

자기조정 뉴로-퍼지제어기를 이용한 다지역 전력시스템의 부하주파수 제어

論 文

49A-3-2

Load Frequency Control of Multi-area Power System using Auto-tuning Neuro-Fuzzy Controller

鄭亨煥* · 金相孝** · 朱碩珉** · 許東烈*** · 李權純§

(Hyeng-Hwan Chung · Sang-Hyo Kim · Seok-Min Joo · Dong-Ryol Hur · Kwon-Soon Lee)

Abstract - The load frequency control of power system is one of important subjects in view of system operation and control. That is, even though the rapid load disturbances were applied to the given power system, the stable and reliable power should be supplied to the users, converging unconditionally and rapidly the frequency deviations and the tie-line power flow ones of each area into allowable boundary limits. Nonetheless of such needs, if the internal parameter perturbation and the sudden load variation were given, the unstable phenomena of power system can be often brought out because of the large frequency deviation and the unsuppressible power line one.

Therefore, it is desirable to design the robust power system controller which can stabilize effectively the given power system as soon as possible. In this paper the robust neuro-fuzzy controller was proposed and applied to control of load frequency over multi-area power system. The architecture and algorithm of a designed NFC(Neuro-Fuzzy Controller) were consist of fuzzy controller and neural network for auto tuning of fuzzy controller. The adaptively learned antecedent and consequent parameters of membership functions in fuzzy controller were acquired from the steepest gradient method for error-back propagation algorithm.

The performances of the resultant NFC, that is, the steady-state deviations of frequency and tie-line power flow and the related dynamics, were investigated and analyzed in detail by being applied to the load frequency control of multi-area power system, when the perturbations of predetermined internal parameters. Through the simulation results tried variously in this paper for disturbances of internal parameters and external stepwise load changes, the superiorities of the proposed NFC in robustness and adaptive rapidity to the conventional controllers were proved.

Key Words : Load frequency control, Fuzzy control, Multi-layer neural network, Steepest gradient method, Error back propagation algorithm, Neuro-fuzzy control

1. 서 론

전력시스템의 부하주파수제어는 계통운용 및 제어에 있어서 주요한 과제 중의 하나이다. 전압 및 주파수를 규정범위 내로 유지하면서 높은 신뢰도와 안정성을 갖고 수용가에 전력을 공급해야 한다. 그러나, 내부 파라미터나 부하의 급격한 변동 등에 기인한 외란 발생시 각 전력 시스템의 주파수 동요 및 조류 편차의 발생으로 계통의 불안정 현상이 빈발할 수 있다. 이를 효과적으로 제어하여 신속하게 전력 시스템의 안정화를 도모하려면 외란에 강인한 제어기를 설계하지 않으면 안된다[1-5]. 따라서, 전기에너지의 품질을 표시하는 두 개의 상태량인 전압 및 주파수를 허용범위 내로 수렴시키기 위해 각 지역에 대한 지역 주파수 응답특성을 이용한 주파수 편의 연계선 전력제어기법과 현대의 최적제어

이론을 이용한 선형레귤레이터의 설계기법을 제시한 이래 현재까지 부하주파수제어에 관한 많은 연구가 진행되어져 왔다[6-14].

이상의 논문에서 제어기법을 살펴보면, 시스템을 일반적 인 선형계로 간주하고 있으며 제어 조작량을 결정하는데 복잡한 수식을 풀어야할 뿐만 아니라, 특히 전력시스템은 각 지역간의 연계선 및 발전전력 증가를 제한 등의 강한 비선형성으로 인해 계통의 해석 및 제어기 설계가 매우 힘든다는 사실을 알 수 있다. 그래서 최근 선형, 비선형 시스템을 불문하고 전문가의 지식 및 경험, 학습 등을 통해 제어동작을 결정하는 퍼지제어 및 신경회로망을 이용한 지능제어 연구가 진행되고 있다.

퍼지제어는 유연성이 있는 제어수법으로 정확한 수식 모델을 취하지 않아도 되고, 언어적 제어규칙을 이용하여 온라인(on-line)으로 단시간에 제어 입력을 결정할 수 있기 때문에 급변하는 부하 외란 등에 대한 적응 특성이 뛰어난 비선형 제어기로서, 전력시스템의 각종 비선형성을 보상할 수 있으며 대단히 효과적으로 전력시스템의 부하주파수와 연계선 조류의 안정화 제어에 적용될 수 있다. 반면에 초기 및 최적규칙의 선정 및 파라미터 조정, 제어변수의 양자화 레벨(Quantized level) 선정 및 정상 상태에서의 오차상존으로 인

* 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣電子컴퓨터工學部 教授 · 工博

** 正 會 員 : 東亞大 情報技術研究所 特別研究員 · 工博

*** 正 會 員 : 東亞大 大學院 電氣工學科 博士課程

§ 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣電子컴퓨터工學部 富教授 · 工博

接受日字 : 1999年 9月 20日

最終完了 : 2000年 1月 24日

한 불안정 현상 등의 문제점을 내포하고 있다[15-17].

한편, 신경회로망은 입력과 출력의 정보로부터 입력력 관계를 학습함으로써 자동적으로 지식획득(Knowledge acquisition)이 가능하고, 정보의 분산처리에 의한 오차 보간 능력과 외란에 대한 강인성 및 속응성 등을 갖는다. 이와 반면에 신경망제어 구조에서는 언어적인 제어가 아니라 수치적인 제어로 인하여 제어능력에 많은 저해요인이 발생하여, 신경망 학습시 지역적 국소치(local minimum)에 빠질 수 있다는 문제점을 갖는다[18-19]. 이러한 신경망 이론과 퍼지이론이 갖는 각각의 단점을 보완하고 장점을 강화하기 위해 퍼지와 신경망을 결합시킨 제어기에 대한 연구가 시도되고 있다. 필자[20]등은 퍼지제어시 발생하는 문제점을 해결하기 위해 신경회로망의 오차역전과 학습알고리즘을 이용하여 최적의 스케일팩터 기법을 제시하여 이를 2지역 계통의 부하주파수 제어에 적용한 바 있다.

따라서, 본 논문에서는 이와 같은 요청에 부합되는 강인한 퍼지제어를 얻고자, 다중 신경회로망을 이용하여 퍼지 제어기 멤버십 함수의 전건부 및 후건부 파라미터들을 시스템에 맞게 자기 조정 하기 위해 최급구배법(Steepest Gradient Method)에 근거한 오차 역전과 알고리즘으로 적용 학습시킬 수 있는 뉴로-퍼지제어기 (Neuro-Fuzzy Control : NFC)의 구조 및 알고리즘을 제안하였다. 이를 다지역 전력 시스템의 부하주파수 제어에 적용하여 종래의 제어기법인 퍼지제어기(Fuzzy Logic Controler : FLC)[21-22], 신경망제어기(Neural Network Controller : NNC)[23]에 적용시켜 제안한 NFC의 플랜트 내부 파라미터의 변동이나 외부의 환경 변화시, 정상상태 편차, 도달시간 및 주파수 최대 편차량 등을 최소화시킬 수 있음을 보이고자 한다.

2. 부하주파수제어 모델 계통 방정식

다수의 제어 지역이 상호 연계된 전력 계통의 효율적인 주파수 제어 대책을 검토하기 위하여 C. E. Fosha 등이 제안한 모델 계통을 주로 사용한다. 이는 Fosha 등이 선형 모델화하여 연구한 이래 다지역 전력 계통의 부하주파수제어에 대한 연구 모델로 많이 이용되고 있다[6].

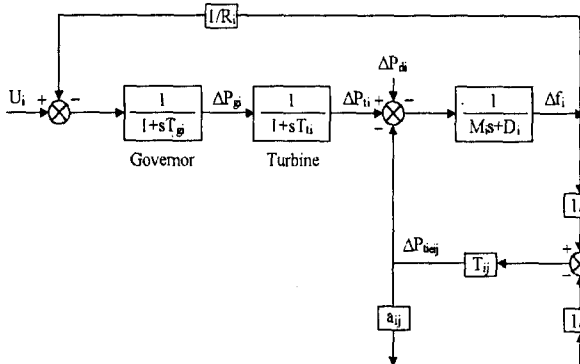


그림 1 다지역 전력시스템의 블록선도
Fig. 1 Blok-diagram of multiarea power system

본 논문에서 사용한 모델 계통은 그림 1과 같으며, 계통

정수는 표 1과 같다. 이 시스템의 각 계통 용량 $P_n = P_r = 2,000[MW]$ 이고, 연계선 용량 $P_{tiemax}=200[MW](10\%)$ 이며, 지역간 전압 위상 차의 평형치 δ_{ij}^* ($= \delta_i^* - \delta_j^*$)=30 [deg], 계통용량비 $a_{ij} = -P_{rj}/P_{ri} = -1$ 이다.

