'90 韓國自動制御學術會議論文集 1990. 10.26~27

연계 시스템의 강건한 분할적응제어기의 설계

홍 선 학° 임 화 영
광운대학교 공과대학 제어계측공학과

The Design of Robust Decentralized Adaptive controller of Interconnected System

Hong-Seon Hack Yim-Wha Yeong
Dept. of Control & Instrument Eng.
Kwang Woon University

ABSTRACT

This paper proposes the design of the decentralized adaptive controllers which are an arbitrary interconnection of sub-systems with unknown parameters, nonlinearities and bounded disturbances. In order to exponentially converge the state and parameter errors, robust decentrallized adaptive controllers are developed for stabilization and tracking the parameters. In the simulation studies of the decentralized adaptive control of a two-area interconnected power system, the effectiveness of the proposed adaptive schemes is demonstrated.

Ⅰ. 서 론

연계 시스템의 주파수 제어는 계통구성요소의 복잡한 동특성을 포함하여 무한차수의 상태 방정식이 되며 비선형성을 포함하게 된다. 복잡한 시스템의 동특성과 비선형성에 대응하여 스스로 조정되어가는 적응제어법이 안정도를 향상시키고 제어효과가 높아지는 결과를 이론과 실제 적용에서 보이고 있다. 연계 시스템을 제어하는데는 제어 영역별로 나누고 그 영역에서의 주파수 편차만을 측정하여 미지의 파라메타에 대응하는 분할 적응제어법이 가장 적합하다.

따라서 본 논문에서는 미소한 부하 변동으로 주파수가 변하는 특성을 선형 동특성으로 나타내고 상호 연계된 시스템을 대상으로 분할 적응제어계의 설계문제를 다룬다.

연계특성의 집중 적응제어계를 분할 적응제어로 시스템에 적용했을때 파라메타 값이 발산하고 불안정하게 된다. 본 논문에서는 최단시간에 부하 변동에 따를 주파수 변동을 억제하여 주파수가 항상 정규 상태로 유지하고 상호연계된 선로의 전력 전류를 모델 시스템의 출력으로 함으로서 주파수 오차를 해소하고, 잔류편차를 제거하도록 개선된 분할 적응제어법을 제시 하였으며, 적용사례를 들어 입증하였다.

Ⅱ. 연계시스템의 상태 방정식

N 개 부분 시스템으로 분할되는 연계 시스템에서 i 제어 영역을 상태식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i U_i + D_i + \sum_{i}^{N} f_{ij}(t, X_j) \qquad (2\text{-}1)$$

$$Y_i = h_i^T X_i \qquad (i = 1,2, \cdots\cdots N) \qquad (2\text{-}2)$$

여기서 $X_i \in R^{ni}$ 인 상태벡터, $U_i \in R^1$: 제어 입력 $Y_i \in R^1$: 출력 변수, $D_i \in R^{ni}$ 유계된 외란을 나타낸다. $f_{ij}(t, X_j) \in R^{ni}$ 는 i 제어 영역과 다른 제어 영역간의 상호 연계특성에 관련한 함수이다. 따라서 단일 입출력을 가진 각 제어 영역들이 연계된 분할적응제어 문제가 된다.

전체 전력계통을 상태식으로 나타내면

$$\dot{X} = AX + BU + D + F(t, X) \qquad (2\text{-}3)$$

이며, 각 영역 시스템간의 관계는 $X=[X_1^T\ X_2^T\ \cdots\ X_i^T]^T$, $Y=[Y_1\ Y_2\ \cdots\ Y_N]^T$,* $U=[U_1^T\ U_2^T\ \cdots\ U_N^T]^T$, $D=[D_1^T\ D_2^T\ \cdots\ D_N^T]^T$ 로 된다. $F(t,X)$ 는 전체 계통의 연계와 관련된 비선형 특성을 나타낸다. 또한 계수 행렬들은 $A=diag(A_i)$, $B=diag(B_i)$, $C=diag(h_i^T)$ 의 관계를 가진다.

