

## 전력시스템의 부하주파수 제어를 위한 IA-Fuzzy 전 보상 PID 제어기 설계

정 형 환\* · 이 정 필\* · 정 문 규\* · 김 창 현\*

### Design of a IA-Fuzzy Precompensated PID Controller for Load Frequency Control of Power Systems

H-H Chung\* · J-P Lee\* · M-K Chung\* · C-H Kim\*

Key words : Power system(전력시스템), Load frequency control(부하주파수제어),  
Generation rate constraints(발전량증가율 제한), Immune algorithm(면역 알고  
리즘), Fuzzy precompensated PID control(퍼지 전보상 PID 제어)

#### Abstract

In this paper, a robust fuzzy precompensated PID controller using immune algorithm for load frequency control of 2-area power system is proposed. Here, a fuzzy precompensated PID controller is designed as a fuzzy logic based precompensation approach for PID controller. This scheme is easily implemented by adding a fuzzy precompensator to an existing PID controller. We optimize the fuzzy precompensator with an immune algorithm for complementing the demerit such as the difficulty of the component selection of fuzzy controller, namely, scaling factor, membership function and fuzzy rules. Simulation results show that the proposed robust load frequency controller can achieve good performance even in the presence of generation rate constraints.

#### 1. 서 론

전력계통의 주파수의 변동은 산업체나 가정에서 쓰이는 각종 정밀기계 및 자동설비에 악영향을 미치며, 또한 각 지역을 연결하는 연계선의 전력 조류는 주파수 변동에 매우 민감하므로 이에 대한 제어를 신속히 행하지 않으면 조류의 동요가 심하게 되어 전력계통의 안정도가 저하된다. 그러므로

계통운용의 안정성과 신뢰성을 확보하기 위해서는 주파수를 일정하게 유지하여야한다. 이러한 일정한 주파수의 유지와 연계선 조류편차를 허용치 이내로 유지하기 위해서 전력계통의 부하주파수 제어(Load Frequency Control : LFC)가 필요하다. 이를 위해 C. E. Fosha<sup>[1][2]</sup> 등에 의해 부하주파수 제어계의 동특성 응답을 개선시키기 위한 최초의 연구가 이루어졌으며, 이후 T. Hiyama<sup>[3]</sup> 등은

\* 동아대학교 전기공학과

전력 시스템의 비선형성을 고려하기 위하여 발전량 증가율제한(Generation Rate Constraints : GRC)을 고려하였다. 이처럼 부하주파수 제어를 위한 노력의 일환으로써 비례, 미분, 적분요소를 갖는 피드백 제어로부터 선형 최적제어 기법, 인공신경회로망 등이 제안되었다.<sup>[44]</sup>

산업 현장에서 많이 쓰이고 있는 제어기 중 PID(Proportional, Integral and Derivative)제어기는<sup>[9][11]</sup> 간단한 구조를 갖고 있음에도 불구하고 상대적으로 우수한 제어성을 제공하는 것으로 알려져 있다. 그러나, PID제어기의 성능은 제어대상 및 제어기의 매개변수에 크게 의존하는 단점을 지니고 있다. 특히 전력계통과 같이 비선형성이 많이 존재하는 경우 계통의 해석 및 제어기 설계가 매우 어려운 실정으로서 전력계통의 부하주파수 제어는 고도의 제어기법이 요구되고 있다. 이러한 문제의 해결책으로 선형, 비선형 시스템을 불문하고 효과적인 성능을 가지며, 학습과 적응 그리고 병렬 분산처리가 가능한 신경회로망 제어나 전문가의 지식 및 경험을 제어규칙으로 퍼지추론에 의해 제어동작을 결정하는 퍼지 제어와 같은 지능제어가 전력계통에 도입되고 있다<sup>[12][14]</sup>. 이중 퍼지 제어는 전문가의 지식 및 경험을 제어규칙으로 이문화하여 추론에 의해 제어동작을 결정하는 유연성 있는 제어수법으로써 정확한 수식 모델을 취하지 않아도 된다는 점과 언어적 제어규칙을 이용하여 온 라인으로 단시간에 제어입력을 결정할 수 있다는 장점이 있다.

한편, PID 제어기와 퍼지 제어기의 장점만을 이용하여 설계된 하이브리드형 제어기들에 관한 연구가 진행중에 있으며, 그에 대한 연구로는 S. G. Tzafestas 등이 2차 시스템에 적용시켜 응답특성을 검증한 이후 활발한 연구가 이루어져 오고 있다. C. L. Chen<sup>[15]</sup> 등은 Lyapunov 함수를 부가하여 안정한 제어가 가능하도록 퍼지 제어기와 PID 제어기를 결합한 하이브리드 제어기를 설계하였으며, T. Brenm<sup>[16]</sup> 등은 PI형 퍼지 제어기와 PD형 퍼지 제어기를 결합한 형태로 제어기를 구성하였다. 그러나, 이들의 제어원리와 구조적인 차이에도 불구하고, 모두 퍼지 규칙베이스 구성시에 전문가의 주관적인 경험에 의존한다는 단점이 있다. 따라

서 이러한 문제의 해결책으로 본 논문에서는 전력계통의 주파수 및 연계선 조류 편차량을 허용치 이내로 수렴시키기 위해 인간의 면역 체계를 모의한 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)<sup>[17][20]</sup>을 이용한 퍼지 전 보상 PID제어기를 설계하고자한다.

