

ANFIS 전 보상 PID 제어기에 의한 2지역 전력계통의 부하주파수 제어에 관한 연구

정문규\* · 정형환\* · 주석민\* · 안병철\*\*  
 \*동아대학교 전기공학과 \*\*부산지방중소기업청

A Study on the Load Frequency Control of Two-Area Power System using ANFIS Precompensated PID Controller

°Mun-Kyu Chung\* · Hyeong-Hwan Chung\* · Seok-Min Joo\* · Byung-Chul An\*\*

\*Dept. of Electrical Eng., Dong-A Univ. \*\*Pusan Small & Medium Business Administration

**Abstract** - In this paper, we design an Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System(ANFIS) Precompensator for the performance improvement of conventional proportional integral derivative (PID) controller that the governor system of power plant constantly maintains the load frequency of two-area power system. The ANFIS Precompensator is expressed as the membership functions of premise parameters and the linear combination of consequent parameters by Sugeno's fuzzy if-then rules using nonlinear input-output relation for the set point automatic modification maintaining conventional PID controller. The proposed compensation design technique is hoped to be satisfactory method overcome difficulty of exact modelling and arising problems by the complex nonlinearities of power system, and our design shows merit that is easily implemented by adding an ANFIS precompensator to an existing PID controller without replacement.

1. 서 론

전력계통의 부하가 변동하여 발전기의 기계적 입력이 부하와 평형을 이루지 못할 경우 전력계통의 주파수가 변동하게 된다. 주파수의 심한 변동은 주파수에 관계하는 정밀기계의 성능을 저하시킬 뿐만 아니라 발전소나 기타 전기설비에 큰 지장을 초래하며 수명 또한 단축시킨다. 또한 각 지역을 연결하는 연계선 전력 조류는 주파수의 변동에 매우 민감하므로 이에 대한 제어를 신속히 행하지 않으면 당시 변동조류가 대단히 크거나 조류의 동요가 심하게 되어 전력계통의 안정도가 저해된다. 그러므로 계통운용의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 시간에 따른 계통상태의 변화, 사고에 대한 계통구성의 변동 등 전력계통의 다양한 상태변동에 대하여 전력수급의 균형을 조절하여 주파수 및 연계선 조류편차를 허용범위 이내로 유지하도록 해야 한다. [1].

한편, 현재 산업공정에 사용되고 있는 제어기 중, PID(Proportional Integral Derivative) 제어기는 간단한 구조를 갖고 있음에도 불구하고 상대적으로 우수한 제어성능을 제공하는 것으로 알려져 있다. 이러한 PID 제어기의 자동동조를 위해 Ziegler-Nichols(ZN)의 동조법을 들 수 있는데, ZN 동조법은 시간영역 속에서 제어대상의 개회로 계단응답에 기초하여 임계이득과 임계주기를 구하여 동조하는 방법 및 주파수 영역에서 임계이득과 임계주기를 구하여 비례, 적분 및 미분 파라미터를 결정하는 방법이다 [2]. 이러한 제어수법은 시스템을 일반적인 선형계로 간주하거나 동작점 부근에서 선형화시킨 것에 불과하며, 또한 복잡한 수식모델로부터 제어조작량을 결정하므로, 실제 시스템과의 오차가 커지고, 온라인(On-line)으로 제어가 불가능하게 된다.

특히, 전력계통의 비선형성과 발전량증가를 제한 등으로 인한 계통의 해석 및 제어기 설계가 매우 어려운 실정이며, 최근 신뢰성이 높고 고품질의 전기에너지 수요의 급격한 증대와 함께 계통간의 연계가 강화되어 전력계통 규모도 광대해지고 복잡해짐에 따라 전력계통의 부하주파수 제어는 고도의 제어기법이 요구되고 있다. 이러한 문제의 해결책으로 최근 선형, 비선형 시스템을 불문하고 효과적인 성능을 가지며, 학습과 적용 그리고 병렬 분산처리가 가능한 신경회로망 제어 [3]나 전문가의 지식 및 경험을 제어규칙으로 퍼지추론에 의해 제어동작을 결정하는 퍼지제어 [4]와 같은 지능적인 제어가 전력계통에 도입되고 있다 [5].