제어영역의 기준모델은 그영역내의 상태량만으로 구성된

$$\dot{X}_{mi} = A_{mi} X_{mi} + B_{mi} \Gamma_i \qquad (2\text{-}4)$$

$$Y_{mi} = C_{mi}^T X_{mi} \qquad (i = 1,2, \ldots N) \qquad (2\text{-}5)$$

으로 나타낸다. 여기서 $X_{mi} \in Rm^i$ 인 상태벡터, Γ_i는 기준 입력 신호이다.

Ⅲ 연계시스템의 분할적응제어

Ⅲ-1. 주파수제어를 위한 연계시스템의 모델

전력계통이 부하와 발전 전력의 평형으로 규정주파수를 유지하다가 부하변동이 생겼을때 재열화력발전기의 동특성을 선형화하여 선형 모델로 취급한다. 상태벡터의 요소로는 $\int \Delta f_i\, dt$, Δf_i, ΔP_i, $\Delta P_{tie\ i}$로 정하고, 출력변수 $Y_i = \Delta f_i$로 하고, $\int \Delta f_i\, dt$신호를 적응제어계의 기준입력으로 한다.

분할제어영역 i와 j가 연계선으로 결합되어 있으므로 전력조류는 선로의 리액턴스만을 고려하면 미소한변동에대하여 동기계수를 적용한 선형화 취급이 가능하다. $f_{ij}(t,X_j)$는 Δf_i에 관련되고, $\Delta P_{tie\ i}$의 상태량을 선형식으로 나타내어 적용사례에 적용했다.

Ⅲ－2. 분할 적응제어계의 설계

식(2-1), (2-2)로 표시된 연계시스템의 전달함수는

$$W_i(s) = h_i^T(sT_L - A)^{-1}b_i = k_i \frac{N_i(s)}{D_i(s)} \qquad (3\text{-}1)$$

로 나타낸다. $N_i(s)$는 Hurwitz의 N_i-1 차, $D_i(s)$는 N_i차인 monic 다항식이다.

기준모델 시스템 식(2-4), (2-5)의 전달함수는

$$W_m(s) = C^T_{mi}(s\pi - A_{mi})^{-1}b_{mi} = K_{mi}\frac{Z_{mi}(s)}{R_{mi}(s)} \qquad (3\text{-}2)$$

여기서 $Z_{mi}(s)$,$R_{mi}(s)$ 는 N_i-1 과 N_i-1 차인 monic Hurwitz 다항식이다. K_i 와 K_{mi} 는 양의 상수로 가정한다.

연계시스템간의 전력조류와 부하변동을 제어영역의 외란으로 보고 적응제어기의 구조식을 설계하면

$$V_i(1) = \Lambda_i V_i(1) + g_i U_i \qquad (3\text{-}3)$$

$$V_i(2) = \Lambda_i V_i(2) + g_i Y_i \qquad (3\text{-}3)$$

여기서 Λ_i 는 $(Ni-1)\times(Ni-1)$ 인 안정한 행열이고 $g_i = [0\ 0\ 0\ \cdots\cdots\ 1]^T$이며 (Λ_i, g_i)는 가제어성이 있어야 한다. i 제어영역의 입력 U_i 는

$$U_i = \theta_i^T \omega_i^T \qquad (3\text{-}5)$$

로 나타내면 $\omega_i^T = [\ r_i\quad v_i^{(1)T}\quad y_i\quad v_i^{(2)T}\ ]$ 이고 θ_i는 $2n_i$ 차수인 지역 파라메타 벡터이다.

식(3-3) 부터 (3-5)를 정리한 분할적응제어기계는 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{X}_i \\ \dot{V}_i(1) \\ \dot{V}_i(2) \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda_i & 0 \\ b_i h_i^T & 0 & \Lambda_i \end{bmatrix} \begin{bmatrix} X_i \\ V_i(1) \\ V_i(2) \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_i \\ g_i \\ 0 \end{bmatrix} [\theta_i^T \quad \omega_i] \qquad (3\text{-}6)$$

$$y_i = h_i^T x_i \qquad (3\text{-}7)$$

상수 벡터인 θ_i 는 식(3-1)이 기준모델과 일치하면 $\theta_i(t)=\theta_i^*$ 로서, 파라메타 오차 $\Phi_i=\theta_i-\theta_i^*$, 상태벡터 오차 $e_i= Y_i-X_{ci}$ 로 나타낸다면 식(3-6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$[X_i^T\ V_i^{(1)T}\ V_i^{(2)T}]^T = A_{ci}[X_i^T\ V_i^{(1)T}\ V_i^{(2)T}]^T + b_{ci}[K_{oi}\Gamma_r + \Phi_i^T(t)W_i] \qquad (3\text{-}8)$$