제안한 IA를 이용한 퍼지 전 보상 PID제어기의 우수성을 입증하기 위해 부하의 변동이 다양하게 발생할 경우 종래의 제어기법인 최적제어와 PID 제어기를 이용한 경우 사례 연구별로 시뮬레이션을 통해 동특성 응답을 비교·고찰하였다.

## 2. 부하주파수제어 모델 계통방정식

다수의 제어지역이 상호 연계된 전력계통의 효율적인 주파수 제어대책을 검토하기 위하여 C. E. Fosha 등<sup>[18][2]</sup>이 제안한 2지역 모델계통을 주로 사용하며 Fig. 1은 2지역 계통중의 하나의 지역만을 나타내었다.

Fig. 1을 기초로 한 i 지역 계통의 선형 모델 상태방정식은 다음 식 (1)~(4)와 같이 표현될 수 있다.

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

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{ti} = -\frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{ti} + \frac{1}{T_{ti}} \Delta P_{gi} \quad (2)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{gi} = \frac{1}{T_{gi}} \Delta P_{gi} - \frac{1}{T_{gi} R_i} \Delta f_i + \frac{1}{T_{gi}} \Delta U_i \quad (3)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta P_{tieij} = T_{ij} (\Delta f_i - \Delta f_j) \quad (4)$$

여기서,  $\Delta f_i$ 는 i지역의 주파수 편차,  $\Delta P_{ti}$ 는 i지역

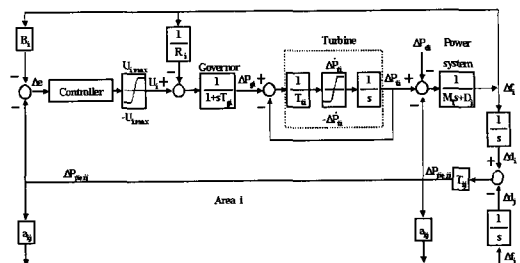


Fig. 1 Block diagram of i areas power system with GRC

의 터빈 출력 편차,  $\Delta P_{gi}$ 는 i지역의 조속기 출력 편차,  $\Delta P_{ueij}$ 는 ij지역의 연계선 조류 편차,  $\Delta P_{di}$ 는 i지역의 부하외란,  $U_i$ 는 i지역의 제어입력을 나타낸다. 그리고  $T_{gi}$ 는 조속기 시정수,  $T_{ui}$ 는 터빈 시정수,  $M_i$ 는 발전기의 관성정수,  $D_i$ 는 제동 정수를 나타낸다.

본 논문에서는 사례연구로서 터빈 밸브의 개폐속도  $\Delta \dot{P}_{ui}$ 에 대해 분당 계통의 기준용량 10%의 발전비로 제한한다. 따라서, i지역에 대한 발전비는 식 (5)와 같이 제한을 하게 된다.

$$\Delta \dot{P}_{ui} = \frac{0.1}{60.0} [p.u.MW/s] \quad (5)$$

### 3. Fuzzy 전보상 PID제어

Tzafestas 등이 퍼지와 PID 제어를 시스템에 적용시킨 이래로 이에 대한 많은 연구가 있었다. 그 중 PID 제어를 설계하기 위한 여러 가지 동조방식에 관한 연구가 있었는데 대표적으로 이득변경 (gain modification)<sup>[11]</sup>과 기준점 변경(set-point modification)<sup>[10][11]</sup>의 두 가지로 분류할 수 있으며, 본 논문에서는 기준점 변경방식을 사용하였다.

여기서, 기준점 변경은 식 (6)과 같이 새로운 오차항을 도입한다.

$$\begin{aligned} e_P &= y_r(k) \circ F_P(e, \Delta e) - y(k) \\ e_I &= y_r(k) \circ F_I(e, \Delta e) - y(k) \\ e_D &= y_r(k) \circ F_D(e, \Delta e) - y(k) \end{aligned} \quad (6)$$

여기서  $\circ$ 는 곱 혹은 합 연산자이고,  $F_P, F_I$ 와  $F_D$ 는  $e$ 와  $\Delta e$ 의 비선형 함수들이며, 그 제어 입력은 식 (7)과 같다.

$$\begin{aligned} u(k) &= K_P e_P(k) + TK_I \sum_{n=0}^k e_I(n) \\ &+ \frac{K_D}{T} \{e_D(k) - e_D(k-1)\} \end{aligned} \quad (7)$$

이것과는 달리, 비례항의 기준점만을 변경하는 경우가 있을 수 있는데,  $F_P = \beta, F_I = F_D = 1$ 과 같이 나타낼 수 있다.  $\circ$ 를 곱의 연산자로 하면 식

