

파라미터 자기조정 퍼지제어기를 이용한 부하주파수제어

Load Frequency Control using Parameter Self-Tuning Fuzzy Controller

이 준 탁*, 정 동 일**, 안 병 철***, 주 석 민***, 정 형 환****

Joon-Tark Lee*, Dong-Il Chung**, Byung-Chul An***, Seok-Min Joo***, Hyeng-Hwang Chung****

※본 연구는 한국전력공사의 지원에 의하여 수행되었음(과제관리번호 : 92-542).

요 약

이 논문은 전력계통의 부하주파수 제어를 위한 자기조정 퍼지제어기의 설계기법을 제시한다. 제안된 퍼지제어기의 파라미터 자기조정 알고리즘은 퍼지제어기의 추론값과 최적 제어기의 출력값들 사이의 오차를 감소시키는 네 개의 방향 벡터를 사용하는 구배법에 기초를 둔다. 최적 제어기로부터 얻어진 입, 출력 데이터쌍을 사용하여, 퍼지추론 룰의 전건부와 후건부에서의 파라미터들은 제안된 구배법에 의해 자동조정되고 학습되어진다. 시뮬레이션 결과, 제안된 퍼지제어기가 종래의 제어기보다 우수한 제어성능을 보임을 확인 하였다.

ABSTRACT

This paper presents a design technique of self tuning fuzzy controller for load frequency control of power system. The proposed parameter self tuning algorithm of fuzzy controller is based on the gradient method using four direction vectors which make error between inference values of fuzzy controller and output values of the specially selected optimal controller reduce steeply. Using input-output data pair obtained from optimal controller, the parameters in antecedent part and in consequent part of fuzzy inference rules are learned and tuned automatically using the proposed gradient method. The related simulation results show that the proposed fuzzy controller is more powerful than the conventional ones for reductions of undershoot and steady-state load frequency deviation and for minimization of settling time.

I. 서 론

전력계통의 부하주파수 제어는 계통 운용 및 제어에 있어서 주요한 과제중의 하나이며 항상 발생하는 부하 변동에 대해서 각 지역내의 주파수 및 연계선 조류편차를 허용치내로 유지시키기 위하여 계통내의 조정용 발전소의 유효전력 출력을 조정하는 역할을

* 동아대학교 전기공학과 부교수
** 동아대학교 전기공학과 시간강사
*** 동아대학교 전기공학과 박사과정
**** 동아대학교 전기공학과 교수

하고 있다. 전력계통에서 기본적으로 요구되는 사항은 그 품질에 대한 소비자의 욕구를 지속적으로 만족시켜야 한다는 것이다. 따라서, 공급 신뢰도와 함께 전기에너지의 품질을 나타내는 척도인 전압 및 주파수를 허용범위내로 유지시키는 문제에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔다.[1-3]

종래에는 각 지역내의 주파수 편차 및 연계선 조류 편차를 검출하여 PI(비례·적분)형 Feedback 제어, 주파수 편의(偏倚) 연계선 전력제어(Tie-Line Bias Control: TBC), 정주파수제어(Flat Frequency Control: FFC) 등의 AFC(Automatic Frequency Control) 방식이 제안되고 있으며, 지금까지 이 방식들은 주파수 제어 문제에 대해서 충분한 제어효과를 갖고 있는 것으로 인식 되어 왔다.[4]

그러나, 최근 신뢰성이 높고 고품질의 전기 에너지 수요의 급격한 증대와 함께 계통간의 연계가 강화되어 전력계통규모도 광대해지고 복잡해짐에 따라 전력계통의 주파수제어는 새로운 개념의 제어기법을 요구하게 되었다.

특히, 연계된 전력계통전체를 안전하게 운용하기 위해서는 각 지역내의 주파수제어의 질적 향상은 물론, 연계계통의 연계선 조류 제어를 급변하는 부하외란에 대해 신속히 대처해야 하며 그렇지 못할 경우 상시 변동 조류가 대단히 크게 되거나 조류의 동요가 심하게 되어, 전력계통의 안정도를 위협하게 된다. 종래의 AFC에 부가하여 복잡한 연계계통의 연계선 조류편차를 규정치 이하로 억제하는 주파수 제어를 LFC (Load Frequency Control)라고 한다.[5, 6]

이를 위해, 현대제어이론을 이용한 많은 제어사례들이 보고되고 있다. 즉, 1986년 이후 일본의 水谷, 後藤, 上田 등에 의해 행해진 현대제어이론에 기초한 이들 제어수법에서는 일반적인 선형계로 간주하여, 제어조작량을 결정하는데 복잡한 수식을 풀어야 할 필요가 있다. 그러나, 실제의 전력계통은 각 지역간의 연계선 등의 강한 비선형성으로 인해 계통의 해석 및 제어기 설계가 곤란해지게 된다.[7-9]

이들 문제의 해결책으로, 최근 외국에서는 다방면에서 폭넓게 응용되고있는 If-Then 형식의 언어적 퍼지 제어를 LFC계에 적극도입하여 최적제어이론을 비롯한 현대제어이론과 병합하여 사용함으로써 전력계통과 같은 복잡한 수식으로 기술되는 비선형계에

적용키 위한 연구가 급속히 진전되고 있다.

퍼지 제어기는 전문가의 지식 및 경험을 제어규칙으로 이론화하여, 퍼지 추론에 의해 제어동작을 결정하게 된다. 또한 퍼지 제어는 유연성이 있는 제어수법으로 정확한 수식 모델을 취하지 않아도 되고, 언어적 제어규칙을 이용하여 On-Line으로 단시간에 제어입력을 결정할 수 있으므로 급변하는 부하외란 등에 대한 적응특성이 뛰어난 비선형 제어기로서, 전력계통의 각종 비선형성을 보상할 수 있으며 대단히 효과적으로 전력계통의 부하주파수와 연계선조류의 안정화제어에 적용될 수 있다.[10, 11]

한편, 퍼지제어는 초기 및 최적규칙의 선정 및 파라미터 조정 기법, 제어변수의 수량화 Level 선정 및 정상상태에서의 오차상존 등에 있어서 문제점을 갖고 있다. 이 문제를 해결하기 위한 파라미터 조정기법의 하나로 水谷氏등은 추정된 부하외란에 대해 전계통의 평가함수를 최소화하는 알고리즘으로 규격화 파라미터를 선정하고 있다. 그러나, 이 기법은 부하변화시 모두 동일한 등쪽의 멤버쉽함수를 사용하므로 정상상태에서의 수렴성이 나빠지고 부하변화시마다 파라미터 조정이 필요하며, 부하추정기구의 수렴속도 및 정도가 좋지못한 결점을 안고 있다.[12, 13] 따라서, 본 연구에서는 시스템의 선형성, 비선형성에 관계없이 전문가의 지식 및 경험에 기초한 퍼지제어규칙 및 최적 제어기를 기반으로 하여 구배법에 의한 퍼지 제어기의 전건부 및 후건부의 파라미터를 실시간으로 자기조정하여, 수렴속도가 빠르고 정도가 양호한 새로운 형태의 부하추정기를 사용하므로써 어떠한 부하에서도 기존 부하외란에 의해 자기조정된 멤버쉽함수 및 규칙은 그대로 사용할 수 있게한다.[14, 15]

이를 비선형 2지역 전력계통모델의 부하주파수제어에 적용하여 Computer 시뮬레이션을 행하고, 제안한 기법에 의해 파라미터 조정이 가능함을 보이고 종래의 제어기법보다 부하주파수 최대편차량과 연계선 조류편차량의 경감 및 도달시간과 정정시간을 최소화 시킬뿐만아니라 정상상태에서의 잔류편차량을 제거할 수 있음을 보이고자 한다.

