

전력계통안정화를 위한 간접적용 비선형제어

Indirect adaptive nonlinear control for power system stabilization

이도관, 윤태웅, 박귀태, 이병준

고려대학교 전기전자전공공학부 (Tel: +82-3290-3240; E-mail: twy@cello.korea.ac.kr)

Abstracts As in most industrial processes, the dynamic characteristics of an electric power system are subject to changes. Amongst those effects which cause the system to be uncertain, faults on transmission lines are considered. For the stabilization of the power system, we present an indirect adaptive control method, which is capable of tracking a sudden change in the effective reactance of a transmission line. As the plant dynamics are nonlinear, an input-output feedback linearization method equipped with nonlinear damping terms is combined with an identification algorithm which estimates the effect of a fault. The stability of the resulting adaptive nonlinear system is investigated.

Keywords Power system, Stabilization, Adaptive control, Feedback linearization

1. 서론

전력계통은 번개나 폭우등의 여러 가지 요인으로 인해 변화하는 동특성을 갖는다. 전송선로의 리액턴스와 같은 파라메터가 사고 발생으로 인해 변하게 되는 것이 그 대표적 예일 것이다. 본 논문에서는 전력계통의 동적 모델을 1기무한모선으로 가정하고, 3상 지락사고를 고려한다[4],[5]. 계통에 이러한 사고가 발생하면 사고발생 위치와 관련하여 전송선로의 리액턴스가 변하게 되고, 이 때 리액턴스의 변화는 계통의 상태방정식의 파라메터들을 변화시키는 요인이 된다. 따라서 이러한 사고 발생으로 인한 계통의 불확실성에 대처할 수 있는 적응알고리즘이 필요하게 된다. 또한 전력계통은 강한 비선형특성을 지니고 있어, 계통의 효과적 제어를 위해서는 비선형제어기법의 도입이 필요하다. 따라서 [6]에서는 케환선형화제어와 추정알고리즘을 결합한 적응제어기법을 제시한 바 있다. 그러나 계통의 내부안정성에 대한 논의가 없었고, Certainty equivalence에 전적으로 의존하였다는 한계를 지닌다. 이어 논문 [7]에서는 계통의 내부안정도 조건에 대해 논하였다. 본 논문에서는 [6],[7]에서의 제어기에 비선형감쇄항(Nonlinear damping)을 추가하여 전체 계통의 안정성을 증대시키고자 한다.

2. 전력 계통 모델

2.1 상태방정식(State equations)

본 논문에서는 그림 1과 같이 간략화된 계통 모델을 고려한다. 이 모델은 한 대의 발전기가 변압기와 송전선로를 통해 무한모선(Infinite bus)으로 근사화된 매우 큰 시스템에 연결된 계통이다.

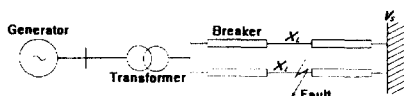


그림 1. 1기 무한모선모델
Fig. 1. Single machine-infinite bus model.

위와 같은 1기 무한모선은 비선형특성을 갖는 상태방정식으로 표현되며 전력계통에 사고가 발생할 경우 전송선로 리액턴스에 영향을 주게 된다. 발전기의 기계적, 전기적 특성은 다음과 같은 상태방정식으로 표현될 수 있다[3],[4],[5].