(8)과 같다.

$$\begin{aligned} u(k) &= K_P(\beta y_r(k) - TK_I \sum_{n=0}^k e(n) \\ &+ \frac{K_D}{T} \{e(k) - e(k-1)\}) \end{aligned} \quad (8)$$

이것은 Hagglund 등<sup>[10]</sup>에 의해 제안된 기준점 가중치 설계(set-point weighting scheme)로 잘 알려져 있다. 또, 그 이후에 Hang 등<sup>[9]</sup>이 정규화된 플랜트 이득과 불감시간의 값에 기초로 해서  $\beta$ 를 결정하는 방법을 연구하였다. 최근에는 Kim 등<sup>[12]</sup> 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 (9)와 같다.

$$\begin{aligned} u(k) &= K_P e'(k) + TK_I \sum_{n=0}^k e'(n) \\ &+ \frac{K_D}{T} \{e'(k) - e'(k-1)\} \end{aligned} \quad (9)$$

여기서,  $e'(k) = y_r(k) + F(e, \Delta e) - y(k)$ 이다. 이것은 비선형 함수  $F$ 를 만족하도록 퍼지 시스템을 사용하고 있기 때문에 퍼지 전 보상 PID 제어기라 하며, 이러한 형태의 제어기는 기존의 PID 제어기에 쉽게 추가하여 실행할 수 있는 장점을 가지게 되며 본 연구에서 제안한 퍼지 전 보상 PID 제어기의 구조는 이러한 기준점 변경방식을 이용하였다.

### 4. 면역 알고리즘(Immune algorithm)

생체는 생체 내에 침입한 박테리아, 바이러스, 병원균을 막기 위한 면역체계를 가지고 있다. 이 체계는 항원에 대응하기 위하여 세포 유전자를 재구성하여 항원에 대응하는 항체(antibody)를 생산하고 항원(antigen)을 배제하는 복잡한 기구이다. 이러한 방어 기능을 효율적으로 수행하기 위하여 면역 체계는 자기 자신의 세포와 외부의 세포를 구별하기 위한 패턴 인식작업을 수행해야만 한다. 면역 체계는 한번 배제한 항원에 대해서는 그 항원을 기억하여 이것을 배제하는 항체를 조속히 생성하는

기억 학습능력을 갖고 있다. 이러한 특성으로 인하여 동일 항원에 대한 2차 반응은 1차 반응에 비하여 훨씬 빠르고 역동적으로 진행된다.

IA는 이러한 인간의 면역 체계를 모사한 최적화 알고리즘으로 IA의 근간이 되는 두 가지의 면역 관련 이론은 소매틱설(somatic theory)과 네트워크가설(network hypothesis)이다. 소매틱설은 면역계의 다양한 항체 생성 능력을 설명하는 이론이고, 네트워크가설은 면역계(immune system)의 자기 조절 능력을 설명하는 이론이다. 그리고, 다른 일반적인 최적화 알고리즘과 비교하여 다음과 같은 특징을 가진다. 첫째 하나의 가능해를 가지고 최적화 과정을 수행하는 것이 아니라, 동시에 여러 개의 가능해로써 최적화를 진행해 나간다. 둘째, 해의 값 자체를 그대로 사용하는 것이 아니라 코드화된 수의 배열을 사용한다. 셋째, 다른 최적화 알고리즘과는 달리 목적 함수의 미분이나 다른 정보를 사용하지 않고 목적 함수만을 사용한다. 또한, IA는 비결정론적 알고리즘으로 IA에서만 존재하는 친화도(affinity)의 계산, 기대치(expect value)의 계산, 기억 세포군(memory cell)의 생성 등의 과정을 가진다.

IA에서의 친화도에서는 두 가지의 종류가 있다. 하나는 항체와 항원과의 사이에 존재하는 친화도으로써 최적화의 목적 함수와 해와의 결합력의 강도를 의미한다. 또 다른 하나는 항원간의 사이에서 계산되는 친화도으로써 두 해간의 유사성을 나타내는데 이것에 의하여 해의 다양성이 보장된다. 위에서 언급한 기대치는 목적 함수에 최적인 해의 과도한 생성을 막기 위해 필요한 것으로, 면역계의 자기 조절 기능에 해당한다.

기억세포군은 최적으로 접근하기 위한 해의 집단으로서 최적해로의 수렴과 빠른 수렴 속도를 보장하는 IA의 핵심부분이다.

#### 4.1 IA의 구현

본 절에서는 소매틱설과 네트워크가설에 기초한 IA를 제안한다. IA는 항체 증식(antibody reproduction)과 자기 조절(self-regulation) 기구를 가지며, 이 알고리즘은 6단계로 이루어진다.

#### STEP 1 : 항원의 인식

IA는 항원 즉, 목적함수와 제약 조건 등을 입력으로 한다. 이 과정은 최적화 문제 정의에 해당한다.

