

전력계통 안정화를 위한 퍼지 유계함수 추정을 이용한 슬라이딩 제어

박영환, 박귀태

* 서남대학교 전자전기 공학과 조교수 ** 고려대학교 전기전자전파 공학부 교수

Stabilization of Power Systems with a Sliding Control Using Fuzzy Estimation of Bounding Function

Young-Hwan Park, Gwi-Tae Park**

* Dept. of Electrical Eng., Seonam Univ.

** School of Electrical Engineering, Korea Univ.

Abstract

A fault on the transmission line results in the variation of reactance and parametric uncertainties in the power system dynamics. In this case, we need a robust control to cope with these uncertainties. A sliding mode control, a sort of robust control, is known to be robust to parametric or state-dependent uncertainties if the bounding function of uncertain terms is determined a priori. However, in general, we can not readily determine the bounding function for the complex systems. Hence, in this paper we introduce a fuzzy system which can estimate the bounding function in relatively simple way. By the use of the proposed fuzzy system, determination of bounding function is made easier. We applied the proposed scheme to the stabilization of power system under the sudden fault on the transmission lines. The simulation result verifies the effectiveness of the scheme.

Key Words : Power Systems, Stabilization, Sliding Control, Fuzzy System, Bounding Function

1. 서론

전력계통에서의 고장은 여러 가지가 있으며, 그 중 하나는 전송선로의 고장이다. 전송선로의 3상 단락과 같은 고장은 선로의 리액턴스를 변화시키며, 이는 계통 동특성식에 파라미터적인 불확실성을 발생시킨다 [1, 2]. 정확히 말하여, 이들 파라미터들은 선형 파라미터적인 형태가 아니며, 따라서 불확실성은 상태변수 의존적이되어 기존의 적응제어 기법으로는 다루기가 쉽지않다. 이에 반해, 강인 제어의 일종인 슬라이딩 제어기는 동특성식의 불확실한 항에 대한 유계함수를 정할 수가 있다면, 파라미터 의존은 물론 상태변수 의존적인 불확실성에 대해서도 강인한 제어 성능을 발휘함이 잘 알려져 있다 [3, 4]. 그러나 이 경우도 불확실성이 상태변수 의존적이면 유계함수를 정하는 것이 쉽지 않다. 따라서, 본 논문에서는 퍼지계통에 의해 필요한 유계함수를 추정하는 방법을 제안하기로 하며, 이 때 퍼지계통은 슬라이딩 제어기의 설계에 필요한, 상태변수에 의존하는 불확실한 항에 대한 유계함수를 추정하도록 구성된다. 제어기 성능을 확인하기 위한 시뮬레이션 연구에서, 퍼지계통에 의해 추정된 유계함수를 사용하는 경우와 실제 유계함수를 사용하는 경우의 슬라이딩 제어기의 성능을 비교하였다. 시뮬레이션 결과, 퍼지계통에 의해 추정된 유계함수를 사용하더라도 실제 유계함수를 사용하는 경우와 대동하게, 고장이 발생된 전력계통의 안정화가 이루어졌으며, 따라서 제안된 방식의 유용성을 확인할 수 있었다.

2. 전력계통 모델 및 제어목적

본 논문에서는 다음 그림 1 과 같은 1기 무한모선 전력계통 모델을 고려한다.

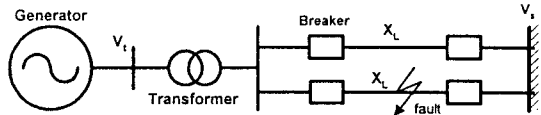


그림 1 1기 무한 모선 계통
Fig. 1 Single machine-infinite bus model

위와 같은 1기 무한모선계통은 비선형 상태방정식으로 표현되며 전송선로에 대칭 3상단락고장(symmetric three-phase short circuit fault)이 발생하면 파라미터 x_L , 즉 전송선로 리액턴스 값이 변하게 된다. 제어목적은 이와같은 교란, 즉 파라미터 x_L 의 변동에도 불구하고 전력계통의 단자전압을 안정화시키고 동기상태를 유지하는 것이다.

