=100$	$K_Q=5$
$X_q=1.6$ p.u	$T_a=0.01$ sec	$T_Q=10$ sec
$X_e=-6$ p.u	$V_{rmin}=-1.0$ p.u	$T_1=T_3=0.5$ sec
$\text{Cos}\phi=0.85$	$V_{rmax}=1.0$ p.u	$T_2=T_4=0.05$ sec
$H=2.37$ p.u	$K_E=0.05$	$V_{min}=-0.05$ p.u
$\gamma=0$	$T_E=0.05$ sec	$V_{max}=0.05$ p.u
$\omega_s=377$ rad/sec	$A_{GX}=0.0039$	
$X_d'=0.245$ p.u	$B_{GX}=1.555$	
$T_{d0}'=5.9$ sec	$K_F=0.04$	
$T_{d0}=0.54$ sec	$T_F=0.715$ sec	
$V_t=1.0$ p.u	$K_R=1$	
	$T_R=0.01$ sec	

4.2 시뮬레이션 결과

그림 3의 1기 무한대 모선 모델계통에서 외란의 형태는 두가지 경우에 대해서 시뮬레이션 하였다.

- Case1. 기계적 입력 P_m 의 step 감소
- Case2. 기준전압 V_{ref} 의 step 증가

Case1, Case2에 대해서 시뮬레이션 한경우의 동요각과 전기적 출력 특성을 도시하면 그림 4와 같다.

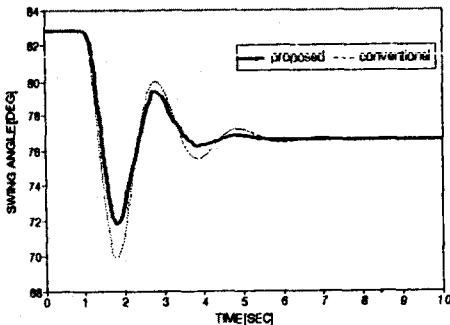


그림4.(a) 동요각 특성

그림 4.(a)는 기계적 입력 P_m 이 0.1PU 감소한 경우의 동요각 특성을 나타낸 것으로서, 기존의 PSS를 갖는 제어기를 적용한 경우보다 본 논문에서 제시한 자기동조 PID 여자제어기를 적용한 경우가 저주파 진동이 많이 감소되어 안정해짐을 알 수 있고, 그림 4.(b)는 기준전압 V_{ref} 이 0.1p.u 증가한 경우의 전기적 출력특성을 나타낸 것으로서, 제시한 제어기가 기존의 제어기보다 계동 특성 및 수렴 특성이 향상되어 안정해짐을 알 수 있다.

5. 결론

본 연구에서는 자기동조 PID 알고리즘을 이용하여 발전계통의 여자제어기를 설계하여 전력계통의 동특성을 해석한 결과 다음과 같은 결론을 얻었다.

1. 계통의 다양한 운전조건 하에서도 계동운전이 최적임을 알 수 있었다.
2. 제어기의 입력변수를 각속도의 편차에 가중인자를 적용한 것과 단자전압 편차와의 차를 사용함으로써, 기존의 각속도를 입력변수로 한 제어기보다 계동특성 및 수렴특성을 개선하였다.

참고문헌

1. Yao-nan Yu, "Electric power system Dynamics", ACADEMIC PRESS, 1983
2. F.P. Demello, C. Concordia, "Concepts of Synchronous machine Stability as affected by Excitation Control", IEEE Trans. PAS-88, pp316-329, 1969
3. Tutorial Course, "Power System Stabilization VIA Excitation Control", 1981
4. Astrom Wittenmark, "Adaptive Control", 1989
5. A. Ghosh, G. Ledwich, etc, "Power System Stabilizer Based on Adaptive Control Techniques", IEEE Trans., PAS-103, pp1983-1989, 1984
6. Chi-Jui Wu, Yuan-Yih Hsu, "Design of Self-Tuning PID power system Stabilizer for Multimachine power systems", IEEE Trans. Vol. 3, NO. 3, 1988
7. Chengxiang Mao, O.P. Malik, etc, "An adaptive Generator Excitation Controller Based on Linear optimal control", IEEE/PES Summer Meeting, 1990
8. A. Chandra, O.P. Malik, etc, 'A Self Tuning Controller For the Control of Multimachine power systems', IEEE Trans. Vol. 3, Bo. 3, 1988