

퍼지 추론을 이용한 전력 계통의 부하 주파수 제어

°정동일* 김해재* 이준탁* 정형환* 박영식**

* 동아대학교 ** 부산전문대학

Load Frequency Control of Power System

Based on Fuzzy Inference Technique

°D. I. Chung*, H. J. Kim*, J. T. Lee*, H. H. Chung*, Y. S. Park**

* Dong-A Univ. ** Pusan Junior College

ABSTRACT

This paper presents a Fuzzy Control Technique to improve the load frequency control dynamics of a power system for a given load perturbation (step-function waveform).

A related simulation results follow and show that the optimized rules by the proposed technique are effective for reduction of overshoot and deviation of load frequency in steady-state, and for minimization of settling time.

습에 따른 계산시간의 증대 및 Overshoot량이 증가하고 정정시간이 단축되지 못하는 등이 단점으로 지적 할 수 있다.

따라서, 본 논문에서는 Fuzzy 추론에 필요한 기본이론을 고찰하고 오차 및 오차변화율, 입력등에 대한 Fuzzy 변수와 Parameter, 기본 Rule들을 적절히 선정함으로써, Step상의 부하외란에 속응하여 부하 주파수의 Overshoot량을 경감시키고 Settling Time이 최소화 되는 최적 Rule을 선정하는 방법을 소개하고, 이의 타당성을 Simulation을 통해 고찰하고자 한다.

1. 서론

근년, 전력계통의 부하 주파수 제어 특성을 개선하기 위해 현대 제어 이론을 이용한 여러가지 실용적인 제어 수법이 개발되고 있다. 이들은 미소의 부하 변동에 대해 최적의 과도 특성과 정상상태에서의 주파수 오차를 최소화 하는 것으로, Limiter를 이용한 적응 최적 제어기의 경우 발전량 증가율을 제어 조작량으로 취급하여 계산 정도가 우수하고, 계산처리가 빠른 계산기를 이용하지 않으면 안된다. 또한, 최근에 이르러 Takai등은 모델 계통의 동특성 파형을 학습함으로써, Neural Network에 의한 자기 조직화적 Fuzzy 제어기의 자동구성에 관한 연구도 소개 되고 있다. 이는 제어 하고자 하는 전력계통이 부정확한 수학적 모델로 구성된다 할지라도, Fuzzy 제어기는 성공적으로 적용 될 수 있는 장점이 있다. 그러나, 급격한 부하외란에 대해서는 학

2. Fuzzy 추론

전력계통의 주파수 제어를 위한 Fuzzy 제어 System의 일반적인 구성은 Fig.1과 같다.

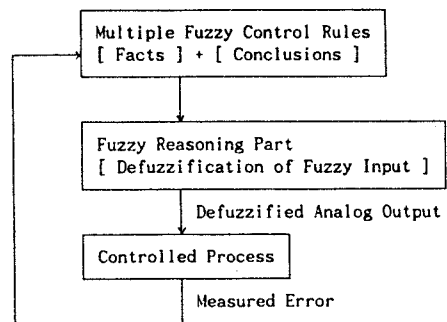


Fig.1 Block Diagram of Fuzzy Control Algorithm

Fuzzy 집합 A의 특성을 나타내는, Membership 함수 μ_A

는 전체집합 E인 단위 폐구간 [0,1]내의 값에 의해

$$\left. \begin{aligned} \mu_A &: E \Rightarrow [0,1] \\ \mu_A(E) &\in [0,1] \end{aligned} \right\} \quad (1)$$

로 표현된다.

그런데, 전체집합 E가 다값인 유한집합 (x_1, x_2, \dots, x_n) 인 경우, Fuzzy 집합 A는

$$A = \sum_{i=1}^n \mu_A(x_i)/x_i \quad (2)$$

로 되고, E가 무한집합인 경우

$$A = \int_E \mu_A(x)/x \quad (3)$$

로 표현된다.

이상에서의 기본적인 Fuzzy 집합의 개념에 근거하여 Fuzzy 명제로 부터, 어느 한 명제를 도출하는 추론법에 는 전제 조건측으로 부터 결론측을 추론하는 Rule형 전향추론법과 Fuzzy관계방정식의 모델화에 기초한 Fuzzy Expert System으로 불리우는 후향 추론법이 있다.

그러나, 중간정도의 애매한 평가를 적극적으로 이용한 대부분의 산업용용 System은 Rule형 전향 추론법에 근거하고 있다. 본 논문에서는 Rule형 전향 Fuzzy 추론법을 채용한다. 이는 If - then 형식의 Rule로 표현되는데 If 뒤에는 전제조건 또는 전건부인 사실과 then 뒤에는 후건부 또는 조작부인 결론으로 구성된다. 이와 같은 사실과 결론에서 정식화한 Fuzzy 명제의 예는 식 (4)와 같이 표현된다.

