

비선형 상호작용을 갖는 전력계통의 비선형 분산 전압제어

Decentralized Nonlinear Voltage Control of Multimachine Power Systems with Nonlinear Interconnections

이재원*, 윤태웅**, 김광연***

(Jae Won Lee, Tae Woong Yoon and Kwang Youn Kim)

* 고려대학교 전기공학과 (전화:(02)3290-3695, 팩스:(02)928-8909, E-mail : jwlee@cello.korea.ac.kr)

** 고려대학교 전기공학과 (전화:(033)3290-3240, 팩스:(02)928-8909, E-mail : twy@cello.korea.ac.kr)

*** 고려대학교 전기공학과 (전화:(033)3290-3695, 팩스:(02)928-8909, E-mail : chaos@cello.korea.ac.kr)

Abstract : For large-scale systems which are composed of interconnections of many lower-dimensional subsystems, decentralized control is preferable since it can alleviate the computational burden, avoid communication between different subsystems, and make the control more feasible and simpler. A power system is such a large-scale system where generators are interconnected through transmission lines. Decentralized control is therefore considered for power systems.

In this paper, a robust decentralized excitation control scheme for interactions is proposed to enhance the transient stability of multimachine power systems. First we employ a DFL(Direct Feedback Linearization) compensator to cancel most of the nonlinearities; however, the resulting model still contains nonlinear interconnections. Therefore, we design a robust controller in order to deal with interconnection terms. In this procedure, an upper bound of interconnection terms is estimated by an estimator. The resulting adaptive scheme guarantees the uniform ultimate boundedness of the closed-loop dynamic systems in the presence of the uncertainties.

Keywords : Decentralize, power systems, nonlinear, voltage control, adaptive robust control

I. 서 론

최근 전력계통 안정화를 위한 제어방식으로 많은 비선형 제어 기법들이 제안되고 있다. 그 중, 궤환 선형화를 통해 시스템을 선형화 한 뒤, 선형 제어 기법을 적용하는 논문들이 있는데 [2][3], [2]는 직접 캐한 선형화(DFL: Direct feedback linearization)기법을 이용하여 전력 시스템의 비선형성을 제거한 뒤, 시스템 파라미터의 불확실성을 고려한 강인 제어기를 제안하였다. 하지만 위의 연구는 발전기 단자전압을 상태로 사용하지 않고 간접적인 방법을 통해 동작점으로 수렴시킨다. 이러한 문제를 해결하기 위해 전압을 포함한 새로운 상태방정식을 사용하여 전압을 추적하는 기법들도 제안되었다 [1][5]. [1]에서는 [5]에서 제안한 1기 무한모선 모델에서 DFL기법을 이용한 후 전압을 포함하는 새로운 상태 방정식을 다기 모델로 확장시킨 비선형 분산 전압 제어기를 제안하였다. 하지만 이 과정에서 상호작용을 몇 가지 가정을 통해 무시했다는 단점이 있다.

본 논문에서는 [1]논문의 상호작용에 대한 가정을 사용하지 않고 각 부 시스템의 정보만을 사용하며 부시스템간 상호작용의 상한을 추정하여 이 영향을 제어기에 포함시킨 비선형 분산 전압 제어기를 제안한다. 제안된 제어기는 정치 시스템(nominal system)에 대해

점근적 안정도를 보이며 상호작용에 대하여 궁극적으로 균일하게 유계(uniformly ultimately bound)됨을 보인다.

II. 전력계통 모델

1. 계통 상태 방정식

1.1 기계적 방정식(mechanical equations)

발전기의 기계적 방정식은 다음의 스윙 방정식(swing equation)으로 표현된다.

$$\dot{\delta}_i = \omega_i$$

$$\ddot{\omega}_i = -\frac{D_i}{2H_i} \omega_i + \frac{\omega_0}{2H_i} (P_{m,i} - P_e)$$

여기서, i 는 발전기 번호를 뜻한다.