표 1 시스템 파라미터
Table 1 System parameters

T_{gi}	=	0.08	[s]
T_{ui}	=	0.3	[s]
D_i	=	0.00823	[p.u.MW/Hz]
M_i	=	0.1667	[p.u.MW .s/Hz]
R_i	=	2.4	[Hz/p.u.MW]
T_{ij}	=	0.545	[p.u.MW/Hz]
P_{tiemax}	=	0.1	[p.u.MW]
P_{ri}	=	2000	[MW]
δ_{ij}^*	=	30	[deg]
a_{ij}	=	$-P_{rj} / P_{ri} = -1$	

그림 1을 기초로 한 i 지역 계통의 선형 모델 상태 방정식은 식(1)과 같이 표현될 수 있다

$$\frac{d}{dt} X(t) = A X(t) + B U(t) + \Gamma \Delta P_d \tag{1}$$

$$Y(t) = C X(t)$$

이다. 이때 **A**는 상태 계수 행렬, **B**는 제어 계수행렬이고, **Γ**는 외란 구동행렬을 나타낸다. i 지역에 대한 상태 변수는 식(2)와 같이 표현 된다.

$$X(t) = \left[\int \Delta P_{tieij} dt \int \Delta f_i dt \Delta f_i \Delta P_{tieij} \Delta P_{gi} \right]^T \tag{2}$$

3. 종래의 제어기법

3.1 퍼지제어

퍼지제어는 언어적 제어 규칙만 적용함으로써 수학적 모델링이 불가능한 경우라도 제어가 가능하고, 초기 과도시 응답 특성이 양호한 장점을 지닌 반면, 부하 변동에 따른 강인성 또는 정상 상태의 잔류 편차 등이 발생하는 문제점이 있다. 이러한 문제점의 해결 방안으로 프로세서가 미리 정해진 영역 내에 들어올 때 제어 규칙 또는 스케일 팩터를 조절하는 윈도잉 기법, 멤버십 함수의 중심값과 폭 등이 유연하게 최적의 값으로 자기 조정될 수 있는 파라미터 자기 조정 기법 등을 들 수 있다.

퍼지추론 알고리즘은 언어적인 형태로 기술된 퍼지제어의 규칙을 적용하기 위한 논리적인 실행 과정을 일컫는다. 이 추론법은 몇 가지 명제에서 어느 한 명제를 도출하는 것으로, 이는 인간이 행하고 있는 추론법과 유사하다. 따라서 본 논문에서는 Mamdani의 퍼지 추론법인 MMGM (Min-Max Gravity Method)을 이용하였다.

퍼지제어 이론을 근거로 하여 전력 계통의 부하주파수제어에 적용하면 i 지역에 대한 퍼지제어기의 구성도는 그림 2와 같다.

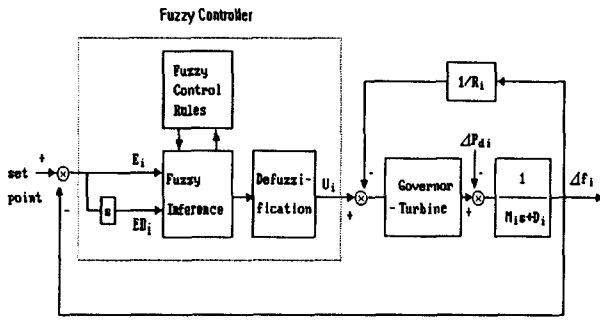


그림 2 퍼지제어되는 i 지역 전력시스템의 블록선도
Fig. 2 Block-diagram of FLC architecture for i area power system

퍼지제어기의 i 지역의 k 번째 제어 규칙은 식(3)과 같은 형태를 사용하였다.

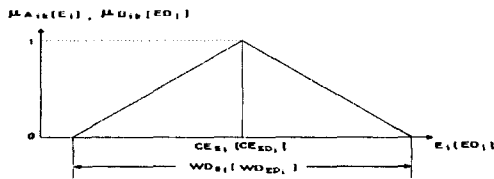
$$R_k : \text{If } E_i \text{ is } A_{ik} \text{ and } ED_i \text{ is } B_{ik} \text{ then } U_i \text{ is } C_{ik} \quad (3)$$

여기서, E_i 는 제어 대상 i 지역의 출력치와 목표치와의 오차이고, ED_i 는 오차 변화율이며, U_i 는 제어량을 표시한다. 또한, A_{ik} 과 B_{ik} 는 입력 변수의 퍼지변수, C_{ik} 는 출력 변수의 퍼지변수를 나타낸다. 퍼지추론을 하기 위해서는 우선 퍼지화에 따른 멤버십 함수가 정의되어야 한다. 멤버십 함수는 삼각형, 사다리형, 종형 등이 있으며, 여기서는 일반적으로 많이 사용되고 계산하기에 편리한 삼각형을 사용하였다. 그림 3은 전건부와 후건부의 삼각형 멤버십 함수를 발생시키기 위한 모형이다, 이때 삼각형 멤버십 함수에 있어 전건부의 $\mu_{A_{ik}}(E_i)$ 와 $\mu_{B_{ik}}(ED_i)$, 후건부의 $\mu_{C_{ik}}(U_i)$ 는 식(4)와 같다. 여기서, WD 는 각 멤버십 함수의 폭, CE 는 중심값이다.

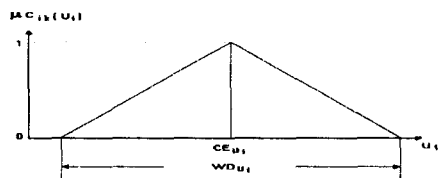
$$\mu_{A_{ik}}(E_i) = 1 - \frac{2|E_i - CE_{E_i}|}{WD_{E_i}}$$

$$\mu_{B_{ik}}(ED_i) = 1 - \frac{2|ED_i - CE_{ED_i}|}{WD_{ED_i}} \quad (4)$$

$$\mu_{C_{ik}}(U_i) = 1 - \frac{2|U_i - CE_{U_i}|}{WD_{U_i}}$$



(a) Antecedent variables



(b) Consequent variables

그림 3 멤버십 함수
Fig. 3 Membership functions

여기서, CE_{E_i} , CE_{ED_i} 및 CE_{U_i} 는 멤버십 함수의 중심값으로 적합도가 최대가 되는 값이고, WD_{E_i} , WD_{ED_i} 및 WD_{U_i} 는 멤버십 함수의 폭을 나타낸다. 따라서 식(4)의 삼각형 멤버십 함수의 발생 알고리즘을 이용하여 그림 4와 같이 5개의 삼각형 퍼지변수를 사용하였으며, 멤버십 함수의 중심값 및 폭을 표 2에 나타내었다.

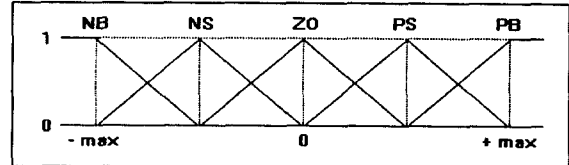


그림 4 E_i , ED_i 및 U_i 의 멤버십 함수
Fig. 4 Membership functions of E_i , ED_i and U_i

표 2 멤버십 함수의 중심 및 폭값
Table 2 Center and width values of membership functions

		NB	NS	ZO	PS	PB
E_i	CE_{E_i}	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0
	WD_{E_i}	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
ED_i	CE_{ED_i}	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0
	WD_{ED_i}	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0
U_i	CE_{U_i}	-2.0	-1.0	0.0	1.0	2.0
	WD_{U_i}	2.0	2.0	2.0	2.0	2.0

전력계통에서의 부하주파수제어는 계통의 주파수 및 연계선 조류 편차를 규정치 이하로 유지하는 것이다. 그러므로, 부하주파수 편차의 오버슈트량과 정상 상태의 편차량을 감소시키며 정정 시간을 줄이고, 또한 연계선 조류 편차량을 최소화시켜야 한다. 이를 위한 퍼지제어기 설계를 위해서는 우선 언어적으로 표현된 제어 규칙을 생성해야 한다. 일반적으로 제어규칙 생성은 숙련된 조작자의 경험과 제어 기술자의 전문지식을 바탕으로 구하는 경우가 대부분이다. 또한, 운전자의 제어 동작을 제어 규칙화하거나 시험 운전을 통하여 제어 규칙을 생성할 수도 있다. 만약 어떤 한 지역에만 부하의란 (ΔP_{di})이 지속적으로 발생하였다고 가정하였을 경우 제어기를 부가하지 않은 상태($U_i=0$)의 시스템 동특성을 기준으로 하여 제어 규칙을 생성할 수 있다. 이 때의 시스템 응답 특성으로부터 각 사례 연구에 대한 퍼지제어기의 제어규칙을 구하면 표 3과 같다.

