

전력 계통 과도상태 안정화를 위한 비선형 적응 백스테핑 제어기 설계

論 文

49A-7-3

Design of an Adaptive Nonlinear Backstepping Controller for Transient Stabilization of Power Systems

金東憲* · 金洪必** · 梁海元***
(Dong-Hun Kim · Hong-Pil Kim · Hai-Won Yang)

Abstract - In this paper, a robust nonlinear excitation controller is proposed to achieve both voltage regulation and system stability enhancement for single machine-infinite power systems. The proposed method employs backstepping technique and combines this with an adaptation algorithm for estimating the effective reactance of transmission line, thereby leading to adaptive nonlinear control. Simulation results show that power angle stabilization as well as voltage regulation is achieved in a satisfactory manner, regardless of the system operating conditions and system structure.

Key Words : 백스테핑 기법, 적응칙, 파라미터 프로잭션 기법, 과도상태 안정화, 여자 제어기

1. 서 론

현재까지 많은 형태의 제어기가 전력계통의 안정화를 위하여 제안되어 왔다. 기본적으로 전력계통은 변개, 폭우, 폭설 등의 기상변화와 과부하에 의한 고장 등으로 인하여 동특성식에 여러 가지 불확실성을 포함하게 된다. 따라서 제어기는 이러한 불확실성에 대해 견실한 성능을 발휘해야 하며, 특히 선로고장으로 인한 리액턴스 변화와 같은 파라미터 불확실성에 대처하여야 한다.

전력 계통에서 동기기에는 발전기 단자전압을 유지시키는 자동전압조정장치(AVR)와 감쇄 토크를 증대시키는 전력 계통 안정화 장치(PSS)가 설치된다. 종래의 AVR/PSS 설계에는 2 가지 고려 되어야 될 부분이 있다. 첫째, AVR과 PSS는 독자적으로 설계되어지고, 서로의 상관 관계 때문에 전압 조정은 시스템의 안정도 향상을 동시에 달성하기가 힘들다[1]. 둘째, 이 장치들은 어떤 동작점에서 근사적으로 선형화된 전력 계통모델에 의하여 설계되므로 동작점이 바뀔 때 원하는 성능을 발휘하기가 힘들다[2]. 또한, 큰 사고가 발생했을 때 역시 효과에 제한이 있다. [3]은 전압 조정과 감쇄 증진 사이에서 효과적인 교환을 하는 새로운 강인하게 조정된 AVR/PSS를 제안하기 위하여 Internal Model Control (IMC)를 사용하였다. 그러나, 근사적으로 선형화된 전력계통 모델을 사용하는 문제는 풀리지 않았다. 최근에는 시스템의 안정도와 수행능력을 증가시키기 위하여 비선형 여자 제어기의 설계로 비선형 제어 이론이 고려되고 있다[4].

한편 전력계통은 비선형 계통이며 동작점 부근에서 선형화 근사시킨(linearly approximated) 모델을 사용하는 전통적인 방식으로는 국부적으로만 유효한 제어기를 설계할 수 있을 뿐이며, 선로고장과 같은 급격한 외란 발생시에는 문제가 될 수 있다. 따라서 동작점에 무관하게 제어성능을 발휘하는 비선형 적응제어기법을 고려할 필요가 있다. 비선형 시스템에 대한 적응 제어 기법은 비선형 이론에서 중요한 부분으로서 현재까지 많은 연구가 진행되어 오고 있다. 특히 산업의 발달에 따라 고속, 고정밀의 제어성능을 필요로 하게 되었다. 적응 백스테핑 기법을 이용한 적응제어기 설계는 비선형 시스템 뿐만 아니라 선형 시스템에도 적용 가능하며 기존의 적응제어기에 비하여 특성이 우수한 것으로 알려져 있다. 최근에는 적응 백스테핑에서 더 진보된 형태로 overparametrization을 없앨 수 있는 튜닝함수 설계 방법이 사용되고 있다[5].

전력계통의 경우 전송선로에서의 고장 발생으로 인한 발전기 리액턴스 변화는 전기적 전력을 변화시킨다. 결과적으로 에너지 불균형을 초래하고 이 에너지 불균형은 일반적으로 발전기를 가속시킨다. 전력각의 변동이 매우 크다면 발전기는 동기 탈조되고 정지된다. 따라서 발전기 리액턴스 값에 대한 변화에 능동적으로 대처하고 안정도를 보장할 수 있는 제어기를 필요로 한다. 또한, 전력계통에는 내부의 부하 변동이나, 송전 선로의 환경 변화로 인한 동작점 변화등의 불확실성이 항상 존재한다. 전력계통 제어에서 이러한 일반적인 경우를 동시에 다룰 수 있는 비선형 제어이론은 아직까지 개발되지 않은 상태이고, 현재는 선형 시스템 이론을 바탕으로 불확실성에 대한 제한적 가정하에 불확실성과 외란을 보상하는 설계기법을 제시하고 있다.

