

퍼지 추론을 이용한 다지역 계통의 부하주파수제어

°정동일* · 주석민* · 이준탁* · 이권순* · 정형환* · 김해재**
 * 동아대학교 전기공학과 ** 거제 전문대학 전기과

Load Frequency Control of Multiarea Power System Based on Fuzzy Inference Technique

D.I. Chung* · S.M. Joo* · J.T. Lee* · K.S. Lee* · H.H. Chung* · H.J. Kim**
 * Dong-A Univ. ** Kojje Junior College

Abstract

This paper presents an optimal Fuzzy Control Technique to control the load frequency control of multiarea power system with a given stepwise load disturbance.

The related simulation results show that the optimized fuzzy control technique are more effective than the conventional control technique (TBC, Optimal Control and etc) for reduction of load frequency deviation in transient and steady-state, and for minimization of settling time.

1. 서론

근년 전력계통의 부하주파수제어 특성을 개선하기 위하여 현대제어이론을 이용한 여러가지 실용적인 제어 수법이 개발되고있다. 이들은 급격한 부하 변동에 대해 최적의 과도 특성과 정상 상태에서의 주파수 편차를 최소화 하고, 연락선 조류 편차를 허용 범위내로 수렴 시키기 위해 계통내의 발전기 출력을 조정하는 것이다(1).

이 목적을 달성하기 위한 종래의 기법은 각 지역의 주파수 편차 및 연락선 전력의 편차를 검출하고, 각각의 값에 대한 PID제어를 실시하는 FFC, TBC 라고 알려진 제어 방식을 적용해왔고, 최근에는 최적 제어 이론을 이용해서 부하주파수제어를 보다 효과적으로 수행하기 위해 많은 연구가 행해져 오고 있다. 이중 TBC는 적분 동작을 부가한 제어 방식으로서 지속적인 외란이 발생해도 주파수 및 연락선 조류가 목표치에 추종하는 것이 가능하지만, 적분형의 동작 때문에 속응성이 없는 단점이 있다. 또한, 최적제어는 최적 레귤레이터 문제로서 정식화된 제어이고, 다지역 전력계통의 동특성을 상태공간 표시에 의해 모델화하고, 각종 평가 함수의 구축하에서 각 지역의 조작량을 결정한다. 이 방식은 과도응답 특성은 우수하지만, 부하가 지속적으로 변화하는 경우는 주파수 및 연락선의 조류에 정상편차가 생기는 문제가 있다. 또한, 계통에서 얻어진 모든 정보는 일괄처리되어 기억되어야 하므로 레벨 상호간의 정보 전달량이 많아지고 계산알고리즘이 복잡해진다(2).

한편, 시스템의 선형성, 비선형성을 불문하고 전문가의 지식, 경험을 제어 규칙으로하여 이론화 하는 것이 가능하고 애매한 추론에 의해 제어 동작을 결정하는 퍼지 제어가 공학의 각 분야에 있어서 주목을 받고 있다. 이것은 퍼지 제어가 수식 모델에 구속되지 않는 유연성이 있는 수법이고, 언어적 제어 규칙을 이용해서 단시간에 제어 입력을 결정할 수 있는 장점이 있다(3).

따라서, 본 논문에서는 다지역 전력계통의 부하주파수제어를 위해서 퍼지추론에 필요한 기본 이론을 고찰하고 최적 Rule을 선정하여 오차 및 오차 변화율, 제어 입력 등에 대한 Scale Factor를 평가지표에 의해 조절한 최적 퍼지 제어기를 구성하고 Simulation을 통해서 종래의 제어 기법인 TBC 및 최적제어 기법 보다 부하 외란에 대한 속응성이 좋고 부하주파수 최대 편차량의 경감 및 Reaching Time과 Settling Time을 최소화 시킬 수 있음을 보이고자 한다.

2. Model 계통(4)

부하 주파수제어 모델은 종래, 계통의 관성, 부하주파수 특성, 계통간의 동기화력을 기초로하여 정식화 하고 있다. 본 논문에서는 Fig.1과 같은 Eigerd씨의 2 지역 계통의 모델을 적용하고 1,2지역의 계통 Parameter들은 각각 동일한 특성을 가지는 것으로 한다. 각 지역의 극소적인값을 이용해서 그 지역의 주파수 및 연락선 전력을 제어하는 분산형 부하주파수 제어인 지역간 오차 $\Delta P_{1,1,2}$ 를 입력 신호로 하는 적분제어로서 표현되는 TBC 기법과 출력 피드백 수법으로써 목적함수 J를 최소화하는 제어량 u를 입력신호로 하는 최적 제어 기법 및 오차와 오차 변화율을 이용한 If-Then 형식의 Rule에 기초한 퍼지 제어 기법을 이 모델 계통에 적용하여 Simulation을 통해서 각 특성을 비교, 검토하고자 한다.