따라서, 본 논문에서는 적응 뉴로 퍼지추론 시스템 (Adaptive Neuro-Fuzzy Inference System:ANFIS) 알고리즘 [6-7]을 이용하여 전력계통의 부하주파수를 일정하게 유지하기 위해 발전소의 조속계통을 제어하는데 있어 기존의 선형제어기인 PID 제어기의 성능향상을 위해 ANFIS 전 보상 PID(ANFIS Precompensated PID) 제어기를 설계하였다. 이러한 ANFIS 전 보상은 기존의 PID 제어기를 그대로 유지하면서, 기준점 (Set point)을 자동 변경하도록 비선형 입출력 관계를 Sugeno 형의 퍼지 If-Then 규칙에 의해 전건부 멤버십 함수의 파라미터 및 후건부 선형 파라미터로 표현하도록 하였다. 그리고 이러한 파라미터들은 최강하법 (Gradient Descent Method)과 최소사승추정 (Least Squares Estimate)에 의해 계산된다. 제안한 보상기적 설계기법은 전력계통의 복잡한 비선형성으로 인한 정확한 모델링의 어려움과 이로 인한 문제점들을 극복하는데 만족할 만한 방법일 것으로 기대된다. 이에 대한 실험으로 ANFIS 전 보상 PID 제어기가 전력계통의 다양한 부하의란에 대해 속응성이 좋고 부하주파수 최대 편차량과 연계선 조류 편차량의 경감 및 도달시간과 정정 시간을 최소화시킬 수 있음을 보이고자 한다.

2. 본 론

2.1 계통 방정식

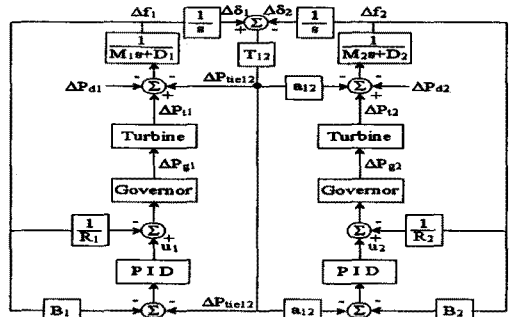


그림 1. PID 제어기를 가지는 2지역 전력계통의 블록선도

다수의 제어지역이 상호 연계된 전력계통의 효율적인 주파수 제어대책을 검토하기 위하여 C. E. Fosha등 [1]이 제안한 2지역 모델계통을 주로 사용한다. 이는 Fosha등이 9차계로 선형모델 화하여 연구한 이래 2지역 전력계통의 부하주파수 제어에 대한 연구모델로 많이 이용되고 있다. 본 논문에서 사용한 모델계통은 그림 1과 같다.

## 2.2 ANFIS 전 보상 PID 제어기

### 2.2.1 ANFIS 구조

본 논문에서 적용하고자 하는 알고리즘은 모델링, 의사결정, 신호처리 및 제어 등에 있어 다양하게 적용되고 있는 ANFIS로서 특징으로는 첫째, 비선형 대응이 다른 선형방식보다 월등하고, 둘째, 조정변수의 개수가 다른 방식에 비해 훨씬 적으며, 셋째, 적용 시 출력오차를 감소시킬 뿐만 아니라 외란을 최소화시킬 수 있는 장점이 있다. 입력  $e$ 와  $\Delta e$ , 그리고 출력  $y$ 를 가지는 퍼지추론 시스템은 식(1)과 같다. 퍼지규칙은 Takagi- Sugeno 형의 퍼지 If-Then 규칙을 이용한다.