#### STEP 2 : 초기 항체의 생성

최초의 과정에서 유효한 항체를 무작위로 발생시켜 이들 중 우수한 항체들을 기억세포로 저장한다. 본 논문에서는 퍼지 전 보상 PID의 파라미터들이 항체로 표현된다.

#### STEP 3 : 친화도 계산

항원과 항체  $v$ 의 친화도  $ax_v$ 와 항체  $v$ 와 항체  $w$ 의 친화도  $ay_{v,w}$ 를 계산한다. 이는 다음 단계에서 행하는 기억 세포로의 분화를 위한 척도가 되는 것으로 식 (10)을 이용한다.

$$ay_{v,w} = \frac{1}{(1 + E(2))} \quad (10)$$

$E(2)$ 는 항체  $v$ 와 항체  $w$ 만의 정보 엔트로피이며,  $E(2) = 0$ 일 때 항체  $v$ 와 항체  $w$ 간의 유전자가 완전하게 일치하는 것을 나타낸다.

한편, 항원과 항체  $v$ 간의 친화도는 식 (11)과 같다.

$$ax_v = opt_v \quad (11)$$

여기서  $opt_v$ 는 항체의 평가치로서 항원과 항체  $v$ 와 결합강도를 나타내며,  $ax_v$ 는 친화도로서 GA에서의 적합도에 상응한다.

본 논문에서는 평가치의 최소값 탐색의 문제이므로 식 (12)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ax_v = \frac{1}{(1 + opt_v)} \quad (12)$$

#### STEP 4: 기억 세포로의 분화

STEP 3에서 구한 항원과의 친화도가 높은 항체를 기억 세포에 추가한다. 기억 세포의 수에는 제한이 있으므로 추가하는 세포에 현재 보존중인 기억 세포중에서 항체간의 친화도가 가장 높은 항체를 소멸시키고 새로이 분화된 친화도가 높은 항체를 추가한다.

**STEP 5:** 항체 생성의 증식과 억제

이전 단계에 남은 항체  $i$ 의 기대치를 (13)식에 의해 계산하고, 기대치가 낮은 항체를 소멸시킨다. 단, 항원과의 친화도가 높은 항체를 소멸시키지 않기 위해 항체의 상위 5%는 억제 대상에서 제외시킨다.

$$e_i = \frac{ax_i}{C_i} \quad (13)$$

여기서,  $c_i$ 는 항체의 농도로써 식 (14)과 같이 구해진다.

$$c_i = \frac{\text{항체 } i \text{와 같은 친화도를 가진 항체의 수}}{\text{항체의 총수 } N} \quad (14)$$

식 (14)식에 의하면 항원과 항체의 친화도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 높고, 농도가 높은 항체일수록 차세대에 남을 확률이 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서, 항체는 항원에 대해 더 높은 친화도를 가진 항체를 증식하고 과도한 농도를 가진 항체의 증식을 억제하므로써 탐색방향의 다양성을 유지한다.

**STEP 6:** 항체의 증식

항원에 대해서 IA는 STEP 5에서 제거된 항체를 대신할 새로운 항체를 증식한다. 이 과정은 GA의 유전연산자에 의해 다양한 항체를 증식하고, 이는 항체의 무작위 발생보다 좀 더 효과적인 것으로 기대된다.

이 단계를 마치고 다시 STEP 3으로 되돌아가면, 무한의 새로운 항원에 대응하는 항체를 생성할 수 있다.

4.2 IA를 이용한 자동 규칙 발생

전력계통의 부하주파수 제어를 위해 본 논문에서 제안하는 IA-Fuzzy 전 보상 PID 제어기의 블록 선도는 Fig. 2와 같다. Fig. 2에서 퍼지 제어기는 식 (15)과 같이 전 보상기의 기준점  $y_r$ 를 생성하기 위해 기준점  $y_r$ 과 전력계통의 출력  $y$ 를 사용한다.

$$\begin{aligned} e(k) &= y_r(k) - y(k) \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \\ y_r(k) &= F[e(k), \Delta e(k)] \end{aligned} \quad (15)$$

이때,  $e(k)$ 는 기준점  $y_r(k)$ 와 전력계통 출력  $y(k)$  사이의 오차,  $\Delta e(k)$ 는 오차의 변화량이다. 또한,  $F[e(k), \Delta e(k)]$ 는 퍼지 논리에 의한  $e(k)$ 와  $\Delta e(k)$ 의 비선형 함수이다. 보상된 기준점  $y_r(k)$ 는 Fig. 2에서 처럼 종래의 PID를 위한 새로운 기준점으로 사용된다. PID 제어기에 대한 방정식은 식 (16)과 같다.

$$\begin{aligned} e(k) &= y_r(k) - y(k) \\ \Delta e(k) &= e(k) - e(k-1) \\ u(k) &= u(k-1) + K_p \Delta e(k) + K_I e(k) \\ &\quad + K_D \Delta e(k) - \Delta e(k-1) \end{aligned} \quad (16)$$