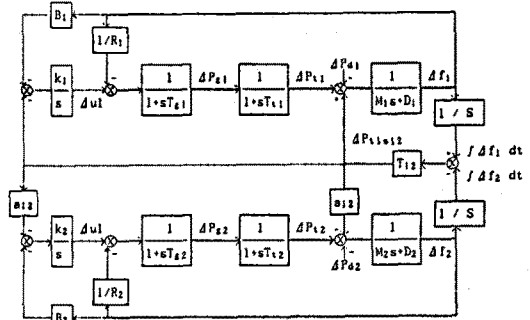


그림 1 부하주파수제어를 위한 다지역 계통의 블록선도
 Fig. 1 Block-diagram of Multiarea Power System

3. 종래의 제어 기법

3-1. TBC(4,7)

TBC 방식에서는 자기지역의 주파수 편차 Δf_1 와 연락선 조류편차 $\Delta P_{t1 \rightarrow 1j}$ 를 검출해서 식(2)와 같이 지역 제어오차(ACE)를 계산하여 적분동작을 부가한 제어방식이다.

$$ACE_1 = \Delta P_{t1 \rightarrow 1j} + B_1 \cdot \Delta f_1 \quad (2)$$

여기서 B_1 는 계통 특성정수 (주파수 바이어스 $B_1 = D_1 + 1/R_1$ [puMW / Hz]) 이다.

그림 1의 점선 부분은 TBC기법을 나타내며 이것의 상태 벡터는 식(3)와 같다.

$$x_1 = [\Delta P_{t1 \rightarrow 12} dt \ \Delta f_1 dt \ \Delta f_1 \ \Delta P_{t1} \ \Delta P_{s1} \ \Delta f_2 dt \ \Delta f_2 \ \Delta P_{t2} \ \Delta P_{s2} \ \Delta ACE_1 dt \ \Delta ACE_2 dt]^T \quad (3)$$

이상의 TBC기법을 적용한 Simulation 결과는 그림 2와 같다.

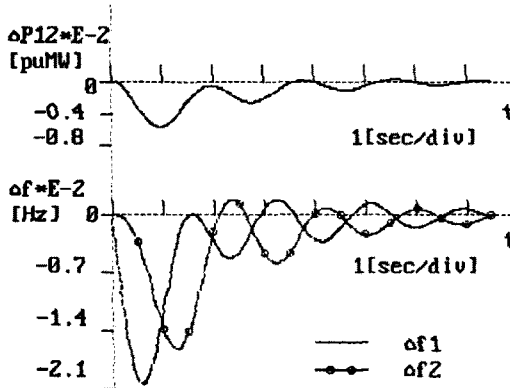


그림 2 TBC에 의한 $\Delta P_{t1 \rightarrow 12}$ 및 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 의 응답
Fig. 2 Responses of $\Delta P_{t1 \rightarrow 12}$ and $\Delta f_1, \Delta f_2$ by TBC

3-2. 최적 제어(5)

그림 1의 모델 계통은 다음과 같은 선형 시스템의 상태 미분 방정식으로 표현할 수 있다.

$$\dot{x} = Ax + Bu \quad (4)$$

- 단, x : 상태 벡터 ($nx1$)
- u : 제어벡터 ($mx1$)
- A : 상태 계수행렬 (nxn)
- B : 제어 계수행렬 (nxm)

이고, 여기서 식(4)을 최적제어하기 위한 목적함수를

$$J = \frac{1}{2} \int_0^{\infty} (x^T Q x + u^T R u) dt \quad (5)$$

- 단, Q : 준정정 대칭행렬(상태 가중행렬) (nxn)
- R : 정정 대칭행렬(제어 가중행렬) (mxm)

로 하고, 식(4)를 최소화 하는 최적제어 입력 u 는 다음과 같이 주어진다.

$$u = -Kx \quad (6)$$

$$K = R^{-1}B^T P$$

P 는 식(7)을 만족하는 정상 Ricatti 방정식의 해이다.

$$PA + A^T P - PBR^{-1}B^T P + Q = 0 \quad (7)$$

이것에 대한 Simulation 결과는 그림 3과 같다.