$$\begin{aligned} \text{If } e \text{ is } A_1 \text{ and } \Delta e \text{ is } B_1, \text{ then } f_1 &= \alpha_1 e + \beta_1 \Delta e + \gamma_1 \\ \text{If } e \text{ is } A_2 \text{ and } \Delta e \text{ is } B_2, \text{ then } f_2 &= \alpha_2 e + \beta_2 \Delta e + \gamma_2 \\ &\vdots \\ \text{If } e \text{ is } A_9 \text{ and } \Delta e \text{ is } B_9, \text{ then } f_9 &= \alpha_9 e + \beta_9 \Delta e + \gamma_9 \end{aligned} \quad (1)$$

그림 2는 본 논문에서 적용된 1차 Sugeno 퍼지모델에 대한 퍼지규칙과 퍼지추론을 보여주고 있다. 여기서 9개의 규칙은 각각 크리스프(Crisp)한 출력을 가지기 때문에 전 출력을 가중치 평균(Weighted average)으로 연계를 알 수 있고, 또 비퍼지화에 필요한 시간을 절약할 수 있음을 알 수 있다. 그림 3은  $e$ ,  $\Delta e$ 를 입력으로 하는 ANFIS 구조를 나타내고 있다.

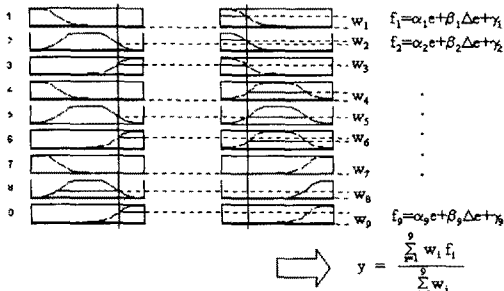


그림 2. Sugeno-Takagi형의 퍼지규칙과 퍼지추론

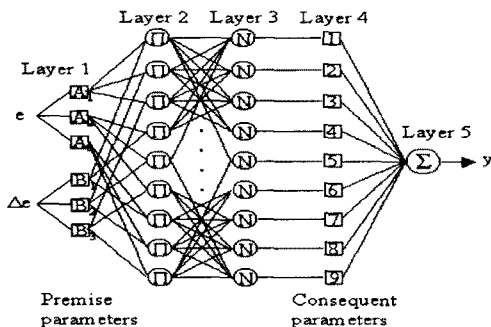


그림 3. ANFIS 구조

ANFIS 구조는  $O_i^1$ 에 의해 표현되는 각각의 층에서 노드의 출력을 가지는 5개의 층으로 구성한다. 여기서  $i$ 는 1층의  $i^{\text{th}}$ 노드이다. 본 논문에서는 다음과 같이 2입력 9규칙 일차 Sugeno 시스템을 사용하였다.

Layer 1 : Generate the membership grades

$$O_i^1 = \mu_{A_i}(e) \quad i = 1, 2, 3 \quad (2)$$

$$O_i^1 = \mu_{B_{i-3}}(\Delta e) \quad i = 4, 5, 6$$

Layer 2 : Generate the firing strengths

$$O_i^2 = w_i = \mu_{A_i}(e) \times \mu_{B_i}(\Delta e), \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (3)$$

Layer 3 : Normalize the firing strengths

$$O_i^3 = \bar{w}_i = w_i / \sum_j w_j, \quad i = 1, 2, \dots, 9 \quad (4)$$

Layer 4 : Calculate rule outputs based on the consequent parameters

$$O_i^4 = \bar{w}_i f_i = \bar{w}_i (\alpha_i e + \beta_i \Delta e + \gamma_i) \quad (5)$$

Layer 5 : Sum all the inputs from layer 4

$$O_1^5 = y = \sum_i \bar{w}_i f_i = \sum_i w_i f_i / \sum_i w_i \quad (6)$$

### 2.2.2 ANFIS 하이브리드 학습규칙

ANFIS는 Sugeno 시스템의 퍼지 시스템 파라미터를 최적화하기 위해 하이브리드 학습규칙을 사용한다 [6,7]. ANFIS 구조는 다음과 같은 두 개의 학습 가능한 파라미터 집합으로 구성된다.