II. 구배법에 의한 파라미터 조정

2.1 퍼지추론법

퍼지추론은 중간정도의 언어적인 애매한 평가를 이용하는 것으로, 대부분의 산업 시스템제어에 널리 응용되고 있으며, Rule형 전향 추론법에 근거하고 있다. 따라서, 본 연구에서는 Rule형 전향 추론법에 따라 추론하며, 그 과정은 다음과 같다.

퍼지제어규칙은 If-Then 형식으로, If 뒤에는 전제 조건 또는 전건부인 사실과 Then 뒤에는 후건부 또는 조작부인 결론으로 구성된다. 이를 부하주파수제어 시스템의 k지역에 대해 정식화하면 식(2.1)과 같다.

Linguistic Representation	Mathematical Representation
j^{th} Rule : If X_{1k} is A_{1k} and X_{2k} is A_{2k} Then Y_k is B_{jk}	$A_{1k} \times A_{2k} \rightarrow B_{jk}$
Premise : If X_{1k} is A'_{1k} and X_{2k} is A'_{2k}	$A'_{1k} \times A'_{2k}$
Conclusion : Then Y_k is B'_k	B'_k

(2.1)

단, 퍼지변수 $A_{ijk}, B_{jk}, A'_{jk}, B'_k$ 는 전체 집합 E의 논 의 되어지는 영역의 범위 X, Y, X', Y'의 부분집합이고 '×'는 AND 연산자이다.

전건부 및 후건부에서 사용하는 퍼지변수 A_{ijk} 및 B_{jk} 에 대한 각각의 멤버십 함수는 중심치 a_{ijk}, c_{jk} 및 폭 b_{ijk}, d_{jk} 에 의해 식(2.2)와 (2.3)으로 정의된다.

$$\mu_{A_{ijk}}(X_{ik}) = 1 - \frac{2 \cdot |(X_{ik} - a_{ijk})|}{b_{ijk}} \quad (2.2)$$

$$\mu_{B_{jk}}(Y_k) = 1 - \frac{2 \cdot |(Y_k - c_{jk})|}{d_{jk}} \quad (2.3)$$

이들을 도시하면 그림 2-1과 같다.

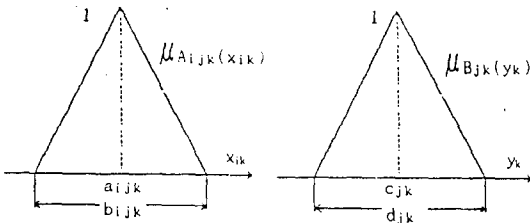


그림 2-1. 멤버십 함수의 표현
Fig. 2-1 Membership functions

또한, i는 입력 변수의 수이며, j는 입력변수가 j번째 Rule에 대해 취하는 퍼지변수이고, k는 지역을 나타낸다.

Mamdani의 방법에 따른 퍼지추론의 결론 B'_k 는 식(2.4)로 된다.

$$\begin{aligned} B'_k &= (A'_{1k} \times A'_{2k}) \circ (A_{11k} \times A_{21k} \rightarrow b_{1k}) \cup (A_{12k} \times A_{22k} \rightarrow B_{2k}) \\ &\quad \cup (A_{1jk} \times A_{2jk} \rightarrow B_{jk}) \dots \cup (A_{11k} \times A_{21k} \rightarrow B_{1k}) \\ &= (A'_{1k} \times A'_{2k}) \circ R_1 \cup R_2 \cup \dots \cup R_1 \dots \cup R_n \\ &= [(A'_{1k} \circ (A_{11k} \rightarrow B_{1k}) \cap A'_{2k} \circ (A_{21k} \rightarrow B_{1k})) \cup \dots \\ &\quad \cup [(A'_{1k} \circ (A_{1jk} \rightarrow B_{jk}) \cap A'_{2k} \circ (A_{2jk} \rightarrow B_{jk})) \dots \\ &\quad \cup [(A'_{1k} \circ (A_{11k} \rightarrow B_{1k}) \cap A'_{2k} \circ (A_{21k} \rightarrow B_{1k}))] \quad (2.4) \end{aligned}$$

여기서, n은 퍼지제어규칙수이고, 'o'는 퍼지합성 연산자이며, '∩'는 and 연산자, '∪'는 or 연산자이다. 위 식에서 입력변수 X_{1k} 와 X_{2k} 에 대한 적합도 연산은 식(2.5)와 같다.

$$\mu_{A_{1k} \times A_{2k}}(X_{1k}, X_{2k}) = \mu_{A_{1k}}(X_{1k}) \wedge \mu_{A_{2k}}(X_{2k}) \quad (2.5)$$

여기서, 기호 '∧'는 t-norm을 나타낸다. 또한, j번째 Rule에 대한 적합도 연산은 식(2.6)과 같이 구해진다.

$$\begin{aligned} \mu_{B'_{jk} \times (Y_k)} &= [[\mu_{A_{1k}}(X_{1k}) \wedge \mu_{A_{2k}}(X_{2k}) \wedge \mu_{B_{jk}}(Y_k)] \\ &\quad \wedge [\mu_{A_{2k}}(X_{2k}) \wedge \mu_{A'_{2k}}(X_{2k})]] \quad (2.6) \end{aligned}$$

식(2.6)의 적합도 연산으로부터 Braae와 Rutherford의 중력중심법(Center of Gravity Method)을 채택한다. 이 방법은 추론된 퍼지집합의 중력중심을 구하여, 그것에 해당되는제어치를 정하는 것으로, 입력변수 X_{1k} 와 X_{2k} 에 대한 비퍼지값 X_{10k} 와 X_{20k} 가 주어질 때, 출력 Y_k 의 최종 추론치 Y^*_{k0} 는 식(2.7)과 같이 구해진다.

$$Y^*_{k0} = \frac{\sum_{j=1}^n (\prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ik}}) \cdot \bar{Y}_{jk}}{\sum_{j=1}^n (\prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ik}})} \quad (2.7)$$

단, Π 는 '∧'연산을 의미하고, \bar{Y}_{jk} 는 j번째 Rule에서의 적합도를 나타내는 식(2.6)의 멤버십 함수 $\mu_{B'_{jk} \times (Y_k)}$ 의 중심치이다.

2.2 파라미터 조정 알고리즘

퍼지추론을 제어분야에 적용하는 경우에, 후건부의 퍼지변수를 실수로 퇴화시킨, 간략퍼지추론이 많이 사용된다. 후건부를 실수로 정의함으로써 조정 파라미터의 수가 감소하고, 조정 알고리즘이 용이하게 되는 이점이 있다. 또한, 실수로 퇴화시키더라도, 추론치는 통상의 퍼지추론과 크게 차이가 없다. 그러나, 여기서는 구배법을 이용한 퍼지 추론의 자동 조정 기법으로 전건부 및 후건부의 파라미터를 동조시킨다. 최적제어로부터 얻은 입력 데이터쌍 (X^0_{ik}, Y^0_k) 에 대한 추정결과는 식(2.8)과 (2.9)로 됨을 알 수 있다.

$$\mu_{B_{jk}} \times (Y^0_k) = [[\mu_{A_{1k}}(X^0_{1k}) \wedge \mu_{A_{2k}}(X^0_{2k}) \wedge \mu_{B_{jk}}(Y^0_j)]] \quad (2.8)$$

$$Y^*_{k0} = \frac{\sum_{j=1}^n [\mu_{A_{1k}}(X^0_{1k}) \wedge \mu_{A_{2k}}(X^0_{2k})] \cdot \bar{Y}_{jk}}{\sum_{j=1}^n [\mu_{A_{1k}}(X^0_{1k}) \wedge \mu_{A_{2k}}(X^0_{2k})]} \quad (2.9)$$

구배법에 의한 파라미터 조정 기법의 구성은 그림 2-2와 같다.