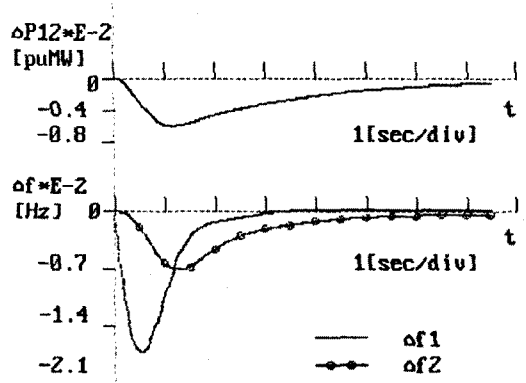


그림 3 최적제어에 의한 $\Delta P_{t1 \rightarrow 12}$ 및 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 의 응답
Fig. 3 Responses of $\Delta P_{t1 \rightarrow 12}$ 및 $\Delta f_1, \Delta f_2$ by Optimal Control

4. 퍼지 제어 기법

4-1. 기본이론

전력계통의 부하주파수제어를 위한 퍼지제어 시스템의 일반적인 구성은 그림 4와 같다.

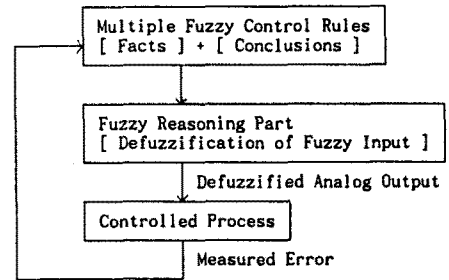


그림 4 퍼지제어 알고리즘의 블록선도
Fig. 4 Block-diagram of Fuzzy Control Algorithm

정식화한 퍼지명제의 예는 식(8)과 같이 표현된다(3).

i th Rule: If x_1 is A_1 and x_2 is B_1 then y is C_1	$A_1 \times B_1 \rightarrow C_1$
전 제 : x_1 is A_1' and x_2 is B_1'	$A_1' \times B_1'$
결 론 : y is C_1'	C_1'

(8)

단, $A_1, A_1', B_1, B_1', C_1, C_1'$ 는 전체집합 E 의 논 의 영계 X, X', Y, Y' 의 부분집합으로 퍼지집합 개념에 따른다.

이때 x_1, x_2 의 비퍼지값 (x_1, x_2)이 주어지면 y 의 합성치는 Braae-Rutherford의 중심법에 의해 y 의 추론치 y_0 는 다음과 같이 구할수 있다(3).

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_{A1}(x_1) \wedge \mu_{B1}(x_2)] \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_{A1}(x_1) \wedge \mu_{B1}(x_2)]} \quad (9)$$

여기서 $\bar{y}_i (i=1, 2, \dots, n)$ 는 Membership 함수 $\mu_c(y) (i=1, 2, \dots, n)$ 가 최대치를 취할 때의 값이다.

4-2. 전력계통에의 적용 및 검토

전력계통의 부하주파수를 제어하는 퍼지 제어를 설계하기 위해서는 먼저 일반적인 Rule이 생성 되어야 한다.

본 시스템에서 사용한 퍼지 제어기의 구성은 그림 5와 같고 퍼지 제어 Rule은 다음과 같은 형태이다.

$$\text{If } e \text{ is } A_{11} \text{ and } ed \text{ is } A_{12} \text{ Then } \Delta u \text{ is } B_1 \quad (10)$$

여기서, e 는 제어대상 출력치와 목표치와의 편차이고, ed 는 편차의 변화율이며 Δu 는 제어 시스템의 제어량을 표시한다.

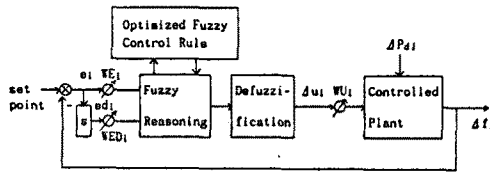


그림 5 퍼지 제어를 부가한 다지역 계통의 블록선도
Fig. 5 Block-diagram of Multiarea Power System with optimized Fuzzy Controller

그림 1의 1 지역에서 부하변동이 생겼을때 제어를 하지않은 상태의 부하주파수 동특성과 위상면 궤적은 그림 6 및 7과 같고, 이를 기초로 하여, 우선, 부하 변동이 있는 지역 1에 대해서만 초기 퍼지 Rule을 설정하고, 문헌[1]에서 제안한 기법으로 식(11)과 같은 최적 퍼지 Rule을 결정할 수 있으며 그 적용 결과는 그림 8과 같다.

