

유전 알고리즘을 이용한 전력계통의 부하주파수 제어를 위한 퍼지 전 보상 PID 제어기 설계

| |
|---------|
| 論 文 |
| 49A-2-4 |

Design of Fuzzy Precompensated PID Controller for Load Frequency Control of Power System using Genetic Algorithm

鄭亨煥* · 王龍泌** · 李丁必*** · 鄭文圭***

(Hyeng-Hwan Chung · Yong-Peel Wang · Jeong-Phil Lee · Mun-Kyu Chung)

Abstract - In this paper, we design a GA-fuzzy precompensated PID controller for the load frequency control of two-area interconnected power system. Here, a fuzzy precompensated PID controller is designed as a fuzzy logic-based precompensation approach for PID controller. This scheme is easily implemented simply by adding a fuzzy precompensator to an existing PID controller. And we optimize the fuzzy precompensator with a genetic algorithm for complements the demerit such as the difficulty of the component selection of fuzzy controller, namely, scaling factor, membership function and control rules. Simulation results show that the proposed control technique is superior to a conventional PID control and a fuzzy precompensated PID control in dynamic responses about the load disturbances of power system and is convinced robustness and reliableness in view of structure.

Key Words : GA-fuzzy precompensated PID controller, Two-area interconnected power system, Load frequency control, Genetic algorithm, PID control, Fuzzy precompensated PID control

1. 서 론

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. 이러한 목적을 달성하기 위해 전력계통의 부하주파수 제어(Load Frequency Control : LFC)가 필요하다. 이에 대한 최초의 연구는 C. E. Fosha 등[1,2]에 의해 부하주파수 제어계의 동특성 응답을 개선시키기 위하여 이루어졌다. 이들이 각 지역에 대한 지역주파수 응답특성을 이용한 주파수 편의 연계선 전력제어기법과 최적제어이론을 이용한 선형 레귤레이터의 설계기법을 제시한 이래 현재까지 LFC에 관한 많은 논문이 발표되고 있다[1-8].

한편, 현재 산업공정에 사용되고 있는 제어기 중, PID (Proportional Integral Derivative) 제어기는 간단한 구조를 갖고 있음에도 불구하고 상대적으로 우수한 제어성능을 제공하는 것으로 알려져 있다. 그러나 PID 제어기의 성능은 제어 대상 혹은 이를 둘러싼 주위환경 변화에 기인한 매개변수의 변화에 대하여 제어기의 파라미터가 재조정되어야 하고, 이의 조정은 대부분 많은 시간이 소요되는 전문가의 수작업에 의

하여 시행착오적으로 이루어지는 단점이 있다. 따라서 PID 제어기의 파라미터 자동동조에 관한 절실한 필요성과 함께 활발한 연구가 진행되고 있다.

대표적 방법중의 하나로 Ziegler-Nichols(ZN)의 PID 제어기 동조법을 들 수 있다[15]. 그러나 이러한 제어수법도 시스템을 일반적인 선형계로 간주하거나 동작점 부근에서 선형화시킨 것에 불과하며, 또한 복잡한 수식모델로부터 제어조작량을 결정하므로 실제 시스템과의 오차가 커지게 된다. 특히, 전력계통의 비선형성으로 인한 계통의 해석 및 제어기 설계가 매우 어려운 실정이며, 최근 신뢰성이 높고 고품질의 전기에너지 수요의 급격한 증대와 함께 계통간의 연계가 강화되어 전력계통의 부하주파수 제어는 고도의 제어기법이 요구되고 있다. 이러한 문제의 해결책으로 최근 선형, 비선형 시스템을 불문하고 효과적인 성능을 가지며, 학습과 적응 그리고 병렬 분산처리가 가능한 신경회로망 제어나 퍼지추론에 의해 제어동작을 결정하는 퍼지제어와 같은 지능적인 제어가 전력계통에 도입되고 있다[4-7]. 이중 퍼지제어는 전문가의 지식 및 경험을 제어규칙으로 이론화하여 추론에 의해 제어동작을 결정하는 유연성이 있는 제어수법으로 정확한 수식 모델을 취하지 않아도 된다는 점과, 언어적 제어규칙을 이용하여 온라인으로 단시간에 제어입력을 결정할 수 있다는 장점을 지니고 있다.

또 PID 제어기와 퍼지 제어기의 장점만을 이용하여 설계된 하이브리드형 제어기들에 관한 연구가 진행중에 있다. 이에 대한 연구로는 S. G. Tzafestas 등[10]이 2차 시스템에 적용시켜 응답특성을 검증한 이후 활발한 연구가 이루어져 오고 있다. C. L. Chen 등[11]은 Lyapunov 함수를 부가하여 안정한 제어가 가능하도록 퍼지 제어기와 PID 제어기를 결합한 하이브리드 제어기를 설계하였으며, T. Brenm 등[12]은 PI형

* 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣工學科 教授 · 工博

** 正 會 員 : Dept. of Electrical & Electronic Eng., Univ. of Canterbury(New Zealand), Post-Doc. · 工博

*** 正 會 員 : 東亞大 工大 電氣工學科 博士課程

接受日字 : 1999年 10月 9日

最終完了 : 1999年 12月 28日

퍼지 제어기와 PD형 퍼지 제어기를 결합한 형태로 제어기를 구성하였다. 또 S. Z. He 등[13]은 PID 제어기를 위한 자기동조 설계에 퍼지추론을 이용하였으며, Kim 등[16]은 퍼지 전보상 PID 제어기(fuzzy precompensated PID controller)를 제안하였다. 이들의 제어원리와 구조적인 차이에도 불구하고, 모두 퍼지 제어기의 각 구성요소를 최적화하는 과정이 문제점으로 남게 되었다. 이러한 문제의 해결책으로 본 논문에서는 유전 알고리즘을 이용하였다. 최적화 문제는 최적화 시간과 최적해의 성능사이의 균형을 잘 이루면서 전역 최적해를 찾아야 하는데, 유전 알고리즘이 이러한 최적화 문제에서 좋은 성능을 내는 것으로 알려져 있다. 유전 알고리즘은 문제를 나타내는 탐색 공간에서 가능성 있는 후보해들에 대해 자연의 적자 생존과 개체 선택 방법을 모방하여 유전 연산을 적용시켜 해들을 진화시킴으로써, 최적해를 찾는 탐색 알고리즘이다[18-20].