$e(k)$ 는 전 보상된 기준점  $y_r(k)$ 와 전력계통 출력  $y(k)$ 사이의 전 보상된 오차이고,  $\Delta e(k)$ 는 전 보상된 오차의 변화량이다.  $u(k)$ 는 전력계통의 제어입력이다. 퍼지 제어기의 각 구성요소를 시행착오법이 아닌 자동으로 최적화하기 위해 IA를 이용하였다. 여기서, 최적화하고자 하는 퍼지 제어기의 구성요소는 스케일링 계수, 멤버쉽 함수, 퍼지 규칙이다. Fig. 3은 퍼지 제어기의 각 구성요소를 최

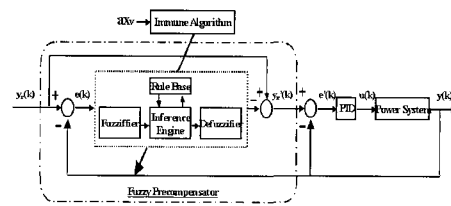


Fig. 2 Block diagram of IA-Fuzzy precompensated PID controller

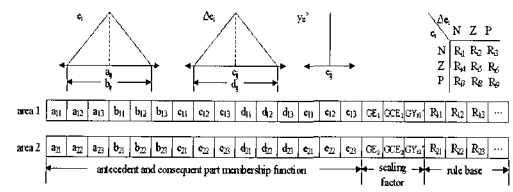


Fig. 3 Proposed antibodies structure

적화하기 위해 제안된 항체 구조이다. 퍼지 제어기의 입출력인  $e$ ,  $\Delta e$ 와  $y_r$ 에 대해 스케일링 계수는 각각  $GE$ ,  $GCE$ ,  $GY_r$ 로서 3개, 멤버십 함수는 전건부의 경우 퍼지 제어기의 입력인  $e$ 와  $\Delta e$ 에 대해 입력 분할 수가 Negative, Zero, Positive이고, 각 멤버십 함수를 표현하는데 필요한 변수는 Center와 Width이므로 전건부 항체의 총 길이는 12개가 된다. 또 후건부의 경우 퍼지 제어기의 출력인  $y_r$ 에 대해 입력 분할 수가 역시 Negative, Zero, Positive이고, 필요한 변수는 Center이므로 후건부 항체의 총 길이는 3개가 된다. 그러므로 전건부와 후건부의 멤버십 함수 최적화를 위한 항체의 총 길이는 15개이며, 마지막으로 퍼지 규칙의 항체 길이는 9개이다. 따라서, 각 구성요소에 대한 총 항체 길이는 27개이다. 이를 전력계통의 1지역과 2지역에 대해 고려하면 모두 54개가 되며, 각 항체의 구성은 Fig. 3과 같다. 이렇게 구성된 항체는 하나의 긴 항체를 구성하며 이 항체를 사용하여 IA가 수행된다. 새롭게 생성된 개체들도 모두 같은 구조를 따르며, 각 개체를 평가할 때에는 퍼지 제어기의 구성요소를 추출하고 추출된 구성요소에 의한 퍼지 제어기를 이용하여 평가하게 된다. 각 개체의 친화도를 평가하는 친화도 함수는 보통 풀고자하는 최적화 문제의 목적함수나 다른 주관적 평가함수에 의해 결정된다. 일반적으로 퍼지 제어기의 최적화는 평가함수값을 최소화시키는 제어기의 구성요소를 찾아내는 것이다. 따라서 본 논문에서 사용된 평가함수는 식 (17)과 같고, 친화도 함수는 식 (12)와 같이 정의하였다.

$$opt_v = \int_0^t (\omega_1 | \Delta f_1 | + \omega_2 | \Delta f_2 | + \omega_3 | \Delta P_{tie12} | + \omega_4 (|u_1| + |u_2|)) dt \quad (17)$$

식 (17)에서  $t$ 은 적분시간이며,  $\omega_1, \omega_2, \omega_3, \omega_4$ 는 가중치이다. 식 (12)의 친화도 함수는 퍼지 제어기가 기준신호에 빨리 도달하고 정상상태 오차가 최소가 될 때, 최대의 값을 갖는다. 이렇게 정의되어진 친화도 함수는 각 항체가 다음 세대에 생존할 가능성의 척도가 되며 이 친화도 함수의 값이 큰 개체는 다음 단계에 생존할 가능성이 크게 되며 이와 반대로 값이 작은 개체는 생존할 가능성이 작게 된다.