본 논문에서는 일반적으로 많이 사용되는 Braae-Rutherford의 무게중심법을 사용하였다. 비퍼지화에 의한 최종 출력값 U_i^* 은 식(5)로 나타내어진다.

$$U_i^* = \frac{\sum_{k=1}^n [\mu_{A_{ik}}(E_i^0) \wedge \mu_{B_{ik}}(ED_i^0)] \cdot \overline{U_{ik}}}{\sum_{k=1}^n [\mu_{A_{ik}}(E_i^0) \wedge \mu_{B_{ik}}(ED_i^0)]} \quad (5)$$

여기서 ' \wedge '는 min 연산자를 의미하고, $\overline{U_{ik}}$ 는 k번째 규칙에서의 적합도를 나타내는 식(6)의 멤버십 함수의 $\mu_{C_{ik}}(U_i)$

표 3 제어 규칙

Table 3 Control rules

U ₁		E ₁					U ₂		E ₂					U ₃		E ₃					
		NB	NS	ZO	PS	PB			NB	NS	ZO	PS	PB			NB	NS	ZO	PS	PB	
ED ₁	PB			PB			ED ₂	PB			PB			ED ₃	PB						
	PS				PB			PS				PS				PS				PB	
	ZO			PS		PB		ZO			PS	PS	PB		ZO			ZO	PS	PB	
	NS			ZO				NS							NS				ZO		
	NB							NB							NB						

의 중심값이다.

$$\mu_{C_k(U_i)} = \mu_{A_k(E_1^i)} \wedge \mu_{B_k(E_2^i)} \wedge \mu_{C_k(U_i)} \quad (6)$$

3. 2 신경회로망

본 논문에서 사용한 다층 신경회로망은 입력층과 출력층 사이에 연산층이 되는 한 개 이상의 중간층이 존재하는 다층 구조를 사용하였다. 그림 5는 3층으로 구성된 다층 신경회로망이다.

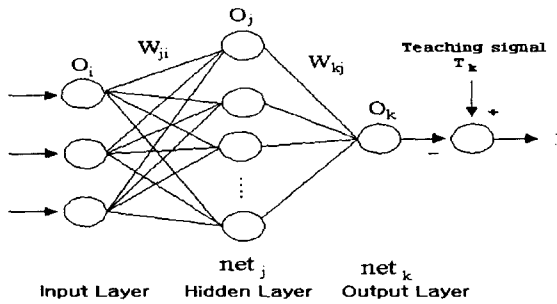


그림 5 다층 신경회로망 구조

Fig. 5 Architecture of multilayered neural network

다층신경회로망의 각 뉴런이 그림 5와 같이 구성되었을 경우 함수 $f(\cdot)$ 에 의해 뉴런 j 의 출력 O_j 가 결정되는 수식은 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} \text{net}_j &= f(\sum_i W_{ji} O_i + \theta_j) \\ O_j &= f(\text{net}_j) \end{aligned} \quad (7)$$

학습의 목표는 출력층 뉴런의 출력(O_k)과 교사신호(T_k) 사이의 오차를 $\delta^k (= T_k - O_k)$ 로 두고 자승오차 $E = \frac{1}{2} \sum_k (T_k - O_k)^2$ 를 최소화시키도록 연결강도를 계산하는 데 있다. 오차 δ^k 는 식(8)과 같다.

$$\frac{\partial E}{\partial O_k} = -(T_k - O_k) = -\delta^k \quad (8)$$

이 오차 E 는 연결강도 W_{kj} 의 함수로서 이 파라미터가 최적화 되었을 때 오차 E 는 최소가 된다. 연결강도가 만든 다차원의 오차표면에서 전역적 최소점에 도달시키는 방법을 최급구배법이라 한다.

시각 t 에 있어서 연결강도는 식(9)에 따라 조정된다.

$$W_{kj}(t+1) = W_{kj}(t) + \Delta W_{kj}(t) \quad (9)$$

여기서, 연결강도의 변화량 ΔW_{kj} 는 $-\frac{\partial E}{\partial W_{kj}}$ 에 비례하고 식으로 나타내면 식(10)과 같다.

$$\Delta W_{kj} = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{kj}} \quad (10)$$

식(10)의 우변의 미분을 연쇄규칙(chain rule)을 이용해서 바꿔 쓰면 식(11)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial W_{kj}} &= \frac{\partial E}{\partial O_k} \frac{\partial O_k}{\partial \text{net}_k} \frac{\partial \text{net}_k}{\partial W_{kj}} \\ &= -(T_k - O_k) f'(\text{net}_k) O_j \end{aligned} \quad (11)$$

연결강도의 변화량 ΔW_{kj} 는 최급구배법을 사용하면 식(12)와 같이 된다.

$$\begin{aligned} \Delta W_{kj} &= \eta (T_k - O_k) f'(\text{net}_k) O_j \\ &= \eta \delta_k O_j \end{aligned} \quad (12)$$

여기서, $\delta_k = (T_k - O_k) f'(\text{net}_k)$ 이다.

입력층과 중간층 사이의 연결강도 W_{ji} 의 변화량 ΔW_{ji} 도 같은 방법으로 식(13), (14)로 정의할 수 있다.

$$\Delta W_{ji} = -\eta \frac{\partial E}{\partial W_{ji}} = \eta \delta_j O_i \quad (13)$$

따라서 중간층의 오차 δ_j 는 (14)로 나타낼 수 있다.

$$\delta_j = \frac{\partial E}{\partial O_j} \frac{\partial O_j}{\partial \text{net}_j} = -[\sum_k \delta_k W_{kj}] f'(\text{net}_j) \quad (14)$$

따라서 중간층에서 연결강도의 변화량 ΔW_{ji} 는 식(15)와 같이 된다.

$$\Delta W_{ji} = \eta [\sum_k \delta_k W_{kj}] f'(\text{net}_j) O_i \quad (15)$$

중간층과 출력층 사이의 연결강도의 변화량은 식(16)과 같다.

$$\Delta W_{kj}(t) = \eta \delta_k O_j + m \Delta W_{kj}(t-1) \quad (16)$$

입력층과 중간층 사이의 연결강도의 변화량은 식(17)과 같다.

$$\Delta W_{ji}(t) = \eta \delta_j O_i + m \Delta W_{ji}(t-1) \quad (17)$$

신경회로망 이론을 근거로 하여 전력시스템의 부하주파수 제어에 적용하면 i 지역에 대한 신경회로망의 구성도는 그림 6과 같다.

시뮬레이션에 사용된 신경회로망은 입력층에 2개, 중간층에 10개, 출력층에 1개의 뉴런으로 구성하였다. 2개의 입력층 뉴런은 오차(E_i)와 오차변화량(ED_i)이 입력되게 하였다.

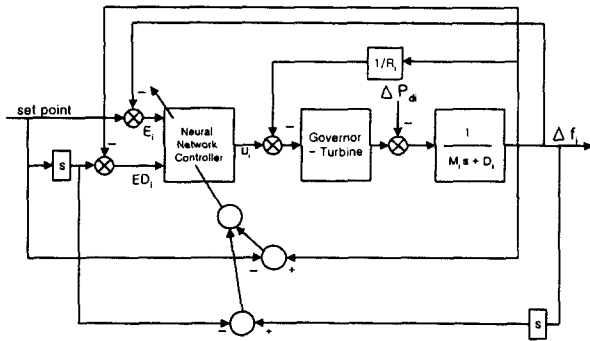


그림 6 NNC에 의한 i 지역 전력시스템의 블록선도
 Fig. 6 Block diagram of i area power system with NNC

4. 뉴로-퍼지제어기 설계

4.1 자기조정기법을 이용한 뉴로-퍼지제어기 설계

현재, 제어분야에서 비선형성이 강하고, 명확하지 않은 플랜트를 효과적으로 제어하기 위해서 퍼지이론이 응용되고 있다. 그러나 퍼지제어에 필요한 적절한 소속함수와 규칙을 구성하는 것은 전문가의 숙달된 지식에 의존하는 실정이다. 따라서 실제로 구성하기 어려운 경우가 많다. 그러므로 신경회로망의 학습기능을 이용하여 적합한 퍼지 소속함수와 규칙을 학습시킬 수 있다. 따라서 각각의 단점을 보완하고 장점을 강화하기 위해 논리 및 추론의 특성을 갖는 퍼지 이론과 학습 및 적용 능력을 갖는 신경망 이론과의 합성 및 융합을 이용한 연구가 시도되고 있다. 본 논문에서 사용한 뉴로-퍼지제어기의 구성은 그림 7과 같다.

