

# 최적 PID 제어기에 의한 2지역 전력계통의 부하주파수 제어특성에 관한 연구

論文
43~5~2

## Load Frequency Control Characteristic of 2-Area Power Systems by Optimal PID Controller

鄭亨煥\*·李浚拆\*\*·安秉喆\*\*\*·王龍泌\*\*\*·金海在§  
 (Hyeng-Hwan Chong·Joon-Tark Lee·Byung-Chul An·Yong-Peel Wang·Hae-Jae Kim)

**Abstract**—This paper describes for the applicability of optimal PID controller to the load frequency control of 2-area power systems. The proposed optimal PID controllers are designed by the optimization technique of P.I.D's gain coefficients using the relatively ingenious simplex method, and we have considered the system sensitivity for the optimal gains and the stable effects of systems to speed regulation changes. This PID controller for load frequency control systems with exciter shows better performances and robustness than conventional tie-line bias controller.

**Key Words** : PID Controller, Simplex Method, Speed Regulation, Robustness

### 1. 서론

최근의 전력계통은 전력수요의 급증으로 규모가 복잡하고 대형화 되어감에 따라 연락선에 흐르는 전력조류도 심하게 변동하는 경향이 있다. 이 때문에 주파수가 상승 또는 저하하게 되어 전력계통의 안정도가 떨어지고 이에 대한 제어가 불가피하다. 특히 전자기기의 광범위한 이용에 따라 주파수의 안정유지에 대한 필요성이 점점 높아지고 있으며, 이러한 고정도 주파수 제어의 요구에 따라 현대 제어 이론을 이용한 제어기 설계 및 제어성능을 향상시키려는 노력이 이루어지고 있다.[1]

O. I. Elgerd와 C. E. Fosha[2]에 의해 부하주파수 제어계의 동특성 응답을 개선시키기 위하여 현대의 최적제어 이론을 이용한 선형 레귤레이터의 설계기법이 제시되었다. 그 후 이 방법을

기초로 하여 F. D. Galiana[3] 등은 계통의 외란이 클 경우에 있어서의 상태 추종제어 기법을 제시하였으며, J. Nanda[4] 등은 연계계통에 있어서 조속기-터어빈계의 이득계수와 시정수의 최적치를 선정하고 이들의 변화가 안정도에 미치는 영향을 해석한 바 있다. A. Bose[5] 등은 부하주파수 조절오차에서 매개변수의 효과에 관하여 연구하였으며, Y. Mizutani[6]는 부하주파수가 목표치에 추종하도록 PI제어 방식을 적용하였으나 속응성이 없는 단점을 보였다.

한편, W. Spendley[7]는 미지변수가 많은 경우와 제약조건이 없는 경우에 유리한 최적화 기법인 단체법(simplex method)을 보고하였으며, J. A. Nelder와 R. Mead[8] 등은 이 단체법을 구체적으로 수식화하였다. 그 후 B. W. Hogg와 Q. H. Wu[9] 등은 수정된 단체법으로 처음 동기 발전기에 대한 비례(P)-적분(I)-미분(D) 요소로 구성된 PID형 전압 조정기 파라미터 최적화에 이용하였고, 필자는 1지역 주파수 제어계통에 비례-적분-미분 제어기(이하 PID 제어기)를 이용하여 외란 발생시 주파수의 수렴특성을 고찰하였다.[10]

\*正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 教授·工博  
 \*\*正會員 : 東亞大 工大 電氣工學科 助教授·工博  
 \*\*\*正會員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 博士課程  
 §正會員 : 巨濟專門大學 電氣科 助教授·工博

接受日字 : 1993年 9月 14日  
 1次修正 : 1993年 12月 31日  
 2次修正 : 1994年 3月 5日

본 논문에서는 PID 제어기를 2지역 주파수 제어계통에 응용하였으며, 단체법을 이용하여 각

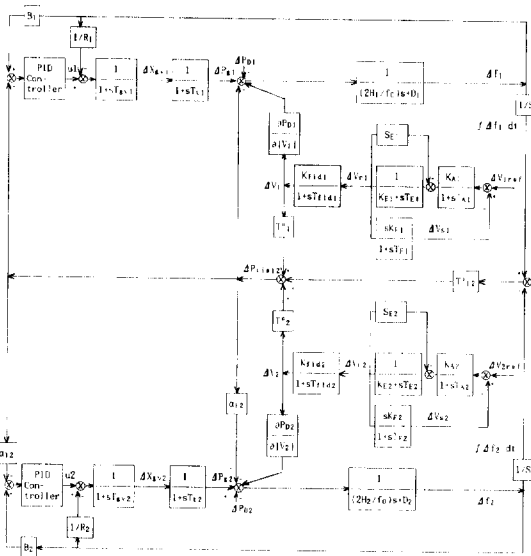


그림 1 PID제어기로 구성된 2지역 전력계통도  
**Fig. 1** Block diagram of 2-area power systems with PID controllers

이득계수를 최적화하고 외란이 발생한 경우 주파수의 특성을 고찰하였다.