구배법에서는 입력 데이터 X^0_{ik} 가 입력된 경우, 퍼지추론의 추론치 Y^*_{k0} 와 C. E. Fosha[1]등이 제안한 최적제어기의 출력치 Y^0_k 와의 추정오차 제곱인 식(2.

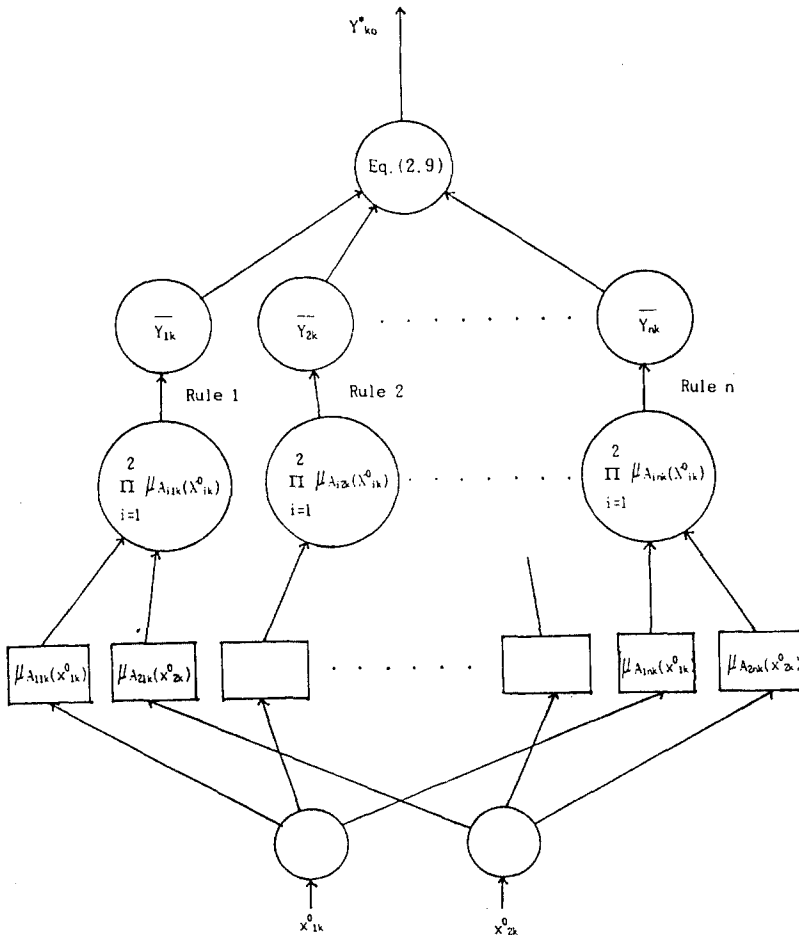


그림 2-2. 구배법에 의한 파라미터 조정기법
Fig. 2-2 Tuning technique of parameters by gradient method

10)의 E를 최소로 하도록 최적화한다.

$$E = \frac{1}{2} (Y^0_k - Y^*_{k0})^2 \quad (2.10)$$

즉, E의 값이 최대로 감소하는 방향을 나타내는 vector는 각 조정 파라미터에 대해 $\left[-\frac{\partial E}{\partial a_{ijk}}, -\frac{\partial E}{\partial b_{ijk}}, -\frac{\partial E}{\partial c_{ijk}}, -\frac{\partial E}{\partial d_{ijk}} \right]$ 로 되며, 각 파라미터 조정 학습칙은 식(2.11)~(2.14)와 같다.

$$a_{ijk}(t+1) = a_{ijk}(t) - G_{a_{ijk}} \cdot \frac{\partial E}{\partial a_{ijk}} \quad (2.11)$$

$$b_{ijk}(t+1) = b_{ijk}(t) - G_{b_{ijk}} \cdot \frac{\partial E}{\partial b_{ijk}} \quad (2.12)$$

$$c_{ijk}(t+1) = c_{ijk}(t) - G_{c_{ijk}} \cdot \frac{\partial E}{\partial c_{ijk}} \quad (2.13)$$

$$d_{ijk}(t+1) = d_{ijk}(t) - G_{d_{ijk}} \cdot \frac{\partial E}{\partial d_{ijk}} \quad (2.14)$$

여기서, $G_{a_{ijk}}, G_{b_{ijk}}, G_{c_{ijk}}, G_{d_{ijk}}$ 는 각 벡터량에 따라 정해지는 학습계수이며, 식(2.11)~(2.14)는 충분한 학습회수에 의해 수렴된 값을 갖게 된다.

한편, 식(2.11)에서 식(2.1) 및 식(2.8), (2.9), (2.10)을 이용하면, (2.15)로 구해지며, 동일한방법으로 식(2.12)~(2.14)에 대해서도 식(2.16)~(2.18)으로 구해진다.

$$\frac{\partial E}{\partial a_{ijk}} = (Y^0_k - Y^*_{k0}) \frac{\sum_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}} \right] \cdot \bar{Y}_{jk} \cdot \sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}}}{\left[\sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}} \right]^2 - \sum_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}} \cdot \bar{Y}_{jk} \right] \sum_{j=1}^n \left[\prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}} \right]}$$

$$= (Y^0_k - Y^*_{k0}) \frac{2 \cdot \text{sgn}(X_{i,k} - a_{ijk})(\bar{Y}_{jk} - Y^*_{k0}) \prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}}}{b_{ijk} \cdot \mu_{A_{ijk}}(X_{i,k}) \sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}}} \quad (2.15)$$

$$\frac{\partial E}{\partial b_{ijk}} = (Y^0_k - Y^*_{k0}) \frac{(1 - \mu_{A_{ijk}}(X_{i,k}))(\bar{Y}_{jk} - Y^*_{k0}) \prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}}}{b_{ijk} \cdot \mu_{A_{ijk}}(X_{i,k}) \sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}}} \quad (2.16)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_{jk}} = (Y^0_k - Y^*_{k0}) \frac{2 \cdot \text{sgn}(Y_{ik} - c_{jk})}{\sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}}} \quad (2.17)$$

$$\frac{\partial E}{\partial c_{jk}} = -(Y^0_k - Y^*_{k0}) \frac{2 \cdot |Y_{ik} - c_{jk}|}{\sum_{j=1}^n \prod_{i=1}^2 \mu_{A_{ijk}}} \quad (2.18)$$

여기서, sgn 함수는

$$\text{sgn}(z) = \begin{cases} 1 & z \geq 0 \\ -1 & z < 0 \end{cases} \quad (2.19)$$

의 값을 갖는 부호함수이다.