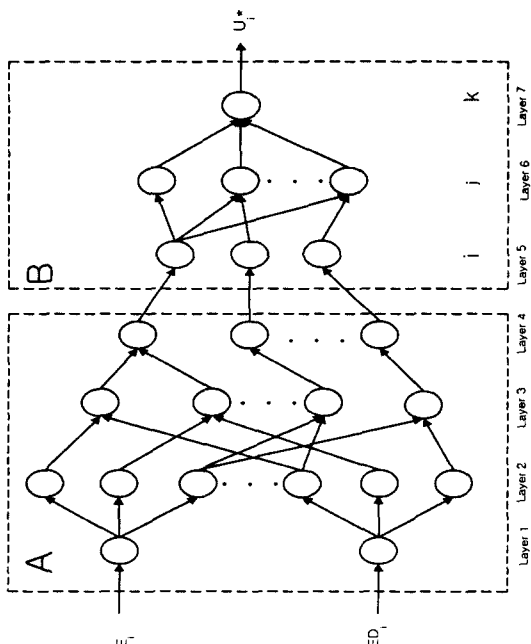


그림 7 i 지역의 뉴로-퍼지제어기 구조
 Fig. 7 Structure of NFC for i area

본 논문에서는 퍼지제어기에 신경망의 학습기법을 이용하여 퍼지제어기의 소속함수형태를 조정하여 시스템에 적합한 제어신호를 얻도록 구성한다. 이때, i 지역의 k번째 제어규칙은 식(3)과 같은 형태를 사용하였고, 멤버십 함수는 일반적으로 많이 사용되고 계산하기에 편리한 식(4)과 같은 삼각형 멤버십 함수를 사용하였다. 따라서, 식(4)의 삼각형 멤버십 함수의 발생 알고리즘을 이용하여 그림 4와 같이 5개의 삼각형 퍼지변수를 사용하였으며, 멤버십 함수의 중심 및 폭은 표 2와 같다.

본 논문의 모델구조는 그림 7과 같이 퍼지추론 방법에 의한 입력과 퍼지규칙의 조건부와의 소속정도를 계산하는 부분(BOX A)과 신경망에 의한 비퍼지화 연산부분(BOX B)으로 나누어진다.

먼저, 신경회로망에 의한 비퍼지화 연산부분을 살펴보면, 신경회로망의 함수근사화를 이용하여 비퍼지화 연산에 대한 부분을 다층 신경회로망으로 구성한다. 그리고 비퍼지화 부분의 학습을 위한 데이터는 결론부에 나타나는 언어항에 대한 Min-Max의 추론 방법으로 구한다.

신경망을 이용한 비퍼지화 부분은 그림 7의 비퍼지화 연산부분과 같이 3층의 다층 신경회로망으로 구성한다.

i) Layer 5 : 입력층으로서 퍼지제어기의 초기값인 중심, 폭, 제어량값을 입력으로 받아 들인다.

ii) Layer 6, 7 : 중간층과 출력층으로서 활성화(임계)함수는 출력[-1, 1]의 범위내에서 미분가능한 하이퍼볼릭 탄젠트 함수를 사용한다.

다음으로, 퍼지추론에 의한 입력과 퍼지규칙의 조건부와의 소속정도를 계산하는 부분은 다음과 같다.

입력과 소속정도를 계산하는 부분은 그림 7의 퍼지추론부와 같이 4개의 층으로 구성하였으며 퍼지추론부에서 각 층의 유니트 사이의 연결강도는 1로 고정한다.

i) Layer 1 : 각 유니트는 입력변수 (E_i, ED_i)에 해당된다.

ii) Layer 2 : 각 유니트는 언어항을 의미하며, 이 층에서는 입력에 대하여 해당 언어항의 소속정도, 즉 퍼지화 값을 구한다.

iii) Layer 3 : 각 유니트는 각각 퍼지규칙의 조건부에 해당되며, Layer 2 에서 계산된 소속정도를 최소값(MIN)연산을 통해 합성한다.

iv) Layer 4 : 각 유니트는 결론부의 언어항에 해당되며 결론부에 있는 퍼지규칙들의 소속정도를 최대값(MAX)연산을 통해 합성한다.

마지막으로, 소속함수 형태 조정을 위한 학습방법을 살펴보면, 소속함수 중심과 폭값을 조정하기 위한 학습방법으로 최급구배법을 사용하고, 신경회로망으로 학습된 비퍼지화 연산부분의 오차를 역전파 시켜서 입력과 각 규칙의 소속정도에 대한 오차값을 계산하는 방법을 사용한다. 따라서 식(18)에 의해 목적 함수를 최소화시킨다.

$$E = \frac{1}{2} (y^* - y^d)^2 \tag{18}$$

여기서, y*는 그림 7에 의해 구해지는 NFC의 출력 U_i*이고, y^d는 원하는 출력 즉 퍼지제어기의 출력이다. 따라서, 오차역전파 알고리즘에 의한 비퍼지화 부분의 각 층에서 역전파 되는 오차는 식(19)~(21)과 같다. 이때 k층(출력층)에

대한 오차는 식(19)와 같다.

$$\delta_k = -\frac{\partial E}{\partial \text{net}_k} = (y^* - y^d)f'(\text{net}_k) \quad (19)$$

j층(중간층)의 뉴런에 역전파 되는 오차는 식(20)과 같다.

$$\delta_j = -\frac{\partial E}{\partial \text{net}_j} = \sum_k \delta_k w_{kj} f'(\text{net}_j) \quad (20)$$

i층(입력층)의 뉴런에 역전파 되는 오차는 식(21)과 같다.

$$\delta_i = -\frac{\partial E}{\partial \text{net}_i} = \sum_j \delta_j w_{ji} \quad (21)$$

여기서, E는 출력오차의 함수로 식(22)와 같다.

$$E = \frac{1}{2} \left[\frac{\sum_{k=1}^m \mu_k(x) \overline{U}_{ik}}{\sum_{k=1}^m \mu_k(x)} - y^d \right]^2 \quad (22)$$

여기에서, $\mu_k(x) = \mu_{A_k}(E_i) \wedge \mu_{B_k}(ED_i)$

소속함수의 중심(CE_{ik})과 폭(WD_{ik})값을 조정하기 위해 B층의 각 파라미터 CE_{ik}, WD_{ik}, U_{ik}를 최급구배법을 이용하여 각각 수정한다. 각 파라미터의 증분항 연산식은 식(23)~(25)와 같다.

$$CE_{ik}(t+1) = CE_{ik}(t) - \eta_c \frac{\partial E}{\partial CE_{ik}} \quad (23)$$

$$WD_{ik}(t+1) = WD_{ik}(t) - \eta_w \frac{\partial E}{\partial WD_{ik}} \quad (24)$$

$$U_{ik}(t+1) = U_{ik}(t) - \eta_u \frac{\partial E}{\partial U_{ik}} \quad (25)$$

여기서, $\left[\frac{\partial E}{\partial CE_{ik}}, \frac{\partial E}{\partial WD_{ik}}, \frac{\partial E}{\partial U_{ik}} \right]$ 에 대한 미분은 식(26)~(28)과 같다.

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial CE_{ik}} &= \frac{\partial E}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \mu_k(x)} \cdot \frac{\partial \mu_k(x)}{\partial \mu_{A_k}(x_k)} \cdot \frac{\partial \mu_{A_k}(x_k)}{\partial CE_{ik}} \\ &= \frac{\mu_k(x)}{\sum_{k=1}^m \mu_k(x)} (y^* - y^d) (\overline{U}_{ik} - y^*) \\ &\quad \cdot \text{sgn}(x_k - CE_{ik}) \frac{2}{WD_{ik} \mu_{A_k}(x_k)} \end{aligned} \quad (26)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial WD_{ik}} &= \frac{\partial E}{\partial y} \cdot \frac{\partial y}{\partial \mu_k(x)} \cdot \frac{\partial \mu_k(x)}{\partial \mu_k(x)} \cdot \frac{\partial \mu_k(x)}{\partial \mu_{A_k}(x_k)} \cdot \frac{\partial \mu_{A_k}(x_k)}{\partial WD_{ik}} \\ &= \frac{\mu_k(x)}{\sum_{k=1}^m \mu_k(x)} (y^* - y^d) (\overline{U}_{ik} - y^*) \\ &\quad \cdot \text{sgn}(x_k - CE_{ik}) \frac{1 - \mu_{A_k}(x_k)}{\mu_{A_k}(x_k)} \frac{1}{WD_{ik}} \end{aligned} \quad (27)$$

$$\begin{aligned} \frac{\partial E}{\partial U_{ik}} &= \frac{\partial E}{\partial y^*} \cdot \frac{\partial y^*}{\partial U_{ik}} \\ &= \frac{\mu_k(x)}{\sum_{k=1}^m \mu_k(x)} (y^* - y^d) \end{aligned} \quad (28)$$

4.1 자기조정기법에 의한 뉴로-퍼지제어기의 전력시스템의 부하주파수 적응

그림 8은 뉴로-퍼지제어기에 의한 전력시스템의 부하주파수제어의 블록 다이어그램이다. 먼저 퍼지제어기에 있어서 퍼지제어기의 전건부, 후건부 학습계수의 초기치를 설정한 후 각추론의 적합도와 추론결과를 행하게 된다. 신경회로망은 그림 8과 같은 다층 신경회로망으로 퍼지제어기의 멤버십 함수를 자동 조정하여 오차를 최소화시키게 된다. 시뮬레이션에 사용된 신경회로망은 입력층 3개, 중간층 10개, 출력층 1개의 뉴런으로 구성하였다. 3개의 입력층 뉴런은 CE_{ik}, WD_{ik}, U_{ik}을 입력으로 하였다. 그리고 출력층은 NFC의 출력값으로 구성하였다. 이를 각각 사례연구별로 고찰하여, 제시한 FLC와 NNC와의 동특성 응답을 고찰하여, 제안한 NFC가 적응성이 우수하며, 견실한 제어성능을 보이고자 한다.