이득계수의 변화에 대한 평가지수의 감도를 구하여 시스템에 대한 강인성(robustness)을 고찰하였으며, 조속기의 속도 조정률을 변화시켜 제한되는 주파수 편차량의 정도에 따른 제어특성을 해석하였다. 또한 중전의 TBC(tie-line bias control)[11, 12]방식과도 비교하여 단체법의 설계에 의한 PID 제어기 적용 가능성을 해석하였다.

### 2. 주파수 제어의 동특성 모델

전력계통의 어느 한 지역에서 부하의 변동으로 전력 공급의 불균형이 생기면 그 지역의 주파수가 변화하고, 또한 연계된 인근 지역의 주파수도 영향을 받는다. 미소 외란에 의한 동특성은 선형 근사화할 수 있고, 제어대상 시스템은 선형 시불변이라고 가정한다.

본 연구에서 사용한 2지역 제어계의 모델은 그림 1과 같다.[13, 14]

그림 1의 계통에 외란으로 전력 공급의 불균형이 생긴 경우, i지역의 전력 평형 방정식은 식

(1)과 같다.

$$\frac{2H_i}{f_0} \cdot \frac{d\Delta f_i}{dt} + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tiei} = \Delta P_{gi} - \Delta P_{Di} \quad (1)$$

여기서 i지역과 인근지역 j에 대한 연락선 조류(Tie-Line Power)  $\Delta P_{tiei}$ 는 식(2)와 같으며, 발전기-터빈-조속기계에서의 응답은 식(3) 및 (4)와 같다.

$$\Delta P_{tiei} = \sum_{j=1}^n T_{ij}^* \left( \int \Delta f_j dt - \int \Delta f_i dt \right) \quad (2)$$

$$\frac{d\Delta P_{gi}}{dt} = -\frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{gi} + \frac{1}{T_{gi}} \Delta X_{gvi} \quad (3)$$

$$\frac{d\Delta X_{gvi}}{dt} = -\frac{1}{T_{gvi}} \Delta X_{gvi} - \frac{1}{T_{gvi} R_i} \Delta f_i + \frac{1}{T_{gvi}} u_i \quad (4)$$

i지역과 j지역간의 기준전력의 비율  $\alpha_{ij}$ 라고 할 때

$$\alpha_{ij} = -P_{ji}/P_{ti} \\ \Delta P_{tiei} = \alpha_{ij} \Delta P_{tiej} \quad (5)$$

이며, 각 지역에 IEEE Type 1의 여자시스템을 포함시키고, 전압변동 효과를 고려하면 실제 부하변동은  $\Delta P_{tiei} + \Delta V_i \cdot \partial P_{Di} / \partial |V_i|$ 가 된다. 이때의 각 벡터요소 및 계수행렬은 다음과 같다.

$$\dot{\mathbf{X}} = \mathbf{A}\mathbf{X} + \mathbf{B}\mathbf{U} \quad (6)$$

$$\dot{\mathbf{X}} = \left[ \int \Delta P_{tie12} \int \Delta f_1 dt \Delta f_1 \Delta P_{g1} \Delta X_{g1} \Delta V_1 \right. \\ \left. \Delta V_{r1} \Delta V_{s1} \int \Delta f_2 dt \Delta f_2 \Delta P_{g2} \Delta X_{g2} \Delta V_2 \right. \\ \left. \Delta V_{r2} \Delta V_{s2} \right]' \quad (7)$$

$$\dot{\mathbf{U}} = \left[ u_1 \ u_2 \ \Delta V_{1ref} \ \Delta V_{2ref} \right]' \quad (8)$$

### 3. PID 제어기의 최적화

#### 3.1 최적화 알고리즘

적용되는 제어시스템을 설계하거나 시스템의 설계를 향상시키는 경우 어느 목적이든 평가지수(performance index)는 측정되어야 한다. 따라서 평가지수가 한계값 또는 최소값에 도달하도록 시스템 변수들이 조정되었을 때 이 시스템은 최적시스템이라 평가할 수 있다. 이러한 제어

성능을 고찰하기 위하여 평가 함수를 다음과 같이 정의한다.

$$J(U) = \sum_{t=0}^N [X'(t)QX(t) + U'(t)RU(t)] \quad (9)$$

여기서 N은 샘플링 주기에 따라 결정되는 큰 수, X는 상태벡터, U는 제어벡터, Q는 준정정행렬, R은 정정행렬이다.