1.2 전기적 방정식(generator electrical equations)

i 번째 발전기의 전기적 동특성인 횡축의 과도 기전력(transient EMF in the quadrature axis of the generator) E_q 는 다음과 같이 표현된다.

$$\dot{E}_q = \frac{1}{T_{d0i}} [E_{f_i} - E_q] \quad (1)$$

여기서, E_{f_i} 는 횡축의 기전력, T_{d0i} 는 직축의 과도 단락회로 시정수를 나타낸다. 그리고 대수방정식으로 표현되는 발전기의 전기적 방정식은 아래와 같다.

$$\begin{aligned} E_{qi} &= \dot{E}_{qi} + (x_{di} - x_{qj}) I_{di} \\ E_{fi} &= k_{di} u_{fi} \\ P_{ei} &= \sum_{j=1}^n E_{qi} E_{qj} B_y \sin(\delta_i - \delta_j) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} Q_{ei} &= -\sum_{j=1}^n E_{qi} E_{qj} B_y \cos(\delta_i - \delta_j) \\ I_{di} &= -\sum_{j=1}^n E_{qj} B_y \cos(\delta_i - \delta_j) \\ I_{qj} &= \sum_{i=1}^n E_{qi} B_y \sin(\delta_i - \delta_j) \\ E_{qi} &= x_{adi} I_{di} \\ V_n &= \sqrt{(E_{qi} - x_{di} I_{di})^2 + (x_{di} I_{qi})^2} \end{aligned} \quad (3)$$

2. 케환 선형화

발전기의 기계적, 전기적 방정식을 고려한 전력계통의 상태방정식을 정리하면 다음과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i \\ \dot{\omega}_i &= -\frac{D_i}{2H_i} \omega_i + \frac{\omega_0}{2H_i} (P_{m0} - P_{ei}) \\ \dot{E}_{qi} &= \frac{1}{T_{d0i}} [E_{fi} - E_{qi}] \end{aligned}$$

식(2)와 위 상태방정식을 정리해보면 $\dot{\omega}_i$ 와 \dot{E}_{qi} 의 관계가 비선형임을 볼 수 있다. 이러한 비선형성을 제거하기 위하여 [2]와 같이 DFL을 적용하여 다음과 같은 상태방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned} \dot{\delta}_i &= \omega_i \\ \dot{\omega}_i &= -\frac{D_i}{2H_i} \omega_i - \frac{\omega_0}{2H_i} \Delta P_{ei} \\ \dot{\Delta P}_{ei} &= -\frac{1}{T_{d0i}} \Delta P_{ei} + \frac{1}{T_{d0i}} u_{fi} + \gamma_{i1} \end{aligned}$$

여기서,

$$\begin{aligned} u_{fi} &= I_{qj} k_{qj} u_{qj} - (x_{di} - x_{qj}) I_{qj} I_{fi} - P_{m0} - T_{d0i} Q_{di} \omega_i \\ \gamma_{i1} &= \sum_{j=1}^n E_{qi} \dot{E}_{qj} B_y \sin(\delta_i - \delta_j) \\ &\quad - E_{qi} \sum_{j=1}^n E_{qj} B_y \cos(\delta_i - \delta_j) \omega_j \\ \Delta P_{ei} &= P_{ei} - P_{m0} \end{aligned} \quad (4)$$

이며, γ_{i1} 는 상호작용 항이다. 그리고 u_{fi} 는 새로운 입력이다. $I_{qj}=0$ (발전기의 정상동작영역에 속하지 않는 다.)인 경우를 제외하면 u_{fi} 에서 u_{qj} 로의 사상이 가역하다. 식(4)로부터 다음의 보상 규칙을 얻을 수 있다.

$$u_{fi} = \frac{1}{k_{qj} I_{qj}} \{u_{qj} + P_{m0} + (x_{di} - x_{qj}) I_{qj} I_{fi} + T_{d0i} Q_{di} \omega_j\} \quad (5)$$

그리고 I_{di} , I_{qj} , ω_i , δ_i 모두 측정이나 계산을 통해 알 수 있다. 따라서 식(5)의 보상규칙은 i 번째 시스템의 정보만을 이용하여 실제로 실현 가능하다.

III. 비선형분산전압제어기의 설계

1. 전압 상태 방정식의 도입

발전기 단자전압은 측정하기 쉬우며 3차 동기 발전기의 ω_i , P_{ei} , V_n 는 하나의 동작점을 갖는다. 게다가 V_n 의 궤환을 통해 전압조정이 용이하며 ω_i , P_{ei} 의 궤환을 통해 안정성을 보장할 수 있다. 그러므로 DFL 보상기 모델을 ω_i , ΔP_{ei} , ΔV_n 모델로 다시 표현한다. 그러면 제어법칙을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$v_n = [k_{i1} \ k_{i2} \ k_{i3}] [\omega_i \ \Delta P_{ei} \ \Delta V_n]^T$$