설계된 제어기는 전력 계통의 리액턴스 변화에 따른 불확실성에 대처할 수 있고, 적응제어 이론과 백스테핑 기법[6]을 결합시킴으로써 제어기 구성시 사용된 모든 변수들이 유계함을 보이며, 발전기 부하각이 동작점에 대해 점근적 안정도를 갖는다.

* 正 會 員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程

** 正 會 員 : 慶一 大 電氣工學科 助教授 · 工博

*** 正 會 員 : 漢陽大 電子 · 컴퓨터 工學部 教授 · 工博

接受日字 : 1999年 12月 9日

最終完了 : 2000年 6月 9日

다. 또한 제어기 구성시에 필요한 전기적 전력, 무효전력에 관한 계측 조건[7]도 파악 수 있다. 시뮬레이션 결과는 설계된 제어기가 종래의 비선형 적응 제어기[7]에 비해 만족할 만한 제어 성능을 갖고 있는 것을 보여 준다.

본 논문의 구성은 다음과 같다. 우선 2절에서는 전력계통 모델 및 제어목적에 대해 설명하고, 3절에서는 전력 계통 시스템을 고려하여 적응 백스테핑을 이용한 비선형 제어기 설계를 하고 적응칙을 유도한다. 4절에서는 제안된 제어기의 성능을 시뮬레이션 하며, 5절에서는 결론과 향후 과제에 대해서 논한다.

2. 전력 계통 모델

2.1 전력 계통 모델

본 연구에서는 그림 1에 나타난 바와 같이 간략화된 전력계통 모델을 고려한다[8]. 이 모델은 한 대의 발전기가 변압기와 송전선로를 통해 무한 모션(infinite bus)으로 근사화된 매우 큰 시스템에 연결된 계통이다. 그림 1과 같은 1기 무한모션 계통은 비선형 특성을 갖는 상태방정식으로 표현되며 전력계통에 사고가 발생할 경우 리액턴스 $x_s, x_{ds}, x_{d's}$ 에 영향을 주게 된다. 이 계통의 기계적, 전기적 방정식은 다음과 같다.

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

$$\dot{\omega}(t) = -\frac{D}{H}\omega(t) + \frac{\omega_0}{H}\left(P_m - \frac{V_s E_q}{x_{ds}} \sin \delta(t)\right) \tag{2}$$

$$\dot{E}_q(t) = \frac{1}{T_{do'}}[k_c u_f(t) - E_q(t)] + \frac{x_d - x_{d'}}{x_{ds}} V_s \sin \delta(t) \omega(t) \tag{3}$$

여기서,

$\delta(t)$: 발전기 부하각,

$\omega(t)$: 발전기의 동기 각속도,

$P_m(t)$: 기계적 입력,

ω_0 : 동기각속도,

D : 제동계수의 pu 값,

H : 관성계수의 pu 값,

$E_q(t)$: 발전기의 횡축 기전력,

$u_f(t)$: 여자 증폭기의 제어입력,

$T_{do'}$: 직축의 과도 단락회로 시정수,

k_c : 여자 증폭기의 이득,

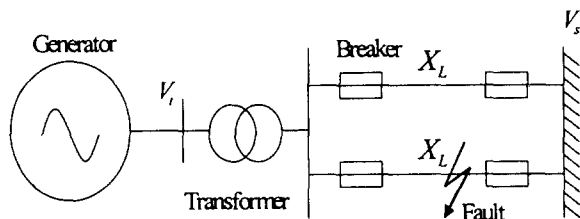


그림 1 1기 무한 모션 전력계통

Fig. 1 Single machine to infinite bus power system

x_d : 발전기의 직축 리액턴스,

x_L : 전송선로의 리액턴스,

$x_{d'}$: 발전기의 직축 과도 리액턴스,

V_s : 무한모션 전압

이며 $x_{ds}, x_{d's}$ 은 다음과 같이 $x_L, x_d, x_{d'}$, 변압기의 리액턴스 x_T 의 함수로 아래와 같이 표현되며,

$$x_{ds} = x_T + \frac{1}{2}x_L + x_d, \quad x_{d's} = x_T + \frac{1}{2}x_L + x_{d'}$$

$T_{do'}$ 은 다음과 같다.

$$T_{do'} = \frac{x_{d's}}{x_{ds}} T_{do}$$

단자전압 $V_i(t)$ 는 아래와 같이 표현되며,

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

여기서,

$$x_s = x_T + \frac{1}{2}x_L$$

식(2),(3),(4)에서 사용된 계통 파라미터들은 표1에 주어져 있다. 동작점은 $\delta_0 = 72^\circ$, $P_{m0} = 0.9 pu$ 이며 사고유형은 다음과 같이 설정한다.