따라서 본 논문에서는 전력계통의 주파수 및 연계선 조류 편차량을 허용치 이내로 수렴시키기 위해 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 전 보상 PID 제어기를 설계하고자 한다. 본 논문의 구성은 다음과 같다. 2장에서는 본 논문에서 사용한 모델계통을 제시하며, 3장에서는 퍼지 PID 제어기에 대한 고찰로서 PID 제어기 성능을 향상시키기 위한 기준점 변경과 이득 변경에 대해 알아본다. 그리고 4장에서는 퍼지 전 보상기의 각 구성요소를 최적화하기 위해 사용한 유전 알고리즘의 적용을 보여주고 있으며, 5장에서는 이에 대한 실험으로 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 전 보상 PID 제어기가 종래의 ZN동조법에 의한 PID[15] 및 시행착오법(trial-and-error method)에 의한 퍼지 전 보상 PID 제어기[16,6]보다 전력계통의 다양한 부하의란에 대해 속응성이 우수하며, 주파수 최대 편차량과 연계선 조류 편차량의 경감 및 정정시간을 최소화시킬 수 있음을 보이고자 한다.

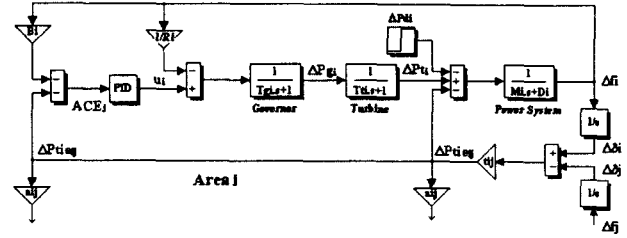
2. 부하주파수 제어 모델 계통 방정식

다수의 제어지역이 상호 연계된 전력계통의 효율적인 주파수 제어대책을 검토하기 위하여 C. E. Fosha 등[1,2]이 제안한 2지역 모델계통을 주로 사용한다. 이는 C. E. Fosha 등이 9차계로 선형 모델화하여 연구한 이래 다지역 전력계통의 부하주파수 제어에 대한 연구모델로 많이 이용되고 있다. 본 논문에서 사용한 모델계통은 그림 1과 같다.

먼저, i지역에서 주파수 제어계의 동특성 모델을 작성하기 위하여 이 지역 내에 ΔP_{di} [p.u.MW]만큼의 부하변동이 발생되었다고 하면, 이 부하변동에 대응해서 i지역내의 ΔP_{ti} [p.u.MW]의 유효발전 전력의 증가를 초래하여, 발전 증가분과 부하 증가분과의 차인 전력여분 $\Delta P_{ti} - \Delta P_{di}$ [p.u.MW]은 식 (1)~(3)과 같다.

i) 운동에너지의 증가분

$$\begin{aligned} \frac{d}{dt} W_{kin i} &= \frac{d}{dt} \left[W_{kin i} \left(\frac{f_i}{f_i^*} \right)^2 \right] \\ &\approx \frac{d}{dt} \left[W_{kin i} \left(1 + \frac{\Delta f_i}{f_i^*} \right)^2 \right] \\ &= 2 \frac{W_{kin i}}{f_i^*} \frac{d}{dt} (\Delta f_i) \end{aligned} \quad (1)$$



- M_i : Inertial constant(0.1667[p.u.MW · s/Hz])
- D_i : Load damping coefficient(0.00823[p.u.MW/Hz])
- T_t : Turbine time constant(0.3[s])
- T_g : Speed governor time constant(0.08[s])
- R_i : Self-regulation coefficient of generator(2.4[Hz/p.u.MW])
- t_i : Tie-line power flow constant(0.545[p.u.MW/Hz])
- B_i : Frequency bias constant
- a_i : Ratio between rated power
- $\Delta \delta_i$: Change in phase angle
- Δf_i : Frequency deviation
- ΔP_{di} : Change in load demand
- ΔP_{ti} : Change in steam turbine output
- ΔP_{tp} : Change in steam turbine output
- ΔP_{tiej} : Tie-line power flow deviation
- ACE : Area control error

그림 1 PID 제어기를 가지는 i지역 전력계통의 블록선도(i=2)
 Fig. 1 Block diagram of i area power system with PID controller (i=2)

여기서, f_i^* 는 공칭주파수, $W_{kin i}^*$ 는 f_i^* 일 때의 i지역의 운동에너지이다.

ii) 주파수 변화에 따른 부하의 증가분 : $D_i \Delta f_i$ (2)

여기서, $D_i = \frac{\partial P_{di}}{\partial f_i}$ [p.u.MW/Hz]는 i제어 지역의 계통제동을 나타내는 양이다.

iii) 연계선을 통한 전력수요의 증가분 : ΔP_{tiej} (3)

식 (1)~(3)을 기초로 하여 전력평형 방정식은 식 (4)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\Delta P_{ti} - \Delta P_{di} = 2 \frac{H_i}{f_i^*} \frac{d}{dt} \Delta f_i + D_i \Delta f_i + \Delta P_{tiej} \quad (4)$$

여기서, $H_i = \frac{W_{kin i}^*}{P_{ri}}$ [s]는 관성계수, P_{ri} [MW]는 i지역의 정격전력이다. 식 (4)의 연계선 조류편차 ΔP_{tiej} 는 i지역에서 유입되는 유효전력으로서 식 (5)와 같다.

$$P_{tiej} = T_{ij} \left(\int \Delta f_i dt - \int \Delta f_j dt \right) \quad (5)$$

여기서, T_{ij} 는 동기 화력계수를 나타낸다. 발전기-터어빈-조속기 계통에 있어 터어빈 발전기와 터어빈에 부속되어 회전속도 조절을 위한 조속기의 관계는 식 (6)~(7)과 같다.