여기서 k_{i1} , k_{i2} , k_{i3} 는 상수이고 $\Delta V_n = V_n - V_{n0}$ 이다. 보상기 모델을 다시 표현하기 위해 식(3)을 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} V_n &= \left[\left\{ E_{qi} + x_{di} \sum_{j=1}^n E_{qj} B_y \cos(\delta_i - \delta_j) \right\}^2 + \left\{ x_{di} \sum_{j=1}^n E_{qj} B_y \sin(\delta_i - \delta_j) \right\}^2 \right]^{\frac{1}{2}} \\ &= f(\delta_i, E_{qi}, \delta_j, E_{qj}) \end{aligned}$$

그리고 윗식을 다음과 같이 미분한다.

$$\dot{V}_n = \frac{\partial V_n}{\partial \delta_i} \dot{\delta}_i + \frac{\partial V_n}{\partial E_{qi}} \dot{E}_{qi} + \frac{\partial V_n}{\partial \delta_j} \dot{\delta}_j + \frac{\partial V_n}{\partial E_{qj}} \dot{E}_{qj}$$

윗식에서 다음의 식을 얻는다.

$$\dot{V}_n = f_{i1} \omega_i - \frac{f_{i2}}{T_{d0i}} \Delta P_{ei} + \frac{f_{i2}}{T_{d0i}} u_{fi} + \gamma_{i2} \quad (6)$$

여기서

$$f_{i1} = \frac{(1 + x_{di} B_y)(E_{qi}^2 B_y + Q_{ei}) V_{n0}}{V_n I_{qi}} - \frac{x_{di}(1 + x_{di} B_y)V_{n0}}{V_n I_{qi}} \quad (7)$$

$$f_{i2} = \frac{(1 + x_{di} B_y)V_{n0}}{V_n I_{qi}} \quad (8)$$

$$\gamma_{i1} = \sum_{j=1}^n E_{qi} \dot{E}_{qj} B_y \sin(\delta_i - \delta_j) - E_{qi} \sum_{j=1}^n E_{qj} B_y \cos(\delta_i - \delta_j) \omega_j \quad (9)$$

여기, 식(6)을 사용하여 $X_i = [\omega_i \ \Delta P_{ei} \ \Delta V_n]^T$ 를 도입하면 DFL 보상기 모델은 다음과 같이 새로운 상태방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i u_i + \gamma_i \quad (10)$$

여기서 $u_i = v_i \odot$ 이며

$$X_i = \begin{bmatrix} \omega_i \\ \Delta P_{ei} \\ \Delta V_n \end{bmatrix}, A_i = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{\omega_0}{2H_i} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{d0i}} & 0 \\ f_{i1} & -\frac{f_{i2}}{T_{d0i}} & 0 \end{bmatrix}, B_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_{d0i}} \\ \frac{f_{i2}}{T_{d0i}} \end{bmatrix}, \gamma_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \gamma_{i1} \\ \gamma_{i2} \end{bmatrix} \quad (11)$$

위 상태방정식의 제어입력을 두 단계를 통해서 구해낸다. 첫째, 아래의 공청시스템을 안정하게 하기 위한 제어기 u_{i1} 을 설계한다.

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i u_{i1} \quad (12)$$

둘째, γ_i 를 다루기 위한 적용강인제어기 u_{i2} 를 설계하

여 제어 입력 u_i 를 다음과 같이 결정한다.

$$u_i = u_{i1} + u_{i2} \quad (13)$$

2. 공정 시스템(nominal system)의 안정도

식(7)-(8)에 의하여 f_{i1} , f_{i2} 가 동작 상태에 따른 영향을 받지만 정상 동작영역에서는 다음과 같이 쓸 수 있다[5].

$$f_{i1\min} \leq f_{i1} \leq f_{i1\max}, \quad f_{i2\min} \leq f_{i2} \leq f_{i2\max}$$

그리면 식(10)은 다음과 같이 표현 될 수 있다.

$$\dot{X}_i = (\bar{A}_i + \Delta A_i) X_i + (\bar{B}_i + \Delta B_i) u_i \\ = (\bar{A}_i + r_{i1}(t) D_i E_{i1}^T + r_{i2}(t) D_i E_{i2}^T) X_i + (\bar{B}_i + r_2(t) D_i F_i^T) u_i$$