2.1 상태 방정식

1기 무한모선계통은 다음과 같은 상태 방정식들로 표현할 수 있다 [1].

$$\dot{\delta}(t) = w(t) \tag{1}$$

$$\dot{w}(t) = -\frac{D}{H} w(t) + \frac{w_0}{H} P_m - \frac{w_0 V_s E_q(t)}{H x_{ds}} \sin \delta(t) \tag{2}$$

$$\begin{aligned} \dot{E}_q(t) = & -\frac{1}{T_{d_0}} E_{q_0} + \frac{x_d - x'_d}{x'_d} V_s w(t) \sin \delta(t) \\ & + \frac{k_c}{T_{d_0}} u_f(t) \end{aligned} \tag{3}$$

여기서

- $\delta(t)$: 발전기의 부하각
- $w(t)$: 발전기의 동기각속도
- $E_q(t)$: 횡축의 기전력
- D : 제동상수의 pu 값
- H : 관성상수의 pu 값
- P_m : 기계적 입력
- V_s : 무한모선전압
- w_0 : 동기각속도
- k_c : 여자기이득
- $u_f(t)$: 발전기의 SCR 증폭기의 제어입력
- x_d : 발전기 직축의 리액턴스
- x'_d : 발전기 직축의 과도 리액턴스

이며 단자전압 V_i 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_i(t) = \frac{1}{x_{ds}} \{ x_{ds}^2 E_q^2(t) + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d V_s E_q(t) \cos \delta(t) \}^{\frac{1}{2}} \tag{4}$$

여기서 x_d, x_d', T_{d_0}, x_s 는 선로사고발생시 영향을 받는 파라미터들로서 이들에 대해서는 다음 절에서 자세히 설명되어 있다.

2.2 선로사고 발생시 계통이 받는 영향

그림 1과 같은 1기 무한모선계통에서 전송선로에 3상 단락고장이 발생할 경우 선로의 리액턴스 값이 변화한다. 전체전송선로의 길이를 l 로 보았을 때 발전기 단자에서 사고 발생지점까지의 거리를 λ 로 정의한다. 예를 들면 발전기 단자에서 사고가 발생할 경우 $\lambda=0$ 이고, 사고가 선로의 중앙에서 발생할 경우 $\lambda=0.5$ 가 된다. 그러면 사고발생시 선로의 리액턴스 x_L 은

$$x_L = x_{L_0} \cdot \lambda \quad (5)$$

와 같이 표현되며, 여기서 x_{L_0} 는 사고발생 이전의 선로 리액턴스값이다. 이러한 x_L 의 영향을 받는 파라미터들은 다음과 같다.

$$x_{ds} = x_T + \frac{1}{2}x_L + x_a, \quad x'_{ds} = x_T + \frac{1}{2}x_L + x_d'$$

$$T_{d_0}' = \frac{x_{ds}'}{x_{ds}} T_{d_0}, \quad x_s = x_T + \frac{1}{2}x_L$$

여기서 T_{d_0} 와 x_T 는 각각 직축의 과도 단락회로 시정수와 변압기의 리액턴스값이다.

2.3 제어목적

제어목적은 선로사고 발생시 2.2절에서 설명된 바와 같이 계통 파라미터들이 변함에도 불구하고 2.1절의 계통이 동기상태와 일정전압을 유지하도록 발전기 SCR 증폭기 제어입력 u_f 를 결정하는 것이다. 즉, 2.1절의 비선형 상태 방정식에서 여러 가지 파라미터들이 변함에도 불구하고 $\omega = 0, V_t = 1.0$ p.u.가 되도록 u_f 를 결정하는 것이며 기계적 입력 P_m 은 0.9 p.u.로 고정시킨다. 참고로 설정된 전력계통모델은 $\delta_0 = 72^\circ, P_{m_0} = 0.9$ p.u., $V_{t_0} = 1.0$ p.u.의 공칭동작점을 갖는다고 가정한다. 이와같은 제어 목적을 달성하기 위해 3 절에서는 유계함수를 추정하는 퍼지계통을 이용한 슬라이딩 제어를 설계하기로 한다.