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{ti} = -\frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{ti} + \frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{gi} \quad (6)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{gi} = -\frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{gi} + \frac{1}{T_{gi}R_i} \Delta f_i + \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{ci} \quad (7)$$

여기서, ΔP_{ti} 와 ΔP_{gi} 는 i 지역 터빈 발전기와 조속기의 발전량 증가분, R_i 는 i 지역 발전기의 속도 조정률 그리고 ΔP_{ci} 는 i 지역 속도 변환장치의 위치 증가분이다.

3. 퍼지 전 보상 PID 제어

S. G. Tzafestas 등이 퍼지와 PID 제어를 시스템에 적용시킨 이래로 이에 대한 많은 연구가 있었다[10-17]. 그 중 PID 제어를 위한 여러 가지 동조방식에 관한 연구가 있는데, 대표적으로 이득 변경(gain modifications)[9,13,17]과 기준점 변경(set-point modifications)[14-16,6,7]의 두 가지로 분류할 수 있다.

PID 제어기와 퍼지 제어를 병렬로 사용하는 구조는 이득 변경의 경우로 볼 수 있는데, 이러한 병렬 구조는 조건적으로 제어기의 출력을 계산하게 되는데 식 (8)과 같다.

$$u(k) = K_P e(k) + TK_I \sum_{n=0}^k e(n) + \frac{K_D}{T} \Delta e(k) \quad (8)$$

if $(e, \Delta e) \in R$
 $G(e, \Delta e)$ otherwise

여기서, R 은 $(e, \Delta e)$ 공간에서의 영역이다. 이 설계에서, 식 (8)의 G 로 표현되는 퍼지 제어기의 미세 동조는 PID 제어기로 대체되게 된다. 이 병렬 구조는 정상 상태 응답동안에는 PID 제어기의 정확성을 가지며, 과도 상태 응답동안에는 퍼지 제어기의 신속성을 효과적으로 결합시킬 수 있다. 이 구조의 중점 설계 목표는 동특성 성능을 최적화하기 위해 R 을 발견하는 것이다. 일반적으로 이득 변경은 식 (9)와 같이 표현될 수 있다.

$$\begin{aligned} K_P' &= K_P + G_P(e, \Delta e) \\ K_I' &= K_I + G_I(e, \Delta e) \\ K_D' &= K_D + G_D(e, \Delta e) \end{aligned} \quad (9)$$

여기서, G_P , G_I 와 G_D 는 비선형 함수이다. R. Babuska 등 [17]은 세 개의 비선형 함수를 충족시키기 위해 3개의 퍼지 제어를 사용하는 방식을 제안하였다. 이 설계 기법은 PID 제어기의 퍼지 감독(fuzzy supervision of PID controller)이라고 한다. 반면에 S. Z. He 등[13]은 이득 변경을 위해 단지 하나의 퍼지 제어를 사용하는 또 다른 형태의 퍼지 감독 기법을 발표하였다. 그들의 계층적인 접근에서 퍼지 제어기는 제어대상의 출력을 평가하고, 보상된 이득을 발생시키기 위해 미리 기술된 과정으로부터 가능한 편차를 검출하였다.

PID 제어를 향상시키기 위한 또 다른 방법은 기준점을 변경하는 것이다. 여기서, 기준점 변경은 식 (10)과 같이 새

로운 오차항을 도입한다.

$$\begin{aligned} e_P &= y_r(k) \cdot F_P(e, \Delta e) - y(k) \\ e_I &= y_r(k) \cdot F_I(e, \Delta e) - y(k) \\ e_D &= y_r(k) \cdot F_D(e, \Delta e) - y(k) \end{aligned} \quad (10)$$

여기서, \cdot 는 곱 혹은 합 연산자이고, F_P , F_I 와 F_D 는 e 와 Δe 의 비선형 함수들이며, 그 제어 입력은 식 (11)과 같다.

$$u(k) = K_{Pe}P(k) + TK_I \sum_{n=0}^k e_I(n) + \frac{K_D}{T} \{e_D(k) - e_D(k-1)\} \quad (11)$$

이것과는 달리, 비례항의 기준점만을 변경하는 경우가 있을 수 있는데, $F_P = \beta$, $F_I = F_D = 1$ 과 같이 나타낼 수 있다. $\cdot = \times$ 이라고 하면 식 (12)와 같다.

$$u(k) = K_P \{\beta y_r(k) - y(k)\} + TK_I \sum_{n=0}^k e(n) + \frac{K_D}{T} \{e(k) - e(k-1)\} \quad (12)$$

이것은, T. Hagglund 등[14]에 의해 제안된 기준점 가중치 설계(set-point weighting scheme)로 잘 알려져 있다. 또, 그 이후에 C. C. Hang 등[15]이 정규화된 플랜트 이득과 불감시간의 값에 기초로 해서 β 를 결정하는 방법을 연구하였다. 최근에는 Kim 등[16]이 기준점을 변경하기 위해 더 일반적인 구조를 제안하였는데, 그들의 설계에서는 동일한 비선형 함수를 사용하였다. 즉, $F_P = F_I = F_D = F$ 이고 새로운 기준점을 가지게 되는데, 식 (13)과 같다.

$$u(k) = K_P e'(k) + TK_I \sum_{n=0}^k e'(n) + \frac{K_D}{T} \{e'(k) - e'(k-1)\} \quad (13)$$

여기서, $e'(k) = y_r(k) + F(e, \Delta e) - y(k)$ 이다. 이것은 비선형 함수 F 를 만족하도록 퍼지 제어를 사용하고 있기 때문에 퍼지 전 보상 PID 제어기라 하며, 기본적인 구조는 그림 2와 같다.