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 '	$A_1' \times B_1'$ (4)
결 론 : y is C_1'	C_1'

단, $A_1, A_1', B_1, B_1', C_1, C_1'$ 는 전체집합 E의 논 의 영계 X, X', Y, Y' 의 부분집합으로 Fuzzy 집합개념에 따른다.

Mamdani의 방법에 따른 Fuzzy 추론의 결론 C_1' 는 다음과 같이 구해진다.

$$C_1' = (A_1' \text{ and } B_1') \circ$$

$$(A_1 \text{ and } B_1 \rightarrow C_1) \cup$$

$$(A_2 \text{ and } B_2 \rightarrow C_2) \cup$$

$$\vdots$$

$$(A_1 \text{ and } B_1 \rightarrow C_1)$$

$$= (A' \text{ and } B') \circ R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_i$$

$$= [A' \circ (A_1 \rightarrow C_1)] \cap B' \circ (B_1 \rightarrow C_1)] \cup$$

$$\dots \cup [A' \circ (A_1 \rightarrow C_1) \cap B' \circ (B_1 \rightarrow C_1)] \quad (5)$$

$$\mu_{A_1 \times B_1}(x_1, x_2) = \mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(x_2) \quad (6)$$

그러므로

$$\mu_{C_1'}(y) = \max_{x_1} \max_{x_2} [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(x_2) \wedge \mu_{C_1}(y) \wedge \mu_{A_1'}(x_1) \wedge \mu_{B_1'}(x_2)]$$

$$= \max_{x_1} [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{A_1'}(x_1)] \wedge \max_{x_2} [\mu_{B_1}(x_2) \wedge \mu_{B_1'}(x_2)] \wedge \mu_{C_1}(y) \quad (7)$$

Rule i : If x_1 is A_1 and x_2 is B_1 then y is C_1

A_1, B_1, C_1 ($i=1, 2, \dots, n$)는 Fuzzy Set으로 각각의

Membership 함수는 $\mu_{A_1}(x_1), \mu_{B_1}(x_2), \mu_{C_1}(y)$ ($i=1, 2, \dots, n$)를 갖는다.

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

$$y_0 = \frac{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(x_2)] \cdot \bar{y}_i}{\sum_{i=1}^n [\mu_{A_1}(x_1) \wedge \mu_{B_1}(x_2)]} \quad (8)$$

여기서 \bar{y}_i ($i=1, 2, \dots, n$)는 Membership 함수 $\mu_{C_1}(y)$ ($i=1, 2, \dots, n$)가 최대치를 취할때의 값이다.

3. 전력계통 부하 주파수 제어 모델

전력계통의 주파수는 발전기 입력과 출력의 차, 즉 계통전체의 발전력과 수용 전력과의 사이에 불명형이 생겼을 경우는

$$\frac{M}{\omega} \cdot \frac{d\omega}{dt} = P_{in} - P_{out} \quad (9)$$

단, M : 계통의 관성 정수
 P_{in} : 발전기의 입력
 P_{out} : 발전기의 출력

$$+ \begin{bmatrix} \frac{1}{T_g} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix} \cdot u + \begin{bmatrix} 0 \\ 0 \\ \frac{1}{M} \end{bmatrix} \cdot \Delta P_L \quad (11)$$

단, x₁ = ΔP_g
 x₂ = ΔP_m
 x₃ = Δω

로 되고, 미소 부하 변동 ΔP_L이 주어진 경우는

$$\Delta P_g = \Delta P_L + D \cdot \Delta \omega \quad (10)$$

이다.

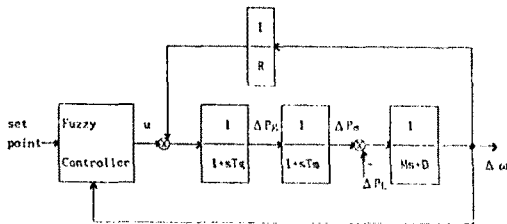
로 된다.

단, ΔP_L : Nonfrequency-sensitive Load change

D · Δω : Frequency-sensitive Load change

이다. 그러나, 본 논문에서는 식(10)에 대한 부하 주파수 문제만을 다룬다.

따라서, 미소 부하 전력 변화에 의해서 생기는 부하 주파수 변화를 제어 하기 위한 제어 Model은 Fig.2과 같이 구성할 수 있다.