• 사고 유형1 : 일시적인 사고

1 단계 - 시스템은 사고 이전상태의 정상상태에 있다.

2 단계 - 사고가 $t=0.1s$ 에 일어난다.

3 단계 - 사고가 $t=0.25s$ 에 차단기가 동작하여 제거 된다.

4 단계 - 시스템이 $t=1.0s$ 에 사고 이전 상태로 복구 된다.

• 사고 유형2 : 영구적인 사고

1 단계 - 시스템은 사고 이전상태의 정상상태에 있다.

2 단계 - 사고가 $t=0.1s$ 에 일어난다.

3 단계 - 사고가 $t=0.25s$ 에 차단기가 동작하여 제거 된다.

표 1 계통 상수

Table 1 System constants

ω_0	314.159	D	5.0	H	8.0
T_{do}	6.9	k_c	1	x_d	1.863
$x_{d'}$	0.257	x_T	0.127	x_L	0.4853

2.2 선로 사고와 제어목적

여기에서는 한 전송선로에서 발생하는 대칭 3상 지락사고 (symmetrical 3-phase short circuit fault)를 고려한다. x_L 은 한 전송선의 총 리액턴스이고 λ 는 고장 발생점에서 좌

측 부분의 전체 선로에 대한 비율을 나타낸다. 예를 들어 $\lambda=0$ 이라면 사고는 발전기 단자에서 발생한 것이고, $\lambda=0.5$ 이면, 송전선 중앙에서 사고가 발생한 것이다. 사고에 의해 리액턴스 값이 어떻게 변하는가를 그림 2가 보여준다. 이러한 사고가 발생했을 때는 $x_s, x_{ds}, x_{d's}$ 값들이 변하고, 이들은 λ 와 $x_L, x_T, x_d, x_{d'}$ 들의 비선형 함수들로서 다음과 같이 표현된다.

$$x_s = (1 + \frac{1}{\lambda})x_T + x_L, \quad x_{ds} = (1 + \frac{1}{\lambda})(x_d + x_T) + x_L$$

$$x_{d's} = (1 + \frac{1}{\lambda})(x_{d'} + x_T) + x_L \quad (5)$$

이러한 계통에 대한 제어 목적은 선로사고 발생시 계통의 파라미터들의 변화에도 불구하고 동기상태와 일정전압을 유지하도록 제어입력 u_f 를 결정하는 것이다. 즉 사고발생에도 불구하고 발전기 부하각이 동작 구간 ($0^\circ \sim 180^\circ$) 내에서 되도록 빠른 시간 내에 안정화되고, 동시에 발전기 단자 전압 V_f 가 일정한 값을 유지하도록 u_f 를 결정하는 것이다. 여기서 과도 기간 동안의 기계적 입력 P_m 은 상수라고 가정한다.

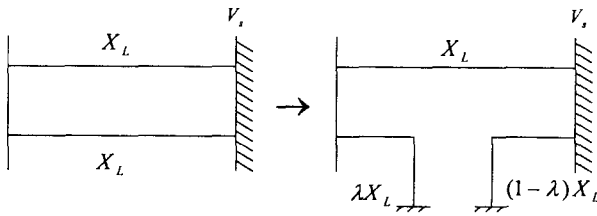


그림 2 사고에 의한 리액턴스 값의 변화

Fig. 2 Variation of reactance due to fault

2.3 상태 방정식

(1),(2),(3)으로부터 다음과 같은 비선형 상태 방정식을 얻을 수 있다.

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

여기서,

$$x = [x_1 \quad x_2 \quad x_3]^T = [\delta \quad \omega \quad E_q]^T$$

$$f(x) = \begin{bmatrix} -\frac{D}{H}\omega + \frac{\omega_0 P_m}{H} - \frac{\omega_0 V_s E_q}{H x_{ds}} \sin \delta \\ -\frac{E_q}{T_{do'}} + \frac{x_d - x_{d'}}{x_{ds}} V_s \omega \sin \delta \end{bmatrix},$$

$$g(x) = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_c}{T_{do'}} \end{bmatrix}, \quad u = u_f \text{ 이다.}$$

3. 적응 백스테핑을 이용한 제어기 설계

3.1 제어기 설계

계통 시스템 (6)으로부터 미지의 파라미터 $\theta_1, \theta_2, \theta_3$

를 포함한 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$\dot{x}_1 = x_2$$

$$\dot{x}_2 = -\frac{D}{H}x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} + \phi_1^T \theta$$

$$\dot{x}_3 = -\phi_3^T \theta x_3 + \phi_2^T \theta + \phi_3^T \theta k_c u \quad (7)$$