여기서

$$\bar{A}_i = \begin{bmatrix} -\frac{D_i}{2H_i} & -\frac{\omega_i}{2H_i} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{T_{d0i}} & 0 \\ \bar{J}_i & -\frac{\bar{J}_{i2}}{T_{d0i}} & 0 \end{bmatrix}, \quad \bar{B}_i = \begin{bmatrix} 0 \\ \frac{1}{T_{d0i}} \\ \frac{\bar{J}_i}{T_{d0i}} \end{bmatrix}, \quad r_{i1}(t) = \frac{f_{i1} - \bar{f}_{i1}}{f_{i1\max} - \bar{f}_{i1}}, \\ r_{i2}(t) = \frac{f_{i2} - \bar{f}_{i2}}{f_{i2\max} - \bar{f}_{i2}}, \quad E_{i1} = \begin{bmatrix} f_{i1\max} - \bar{f}_{i1} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}, \quad E_{i2} = \begin{bmatrix} 0 \\ -\frac{f_{i2\max} - \bar{f}_{i2}}{T_{d0i}} \\ 0 \end{bmatrix}, \quad D = \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ 1 \end{bmatrix}, \quad r_2(t) = \frac{f_{i2} - \bar{f}_{i2}}{f_{i2\max} - \bar{f}_{i2}}$$

이여 X_i 와 u_i 는 식(10)과 같다. 그리고 \bar{f}_{i1} , \bar{f}_{i2} 는 f_{i1} , f_{i2} 각각의 평균값이다. 위의 제어문제를 풀기 위해 다음의 제어기를 선택한다.

$$u_{i1} = -R^{-1}B_i^TP_iX_i \quad (14)$$

여기서 R 과 P 는 대칭 양정치 행렬이다. 그리고 리아프노브 후보 함수를 다음과 같이 선택한다.

$$V_{i1}(X_i) = X_i^TP_iX_i$$

위의 식을 미분하면 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{V}_{i1}(X_i) = X_i^TP_iX_i \quad (15)$$

여기서 W_i 는 다음과 같다.

$$W_i \leq P_i(\bar{A}_i - \bar{B}_i R_i^{-1} F_i E_{i2}^T) + (\bar{A}_i - \bar{B}_i R_i^{-1} F_i E_{i2}^T)^T P_i \\ + P_i(2D_i D_i^T + \bar{B} R_i^{-1} F F_i^T R_i^{-1} \bar{B}^T - 2\bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T)P_i + E_{i1} E_{i1}^T + E_{i2} E_{i2}^T + Q_i = 0$$

다음을 만족하는 양정치 행렬 Q_i 를 선택한다.

$$P_i(\bar{A}_i - \bar{B}_i R_i^{-1} F_i E_{i2}^T) + (\bar{A}_i - \bar{B}_i R_i^{-1} F_i E_{i2}^T)^T P_i \\ + P_i(2D_i D_i^T + \bar{B} R_i^{-1} F F_i^T R_i^{-1} \bar{B}^T - 2\bar{B}_i R_i^{-1} \bar{B}_i^T)P_i + E_{i1} E_{i1}^T + E_{i2} E_{i2}^T + Q_i = 0$$

위의 리카티 방정식을 만족하는 양정치 행렬 P_i 가 존재하며, 식(14)의 제어 법칙이 얻어진다. 그리고 식(15)는 다음을 만족하게 된다.

$$\dot{V}_{i1}(X_i) = X_i^T W_i X_i = -X_i^T Q_i X_i \quad (16)$$

따라서 식(10)의 공정시스템 식(12)는 식(14)의 제어기 u_i 에 의해 원점이 점근적 안정도를 갖는다.

3. 적용 강인 제어기 설계

식(10)을 고려하면 상호작용 항인 γ_i 는 식(9)와 식(11)에 의하여 다음과 같은 관계를 얻는다.

$$\gamma_i = B_i T_{d0i}^T Y_{i1}$$

따라서 식(10)은 다음과 같이 표현 가능하다.

