

전력계통 주파수 제어를 위한 최적 PID 제어기 적용

김해제* · 왕용필** · 조급식** · 정동일** · 정형환**
 * 거제전문대학 전기과 ** 동아대학교 전기공학과

Application of Optimal PID Controller for
 the Frequency Control of Power Systems

H. J. Kim* · Y. P. Wang** · K. S. Cho** · D. I. Chung** · H. H. Chung**
 * Koje Junior College ** Dong-A Univ.

Abstract

This paper is described to the application of PID controller for the frequency control of power systems.

The proposed optimal PID controller is designed to obtain gain parameters of P, I, D's coefficients according to optimization technique using the relatively ingenious simplex method. The PID controller which is applied to one area, tie-line two area with(or without) exciter is showed good performance rather than that of optimal PI controller.

1. 서론

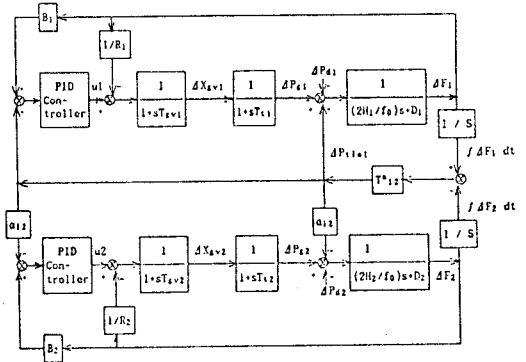
전력계통의 주파수는, 전력의 수요와 공급의 균형에 따라 안정하지만, 이 수급의 균형이 무너지면 상승 또는 저하하게 되어 이에 대한 제어가 불가피하다. 특히, 최근들어 전자기기의 광범위한 이용에 따라 점점 주파수의 안정유지에 대한 필요성이 높아지고 있다. 이러한 고정도의 주파수 제어가 요구되는 추세에 맞추어 현대의 최적제어 이론을 이용한 설계법에 따라 제어성능을 향상시키려는 노력이 활발히 이루어지고 있다[1,2].

본 연구에서는, 제어분야에서 그 우수성을 인정받고 있는 비례-적분-미분 제어기(PID Controller)를 전력계통의 주파수제어에 응용하고자 한다. 이를 위해, 최적이론에 따라 PID 제어기의 이득계수를 구성하였으며, 최적화 기법으로는 비교적 정교한 단체법(Simplex Method)을 이용하였다[3, 4, 5, 6].

1기 및 2기 연계된 조속기계에 적용하여, 각지역 주파수의 동특성을 고찰하였으며, 외란의 변화 및 비례-적분제어기와도 비교하여 PID제어기의 우수성을 입증하고자 한다.

2. 주파수 제어의 동특성 모델

전력계통의 어느 한지역에서 부하의 변동으로 전력수급의 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. Elgerd와 Fosha가 제안한 제어계를 중심으로 한 다지역 제어계에 대한 모델을 구성하면 그림 1과 같다[1,2].



- T_{gv} : Speed governor time constant
- T_t : Turbine time constant
- D : Load-frequency constant
- H : Inertia constant
- R : Self-regulation of generator
- u : Control signal
- T^*_{12} : Tie-line power flow constant
- ΔP_d : Change in load of generator
- Δf : Frequency deviation
- ΔX_{gv} : Change in governor-valve position
- ΔP_{gi} : Change in steam turbine output
- ΔP_{tie} : Change in tie-line power
- B : Stabilizing signal coefficient ($-1 < B < 0$)

그림 1 PID 제어기를 가진 전력계통의 다지역 주파수 제어 모델
 Fig. 1 Block Diagram of Power System with PID Controller

미소 외란에 의해 전력 수급의 불균형이 생긴 경우, i 지역의 전력평형 방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{2H_i}{f_0} \frac{d \Delta f_i}{dt} + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tie i} = \Delta P_{gi} - \Delta P_d i \quad (1)$$

여기서 i 지역과 인근지역에 대한 연계전력(Tie-Line Power) $\Delta P_{tie i}$ 는 식(2)와 같으며, 발전기-터어린-조속기계에서의 응답은 식(3), (4)와 같다.

$$\Delta P_{tie i} = \sum_{j=1}^n T^*_{ij} (\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_j dt) \quad (2)$$

$$\Delta u_i(t) = \Delta u_{bi}(t) + \Delta u'_i(t) \quad (13)$$

$$u_{bi}(t) = u_b(t-1) + \rho \Delta u'_i(t), \quad 0 < \rho < 1 \quad (14)$$

이상의 제어법칙에서, 최적화 대상인 제어 파라메타 K는 식(15)과 같다.