비례(P), 적분(I), 미분(D) 3개의 독립요소로 구성된 PID제어법칙의 일반적인 형식은 식(10)과 같다.

$$u_i(t) = \left[ y_i(t) + \frac{1}{T_i} \sum_{k=0}^t y_i(k)T + T_D \frac{y_i(t) - y_i(t-1)}{T} \right], \quad i=1, 2 \quad (10)$$

여기서  $u_i(t)$ 는 제어신호,  $y_i(t)$ 는 입력신호,  $K_P$ 는 비례 이득값,  $T_i$ 는 적분시간,  $T_D$ 는 미분시간, T는 샘플링 주기(sampling period)이다.

식(10)은 제어신호  $u(t-1)$ 와의 관계로부터 식(11)로 쓸 수 있다.

$$u_i(t) = u_i(t-1) + K_{Pi} [y_i(t) - y_i(t-1)] + K_{Ii} y_i(t) + K_{Di} [y_i(t) - 2y_i(t-1) + y_i(t-2)] \quad (11)$$

$$\Delta u_i(t) = u_i(t) - u_i(t-1) \quad (12)$$

$$\left. \begin{aligned} K_i &= T/T_i \\ K_D &= T_D/T \end{aligned} \right\} \quad (13)$$

다지역 제어계에 대한 제어기의 입력신호는 식(14)와 같이 한다.

$$y_i(t) = B_i \Delta f_i - \Delta P_{refi} \quad (14)$$

여기서  $B_i (= D_i + 1/R_i)$ 는  $i$ 지역( $i=1, 2$ )의 주파수 안정화 계수이다.

설계과정에서, 동특성에 대한 잔류편차를 줄이기 위하여 바이어스 신호  $u_{bi}(t)$ 를 이용하면 식(11)은 식(15)와 같이 쓸 수 있고, 이를 점차 안정하게 개선시키기 위한 적정계수  $\rho$ 를 이용하여 식(16)과 같이 정의한다.[9,15]

$$u_i(t) = u_{bi}(t) + \Delta u_i(t) \quad (15)$$

$$u_{bi}(t) = u_{bi}(t-1) + \rho \Delta u_i(t) \quad (16)$$

$$u_{imin} < \Delta u_i < u_{imax}, \quad 0 < \rho < 1$$

이상의 제어법칙에서, 최적화 대상인 제어기 이득계수 K는 식 (17)과 같다.

$$K = [K_{P1}, K_{I1}, K_{D1}, K_{P2}, K_{I2}, K_{D2}] \quad (17)$$

따라서 평형 운전점 부근의 미소 교란에 대한 평가함수 J의 값을 구하고, 이 값이 최소가 되는 그 때의 K의 값을 제어기의 최적 이득계수로 선정한다.

최소의 평가지수에 의해 최적계수를 구하는데 필요한 최적화 기법으로는, 비교적 단순하면서도 계산시간을 단축시킬 수 있는 단체법을 이용하였다.

### 3.2 최적 시스템의 감도

최적화 과정에 따라 설계된 이득계수에 대하여 시스템의 강인성을 고찰하기 위한 감도함수(sensitivity function)를 이용한다. 즉 각 이득계수  $K_{PiDi}$ 의 변화에 대한 평가함수 J의 감도를 식(18)과 같이 정의한다.[16, 17]

$$\begin{aligned} S_k^J &= \frac{K_{PiDi}}{J} \cdot \frac{\partial J}{\partial K_{PiDi}} \\ &\cong \frac{K_{PiDi}}{J} \cdot \frac{\Delta J}{\Delta K_{PiDi}} \end{aligned} \quad (18)$$

감도의 크기로부터 이득계수의 조정이 계통안정도 향상에 미치는 기여도를 파악할 수 있으며, 또한 전달함수 및 입·출력 관계에 대한 운전조건과 계통 파라미터의 변화에 대한 효과를 결정하는데 이용할 수 있다. 또한 감도가 작은 이득계수를 갖는 시스템일수록 강인성이 높은 시스템이라 평가할 수 있다.