3. 슬라이딩 제어기 설계

3.1 슬라이딩 제어기

편의상 방정식 (1)~(4)를 다음과 같은 일반적인 형태로 다시 쓴다. 즉,

$$\dot{x}(t) = f(x(t)) + g(x(t))u_f(t) \quad (6)$$

$$y = h(x(t))$$

여기서

$$x = \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \delta \\ \omega \\ E_q \end{bmatrix}$$

$$y = V_t = h(x)$$

$$= c_7 \{ c_8 x_3^2(t) + c_9 + c_{10} x_3(t) \cos x_1(t) \}^{\frac{1}{2}} \quad (7)$$

$$f(x(t)) \triangleq \begin{bmatrix} x_2 \\ c_1 x_2 + c_2 x_3 \sin x_1 + c_3 P_m \\ c_4 x_3 + c_5 x_2 \sin x_1 \end{bmatrix}, \quad g(x(t)) \triangleq \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$c_1 \triangleq \frac{D}{2H}, \quad c_2 \triangleq -\left(\frac{\omega_0}{2H}\right)\left(\frac{V_s}{x_{ds}}\right), \quad c_3 \triangleq \frac{\omega_0}{2H}$$

$$c_4 \triangleq -\frac{1}{T_{d_0}'}, \quad c_5 \triangleq \frac{x_d - x_d'}{x_{ds}'}, \quad c_6 \triangleq \frac{k_c}{T_{d_0}'}$$

$$c_7 \triangleq \frac{1}{x_{ds}}, \quad c_8 \triangleq x_{ds}^2, \quad c_9 \triangleq V_s^2 x_{ds}^2, \quad c_{10} \triangleq 2x_s x_d V_s$$

이 때 계통 (6)의 상태변수는 제어변수가 아니며, 따라서 (4)는 제어변수와 그 도함수 공간에서 슬라이딩 제어를 설계하는 문제를 다음과 같이 다루었다. 즉, 출력변수 $V_t(x_1, x_2, x_3)$ 를 새로운 상태변수 z_1 으로 선정하고 $z_2 = x_1, z_3 = x_2$ 로 하는 역변환 가능한 좌표변환을 다음과 같이 선정하면,

$$z_1 \triangleq V_t = h(x_1, x_2, x_3)$$

$$z_2 \triangleq x_1$$

$$z_3 \triangleq x_2 \quad (8)$$

$$z \triangleq (z_1, z_2, z_3)^T \triangleq \Phi(x)$$

변환된 계통의 동특성식은 다음과 같다.

$$\dot{z}_1(t) = \frac{\partial h(x)}{\partial x} f(x) + \frac{\partial h(x)}{\partial x} g(x)u$$

$$= L_f h(\Phi^{-1}(z)) + L_g h(\Phi^{-1}(z))u$$

$$= b(z) + a(z)u$$

$$\dot{z}_2(t) = \dot{x}_1 = x_2$$

$$= q_2(\Phi^{-1}(z)) \quad (9)$$

$$\dot{z}_3(t) = \dot{x}_2 = c_1 x_2 + c_2 x_3 \sin x_1 + c_3 P_m$$

$$= q_3(\Phi^{-1}(z))$$

(9)에서 입출력 사이의 상대차수는 1이며, 다음과 같이 1차원 부공간에 대한 슬라이딩 평면 $s = 0$ 를 고려한다.