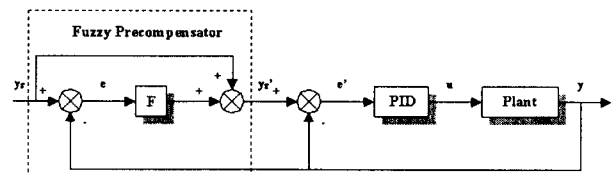


그림 2 퍼지 전 보상 PID 제어기의 일반적인 구조
 Fig. 2 Basic structure of fuzzy precompensated PID controller

이상과 같이 퍼지 제어기는 PID 제어기의 성능을 향상시킬 수 있으며, PID 제어기와 퍼지논리 기법들을 결합하는 많은 접근들이 있었다. 이러한 퍼지 PID 제어 구조는 기준점 변경이나 또는 이득변경을 통해서 PID 제어기를 자동동조할 수 있다. 그러나 이러한 접근들의 거의 대부분은 퍼지 제어기의 구성요소 선정에 있어 시행착오법에 의지해야만 한다는 것이다. 이러한 방법에 의한 퍼지 제어기 설계는 영역(domain)에 대한 지식을 요구하며, 또 이러한 지식을 이용한다 할지라도, 퍼지 제어기의 미세 동조는 많은 시간과 노력을 필요로 하게 된다.

4. 유전 알고리즘에 의한 퍼지 전 보상 PID 제어기의 자동규칙 발생

1970년 John Holland는 집단이 가진 염색체(chromosome)가 세대(generation)에 따라 그들이 처한 환경에 대하여 생존과 번식의 적합한 활동을 위한 자연선택(natural selection) 때문에 진화한다는 다윈의 진화이론을 토대로 한 자연의 유전원리를 모방하여 유전 알고리즘(GA : Genetic Algorithm)을 도입하기 시작했다. 이 유전 알고리즘은 최근 최적화 문제를 해결하는데 적용되고 있으며 해를 구하는 방법에서 강인한 탐색방법으로 알려져 있다[18-20].

전력계통의 부하주파수 제어를 위해 본 논문에서 제안하는 GA-퍼지 전 보상 PID 제어기의 블록선도는 그림 3과 같다. 여기서, 퍼지 전 보상기의 각 구성요소를 시행착오법이 아닌 자동으로 최적화하기 위해 유전 알고리즘을 이용하였다. 이에 대한 흐름도는 그림 4와 같다.

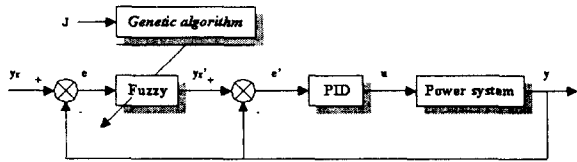


그림 3 제안된 GA-퍼지 전 보상 PID 제어기
Fig. 3 Proposed GA-fuzzy precompensated PID controller