- T_g : speed governor time constant (0.08[s])
- T_m : turbine time constant (0.3[s])
- D : load-frequency constant (0.00823[p.u.MW/Hz])
- M : inertia constant (0.01667[p.u.MW · s/Hz])
- R : self-regulation of generator (10[Hz/p.u.MW])
- Δω : angular speed deviation
- ΔP_L : change in load of generator (0.01[p.u.MW])
- ΔP_g : change in governor-valve position
- ΔP_m : change in steam turbine output

Fig.2 Block Diagram of Power System with Fuzzy Controller

이 Model에 기초한 상태 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \dot{x}_1 \\ \dot{x}_2 \\ \dot{x}_3 \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{1}{T_g} & 0 & -\frac{1}{R \cdot T_g} \\ \frac{1}{T_m} & -\frac{1}{T_m} & 0 \\ 0 & \frac{1}{M} & -\frac{D}{M} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} x_1 \\ x_2 \\ x_3 \end{bmatrix}$$

4. FUZZY 제어기의 구성

전력계통의 부하 주파수를 제어하는 Fuzzy제어기를 설계하기 위해서는 먼저 일반적인 Rule의 생성이 전개되어야 한다.

본 System에서 사용한 Fuzzy제어기의 제어 Rule은 다음과 같은 형태이다.

$$\text{If } e \text{ is } A_{i1} \text{ and } ed \text{ is } A_{i2} \text{ Then } u \text{ is } B_i \quad (12)$$

여기서, e는 제어대상 출력치와 목표치와의 편차이고 ed는 편차의 변화분이며 u는 제어 System의 제어량을 표시한다. 이러한 Fuzzy변수를 나타내기 위한 Membership함수는 Fig.3과 같다.

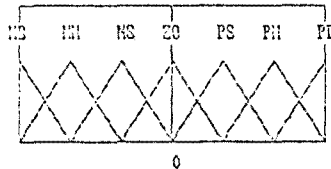


Fig.3 Membership Function of Fuzzy Rule

여기서 사용한 Fuzzy Label의 약어는 다음과 같다.

- PB:Positive Big NB:Negative Big
- PM:Positive Medium NM:Negative Midium
- PS:Positive Small NS:Negative Small
- ZO:Zero

본 제어 모델에 ΔP_L의 부하변동에 대한 주파수의 동특성과 위상면 궤적은 Fig.4와 같으며 이것의 Over-

shoot와 정정시간을 줄이기 위하여 Fig.4로부터 초기 Rule을 설정하고, 이를 제안한 방법의예해 개선시키고자 한다. 여기에 사용되는 기본 생성 제어 Rule은 Table 1과 같다.

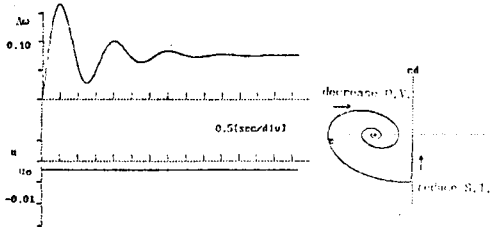


Fig. 4 Dynamic Responses Without Fuzzy Controller (e,u)

Table 1 Generated Base Rule Table

	e							
	ed							
	u							
		NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	PB							PB
	PM							PM
	PS							PS
	ZO	NB	NM	NS	ZO	PS	PM	PB
	NS							NS
	NM							NM
	NB							NB

5. Simulation 결과

Fig.2와 같은 전력계통 부하 주파수 제어 시스템의 주파수 동특성인 Fig.4의 Overshoot를 줄이고 정정시간을 단축 시키기 위하여, Rule수를 3개와 5개로 하였으며, 각각의 경우에 대하여 개선시킨 Rule은 Table 2 및 Table 3과 같고 그 결과는 Fig.5 및 Fig.6에 나타났다.

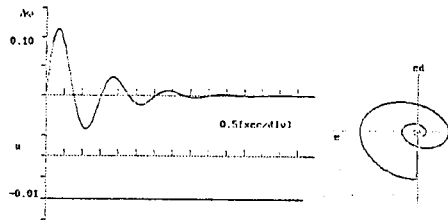
Table 2 3 Rules

		Base Rules	1st improved	2nd improved
	e	ZO NB NS	NB ZO ZO	NB ZO ZO
	ed	NB ZO ZO	ZO PS ZO	ZO PS ZO
	u	NB NB NS	NB ZO NS	NB PS NS
	결과	Fig. 5(a)	Fig. 5(b)	Fig. 5(c)