식(2.15)~(2.18)의 학습법칙은 목적함수 E를 최소

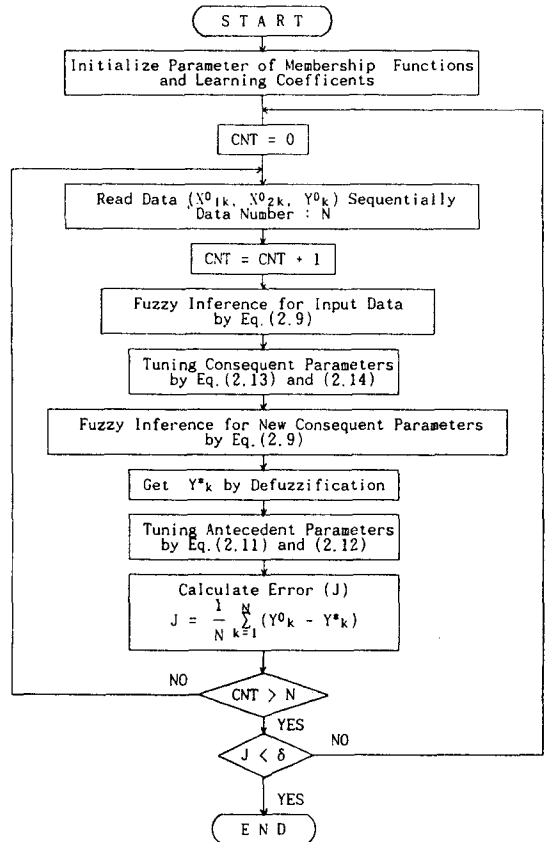


그림 2-3. i 지역에 대한 파라미터 조정 알고리즘 흐름도
Fig. 2-3 Flow chart for parameter tuning algorithm of i are

로 하는 방향으로 탐색하여 파라미터를 조정한다. 그림 2.3은 i지역에 대한 파라미터 조정 알고리즘의 흐름도를 나타낸다.

III. 모델계통

3.1 기본이론

전력계통은 일반적으로 다수의 발전소 및 다수의 부하 지점과 이들을 결합하는 송전선으로 구성되어 있으며 이 시스템 구성은 점차 복잡·다기화 되고 있다. 즉, N개의 지역이 상호연계된 전력계통은 분할된 각 지역에 대한 일련의 1계 비선형 미분방정식으로 기술될 수 있다. i지역 Sub System에 대한 상태방정식은

$$\dot{X}_i = f_i(X_i, U_i, \Delta P_{di}) \quad (3.1)$$

로부터

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i U_i + C_i \Delta P_{di} + \Gamma_i \Delta P_{tieij} \quad (3.2)$$

로 표현된다.

단, X_i 는 n차원의 상태 vector, U_i 와 ΔP_{di} 는 스칼라 형태의 제어입력 및 외란이며, n은 각 지역에서의 상태변수의 수이고, ΔP_{tieij} 는 j지역에서 i지역에 미치는 연계선 전력 편차량을 나타낸다.

그런데, ΔP_{di} 및 ΔP_{tieij} 는 그 지역의 주파수 편차 Δf_i 에만 직접 관계하므로 식(3.3)으로 둘 수 있다.

$$D_i \Phi_i = C_i \Delta P_{di} + \Gamma_i \Delta P_{tieij} \quad (3.3)$$

단,

$$\Phi_i = \Delta P_{di} + a_{ij} \cdot \Delta P_{tieij} \quad (3.4)$$

이고, i 는 외란의 전체량으로 정의되며, D_i 는 C_i 및 Γ_i 에 의해 주어진다. 따라서 i지역의 동적시스템은 식(3.5), (3.6)과 같이 표현할 수 있다.

$$\dot{X}_i = A_i X_i + B_i U_i + D_i \Phi_i \quad (3.5)$$

$$Y_i = C_i X_i + E_i \Phi_i \quad (3.6)$$

부하외란이 i지역에만 존재하는 경우 j지역에서의 j는 $a_{ij} \cdot \Delta P_{tieij}$ 의 값만을 가지므로 $\Delta P_{dj} = 0$ 이다. 이 경우 ΔP_{tieij} 는 기지이고 ΔP_{di} 는 미지인 양으로 추정이 필요하므로 i지역 전체 외란추정치 i 로부터 식(3.7)로 추정된다.

$$\Delta \hat{P}_{di} = \hat{\Phi}_i - a_{ij} \cdot \Delta P_{tieij} \quad (3.7)$$

그리고, Π 형 등가회로부터 모선 i에서 유입하는 유효전력은 식(3.8)로 표현된다.

$$P_{tieij} = G_{tieij} |E_i|^2 - G_{tieij} |E_i| |E_j| \cos(\delta_i - \delta_j) - B_{tieij} |E_i| |E_j| \sin(\delta_i - \delta_j) \quad (3.8)$$

$$G_{tieij} = \frac{\gamma_{ij}}{\gamma_{ij}^2 + x_{ij}^2}$$

$$B_{tieij} = \frac{-x_{ij}}{\gamma_{ij}^2 + x_{ij}^2}$$

여기서, $x_{ij} \gg |j|$ 이면 식(3.9)로 된다.

$$P_{tieij} = \frac{|E_i| |E_j| \sin(\delta_i - \delta_j)}{x_{ij}} \quad (3.9)$$

따라서, 평형치 $\delta_{ij}^* (= \delta_i^* - \delta_j^*)$ 로부터 $\delta_{ij} = \delta_{ij}^* + \Delta \delta_{ij}$ 만큼 섭동(perturbation)된 경우, P_{tieij} 는 ΔP_{tieij} 만큼 섭동되므로

$$P_{tieij} + \Delta P_{tieij} = \frac{|E_i \text{Exp}(j\Delta \delta_i)| |E_j \text{Exp}(j\Delta \delta_j)|}{x_{ij} \sin(\delta_{ij}^* + \Delta \delta_{ij})} \quad (3.10)$$

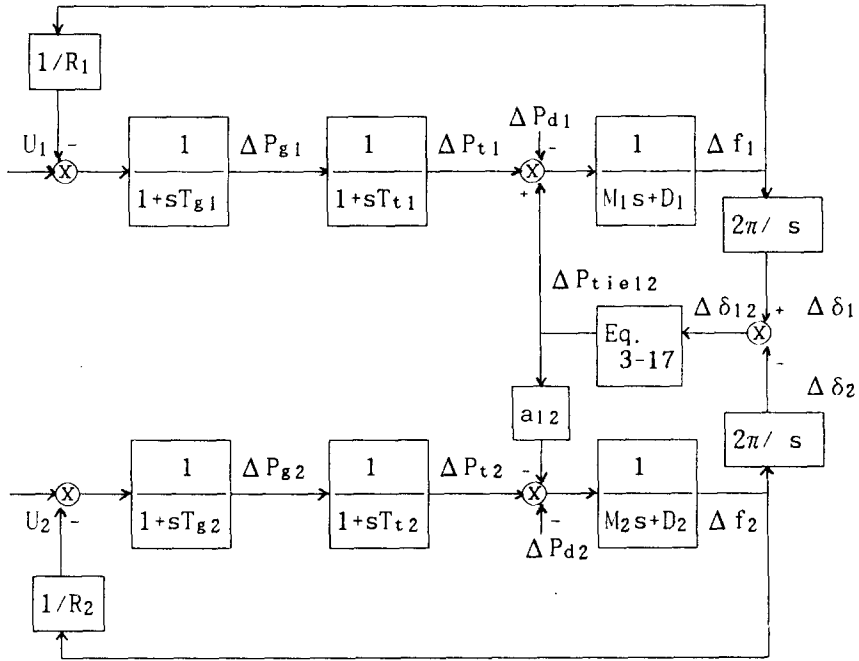
$$= \frac{|E_i| |E_j|}{x_{ij}} (\sin(\delta_{ij}^* + \Delta \delta_{ij}) - \sin \delta_{ij}^*)$$

로부터, i지역과 j지역의 연계선 조류편차, ΔP_{tieij} 는 식(3.11)과 같은 비선형식으로 표현된다.

$$\Delta P_{tieij} = \frac{|E_i| |E_j|}{x_{ij}} (\sin(\delta_{ij}^* + \Delta \delta_{ij}) - \sin \delta_{ij}^*) \quad (3.11)$$

3.2 모델계통

이상의 이론을 적용하기 위해 2 지역 전력계통의 모델인 그림 3-1과 같은 비선형 모델을 사용한다.