여기서,

$$\theta_1 = \frac{\omega_0 V_s}{H x_{ds}}, \quad \theta_2 = \frac{x_d - x_{d'}}{x_{ds}} V_s, \quad \theta_3 = \frac{1}{T_{do'}}$$

$$\theta = \begin{bmatrix} \theta_1 \\ \theta_2 \\ \theta_3 \end{bmatrix}, \quad \phi_1 = \begin{bmatrix} -x_3 \sin x_1 \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \phi_2 = \begin{bmatrix} 0 \\ x_2 \sin x_1 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad \phi_3 = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}$$

$$u_f = u \quad (8)$$

오차 변수 z 를 단계마다 새로 만들고 가상의 입력으로서 안정화 함수 α 를 매 단계마다 만들어 가면서 Lyapunov 함수의 도함수를 구해 나가는 방식인 튜닝함수 기법을 제어기 설계에 적용해서 [9]에서의 결점으로 지적되었던 Overparameterization을 없애기로 한다.

먼저 아래와 같이 오차 변수 z 를 정의한다.

$$z_1 = x_1 - y_s \quad (9)$$

$$z_2 = x_2 - \alpha_1 \quad (10)$$

단계 1 : 첫 번째 오차 변수 $z_1 = x_1 - y_s$ 의 미분식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{z}_1 = x_2 = z_2 + \alpha_1$$

Lyapunov 함수 $V_1 = \frac{1}{2} z_1^2 + \frac{1}{2} \vartheta^T \Gamma^{-1} \vartheta$ 를 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\dot{V}_1 = z_1(z_2 + \alpha_1) - \vartheta^T \Gamma^{-1} \dot{\vartheta} \quad (11)$$

여기서, $\dot{\vartheta} = \dot{\theta} - \dot{\vartheta}$, $\Gamma = \begin{bmatrix} \gamma_1 & 0 & 0 \\ 0 & \gamma_2 & 0 \\ 0 & 0 & \gamma_3 \end{bmatrix}$.

첫 번째 안정화 함수 α_1 을 아래와 같이 설정하면

$$\alpha_1 = -c_1 z_1 = -c_1 (x_1 - y_s) \quad (12)$$

(11)은 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\dot{V}_1 = -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 - \vartheta^T \Gamma^{-1} \dot{\vartheta} \quad (13)$$

오차 변수 z_3 를 다음과 같이 정의하기로 한다.

$$z_3 = x_3 - \alpha_2 \quad (14)$$

단계 2 : 두 번째 오차 변수 $z_2 = x_2 - \alpha_1$ 의 미분식을 구하면 다음과 같다.

$$\dot{z}_2 = -\frac{D}{H}x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} + \phi_1^T \theta - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} x_2$$

$$= -\frac{D}{H}x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} - x_3 \sin x_1 \theta_1 - \frac{\partial \alpha_1}{\partial x_1} x_2$$

Lyapunov 함수 $V_2 = V_1 + \frac{1}{2} z_2^2$ 를 시간에 대해 미분하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_2 &= -c_1 z_1^2 + z_1 z_2 - \partial^T \Gamma^{-1} \dot{\partial} \\
 &\quad + z_2 \left[-\frac{D}{H} x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} + \phi_1^T \theta - \frac{\partial a_1}{\partial x_1} x_2 \right] \\
 &= -c_1 z_1^2 + z_2 \left[z_1 - \frac{D}{H} x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} + \phi_1^T \theta - \frac{\partial a_1}{\partial x_1} x_2 \right] \\
 &\quad + \widehat{\theta}^T (\phi_1 z_2 - \Gamma^{-1} \dot{\partial}) \\
 &= -c_1 z_1^2 + z_2 \left[z_1 - \frac{D}{H} x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} \right. \\
 &\quad \left. - (z_3 + a_2) \widehat{\theta}_1 \sin x_1 - \frac{\partial a_1}{\partial x_1} x_2 \right] + \widehat{\theta}^T (\phi_1 z_2 - \Gamma^{-1} \dot{\partial}) \\
 &= -c_1 z_1^2 + z_2 \left[z_1 - \frac{D}{H} x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} - z_3 \widehat{\theta}_1 \sin x_1 \right. \\
 &\quad \left. - a_2 \widehat{\theta}_1 \sin x_1 - \frac{\partial a_1}{\partial x_1} x_2 \right] + \widehat{\theta}^T (\phi_1 z_2 - \Gamma^{-1} \dot{\partial}) \quad (15)
 \end{aligned}$$

여기서, 적응칙 $\dot{\partial} = \Gamma \tau_1$ 으로 \dot{V}_2 에서 $\dot{\partial}$ 항을 없앨 수 있다. 따라서, 튜닝함수 τ_1 은 다음과 같다.

