

상호 연계된 시스템의 분할
적응 제어계의 설계

윤석열 전상영 임화영
광운대학교 전기공학과 전기공학과 제어계측공학과

A Design of the Decentralized Adaptive controller on
Interconnected systems.

Yun, Suk-Youl Jun, Sang-Young Yim, Hwa-yeong
Dept. of Electrical Eng. Dept. of Control & instrument Eng.

Abstract

This paper deals with the design of the adaptive controller using a decentralized control for Large-Scale system formed of an arbitrary interconnection of subsystem with unknown parameters, nonlinearity and bounded disturbance. In order to reduce the load and frequency deviations, now decentralized 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 is demonstrated.

1. 서 론

본 논문에서는 상호 연계로 인한 외란과 비선형 특성을 선형 동특성으로 나타내고, 상호 연계된 전력계통을 대상으로 분할 적응 제어기의 설계 문제를 다루었다.

상호 연계된 대규모 시스템의 동특성을 수식으로 나타내면 무한차수의 상태 방정식이 되며 외란과 상호 연계된 특성을 포함하는 비선형 시스템이 된다.

이러한 시스템에서 미소한 연계특성이 존재시, 매개변수가 발산하여 불안정하게 되지만 Ioannou의 분할 적응 제어 법칙을 이용하여 안정함을 보였다.

시스템이 최단 시간에 부하 변동에 따른 주파수 변화를 억제하여 정상 상태로 복귀시키는데 중점을 두고, 주파수가 정상 상태로 유지되는 것을 이상적인 시스템의 출력으로 정하여 각 부시스템에 적분기를 도입함으로써 상호 연계된 전력계통의 주파수 오차를 해소하고, 잔류 편차를 제거하였으며, 각 제어 지역내에서 발생하는 외란을 자체적으로 흡수하도록 하였다.

2. 이론적 배경

2-1. 연계된 시스템의 상태 방정식

대규모 시스템을 N 개의 부분 시스템으로 분할하면 상호 연계된 i 제어 영역의 상태 방정식은 식(2-1)이다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_i &= A_i x_i + b_i U_i + D_i + \sum_{j=1}^N f_{ij}(t, x_j) \\ y_i &= h_i^T x_i \quad i = 1, 2, \dots, N \end{aligned} \quad (2-1)$$

여기서 적당한 차수의 상태벡터 $x_i \in R^{n_i}$ 이고, $U_i \in R^1$ 는 출력변수, $D_i \in R^{n_i}$ 는 유계된 외란이다. $f_{ij}(t, x_j) \in R^{n_i}$ 는 i제어 영역과 상호 연계된 제어 영역간의 비선형 함수이다. 따라서 단일 입출력을 가진 제어 영역이 연계된 분할 적응 제어 문제이다.

전체 시스템 상태 방정식은 식(2-2)이다.

$$\begin{aligned} \dot{x} &= Ax + BU + D + F(t, x) \\ y &= Cx \end{aligned} \quad (2-2)$$

각 영역 시스템간의 관계는 $x = [x_1^T, x_2^T, \dots, x_n^T]^T$ 상태벡터, $y = [y_1, y_2, \dots, y_n]^T$ 출력벡터, $U = [U_1, U_2, \dots, U_n]^T$ 제어벡터, $D = [D_1^T, D_2^T, \dots, D_n^T]^T$ 외란벡터, $F(t, x)$ 전체 계통의 연계된 비선형 특성이다. 또한 계수행렬은 $A = \text{diag}(A_i)$, $B = \text{diag}(b_i)$, $C = \text{diag}(h_i^T)$ 이다.

제어 영역의 기준 모델은 식(2-3)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{x}_{mi} &= A_{mi} x_{mi} + B_{mi} r_i \\ y_{mi} &= C_{mi}^T x_{mi} \quad i = 1, 2, 3 \dots N \end{aligned} \quad (2-3)$$

여기서, x_{mi} 기준 상태벡터, y_{mi} 기준 출력벡터, r_i 는 기준 입력 신호이다.

외란과 비선형성, 상호 간섭이 존재하지 않을때 식(2-1)은 단일 입출력 집중 적응제어 문제가 된다. 그러나 상호연계 관계가 존재할 때 $F(t, x)$ 가 선형성을 지닌 함수인 경우에도 각 제어 영역별 시스템은 비선형을 내포하여 외란과 모델의 오차에 의해 불안정하게 되기 쉽다.