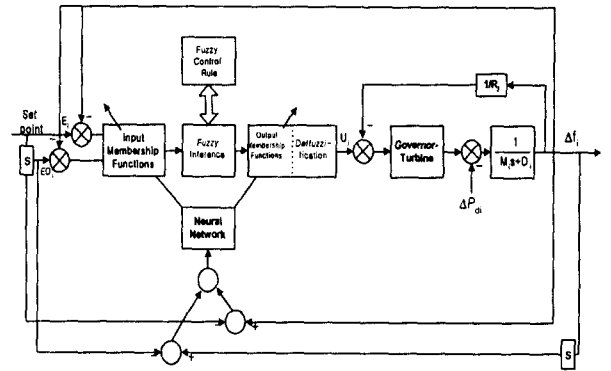


그림 8 NFC에 의한 i 지역 전력시스템
Fig. 8 NFC for i area power system

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 연구에서는 시스템의 오차와 오차변화량을 입력으로 하는 전력시스템의 부하주파수제어에 있어서 부하의란에 대해 적응성을 갖도록 부하의 변동이 다양하게 변동될 경우와 발전전력 증가를 제한을 고려한 경우에 있어서 NFC를 설계하였다. 이때 NFC의 소속함수는 NFC 학습 알고리즘에 의해 자동조정 되도록 하였다.

먼저, C. E. Fosha등이 제안한 종래의 최적제어 응답에서 E_i, ED_i 및 U_i에 대한 학습용 입·출력 데이터 쌍 400개를 얻었다. 다음 각 변수에 대해서 5개의 퍼지변수(NB, NS, ZO, PS, PB)를 초기 설정하고 그리고 최적제어에서 얻은 데이터를 랜덤하게 읽어들이어 퍼지추론의 전건부 및 후건부의 중심치와 폭을 계산하게 된다. 폭과 중심치를 계산한 결과는 신경회로망의 입력으로 사용하여 오차가 최소화 될 때까지 반복계산 하게 된다. 시뮬레이션을 위한 프로그램 순서는 그림 9와 같다.

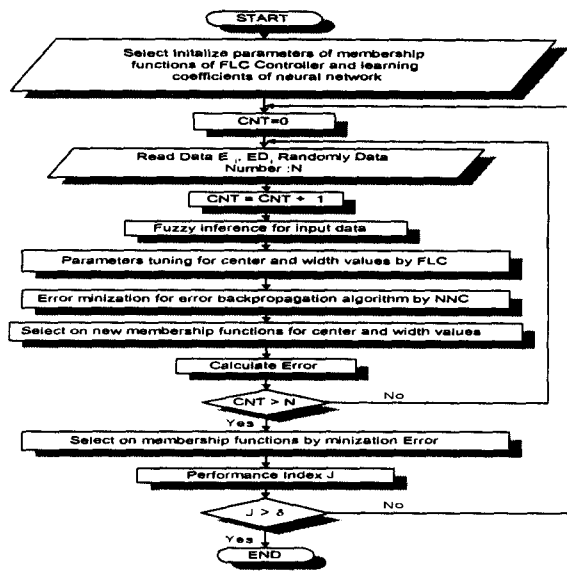


그림 9 제안된 NFC의 흐름도

Fig. 9 Flowchart of proposed NFC

제시한 NFC의 학습 알고리즘을 이용하여 3지역 전력시스템의 부하주파수제어에 적용시켰다. 이때 사례연구의 조건으로는 부하의란 $\Delta Pd1=0.03$ [p.u.], $\Delta Pd2=0.01$ [p.u.], $\Delta Pd3=0.0$ [p.u.]이 지속적으로 인가되는 것으로 하였다. 또한 강인성 검증을 위해 부하의란이 $\Delta Pd1=0.05$ [p.u.], $\Delta Pd2=0.03$ [p.u.], $\Delta Pd3=0.0$ [p.u.]으로 변동될 경우에 있어서 동특성 응답을 고찰하였다.

3 지역 전력시스템 모델은 C. E. Fosha등의 2 지역 전력시스템을 3지역 시스템으로 확장한 모델로써, 1, 2, 3 지역에 있어서 부하의란이 각각 다르게 지속적으로 발생한 경우로 하였다.

각 지역에 대한 멤버쉽 함수가 조정되어 지는 과정은 그림 10에서 보여준다.

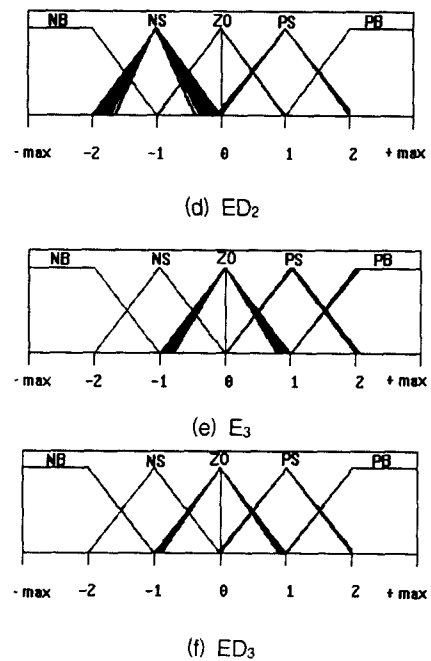
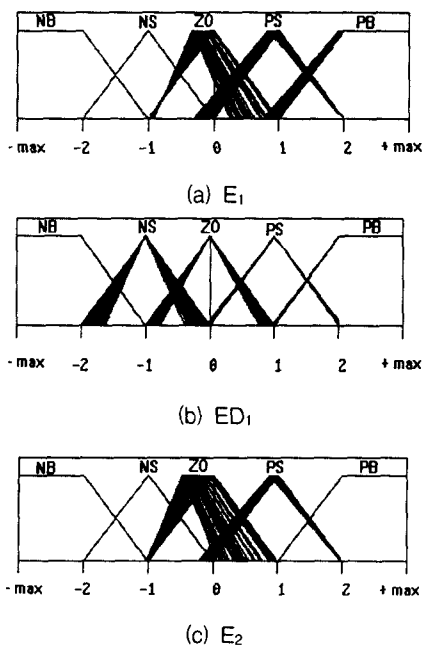


그림 10 1, 2 및 3 지역의 멤버쉽 함수 조정 과정

Fig. 10 Tuning patterns of membership functions for area 1, 2 and 3

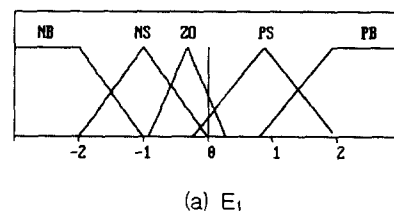
학습한 후 조정된 1지역에 대한 파라미터 값들은 표 4와 같고, 그림 11은 조정된 멤버쉽 함수이고, 2지역에 대한 파라미터 값들은 표 5와 같고, 그림 12는 조정된 멤버쉽 함수이고, 3지역에 대한 파라미터 값들은 표 6과 같고, 그림 13은 조정된 멤버쉽 함수이다. 이때 학습횟수는 총30회 중에서 26회를 선택하였다. 그림 14는 학습횟수에 따른 각 지역의 평가함수 J의 변화량을 보여준다.

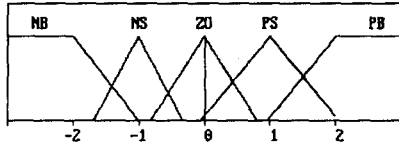
최적제어의 응답특성으로부터 얻은 학습용 입·출력 데이터를 사용하여 각 퍼지변수의 멤버쉽 함수에 대한 파라미터를 제시한 학습 알고리즘에 따라 유연하게 조정되어짐을 나타내었다. 이를 모델시스템에 적용해 본 결과 주파수 편차량 및 연계선 조류편차량을 현저히 경감시킬 수 있고, 정정 시간 및 도달시간도 최소화시킬 수 있었으며 제어능력이 양호하고 유용성이 있음을 알 수 있었다.