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

$$\dot{\omega}(t) = -\frac{D}{H} \omega(t) + \frac{\omega_0 P_m}{H} - \frac{\omega_0 V_s E_d(t)}{H x_{as}} \sin \delta(t) \tag{2}$$

$$\dot{E}_d(t) = \frac{1}{T_{do}} (k_c u_f(t) - E_d(t)) + \frac{x_d - x_d'}{x_{as}} V_s \omega(t) \sin \delta(t) \tag{3}$$

여기서 $\delta(t)$ 는 발전기의 동기각, $\omega(t)$ 는 발전기의 동기각속도, $E_d(t)$ 는 횡축의 기전력, D 는 제동상수의 PU값, H 는 관성상수의 PU값, P_m 은 기계적 입력, V_s 는 무한모선전압, ω_0 는 동기각 속도, k_c 는 여자기의 이득, $u_f(t)$ 는 발전기의 SCR증폭기의 제어입력, x_d 는 발전기 직축의 리액턴스, x_d' 는 발전기 직축의 과도리액턴스를 각각 의미한다. 또한 단자전압 V_t 는 다음과 같이 표현된다.

$$V_t = \frac{1}{x_{as}} \{x_d^2 E_d^2 + V_s^2 x_d'^2 + 2x_d x_d' V_s E_d \cos \delta\}^{1/2} \tag{4}$$

(1)-(4)에서 $x_{as}, x_{as}', T_{do}', x_s$ 는

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

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

의 관계를 만족하며, 여기서 T_{do} 와 x_T 는 각각 직축의 과도 단락 회로 시정수와 변압기의 리액턴스를 의미한다. 시뮬레이션에서 사용되는 상수들은 표 1에 주어져 있다.

표 1. 시스템 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

한편 이상과 같이 설정된 전력계통모델은 $\delta = 70^\circ, P_m = 0.9, V_t = 1.0, V_s = 0.98$ 의 공칭동작점을 갖는다고 가정한다.

2.2 사고발생시 계통의 영향

본 논문에서 고려하는 사고는 한 전송선로에서 발생하는 대칭 3상 지락사고(Symmetrical 3-phase short circuit fault)이다. x_L 은 한 전송선의 총 리액턴스이고 λ 는 고장 발생 점에서 좌측 부분의 전체 선로에 대한 비율을 나타낸다. 만약 $\lambda=0$ 이라면 사고는 발전기 단자에서 발생한 것이고, $\lambda=0.5$ 라면 전송선 정 중앙에서 사고가 발생한 것이다. 사고 발생시 x_{as} , x_{as}' , x_s 를 λ 의 비선형 함수로 나타내면 다음 식들과 같다.

$$\begin{aligned} x_s &= (1 + \frac{1}{\lambda})x_T + x_L \\ x_{as} &= (1 + \frac{1}{\lambda})(x_d + x_T) + x_L \\ x_{as}' &= (1 + \frac{1}{\lambda})(x_d' + x_T) + x_L \end{aligned}$$

이러한 계통의 제어 목적은 선로사고 발생시 계통의 파라미터들이 변함에도 불구하고 동기상태와 일정전압을 유지하도록 제어입력 u_f 를 결정하는 것이다. 즉, 사고발생에도 불구하고 발전기 부하각이 동작구간($0^\circ \sim 90^\circ$)내에서 되도록 빠른 시간내에서 안정화되고, 동시에 발전기 단자전압 V_f 가 1.0 [p.u.]를 유지하도록 한다.

3. 의사출력식을 사용한 궤환 선형화

3.1 입출력 궤환선형화

참고문헌 [6],[7]의 결과를 토대로 동기각의 진동문제에 대처하고 내부동특성을 개선시키기 위해 다음과 같은 출력방정식을 사용한다.

$$y = V_f + a\omega_f \quad (5)$$

여기서

$$\omega_f = -b\omega_f + b\omega \quad (6)$$

를 만족한다. 상태변수 ω_f 를 추가한 계통은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\delta} \\ \dot{\omega} \\ \dot{E}_q \\ \dot{\omega}_f \end{bmatrix} = f(\delta, \omega, E_q, \omega_f) + g(\delta, \omega, E_q, \omega_f)u_f \quad (7)$$