## 4. 해석 및 결과고찰

### 4.1 이득계수의 최적화

2지역 PID 제어계의 이득계수  $K_{Pi}$ ,  $K_{Ii}$ ,  $K_{Di}$ 의 최적값을 찾기 위하여, 최적화 기법의 하나인 단체법을 이용하였다. 부하전력의 미소 변동에 따른 평가함수를 결정하고 이 값을 최소로 하는 K의 계수를 선정, 2지역 계통에 적용하여 주파수의 동특성을 고찰하였다. 시뮬레이션에 이용한 계통정수는 표 1과 같으며, 이득계수의 최적화

표 1 계통정수

Table 1 System parameters

$f_0 = 60\text{Hz}$	$T_{Rv1} = T_{Rv2} = 0.08\text{sec}$
$T_{I1} = T_{I2} = 0.3\text{sec}$	$D_1 = D_2 = 0.0083\text{p.u.Mw/Hz}$
$H_1 = H_2 = 5.0\text{sec}$	$R_1 = R_2 = 2.4\text{Hz/p.u.Mw}$
$T^*_{I2} = 0.545\text{p.u.Mw/Hz}$	$T^*_{1} = T^*_{2} = 0.05\text{p.u.Mw/Hz}$
$S_{E1} = S_{E2} = 1.25$	$T_{f1d1} = T_{f1d2} = 6.17\text{sec}$
$K_{f1d1} = K_{f1d2} = 0.57$	$T_{E1} = T_{E2} = 0.5\text{sec}$
$K_{E1} = K_{E2} = -0.05$	$T_{A1} = T_{A2} = 0.0\text{sec}$
$K_{A1} = K_{A2} = 25.0$	$T_{F1} = T_{F2} = 1.0\text{sec}$
$K_{F1} = K_{F2} = 0.04$	$P_{r1} = P_{r2} = 2,000\text{Mw}$
$\alpha_{12} = P_{r1}/P_{r2} = -1.0$	$\Delta P_{D1} = 0.01, \Delta P_{D2} = 0.0\text{p.u.}$
$\partial P_{D1}/\partial  V_1  = \partial P_{D2}/\partial  V_2  = 1.0\text{p.u.}$	

과정을 포함한 계산 흐름도는 그림 2와 같다.

4.2 결과 고찰

상태변수는  $X = [\int \Delta P_{ue12} \int \Delta f_1 dt \Delta f_1 \Delta P_{R1} \Delta X_{Rv1} \Delta V_1 \Delta V_{r1} \Delta V_{s1} \int \Delta f_2 dt \Delta f_2 \Delta P_{R2} \Delta X_{Rv2} \Delta V_2 \Delta V_{r2} \Delta V_{s2}]'$ 이며 이 때의 상태 가중치는  $Q = \text{diag}[10, 10, 10, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 10, 10, 1, 1, 1, 1, 1]$ 로 하였다. 또 제어변수는  $U = [u_1 u_2 \Delta V_{1ref} \Delta V_{2ref}]'$ 이며 제어 가중치는  $R = \text{diag}[1, 1, 1, 1]$ 로 선택하였고 샘플링 시간은  $T = 0.01[\text{sec}]$ 이다. 최적화 과정에서의 외란은 1, 2지역 모두  $0.01[\text{p.u.}]$ 의 단위계단함수로 하였으며, 이 때 제어신호의 극한값은  $u_{\max} = 0.2P_{m0}, u_{\min} = -0.2P_{m0}$ 로 하였다. 이득계수인  $K_{P_i}, K_{I_i}, K_{D_i}(i=1, 2)$ 의 초기값으로는  $K_0 = [1.0, 0.1, 1.0, 1.0, 0.1, 1.0]'$ 로 선택하였으며, 상하의 제한치는 고려하지 않았다. 단체법에 의해 얻어진 최적의 이득계수는  $K^* = [90.81149, 0.02426, 1.51814, 90.81149, 0.02423, 1.51814]'$ 로 나타났으며, 평가지수의 최솟값은  $J = 0.453439[\text{p.u.}]$ 이었다.

그림 3은 이득계수가 계통의 안정도에 미치는 영향 또는 기여도를 평가하기 위하여 각각을  $\pm 50\%$  증감시킨 경우의 평가지수 곡선이며, 100%인 지점이 설계한 각 이득계수의 최적지점이다. 두 지역의 제어기 이득계수인 비례, 적분, 미분 요소가 동일하거나 비슷하게 나타났기 때문에 거의 겹쳐진 모습을 보였다. 그림 3에서 알 수 있는 바와 같이, 설계대상의 변수가 많은 경우 단체법에 의한 이득계수의 최적화 과정이 매우 효과적임을 알 수 있다.

또한 표 2는 최적의 이득계수에서 5% 증가한 지점의 평가지수에 대한 감도를 나타낸 것이다. 미분요소인  $K_D$ 의 변동이 가장 완만함을 보이고 있으며 감도 또한 낮게 나타났다. 따라서 미분요소가 계통의 안정도에 미치는 기여도가 가장 크음을 알 수 있고, 강인성이 높은 요소로 해석된다.