2-2. 분할 적응 제어기의 설계

식(2-1)로 표시된 부분 시스템의 전달함수는 식(2-4)이다.

$$W_i(S) = h_i^T (sI - A_i)^{-1} b_i = K_i \frac{N_i(S)}{D_i(S)} \quad (2-4)$$

여기서 $N_i(S)$ 는 Hurwitz의 n_i-1 차인 monic 다항식이며 $D_i(S)$ 는 n_i 차인 monic 다항식이다.

식(2-3)의 기준모델 시스템의 전달함수는 식(2-5)이다.

$$W_i(S) = C_{mi}^T (sI - A_m)^{-1} b_{mi} = K_{mi} \frac{Z_{mi}(S)}{R_{mi}(S)} \quad (2-5)$$

여기서 $Z_{mi}(S)$, $R_{mi}(S)$ 는 monic Hurwitz 다항식이며 n_i-1 과 n_i 차수를 가진다. 식(2-4), 식(2-5)에서 K_i , K_{mi} 는 양의 정수로 가정하자.

분할된 부분 시스템의 섭동 신호를 비선형 상호 함수로 간주하면 식(2-6)의 구조식이 된다.

$$\dot{V}_i^{(1)} = \Lambda_i V_i^{(1)} + g_i U_i \quad (2-6a)$$

$$W_i^{(1)} = C_i^T(t) V_i^{(1)} \quad (2-6b)$$

$$\dot{V}_i^{(2)} = \Lambda_i V_i^{(2)} + g_i y_i \quad (2-6c)$$

$$W_i^{(2)} = d_{oi}(t) y_i + d_i^T V_i^{(2)} \quad (2-6d)$$

i 제어 영역의 입력 U_i 는

$$U_i = \theta_i^T W_i \quad (2-7)$$

여기서, $W_i^T = [r_i, V_i^{(1)T}, Y_i, V_i^{(2)T}]$

$$\theta_i^T = [K_{oi}(t), C_i^T(t), d_{oi}(t), d_i^T(t)] \text{ 이며}$$

식(2-7)은 $2n_i$ 차수 조절 매개변수 벡터가 된다.

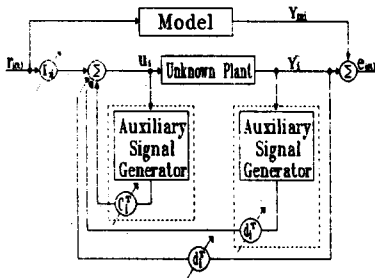


그림 1. 분할 적응제어기의 블록선도

Fig 1. Block diagram of the decentralized adaptive system

식(2-6a), 식(2-6b)의 전달함수를 $W_1(S)$, 식(2-6c), 식(2-6d)의 전달함수를 $W_2(S)$ 라 하면 식(2-8)과 같다.

$$W_1(S) = C_i^T (SI - \Lambda_i)^{-1} g_i = \frac{C(S)}{N(S)} \quad (2-8a)$$

$$W_2(S) = d_{oi} + d_i^T (SI - \Lambda_i)^{-1} g_i = d_{oi} + \frac{D(S)}{N(S)} \quad (2-8b)$$

C_i , d_i 는 파라미터 상수값, Λ_i 는 $(n_i - 1) \times (n_i - 1)$ 인 안정한 행렬, $g_i = [0, 0, 0, 0, \dots, 1]^T$ 의 행렬, (Λ_i, g_i) 는 가제어성 이어야 한다.

식(2-6a, b, c), 식(2-7)를 종합한 분할적응 제어 시스템을 상태 방정식으로 나타내면 식(2-9)이다.

$$\begin{bmatrix} \dot{\chi}_i \\ \dot{V}_i^{(1)} \\ \dot{V}_i^{(2)} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} A_i & 0 & 0 \\ 0 & \Lambda & 0 \\ g_i h_i^T & 0 & \Lambda \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \chi_i \\ V_i^{(1)} \\ V_i^{(2)} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} b_i \\ g_i \\ 0 \end{bmatrix}$$

$$y_i = h_i^T \chi_i \quad (2-9)$$

$\theta_i(t) = \theta_i^* + \phi_i(t)$ 로 표시하면 식(2-9)는 식(2-10)이다.

$$[\chi_i^T, V_i^{(1)T}, V_i^{(2)T}]^T \quad (2-10)$$

$$= A_{ci} [\chi_i^T, V_i^{(1)T}, V_i^{(2)T}]^T + b_{ci} [K_{or}^* r_i + \phi_i^T(t) W_i]$$

여기서 매개변수 오차 $\phi_i = \theta_i - \theta_i^*$, 상태오차 $e_i = y_i - \chi_{oi}$.