여기서

$$\begin{aligned} f(\delta, \omega, E_q, \omega_f) &= \begin{bmatrix} -\frac{D}{H}\omega + \frac{\omega_0 P_m}{H} - \frac{\omega_0 V_s E_q}{H x_{as}} \sin \delta \\ -\frac{1}{T_{d0}} E_q + \frac{x_d - x_d'}{x_{as}} V_s \omega \sin \delta \\ -b\omega_f + b\omega \\ 0 \\ 0 \\ \frac{k_c}{T_{d0}} \\ 0 \end{bmatrix} \\ g(\delta, \omega, E_q, \omega_f) &= \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{k_c}{T_{d0}} \\ 0 \end{bmatrix} \end{aligned}$$

이다. 이때의 출력식은 다음과 같다.

$$\begin{aligned} y &= V_f + a(-b\omega_f + b\omega) \\ &= \frac{1}{x_{as}} \{x_s^2 E_q^2 + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d V_s E_q \cos \delta\}^{\frac{1}{2}} + a(-b\omega_f + b\omega) \quad (8) \\ &= h(\delta, \omega, E_q, \omega_f) \end{aligned}$$

입출력 궤환선형화를 적용하기 위해 출력식을 미분하면 식 (9)와 같이 표현된다.

$$\dot{y} = L_y h(\delta, \omega, E_q, \omega_f) + L_g h(\delta, \omega, E_q, \omega_f)u_f \quad (9)$$

여기서

$$\begin{aligned} L_y h &= \nabla h f = \frac{f_3}{x_{as} f_1^{1/2}} + f_4 \\ L_g h &= \nabla h g = \frac{f_2}{x_{as} f_1^{1/2}} \end{aligned}$$

이며 함수 f_1, f_2, f_3, f_4 는

$$\begin{aligned} f_1 &= x_s^2 E_q^2 + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d V_s E_q \cos \delta \\ f_2 &= x_s^2 E_q - \frac{1}{T_{d0}} k_c + x_s x_d V_s \cos \delta - \frac{1}{T_{d0}} k_c \\ f_3 &= -x_s^2 E_q^2 - \frac{1}{T_{d0}} + x_s^2 E_q \frac{x_d - x_d'}{x_{as}} V_s \omega \sin \delta \\ &\quad - x_s x_d V_s \cos \delta - \frac{1}{T_{d0}} E_q \\ &\quad + x_s x_d V_s \cos \delta - \frac{x_d - x_d'}{x_{as}} V_s \omega \sin \delta - x_s x_d V_s E_q \omega \sin \delta \\ f_4 &= ab \left\{ -\frac{D}{H} \omega + \frac{\omega_0}{H} \left(P_m - V_s \frac{E_q}{x_{as}} \sin \delta \right) + b\omega_f - b\omega \right\} \end{aligned}$$

으로 정리된다.

기준전압을 y_d , 오차 e 를 $e = y - y_d$ 라 정의하고,

$$\dot{e} + ke = 0, \quad (k > 0) \quad (10)$$

가 만족되는 궤환선형화 제어입력을 설계하면 다음과 같다[1].

$$u_f = \frac{1}{f_2} \{x_{as} f_1^{\frac{1}{2}} [-k(y - y_d) + \dot{y}_d - f_1] - f_3\} \quad (11)$$

3.2 내부동특성 안정도 해석

전체시스템의 차수는 4차인데 반해 제어입력과 출력사이의 관계가 1차 미분방정식으로 표현되므로, 이 시스템은 3차의 내부동특성을 갖는다. 궤환선형화를 사용한 제어기가 안정하기 위해서는 이 내부동특성이 안정해야 하는데 참고문헌 [7]에 의하면 $\alpha < 0$, $0^\circ < \delta < 90^\circ$ 의 범위 내에서 내부동특성은 국부적으로 안정하게 되고, $|\alpha|$ 가 증가함에 따라 내부동특성의 감쇄(Damping) 특성이 증가하게 된다. 즉 내부상태변수인 동기각의 진동문제를 $|\alpha|$ 를 증가시킴에 의해 해결할 수 있다.