- T_{gi} : Speed governor time constant (0.08[s])
- T_{ti} : Turbine time constant (0.3[s])
- D_i : Load-frequency constant (0.00823[p.u.MW/Hz])
- M_i : Inertia constant (0.1667[p.u.MW · s/Hz])
- R_i : Self-regulation of generator (2.4[Hz/p.u.MW])
- ΔP_{di} : Change in load of generator (0.01[p.u.MW])
- Δf_i : Frequency deviation ([Hz])
- ΔP_{gi} : Change in governor-valve position
- ΔP_{ti} : Change in steam turbine output
- ΔP_{tieij} : Change in tie-line power
- $\Delta \delta_i$: Change in load angle

그림 3-1. 2지역 비선형 전력계통의 블록선도

Fig. 3-1 Block-diagram of power system with nonlinearity

그림 3-1은 2개의 지역으로 분할될 수 있는데 i 지역 계통은 식(3.12)~(3.15)와 같은 미분방정식으로 표현될 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \Delta \delta_i = 2\pi \cdot \Delta f_i \quad (3.12)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta f_i = \frac{1}{M_i} (-D_i \cdot \Delta f_i + \Delta P_{ti} - \Delta P_{tieij} - \Delta P_{di}) \quad (3.13)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{ti} = \frac{1}{T_{ti}} (-\Delta P_{ti} + \Delta P_{gi}) \quad (3.14)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{gi} = \frac{1}{T_{gi}} \left(-\frac{\Delta f_i}{R_i} - \Delta P_{gi} + U_i \right) \quad (3.15)$$

단, 여기서

$$\Delta_{ij} = \Delta \delta_i - \Delta \delta_j \quad (3.16)$$

$$\Delta P_{tieij} = P_{tieij \max} (\sin(\delta_{ij}^* + \Delta \delta_{ij}) - \sin \delta_{ij}^*) \quad (3.17)$$

이다. 그리고, i 지역계통의 상태변수는 식(3.18)과 같

이 설정한다.

$$X_i = [\Delta\delta_i \ \Delta f_i \ \Delta P_{di} \ \Delta P_{di}]^T \quad (3.18)$$

IV. 부하추정기구의 설계

기준부하 변동에 대하여 학습된 파라미터를 임의의 또 다른 부하외란에서도 적용하여 사용할 수 있도록 각 시점마다 각지역에서의 부하를 on-line 추정할 수 있는 추정기 설계가 요구된다. 왜냐하면, 기준부하 변동 상태에서 부하의 크기나 형태에 변화가 생기면 제어 응답 특성이 양호하지 못하며 정상 편차가 잔존하는 문제점이 발생하기 때문이다.

미지의 부하 외란항 $i(t)$ 를 추정하는 추정기구는 현재와 과거의 입, 출력비와 현재의 시스템 상태간의 관계로 부터 유도되는 것으로서, 식(3.5)와 식(3.6)으로부터 모든 상태를 출력으로 하는 경우, 즉, C_i 가 단위 행렬일 경우 출력 $Y_i(t)$ 는 식(4.1)과 같이 주어진다.

$$Y_i(t) = X_i(t) + E_i \hat{\phi}_i(t)$$

$$= [I_i \ E_i] \begin{bmatrix} X_i(t) \\ \hat{\phi}_i(t) \end{bmatrix} \quad (4.1)$$

단, $i(t)$ 는 $i(t)$ 의 추정치이다.

식(4.1)로 부터 샘플링 주기 만큼 지연된 경우, 출력 $Y_i(t-\tau)$ 는 식(4.2)로 된다.

$$Y_i(t-\tau) = X_i(t-\tau) + E_i \hat{\phi}_i(t-\tau) \quad (4.2)$$

따라서, 부하외란의 추정기는 식(4.3)과 같이 된다.

$$\hat{\phi}_i(t) = (A_i E_i - D_i)^{Lm} [Y_i(t-\tau) + B_i \tau U_i(t) - (I - A_i \tau) Y_i(t)] \frac{1}{\tau} \quad (4.3)$$

$$(A_i E_i - D_i)^{Lm} = [(A_i E_i - D_i)^T (A_i E_i - D_i)]^{-1} (A_i E_i - D_i)^T \quad (4.4)$$

이다.

그러므로 미지의 부하외란량은 식(3.7)과 식(4.3)으로부터 추정할 수 있다.

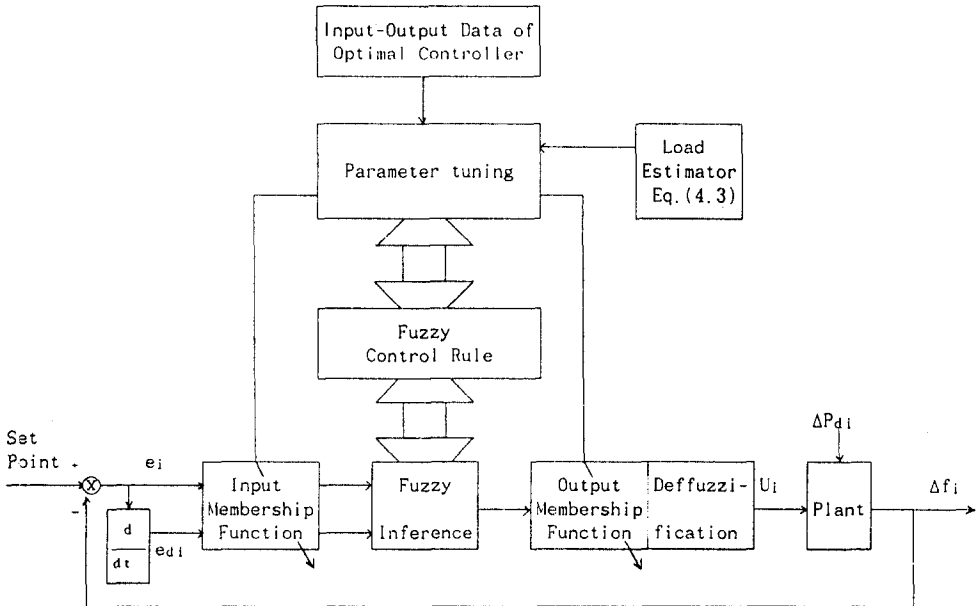


그림 5-1. 부하주파수 제어를 위한 i지역 퍼지제어 시스템의 블록선도

Fig. 5-1 Block diagram of i-area fuzzy control system for LFC

V. 시뮬레이션 결과 및 검토

본 논문에서 사용한 퍼지제어시스템의 구성은 그림 5-1과 같다.

전력계통의 부하주파수를 제어하는 퍼지제어기를 설계하기 위해서는 먼저 일반적인 Rule이 생성되어야 한다. 본 시스템에서 사용한 퍼지제어기의 j번째 제어 Rule은 식(5.1)과 같은 형태이다.

$$\text{If } e_{jk} \text{ is } A_{1jk} \text{ and } ed_{jk} \text{ is } A_{2jk} \text{ Then } U_{jk} \text{ is } B_{jk} \quad (5.1)$$

여기서, e_{jk} 는 제어대상 k지역의 출력치와 목표치의 편차이고, ed_{jk} 는 편차의 변화율이며, U_{jk} 는 제어시스템의 제어량을 표시한다.

이러한 퍼지 변수를 나타내기 위한 멤버십 함수는 그림 5-2와 같은 삼각파형 함수를 사용하였다.

