

비선형 적응제어를 이용한 전력계통 안정화

Power system stabilization via adaptive feedback linearization

윤태웅^{*}, 이도관^{**}

^{*} 고려대학교 전기전자전파공학부 (Tel: 920-2188; E-mail: twy@cello.korea.ac.kr)

^{**} 고려대학교 전기전자전파공학부 (Tel: 923-2881; E-mail: kany@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 is combined with an identification algorithm which estimates the effect of a fault.

Keywords Power system, Stabilization, Adaptive control, Feedback linearization

1. 서론

사용된다.

전력계통은 번개나 폭우등의 여러 가지 요인으로 인해 변화하는 동특성을 갖는다. 전송선로의 리액턴스와 같은 파라메터가 사고 발생으로 인해 변하게 되는 것이 그 대표적 예일 것이다. 전력계통에 사고가 발생하였을 경우 이를 해석하는 고전적인 방법으로는 AVR과 PSS를 사용한 안정화 방법을 대표적으로 들 수 있을 것이다[1]. 그러나 이러한 방법은 동작점 부근에서 선형화하여 안정도를 해석하는 방식이므로 지락사고와 같은 대규모의 외란이 발생하였을 경우에는 문제가 생길 수 있을 것이다. 따라서 이러한 대규모의 외란에도 전력계통이 안정할 수 있는 제어 방식을 제시하고자 하는 것이 여기서의 목적이다.

본 논문에서는 전력계통의 동적 모델을 1기무한모선으로 가정하고, 3상 지락사고를 고려한다. 계통에 이러한 사고가 발생하면 사고발생 위치와 관련하여 전송선로의 리액턴스가 변하게 되고, 이 때 리액턴스의 변화는 계통의 상태방정식의 파라메터들을 변화시키는 요인이 된다. 따라서 사고발생으로 인해 변화하는 파라메터를 추정할 수 있는 적응제어 알고리즘이 유용한 방법으로 채택될 수 있을 것이다.

전력계통의 제어에 있어서 또다른 문제점은 계통이 비선형특성을 지니고 있다는 점이다. 따라서 비선형제어방법이 필요하게 되는데, 여기에서는 입출력궤환선형화를 사용한 제어방식을 채택하였다[2]. 입출력궤환선형화를 사용한 제어기는 전력계통의 비선형특성을 선형화하여 제어대상인 단자전압을 원하는 전압, 즉 사고발생전의 단자전압으로 유도해 줄 수 있는 제어입력을 구할 수 있게 된다. 이 과정에서 계통의 내부동특성을 개선하기 위하여 제어대상을 단자전압과 상태변수들로 이루어진 함수로 재구성할 수 있다.

이러한 궤환선형화는 계통에 불확실성이 없다는 가정하에 정확한 제어입력을 만들어 낼 수 있으나, 사고 발생으로 계통의 불확실성이 야기되면 그 성능은 제약될 수밖에 없다. 따라서 이러한 불확실성에 대처할 수 있는 적응제어 알고리즘이 필요하게 된다. 제시된 적응제어 알고리즘에서는, 먼저 전송선로의 리액턴스와 관련된 계통의 파라메터를 추정하는 모델을 구성하며, 여기에서 구해진 추정값은 궤환선형화 제어기에서 간접적응제어의 형태로

2. 전력계통 모델

본 논문에서 다음 그림과 같은 1기무한모선 전력계통 모델을 고려한다.

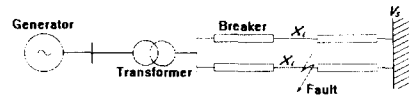


그림 1. 1기무한모선 모델.

Fig. 1. Single machine-infinite bus model.

위와 같은 1기무한모선은 비선형특성을 갖는 상태방정식으로 표현되며 전력계통에 사고가 발생할 경우 이것은 x_L 로 표현되는 전송선로 리액턴스에 영향을 주게 된다.