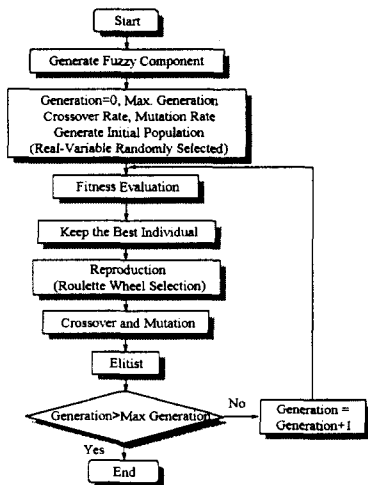


그림 4 GA를 이용한 퍼지 구성요소의 자동동조
Fig. 4 Auto-tuning of fuzzy component using GA

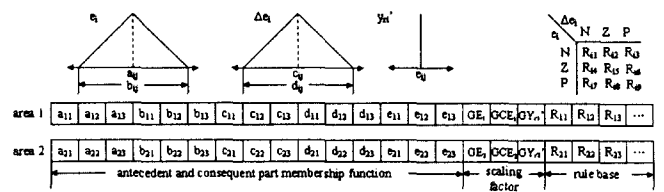


그림 5 제안된 염색체 구조
Fig. 5 Proposed chromosomes structure

여기서, 최적화하고자 하는 퍼지 전 보상기의 구성요소는 스케일링 계수, 멤버쉽함수, 제어규칙이다. 그림 5는 퍼지 전 보상기의 각 구성요소를 최적화하기 위한 염색체 구조이다. 본 논문에서 제안한 염색체는 실수 스트링을 사용하여 표현하였다. 염색체의 길이는 다음과 같다. 퍼지 전 보상기의 입력 출력인 e , Δe 와 y_r 에 대해 스케일링 계수는 각각 GE, GCE와 GYr' 로서 3개, 멤버쉽함수는 전건부의 경우 퍼지 전 보상기의 입력인 e 와 Δe 에 대해 입력 분할 수가 Negative, Zero, Positive이고, 각 멤버쉽함수를 표현하는데 필요한 변수는 Center와 Width이므로 전건부 스트링의 총 길이는 $2 \times 3 \times 2 = 12$ 개가 된다. 또 후건부의 경우 퍼지 전 보상기의 출력인 y_r 에 대해 입력 분할 수가 역시 Negative, Zero, Positive이고, 필요한 변수는 Center이므로 후건부 스트링의 총 길이는 $1 \times 3 \times 1 = 3$ 개가 된다. 그러므로 전건부와 후건부의 멤버쉽함수 최적화를 위한 스트링의 총 길이는 15개이며, 마지막으로 제어규칙의 스트링 길이는 9개이다. 그러므로 각 구성요소에 대한 총 스트링 길이는 27개이다. 이를 전력계통의 1지역과 2지역에 대해 고려하면 모두 54개가 되며, 각 염색체의 구성은 그림 5와 같다. 그림 5에서 전건부의 e 에 대한 멤버쉽함수의 중심점 a , 폭 b 와 Δe 에 대한 멤버쉽함수의 중심점 c , 폭 d 가 차례로 염색체로 구성되며, 이어서 후건부 파라미터인 e 가 배치된다. 그 다음에는 스케일링 계수에 대한 변수가 염색체로 구성되며, 마지막으로 제어규칙이 염색체로 구성된다. 이렇게 구성된 염색체는 하나의 긴 염색체를 구성하며 이 염색체를 사용하여 유전 알고리즘이 수행된다. 새롭게 생성된 개체들도 모두 같은 구조를 따르며, 각 개체를 평가할 때에는 퍼지 전 보상기의 구성요소를 추출하고 추출된 구성요소에 의한 퍼지 전 보상기를 이용하여 평가하게 된다. 각 개체의 적합도를 평가하는 적합도 함수는 보통 풀고자하는 최적화 문제의 목적함수나 다른 주관적 평가함수에 의해 결정된다. 일반적으로 퍼지 전 보상기의 최적화는 평가함수값을 최소화시키는 퍼지 전 보상기의 구성요소를 찾아내는 것이다. 따라서 본 논문에서 사용된 평가함수는 식 (14)와 같고, 적합도 함수는 식 (15)와 같이 정의하였다.

$$J = \int_0^{t_1} (|\Delta f_1| + |\Delta f_2| + |\Delta P_{tie12}| + \omega(|u_1| + |u_2|)) dt \quad (14)$$

$$\text{Fitness}(J) = \frac{1}{1 + \min J} \quad (15)$$

식 (14)에서 t_1 은 적분시간이며, ω 는 가중치이다. 식 (15)의 적합도 함수는 퍼지 전 보상기가 기준신호에 빨리 도달하

고 정상상태 오차가 최소가 될 때, 최대의 값을 갖는다. 이렇게 정의되어진 적합도 함수는 각 개체가 다음 세대에 생존할 가능성의 척도가 되며 이 적합도가 큰 개체는 다음 세대에 생존할 가능성이 크게 되며 이와 반대로 적합도가 작은 개체는 생존할 가능성이 작게 된다.

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 부하외란에 대해 적응성을 갖도록 부하의 변동이 다양하게 변동될 경우에 있어서 2지역으로 연계된 전력계통의 부하주파수 제어를 위해 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 전 보상 PID 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기는 각각의 지역에 적용되고, 각 발전기의 제어입력은 조속기에 적용되며, 이 입력을 조절함으로 인하여 주파수를 조절하도록 하고 있다. 제어기 설계시에는 먼저, 퍼지 전 보상기의 입력력 요소인 e_i , Δe_i 와 y_{ri} 에 대해서 3개의 퍼지변수(Negative, Zero, Positive)를 초기 설정하고, 유전 알고리즘을 이용하여 퍼지 전 보상기의 전건부 및 후건부의 중심치와 폭, 스케일링 계수와 제어규칙을 계산하게 된다. 이 구성요소에 의한 제어 성능은 평가함수가 최소화 될 때까지 반복계산 하게 된다. 제한한 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 종래의 설계방식인 PID 제어[15] 및 퍼지 전 보상 PID 제어[16]방식을 이용하였을 경우에 대하여 시뮬레이션을 통하여 동특성을 비교, 고찰하였다. 또한 각 방식에 대한 평가함수의 비교를 통하여 제어성능을 고찰하였다. 여기서 사용된 PID 제어방식은 시간 영역 상에서 임계이득과 임계주기를 구하여 쉽게 파라미터를 선정할 수 있는 ZN 방식을 이용하였고, 퍼지 전 보상 PID 제어방식은 시행착오법에 의한 전 보상 방식을 이용하였다. LFC를 위한 흐름도는 그림 6과 같다.

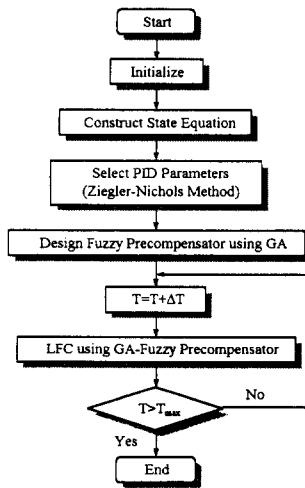


그림 6 부하주파수 제어의 흐름도

Fig. 6 Flowchart of LFC

모델계통은 C. E. Fosha 등의 2지역 전력계통 선형모델에 부하의 변동이 다양하게 변동될 경우에 있어서 각 사례연구 별로 제어성능을 고찰하였다.

5.1 1지역에 부하외란 $\Delta P_{d1}=0.01$ [p.u.]가 지속적으로 발생하였을 경우

유전 알고리즘의 초기 파라미터는 표 1과 같고, 각 지역에 대해 최적화된 퍼지 전 보상기의 각 구성요소의 값들은 각각 표 2, 표 3과 그림 7과 같다. 여기서, 그림 7은 멤버십함수의 동조과정과 최적화된 중심값과 폭을 나타내고 있다. 또 각 세대에 따른 최대적합도와 평균적합도는 그림 8의 (a)와 같으며, 평가함수가 최소화되고 있는 과정을 그림 8의 (b)에서 보여주고 있다.