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i(u_i + T_{d0i} \gamma_{i1}) = A_i X_i + B_i(u_i + \gamma_{i1}) \quad (17)$$

여기서,

$$Y_{i1} \square T_{d0i}^T Y_{i1}$$

이며, 식(17)에 식(13)을 적용하여 다음을 정의한다.

$$\dot{X}_i = (A_i X_i + B_i u_i) + B_i(u_{i2} + \gamma_{i1})$$

$$\square F(X_i) + B_i(u_{i2} + \gamma_{i1})$$

여기서, $F(X_i)$ 는 u_{i1} 가 포함된 안정한 시스템이다. 그리고 상호작용 항의 상한의 구조가 다음과 같다[2].

$$|\gamma_{i1}| \leq \theta_{i1}^* + \theta_{i2}^* \|X_i\| = \rho_i^* \theta_i^*$$

여기서, θ_i^* 는 미지의 파라미터 벡터이다.

$$\rho_i^* = [1 \|X_i\|], \quad \theta_i^* = [\theta_{i1}^* \theta_{i2}^*]^T$$

식을 간단히 하기 위하여 다음을 정의한다.

$$\mu_i \square 2B_i^T P_i X_i$$

식(17)에서 시스템 안정도에 대한 γ_{i1} 의 영향을 줄이기 위하여 다음과 같은 제어기를 제안한다[4].

$$u_{i2} = -\frac{\mu_i \rho_i^* \hat{\theta}_i}{\|\mu_i\| \rho_i^* \hat{\theta}_i + \varepsilon_i} \rho_i^* \hat{\theta}_i \quad (18)$$

여기서 ε_i 는 임의의 양수이고, $\hat{\theta}_i$ 는 θ_i^* 의 추정 벡터이다. $\hat{\theta}_i$ 는 다음의 적용 법칙에 의해 구해진다.

$$\dot{\hat{\theta}}_i = -\sigma_i \Gamma_i \hat{\theta}_i + \frac{1}{2} \|\mu_i\| \Gamma_i \rho_i^* \theta_i^* \quad (19)$$

여기서 Γ_i 는 양정치 행렬이고 σ_i 는 임의의 양수이다.

그리고 $\hat{\theta}_i \square \hat{\theta}_i - \theta_i^*$ 를 정의하면 식(19)는 다음과 같은 오차 모델로 다시 쓸 수 있다.

$$\dot{\hat{\theta}}_i = -\sigma_i \Gamma_i \hat{\theta}_i + \frac{1}{2} \|\mu_i\| \Gamma_i \rho_i^* \theta_i^* - \sigma_i \Gamma_i \theta_i^* \quad (20)$$

안정도를 보이기 위해 리아프노브 후보함수를 다음과 같이 선택한다.

$$V(X_i, \hat{\theta}_i) = X_i^T P_i X_i + \hat{\theta}_i^T \Gamma_i^{-1} \hat{\theta}_i$$

그러면 식(16), (18), (20)을 사용하면 윗식의 미분은 다음과 같이 된다.

$$\dot{V}(X_i, \hat{\theta}_i) \leq -\left(X_i^T Q_i X_i + \sigma_i \|\hat{\theta}_i\|^2 \right) + (\varepsilon_i + \sigma_i \|\theta_i^*\|^2) \quad (21)$$

여기서 ε_i 와 σ_i 는 설계 가능한 파라미터이다.

IV. 모의 실험

본 장에서는 앞에서 제시한 비선형 분산 전압 제어기의 모의실험 결과를 제시한다. 사고발생 이전에는 계통이 정상상태에 있다고 가정한다. 실험에 사용된 시스템은 그림 1와 같다.

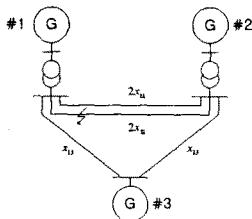


그림 1. 전력 시스템

Fig 1. power system model

그리고 다음과 같은 임력제약을 고려한다.

$$|k_1 u_{j1}| \leq 6.0 \text{ (p.u.)}, \quad |k_2 u_{j2}| \leq 6.0 \text{ (p.u.)}$$

식(1)에 동기 발전기의 포화를 고려하면 다음과 같은 수식으로 표현할 수 있다[4].

$$\dot{E}_q = \frac{1}{T_{d0}} [E_{f0} - (x_d - x_q) I_d - k_f E_q], \quad k_f = 1 + \frac{b}{a_i} (E_q)^{n-1}$$

모의실험시 파라미터는 다음과 같다.

$$a_1 = a_2 = 0.95, \quad b_1 = b_2 = 0.051, \quad n_1 = n_2 = 8.727$$

$$\sigma_1 = \sigma_2 = 1, \quad \varepsilon_1 = \varepsilon_2 = 0.01, \quad \Gamma_1 = \Gamma_2 = I$$

그리고 제안한 제어기는 다음과 같다.

$$u_{11} = 30.769 \Delta \omega_1 - 69.8389 \Delta P_{e1} - 93.5156 \Delta V_{11}$$

$$u_{21} = 26.2434 \Delta \omega_2 - 43.0367 \Delta P_{e2} - 104.8416 \Delta V_{11}$$