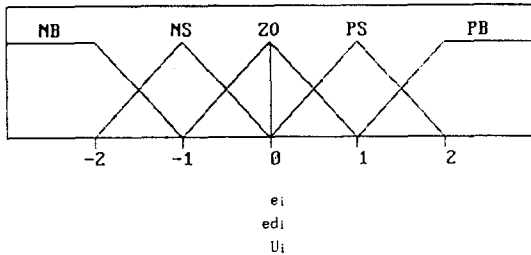


그림 5-2. 멤버십 함수
Fig. 5-2 Membership functions

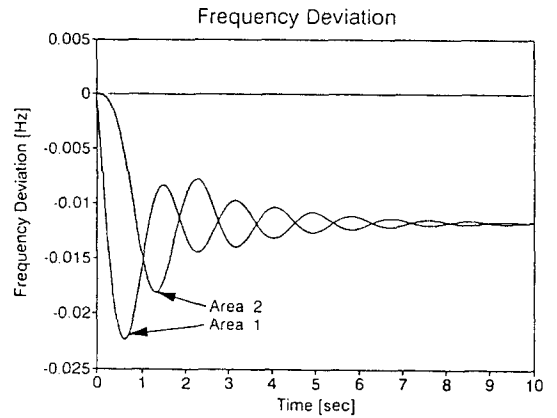
여기서, 사용한 퍼지 변수의 약어는 다음과 같다.

- PB : Positive Big
- PS : Positive Small
- Zo : Zero
- NB : Negative Big
- NS : Negative Small

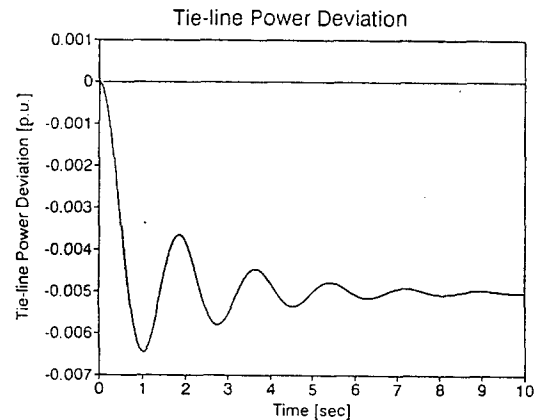
그림 3-1의 지역 1에서만 지속적인 부하변동 $\Delta P_{d1} = 0.01$ [p.u.]이 생겼을때 제어기를 부가하지않은 상태 ($U_i = 0$)의 부하주파수 동특성은 그림 5-3과 같다.

여기서, 전력계통에서의 부하주파수제어는 계통의 주파수 및 연계선 조류편차량을 규정치 이하로 유지하는 것이다. 그러므로, 부하주파수 편차의 오버슈트량과 정상편차량을 감소시키며 정정시간(settling time)을 줄이고, 또한 연계선 조류 편차량을 최소화 시켜

야 한다.



(a) Δf_i



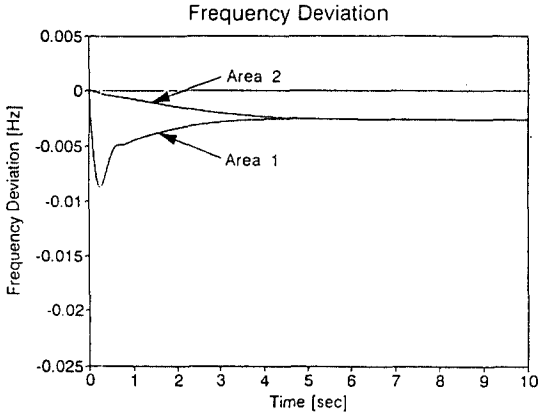
(b) ΔP_{tie2}

그림 5-3. 외란 발생시 무제어 전력계통의 응답특성.
($\Delta P_{d1} = 0.01$ [p.u.], $U_i = 0$)

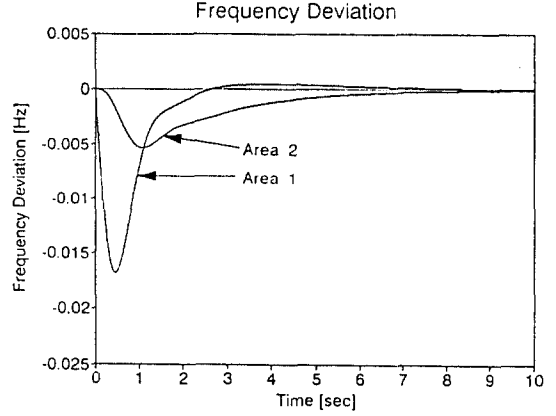
Fig. 5-3 Responses of uncontrolled power system against ΔP_{d1}

먼저, 주파수 편차 e_i 와 편차 변화율 ed_i 의 조합에 의해 이루어지는 모든 Rule을 사용하여 파라미터가 학습되기 전의 상태로 제어한 전력계통의 응답특성은 그림 5-4와 같다.

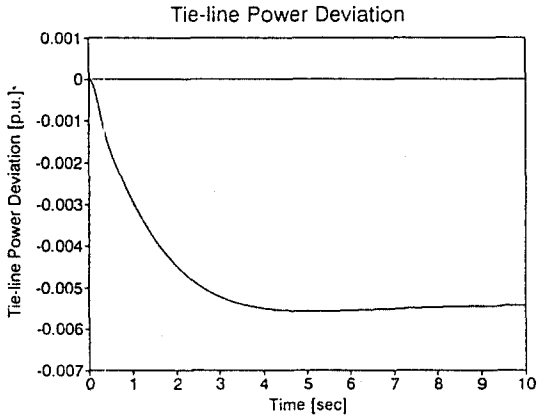
이것은 초기 과도시의 응답 특성에 대해서도 퍼지 제어기는 주파수 편차량의 언더슈트를 상당히 감소시켰을 뿐만아니라 진동적인 현상을 제거하였음을 볼 수 있다. 그러나 정상 상태의 편차를 계속 가지고



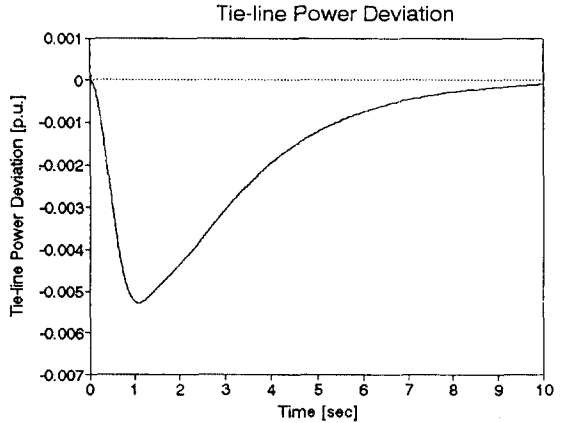
(a) Δf_i



(a) Δf_i



(b) ΔP_{tie2}



(b) ΔP_{tie2}

그림 5-4. 퍼지 제어기의 응답특성(조정전)

Fig. 5-4 Responses of Power system with fuzzy controller (before tuning)

그림 5-5. 최적 제어기에 의한 전력계통의 응답특성

Fig. 5-5 Responses of power system with optimal controller

있으며 연계선 조류편차량에 대해서는 제어 효과가 양호하지 못함을 보여준다. 따라서 이런 문제점을 해결하기 위하여 전건부 및 후건부 멤버십함수의 중심치 및 폭을 제안한 기법에 의해 조정하여 본 시스템에 적용하였다. 이를 위해 먼저, 종래의 제어인 C. E. Fosha 등의 최적제어 기법에 의한 응답특성인 그림 5-5로부터 학습용 입출력 데이터쌍 140개를 얻었다.