표 1 초기 파라미터

Table 1 Initial parameters

| Parameters | Values |
|----------------------|--------|
| Population size | 40 |
| Number of generation | 100 |
| Crossover rate | 0.8 |
| Mutation rate | 0.005 |

표 2 최적화된 스케일링 계수

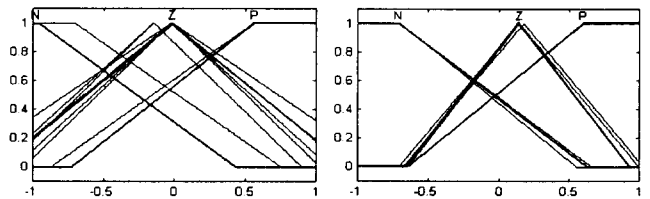
Table 2 Optimized scaling factors

| | GE | GCE | GYr' |
|--------|----------|----------|----------|
| Area 1 | 0.009040 | 0.002560 | 0.019358 |
| Area 2 | 0.001137 | 0.000038 | 0.000685 |

표 3 최적화된 퍼지규칙

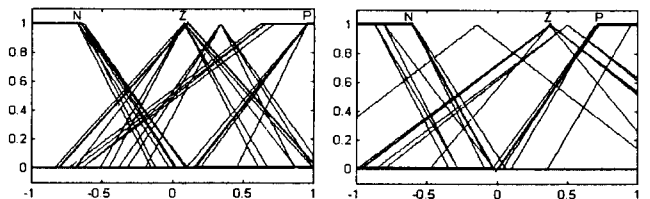
Table 3 Optimized fuzzy rules

| Area 1 (y_{r1}') | | | | Area 2 (y_{r2}') | | | |
|----------------------|---|---|---|----------------------|---|---|---|
| | N | Z | P | | N | Z | P |
| e_1 | N | N | N | N | N | N | N |
| | Z | N | Z | Z | Z | N | Z |
| | P | Z | Z | P | P | N | P |



Label N Z P Label N Z P
 Final Center-0.9677-0.0161 0.5645 Final Center-0.7097 0.1452 0.5968
 Final Width 2.8062 3.0000 2.6128 Final Width 2.5484 1.5807 2.4840

(a) Area 1 (e_1 , Δe_1)



Label N Z P Label N Z P
 Final Center-0.6290 0.1129 0.9516 Final Center-0.6129 0.3710 0.7258
 Final Width 1.4516 1.8388 1.5806 Final Width 1.1936 2.6774 1.4516

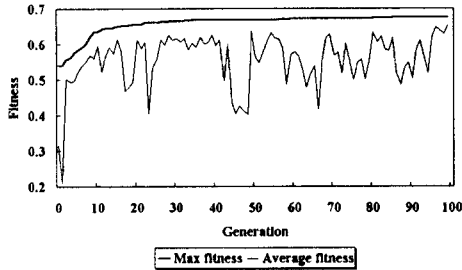
(b) Area 2 (e_2 , Δe_2)

| | N | Z | P |
|---------------------|---------|--------|--------|
| Area 1(y_{r1}') | -0.9516 | 0.3710 | 0.9032 |
| Area 2(y_{r2}') | -0.5000 | 0.0484 | 0.7742 |

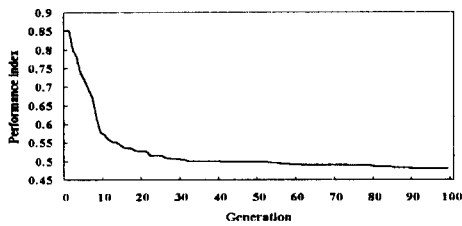
(c) Final center values of consequent part

그림 7 최적화된 멤버십함수

Fig. 7 Optimized membership function



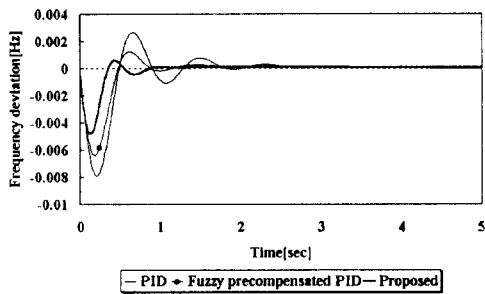
(a) Max and average fitness



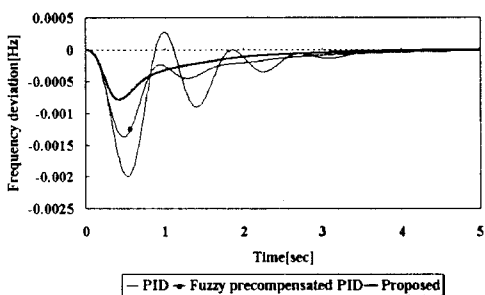
(b) Performance index

그림 8 적합도와 평가함수

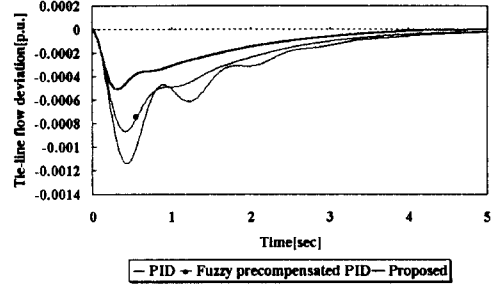
Fig. 8 Fitness and performance index



(a) Δf_1



(b) Δf_2



(c) ΔP_{tie2}

그림 9 전력계통의 동특성 응답 ($\Delta P_{d1}=0.01$ [p.u.])

Fig. 9 Dynamic responses of power system ($\Delta P_{d1}=0.01$ [p.u.])