$y_i^T = [\chi_i^T, V_i^{(1)T}, V_i^{(2)T}]$ 이다.

i 부분 기준모델의 상태벡터 χ_{oi} 는 식(2-11)과 같다.

$$\dot{\chi}_{oi} = A_{ci} \chi_{oi} + b_{ci} K_{or}^* r_i \quad (2-11)$$

플랜트 $(3n_i-2)$ 인 상태벡터와의 오차 e_i 는 식(2-12)로 표시한다.

$$\dot{e}_i = A_{ci} e_i + b_{ci} \phi_i^T W_i + D_{ci} + F_i$$

$$e_{oi} = h_{ci}^T e_i = [1, 0, 0, \dots] e_i \quad (2-12)$$

여기서, $e_{oi} = y_i - y_{mi}$, $D_{ci} = [D_i^T, 0, 0]^T$

$$F_i = \left[\sum_{t=1}^N f_{ij}^T(t, \chi_i), 0, 0 \right]^T, A_{ci} \text{는 안정한 행렬이고,}$$

(h_{ci}, A_{ci}, b_{ci}) 는 가제어하며 가관측 하다.

Ioannou가 제시한 새로운 적응 법칙은 식(2-13)과 같다.

$$\begin{aligned} \dot{\theta}_i &= -\delta_i \Gamma_i \theta_i - \Gamma_i e_{oi} W_i \\ \delta_i &= \begin{cases} \delta_{oi} & \text{if } \|\theta_i\| > \theta_{oi} \\ 0 & \text{if } \|\theta_i\| \leq \theta_{oi} \end{cases} \end{aligned} \quad (2-13)$$

여기서, δ_{oi} , θ_{oi} 는 양의 스칼라 설계 매개변수이고,

$\Gamma_i = \Gamma_i^T > 0$ 이다.

$t \rightarrow \infty$ 일때 $|e_i(t)| \rightarrow 0$ 되려면 $h_{ci}(SI - A_{ci})$ 가 엄격히

양의 정수(SPR) 이어야 한다. 그러므로 Lyapunov 함수

$$V(e_i, \phi_i) = \frac{1}{2} (e_i^T P_{ci} e_i + \phi_i^T P_i^{-1} \phi_i) \quad (2-14)$$

는 $P_{ci} = P_{ci}^T > 0$ 가 되고,

$$V(e_i, \phi_i) = \frac{1}{2} e_i^T (g_i g_i^T + \epsilon L_i) e_i \leq 0$$

되어 점근 안정하게 된다.

2-3. 전력 계통의 분할 적응 제어기 설계

발전기의 구동 토크 입력은 평속기의 동작에 의해 조절되며, 평속기는 주파수에 관련된 회전수에 의해 동작되므로 비례 상수로 변환시키는 역할을 한다. 상태 벡터 (x_i)의 주파수 편차 적분치 : $\int \Delta f_i dt$, 주파수 편차 : Δf_i , 평속기 속도 조절레바 변분 : $\Delta X_{\omega i}$, 발전 전력 변분 : ΔP_i 로 구성된 4차 시스템에서 출력변수 $y_i = \Delta f_i$ 로 두고 출력이 피드백 신호를 기준 입력 r_i 로 하고 연계선의 유출입 전력 변분 $\Delta P_i - \Delta P_i$ 에 비례하여 식(2-1)의 $f_{ij}(t, x_j)$ 는 Δf_i 에 관련된 선형식으로 나타내었다. 전력계통에 적분기를 도입하여 4차 시스템으로 구성된 블록선도는 그림 2와 같다.

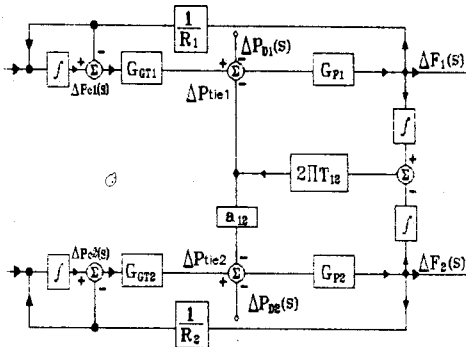


그림 2. 적분기를 도입한 연계된 전력계통의 블록선도

Fig 2. Block diagram of interconnected power system with integrator

3. 컴퓨터 시뮬레이션

본 논문에서는 시스템의 부하와 발전전력 평형시, 미소의 부하 변동이 생겼을때 발전기의 동특성을 선형화하여 2개의 화력 발전기를 대상으로 상호 연계된 시스템에 Narendra 가 제시한 적응법칙 식(3-1)과 Ioannou 가 제시한 적응법칙 식(3-2)와 같다.