$$s \triangleq e = 0, \quad e \triangleq z_1 - z_{d1} \quad (10)$$

여기서, z_{d1} 은 z_1 의 원하는 값이며, 전력계통의 경우 출력단자전압의 원하는 값 $z_{d1} = 1$ p.u.이다. s 의 시간 미분은 다음과 같으며

$$\dot{s} = \dot{z}_1 - \dot{z}_{d1}$$

$$= b(z) + a(z)u - \dot{z}_{d1} \quad (11)$$

$a(z)$ 의 부호를 안다고 가정하고, 등가제어 \hat{u} 과 경계층 두께 ϕ 를 고려한 입력 u 를 다음과 같이 선정하자.

$$\hat{u} = -\hat{b}(z) + \dot{z}_{d1}$$

$$u = \frac{1}{\hat{a}_1(z)} [\hat{u} - k_1 \text{sat}(\frac{s}{\phi})] \quad (12)$$

$$k_1 = \text{sgn}(a(z))k, \quad k > 0$$

여기서, $\hat{b}(z)$ 는 $b(z)$ 의 추정치이고 $\hat{a}_1(z)$ 는 $a(z)$ 의 추정치이고 $\phi > 0$, $\hat{a}_1(z) > 0$ 이다.

그러면, (11)은 다음과 같이 고쳐 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{s} &= b(z) + a(z) \frac{1}{\hat{a}_1(z)} \left\{ \hat{u} - k_1 \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \right\} - \dot{z}_{a1} \\ &= b(z) + a(z) \hat{a}_1^{-1}(z) \left\{ -\hat{b}(z) + \dot{z}_{a1} \right. \\ &\quad \left. - k_1 \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \right\} - \dot{z}_{a1} \\ &= \left\{ b(z) - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z) \hat{b}(z) \right. \\ &\quad \left. + (1 - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z))(-\dot{z}_{a1}) \right\} \\ &\quad - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z) k_1 \text{sat}\left(\frac{s}{\phi}\right) \end{aligned} \quad (13)$$

따라서, 경계층 밖에서의 슬라이딩 조건식은 다음과 같다.

$$\text{If } |s| > \phi,$$

then

$$\begin{aligned} \dot{s}s &= \left\{ b(z) - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z) \hat{b}(z) + (1 - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z)) \right. \\ &\quad \left. (-\dot{z}_{a1}) \right\} - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z) k_1 |s| \\ &= \left\{ b(z) - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z) \hat{b}(z) + (1 - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z)) \right. \\ &\quad \left. (-\dot{z}_{a1}) \right\} - |a(z) \hat{a}_1^{-1}(z)| k |s| \end{aligned} \quad (14)$$

(14)는 k 가 다음과 같은 크기의 값을 가지면 슬라이딩 조건이 만족됨을 의미한다.

$$\text{If } k \geq \frac{1}{|a(z) \hat{a}_1^{-1}(z)|} \left\{ |b(z) - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z) \hat{b}(z) + (1 - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z))(-\dot{z}_{a1})| + \eta \right\}, \eta > 0$$

$$\text{then } \dot{s}s < 0 \quad (15)$$

(15)의 부등식 우변에 대해 다음 (16)이 성립하므로, 슬라이딩 조건을 만족시키는 k 의 범위는 (17)과 같다.

$$\begin{aligned} &|a^{-1}(z) \hat{a}_1^{-1}(z) \{ b(z) - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z) \hat{b}(z) \\ &+ (1 - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z))(-\dot{z}_{a1}) + \eta |a^{-1}(z) \hat{a}_1(z) | \\ &= | \hat{a}_1(z) \hat{a}_1^{-1}(z) | \left[|a^{-1}(z) \hat{a}_1^{-1}(z) \{ b(z) \right. \\ &\quad \left. - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z) \hat{b}(z) + (1 - a(z) \hat{a}_1^{-1}(z))(-\dot{z}_{a1}) \} \right. \\ &\quad \left. + \eta | \hat{a}_1(z) \hat{a}_1^{-1}(z) | \right] \\ &\leq | \hat{a}_1(z) \hat{a}_1^{-1}(z) | \{ \beta(F + \eta) + (\beta + 1) | \hat{u} | \} \end{aligned} \quad (16)$$