x_{ci} 가 i 제어지역 기준 모델의 상태값이라면

$$\dot{x}_{ci} = A_{ci}x_{ci} + b_{ci}K_{oi}{}^*\Gamma_i \qquad (3\text{-}9)$$

플랜트의 (3n-2)인 상태벡터와의 오차 e_i 는

$$e_i = A_{ci}e_i + b_{ci}\Phi_i^T W_i + D_{ci} + F_i \qquad (3\text{-}10)$$

$$e_{oi} = h_{ci}^T e_i = [1\ 0\ \cdots\ 0]e_i \qquad (3\text{-}11)$$

로 표시된다. 여기서 $e_{oi} = Y_i - Y_{mi}$, $D_{ci} = [D_i^T\ 0\ 0]^T$, $F_i = [\ \Sigma f_{ij}^T(t,x_j)\quad 0\quad 0]^T$ 이고 A_{ci} 는 안정하고(h_{ci}, A_{ci}, D_{ci}) 는 제어가능 detactable 하다.

본 논문에서는 Ioannou 가 제시한 지역 파라메타 조정식을 주파수 편차 $\Delta f_i = e_{oi}$ 로 적용하고 또한 W_i 벡터 요소중 Y_i를 Δf_i 로 취급하여 이들 상호간의 곱은 부호에 관계없이 양의 값이 되므로 Y_i 는 절대치를 취한 $|\Delta f_i|$ 로 하였다. 이를 정리하면

$$\dot{\theta}_i = -\sigma_i\Gamma_i\theta_i - \Gamma_i\Delta f_i W_{di} \qquad (3\text{-}12)$$

여기서 $W_{di} = [\int\Delta f_i dt\quad V_i^{(1)T}\quad |\Delta f_i|\quad V_i^{(2)T}\ ]$ 이다. $t\to\infty$ 일때 $|(e(t)|\to 0$ 으로 되어 안정하려면 $h_{ci}(SI-A_{ci})$가 SPR 이어야 한다.

Lyapunov 함수를

$$V(e_i,\Phi_i)=\tfrac{1}{2}(e_i^T P_{ci}e_i + \Phi_i^T P_{ci}e_i + \Phi_i^T\Gamma_i^{-1}\Phi_i) \qquad (3\text{-}13)$$

로 놓으면, $h_{ci}(SI-A_{ci})b_{ci}$가 SPR 일때 $P_{ci} = P_{ci}^T > 0$ 이 존재 한다.

Kalmann - Yacubovich 는

$$A_{ci}^T P_{ci} + P_{ci}A_{ci} = -q_i^T q_i - \varepsilon L_i \qquad (3\text{-}14)$$

$$P_{ci}b_{ci} = h_{ci} \qquad (3\text{-}15)$$

가 벡터 q_i 와 $L_i=L_i^T > 0$, $\varepsilon>0$ 일때 만족됨을 보였다.

식(3-13)을 미분하면

$$\dot{V}(e_i,\Phi_i)=\tfrac{1}{2}e_i(q_i q_i^T + \varepsilon L_i)e_i \le 0 \qquad (3\text{-}16)$$

로 되어 점근안정(uniformly asymptotic stable) 하게된다.

Ⅳ. 시뮬레이션

Ⅳ－1. 연계시스템의 동특성 모델

제어지역 i에 대한 동적상태모델은 다음과 같이 정리될 수 있다.

$$\frac{d}{dt}\Delta f_i = \frac{f^o}{2W^o_{kin\ i}}[-D_i\Delta f_i - \Delta P_{tie\ i} + \Delta P_{Gi} - \Delta P_{Di}]$$

$$\frac{d}{dt}\Delta P_{tie\ i} = 2\pi\sum_{i=1}^{k} T^o_{ik}\ (\Delta f_i - \Delta f_k)$$

$$\frac{d}{dt}\Delta P_{Gi} = \frac{K_{Ti}}{T_{Ti}}\Delta X_{Ei} - \frac{1}{T_{Ti}}\Delta P_{Gi}$$

$$\frac{d}{dt}\Delta X_{gvi} = \frac{K_{Gi}}{T_{Gi}}\Delta P_{Gi} - \frac{K_{Gi}}{T_{Gi}P_i}\Delta f_i - \frac{1}{T_{Gi}}\Delta X_{gvi}$$