2.1 방정식들 (Equations)

발전기의 기계적, 전기적 특성은 다음과 같은 상태방정식들로 표현될 수 있다.[3],[4]

$$\dot{\delta} = \omega \quad (1)$$

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

$$\dot{E}_d(t) = \frac{1}{T_d} (k_c u_f(t) - E_d(t)) + \frac{x_d - x_d'}{x_{ds}} V_s \omega(t) \sin \delta(t) \quad (3)$$

- 여기서
- $\delta(t)$: 발전기의 동기각
 - $\omega(t)$: 발전기의 동기각속도
 - $E_d(t)$: 횡축의 기전력
 - D : 제동상수의 PU값
 - H : 관성상수의 PU값
 - P_m : 기계적 입력

- V_s : 무한모선전압
- ω_0 : 동기각속도
- k_c : 여자기의 이득
- $u_f(t)$: 발전기의 SCR증폭기의 제어입력
- x_d : 발전기 직축의 리액턴스
- x_d' : 발전기 직축의 과도리액턴스

이며 단자전압 V_t 는 다음과 같이 표현된다.

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

여기서 x_{ds} , x_{ds}' , T_{do}' , x_s 는 사고발생시 영향을 받게되는 파라미터들로서 이들에 관해서는 다음 절에서 다시 설명하기로 한다.

2.2 사고발생시 계통의 영향

그림 1과 같은 1기무한모선에서 전송선로상에 지락사고가 발생할 경우 선로의 리액턴스가 변화한다는 것은 이미 언급한 바 있다. 전체전송선로의 길이를 1로 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 선로의 리액턴스 x_L 은

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

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

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

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

여기서 T_{do} 와 x_T 는 각각 직축의 과도 단락회로 시정수와 변압기의 리액턴스를 의미한다. 모의실험상에서 사용되는 파라미터 값은 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}	0.4853

한편 이상과 같이 설정된 전력계통모델은 $\delta = 72^\circ$, $P_m = 0.9$, $V_t = 1.0$, $V_s = 0.4187$ 의 공칭동작점을 갖는다고 가정한다.

3. 궤환선형화

여기서는 2절에서 주어진 비선형 시스템을 위한 비선형 제어방식으로서 궤환선형화 기법을 고려한다. 선형모델을 이용한 제어방법이 시스템의 비선형성을 간과하는데 반하여 궤환선형화는 비선형궤환을 통해 시스템의 비선형성을 상쇄하는 제어방법이다.

3.1 제어대상이 V_t 인 입출력궤환선형화

입출력궤환선형화를 적용하기 위해 출력식을 미분하면

$$\dot{y} = \frac{1}{x_{ds} f_1^{1/2}} (f_2 u_f + f_3) \quad (6)$$

이고 여기서

$$f_1 = x_s^2 E_q^2 + V_s^2 x_d^2 + 2x_s x_d V_s E_q \cos \delta$$

$$f_2 = x_s^2 E_q \frac{1}{T_{do}} k_c + x_s x_d V_s \cos \delta \frac{1}{T_{do}} k_c$$

$$f_3 = -x_s^2 E_q \frac{1}{T_{do}} + x_s^2 E_q \frac{x_d - x_d'}{x_{ds}'} V_s \omega \sin \delta$$

$$-x_s x_d V_s \cos \delta \frac{1}{T_{do}} E_q$$

$$+ x_s x_d V_s \cos \delta \frac{x_d - x_d'}{x_{ds}'} V_s \omega \sin \delta - x_s x_d V_s E_q \omega \sin \delta$$