이의 응답특성은 부하주파수 최대편차량 및 연계선 조류편차량이 크고 수렴시간도 늦음을 볼 수 있다.

다음, 각 변수에 대해서 그림 5-2와 같은 5종류의

멤버십 함수를 초기 설정한다. 최적제어에서 얻은 데이터를 순차적으로 동정(identification)하여 퍼지 추론의 전건부 및 후건부의 중심치와 폭을 제 2-2절의 파라미터 학습방법으로 조정한다.

이와같은 조정절차에 따라 반복학습횟수를 30회로 하였을 대의 조정된 멤버십 함수는 그림 5-6과 같으며, 계통주파수 응답특성은 그림 5-7과 같다. 이때 1지역의 학습계수 $G_{a11} = 0.05$, $G_{b11} = 0.05$, $G_{a21} = 0.003$, $G_{b21} = 0.05$, $G_{c1} = 1.75$, $G_{d1} = 0.05$ 이고, 2지역의 학습계수 $G_{a21} = 0.08$, $G_{b21} = 0.05$, $G_{a22} = 0.001$, $G_{b22} = 0.01$,

$G_{c2} = 0.1, G_{d2} = 0.01$ 이다.

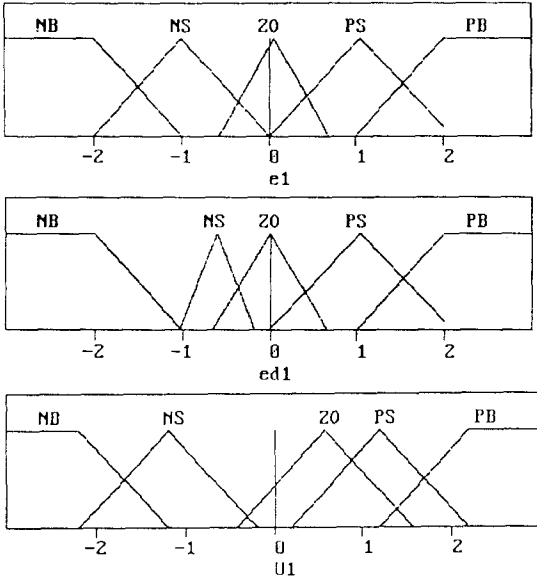


그림 5-6. 조정된 멤버쉽 함수(학습후)
Fig. 5-6 Tuned membership functions(after learning)

이것은 파라미터를 조정하지 않았을 때 보다도 최대 언더슈터량도 감소 되었을 뿐만 아니라 지속적으로 존재하던 정상상태의 잔류편차를 제거할 수 있었다. 또한, 연계선 조류편차량에 대해서는 매우 좋은 제어 효과를 보여 주고 있다. 그러나 부하 주파수 편차량의 도달시간을 많이 줄임으로서 다소의 오버슈터가 나타남을 볼 수 있다.

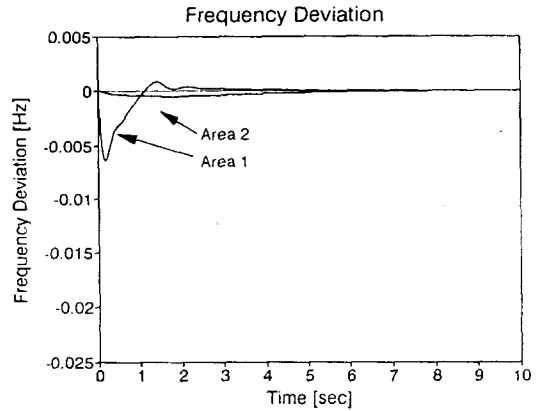
또한, 임의의 부하변동이 발생하였을 경우에도 최적의 제어 결과를 얻기 위하여 제 4장에서 구성한 부하 추정기를 이용하여 $\Delta P_{d1} = 0.01$ [p.u.]의 기준부하에 대해 학습되어 있는 그림 5-6에서의 파라미터 규격화 정수를 다음과 같이 조정하여 제어한다.

$$SF = \frac{\text{추정부하량}}{\text{기준부하량}}$$

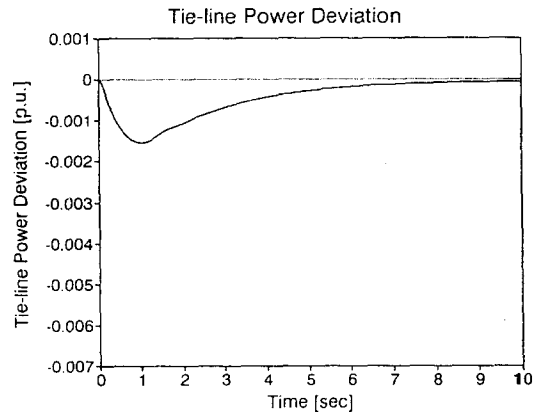
$$e_{iN} = SF \times e_i$$

$$ed_{iN} = SF \times ed_i$$

$$U_{iN} = SF \times U_i$$



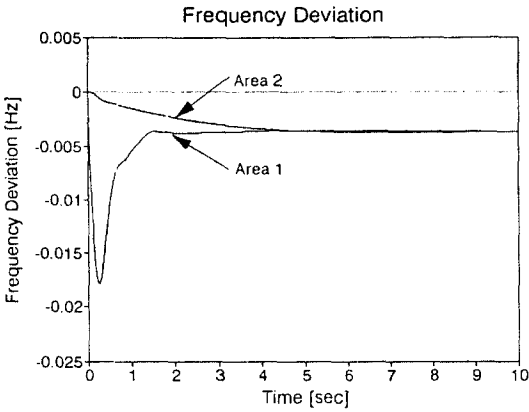
(a) Δf_i



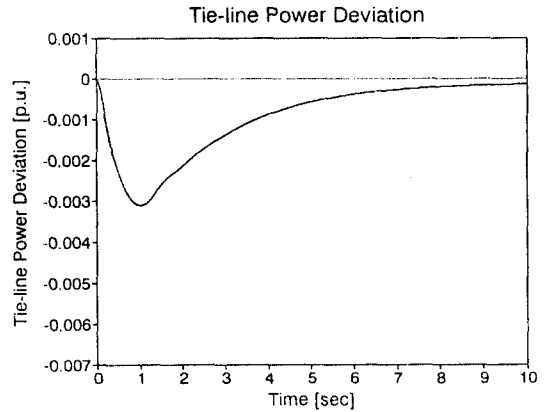
(b) ΔP_{tie2}

그림 5-7. 제안한 기법에 의한 전력계통의 응답특성(학습후)
Fig. 5-7 Responses of power system by proposed technique (after learning)

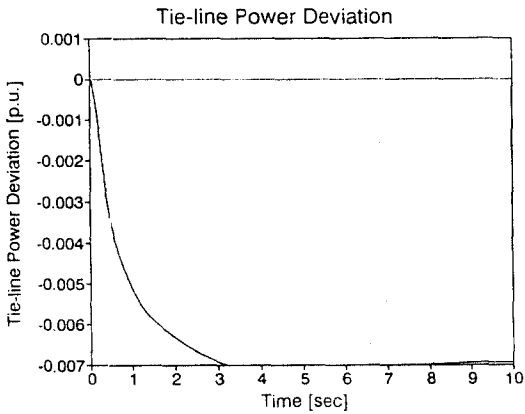
이의 유용성을 검토하기 위해 부하의란 $\Delta P_{d1} = 0.02$ [p.u.]로 변화하였을 때 부하변화량의 추정 유무에 따라 제어한 결과는 그림 5-8 및 5-9와 같다. 그림 5-8은 부하변동량을 추정하지 않고 제어한 결과로써 정상상태의 잔류편차가 잔존하고 있으며 응답특성이 양호하지 못함을 보여준다. 그러나 그림 5-9는 부하변동량을 추정하여 제어한 결과로써 과도시 응답특성 뿐만 아니라 정상상태의 잔류편차량도 제거시킬 수 있음을 알 수 있다.