여기서,

$$| \hat{b}(z) - b(z) | \leq F,$$

$$a_{\min} \leq |a(z)| \leq a_{\max},$$

$$\beta \triangleq (a_{\max} / a_{\min})^{\frac{1}{2}}$$

$$\hat{a}(z) \triangleq (a_{\min} \cdot a_{\max})^{\frac{1}{2}}$$

$$k \geq | \hat{a}_1(z) \hat{a}_1^{-1}(z) | \{ \beta(F + \eta) + (\beta + 1) | \hat{u} | \} \quad (17)$$

(17)에 필요한 β , F , $\hat{a}(z)$ 값은 불확실한 항 $a(z)$, $b(z)$ 의 한계를 알아야 계산할 수 있는데, $a(z)$, $b(z)$ 의 불확실성이 상태변수 의존적일 경우 한계를 구하는 과정이 간단하지 않다. 따라서, 본 논문에서는 (17)의 k 처럼 슬라이딩 조건이 만족되도록 하는 k 값을

퍼지계통에 의해 추정하는 방법을 3.2 절에서 제안하기로 한다.

한편 (9)에는 입출력 관계식에 포함되지 않는 2차의 내부 동특성식이 존재하는데, 이의 안정성은 지역적으로 다음과 같은 선형화된 계통행렬의 특성 방정식으로부터 판별할 수 있다.

$$Q = \frac{\partial a}{\partial \eta}, \eta = [z_2, z_3]^T, q = [q_2, q_3]^T \quad (18)$$

즉, 행렬 Q 의 특성 방정식은 (9)로부터 다음과 같으며,

$$\Delta(s) = s^2 - c_1 s - c_2 x_3 \cos x_1 = 0 \quad (19)$$

Routh-Hurwitz 안정도 판별법으로부터, 안정도 조건은 $-c_2 x_3 \cos x_1 > 0$ 이다. 따라서 $-c_2 > 0$ 이므로 $x_3 \cos x_1 > 0$ 가 안정조건이며 $x_3 > 0$ 일 경우, $|x_1| (= |\delta|) < 90^\circ$ 가 내부 동특성식이 안정한 영역이 된다.

3.2 퍼지계통 설계

본 절에서는 (15), (17)의 k 를 대신하여, 경계층 밖에서 슬라이딩 조건이 만족되도록 k 를 결정하는 퍼지계통을 설계하기로 한다. 기본적인 개념은 제적이 경계층을 벗어났을 때 ($|s| > \phi$), k 를 매우 큰 값 ($k \rightarrow \infty, k > 0$) 으로 선정하는 것이며 (20)과 같이 선정된 k 가 $|s| > \phi$ 일 때, $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$ 가 되도록 한다.

$$k = (\tan \theta) \cdot \|z\| \quad (20)$$

이제 $|s|$ 와 θ 에 관한 퍼지집합을 그림 2, 그림 3으로, θ 를 정하는 퍼지규칙을 다음 (R)과 같이 선정하기로 한다.



그림 2 퍼지집합 $\tilde{S}_S, \tilde{S}_M, \tilde{S}_L$
Fig. 2 Fuzzy sets $\tilde{S}_S, \tilde{S}_M, \tilde{S}_L$