으로 정리된다. 이 수식에서 보는 바와 같이 제어입력 u_f 와 제어대상인 y 의 관계가 1차미분항에서 나타나므로 이 시스템은 상대차수가 1이 된다. 상대차수가 1이고 전체 시스템의 차수는 3차이므로 이 시스템은 내부동특성(internal dynamics)이 2차가 된다. 시스템의 안정도를 고려하기 위해서는 이 내부동특성이 안정한가에 대해 알아볼 필요가 있고, 모의실험 및 Phase plane해석을 통해서 내부동특성이 공칭동작점 부근에서 안정함을 확인할 수 있었다. 기준전압을 y_d , 오차 e 를 $e = y - y_d$ 라 하고

$$\dot{e} + ke = 0 \quad (k > 0) \quad (7)$$

가 되도록 궤환선형화 제어입력을 설계하면 다음과 같다.

$$u_f = \frac{1}{f_2} (x_{ds} f_1^{1/2} [-k(y - y_d) + \dot{y}_d] - f_3) \quad (8)$$

이러한 제어입력을 가진 시스템에 대해 모의실험한 결과는 그림 2와 같다. 모의실험에서 식(7)의 k 는 10으로 설정하였다.

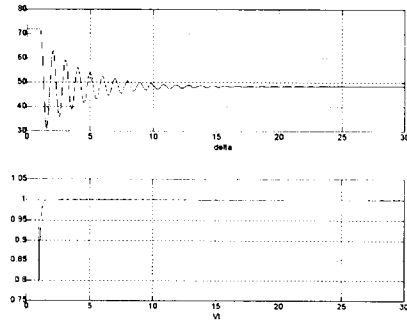


그림 2. $y = V_t$ 를 사용한 모의실험

Fig. 2. Simulation for $y = V_t$

모의실험에서 사용된 환경은 시스템의 응답을 확인하기 위해서 1초인 순간부터 $\lambda = 0.5$ 인 사고가 계속 발생한 것으로 가정하였다. 여기서는 사고발생 후의 모든 파라미터를 정확히 알고 있다고 가정하였다. 모의실험결과 제어대상을 V_t 만을 사용한 제어에서는 동기각 δ 가 진동(oscillation)하는 문제를 볼 수 있었고 내부동특성이 안정할 수 있는 δ 의 범위도 매우 제한되어있음을 알 수 있었다.

3.2 의사출력식을 사용한 궤환선형화

앞절에서 제기되었던 δ 의 진동문제에 대처하고 내부동특성의 안정도를 개선하기 위해서 다음과 같은 새로운 출력방정식을 고려한다.

$$y = V_t + g(\delta, \omega, \dot{\omega}) \quad (9)$$

여기에서 $g(\delta, \omega, \dot{\omega})$ 는 내부동특성을 개선하기 위해 도입되는 비선형함수이고, 이러한 비선형함수인 $g(\delta, \omega, \dot{\omega})$ 를 출력식에 첨가하는 것은 출력식을 재조정함으로써 시스템의 내부동특성이 수정될 수 있기 때문이다. 여기서는 제어대상을 $y = V_t + \alpha \dot{\omega}_F$ 로

설정한 경우에 대해 알아보겠다. 출력방정식은

$$y = V_i + \alpha \dot{\omega}_F \quad (10)$$

이고 위에서 사용된 ω_F 는 그림 3과 같이 얻어진다.

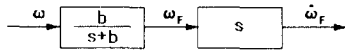


그림 3. ω_F 의 블럭다이아그램
Fig. 3. A block diagram of ω_F

그림 3에 나타난 바와 같이 ω_F 는

$$\dot{\omega}_F = -b\omega_F + b\omega \quad (11)$$

의 방정식을 만족하며 따라서

$$y = V_i + \alpha \dot{\omega}_F = V_i + \alpha(-b\omega_F + b\omega) \quad (12)$$

가 된다. 즉 정상상태에서 $y = V_i$ 가 되도록 ω 대신 $\dot{\omega}_F$ 가 사용된 것이다. 마찬가지로 입출력궤환선형화를 적용하기 위해 출력식을 미분하면

$$\dot{y} = \frac{1}{x_{ds} f_1^{1/2}} (f_2 u_f + f_3) + f_4 = v \quad (13)$$

로 정리되고 여기서 f_1, f_2 와 f_3 는 위에서와 같은 함수이며 f_4 는

$$f_4 = ab \left(-\frac{D}{H} \omega + \frac{\omega_0}{H} \left(P_m - V_s \frac{E_q}{x_{ds}} \sin \delta \right) + b\omega_F - b\omega \right)$$