4. 추정 알고리즘

4.1 일반적인 추정알고리즘

다음과 같은 비선형방정식을 고려한다.

$$\dot{z} = \Phi^T(z, u)\theta + \psi(z, u) \quad (12)$$

여기서 z 는 상태변수, Φ 는 Regressor 벡터, θ 는 미지의 파라미터 벡터이고 ψ 는 θ 와 관계없는 항을 나타낸다. 추정법칙을 얻기 위해 다음과 같은 추정방정식을 도입한다.

$$\hat{\dot{z}} = \Phi^T(z, u)\hat{\theta} + \psi(z, u) - \Omega \varepsilon \quad (13)$$

여기서 \hat{z} 는 상태변수 예측, $\hat{\theta}$ 는 파라미터 벡터의 예측을 각각 나타내며, Ω 는 Positive definite 행렬 P, Q 에 대해 $\Omega^T P + F\Omega = -Q$ 를 만족하는 안정한 행렬이다. 식 (12)와 (13)으로부터

$$\dot{\varepsilon} = \Phi^T(z, u)\hat{\theta} + \Omega \varepsilon \quad (14)$$

를 얻으며, 여기서 $\varepsilon = z - \hat{z}$, $\hat{\theta} = \theta - \hat{\theta}$ 이다. 오차방정식 (14)를 안정하게 하기 위해 다음과 같은 리아프노프 후보함수 (Lyapunov candidate function)를 고려한다.

$$V = \varepsilon^T P \varepsilon + \hat{\theta}^T \Gamma^{-1} \hat{\theta} \quad (15)$$

여기에서 Γ 는 임의의 Positive definite matrix이다.

이의 미분형은

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \varepsilon^T P \dot{\varepsilon} + \dot{\varepsilon}^T P \varepsilon + \hat{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} + \hat{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} \\ &= \varepsilon^T (\Omega^T P + F\Omega) \varepsilon + 2\hat{\theta}^T (\Gamma^{-1} \hat{\theta} + \Phi P \varepsilon) \end{aligned} \quad (16)$$

으로 계산되어진다. 위의 식 (16)로부터 $\Gamma^{-1} \hat{\theta} + \Phi P \varepsilon = 0$ 의 조건을 만족하도록 $\hat{\theta}$ 를 결정하면

$$\dot{V} = -\varepsilon^T Q \varepsilon \leq 0 \quad (17)$$

가 되어 오차 ε 가 0으로 수렴하게 됨을 알 수 있다. 따라서 다음과 같은 추정법칙을 얻는다.

$$\hat{\theta} = \Gamma \Phi P \epsilon \quad (= \hat{\theta}) \quad (18)$$

한편 추정된 파라미터 $\hat{\theta}$ 이 항상 주어진 집합내에 있도록 프로젝션 알고리즘(Projection algorithm)을 적용하여 추정법칙을 구성하면 다음과 같다.

$$\dot{\hat{\theta}} = Proj\{\Gamma \Phi P \epsilon\} \quad (= \dot{\hat{\theta}}) \quad (19)$$

여기서 프로젝션 오퍼레이터(Projection Operator) $Proj(\cdot)$ 는 참고문헌 [2]의 Appendix E에서 소개되어 있으며 이 경우 V 의 미분항은

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \epsilon^T P \epsilon + \epsilon^T P \epsilon - 2\hat{\theta}^T \Gamma^{-1} \hat{\theta} \\ &= \epsilon^T P \epsilon + \epsilon^T P \epsilon - 2\hat{\theta}^T \Gamma^{-1} Proj\{\Gamma \Phi P \epsilon\} \end{aligned} \quad (20)$$