$$K = [K_p, K_i, K_d, \gamma]^T \quad (15)$$

단, $K_{p1}=K_{p2}$, $K_{i1}=K_{i2}$, $K_{d1}=K_{d2}$, $B_1=B_2$

$\Delta u(t) = G(y(t), K)$ 라 둘 때 평가함수는 식(16)과 같으며, 계통의 미스 외란에 대한 평가함수 J의 값이 최소가 되는 K의 값을 최적계수로 선정한다.

$$J(K) = \sum_{t=0}^N [X^T(t)QX(t) + G^TRG] \quad (16)$$

4. 해석 및 결과고찰

4-1. 제어 파라메타의 최적화

PID 제어계의 3요소, K_p , K_i , K_d 와 주파수 안정화 계수 B의 최적계수를 찾기 위하여, 최적화 기법의 하나인 단체법(simplex method)을 이용하였다. 개략적인 흐름도는 그림 2와 같다.

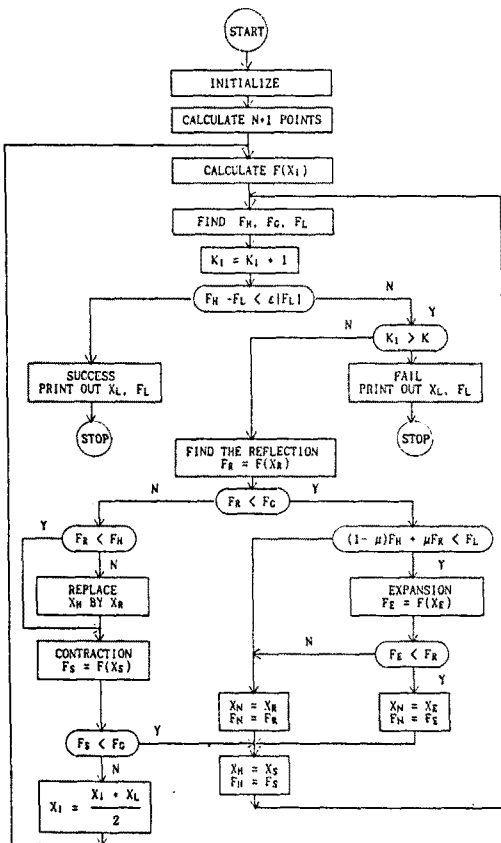


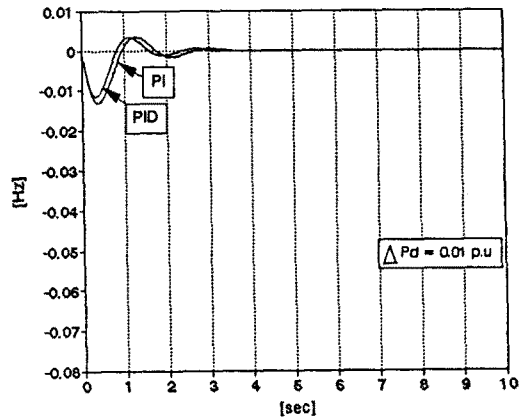
그림 2. Flowchart of the Simplex Method

4-2. 결과 고찰

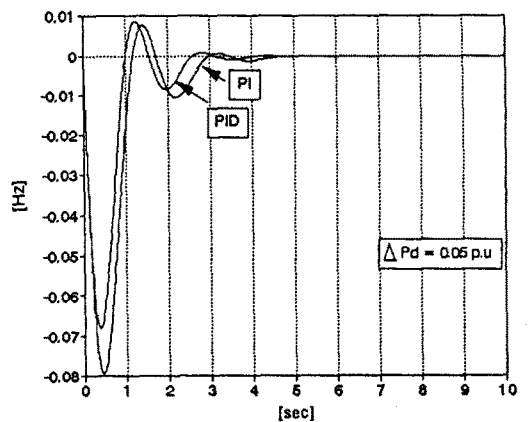
부하전력의 미스 변동에 따른 평가함수를 결정하고 이 값을 최소로 하는 K의 계수를 선정, 단일지역, 다지역 및 여자시스템을 포함한 계통에 적용하여 주파수의 동특성을 고찰하였다.

4-2-1 단일 지역 제어계

식 (16)의 평가함수에서 상태변수는 $X_1 = [\Delta f_1, \Delta P_{s1}, \Delta X_{sV1}]^T$ 이며, 상태 가중치는 $Q = \text{diag}[1, 1, 10]$, 제어 가중치는 $R = 1$, 샘플링 시간은 $T=0.01[\text{sec}]$ 이다. 최적화 파라메타인 K_p , K_i , K_d 및 B의 초기값으로는 시행착오에 따라 $K_0 = [15, 0.03, 0.5, -0.7]^T$ 로 선택하였으며, 이 때 simplex 법에 의한 최적값은 $K^* = [15.003, 0.033, 0.503, -0.697]^T$ 로 나타났다. 최적 비례-적분제어기(PID Controller)와 비교한 주파수 응답은 그림 3(a)와 같으며 또한 외란을 $\Delta P_{d1} = 0.05 \text{ p.u}$ 로 크게한 경우의 응답은 그림 3(b)와 같다. 외란의 큰 변화에도 불구하고 대체로 수렴성이 우수한 결과를 보이고 있다.