을 만족한다. 입출력관계식 (13)으로부터 제어입력은 u_f 는

$$u_f = \frac{1}{f_2} \{ x_{ds} f_1^{1/2} [-k(y - y_d) + \dot{y}_d - f_4] - f_3 \} \quad (14)$$

으로 결정되어진다.

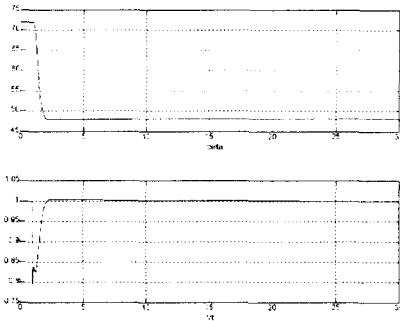


그림 4. $y = V_i + \alpha \dot{\omega}_F$ 를 사용한 모의실험
Fig. 4. Simulation for $y = V_i + \alpha \dot{\omega}_F$

3.1절에서와 동일한 환경에서 수행한 결과를 그림 4에 제시하였으며 사용된 설계상수는 $\alpha = -5, b = 0.04$ 로 선정하였다. 실험결과에서 알 수 있듯이 진동(oscillation)문제는 현저히 해결되었고, 또한 내부동특성의 안정도 범위도 증대되었음을 확인할 수 있었다.

4. 적응제어 알고리즘

지금까지 비선형성을 갖는 전력계통을 입출력궤환선형화를 이용하여 제어하는 방법에 대해 설명하였다. 그러나 사고발생으로 인해 계통의 파라미터가 변하게 되었을 경우, 3절에서처럼 변화

된 파라미터의 값을 알고 있다고 가정하는 것은 사실상 비현실적이다. 따라서 변화한 파라미터를 추정하는 알고리즘이 필요하게 되고 여기에서는 적응알고리즘을 통하여 사고발생시에 변화된 파라미터를 추정한다.

4.1 적응 알고리즘 (General case)

다음과 같은 형태의 상태방정식을 고려한다.

$$\dot{x} = \Phi^T(x, u)\theta + \psi(x, u) \quad (15)$$

여기서 x 는 상태변수, u 는 입력, Φ 는 Regressor 벡터, θ 는 미지의 파라미터 벡터, ψ 는 미지파라미터와 무관한 항을 각각 나타내고 있다. θ 의 추정을 위해 추정방정식

$$\dot{\hat{x}} = \Phi^T(x, u)\hat{\theta} + \psi(x, u) - \Omega \varepsilon \quad (16)$$

을 도입한다. 여기서 ε 과 Ω 는

$$\varepsilon = x - \hat{x} \quad (17)$$

$$\Omega^T P + P \Omega = -Q \quad (18)$$

를 만족하며 P, Q 는 임의의 Positive definite matrix들이다. 식 (16),(17),(18)로부터 다음의 오차방정식

$$\dot{\varepsilon} = \Phi^T(x, u)\vartheta + \Omega \varepsilon \quad (19)$$

을 얻으며, 여기서 ϑ 는

$$\vartheta = \theta - \hat{\theta} \quad (20)$$

이다. 오차방정식 (19)를 안정하게 하기 위해 다음과 같은 Lyapunov candidate를 고려한다.

$$V = \varepsilon^T P \varepsilon + \hat{\theta}^T \Gamma^{-1} \hat{\theta} \quad (21)$$