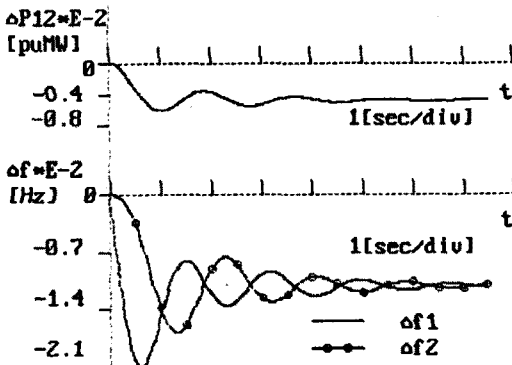
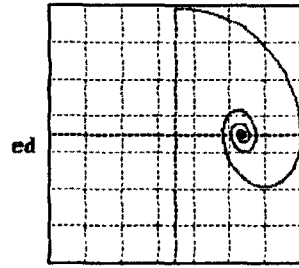


그림 6 의란 (ΔP_{d1}) 발생시 $\Delta P_{1:12}$ 및 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 의 응답 ($\Delta u_1=0$)
Fig. 6 Uncontrolled responses of $\Delta P_{1:12}$ 및 $\Delta f_1, \Delta f_2$ against ΔP_{d1}



e

그림 7 ΔP_{d1} 발생시 Δf_1 에 대한 e, ed 의 위상면 궤적 ($\Delta u_1=0$)

Fig. 7 Uncontrolled e, ed Phase Plane Trajectory of Δf_1 in case ΔP_{d1}

- If e_1 is ZO and ed_1 is PB Then Δu_1 is PB
- If e_1 is PB and ed_1 is ZO Then Δu_1 is PB
- If e_1 is PS and ed_1 is ZO Then Δu_1 is PS (11)
- If e_1 is PS and ed_1 is NS Then Δu_1 is ZO
- If e_1 is ZO and ed_1 is ZO Then Δu_1 is PS

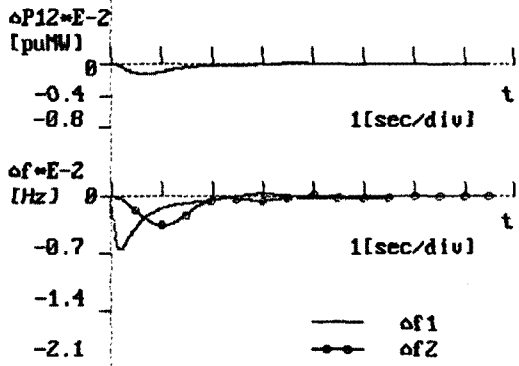


그림 8 SF조정없는 최적 퍼지 Rule에 의한 $\Delta P_{1:12}$ 및 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 의 응답

Fig. 8 Responses of $\Delta P_{1:12}$ 및 $\Delta f_1, \Delta f_2$ by Optimized Fuzzy Rule without adjustment SF

다음에 Reaching Time과 주파수 최대 편차를 더욱 경감시키고 Settling Time을 최소화 하기 위해서 식(12)와 같은 평가지수를 이용하여 적절한 SF(Scale Factor) 즉, WE_1, WED_1 및 WU_1 를 선정하였다.

$$Q_1 = \int_0^{\infty} (r_1 e^2(t) + r_2 u^2(t)) dt$$

$$Q_2 = \frac{\sup |x_1(t) - x_{10}|}{x_{10}} \quad (12)$$

$$Q_3 = \min (t | x_1(t) = x_{10})$$

식(12)에 의해 결정된 1 지역의 각 SF는 $WE_1=0.4, WED_1=0.9, WU_1=1$ 이며 이것을 적용한 Simulation 결과는 그림 9와 같다. 이와 같이 SF를 적용하므로써 Δf_1 및 Δf_2 의 Reaching Time 과 Settling Time을 더욱 경감시킬 수 있을 뿐만 아니라 연락선 전력량도 현저히 줄일 수 있었지만 Overshoot가 다소 크게 나타났다.