### 5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 부하의란에 대해 적응성을 갖도록 부하의 변동이 다양하게 변동될 경우와 GRC를 고려한 경우에 있어서 2지역으로 연계된 전력계통의 부하주파수 제어를 위해 IA를 이용한 퍼지 전 보상 PID 제어기를 설계하였다. 설계된 제어기를 각각의 지역에 적용하고, 각 발전기의 제어입력은 조속기에 적용되며, 이 입력을 조절함으로 인하여 주파수를 조절하도록 하고 있다. 제어기 설계시에는 먼저 퍼지 제어기의 입출력 요소인  $e, \Delta e$ 와  $y_r$ 에 대해서 3개의 퍼지변수(Negative, Zero, Positive)를 초기 설정하고, IA를 이용하여 퍼지 제어기의 전건부 및 후건부의 중심치와 폭, 스케일링 계수와 퍼지 규칙을 계산하게 된다. 이 구성요소에 의한 제어성능은 평가함수가 최소화 될 때까지 반복계산 하게 된다. 제안한 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 종래의 설계방식으로 최적 제어<sup>[11]</sup> 및 PID 제어를 이용한 제어 방식<sup>[6]</sup>을 이용하였을 경우에 대하여 시뮬레이션을 통하여 동특성을 비교, 고찰하였다. 여기서 사용된 기존의 PID 제어 방식 및 제안한 퍼지 전 보상 PID의 파라미터 값은 임계 이득과 임계주기를 구하여 파라미터를 선정할 수 있는 Ziegler-Nichols 방법을 이용하였다.

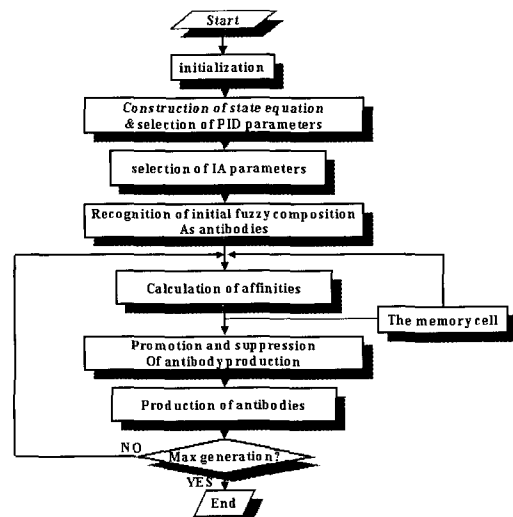


Fig. 4 Flowchart for optimal design of the IA-Fuzzy Precompensated PID controller

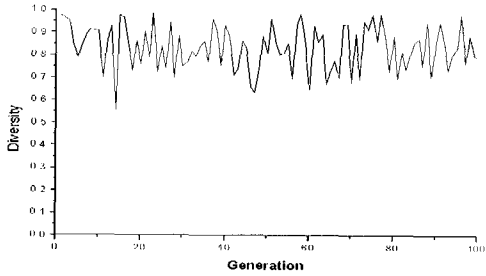


Fig. 5 Diversity of immune algorithm

Table 1 Optimized scaling factors

	GE	GCE	GY <sub>r</sub>
Area 1	0.005053	0.001163	0.030000
Area 2	0.000790	0.000024	0.001308

Table 2 Optimized fuzzy rules

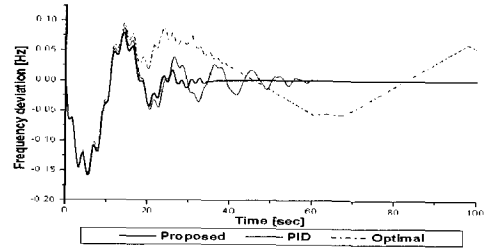
Area 1 (y <sub>r1</sub> )	Δe <sub>1</sub>			Area 2 (y <sub>r2</sub> )	Δe <sub>1</sub>			
	N	Z	P		N	Z	P	
e <sub>1</sub>	N	N	N	e <sub>2</sub>	N	N	N	
	Z	N	Z		Z	N	Z	Z
	P	Z	Z		P	N	Z	P

IA-Fuzzy 전 보상 PID 제어기의 최적 설계를 위한 흐름도는 Fig. 4와 같다.

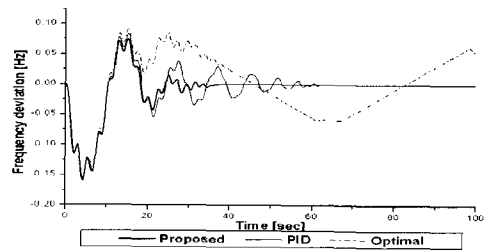
시뮬레이션에 사용된 IA의 파라미터 값은 항체의 수는 40, 세대수는 200, 교차율은 0.8 그리고 돌연변이율은 0.01로 하였다. Fig. 5는 IA의 해의 다양도를 나타내고 있다. 시뮬레이션 결과 IA는 항상 해의 다양성을 유지하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 제안한 IA는 기억 학습 기구와 다양성이 있는 항체를 유지함에 의해 조기 수렴 문제를 피하고 고속으로 해를 구할 수 있었다. Table 1과 Table 2는 최적화 되어진 스케일링 계수와 퍼지 규칙을 나타내고 있다.