$$\tau_1 = \phi_1 z_2 \quad (16)$$

안정화 함수 a_2 를 다음과 같이 설정하면

$$a_2 = \frac{1}{\widehat{\theta}_1 \sin x_1} \left(z_1 + c_2 z_2 - \frac{D}{H} x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} - \frac{\partial a_1}{\partial x_1} x_2 \right) \quad (17)$$

(15)는 다음과 같이 바뀌게 된다.

$$\dot{V}_2 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + \partial^T (\tau_1 - \Gamma^{-1} \dot{\partial}) - z_2 z_3 \widehat{\theta}_1 \sin x_1 \quad (18)$$

단계 3 : 세 번째 오차 변수 $z_3 = x_3 - a_2$ 의 미분식을 구하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{z}_3 &= -\phi_3^T \theta x_3 + \phi_2^T \theta + \phi_3^T \theta k_c u \\
 &\quad - \left(\frac{\partial a_2}{\partial \widehat{\theta}_1} \dot{\widehat{\theta}}_1 + \frac{\partial a_2}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial a_2}{\partial x_2} \dot{x}_2 \right) \\
 &= -\phi_3^T \theta x_3 + \phi_2^T \theta + \phi_3^T \theta k_c u - \left[\frac{\partial a_2}{\partial \widehat{\theta}_1} \dot{\widehat{\theta}}_1 + \frac{\partial a_2}{\partial x_1} \dot{x}_1 \right. \\
 &\quad \left. + \frac{\partial a_2}{\partial x_2} \left(-\frac{D}{H} x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} + \phi_1^T \theta \right) \right]
 \end{aligned}$$

Lyapunov 함수 $V_3 = V_2 + \frac{1}{2} z_3^2$ 를 시간에 대해 미분하고, $\theta = \partial + \widehat{\theta}$ 를 사용하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_3 &= \dot{V}_2 + z_3 \dot{z}_3 \\
 &= -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + \partial^T (\tau_1 - \Gamma^{-1} \dot{\partial}) + z_3 \dot{z}_3 \\
 &\quad - z_2 z_3 \widehat{\theta}_1 \sin x_1 \\
 &= -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + \partial^T (\tau_1 - \Gamma^{-1} \dot{\partial}) + \phi_2 z_3 - \phi_1 z_3 \frac{\partial a_2}{\partial x_2} \\
 &\quad - \phi_3 x_3 z_3 + z_3 \left[\phi_2^T \theta - \phi_3^T \theta x_3 + \phi_3^T \theta k_c u - z_2 \widehat{\theta}_1 \sin x_1 \right. \\
 &\quad \left. - \left(\frac{\partial a_2}{\partial \widehat{\theta}_1} \dot{\widehat{\theta}}_1 + \frac{\partial a_2}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial a_2}{\partial x_2} \left(-\frac{D}{H} x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. + \phi_1^T \theta \right) \right) \right] \quad (19)
 \end{aligned}$$

u 를 다음과 같이 설정하면

$$\begin{aligned}
 u &= w(x, \partial) \\
 &= \frac{1}{k_c \phi_3^T \theta} \left[-c_3 z_3 - \phi_2^T \theta + \phi_3^T \theta x_3 + z_2 \widehat{\theta}_1 \sin x_1 \right. \\
 &\quad \left. + \left(\frac{\partial a_2}{\partial \widehat{\theta}_1} \dot{\widehat{\theta}}_1 + \frac{\partial a_2}{\partial x_1} \dot{x}_1 + \frac{\partial a_2}{\partial x_2} \left(-\frac{D}{H} x_2 + \frac{\omega_0 P_m}{H} \right. \right. \right. \\
 &\quad \left. \left. \left. + \phi_1^T \theta \right) \right) \right] \quad (20)
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 \dot{V}_3 &= -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 + \partial^T (\tau_1 - \Gamma^{-1} \dot{\partial}) + \phi_2 z_3 - \phi_1 z_3 \frac{\partial a_2}{\partial x_2} \\
 &\quad - \phi_3 x_3 z_3 + z_3 (-c_3 z_3 + k_c \phi_3^T \theta w(x, \partial)) \\
 &= -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 + \partial^T (\tau_1 - \Gamma^{-1} \dot{\partial}) + \phi_2 z_3 - \phi_1 z_3 \frac{\partial a_2}{\partial x_2} \\
 &\quad - \phi_3 x_3 z_3 + \phi_3 k_c z_3 w(x, \partial)
 \end{aligned}$$

적용칙 $\dot{\partial} = \Gamma \tau_2$ 으로 \dot{V}_3 에서 $\dot{\partial}$ 항을 없앨 수 있다. 따라서, 튜닝함수 τ_2 는 다음과 같다.

$$\tau_2 = \tau_1 + \phi_2 z_3 - \phi_1 z_3 \frac{\partial a_2}{\partial x_2} - \phi_3 x_3 z_3 + \phi_3 k_c z_3 w(x, \partial) \quad (21)$$

∂ 와 u 를 다음과 같이 설정하면

$$\dot{\partial} = \Gamma \tau_2 = \Omega \quad (22)$$

$$\dot{V}_3 = -c_1 z_1^2 - c_2 z_2^2 - c_3 z_3^2 \leq 0 \quad (23)$$

와 같이 된다.