이고 $-2\hat{\theta}^T \Gamma^{-1} Proj\{\Gamma \Phi P \epsilon\} \leq -2\hat{\theta}^T \Gamma^{-1} \Gamma \Phi P \epsilon$ ([2, Lemma E.1])의 부등식을 사용하여 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq (\epsilon^T \Omega^T + \hat{\theta}^T \Phi) P \epsilon + \epsilon^T P (\Phi^T \hat{\theta} + \Omega \epsilon) - 2\hat{\theta}^T \Phi P \epsilon \\ &= \epsilon^T (\Omega^T P + F \Omega) \epsilon \\ &= -\epsilon^T Q \epsilon \leq 0 \end{aligned} \quad (21)$$

으로 전개된다. 즉 프로젝션 알고리즘을 사용하여도 $\epsilon, \hat{\theta}$ 가 유계되어 있음을 확인할 수 있다.

4.2 전력계통모델에서의 추정알고리즘적용

위에서 제시된 추정알고리즘을 적용하기 위해서 상태방정식을 다음과 같이 미지파라미터에 대하여 선형인 형태로 재정리한다.

$$\dot{\omega} = \left(-\frac{D}{H} \omega + \frac{\omega_0}{H} P_m \right) + \left(-\frac{\omega_0 V_s E_q(t) \sin \delta(t)}{H} \right) \left(\frac{1}{x_{as}} \right) \quad (22)$$

$$\dot{E}_q = \left(\frac{1}{T_{d0}} K_c u_f + (x_d - x_d') I_q \omega - \frac{1}{T_{d0}} E_q \right) \left(\frac{x_{as}}{x_{as}'} \right) \quad (23)$$

여기서 $I_q(t) = \frac{V_s}{x_{as}} \sin \delta(t)$ 이며, 측정가능한 횡축전류이다. 사고가 발생함에 의해 변화되는 x_L 에 의해 영향을 받는 파라미터들은 x_s, x_{as}, x_{as}' 이고, 식 (22)와 (23)에서 $\frac{1}{x_{as}}, \frac{x_{as}}{x_{as}'}$ 를 각각 추정하여

x_s, x_{as}, x_{as}' 의 추정치인 $\hat{x}_s, \hat{x}_{as}, \hat{x}_{as}'$ 를 구할 수 있다.

앞절에서의 적용 알고리즘을 식 (22)와 (23)에 적용하면 아래와 같은 전력계통에서의 적용법칙을 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{x_{as}} \right) = Proj \left[\Gamma_1 \left\{ -\frac{\omega_0 V_s E_q(t) \sin \delta(t)}{H} \right\} P_1 (\omega - \hat{\omega}) \right] \quad (24)$$

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{x_{as}}{x_{as}'} \right) = Proj \left[\Gamma_2 \left\{ \frac{1}{T_{d0}} k_c u_f + (x_d - x_d') I_q \omega - \frac{1}{T_{d0}} E_q \right\} P_2 (E_q - \hat{E}_q) \right] \quad (25)$$

$$\begin{aligned} \frac{d\hat{\omega}}{dt} &= \left(-\frac{D}{H} \hat{\omega} + \frac{\omega_0}{H} P_m \right) \\ &+ \left\{ -\frac{\omega_0 V_s E_q(t) \sin \delta(t)}{H} \right\} \left(\frac{1}{\hat{x}_{as}} \right) - \Omega_1 (\omega - \hat{\omega}) \end{aligned} \quad (26)$$

$$\frac{d\hat{E}_q}{dt} = \left\{ \frac{1}{T_{d0}} k_c u_f + (x_d - x_d') I_q \omega - \frac{1}{T_{d0}} E_q \right\} \left(\frac{\hat{x}_{as}}{\hat{x}_{as}'} \right) - \Omega_2 (E_q - \hat{E}_q) \quad (27)$$

여기서 프로젝션 오퍼레이터는 추정치의 값이 0보다 크도록 하기 위해 사용되며 차후 소개될 비선형 적응제어의 안정성을 보장하기 위해 사용되고 있다. 또한 (\cdot) 는 변수 (\cdot) 의 추정치를 의미한다. 이상의 적용법칙으로 \hat{x}_s, \hat{x}_{as} 을 얻을 수 있고, 이를 이용하여 다음의 식으로 \hat{x}_s 를 계산할 수 있다.