5. 1 사례연구 1

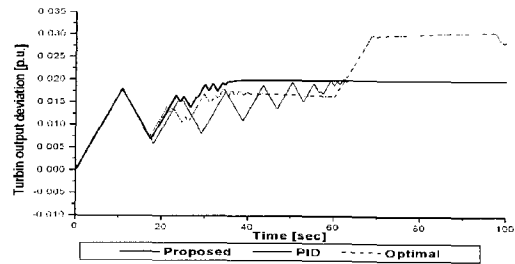
첫 번째의 사례연구 조건으로는 제어기의 강인성을 검증하기 위하여 GRC를 고려하였을 경우, 1 지역에 비교적 큰 부하외란 ΔP<sub>d1</sub> = 0.02[p.u.]의 부하외란이 지속적으로 인가되는 것으로 하였다. 종래의 제어기법으로는 PID 제어와 최적 제어기법을 비교하였다. Fig. 6의 (a)는 1지역 주파수 편차의 동특성을 나타내고, (b)는 2지역 주파수 편차의



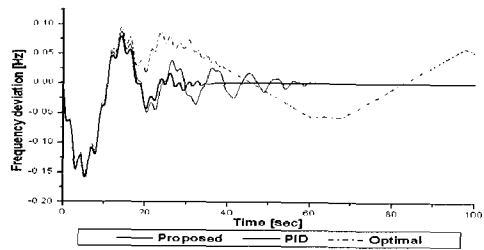
(a) Δf<sub>1</sub>



(b) Δf<sub>2</sub>

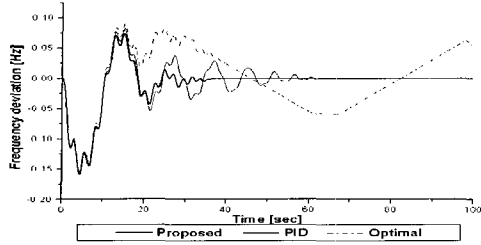


(c) ΔP<sub>1</sub>



(d) ΔP<sub>2</sub>

동특성, (c)는 1지역 터빈 출력 편차량, (d)는 2지역 터빈 출력 편차량이다. 그리고 (e)는 1·2지역 연계선 조류 편차량의 동특성을 나타내고 있다. 정정 시간을 비교해보면 제안한 제어기가 약 33[sec]로 종래의 제어기법보다 빠른 수렴 특성 및 양호한 응



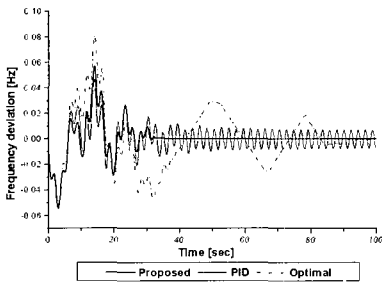
(e)  $\Delta P_{tie12}$

**Fig. 6 Dynamic responses of a power system**  
( $\Delta P_{d1} = 0.02$ [p.u.],  $GRC = 10$ [%])

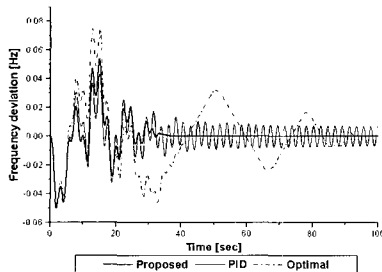
답 특성을 얻을 수 있었다. 역시 터빈 출력편차량 및 연계선 편차량도 이러한 종래의 제어기들보다 우수한 성능을 얻을 수 있었다.

### 5.2 사례연구 2

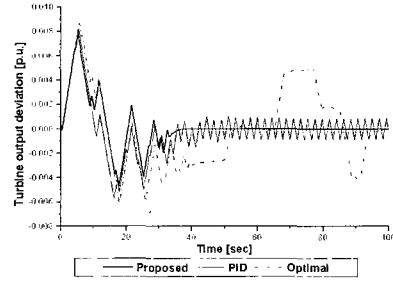
두 번째의 사례연구 조건으로는 1지역에 부하의 란  $\Delta P_{d1} = 0.01$ [p.u.]의 부하의 란이 10[sec]동안 지속적으로 인가 후 갑자기  $\Delta P_{d1} = 0.0$ [p.u.]로 감소되는 것으로 하였다. Fig. 7의 (a)와 (b)는 1지역과 2지역 주파수 동특성이다. 정정 시간을 비교해 보면 역시 제안한 제어기가 종래의 제어기법보다



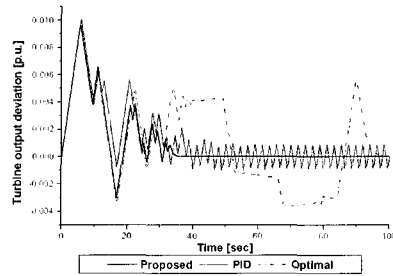
(a)  $\Delta f_1$



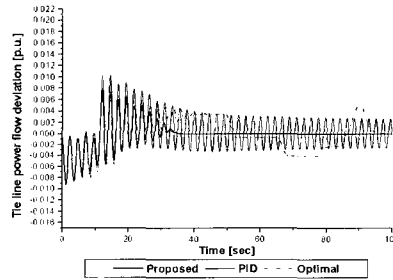
(b)  $\Delta f_2$



(c)  $\Delta P_{t1}$



(d)  $\Delta P_{t2}$



(e)  $\Delta P_{tie12}$

**Fig. 7 Dynamic responses of a power system**

빠른 수렴 특성 및 양호한 응답 특성을 얻을 수 있었으며, 터빈 출력 편차량 및 연계선 편차량도 종래의 제어기법에 비해 우수한 성능을 가졌음을 알 수 있다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 2지역으로 연계된 전력계통의 주파수 및 연계선 조류 편차량을 허용치 이내로 수렴시키기 위해 IA를 이용한 최적의 퍼지 전 보상 PID 제어기를 설계하였다. 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 종래의 제어기와 비교, 고찰하였다. 주요한 결과는 다음과 같다.