- 1) 전건부 멤버십 함수 파라미터 {a, b, c}
- 2) 후건부 다항식 파라미터 { $\alpha, \beta, \gamma$ }

ANFIS 학습은 전건부 파라미터를 최적화하기 위한 최급강하법을 사용하고 후건부 파라미터를 위해 최소 자승 추정을 사용한다. 이것은 오차를 줄이기 위해 두 가지의 매우 다른 알고리즘을 사용하고 있기 때문에 학습규칙은 하이브리드라고 불리게 된다. 후건부 파라미터는 먼저 최소자승추정을 사용하여 갱신되고 전건부 파라미터는 아직 존재하는 오차를 역전파법에 의해 갱신된다. 이를 정리하면 표 1과 같다.

표 1. ANFIS 하이브리드 학습

	Forward pass	Backward pass
Premise parameters	Fixed	Gradient descent method
Consequent parameters	Least squares estimate	Fixed
Signals	Node outputs	Error signals

### 2.2.3 ANFIS 전 보상기를 이용한 PID 제어를 가지는 2지역 전력계통

본 논문에서는 PID 제어기의 자동동조를 위해 기준점 변경(Set point modification)과 이득 변경(Gain modification) [8] 중 전자의 방식을 사용하였으며, 기준점을 자동으로 조정하기 위한 제어수법으로 ANFIS 전 보상기를 설계하였다. 제안된 ANFIS 전 보상 PID 제

여기를 가지는 2지역 전력계통의 기본 제어구조는 그림 4와 같으며, 종래의 제어기인 PID 제어기의 성능향상을 위해 적응 뉴로 퍼지추론 기법에 기초를 둔 보상기적 접근으로 구성하였다.

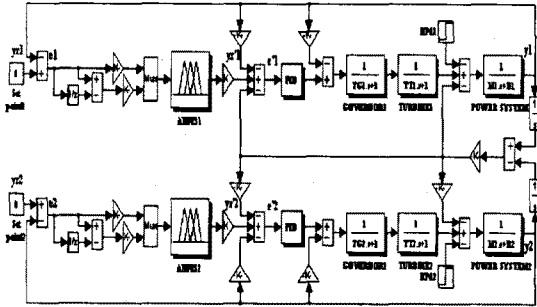


그림 4. 제안한 ANFIS 전 보상 PID 제어기를 가지는 2지역 전력계통의 블록선도

ANFIS 전 보상은 식(7)과 같이 전 보상기 기준입력  $y'_r$ 을 생성하기 위한 기준입력  $y_r$ 과 플랜트 출력  $y$ 를 사용한다.

$$\begin{aligned} e(k) &= y_r(k) - y(k) \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \\ y'_r(k) &= \text{ANFIS}[e(k), \Delta e(k)] \end{aligned} \quad (7)$$

이때,  $e(k)$ 는 기준입력  $y_r(k)$ 와 플랜트 출력  $y(k)$ 사이의 오차,  $\Delta e(k)$ 는 오차의 변화량이다. 또한, ANFIS  $[e(k), \Delta e(k)]$ 는 적응 뉴로 퍼지추론 기법에 기초를 둔  $e(k)$ 와  $\Delta e(k)$ 의 비선형 함수이다. 보상된 명령신호  $y'_r(k)$ 는 그림 4에서처럼 종래의 PID 설계를 위한 새로운 기준신호로 사용된다. PID 제어기를 위한 방정식은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} e'(k) &= y'_r(k) - y(k) \cdot B_i - \Delta P_{tieij} \\ \Delta e'(k) &= e'(k) - e'(k-1) \\ u(k) &= u(k-1) + K_P \Delta e'(k) + K_I e'(k) \\ &\quad + K_D (\Delta e'(k) - \Delta e'(k-1)) \end{aligned} \quad (8)$$

$e'(k)$ 는 보상된 기준입력  $y'_r(k)$ 와 제한입력  $y(k) \cdot B_i - \Delta P_{tieij}$  사이의 보상된 오차이고,  $\Delta e'(k)$ 는 보상된 오차의 변화량이다.  $u(k)$ 는 플랜트의 입력이다.