$$\hat{x}_s = [x_T \ x_L] \begin{bmatrix} x_d + x_T & x_L \\ x_d' + x_T & x_L \end{bmatrix}^{-1} \begin{bmatrix} \hat{x}_{as} \\ \hat{x}_{as}' \end{bmatrix} \quad (28)$$

5 적용 비선형제어

본 절에서는 계환선형화제어기와 파라미터 추정기가 서로 결합되어서도 안정할 수 있도록 비선형 감쇄항(Nonlinear damping)을 도입하고자 하며 이를 위해 다음과 같이 가정한다.

가정 1 : 일반적인 동작점에서 $E_d > 0, 0^\circ < \delta < 90^\circ$ 이 성립한다.

이와 같은 가정하에 다음의 보조정리 1, 2를 얻는다.

보조정리 1 : 전력계통의 출력식을 미분한 식(9)의 $L_g h$ 와 4절에서의 추정알고리즘을 사용하여 얻은 파라미터값들을 사용한 $\widehat{L}_g h$ 는 다음과 같은 특성을 갖는다.

1. 부등식 $0 < \gamma_1 \leq |L_g h| \leq \gamma_2, \gamma_1 > 0, \gamma_2 > 0$ 이 성립하며 $L_g h$ 는 양수이다.
2. 부등식 $0 < \gamma_3 \leq |\widehat{L}_g h| \leq \gamma_4, \gamma_3 > 0, \gamma_4 > 0$ 이 성립하며 $\widehat{L}_g h$ 는 양수이다.

증명 : 생략

보조정리 2 : 식(9)의 $L_g h, L_f h$ 와 4절의 추정알고리즘에 의해 구한 파라미터를 사용한 $|L_f h \widehat{L}_g h - \widehat{L}_f h L_g h|$ 는 다음과 같이 유계되어 있다.

$|L_f h \widehat{L}_g h - \widehat{L}_f h L_g h| \leq k_1 |\Delta_1| + k_2(\zeta) + k_3(\zeta) |\Delta_2| + k_4(\zeta) + k_5(\zeta) |\Delta_3|$ 여기서

$$\Delta_1 = \left[\left| \frac{\widehat{x}_{as}}{x_{as}} \right| \right], \Delta_2 = \left[\left| \frac{\widehat{x}_s}{x_{as} x_{as}'} \right| \right], \Delta_3 = \left| \frac{\widehat{x}_s}{x_{as}'} \right| \text{를 의미한다.}$$

증명 : 생략

이상의 보조정리를 이용하여 다음과 같이 적용 비선형제어기를 구한다.

정리 1 : [가정 1], [보조정리 1], [보조정리 2]가 만족되고, 시스템의 내부동특성이 안정할 때, 추정알고리즘 (24), (25), (26), (27)을 이용한 적응제어법칙

$$u_f = \frac{1}{L_g h} [-k \zeta_1 - \widehat{L}_f h - k_1^2 \omega^2 \zeta_1 - k_2^2 \omega^2 \zeta_1 - k_3^2 \omega^2 \zeta_1 - k_4^2 \omega^2 \zeta_1 - k_5 E_q^2 \zeta_1 - k_6 E_q^2 \zeta_1] \quad (29)$$

는 출력방정식의 안정성을 보장한다.