여기서 $W_{kin\ i}$ 는 i 제어계의 운동 에너지, Di 는 i 제어계의 계통제동, T^o_{ij} 는 동기 계수로서 다음과 같이 정의된다. $T^o_{ij} = P_{max\ ij}\cdot\cos(\delta_i - \delta_j)$, $X_{gv}(S)$ 는 증기 제어밸브의 열림 각변위의 크기를 나타낸다.

연계 시스템의 효율적인 분할적응제어 방안을 검토하기 위하여 제어 대상 계통의 상태모델에서 각 계수행렬의 파라메타는 다음값을 적용하였다.

$P_{r1} = P_{r2} = 1$ PUMW	$f^o = 60$ Hz
$H_1 = H_2 = 5.0$ s	$D_1 = D_2 = 8.33\times10^{-3}$ PUMW/Hz
$T_{t1} = T_{t2} = 0.3$ s	$T_{gv1} = T_{gv2} = 0.08$ s
$R_1 = R_2 = 2.4$ Hz/PUMW	$P_{tie\,max} = 0.1$ PUMW
$\delta_1 = \delta_2 = 30^o$	$T_{12} = 0.545$ PUMW
$\Delta P_{D1} = 0.05$ PUMW	$\alpha_{12} = -P_{r1}/P_{r2} = -1$

Ⅳ-2. 적응 제어기 설계

2 제어지역 상태모델 방정식에서 $\int \Delta P_{tie,1}\, dt$ 가 가제어성을 갖기 위해서 제어지역 1,2 가 모두 주파수 제어 기능을 가지고 있다고 하면 제어계의 상태모델을 백터행렬로 표현하면 다음과 같이 9차수의 상태방정식이 유도된다.

$$\dot{X} = AX + BU + D + EX_{ij} \qquad (4\text{-}1)$$

이때 각벡터의 요소는

$$X = [\Delta P_{tie}\ \int\Delta f_1 dt\ \Delta f_1\ \Delta X_{E1}\ \Delta P_1\ \int\Delta f_2 dt\ \Delta f_2\ \Delta X_{E2}\ \Delta P_2\ ]^T$$

$$U = [\ \Delta P_{c1}\ \ \Delta P_{c2}\ ]^T$$

$$E = [\ 0\quad 0\quad \frac{f^oT_{12}}{2H_1}\quad 0\quad 0\quad 0\quad -\frac{fT_{12}}{2H_2}\quad 0\quad 0\ ]^T$$

이다 또한 ΔP_{tie} 을 제외한 4 차 선형 상태방정식은

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -3.27 & -0.05 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & -3.33 & 3.33 \\ 0 & -5.028 & 0 & -12.5 \end{bmatrix}$$

$$B_1 = B_2 = [\ 0\ 0\ 0\ 12.5\ ]$$

$$D_1 = [\ 0\ -0.3\ 0\ 0\ ]^T \qquad D_2 = [\ 0\ 0\ 0\ 0\ ]^T$$

$$E_1 = E_2 = [\ 0\ \ 3.27\ 0\ \ 0\ ]^T$$

을 적용 하였다. 외란백터 D_2 는 0 요소인 반면에 D_1 은 비영요소가 있도록하여 제어영역 1 에서 부하증가(변동)가 생겼을때 상호 연계특성을 지닌 분할 적응제어를 통해 주파수 편차를 해소 하도록 하였다.

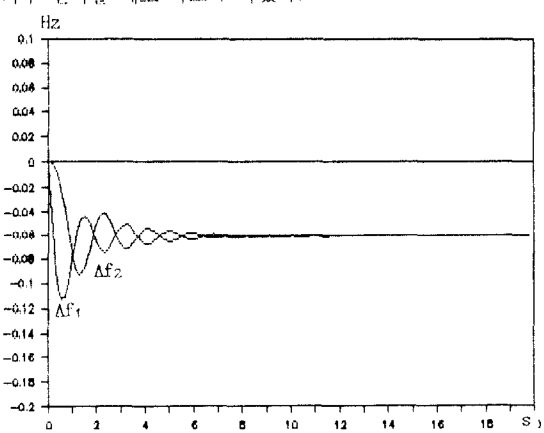

그림 4-1. 2제어영역을 가진 연계시스템의 주파수 편차

무제어상태($U_i = 0$)상태 에서 주파수 편차는 (4-1)그림과 같이 정상상태에서 잔류편차가 남는다.