#### 2.2.4 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 2지역 전력계통의 부하주파수 제어를 위해 PID 제어기를 설계하였고, 이 PID 제어기가 가지고 있는 한계성을 보상하기 위해 적응 뉴로 퍼지추론 기법에 기초를 둔 전 보상기를 사용하였다.

사례연구는 부하의란을 다양하게 변화시켰을 때 제안한 ANFIS 전 보상 PID 제어의 속응성과 강인성을 고찰하였으며, 종래의 제어기법으로는 PID 제어[2]를 사용하였다. 이때 ZN법에 의해 동조된 PID 제어기의 파라미터는  $K_{P1} = 2.07$ ,  $K_{I1} = 3.39$ ,  $K_{D1} = 0.32$ 이다.

표 2는 1지역과 2지역의 학습전과 학습후의 전건부 ( $e, \Delta e$ )의 파라미터( $a, b, c$ )를 나타낸다. 표 3은 역시 각 지역의 학습전과 학습후의 후건부 ( $y$ )의 파라미터( $\alpha, \beta, \gamma$ )를 나타낸다. 특히 후건부의 파라미터는 선형 파라미터로 구성되어 있으므로 최적의 규칙선정에 이용될 수 있을 것으로 보인다.

표 2. 전건부의 초기와 최종 파라미터

	Initial parameters of area 1 (e, $\Delta e$ )			Initial parameters of area 2 (e, $\Delta e$ )		
	a	b	c	a	b	c
N	0.5	2.5	-1	0.50	2.5	-1
Z	0.5	2.5	0	0.5	2.5	0
P	0.5	2.5	1	0.5	2.5	1

Final parameters (e) of area 1			Final parameters ( $\Delta e$ ) of area 1		
a	b	c	a	b	c
0.5345	2.4940	-0.9838	0.5833	2.5000	-0.9229
0.4817	2.5080	0.0125	0.4878	2.5130	0.0158
0.5151	2.4910	1.0170	0.5286	2.4950	1.0090

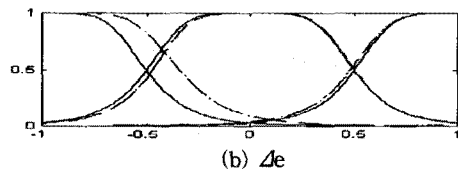
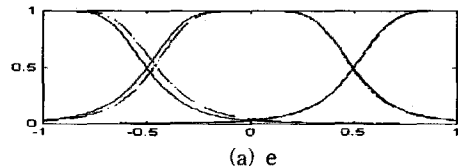
Final parameters (e) of area 2			Final parameters ( $\Delta e$ ) of area 2		
a	b	c	a	b	c
0.5524	2.4960	-0.9666	0.5434	2.4860	-1.0070
0.5056	2.4930	-0.0277	0.4829	2.5250	0.0027
0.5052	2.4990	1.0040	0.5426	2.4820	1.0320

표 3. 후건부의 초기와 최종 파라미터

	Initial parameters of area 1			Final parameters of area 1		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	0.0000	0.0000	-1.0000	-0.0263	0.0484	-0.1585
2	0.0000	0.0000	-0.7500	-0.0084	0.1652	-0.3110
3	0.0000	0.0000	-0.5000	0.1462	0.0419	-0.0404
4	0.0000	0.0000	-0.2500	-0.0827	0.1888	-0.2280
5	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0015	-0.0618	0.0017
6	0.0000	0.0000	0.2500	0.0419	0.0300	0.1969
7	0.0000	0.0000	0.5000	-0.0280	0.0193	0.1246
8	0.0000	0.0000	0.7500	-0.0327	-0.0267	0.7898
9	0.0000	0.0000	1.0000	0.0957	0.1408	0.8479