3.2 안정도 증명

(23)을 사용하여 $z_1, z_2, z_3, \widehat{\theta}_1, \widehat{\theta}_2, \widehat{\theta}_3$ 모두 유계함을 보였다. 따라서, (9), (10), (14)를 사용하여 δ, ω, E_o 가 유계하며, (4)를 사용하여 단자전압 V_l 역시 유계함을 보일 수 있다. 또한, (12), (17), (20)을 사용하여 α_1, α_2, u 가 모두 유계하여 제안된 알고리즘에 사용된 모든 신호가 유계임을 알 수 있다.

(23)을 적분해서 전개하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned}
 c_1 \int_0^t z_1^2(\tau) d\tau &= -V_3(t) + V_3(0) - c_2 \int_0^t z_2^2(\tau) d\tau - c_3 \int_0^t z_3^2(\tau) d\tau \\
 \int_0^t z_1^2(\tau) d\tau &\leq \frac{1}{c_1} V_3(0) \\
 &= \frac{1}{2c_1} (z_1^2(0) + z_2^2(0) + z_3^2(0) + \widehat{\theta}^T(0) \Gamma^{-1} \partial(0))
 \end{aligned}$$

따라서, $z_1 \in L_2$. $\dot{z}_1 = z_2 + \alpha_1$ 이므로 $\dot{z}_1 \in L_\infty$ 이다. 여기서 Barbalat의 보조정리[10]를 이용하면 $\lim_{t \rightarrow \infty} z_1(t) = 0$ 을 얻게 된다. 그러므로, 발전기 부하각 δ 가 동작점 y_s 에 대한 안정화 문제에 대하여 점근적 안정도를 보장할 수 있다.

3.3 적응적 설계

3.1절에서 (21)처럼 적응칙을 설계하였지만, (17)(20)에 분

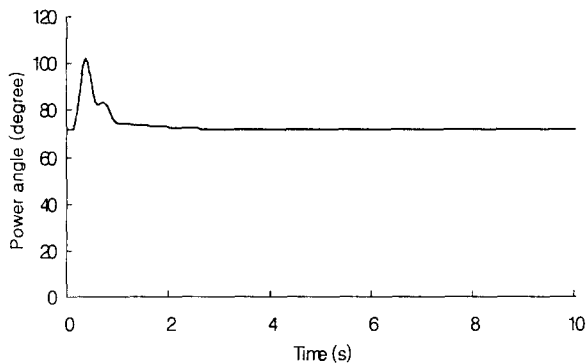
모 항으로 있는 항이 항상 0보다 크게 설계되어야 되기 때문에 프로젝션 방법[6]을 도입하여 (21)에 정의된 파라미터 θ 에 대한 적응칙을 수정하기로 한다. x_1 은 $0^\circ < x_1 < 180^\circ$ 에서 유계함을 보이면 되고, $\hat{\theta}$ 가 임의의 어떤 양의 상수보다 큰 값을 갖도록 적응칙을 수정하면 다음과 같다.

$$\dot{\theta} = \begin{cases} \Omega & \text{if } \hat{\theta} \in \text{int}(\Lambda) \\ \Omega & \text{if } \hat{\theta} \in B(\Lambda) \text{ and } \Omega^T \hat{\theta}^+ \geq 0 \\ \text{Pr}(\Omega) & \text{if } \hat{\theta} \in B(\Lambda) \text{ and } \Omega^T \hat{\theta}^+ < 0 \end{cases} \quad (24)$$

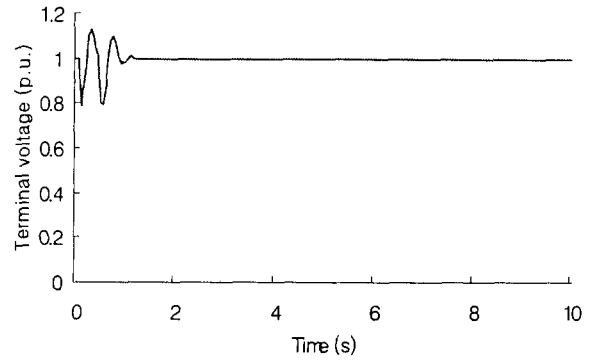
여기서 Λ 는 컨벡스 영역이고, 파라미터 추정 벡터가 컨벡스 영역에서 초기값을 가지면 제어입력 (22)가 잘 정의되는 영역에서 항상 존재 하도록 (24)는 설계 되어진다. $\text{int}(\Lambda)$ 와 $B(\Lambda)$ 는 각각 이 영역의 내부와 경계를 표시한다. $\hat{\theta}$ 지점에서 경계 표면에 대한 법선 벡터는 $\hat{\theta}^+$ 로 표시한다. $\text{Pr}(\Omega)$ 는 벡터 Ω 를 $\hat{\theta}$ 의 경계표면에 대한 접선 평면으로 투영하는 것을 의미한다.