그림 4는 속도 조정률 R의 변화시 각 이득계수의 증감에 따른 평가지수를 나타낸 것으로 조정률이 낮을수록 평가지수가 작게 나타났다. 결국 조정률이 낮을수록 주파수 바이어스계수 B가 크게 되고 조정능력이 커져서 주파수 제어가 우수하게 됨을 알 수 있다. 또한, 표 3에서 속도조정률의 변화시 최적의 이득계수와 평가지수를 나타내었으며, 비례 요소인  $K_P$ 의 변동이 큰 반면에 적분, 미분요소인  $K_I, K_D$ 는 변화가 적었다. 따라서 그림 4와 표 3을 종합해 볼 때, 속도 조

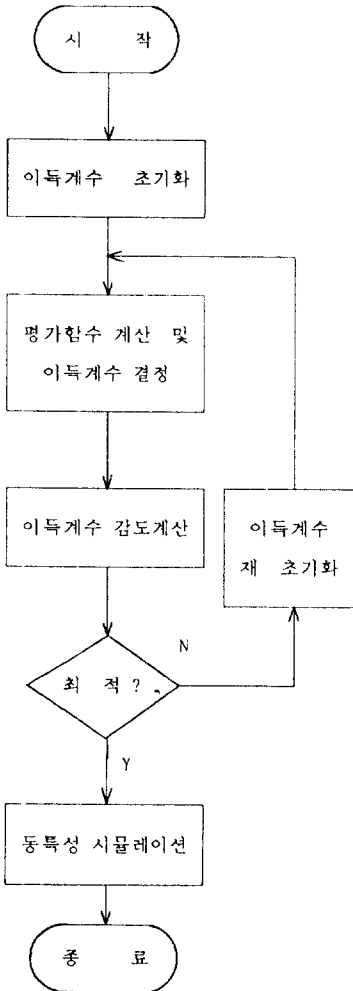


그림 2 계산 흐름도  
Fig. 2 Calculation flowchart

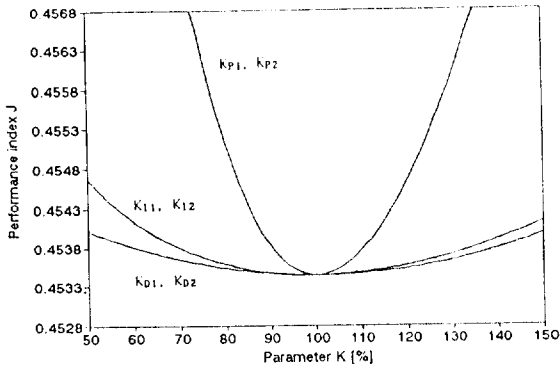


그림 3 평가지수곡선

Fig. 3 Performance indices due to changes of optimal gain

표 2 평가지수와 감도

Table 2 Performance indices

(P.I.=4.534390E-1) and sensitivity

Parameters	105% P.I.	Sensitivity
$K_{P1}$	4.537610E-01	3.660889E-03
$K_{I1}$	4.534740E-01	4.416728E-04
$K_{D1}$	4.544590E-01	2.208364E-04
$K_{P2}$	4.537570E-01	3.572817E-03
$K_{I2}$	4.534746E-01	4.416732E-04
$K_{D2}$	4.534590E-01	2.208364E-04

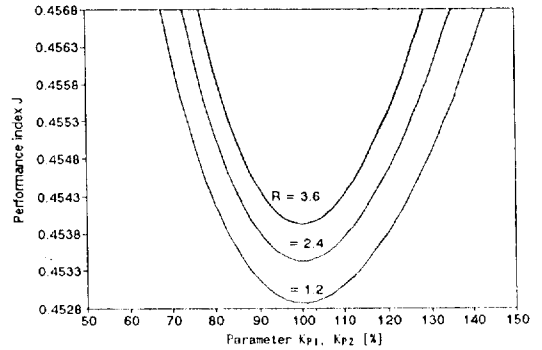
표 3 속도 조정률 변화시의 최적계수와 평가지수

Table 3 Optimal gains and performance indices due to changes of speed regulation factor