제안된 제어기의 성능을 확인하기 위해, 그림 1에서와 같이 발전기 #1과 발전기 #2 사이의 전송선로(transmission line)의 중간 지점에서 단락 사고가 발생한 상황을 고려한다. 사고는 0.1초에 발생하고, 0.25초에 제거(clear)되며, 1초에 복구 restore 된다. 동작점은 다음과 같다.

$$\delta_{10} = 47.3^\circ, \quad V_{10} = 1.0, \quad P_{m10} = 0.4$$

$$\delta_{20} = 67.1^\circ, \quad V_{20} = 1.02, \quad P_{m20} = 0.8$$

전체 페루프 시스템에 대한 응답은 그림 2(실선은 #1 발전기, 점선은 #2 발전기)에 나타나있다.

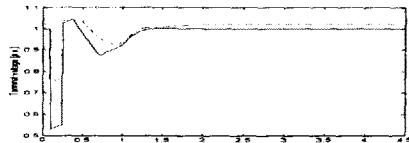
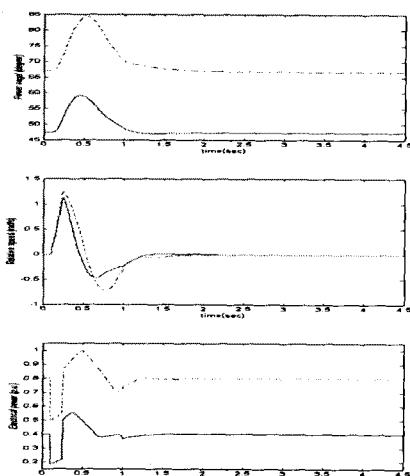


그림 2. 사고시 여자제어 응답

(동기각, 각속도, 유효전력, 단자전압)

Fig 2. Responses of excitation control

제 5 장 결 론

제안된 제어기는 전압을 상태 방정식에 포함하여 발전기 단자전압을 직접 제어할 수 있다. 또한 다른 부 시스템(subsystem)의 정보를 사용하지 않고도 제어기의 실현이 가능하다. 다른 시스템의 정보로 이루어진 부 시스템 간 상호작용을 고려하기 위하여 적용 가능한 제어법칙을 적용하였다. 상호작용 항인 γ_i 의 상한을 추정하기 위하여 적용 제어기법을 적용하고, 추정한 상한을 이용하여 상호작용의 영향을 소거함으로써 i 번 째 발전기에 대하여 E_q 가 상수이고 ω_i 의 영향을 무시하는[1][6] 등의 가정을 하지 않고도 시스템의 안정도를 보일 수 있다. 또한 식(21)에 의해서 두 식의 해 $(X_i, \dot{\theta}_i)(t, t_0, X_i(t_0), \dot{\theta}_i(t_0))$ 는 γ_i 에 대하여 궁극적으로 균일하게 유계 되었다는(uniformly ultimately bounded) 결론을 얻을 수 있다.

*본 연구는 산업자원부의 지원에 의하여 기초전력공학 공동연구소(R-2003-B-109) 주관으로 수행된 과제임.

참 고 문 헌

- [1] C. Zhu, R. Zhou and Y. Wang, "A New Decentralized Nonlinear Voltage Controller for Multimachine Power Systems," *IEEE Trans. on Power Systems*, Vol. 13, No. 1, 1998, pp. 211-216.
- [2] Y. Wang, G. Guo and D. J. Hill, "Robust Decentralized Nonlinear Controller Design for Multimachine Power Systems," *Automatica*, Vol. 33, No. 9, pp. 1725-1733, 1997.
- [3] Y. Guo, D. J. Hill and Y. Wang, "Nonlinear Decentralized Control of Large-Scale Power Systems," *Automatica*, Vol. 36, pp. 1275-1289, 2000.
- [4] J. arrillaga and C. P. Arnold, *Computer Analysis of Power systems*, John Wiley & Sons, Chichester, 1990.
- [5] C. Zhu, R. Zhou and Y. Wang, "A New Nonlinear Voltage Controller for Power Systems," *Electrical Power & Energy Systems*, Vol. 19, No. 1, 1997, pp. 19-27.
- [6] Q. Lu and Y. Z. Sun, Nonlinear Stabilizing Controller of Multimachine Systems, *IEEE Trans. on Power Systems*, PWRS-4, 1989, pp.236-24