4. 모의실험

제안된 제어기의 성능확인을 위하여 1기 무한 모선 계통에서 3상 단락고장이 발생했을 경우의 과도 안정화 문제를 시뮬레이션하였다. 계통 파라미터들은 표1과 같고, 고장으로 인한 선로 리액턴스 변화는 (5)와 같다. 초기값은 $\hat{\theta}_1 = 15, \hat{\theta}_2 = 1, \hat{\theta}_3 = 1$ 이고, 설계 파라미터는 다음과 같다. $c_1 = c_2 = c_3 = 2.5, \gamma_1 = \gamma_2 = \gamma_3 = 0.5$. 그림 4는 $\lambda = 0.5$ 에서 일시적인 사고일 때의 발전기 상대각과 단자 전압을 나타내며, 그림 5는 각각 $\lambda = 0.3, \lambda = 0.1$ 에서 일시적인 사고일 때의 발전기 상대각을 나타내며, 그림 6은 $\lambda = 0.5$ 에서 영구적인 사고일 때의 발전기 상대각과 단자 전압을 나타낸다. 시뮬레이션 결과로부터 제안된 적응 백스테핑 제어기가 과도 상태에서도 안정도를 유지하고, [7]의 결과와는 다르게 $\lambda = 0.1$ 일때에도 안정도가 유지되는 것을 보여 주고 있다.



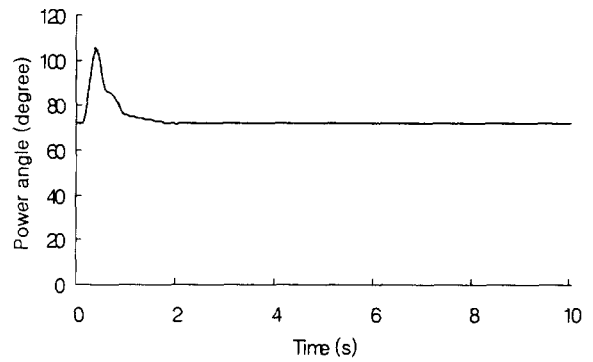
(a)



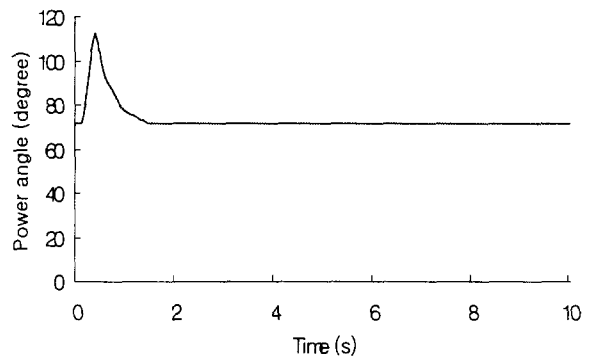
(b)

그림 4 $\lambda=0.5$ 일 때 일시적인 사고시 (a)발전기 상대각, (b) 단자 전압

Fig. 4 (a) Power angle response, (b) Terminal voltage response for a temporary fault at $\lambda=0.5$



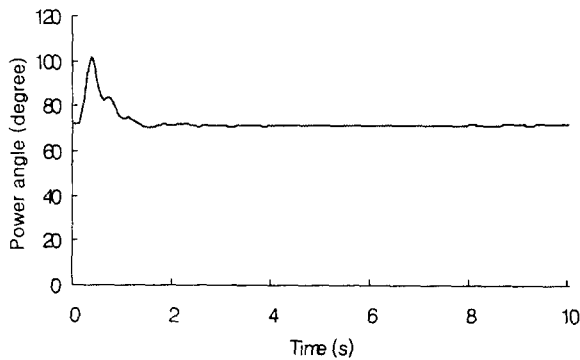
(a)



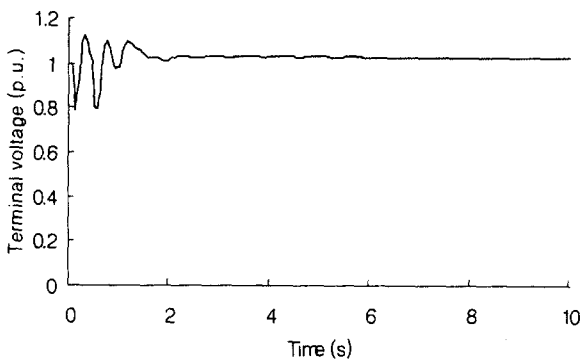
(b)