여기에서 Γ 는 임의의 Positive definite matrix이다. 이의 미분형은

$$\begin{aligned} \dot{V} &= \varepsilon^T P \dot{\varepsilon} + \varepsilon^T P \varepsilon + \hat{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} + \hat{\theta}^T \Gamma^{-1} \hat{\theta} \\ &= (\varepsilon^T \Omega^T + \hat{\theta}^T \Phi) P \varepsilon + \varepsilon^T P (\Phi^T \vartheta + \Omega \varepsilon) + 2 \hat{\theta}^T \Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} \\ &= \varepsilon^T (\Omega^T P + P \Omega) \varepsilon + 2 \hat{\theta}^T (\Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} + \Phi P \varepsilon) \end{aligned} \quad (22)$$

으로 계산되어진다. 위의 식 (22)로부터 $\Gamma^{-1} \dot{\hat{\theta}} + \Phi P \varepsilon = 0$ 의 조건을 만족하도록 $\dot{\hat{\theta}}$ 을 결정하면

$$\dot{V} = -\varepsilon^T Q \varepsilon \leq 0 \quad (23)$$

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

$$\dot{\hat{\theta}} = \Gamma \Phi P \varepsilon \quad (= \dot{\vartheta}) \quad (24)$$

4.2 전력계통모델에서의 적응알고리즘적용

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

$$\dot{\omega} = \omega \quad (25)$$

$$\dot{\omega} = -\frac{D}{H} \omega + \frac{\omega_0}{H} (P_m - P_e) \quad (25)$$

$$E_q = \bar{x}_d \left[\frac{1}{T_{d0}} K_c u_f + (x_d - x_d') I_q \omega - \frac{1}{T_{d0}} E_q \right] \quad (26)$$

여기서

$$\bar{x}_d = \frac{x_{ds}}{x_{ds}} \quad (27)$$

$$P_e(t) = \frac{V_s E_q(t)}{x_{ds}} \sin \delta(t) \quad (28)$$

$$I_q(t) = \frac{V_s}{x_{ds}} \sin \delta(t) \quad (29)$$

이며 P_e 와 I_q 는 전기적출력과 횡축전류를 의미한다. 그리고 사고가 발생함에 의해 변화되는 x_L 에 영향을 받는 파라미터는 \bar{x}_d 이

다. 식 (1)과 (25)에서는 추정하려는 파라메터가 포함되어 있지 않으므로 식 (26)만을 사용하여 적응제어알고리즘을 구현한다.

$$\hat{E}_q = \hat{x}_d \left[\frac{1}{T_{d0}} K_c u_f + (x_d - x_d') I_q \omega - \frac{1}{T_{d0}} E_q \right] \quad (30)$$

4.1절에서 유도된 일반적인 적응알고리즘을 상태방정식 (30)에 적용하면 다음의 적응법칙이 얻어진다.

$$d\hat{E}_q/dt = \hat{x}_d \left[\frac{1}{T_{d0}} k_c u_f + (x_d - x_d') I_q \omega - \frac{1}{T_{d0}} E_q \right] - \Omega (E_q - \hat{E}_q) \quad (31)$$

$$d\hat{x}_d/dt = \Gamma \left[\frac{1}{T_{d0}} k_c u_f + (x_d - x_d') I_q \omega - \frac{1}{T_{d0}} E_q \right] P (E_q - \hat{E}_q) \quad (32)$$

5. 비선형 적응제어

지금까지 불확실성을 갖는 전력계통의 제어를 위해 입출력제한 선형화와 적응알고리즘을 설명하였다. 여기서는 입출력제한 선형화와 적응알고리즘을 결합한 간접적응제어에 대해 논한다. 적응알고리즘을 사용하여 \hat{x}_d 를 추정하는 것이 가능하고 이 추정된 \hat{x}_d 를 사용하여 λ 나 \hat{x}_L 를 대수적으로 구해내는 것이 가능하다. 이 추정된 파라메터를 3.2절에서 제시된 $y = V_i + \alpha \omega_F$ 를 출력식으로 사용하여 입출력제한 선형화하면 제어입력은

$$u_f = \frac{1}{\hat{f}_2} \{ \hat{x}_{ds} \hat{f}_1^{\frac{1}{2}} [-k(y - y_d) + y_d' - \hat{f}_4] - \hat{f}_3 \} \quad (33)$$