증명 : 출력식 y 를 ζ_1 이라 정의하면, 내부동특성을 제외한 시스템은 다음과 같다.

$$\dot{\zeta}_1 = L_f h + L_g h u_f \quad (30)$$

비선형 감쇄를 사용한 제어기는 식 (29)에 제시되었으며, 이를 사용한 페루프 시스템은 식 (31)과 같다.

$$\dot{\zeta}_1 = L_f h + \frac{L_g h}{L_g h} [-k \zeta_1 - \widehat{L}_f h - k_1^2 \omega^2 \zeta_1 - k_2^2 \omega^2 \zeta_1 - k_3^2 \omega^2 \zeta_1 - k_4^2 \omega^2 \zeta_1 - k_5 E_q^2 \zeta_1 - k_6 E_q^2 \zeta_1] \quad (31)$$

여기서 계환선형화 제어기에 추가된 비선형 감쇄항은 페루프 시스템의 안정도를 보장하기 위해서 사용된다. 페루프 시스템인 식 (31)의 안정성 여부를 판별하기 위해 다음과 같은 유사리아프노프 함수(Lyapunov-like function)를 고려한다.

$$V = \frac{1}{2} \zeta_1^2 \quad (32)$$

이의 미분형은

$$\dot{V} = \zeta_1 \dot{\zeta}_1$$

$$= \frac{1}{L_{gh}} \{ -L_{gh} h k \zeta_1^2 + (L_{gh} \widehat{L_{gh}} - L_{gh} \widehat{L_{gh}}) \zeta_1 - L_{gh} k_1^2 \omega^2 \zeta_1^2 - L_{gh} k_2^2 \omega^2 \zeta_1^2 - L_{gh} k_3^2 \omega^2 \zeta_1^2 - L_{gh} k_4^2 \omega^2 \zeta_1^2 - k_5 E_q^2 \zeta_1^2 - k_6 E_q^2 \zeta_1^2 \} \quad (33)$$

이고 [보조정리 2]를 사용하여 정리하면

$$\begin{aligned} \dot{V} &\leq \frac{1}{L_{gh}} \{ -L_{gh} h k \zeta_1^2 + k_1 |\omega| |\Delta_1| + k_2 |\omega| + k_3 |\omega| |\Delta_2| \\ &\quad + k_4 |\omega| + k_5 |E_q| |\Delta_3| + k_6 |E_q| \\ &\quad - L_{gh} k_1^2 \omega^2 \zeta_1^2 - L_{gh} k_2^2 \omega^2 \zeta_1^2 - L_{gh} k_3^2 \omega^2 \zeta_1^2 \\ &\quad - L_{gh} k_4^2 \omega^2 \zeta_1^2 - L_{gh} k_5^2 E_q^2 \zeta_1^2 - L_{gh} k_6^2 E_q^2 \zeta_1^2 \} \\ &\leq -k \frac{L_{gh}}{L_{gh}} \zeta_1^2 + \frac{|\Delta_1|^2}{4L_{gh} \widehat{L_{gh}}} + \frac{1}{4L_{gh} \widehat{L_{gh}}} \\ &\quad + \frac{|\Delta_2|^2}{4L_{gh} \widehat{L_{gh}}} + \frac{1}{4L_{gh} \widehat{L_{gh}}} + \frac{|\Delta_3|^2}{4L_{gh} \widehat{L_{gh}}} + \frac{1}{4L_{gh} \widehat{L_{gh}}} \end{aligned} \quad (34)$$

[보조정리 1]으로부터 $\frac{L_{gh}}{L_{gh}} > 0$ 이므로 추정치오차인

$|\Delta_1|, |\Delta_2|, |\Delta_3|$ 가 유계되어 있는 추정알고리즘을 사용함으로써 결합된 시스템의 출력인 ζ_1 , 즉 y 가 유계됨을 알 수 있다. □

[정리 1]로부터 변환선형화제어와 추정알고리즘을 비선형 감쇄를 사용해 결합한 적응 비선형제어기가 안정함을 알 수 있다. 그러나 이러한 안정도 문제는 내부동특성의 안정도에 의존하게 되며 내부동특성의 안정도가 국부적으로만 보장되기 때문에, [정리 1]은 그 기본적인 한계를 갖는다.