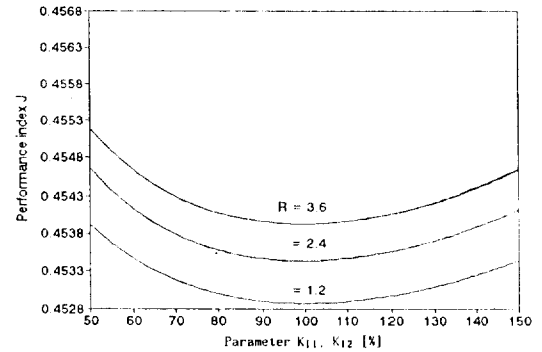
R	1.2	2.4(기준)	3.6
$K_{P1}/K_{P2}$	42.62415/42.62415	90.81149/90.81149	138.97340/138.96000
$K_{I1}/K_{I2}$	0.01102/0.01101	0.01243/0.01242	0.01286/0.01286
$K_{D1}/K_{D2}$	1.83022/1.83022	1.51815/1.51815	1.43964/1.43964
P.I.	4.528675E-01	4.534390E-1	4.539335E-1

정률이 낮을수록 평가지수가 작게 나타나 비교적 안정효과가 개선되었으며 시스템에 대한 감도는 거의 변화가 없음을 알 수 있다.

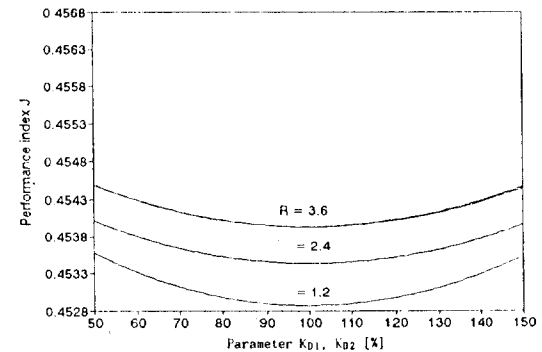
그림 5는 작은 외란( $\Delta P_{D1}=0.01, \Delta P_{D2}=0.0$ [p.u.])을 단위계단 함수로 가한 경우의 응답특성이다. 그림 5(a)는 부가한 외란과 각 지역의 주파수 특성이며, 기존의 TBC방식과 비교해 볼 때



(a)  $K_{P1}, K_{P2}$



(b)  $K_{I1}, K_{I2}$



(c)  $K_{D1}, K_{D2}$

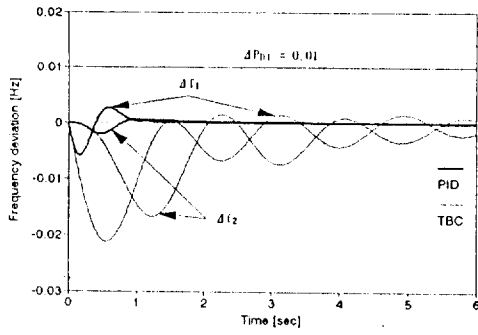
그림 4 속도 조정률 변화에 따른 평가지수

Fig. 4 Performance indices due to speed regulation changes

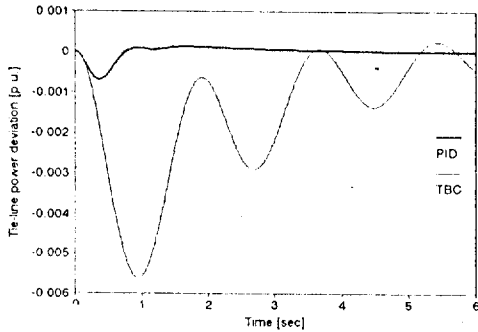
양호한 수렴성을 보이고 있다.

그림 5(b)는 두 지역간의 연락선 조류편차를 나타내며, 그림 5(c)는 각 지역의 PID제어기에 대한 제어량을 나타낸다.

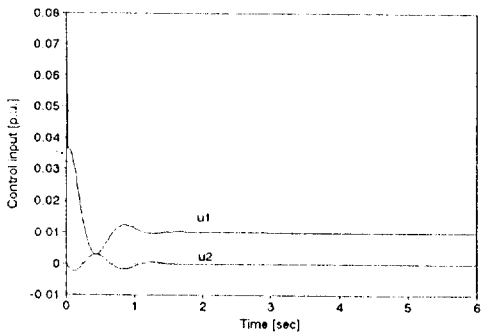
그림 6은 대체로 큰 외란( $\Delta P_{D1}=0.05, \Delta P_{D2}=0.0$ [p.u.])을 단위계단 함수로 가한 경우이며 역