(a) Δf_i



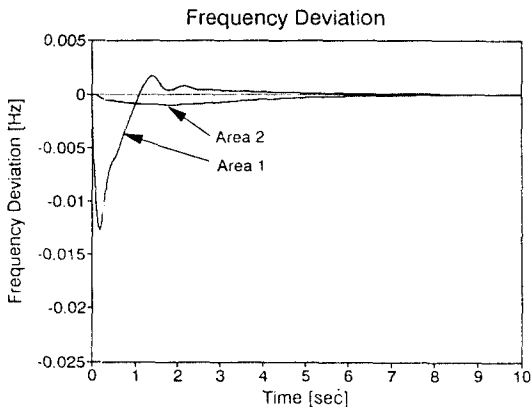
(b) ΔP_{tie12}



(b) ΔP_{tie12}

그림 5-8. 부하추정기가 없는 경우의 전력계통 응답특성 ($\Delta P_{d1} = 0.02$ [p.u.]

Fig. 5-8 Responses of power system without load estimator



(a) Δf_i

그림 5-9. 부하추정기가 있는 경우의 전력계통 응답특성 ($\Delta P_{d1} = 0.02$ [p.u.]

Fig. 5-9 Responses of power system with load estimator

VI. 결 론

본 논문에서는 비선형 2지역 전력계통의 부하추정제어 특성을 개선하기 위해 퍼지제어 Rule의 전건부 및 후건부의 중심치와 폭 등의 파라미터를 구배법을 이용하여 실시간 학습으로 자기 조정할 수 있는 능력을 가진 퍼지제어기의 한 설계기법을 제안하였다. 그리고, 파라미터 학습시의 기준부하와 다른 부하 변동시에도 최적의 제어결과를 얻기 위하여 부하추정기를 설계하였다. 이로써 각지역의 부하 추정을 용이하게 할 수 있을뿐만 아니라, 기준부하에 대해 학습된 멤버십 함수 및 규칙을 그대로 사용할 수 있도록 하였다.

그 결과 최적제어에서 나타나는 큰 언더슈터량이나 정상상태 도달시간 지연 등은 퍼지제어으로써 해소할 수 있었으며, 종래의 제어기법보다 주파수 편차량 및 연계선 조류 편차량을 현저히 경감 시켰을 뿐만 아니라 정정시간 및 도달시간도 최소화 시킬 수 있었으며, 기준부하와 다른 부하 변동에 대해서도 제어 성능이 우수하고, 그 유용성이 있음을 시뮬레이션을 통해서 알 수 있었다.

참 고 문 헌

1. C. E. Fosha, O. I. Elgerd, "The Megawatt-Fre-

quency Control problem: A New Approach Via Optimal Control Theory”, IEEE Trans, PAS-89, No. 4, pp.563-557, 1970.

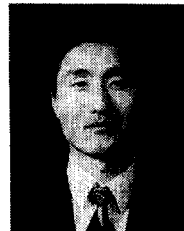
2. Y. Mizutani, “A Suboptimal Control for Load Frequency Control System Using a Area Decomposition Method”, JIEE, Vol. 98, No. 12, pp.971-978, 1978.
3. A. J. Wood, B. F. Wollenberg, “Power Generation, Operation and Control”, John Wiley & Sons, 1984.
4. G. Shiral, “A Method of Load Frequency Control Coordinating with Conventional Tie-Line Bias Control”, JIEE, Vol. 100, No. 12, pp.723-730, 1980.
5. G. Shiral, S. Ohtsuka, “Load Frequency for Multi-Area Electric Energy Systems Using Decomposition of Information Structure”, JIEE, Vol. 99, No. 7, pp.417-424, 1979.
6. V. Avatchanakorn, Y. Mizutani, “Area-Decomposition Type Load Frequency Control Considering Power Demand Estimation and Computation Time Delay”, JIEE, Vol. 109, No. 1, pp.9-16, 1989.
7. N. N. Bengiamin, W. C. Chan, “Multilevel Load-Frequency Control of Inter-connected Power Systems”, Proc. IEE, Vol. 125, No. 6, pp.521-526, 1990.
8. Y. Goto, Y. Mizutani, “Suboptimal Load Frequency Control Using Hybrid Type Control Information”, JIEE, Vol. 103, No. 10, pp.671-678, 1983.
9. Y. Mizutani, Y. Goto, “Area-Decomposition Type Load Frequency Control Considering Generation Rate Constraint”, JIEE, Vol. 105, No. 4, pp. 399-405, 1985.
10. 菅野道夫 原著, “퍼지제어시스템”, 大英社, 1990.
11. 정형환, 이준탁, 김해재, 정동일, 주석민, “2지역 전력계통의 부하주파수 제어를 위한 퍼지추론 기법의 적용”, 한국퍼지시스템학회 논문지, Vol. 2, No. 4, 1992.
12. V. Avatchanakorn, A. Usda, Y. Gotoh Y. Mizutani, “Load Frequency Control Using Power Demand Estimation and Fuzzy Control”, JIEE, Vol. 110, No. 10, pp.841-849, 1990.
13. A. Ishigame, H. Kaizu, S. Kawamoto, T. Satou, T. Taniguchi, “Power System Stabilizing Control

Based on Simplification of Constructing Fuzzy Control Rules”, JIEE, Vol. 113, No. 1, pp.29-35, 1993.

14. H. Nomura, I. Hayashi, N. Wakami, “A Learning Method of Fuzzy Inference Rules by Descent Method”, IEEE Conf., 1992.
15. 이준탁, “자기조직화적 Fuzzy 제어를 이용한 다지역 전력계통의 부하주파수제어”, 한국전력공사, 1993.



이 준 탁(Joon-Tark Lee) 정회원
1956년 11월 21일생
1979년: 동아대 공대 전기공학과 졸업
1988년: 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공박)
현재: 동아대 공대 전기공학과 부교수



정 동 일(Dong-Il Chung) 정회원
1960년 8월 6일생
1984년: 동아대 공대 전기공학과 졸업
1986년: 동 대학원 전기공학과 졸업(석사)
1988년 3월~1990년 2월: (주)금성사 창원전기연구소

연구원

1995년: 동 대학원 전기공학과 졸업(박사)
현재: 동아대 정보통신 연구소 연구원



안 병 철(Byung-Chul An) 정회원
1963년 6월 2일생
1988년: 동아대학교 전기공학과 졸업
1990년: 동대학원 전기공학과 졸업(석사)
현재: 동대학원 전기공학과 박사과정 수료

부산지방중소기업청 공업연구소



주 석 민(Seok-Min Joo) 정회원
1965년 5월 11일생
1992년: 동아대학교 전기공학과
졸업
1994년: 동대학원 전기공학과 졸
업(석사)
현재: 동대학원 전기공학과 박사
과정



정 형 환(Hyeng-Hwan Chong) 정회원
1941년 1월 19일생
1964년: 연세대학교 전기공학과
졸업
1984년: 동대학원 전기공학과 졸
업(공학)
현재: 동아대학교 전기공학과 교
수