으로 구해질 수 있으며, 여기서 $\hat{f}_1, \hat{f}_2, \hat{f}_3$ 과 \hat{f}_4 는 각각 f_1, f_2, f_3 과 f_4 를 λ 를 사용하여 예측한 값들이다. 여기서도 3절에서와 마찬가지로 $\lambda = 0.5$ 인 사고가 발생한 것으로 가정하였으나 사고발생으로 인한 파라메터의 변화를 제어기에서는 알 수 없는 실제적인 경우로 가정하였다. 적응제어알고리즘의 성능을 확인하기 위하여 적응제어알고리즘을 사용하지 않은 경우를 그림 5에 제시하였고, 적응제어알고리즘을 사용한 경우(식 (33) 참조)를 그림 6에 제시하였다.

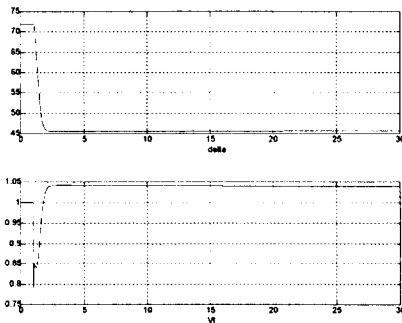


그림 5. 적응알고리즘이 사용되지 않은 경우
Fig. 5. Nonadaptive case

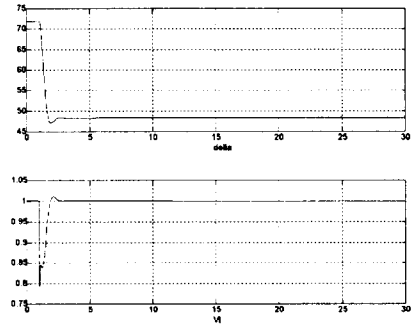


그림 6. 적응알고리즘이 사용된 경우
Fig. 6. Adaptive case

표 2는 $y = V_i + \alpha \omega_F$ 를 사용한 모의실험에서 사용된 설계상수를 나타낸다.

표 2. 모의실험에서 사용된 설계상수
Table 2. Design constants

제한선형화에서 사용된 설계상수	$k = 10$	$\alpha = -5$	$b = 0.04$
적응알고리즘에서 사용된 설계상수	$P = 10$	$Q = 2$	$\Gamma = 4.5$

적응제어알고리즘을 사용하지 않은 그림 5에서는 정상상태에서 오차를 가지고 있음을 확인할 수 있었으나 적응알고리즘이 사용된 그림 6에서는 λ 값의 적절한 추정을 통해 이러한 문제가 해소되었음을 알 수 있었다.

6. 결론

본 논문에서는 전력계통안정과 자동전압조정을 위한 비선형 적응제어방식을 제안하였다. 제시된 제어시스템은 내부동특성의 개선을 위해 도입된 의사출력(pseudo-output)의 선형화 제어기와 사고발생으로 인해 변화하는 파라메터의 추정을 위한 적응알고리즘으로 구성된다. 모의실험을 통해 의사출력의 사용이 내부동특성을 현저히 개선하였음과 적응알고리즘이 변화하는 파라메터를 효과적으로 추정할 수 있음을 알 수 있었다. 그러나 제안된 적응제어 알고리즘의 성능은 예컨대 Γ 와 같은 여러 설계상수에 따라 달라지게 되며, 따라서 이러한 설계상수의 효과적 설정방법의 제시가 향후 필요할 것이다

참고문헌

- [1] P. Kundur "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc. (1994)
- [2] J. E. Slotine and W. Li "Applied Nonlinear Control" PRENTICE HALL (1992)
- [3] 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)
- [4] 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)