표 4 1 지역의 멤버쉽 함수 조정 결과

Table 4 Tuning results membership functions for area 1

	Error		Change of Error		U _{ik}
	Center	Width	Center	Width	
NB	-2.0000E+0	2.0000E+0	-2.0000E+0	2.0000E+0	-2.0000E+0
NS	-1.0000E+0	2.0000E+0	-1.0083E+0	1.3581E+0	-1.0000E+0
ZO	-3.2025E-1	1.2031E+0	-6.2148E-3	1.6224E+0	0.0000E+0
PS	8.7450E-1	2.2475E+0	9.9838E-1	2.1091E+0	1.8389E+0
PB	1.9280E+0	2.2787E+0	1.9991E+0	2.0761E+0	2.1020E+0





(b) ED₁

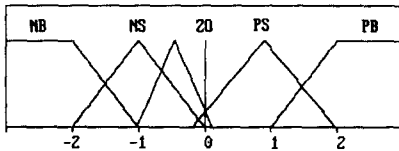
그림 11 1 지역의 멤버십 함수 조정 결과

Fig. 11 Tuning results membership functions for area 1

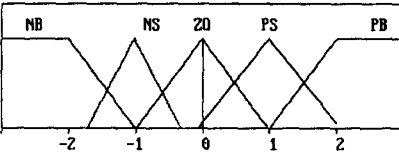
표 5 2 지역의 멤버십 함수 조정 결과

Table 5 Tuning results membership functions for area 2

	Error		Change of Error		U _{ik}
	Center	Width	Center	Width	
NB	-2.0000E+0	2.0000E+0	-2.0000E+0	2.0000E+0	-2.0000E+0
NS	-1.0000E+0	2.0000E+0	-1.0192E+0	1.4007E+0	-1.0000E+0
ZO	-4.5532E-1	1.1400E+0	-3.6123E-3	1.9624E+0	0.0000E+0
PS	8.9736E-1	2.1653E+0	9.9573E-1	2.1300E+0	1.2935E+0
PB	2.0000E+0	2.0000E+0	2.0000E+0	2.0000E+0	2.0000E+0



(a) E₂



(b) ED₂

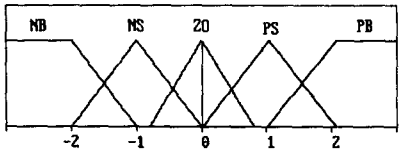
그림 12 2 지역의 멤버십 함수 조정 결과

Fig. 12 Tuning results membership functions for area 2

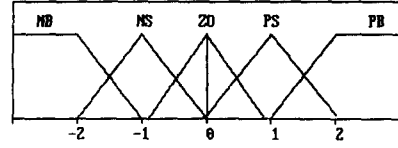
표 6 3 지역의 멤버십 함수 조정 결과

Table 6 Tuning results membership functions for area 3

	Error		Change of error		U _{ik}
	Center	Width	Center	Width	
NB	-2.0000E+0	2.0000E+0	-2.0000E+0	2.0000E+0	-2.0000E+0
NS	-1.0000E+0	2.0000E+0	-1.0000E+0	2.0000E+0	-1.0000E+0
ZO	2.3868E-3	1.6050E+0	2.5612E-1	1.7967E+0	0.0000E+0
PS	1.0367E+0	2.0555E+0	1.0035E+0	2.0925E+0	1.0000E+0
PB	2.0701E+0	2.1471E+0	2.0013E+0	2.0412E+0	2.0060E+0



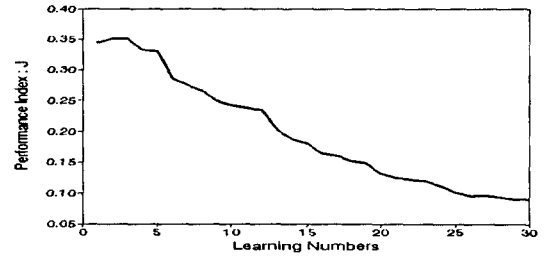
(a) E₃



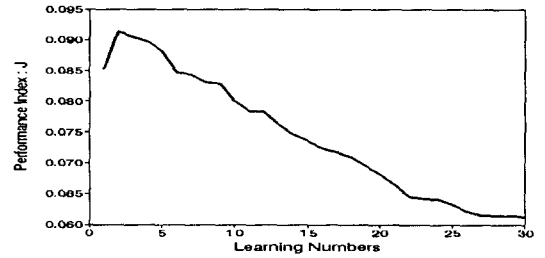
(b) ED₃

그림 13 3 지역의 멤버십 함수 조정 결과

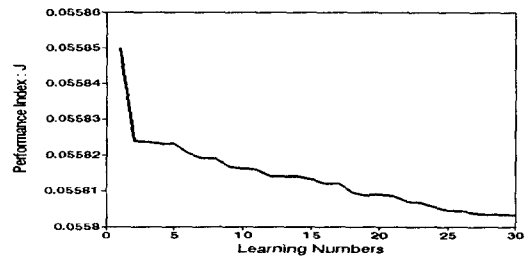
Fig. 13 Tuning results membership functions for area 3



(a) area 1



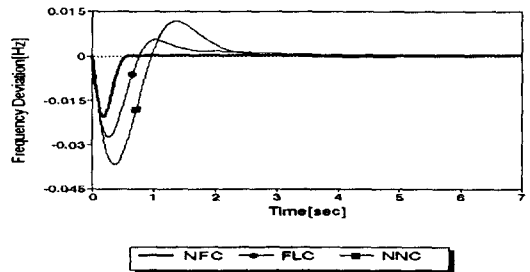
(b) area 2



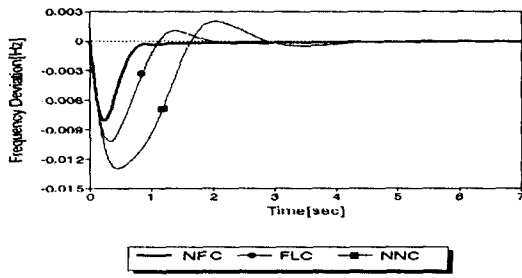
(c) area 3

그림 14 1, 2 및 3 지역의 평가지수 J

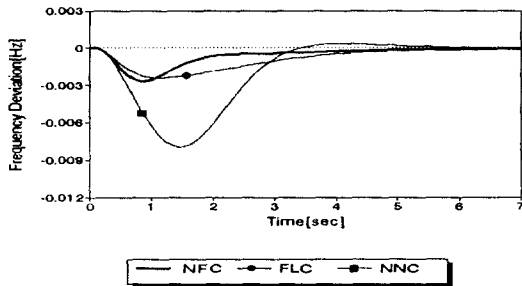
Fig. 14 Performance indices J of area 1, 2 and 3



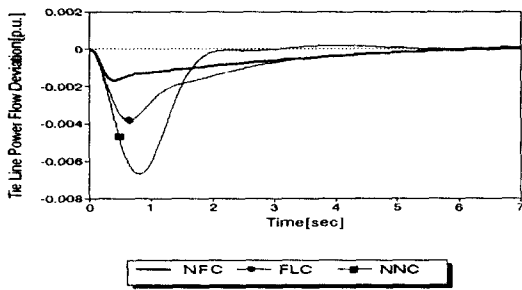
(a) Δf₁



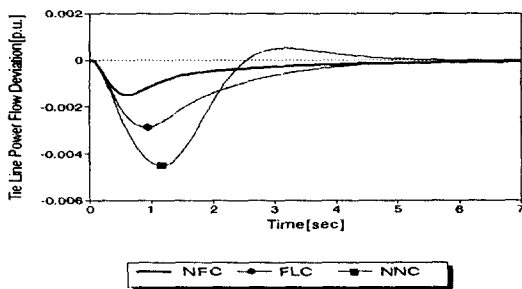
(b) Δf_2



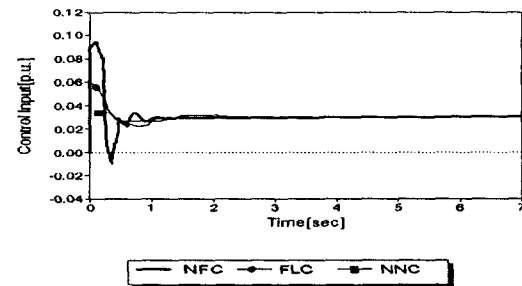
(c) Δf_3



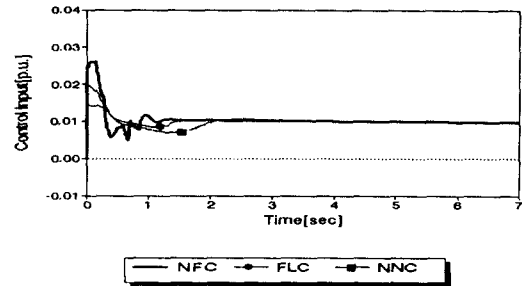
(d) ΔP_{tie12}



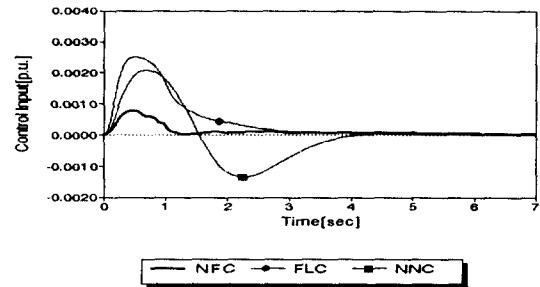
(e) ΔP_{tie23}



(f) U_1



(g) U_2



(h) U_3

그림 15 NNC, FLC 및 NFC에 의한 전력시스템의 동특성 응답과 제어입력

($\Delta Pd1=0.03$ [p.u.], $\Delta Pd2=0.01$ [p.u.], $\Delta Pd3=0.0$ [p.u.])