(a)  $\Delta f_1, \Delta f_2$



(b)  $\Delta P_{tie12}$



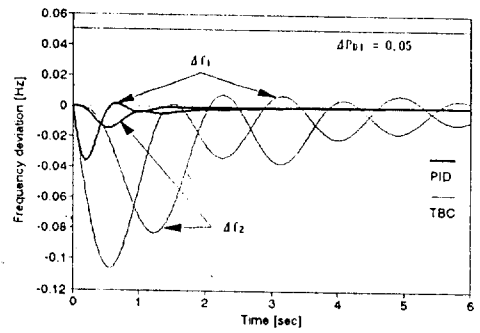
(c)  $u_1, u_2$

그림 5 외란 발생시  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie12}, u_1, u_2$ 의 응답

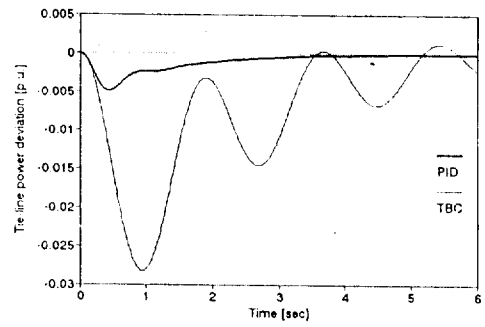
Fig. 5 Responses of  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie12}, u_1, u_2$   
( $\Delta P_{D1}=0.01, \Delta P_{D2}=0.0$ [p.u.] )

시 우수한 특성을 보이고 있다.

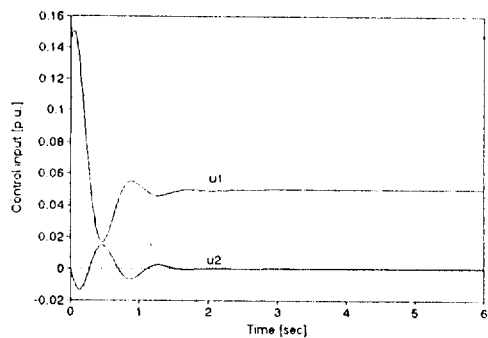
그림 7은 1지역에  $\Delta P_{D1}=0.05$ [p.u.]( $\Delta P_{D2}=0.0$ [p.u.])의 외란을 200.0[ms]동안 가한 경우, 속도조정률 변화시의 주파수 특성이다. 조속기의 불감폭 및 발전량 증가를 제한치는 고려하지 않았지만, 표 3에서 알 수 있듯이 조정률이 낮을수록 평가지수가 작게 나타났으며, 응답특성에 대한 효과가 높음을 알 수 있다.



(a)  $\Delta f_1, \Delta f_2$



(b)  $\Delta P_{tie12}$



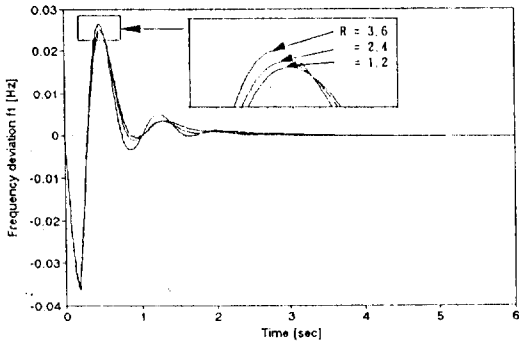
(c)  $u_1, u_2$

그림 6 외란 발생시  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie12}, u_1, u_2$ 의 응답

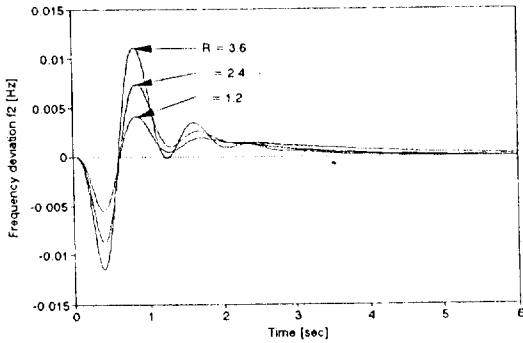
Fig. 6 Responses of  $\Delta f_1, \Delta f_2, \Delta P_{tie12}, u_1, u_2$   
( $\Delta P_{D1}=0.05, \Delta P_{D2}=0.0$ [p.u.] )

### 5. 결론

최적화 기법의 하나인 단계법을 이용하여 PID 제어기의 이득계수를 설계하고, 이를 2지역 전력제동에 적용하여 각 지역 주파수의 동특성을 해석하였으며, 또한 최적화한 이득계수의 변화에 대한 감도함수를 도입하여 시스템에 미치는 기여도 및 강인성을 해석하였다. 또한 속도 조정률



(a)  $\Delta f_1$



(b)  $\Delta f_2$

그림 7 외란이 200ms 동안 발생한 경우의  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  응답

Fig. 7 Responses of  $\Delta f_1$ ,  $\Delta f_2$  against load disturbance  $\Delta P_{D1}=0.05$ ,  $\Delta P_{D2}=0.00$  [p.u.] duration 200ms

의 변화가 계통에 미치는 영향을 고찰하고 외란의 변화 및 TBC방식과도 비교하여 PID제어기의 적용 가능성을 해석하였다.