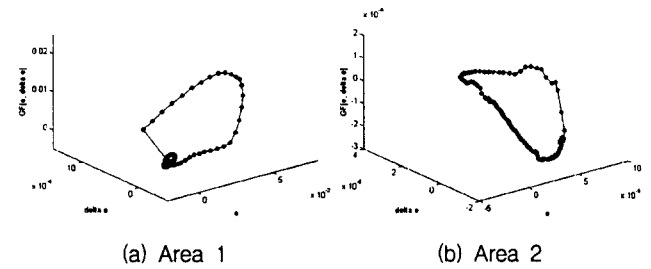


그림 10 기준점의 자동동조

Fig. 10 Auto-tuning of set-point

그림 9의 (a)는 1지역의 주파수 응답특성을 나타내고 있다. 주파수 최대 편차량을 비교해 보면 PID 기법은 -7.916×10^{-3} [Hz], 퍼지 전 보상 PID는 -6.409×10^{-3} [Hz], GA-퍼지 전 보상 PID는 -4.822×10^{-3} [Hz]이다. 즉, 제안한 제어기법은 PID보다 39%정도, 퍼지 전 보상 PID보다 25%정도 감소시켰다. 또한 정정시간을 비교해 보면 제안한 제어기법의 정정시간이 빠른 수렴 특성을 나타내었다. 그림 13의 (b)는 2지역의 주파수 편차량의 응답특성을 나타내고 있으며, 그림 13의 (c)는 연계선 조류 편차량의 응답특성을 나타내고 있다. 역시 제안한 제어기법이 PID 및 퍼지 전 보상 PID 제어보다 주파수 최대 편차량 및 연계선 조류의 최대 편차량이 현저히 감소되었고, 정정시간 역시 현저히 감소시켰다.

그림 10은 오차와 오차 변화량에 대해 각 지역에 대한 기준점이 자동동조 되어지는 과정으로서, 얼마간의 시간 후에는 일정한 값으로 수렴하는 것을 볼 수 있다. 이 시점에서 전 보상기는 더 이상 필요가 없으며 단지 PID 제어기에 의해서 전력계통이 제어되고 있는 하이브리드형의 성질을 나타내고 있다.

제어성능을 평가하기 위해 식 (14)와 같은 평가함수를 사용하여 PID, 퍼지 전 보상 PID 및 GA-퍼지 전 보상 PID의 제어성능을 비교한 결과는 표 4와 같이 제안한 기법의 제어 성능이 PID 및 퍼지 전 보상 PID보다 우수함을 알 수 있었다.

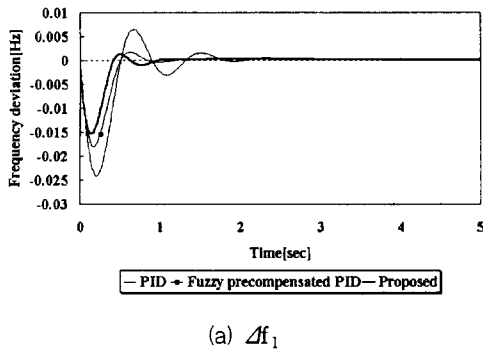
표 4 평가함수

Table 4 Performance index

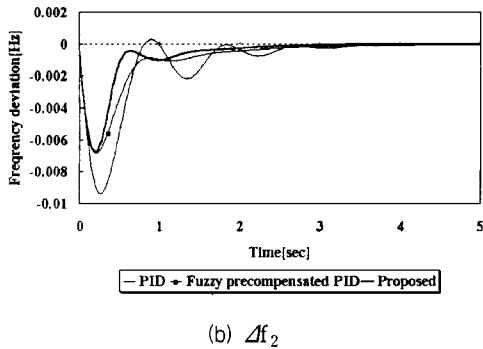
| Performance index | Control method | | |
|-------------------|------------------------|--------------------------|------------------------|
| | PID | Fuzzy precompensated PID | Proposed |
| J | 9.531×10^{-1} | 7.531×10^{-1} | 4.801×10^{-1} |

5.2 1지역과 2지역에 부하외란 $\Delta P_{d1}=0.03[p.u.]$, $\Delta P_{d2}=0.01[p.u.]$ 가 동시에 지속적으로 발생하였을 경우

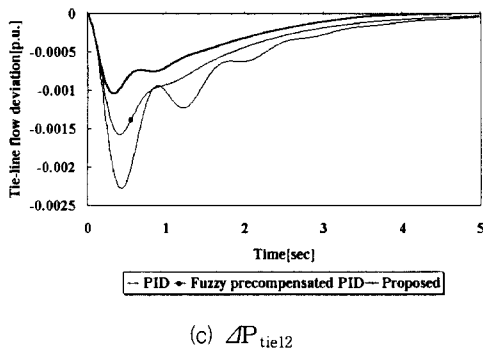
두 번째의 사례연구 조건으로는 1지역에 비교적 큰 부하외란 $\Delta P_{d1}=0.03[p.u.]$ 와 2지역에 부하외란 $\Delta P_{d2}=0.01[p.u.]$ 가 동시에 지속적으로 인가되는 것으로 하였다. 모델계통의 동특성 응답은 그림 11과 같으며, 역시 종래의 제어기법인 PID 제어기법과 퍼지 전 보상 PID 제어기법보다 1, 2지역의 주파수 편차량 및 연계선 조류편차량을 경감시킬 수 있었고, 양호한 정정시간을 얻을 수 있었다. 또 기준점이 자동동조되어지는 과정은 그림 12와 같다.



(a) Δf_1



(b) Δf_2



(c) ΔP_{tie12}

그림 11 전력계통의 동특성 응답
($\Delta P_{d1}=0.01[p.u.]$, $\Delta P_{d2}=0.03[p.u.]$)
Fig. 11 Dynamic responses of power system
($\Delta P_{d1}=0.01[p.u.]$, $\Delta P_{d2}=0.03[p.u.]$)

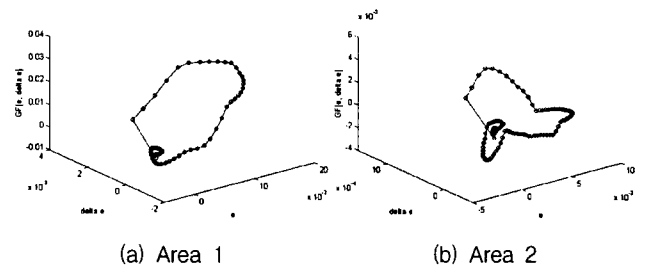


그림 12 기준점의 자동동조
Fig. 12 Auto-tuning of set-point

식 (15)의 평가함수를 사용하여 비교한 결과는 표 5와 같으며, 역시 제안한 기법이 PID, 퍼지 전 보상 PID보다 평가함수를 최소화시킴을 알 수 있었다.