Fig. 15 Dynamic responses and control input of power system by NNC, FLC and NFC

($\Delta Pd1=0.03$ [p.u.], $\Delta Pd2=0.01$ [p.u.], $\Delta Pd3=0.0$ [p.u.])

그림 15는 제안한 NFC의 우수성을 검증하기 위해 $\Delta Pd1=0.03$ [p.u.], $\Delta Pd2=0.01$ [p.u.], $\Delta Pd3=0.0$ [p.u.]

으로 변동할 경우에 있어서 종래의 제어기법인 FLC, NNC와 응답특성을 비교한 것이다.

먼저, 그림 15의 (a)와 (b), (c)는 1, 2 및 3지역에 대한 주파수 최대편차량을 비교한 것이다. 여기에서, NNC와 FLC는 1, 2 및 3지역 모두 주파수 최대편차량이 큰 폭을 나타내고 있지만 진동없이 정상상태에 도달하는 특성을 보였다. 제안한 NFC의 주파수 특성을 살펴보면 종래의 제어기법보다 주파수 최대편차량을 큰 폭으로 감소시켰고, 또한 도달시간과 정정시간에 있어서도 최소화시킬 수 있었다. 그림 15의 (d)와 (e)는 1, 2지역과 2, 3지역간에 연계선 조류편차량의 응답특성을 나타내고 있다. 이때 부하외란의 발생은 주파수의 변동을 초래할 뿐 아니라 각 시스템간에 상호 연계된 조류도 심하게 변하게 되어 일정 전력을 유지할 수 없다. 그러므로 주파수가 일정하게 유지된다면 연계선 조류의 변화도 안정화되어서 시스템의 연계운전을 원활하게 운영할 수 있다. 따라서, NFC의 연계선 조류편차는 NNC, FLC의 연계선 조류편차보다 최대편차량을 경감시켰을 뿐만 아니라 도달시간 및 정정시간에 있어서도 최소화됨을 알 수 있었다. 그림 15의 (f), (g) 및 (h)는 제어입력을 나타내고 있다. 제어성능을 평가하기 위한 평가함수로는 식(30)과 같이 두었다.

$$J = \int (\alpha \cdot \Delta E_1^2 + \beta \cdot \Delta E_2^2 + \gamma \cdot \Delta E_3^2 + \eta \cdot \Delta P_{tie12}^2 + \lambda \cdot \Delta P_{tie23}^2) dt \quad (30)$$

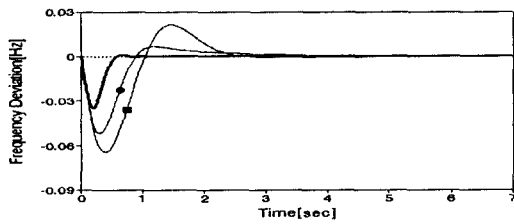
여기서, $\alpha=1.0$, $\beta=1.0$, $\gamma=1.0$, $\eta=3.0$, $\lambda=3.0$ 이다. 식(30)의 평가함수를 사용하여 각 제어기법들에 대한 성능평가의 결과는 표 7과 같다.

표 7 제안된 NFC와 종래의 방법에 대한 평가지수 ($\Delta P_{d1}=0.03$ [p.u.], $\Delta P_{d2}=0.01$ [p.u.], $\Delta P_{d3}=0.0$ [p.u.]

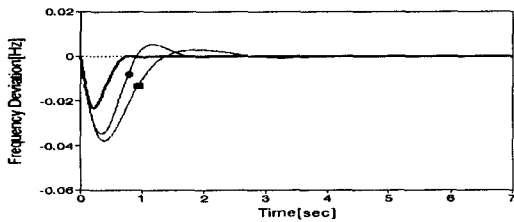
Table 7 Performance comparisons between conventional and proposed NFC method ($\Delta P_{d1}=0.03$ [p.u.], $\Delta P_{d2}=0.01$ [p.u.], $\Delta P_{d3}=0.0$ [p.u.]

Performance indices	Control Technique Method		
	NNC	FLC	NFC
J	2.0570×10^{-1}	7.6651×10^{-2}	2.63319×10^{-2}

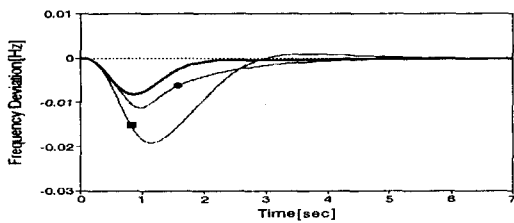
다음의 사례연구는 NFC의 강인성과 속응성을 검증하기 위해 부하의란이 $\Delta P_{d1}=0.03$ [p.u.], $\Delta P_{d2}=0.01$ [p.u.], $\Delta P_{d3}=0.0$ [p.u.]에서 $\Delta P_{d1}=0.05$ [p.u.], $\Delta P_{d2}=0.03$ [p.u.], $\Delta P_{d3}=0.0$ [p.u.]으로 변동될 경우에 있어서 동특성 응답을 고찰하였다.



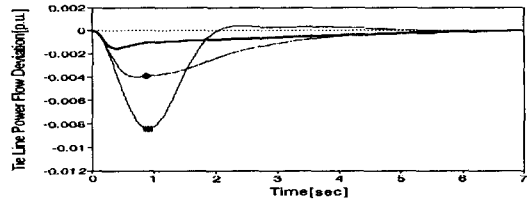
(a) Δf_1



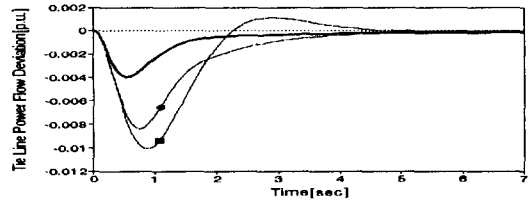
(b) Δf_2



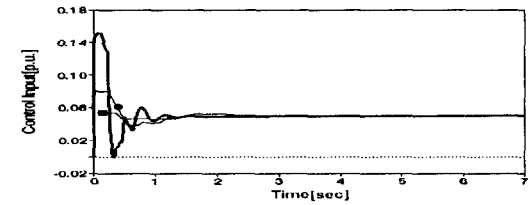
(c) Δf_3



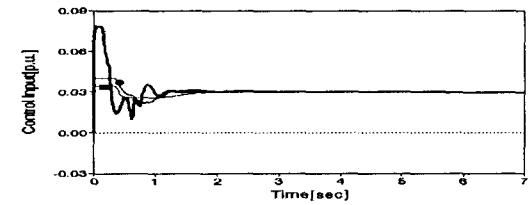
(d) ΔP_{tie12}



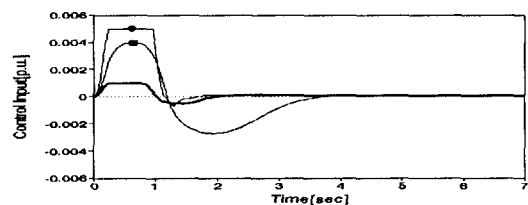
(e) ΔP_{tie23}



(f) U_1



(g) U_2



(h) U_3

그림 16 NNC, FLC 및 NFC에 의한 전력시스템의 동특성 응답과 제어입력 ($\Delta P_{d1}=0.05$ [p.u.], $\Delta P_{d2}=0.03$ [p.u.], $\Delta P_{d3}=0.00$ [p.u.]

Fig. 16 Dynamic responses and control input of power system by NNC, FLC and NFC ($\Delta P_{d1}=0.05$ [p.u.], $\Delta P_{d2}=0.03$ [p.u.], $\Delta P_{d3}=0.00$ [p.u.]

그림 16은 부하가 변동될 때 제안한 NFC와 종래의 제어 기법에 대한 각 지역의 주파수 편차와 연계선 조류편차의 응답특성과 제어입력을 나타내고 있다. 그림 16의 (a)~(c)는 각 지역에 대한 주파수의 최대편차량을 비교해 본 결과 비교대상의 제어기법들보다 주파수 최대 편차량을 줄일 수 있었다. 그림 16의 (d)~(e)는 연계선 조류 편차량의 응답특성을 나타낸 것으로 응답특성이 양호하고 정정시간을 줄일 수 있었다. 그림 16의 (f)~(h)는 각 지역의 제어입력을 나타내고 있다. 각 지역에 서로 다른 부하변동이 지속적으로 발생함으로 인해 부하의란이 큰 지역에 있어서 제어기 분담률이 크게 나타남을 알 수 있었다. 식 (30)의 평가함수를 사용하여 각 제어기법들에 대한 성능평가의 결과는 표 8과 같다.

표 8 제안된 NFC와 종래의 방법에 대한 평가지수
 ($\Delta P_{d1}=0.05$ (p.u.), $\Delta P_{d2}=0.03$ (p.u.), $\Delta P_{d3}=0.00$ (p.u.)

Table 8 Performance comparisons between conventional and proposed NFC method

($\Delta P_{d1}=0.05$ (p.u.), $\Delta P_{d2}=0.03$ (p.u.), $\Delta P_{d3}=0.00$ (p.u.)