첫째, 퍼지 제어기의 설계시 최적화에 강인한 IA를 이용하였으며, 종래의 퍼지 전 보상 PID 제어기의 구성요소(스케일링 계수, 멤버십 함수, 퍼지 규칙) 선정시 사용되었던 시행착오법이나 부분적인 최적화와는 달리 자동으로 모든 퍼지 제어기의 구성요소를 최적화 시켰다.

둘째, PID 제어기의 자동 동조를 위해 기준점 변경방식을 이용하였으며, 이 방식은 현재 전력계통에 사용중인 PID 제어시스템에 매우 간단히 설치될 수 있는 제어구조를 가지고 있음을 보였다.

셋째, IA를 이용하여 국부적인 최적해가 많이 존재하는 다변수 최적화 문제를 쉽게 해결할 수 있었고, 기억 학습기구와 다양성이 있는 항체를 유지함으로써 인하여 고속으로 해를 구할 수 있었다.

넷째, GRC를 고려하였을 경우의 사례연구들을 통하여 제안한 제어기법이 종래의 제어 방식들보다 주파수 및 연계선 조류 편차의 정정 시간을 현저히 감소시킬 수 있음을 보였다.

## 후 기

이 논문은 2001학년도 동아대학교 학술연구조성비(공모과제)에 의하여 연구되었음.

## 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] T. Hiyama, "Decentralized Load Frequency Control Considering Generation Rate Constraint", IEE Japan Vol. 102B, No 7, pp. 63-69, 1982.
- [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] 정형환, 주석민, 정동일, 김상효, "새로운 FPID 제어를 이용한 2지역 계통의 부하주파수 제어", 대한전기학회논문지, 제 47권 5호, pp. 541-548, 1998.
- [6] 정형환, 정문규, 유재엽, "퍼지 전 보상 PID 제어를 이용한 전력계통의 부하주파수 제어에 관한 연구", 東亞大學校 生産技術研究所論文集, 제 4권 1호, pp. 241-248, 1999.
- [7] H. H. Chung, J. T. Lee, S. M. Joo, D. I. Chung, S. H. Kim, M. K. Chung, "Application of Fuzzy PID Controller for Stabilization of Power System" IEEE International Fuzzy Systems Conference Proceedings, pp. 1729-1733, 1999.
- [8] H. Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc, pp. 527-585, 1999.
- [9] 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.
- [10] 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.
- [11] 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.
- [12] 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.
- [13] 김상효, "뉴로-퍼지제어기를 이용한 다지역 전력시스템의 부하주파수제어에 관한 연구", 동아대학교, 박사학위논문, (1998)
- [14] 정형환, 왕용필, 이정필, 정문규, "유전 알고리즘을 이용한 전력 계통의 부하주파수제어를 위한 퍼지 전 보상 PID 제어기 설계", 대한 전기학회지, Vol.49A, No.2, PP.62~69, 2000.
- [15] 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.
- [16] T. Brehm and K. S. Rattan, "Hybrid Fuzzy Logic PID Controller", 3th IEEE international conference on fuzzy systems, Vol. 3, pp. 1682-

1687, 1994.

- [17] 정형환, 이정필, 정문규, 이광우, "면역 알고리즘을 이용한 전력 계통 안정화 장치의 최적 파라미터 선정", 대한 전기학회, 제 49권 9호, pp. 433~455, 2000.
- [18] 정형환, 김창현, 이정필, 정문규, "전력시스템의 부하주파수 제어를 위한 IA-PID 제어기 특성에 관한 연구", 동아대학교, 정보기술연구소, 2001.
- [19] D. Dasgupta, "Artificial Immune Systems and Their Applications", Springer, pp. 210-220. 1998.
- [20] K. Mori, M. Tsukiyama and T. Fukuda, "Multi-Optimization by Immune Algorithm whith Diversity and Learning", 2nd Int. Conf. on Multi-Agent Systems, Workshop Notes on Immunity-Based Systems, pp. 118-123, 1996.

## 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, 당학회 회원



### 이정필(李丁必)

1971년 8월 19일 생. 1997년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 당학회 회원



### 정문규(鄭文圭)

1971년 11월 16일 생. 1998년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정 재학 중. 당학회 회원



### 김창현(金昌現)

1973년 11월 8일 생. 2000년 동아대 공대 전기공학과 졸업. 2002년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 한국전기연구원 근무. 당학회 회원