$$\dot{\theta}_i = -\delta_i \Gamma_i W_i e_{\theta i} \tag{3-1}$$

$$\theta_i = \begin{cases} -\delta_i \Gamma_i \theta_i - \Gamma_i e_{\theta i} W_i, & \delta_i = \begin{cases} \delta_{\theta i} & \|\theta_i\| > \theta_{\theta i} \\ 0 & \|\theta_i\| \leq \theta_{\theta i} \end{cases} \end{cases} \tag{3-2}$$

여기서 $\delta_{\theta i}$, $\theta_{\theta i}$ 는 설계 매개변수이고, $\Gamma_i = \Gamma_i^T > 0$ 이다. $e_{\theta i}$ 는 주파수 편차 Δf_i 를 그대로 적용하고, W_i 벡터 요소 중 y_i 역시 Δf_i 이므로, 이들 상호간의 곱은 부호에 관계없이 양의 값을 가지게 되므로 y_i 는 절대값을 취한 $|\Delta f_i|$ 로 하였다. 4차로 연계된 선형 상태 방정식은 식(3-3)이다.

$$\dot{x}_1 = A_1 x_1 + b_1 U_1 + D_1 + E x_{21} \tag{3-3a}$$

$$\dot{x}_2 = A_2 x_2 + b_2 U_2 + D_2 + E_2 x_{11} \tag{3-3b}$$

$$x_1 = [\int \Delta f_1 dt, \Delta f_1, \Delta X_{\omega 1}, \Delta P_1]^T$$

$$x_2 = [\int \Delta f_2 dt, \Delta f_2, \Delta X_{\omega 2}, \Delta P_2]^T$$

$$x_{21} = \int \Delta f_2 dt, \quad x_{11} = \int \Delta f_1 dt$$

$$A_1 = A_2 = \begin{bmatrix} 0 & 1 & 0 & 0 \\ -3.27 & -0.05 & 6 & 0 \\ 0 & 0 & -3.33 & 3.33 \\ 0 & -5.208 & 0 & -12.5 \end{bmatrix}$$

$$b_1 = b_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 12.5]^T$$

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

$$D_2 = [0 \ 0 \ 0 \ 0]^T$$

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

안정한 계수행렬은 식(3-5) 이다.

$$\Lambda_1 = \Lambda_2 = \begin{bmatrix} -1 & -0.1 & 0 \\ -0.1 & -1 & -0.1 \\ 0 & -0.1 & -1 \end{bmatrix} \tag{3-5}$$

식(3-1), (3-2)의 계수행렬 $\Gamma_1 = \Gamma_2$ 는 상삼각행렬 비영 요소 정하고 대칭성을 이용하여 하삼각행렬로 하고,

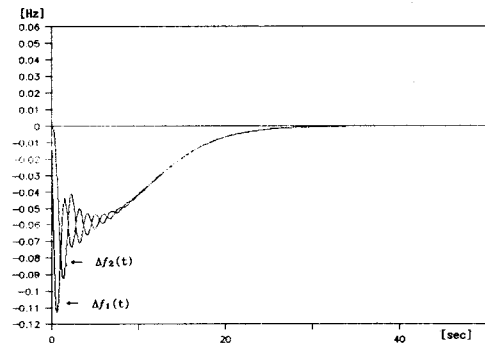
$$\Gamma_1(i, i) = \Gamma_2(i, i) = 0.1$$

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

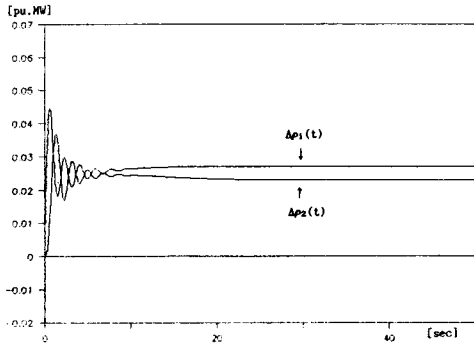
$$\Gamma_1(i, i+2) = \Gamma_2(i, i+2) = 0.01$$

$$\delta_{\theta 1} = \delta_{\theta 2} = \theta_{\theta 1} = \theta_{\theta 2} = 1 \text{ 로 하였다.}$$