Performance indices	Control Technique Method		
	NNC	FLC	NFC
J	7.3801×10^{-1}	3.9433×10^{-1}	1.0021×10^{-1}

6. 결 론

부하주파수제어는 계통운용 및 제어에 있어서 주요한 과제 중의 하나이며 발생하는 부하변동에 대해서 각 지역내의 주파수 및 연계선 조류편차를 허용치 내로 수렴시키기 위해서 계통 내에 있는 발전소의 출력을 조정해야 한다. 전력 시스템에서 기본적으로 요구되는 사항은 발전전력 출력량과 그 품질에 대한 소비자의 욕구를 지속적으로 만족시키기 위해 양질의 전력을 공급해야 한다.

따라서 본 논문에서는 다층신경회로망의 오차역전파 학습 알고리즘을 이용하여 퍼지 논리제어기에 미지의 플랜트 및 주위환경의 변화에 적용할 수 있는 NFC의 구조 및 알고리즘을 제안하였다. 이때 학습 퍼지 논리제어기는 주된 기능을 담당하는 퍼지 논리제어기와 시스템의 환경변화에 대해 적응성을 갖도록 하는 신경회로망으로 구성하였다. 신경회로망의 최급구배법을 이용하여 퍼지제어기에 있어 퍼지변수의 전건부 및 후건부 파라미터를 시스템에 알맞게 자기조정할 수 있는 파라미터 자기조정기법을 제시하였다. 파라미터 자기조정기법으로는 종래 최적제어기의 응답특성으로 부터 얻은 학습용 입·출력 데이터를 사용하여 각 퍼지변수에 대한 중심값과 폭 등을 신경회로망의 오차역전파 학습 알고리즘에 따라 오차가 최소화될 때까지 반복 계산하였다. 이를 부하주파수제어 모델에 적용하여 NFC와 종래의 제어기법인 NNC, FLC와의 시뮬레이션을 통하여 정상상태 편차, 도달시간 및 최대 편차량 등의 동특성 응답을 비교하였다. 제안한 NFC제어기는 제어대상의 특성이 변화되거나 부하의란에 대해 적응성을 갖도록 자동으로 조정이 가능한 제어기로서 종래의 제어기법인 퍼지제어, 신경회로망과 비교하여 제어성능이 우수하며 견실한 제어기임을 입증하였다.

각 사례 연구별로 뉴로-퍼지제어기에 의한 각 지역에 대한 주파수 최대 편차량 및 연계선 조류편차량 등을 비교·고찰한 결과는 다음과 같다.

3지역 전력시스템에 있어 부하의란이 1, 2 및 3 지역에 모두 다르게 지속적으로 발생할 시 NFC 제어기의 응답특성을 고찰하였다. 이 경우에 있어서 제안한 NFC는 종래의 제어기법들보다 과도시 응답 특성이 양호하였을 뿐만 아니라, 또한 강인성 검증을 위해 부하의란을 변동시켰을 경우에 있어서도 양호한 특성을 보였다. 이상에서 알 수 있는 바와 같이 NFC는 종래의 제어기법들 보다 우수한 동특성 응답을 나타내었으며, 견실한 제어기임을 입증하였다.

참 고 문 헌

- [1] V. R. Moorthi, R. P. Aggarwal, "Suboptimal and near-optimal control of a load-frequency-control system", Proc. IEE, Vol.119, No. 11, pp. 1653-1659, 1972.
- [2] K. Venkateswarlu and A. K. Mahalanabis, "Design of decentralised load-frequency regulator", Proc. IEE, Vol. 124, No. 9, pp. 817-821, 1977.
- [3] G. Shirai, S. Ohtsua, "Load Frequency Control for Multi-Area Electric Energy Systems Using Decomposition of Information Structure", T.IEE Japan, Vol. 99-B, No. 7, pp. 417-424, 1979.
- [4] W. C. Chan, Y. Y. Hsu, "Automatic generation control of interconnected power system using variable-structure controllers", IEE Proceeding, Vol.128, Pt.D, No.5, pp. 269-279, 1981.
- [5] A. J. Wood, B. F. Wollenberg, "Power generation, operation and control", John Wiley & Sons, 1984.
- [6] 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.
- [7] E. V. Bohn, "Optimum load-frequency continuous control with unknown deterministic power demand", IEEE Trans. on Power Apparatus Systems, Vol. 91, pp. 1910-1915, 1972.
- [8] J. Nanda, B. L. Kaul, "Automatic generation control of an interconnected power system", IEE Proceeding, Vol.125, No.5, pp. 385-390, 1978.
- [9] 장세훈, 임화영, "주파수 제어를 위한 비례 제어기구의 최적설계에 관한 연구", 대한전기학회논문지, Vol. 26, No. 2, pp. 99-103, 1977.
- [10] 김훈기, 광노홍, 문영현, "최적선형 추적법에 의한 부하주파수제어", 대한전기학회논문지, Vol. 38, No. 2, pp. 88-92, 1989.
- [11] Y. Wang, R. Zhou and C. Wen, "Robust load-frequency controller design for power systems", IEE Proceedings, Vol. 140, No. 1, pp. 11-16, 1993.
- [12] 정형환, 이준탁, 안병철, 왕용필, 김해재, "최적 PID 제어기에 의한 2지역 전력계통의 부하주파수 제어 특성에 관한 연구", 대한전기학회논문지, Vol. 43, No. 5,

pp. 703-710, 1994.

[13] K. Y. Lim, Y. Wang, "Robust decentralised load frequency control of multi-area power systems", IEE Proceedings, Vol. 143, No. 5, pp. 377-386, 1996.

[14] A. M. Stankovic, G. Tadmor and T. A. Sakharuk, "On Robust Control Analysis and Design for Load Frequency Regulation", IEEE Trans. Power. Syst., Vol. 13, No. 2, pp. 449-455, 1998.

[15] H. T. Nguyen, R. R. Yager, "Theoretical Aspects of Fuzzy Control", John Wiley & Sons, Inc., 1995.

[16] Dimiter Driankov, Hans Hellendoorn, "An Introduction to Fuzzy Control", Springer, 1995.

[17] J. C. Wu, T. S. Liu, "Fuzzy Control Stabilization with Applications to Motorcycle Control", IEEE Transactions on Systems, Man and Cybernetics-Part B: Cybernetics, Vol. 26, No. 6, pp. 836-847, 1996.

[18] Y. Zhang, G. P. Chen, O. P. Malik, G. S. Hope, "An Artificial Neural network Based Adaptive Power System Stabilizer", IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol. 8, No. 1, pp. 71-77, 1993.

[19] S. Omatu, M. Khalid, R. Yusof, "Neuro-Control and its Applications", Springer, 1996

[20] 정형환, 김상효, 주석민, 이정필, 이동철, "퍼지-신경망 제어기를 이용한 2지역 계통의 부하주파수 제어에 관한 연구", 대한전기학회논문지, Vol. 48A. No. 2, pp. 97-106, 1999.

[21] Y. Terasawa, S. Iwamoto, "Optimal power flow solution using fuzzy mathematical programming", Electrical engineering in Japan, Vol. 108, No. 3, pp.46-54, 1990.

[22] H. Nomura, I. Hayashi, N. Wakami, "A learning method of inference rules by descent methods", IEEE, pp.203-210, 1992.

[23] F. Beaufays, Y. A. Magid, "Application of Neural Networks to Load-Frequency Control in Power Systems", Neural Networks, Vol. 7, No. 1, pp. 183-194, 1994.

저 자 소 개



정형환(鄭亨煥)
 1941년 1월 19일 생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 2000년 현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 교수. 당학회 평의원
 Tel : 051-200-7733 Fax : 051-200-7743
 E-mail : hhchong@mail.donga.ac.kr



허동렬(許東烈)
 1969년 11월 10일 생. 1995년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정
 E-mail : a967650@mail.donga.ac.kr



김상효(金相孝)
 1965년 8월 29일 생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동아대 정보기술연구소 특별연구원
 E-mail : sanghyo@orgio.net



이권순(李權純)
 1955년 1월 18일 생. 1997년 2월 충남대 공업교육과 졸업. 1981년 2월 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1990년 7월 Oregon State University 전기 및 컴퓨터 공학과 졸업(Ph. D.). 1996년 8월 ~ 1997년 8월 Virginia Tech. 전기 및 컴퓨터 공학과 Visiting scholar. 1995년 2월 ~ 1996년 1월 일본 전기통신대학 기계 제어공학과 객원연구원. 1992년 3월 ~ 1998년 2월 대한의용생체공학회 학술위원. 1998년 1월 ~ 1998년 12월 대한전기학회 편집위원. 1982년 3월 현재 동아대 공대 전기전자컴퓨터공학부 부교수
 Tel : 051-200-7739, Fax : 051-200-7743
 E-mail : kslee@daunet.donga.ac.kr



주석민(朱碩珉)
 1965년 5월 11일 생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동아대 정보기술연구소 특별연구원
 E-mail : i8545338@mail.donga.ac.kr