그림 5 (a) $\lambda=0.3$, (b) $\lambda=0.1$ 일 때 일시적인 사고시 발전기 상대각

Fig. 5 Power angle responses for a temporary fault (a) at $\lambda=0.5$ and (b) at $\lambda=0.1$



(a)



(b)

그림 6 $\lambda=0.5$ 일 때 영구적인 사고시 (a)발전기 상대각, (b) 단자 전압

Fig. 6 (a) Power angle response, (b) Terminal voltage response for a permanent fault at $\lambda=0.5$

5. 결 론

기존의 적응제어를 이용한 설계 방법에서는 근사적으로 선형화한 모델을 사용하여 적응 제어를 설계하였고, 이러한 제어기들은 특정 동작점에서 설계된 선형 제어기이다. 이 경우 큰 사고시 시스템의 파라미터와 동작점이 크게 바뀌게 되어, 선형 제어기는 일반적으로 시스템의 과도 안정도를 유지 할 수 없다.

본 연구에서는 1기 무한 모선 계통에서 동작점 변동에 의해 발생하는 시스템 내부의 불확실성에 대하여 강인성을 갖는 여자 제어기를 비선형 적응 백스텝핑 이론을 이용하여 설계하였다. 따라서, 전력 계통의 리액턴스 변화에 따른 불확실성에 대처하여 발전기 상대각과 단자전압을 일정한 값으로 유지시켰다. 또한, 제안된 제어기는 다기계통의 전력계통 모델에 확장 시킬 수 있다. 그러나 불안정성이나 시스템에서의 불안정한 기계, 전기적 성질을 일으키는 외부 시스템의 변화에 대해서는 강인성 연구가 필요하다.

감사의 글

본 연구는 1998년도 전기연구소의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사 드립니다.

참 고 문 헌

- [1] P. Kundur, *Power System Stability and Control*, McGraw-Hill, New York, 1994.
- [2] K. T. Law, D. J. Hill and N. R. Godfrey, "Robust Controller Structure for Coordinated Power System Voltage Regulator and Stabilizer Design", *IEEE Trans Control System Technology*, vol. 2, no. 3, pp. 220-232, 1994.
- [3] C. Zhu, R. Zhou and Y. Wang, "A New Nonlinear Voltage Controller for Power Systems", *Electrical Power & Energy Systems*, vol. 19, no. 1, pp. 19-27, 1997.
- [4] M. Krstic, I. Kanellakopoulos and P. V. Kokotovic, "Nonlinear Adaptive Control Design", *John Wiley & Sons*, 1995.
- [5] M. Krstic, I. Kanellakopoulos and P. V. Kokotovic, "Adaptive Nonlinear Control without Overparametrization", *Systems & Control Letters*, vol. 19, pp. 177-185, 1992.
- [6] R. Lazano and B. Brogliato, "Adaptive Control of Robot manipulators with Flexible Joints", *IEEE Trans. Automatic Control*, vol. 37, no. 2, pp. 174-181, 1992.
- [7] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton and L. Gao, "Transient Stabilization of Power System with an Adaptive Control Law", *Automatica*, vol. 30, No. 9, pp. 1409-1413, 1994.
- [8] Yao-nan Yu, *Electric Power System Dynamics*, Academic Press, 1983.
- [9] I. Kanellakopoulos and P. V. Kokotovic, "Systematic Design of Adaptive Controllers for Feedback Linearizable Systems", *IEEE Trans. Automat. Contr.*, vol. 36, pp. 1241-1253, 1991.
- [10] K. S. Narendra and A. M. Annaswamy, "Stable Adaptive Systems", *Prentice Hall*, 1989.

저 자 소 개



김 동 헌 (金東憲)

1970년 3월 8일생. 1995년 한양대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년~현재 동 대학원 박사과정

Tel : 0345-419-2313

E-mail : ddhkim@hymail.hanyang.ac.kr



양 해 원 (梁海元)

1950년 3월 20일생. 1971년 서울대 전기공학과 졸업. 1973년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1982년 일본 Kyoto대 전기공학과 졸업(공학박). 1993년 미국 Yale

대 교환교수. 1993년~현재 한양대 전자 컴퓨터공학부 교수. 제어 자동화 시스템 공학회 학술이사. 대한전기학회 편집위원장.

Tel : 0345-400-5162

E-mail : hwyang@email.hanyang.ac.kr



김 홍 필 (金洪必)

1955년 10월 10일생. 1977년 한양대 공대 전기공학과 졸업(학사). 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1990년~현재 경 일대 공대 전기공학과 부교수

Tel : 053-850-7146

E-mail : Kimhongp@bear.kyungil.ac.kr