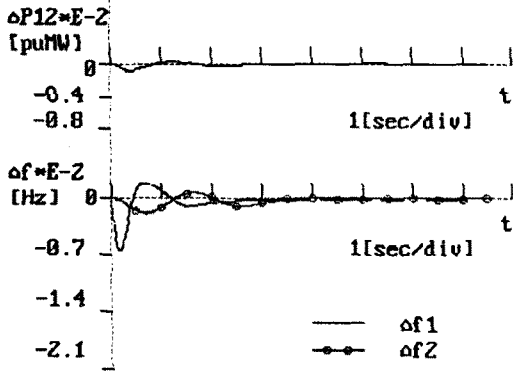


그림 9 1지역에만 퍼지 제어를 한경우의 ΔP_{12} 및 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 의 응답 ($WE_1=0.4, WED_1=0.9, WU_1=1$)
 Fig. 9 Responses of $\Delta f_1, \Delta f_2$ and ΔP_{12} by optimized SF ($WE_1=0.4, WED_1=0.9, WU_1=1$)

따라서, 2 지역에도 1 지역에서의와 마찬가지로 식(13)과

- If e_2 is ZO and ed_2 is ZO Then Δu_2 is ZO
- If e_2 is PS and ed_2 is NS Then Δu_2 is ZO
- If e_2 is PB and ed_2 is ZO Then Δu_2 is PB (13)
- If e_2 is PS and ed_2 is PS Then Δu_2 is PS
- If e_2 is PS and ed_2 is ZO Then Δu_2 is PS

같은 방법으로 최적 퍼지 Rule을 선정하고 SF($WE_2=1.3, WED_2=3, WU_2=1$)를 결정하여 1,2지역 모두 퍼지 제어를 실시한 결과 그림 10과 같이 1 지역에만 퍼지 제어를 한 그림 9 보다 Reaching Time 과 Settling Time이 더욱 경감 되고, Overshoot도 현저히 감소되었음을 나타내고 있다.

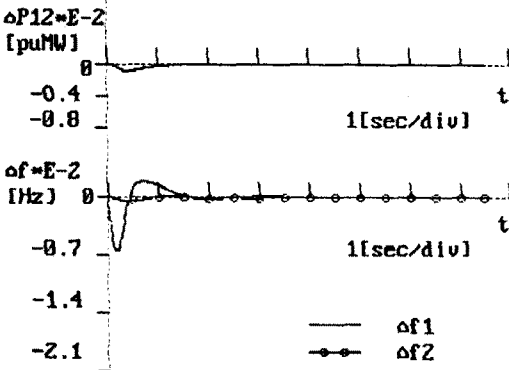


그림 10 1,2지역 모두 퍼지 제어를 한경우의 ΔP_{12} 및 $\Delta f_1, \Delta f_2$ 의 응답 ($WE_1=0.4, WED_1=0.9, WU_1=1, WE_2=1.3, WED_2=3, WU_2=1$)
 Fig. 10 Responses of ΔP_{12} and $\Delta f_1, \Delta f_2$ by optimized SF ($WE_1=0.4, WED_1=0.9, WU_1=1, WE_2=1.3, WED_2=3, WU_2=1$)

5. 결론

다지역 계통의 부하주파수제어에 대한 종래의 제어 기법인 TBC 및 최적 제어와 제한한 제어 기법인 퍼지 제어로서 부하주파수 동특성을 Simulation을 통해서 비교 검토하였다. 그 결과 TBC보다 최적 제어 기법이 주파수 최대 편차 및 Settling Time에서 양호한 특성을 나타내었으나, 최적 퍼지 Rule에 의한 결과가 훨씬 더 좋은 특성을 나타내었다. 또한, 1,2지역 모두 최적 퍼지 Rule을 선정하여 제어한 결과가 1 지역에만 퍼지 제어를 한 것 보다 주파수 편차의 Overshoot량 및 연락선 전력 편차를 현저히 경감 시켰을 뿐만 아니라 Settling Time 및 Reaching Time도 최소화 시킬 수 있었다.

참고 문헌

- [1] 정형환, 이준탁, 김해재, 정동일, "퍼지 추론을 이용한 전력계통의 부하주파수제어", 한국자원개발연구회, pp.147-155, 1992
- [2] Yoshibumi Mizutani, "A Suboptimal Control for Load Frequency Control System Using a Area Decomposition Method", JIEE, Vol. 98, No.12, pp.971-978, 1978
- [3] 菅野道夫 原著: 퍼지제어시스템, 大英社, 1990
- [4] 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
- [5] C.E.Fosha & O.I.Elgerd, "The Megawatt-Frequency Control Problem: A New Approach Via Optimal Control Theory", IEEE Trans, PAS-89, No. 4, pp. 563-557, 1970
- [6] Yoshibumi Mizutani & Yasuyuki Goto, "Area Decomposition Type Load Frequency Control Considering Generation Rate Constraint", JIEE, Vol. 105, No. 4, pp. 399-405, 1985
- [7] Allen J.Wood & Bruce F. Wollenberg: "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, 1984