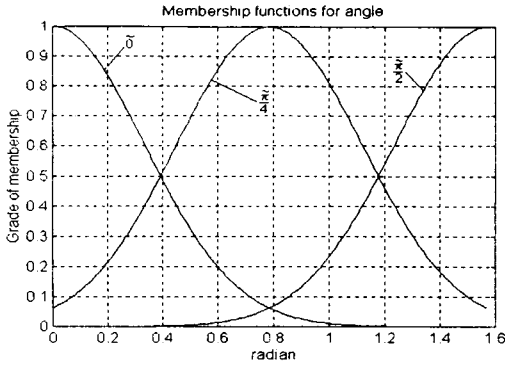


그림 3 퍼지집합 $\tilde{\theta}$, $\tilde{\frac{\pi}{4}}$, $\tilde{\frac{\pi}{2}}$

Fig. 3 $\tilde{\theta}$, $\tilde{\frac{\pi}{4}}$, $\tilde{\frac{\pi}{2}}$

(R)

If $|s|$ is \tilde{s}_S , then θ is $\tilde{\theta}$

If $|s|$ is \tilde{s}_M , then θ is $\tilde{\frac{\pi}{4}}$

If $|s|$ is \tilde{s}_L , then θ is $\tilde{\frac{\pi}{2}}$

규칙기반 (R)에 근거해 추정되는 θ 는 singleton 퍼지화기, sup-star 합성추론, 중심평균 비퍼지화기를 사용할 경우, 다음과 같이 쓸 수 있다 [5].

$$\theta = \frac{\mu_{\tilde{s}_S}(|s|) \cdot 0 + \mu_{\tilde{s}_M}(|s|) \cdot \frac{\pi}{4} + \mu_{\tilde{s}_L}(|s|) \cdot \frac{\pi}{2}}{0 + \frac{\pi}{4} + \frac{\pi}{2}} \quad (21)$$

(21)의 θ 를 $|s|$ 에 대해 그리면 그림 4와 같고

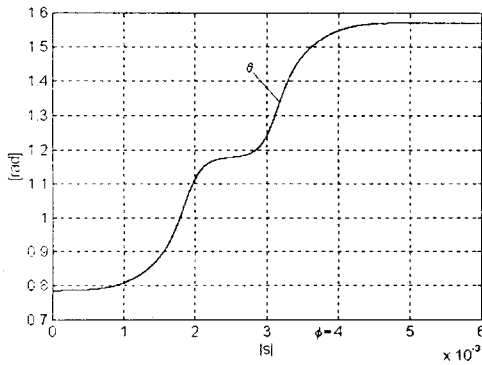


그림 4 $|s|$ 값에 따른 θ 의 값

Fig. 4 The value of θ with respect to $|s|$

그림 4 에서 $|s| > \phi$ 이면 $\theta \rightarrow \frac{\pi}{2}$ 이므로 (20)의 k 는 $k \rightarrow \infty$ 가 되어 (15), (17)로 정한 k 보다 크게 되어 슬라이딩 조건을 만족시키게 된다. (20), (21)로 추정된 k 의 타당성은 4 절의 시뮬레이션 연구를 통해 확인하기로 한다.

4. 시뮬레이션

3 절에서 제시된 제어기의 성능을 확인하기 위해 1기 무한 모션 계통 (1), (2), (3), (4)에서 전송선로 3상 단락고장이 발생했을 경우의 안정화 문제를 시뮬레이션 하였다. 계통 파라미터들은 표 1과 같고, 고장으로 인한 선로 리액턴스 변화는 (5)를 사용하였다. 고장은 (1)에서 제시된 다음과 같은 일시적 고장을 가정하였다.

표 1. 계통 파라미터들
Table 1. System parameters

w_0	314.159	D	5.0	H	8.0
T_{d_0}	6.9	k_c	1	x_d	1.863
x_d'	0.257	x_T	0.127	x_{L_0}	0.483

1. 고장전 정상상태(prefault steady state)
2. $\lambda=0.5$ 인 선로상에서 3상단락고장 발생($t=2$ sec에서)
3. breaker 개방에 의한 고장분리($t=2.15$ sec에서)
4. 고장제거로 인한 선로복구($t=2.35$ sec에서)
5. 고장후 상태(postfault state)