	Initial parameters of area 2			Final parameters of area 2		
	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$	$\alpha$	$\beta$	$\gamma$
1	0.0000	0.0000	-1.0000	-0.0164	0.0361	-0.0272
2	0.0000	0.0000	-0.7500	0.1243	0.6790	-0.3522
3	0.0000	0.0000	-0.5000	0.1737	0.4063	-0.3154
4	0.0000	0.0000	-0.2500	-0.1296	-0.1467	-0.1908
5	0.0000	0.0000	0.0000	-0.0003	0.0131	-0.0073
6	0.0000	0.0000	0.2500	0.0346	-0.0036	0.2109
7	0.0000	0.0000	0.5000	-0.0362	0.1538	0.4684
8	0.0000	0.0000	0.7500	-0.0685	0.0811	0.7041
9	0.0000	0.0000	1.0000	0.0170	-0.0161	0.9897

또 각 지역의 초기 멤버십 함수와 변경된 멤버십 함수는 그림 5와 같다. 그림에서 실선은 초기 멤버십 함수를 나타내고, 단선은 변경된 멤버십 함수를 나타낸다.



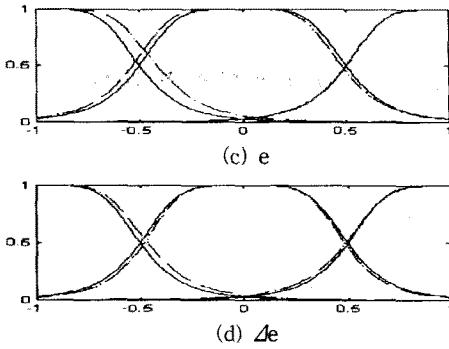
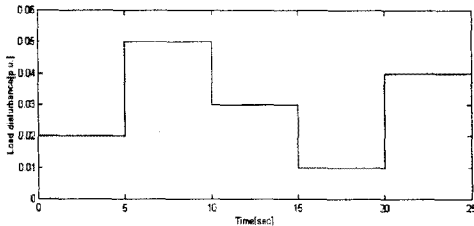
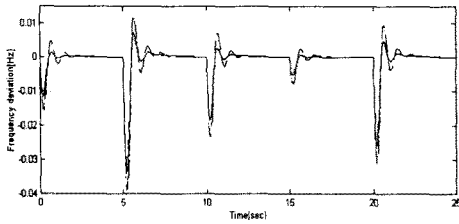


그림 5. 초기(실선)와 최종(단선) 멤버십 함수 : (a) e, (b)  $\Delta e$  - 1지역, (c) e, (d)  $\Delta e$  - 2지역

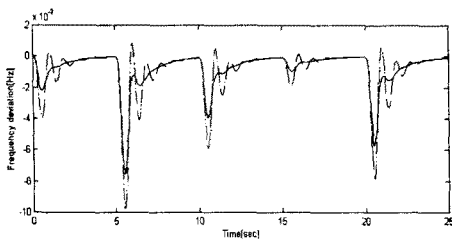
그림 6의 (a)는 시간 변화에 따른 1지역의 부하의란을 나타내고 있다. 강인성을 검증하기 위해 1지역에 대하여 25초 동안에 5번의 다양한 부하 변화를 일으켰을 때로 하였다. 그림 6의 (b)와 (c)는 각 지역에 대한 주파수 최대 편차량으로, 종래의 제어기법인 ZN PID보다 제안한 ANFIS 전 보상 PID 제어가 주파수 최대 편차량을 경감시켰을 뿐 만 아니라 부하의란의 증가에서도 적응성이 있음을 보여주고 있다. 그림 6의 (d)는 연계선 조류 편차량의 응답특성을 나타내고 있는데, 역시 제안한 제어기법이 종래의 제어기법보다 편차량을 경감시킬 수 있었다. 따라서 종래의 제어기법인 PID 제어기에 ANFIS 전 보상을 추가한 ANFIS 전 보상 PID 제어는 비교적 간단한 구조임에도 불구하고 전력계통의 부하주파수 제어에 매우 적합함을 알 수 있었다.