분할적응제어를 적용하기 위한 식(3-3),(3-4)의 안정한 계수행렬 A_i 를

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} -1. & -0.1 & 0 \\ -0.1 & -1. & -0.1 \\ 0 & -0.1 & -1. \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}2)$$

로 적용하였다. 제어 영역의 파라메타백터 θ_1 과 θ_2 를 구하기 위한 식(3-12)의 계수행렬 $\Gamma_1 = \Gamma_2$ 는 상삼각 행렬 비영요소를 정하고 대칭성을 이용하여 하삼각 행렬을 채웠다.

$\Gamma_1(i,i) = \Gamma_2(i,i) = 0.1$

$\Gamma_1(i,i+1) = \Gamma_2(i,i+1) = 0.01$

$\Gamma_1(i,i+2) = \Gamma_2(i,i+2) = 0.01$

$\sigma_i = 2$ 로 두고 분할적응제어시의 각영역의 주파수편차는 그림 (4-2)와 같이 잔류편차가 없어짐을 보이고 있다.

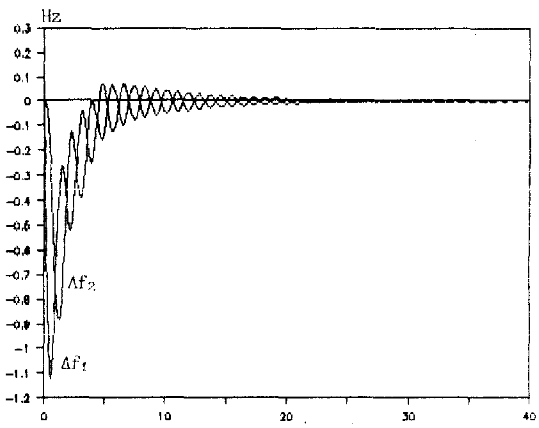

그림 4-2. 분할적응제어에 의한 각제어지역의 주파수 편차

이때 각 제어 영역의 발전 전력의 변화분은 그림 4-3 과 같다.

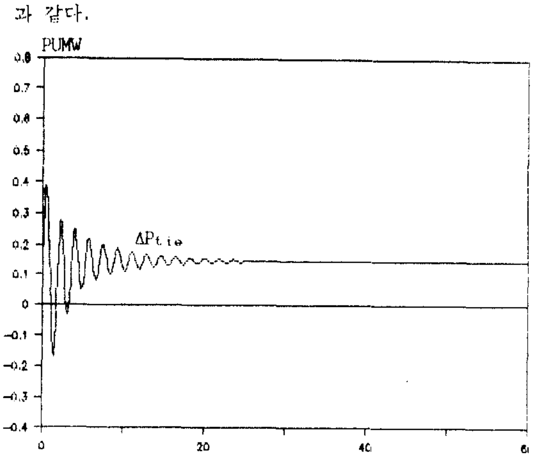

그림 4-3. 분할적응제어에 의한 발전전력의 변화분

식(3-12)로 정해지는 적응제어 파라메타중 일부가 수렴해 가는 안정한 특성을 나타내고 있으나 불안정한 결과를 보이고 있다. 따라서 식(4-2)의 A_i 계수행렬을 비대칭형으로

$$A_i = \begin{bmatrix} 0 & 0 & -0.545 & 0 \\ 0 & -0.1 & -6 & 0 \\ -6.0 & 0 & -3 & -3 \\ 0 & -127 & -12.7 & -36.5 \end{bmatrix} \qquad (4\text{-}3)$$