6. 시뮬레이션

본 절에서는 5절의 적응 비선형제어기의 시뮬레이션 결과를 소개한다. 시뮬레이션에서는 시간 1s에서 $\lambda = 0.5$ 인 사고가 발생하였다고 가정한다. 제어기의 성능을 확인하기 위해 차단기 및 복원작용은 하지 않는다고 가정하였다. 시뮬레이션 1은 사고발생으로 인한 파라미터 변화를 알지 못하는 경우, 즉 적응제어를 사용하지 않는 비선형제어기를 사용한 결과를 나타내며 시뮬레이션 2는 적응 비선형제어를 사용한 결과이다. 그림 2에서 알 수 있듯이 적응제어를 사용하지 않는 경우에는 계통의 내부동특성이 안정한 범위를 넘어가게 되고, 따라서 동기각이 탈조하며 출력이 제어되지 않음을 보인다. 그러나 적응 비선형제어를 사용한 그림 3에서는 동기각과 단자전압의 제어가 잘 이루어지고 있음을 볼 수 있다.

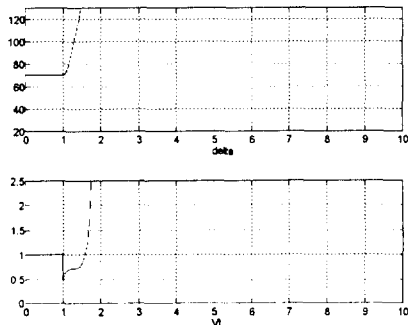


그림 2. 모의실험 1
Fig. 2. Simulation 1

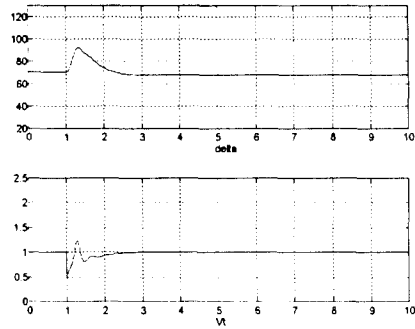


그림 3. 모의실험 2
Fig. 3. Simulation 2

7. 결론

본 논문에서는 파라미터 추정법칙을 사용한 적응 비선형제어기법을 제시하였다. 제시된 적응 비선형제어는 파라미터 추정값을 사용한 변환선형화 제어와 안정성을 증대시키기 위한 비선형 감쇄항으로 구성된다. 계통의 내부동특성이 안정한 경우, 전체 적응 비선형제어시스템이 안정함을 보였으며, 또한 시뮬레이션을 통해 제어기가 파라미터의 변화에 효과적으로 대처하여 단자전압을 일정한 값으로 유지함과 동시에 동기각을 안정화시킬 수 있음을 보였다.

참고문헌

- [1] A. Isidori, "Nonlinear Control System", New York: Springer Verlag, 1994
- [2] Miroslav Krstic, Ioannis Kanellakopoulos and Petar Kokotovic., "Nonlinear and adaptive control design", JOHN WILEY & SONS, INC. 1995
- [3] P. Kunder "Power System Stability and Control". McGraw-Hill, Inc. 1994
- [4] Y. Wang, D. J. Hill and R. H. Middleton "Transient Stability Enhancement and Voltage Regulation of Power Systems", *IEEE Transaction on Power Systems*, Vol. 8, pp. 620-627, 1993
- [5] Y. Wang, D. J. Hill, R. H. Middleton and L. Gao "Transient Stabilization of Power Systems with an Adaptive Control Law" *Automatica*, Vol. 30, No. 9, pp. 1409-1413, 1994
- [6] T. W. Yoon, D. K. Lee, "Adaptive feedback linearization for power system stabilization", ICARCV, Vol 3, pp. 2394-2398, 1996
- [7] 윤태웅, 이도관, "의사출력식을 사용한 전력계통의 비선형제어", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.907-910, 1997

본 연구는 기초전력공학공동연구소 연구 지원금에 의해 수행되었습니다.