표 5 평가함수
Table 5 Performance index

| Performance index | Control method | | |
|-------------------|----------------|--------------------------|----------|
| | PID | Fuzzy precompensated PID | Proposed |
| J | 3.026 | 2.339 | 1.711 |

6. 결 론

본 논문에서는 2지역으로 연계된 전력계통의 주파수 및 연계선 조류 편차량을 허용치 이내로 수렴시키기 위해 유전 알고리즘을 이용한 최적의 퍼지 전 보상 PID 제어기를 설계하였다. 본 논문의 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, 퍼지 전 보상이 설계시 최적화에 강인한 유전알고리즘을 이용하였으며, 종래의 퍼지 전 보상 PID 제어기의 구성요소(스케일링 계수, 멤버십함수, 제어규칙) 선정시 사용되었던 시행착오법이나 부분적인 최적화와는 달리 자동으로 모든 퍼지 전 보상의 구성요소를 최적화시켰다.

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

셋째, 2가지 경우의 사례연구를 통하여 작은 부하외란과 비교적 큰 외란이 각 지역에, 또는 동시에 지속적으로 발생하였을 경우 제안한 유전 알고리즘을 이용한 퍼지 전 보상 PID 제어기법이 종래의 제어 방식들보다 주파수 최대 편차량 및 연계선 조류 최대 편차량을 경감시킬 수 있었고, 정정시간을 감소시킬 수 있었다.

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] O. I. Elgerd and C. E. Fosha, "Optimum megawatt-frequency control of multiarea electric energy

systems", IEEE Trans. Power App. Syst., Vol. Pas-89, No. 4, pp. 556-563, (1970).

[3] P. Kundur, "Power System Stability and Control", McGraw-Hill, Inc., pp. 581-626, 1993.

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

[5] 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.

[6] 정형환, 정문규, 유재엽, "퍼지 전 보상 PID 제어를 이용한 전력계통의 부하주파수 제어에 관한 연구", 生産技術研究所論文集, 제 4권 1호, pp. 241-248, 1999.

[7] 정형환, 김상효, 정문규, "전력계통의 부하주파수 제어를 위한 신경회로망 전 보상 PID 제어기 적용", 韓國船舶機關學會誌, 제 23권 4호, pp. 480-487, 1999.

[8] H. Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc, pp. 527-585, 1999.

[9] H. H. Chung, J. T. Lee, S. M. Joo, M. K. Chung, "Application of Fuzzy PID Controller for Stabilization of Power System", 1999 IEEE International Fuzzy Systems Conference, pp. 1729-1733, 1999.

[10] S. Tzafestas and N. P. Papanikolopoulos, "Incremental Fuzzy Expert PID Control", IEEE Trans. Industrial Electronics, Vol. 37, No. 5, 1990.

[11] C. L. Chen, P. C. Chen and C. K. Chen, "Analysis and Design of Fuzzy Control System", Fuzzy Sets and Systems, Vol. 57, pp. 125-140, 1993.

[12] T. Brehm and K. S. Rattan, "Hybrid Fuzzy Logic PID Controller", 3th IEEE international conference on fuzzy systems, Vol. 3, pp. 1682-1687, 1994.

[13] S.-Z. He, S. Tan and F.-L. Xu, "Fuzzy self-tuning of PID controllers, Fuzzy Sets and Systems, Vol. 24, pp. 37-46, 1993.

[14] T. Hagglund and K. J. Astrom, "Automatic tuning of PID controllers based on dominant pole design", Proc. IFAC Workshop on Adaptive Control of Chemical Processes, Frankfurt, 1985.

[15] 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.

[16] 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.

[17] R. Babuska and P. Horacek, "Laboratory evaluation of fuzzy controllers", Preprints of the IFAC/IFIC/IMACS Internat. Symp. on Artificial Intelligence in Real-Time Control, Delft, pp. 263-268, 1992.

[18] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1989.

[19] M. Gen, R. Cheng, "Genetic Algorithms and Engineering Design", John, Wiley & Sons, Inc., 1997.

[20] 정형환, 왕용필, 정동일, 정문규, "유전 알고리즘을 이용한 전력시스템 안정화 장치의 최적 파라미터 선정", 대한전기학회논문지, 제 48권 6호, pp. 683-691, 1999.

저 자 소 개



정형환 (鄭亨煥)

1941년 1월 19일 생. 1964년 연세대 공대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동아대 공대 전기공학과 교수.

Tel : 051-200-7733

E-mail : hhchong@mail.donga.ac.kr



왕용필 (王龍泌)

1966년 8월 25일 생. 1992년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1998년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 현재 동 대학 부설 정보기술연구소 특별연구원 및 뉴질랜드

University of Canterbury Post-Doctoral Researcher

Tel : 64-3-3642-987

E-mail : y.wang@elec.canterbury.ac.nz



이정필 (李丁必)

1971년 8월 19일 생. 1999년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년~현재 동 대학교 전기공학과 박사과정.

Tel : 051-200-6747

E-mail : leejp@mail.taegu.net



정문규 (鄭文圭)

1971년 11월 16일 생. 1998년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1998년~현재 동 대학교 전기공학과 석사과정.

Tel : 051-200-6747

E-mail : d9134723@mail.donga.ac.kr