로 정하여 ΔP_{tie} 를 상태 방정식에 포함시킨 9차계의 상태 계수행렬은

$$A = \begin{bmatrix} 0 & 0 & 0.545 & 0 & 0 & 0 & -0.545 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 1 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ -6 & -3.27 & -0.05 & 6 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & -3.33 & 3.33 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & -5.028 & 0 & -12.5 & 0 & 0 & 0 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 1 & 0 & 0 \\ -6 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.27 & -0.05 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -3.33 & 3.33 \\ 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & 0 & -5.028 & 0 & -12.5 \end{bmatrix}$$

$$B = [\ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 12.5\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 12.5\ ]^T$$

$$D = [\ 0\ \ 0\ \ -0.3\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ \ 0\ ]^T$$

을 적용 하였다. 이때 각영역의 주파수 편차는 그림(4-4)와 같이 미소한 편차에의한 속응성을 보이고있다.

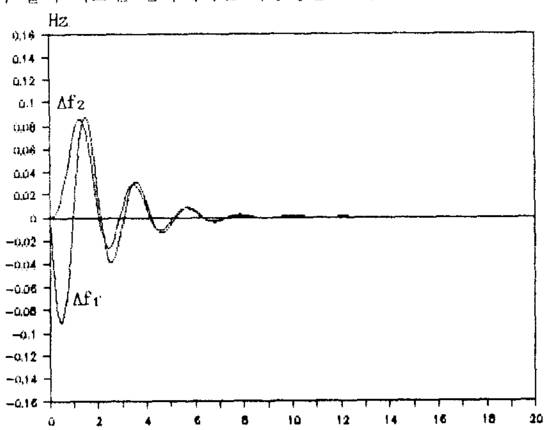

그림 4-4. 9차계 분할 적응제어에 의한 각 제어 지역의 주파수편차.

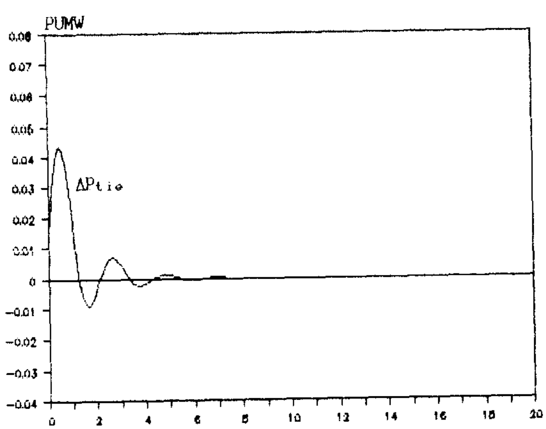

그림 4-5. 개선된 분할 적응제어에 의한 발전 전력의 변화분.

또한 각제어지역의 연계선 조류전력의 변화분은 그림(4-5)와 같다.

VI. 결 론

연계시스템의 주파수제어는 임의로 상호 결합된 비선형 특성과 외란이 존재하는 단일 제어영역의 결합으로 보고 각제어영역에서의 주파수편차를 측정하여 강건한 분할적응 제어를 시도함으로서 연계시스템이 효율적으로 제어되도록 하였다. 개선된 분할 적응제어법을 제시하고 기준모델 제어입력을 주파수 편차의 적분치로 하여 주파수 잔류 편차를 소거하였으며 파라메타들이 정상치로 안정하게 수렴하는 분할적응 제어계를 설계하였다.

제어영역의 상태식을 4차인 2개의 영역과 9차 연계시스템에 적용한 사례를 들어 제어법칙의 효율성을 증명하였다.

참 고 문 헌

1. O.I.Elgerd,Electric Energy System Theory : An Introduction,McGraw-Hill Book Co., New York, 1971.
2. 임화영, "출력피이드백에 의한 전력계통의 최적 주파수 제어",박사학위논문,한양대학교, 1983.
3. F.A.Ioannou,"Decentralized Adaptive Control of Interconnected Systems",IEEE Tran. on Automatic Contr.,Vol.AC-31, NO.4, PP.291-298 1986.
4. K.S.Narendra and L.S. Valavani,"Stable Adaptive Controller Design-Direct Control",IEEE Tran.on.Automatic Contr.,Vol.AC-23,No.4,pp. 570-583, 1978.
5. K.S.Narendra and L.S.Valavani, " Stable Adaptive Controller Design-Direct Control ", IEEE Tran.on Automatic Contr.,Vol.AC-23,NO.4,pp.570-583, 1978.