슬라이딩 제어기 (12)에서 필요로 하는 값들은 다음과 같이 선정하였다.

$$z_{d1} = 1, \quad \dot{z}_{d1} = 0, \quad \hat{a}_1(z) = \overline{L_g}h(x) = 0.82, \\ \hat{b}(z) = \overline{L_f}h(x) = -20, \quad \phi = 4 \times 10^{-3}, \quad \eta = 1$$

또한, $0 < x_1 < \pi$, $x_3 > 0$ 의 운전영역에서 경험적으로 구한 $L_g h(x)$ 의 값은 $L_g h(x) (=a(z)) \approx 0.8$ 이므로 $sign(a(z)) = +1$ 로 선정하였다. (12)의 k 는 (20), (21)의 퍼지계통에 의해 선정하였다. 그림 5 는 퍼지계통에 의해 k 를 정했을 때의 시뮬레이션 결과로써, 고장으로 인한 선로 리액턴스 변화에도 불구하고 발전기 단자전압 $V_t (=y)$ 와 발전기 상대속도 $\omega (=x_2)$ 가 각각 1과 0으로 잘 유지됨을 알 수 있다.

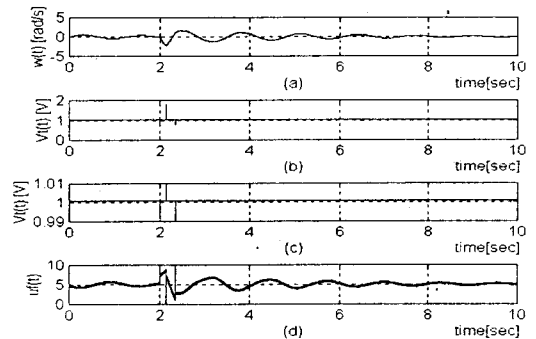


그림 5 퍼지계통에 의해 k 를 정했을 경우

- (a) 발전기 상대 각속도 $w(t)$
- (b) 단자전압 $V_t(t)$
- (c) 단자전압 $V_f(t)$
- (d) 제어입력 $u_f(t)$

Fig. 5 Simulation results with estimated k

- (a) Generator relative speed $w(t)$
- (b) Terminal voltage $V_t(t)$
- (c) Terminal voltage $V_f(t)$
- (d) Control input $u_f(t)$

한편, 본 논문에서는 퍼지계통에 의해 k 를 정하는 경우와 해석적으로 (15), (17)에 의해 k 를 정한 경우($a(z)$, $b(z)$ 를 안다고 가정)의 제어기 성능을 비교하기 위하여 또 다른 시뮬레이션을 하였다. 즉, 그림 6은 (15), (17)에 의해 k 를 정했을 때의 시뮬레이션 결과인데, 그림 5와 거의 비슷한 결과가 얻어짐을 알 수 있다. 따라서 그림 5와 그림 6의 결과로부터, 퍼지계통에 의해 정한 k 가 해석적으로 구한 k 에 못지 않은 슬라이딩 제어기 성능을 보장함을 알 수 있다. 참고로, 그림 7(a)는 (15)에 의해 정해진 k 를, 그림 7(b)는 퍼지계통 (20), (21)에 의해 정해진 k 를 보여준다. 그림 6(b)의 k 가 그림 6(a)의 k 보다 큰 것을 알 수 있으며, 따라서 3절의 그림 4에 대한 설명이 타당함을 알 수 있다.