(a) $\Delta P_{d1} = 0.01 \text{ p.u}$

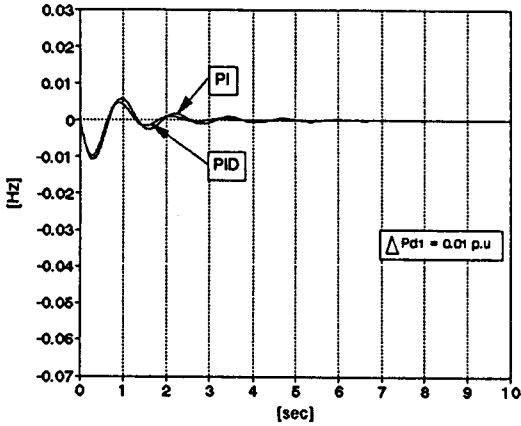


(b) $\Delta P_{d1} = 0.05 \text{ p.u}$

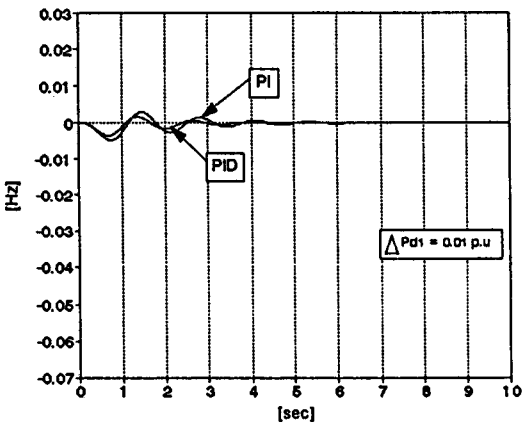
그림 3 단일 지역의 주파수 응답
Fig. 3 Response of Frequency Δf_1

4-2-2 다지역 제어계

파라메타의 초기값은 $K_0 = [10, 0.01, 0.5, -0.7]$, 최적값은 $K^* = [14.101, 0.032, 0.722, -0.968]$ 이며, $Q = \text{diag}[0, 0, 1, 1, 1, 1, 1, 0, 0]$, $R = \text{diag}[1, 1]$ 이다. 그림 4는 외란이 $\Delta P_{d1} = 0.01$, $\Delta P_{d2} = 0.0$ p.u. 그림 5는 $\Delta P_{d1} = 0.05$, $\Delta P_{d2} = 0.0$ p.u. 일 때의 응답 곡선이며, 역시 단일지역의 경우와 같은 결과를 얻을 수 있었다. 다만, 그림 4(a)는 그림 3(a)와 비교해 볼 때 reaching time은 빠르지만, overshoot와 settling time은 뒤떨어진 결과를 나타내었다.