주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 최적화한 이득계수 중 미분요소인  $K_D$ 의 감도가 낮게 나타났으며, 계통에 미치는 기여도가 높은 강인성을 보였다.
- 2) 속도 조정률이 낮을수록 평가지수가 작게 나타났고 비교적 안정효과가 높았으며, 시스템에 대한 감도는 거의 변화가 없었다.
- 3) 다양한 외란의 변화에 대해서도 수렴성이 우수하였으며, 종래의 TBC방식에 비해서 제어효과가 높았다.

참 고 문 헌

[ 1 ] G. Shirai, S. Ohtsuka, "Load Frequency Control for Multi-Area Electric Energy

Systems using Decomposition of Information Structure", IEE J, Vol. 99, No. 7, pp. 1-8, 1979.

[ 2 ] O. I. Elgerd, C. E. Fosha, "Optimum Megawatt-Frequency Control of Multiarea Electric Energy system", IEEE Trans, PAS-89, No. 4, pp. 556-563, 1970.

[ 3 ] F. D. Galiana, "State Adaptation in Power System Control", IEEE. Trans, Vol. PAS-92, pp. 1670-1678, 1973.

[ 4 ] J. Nanda, B. L. Kaul, "Automatic Generation Control of an Interconnected Power System", PROC. IEE, Vol.125, No.5, 1978.

[ 5 ] A. Bose, I. Atiyah, "Regulation Error in Load Frequency Control", IEEE. Trans, Vol. PAS-99, No. 2, pp. 650-656, 1980.

[ 6 ] Y. Mizutani, "Suboptimal Control for Load Frequency Control of P-I Type using Area-Decomposition and Aggregation Method", IEE J, Vol. 100, No. 1, pp. 9-16, 1980.

[ 7 ] W. Spendley, G. R. Hext, F. R. Himsforth, "Sequential Application of Simplex Designs in Optimization and Evolutionary Operation", TECHNOMETRICS, Vol. 4, No. 4, pp. 441-460, 1962.

[ 8 ] J. A. Nelder, R. Mead, "A Simplex Method for Function Minimization", The Computer Journal, Vol. 7, pp. 308-317, 1965.

[ 9 ] B. W. Hogg, Q. H. Wu, E. Swidenbank, "Optimal PID Automatic Voltage Regulator for Synchronous Machine", Int. J. Control, Vol. 50, No. 6, pp. 2635-2644, 1989.

[ 10 ] 김해재, "전력계통에 있어서 동기발전기에 대한 최적주파수 제어에 관한 연구", 저체전문대학 논문지, 창간호, pp.121-130, 1993.

[ 11 ] H. Cohn, "Some Aspects of Tie-Line Bias Control on Interconnected Power Systems", AIEE Trans, Vol. 75, pp. 1415-1436, 1957.

[ 12 ] G. Shirai, "A Method of Load Frequency Control Coordinating with Conventional Tie-Line Bias Control", IEE J. Vol.100, No.12, pp. 23-30, 1980.

[ 13 ] 문영현, et al., "최적선형 추적법에 의한

부하-주파수 제어”, 대한전기학회 논문지, 제38권 2호, pp. 83-92, 1989.

- [14] 정형환, et al., “전력계통 주파수 제어를 위한 최적 PID제어기 적용”, 대한전기학회 하계학술대회 논문지(A), pp. 113-117, 1992.
- [15] C. A. Smith, A. B. Corripio, Principles

and Practice of Automatic Process Control, John Wiley & Sons, 1985.

- [16] F. J. Hale, Introduction to Control System Analysis and Design, Prentice Hall, Englewood Cliffs, 1988.
- [17] R. C. Dorf, Modern Control Systems, Addison-Wesley, 1989.

## 저자 소개



**정형환(鄭亨煥)**

1941년 1월 19일생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 동아대 공대 전기공학과 교수 및 당학회 부산지부장.



**이준탁(李浚拆)**

1956년 11월 21일생. 1979년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1988년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 동아대 공대 전기공학과 조교수.



**안병철(安秉喆)**

1963년 6월 2일생. 1988년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1990년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정



**왕용필(王龍泌)**

1966년 8월 25일생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**김해재(金海在)**

1957년 5월 29일생. 1980년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1993년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 현재 거제전문대학 전기과 조교수.