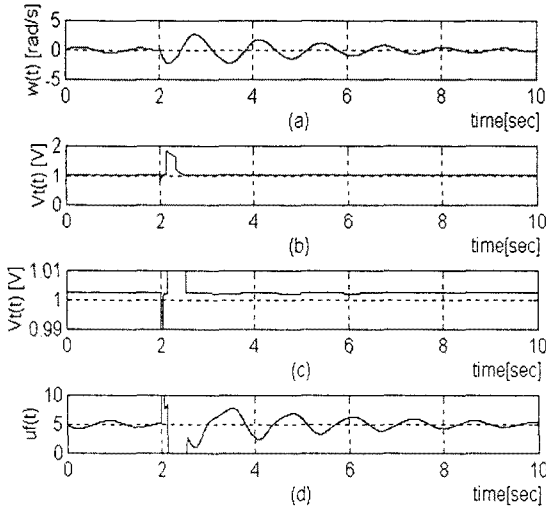


그림 6 식 (15), (17)에 의해 k 를 정했을 경우
 (a) 발전기 상대 각속도 $w(t)$
 (b) 단자전압 $V_t(t)$
 (c) 단자전압 $V_t(t)$
 (d) 제어입력 $u_f(t)$

Fig. 6 Simulation results with k determined by Eqs. (15) and (16)
 (a) Generator relative speed $w(t)$
 (b) Terminal voltage $V_t(t)$
 (c) Terminal voltage $V_t(t)$
 (d) Control input $u_f(t)$

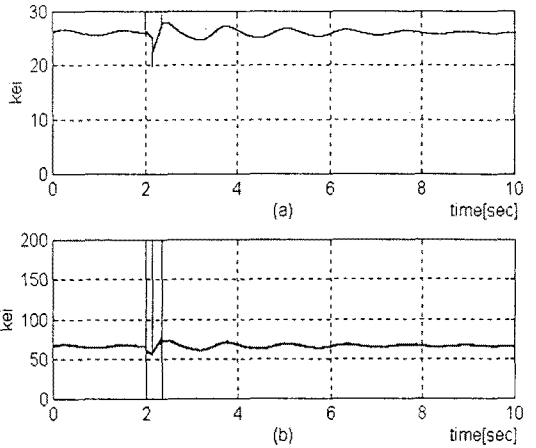


그림 7 (a) 식 (15), (17)에 의해 정해진 k
 (b) 퍼지계통 (20), (21)에 의해 정해진 k
 Fig. 7 (a) k determined by (15) and (17)
 (b) k determined by fuzzy system (20) and (21)

5. 결론

전송선로에서의 3상 단락고장으로 인한 리액턴스 변화는 전력계통 동특성식에 상태변수 의존적인 불확실성을 발생시키며, 슬라이딩 제어기 설계시 필요한 유계함수의 결정을 어렵게 만든다. 따라서 본 논문에서는 슬라이딩 제어기 설계에 필요한 유계함수를 퍼지계통에 의해 추정하는 방법을 제시하였으며, 제시된 방법은 전력계통 안정화와 전압유지에 적용되었다. 제안된 방법의 유용성을 확인하기 위해 4절에서 시뮬레이션 연구가 수행되었다. 즉, 4절에서 해석적으로 얻어진 k 와 퍼지계통에 의해 얻어진 k 를 슬라이딩 제어기 설계에 사용하여 비교하여 보았으며, 시뮬레이션 결과는 두 방식의 제어성능이 크게 다르지 않음을 보여주었다.

[참 고 문 헌]

- [1] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, L. Gao, "Transient stabilization of Power System with an Adaptive Control Law," *Automatica*, Vol. 30, No. 9, pp. 1409-1413, 1994.
- [2] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton, L. Gao, "Transient stability enhancement and voltage regulation of power systems," *IEEE Trans. Power Sys.* Vol. 8, No. 2, pp. 620-626, May 1993.
- [3] Slotine and Li, *Applied Nonlinear Control*, Prentice-Hall Inc., 1991.
- [4] Vadim I. Utkin, *Sliding Modes in Control Optimization*, Springer-Verlag, 1992.
- [5] Li-Xin Wang, "Stable adaptive fuzzy controllers with application to inverted tracking," *IEEE Trans., Syst., Man, Cybern.*, Vol. 26, No. 5, pp 677-691, 1996.