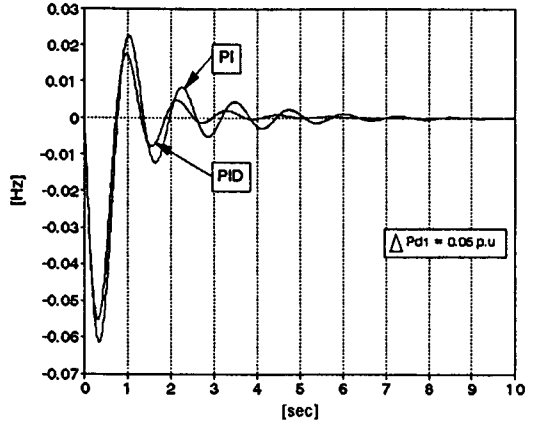


(a) Δf_1

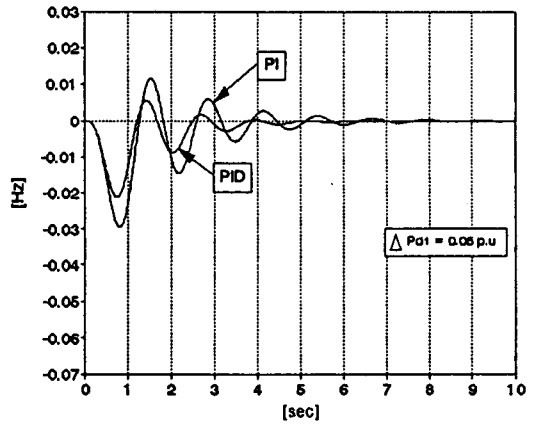


(b) Δf_2

그림 4 다지역 제어계의 주파수 응답
Fig. 4 Response of Frequency $\Delta f_1, \Delta f_2$



(a) Δf_1



(b) Δf_2

그림 5 다지역 제어계의 주파수 응답
Fig. 5 Response of Frequency $\Delta f_1, \Delta f_2$

4-2-3 여자기 시스템을 포함한 경우

파라메타의 초기값은 $K_0 = [30, 0.01, 0.5, -0.9]$, 최적값은 $K^* = [30.030, 0.040, 0.530, -0.870]$ 이며, $Q = \text{diag}[5, 5, 1, 1, 5, 5, 1, 1, 1, 1]$, $R = \text{diag}[1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1, 1]$ 이다. 그림 6(a)는 다지역 제어계에서 여자기를 포함한 경우와 그렇지 않는 경우의 주파수 응답곡선이며, (b)는 $\Delta P_{d1} = 0.05$, $\Delta P_{d2} = 0.0$ p.u. 일 때의 응답이다. 결국, 전압변동 효과를 고려한 경우가 가장 우수한 제어효과가 있음을 알 수 있다.

5. 결론

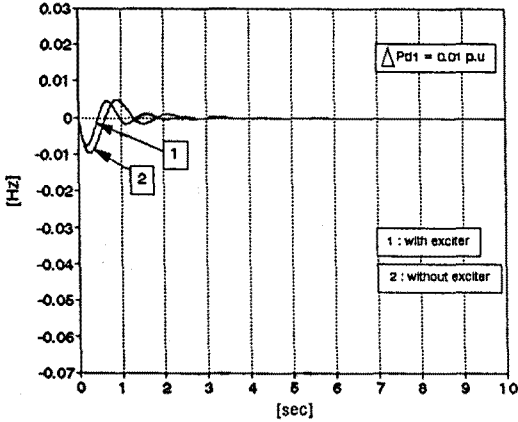
최적화 기법의 하나인 Simplex 법을 이용하여 PID 제어기의 이득계수를 설계하고, 이를 전력계통의 주파수 제어에 적용하였다.

최적화 파라메타의 초기값 설정에 어려운 점이 있었으나 대체로 단시간내에 수렴 특성을 보였으며, 여자기 시스템을 포함시켜서 전압변동 효과를 고려한 경우 더욱 우수한 제어 효과를 이룰 수 있었다. 또한, PI 제어기에 비해서 그리고 큰 부하변동에도 신속하게 수렴하는 속용성을 나타내었다.

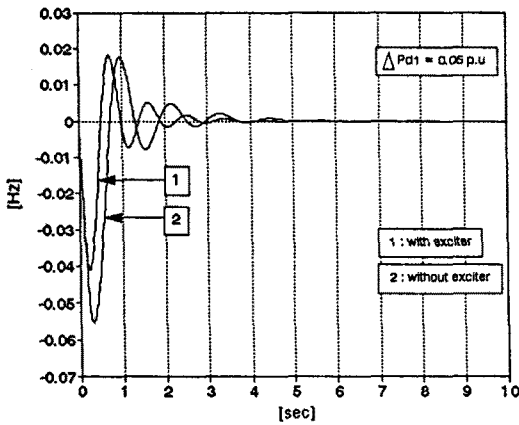
다만, 여자기 시스템을 포함한 경우, 다른 경우에 비해서 파라메타의 최적값이 큰 값에서 우수한 특성을 나타낸 것이 특이한 점이라 할 수 있으며, 이에 대한 계속적인 연구가 주목된다.

참고 문헌

- [1] 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.
- [2] 水谷芳史, "地域·分割縮約手法を用いたPI形LFCの最適制御", 일본전기학회논문지B, 100권 1호, pp. 9-16, 1980.
- [3] J.A.Nelder & R.Mead, "A simplex method for function minimization", The Computer Journal, 7, pp. 308-317, 1965.
- [4] James N. Siddall, "Optimal Engineering Design, Principles and application", Marcel Dekker, Inc., 1982.
- [5] F.Radke & R.Isermann, "A Parameter-adaptive PID-controller with Stepwise Parameter Optimization", Automatica, Vol. 23, No. 4, pp. 449-457, 1987.
- [6] Richard.C.Dorf, "Modern Control Systems", Addison-Wesley, 1989.
- [7] B.W.Hogg & Q.H.Wu & E.Swidanbank, "Optimal PID automatic voltage regulator for synchronous machine", Int. J. Control, Vol. 50, No. 6, pp. 2635-2644, 1989.
- [8] Carlos.A.Smith & Armando.B.Corripio, "Principles and Practice of Automatic Process Control", John Wiley & Sons, 1985.



(a) df_1



(b) df_1

그림 6 디지털 제어계의 주파수 응답

Fig. 6 Response of Frequency with, without Exciter