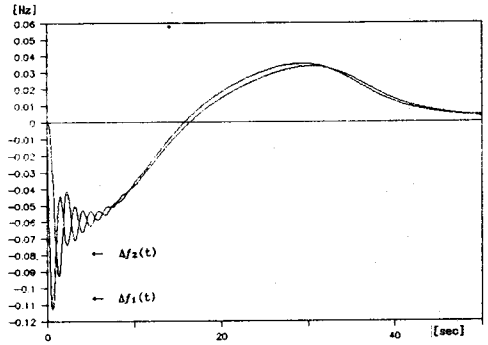
외란 벡터 D_2 는 0 요소인 반면에 D_1 은 비영요소가 있도록 하여 제어영역 1 에서만 부하변동이 생겼을때를 고려하여, 식(2-6a,c,d), 식(3-1), 식(3-2)를 이용하여 상호연계 특성을 지닌 시스템의 주파수 편차와 발전변분에 대하여 불안정도와 안정도를 보았다.(그림 3)



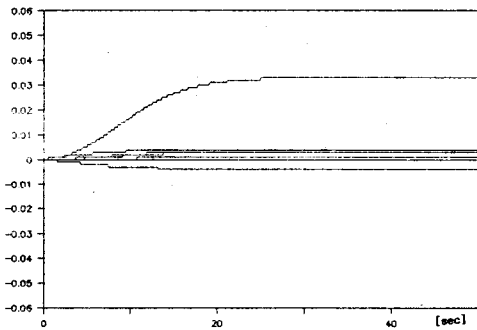
A. 주파수 편차



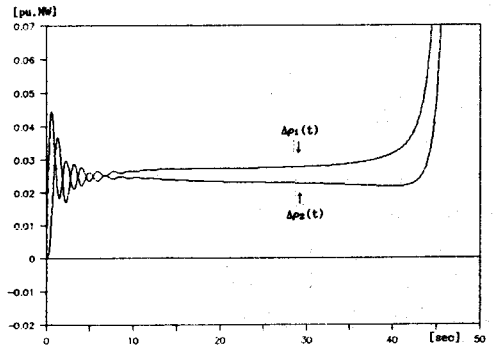
B. 발전 전력의 변분



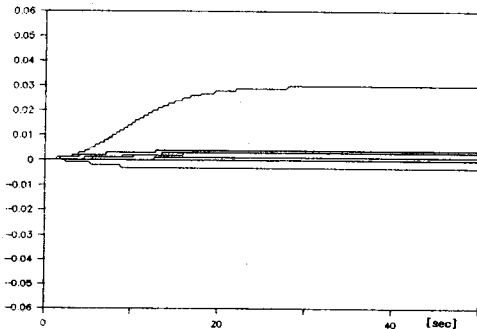
A. 주파수 편차



C. 매개 변수 θ_1 변화



B. 발전 전력의 변분



D. 매개 변수 θ_2 변화

그림 4. 4차 상호 연계된 시스템의 직접 적응 제어

그림 3. 4차 상호 연계된 시스템의 분할 적응 제어

4. 결 론

각 부시스템의 출력 오차에 적분기를 도입하여 기준 입력으로 하였을 때, 전력 계통은 아주 미소한 연계특성을 갖고 있더라도 직접 적응제어기법은 분할 적응제어 시스템에 적용하였을 때 전력 변분과 주파수 편차, 매개변수가 불안정하게 되었다. 그러나 분할 적응 제어법은 안정하게 수렴하였다.

참고 문헌

1. C.E.Fosha and O.I.Elgerd, " The Megawatt-Frequency Control Problem - A New Approach Frequency Control Problem - A New Approach via Optimal Control Control Theory." Proc Power Ind. Computer Appl. Conf., pp. 123-132, 1969.
2. F.A.Ioannou, " Decentralized Adaptive Control of Interconnected Systems." IEEE Tran. on Automatic Contr. Vol. AC-31, No.4, pp. 291-298, 1986.
3. 임 화영, " 출력 피이드백에 의한 전력계통의 최적 주파수 제어 ." 박사학위 논문, 1983.
4. K.S.Narendra and L.S.Valavani, " Stable Adaptive Controller Design-Direct Control ", IEEE Train.on Automatic Contr., Vol.AC-23, No.4, pp.570-583, 1978.
5. K.S.Naredra, Y.J.Lin and L.Valanvani, " Stable Adaptive Controller Design-Part II :Proof of Stability. ", IEEE Trans. Automatic Contr., Vol.AC-25.No.3, Jan.1980.
6. D.D.Siljak, Large-Scale Dynamical Systems: Stability and Structure. Amsterdam, The Netherlands : North-Holland, 1978.