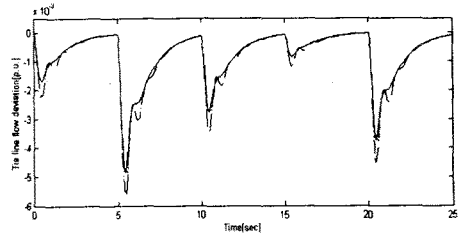
(a)  $\Delta P_{d1}$



(b)  $\Delta f_1$



(c)  $\Delta f_2$



(d)  $\Delta P_{tie12}$

그림 6. ANFIS 전 보상 PID(실선)와 ZN PID(단선) 제어기에 의한 전력계통의 동특성 응답

### 3. 결 론

본 논문에서는 2지역 전력계통의 부하주파수 제어를 위한 ANFIS 전 보상 PID 제어를 제안하였다. 제안한 보상기적 접근은 제어대상의 특성이나 부하의란의 변화에 대해 적응성을 갖도록 PID 제어기의 기준입력을 자동으로 조정하도록 설계하였으며, 비선형 입력력 관계를 Sugeno형의 If-Then 규칙에 의해 전건부 멤버십 함수의 파라미터를 최급강하법으로, 후건부 선형 파라미터를 최소자승추정에 의해 표현하도록 한 ANFIS 알고리즘을 이용하였다. 본 논문의 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 종래의 제어기법 시 존재하는 비선형성에 대한 한계를 학습기능을 가진 전 보상기를 사용함으로써 전력 계통에 적합함을 보였다.

둘째, PID 제어기의 자동동조를 위해 기준점 변경과 이득 변경중 전자의 방식을 사용하였으며, 이 방식은 현재 전력계통에 사용중인 PID 제어시스템에 매우 간단히 설치될 수 있는 제어구조를 가지고 있음을 보였다.

셋째, 종래의 제어기법인 ZN PID 제어기에 의한 부하주파수 제어특성은 주파수 편차량과 연계선 조류 편차량의 특성이 최대편차량과 장시간의 진동으로 수렴특성이 좋지 못한다에 비해, ANFIS 전 보상 PID 제어는 최대 편차량 및 정정시간 등의 특성에서 우수함을 보였다.

### (참 고 문 헌)

- [1] C. E. Fosha and O. I. Elgerd, "The Megawatt-Frequency Control Problem : A New Approach Via Optimal Control Theory", IEEE Trans. Power App. and Syst., Vol. Pas-80, No. 4, pp. 553-577, 1970.
- [2] C. C. Hang, K. J. Astrom and W. K. Ho, "Refinements of the Ziegler-Nichols tuning formula", IEE Proc.-D, Vol. 138, No.2, pp. 111-118, 1991.
- [3] S. Akhyar and S. Omatu, "Neuromorphic Self-Tuning PID Controller", IEEE Proc., pp. 552-557, 1993.
- [4] C. C. LEE, "Fuzzy Logic in Control Systems : Fuzzy Logic Controller - Part I, II", IEEE Trans. Cont. Syst. Tech., Vol. 20, No. 2, pp. 404-435, 1990.
- [5] C. S. Chang, W. Fu and F. Wen, "Load Frequency Control using Genetic-Algorithm based Fuzzy Gain Scheduling of PI Controllers", Electric Machines and Power Systems, 26, pp. 39-49, 1998.
- [6] J.-S. R. Jang, "ANFIS : Adaptive-Network-Based Fuzzy Inference System", IEEE Trans. Syst. Cyber., Vol. 23, No. 3, pp. 665-685, 1993.
- [7] J.-S. R. Jang and C.-T. Sun, "Neuro-Fuzzy Modeling and Control", IEEE Proceedings, Vol. 83, No. 3, pp. 378-406, 1995.
- [8] J. H. Kim, K. C. Kim and E. K. P. Chong, "Fuzzy Precompensated PID Controllers", IEEE Trans. Cont. Syst. Tech., Vol. 2, No. 4, pp. 406-411, 1994.