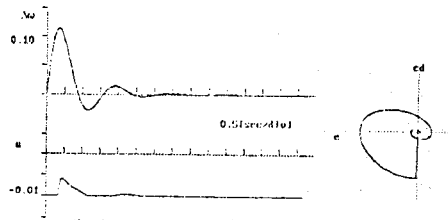
Table 3 5 Rules

		Base Rules					1st improved				
	e	ZO	NB	NM	NS	NM	ZO	NB	ZO	PS	NS
	ed	NB	ZO	PM	ZO	ZO	NB	ZO	PS	ZO	ZO
	u	NB	NB	ZO	NB	NM	NB	NB	PS	PS	NS
	결과	Fig. 6(a)					Fig. 6(b)				

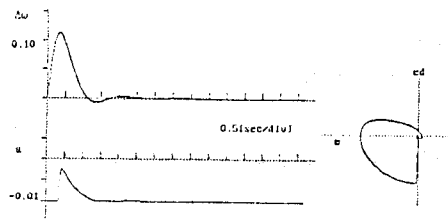
		2nd improved					3rd improved				
	e	ZO	NB	ZO	PS	ZO	ZO	NB	NS	NS	ZO
	ed	NB	ZO	PS	ZO	ZO	NB	ZO	PS	NS	ZO
	u	NB	NB	PS	PS	NS	NB	NB	PM	NB	NS
	결과	Fig. 6(c)					Fig. 6(d)				



(a) for Base Rules



(b) for 1st Improved Rules



(c) for 2nd Improved Rules

Fig. 5 Dynamic Responses and Phase plane Trajectory for 3 Rules

참 고 문 헌

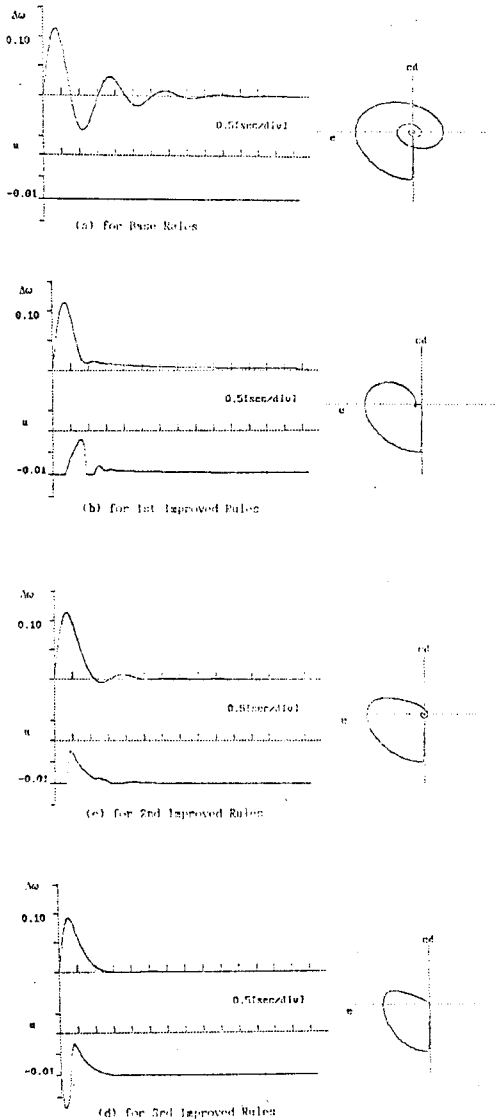


Fig.5 Dynamic Responses and Phase plane Trajectory for 5 Rules

1. Takai et alii: "Self-organizing Fuzzy controllers by Neural Networks", Proceedings of the International Conference on Fuzzy Logic and Neural Network, pp.187-191,1990
2. 이 준탁 외: "Fuzzy Controller 를 이용한 외란 부가 Servo System 제어", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 699-702, 1991
3. 菅野道夫 原著: 퍼지제어시스템, 大英社, 1990
4. Allen J. Wood, Bruce F. Wollenberg: "Power Generation, Operation and Control", John Wiley & Sons, 1984

6. 결 론

본 논문에서는 미소 부하 변동에 대한 전력 계통의 부하 주파수 제어 특성을 개선하기 위한 Fuzzy 제어의 한 수법을 제안하였다. 특히, 초기 선정된 Rule들을 제안한 기법으로 최적화 시킴으로써 step 상의 부하외란에 대응하여, 부하 주파수의 Overshoot량이 현저히 경감되고, 정상상태에서의 주파수 편차를 0으로 할 수 있었을뿐 만 아니라, Settling Time 또한 최소화 됨을 확인하였다.