

IA-PID 제어를 이용한 전력시스템의 부하주파수 제어 특성에 관한 연구

김창현* · 이정필* · 정문규* · 정형환*
*동아대학교 전기공학과

A study on load frequency control characteristics of power systems using IA-PID controller

C. H. Kim* · J. P. Lee* · M. K. Mun* · H. H. Chung*
*Dept. of Electrical Eng., Dong-A Univ.

Abstract - In this paper, the robust PID controller using immune algorithm(IA) for load frequency control(LFC) is designed. In proposed method, objective function is represented as antigens. An affinity calculation is embedded within the algorithm for determining the promotion or suppression of antibody. 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

연계된 전력 시스템의 상시 변동 조류가 대단히 크게 되거나 조류의 동요가 심하게 되면, 전력 시스템 전체의 안정도를 위협하게 된다. 따라서, 종래의 자동 주파수 제어(Automatic Frequency Control : AFC)와는 달리 부하주파수 제어(Load Frequency Control : LFC)는 연계 계통의 조류 편차 및 부하주파수 편차를 규정치 이하로 억제하는 것이 요청되어 지고 있다[1-5].

현재 산업 공정에 사용되고 있는 제어기중 PID (Proportional, Integral and Derivative) 제어기는 간단한 구조를 갖고 있음에도 불구하고 상대적으로 좋은 제어 성능을 제공하는 것으로 알려져 있다. 그러나, 이와 같은 보편적이고 광범위한 활용에도 불구하고, PID 제어기의 성능은 제어 대상 혹은 이를 둘러싼 주위 환경 변화에 기인한 매개변수의 변화에 대하여, 제어기의 파라미터가 재조정되어야 하고, 이의 조정은 대부분 많은 시간과 경비가 소요되는 전문가의 수작업에 의하여 시행착오적으로 이루어지고 있는 현실이다. 따라서, PID 제어기의 파라미터 자동 동조의 필요성이 절실히 요청되고 있으며, 이에 대한 연구가 다양하게 진행되고 있다.

전력계통의 부하주파수 제어에는 비선형성이 강하고 발전량 증가율 제한(Generation Rate Constraints : GRC)등으로 인해 계통의 해석 및 제어기 설계가 매우 어려운 실정이다. 이러한 문제의 해결책으로 자연의 진화과정을 모의한 유전알고리즘(Genetic Algorithm : GA)이 제어 동작을 결정하기 위해 적용되고 있으며, 보다 개선된 성능의 알고리즘이 계속 연구되고 있다[6].

본 연구에서는 GA에서 발생할 수 있는 조기 수렴 문제와 수렴 속도의 향상을 위하여 인간의 면역체계를 모의한 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)을 이용하여 PID 제어기의 최적 설계 방법을 제시하였다 [7-9]. 제안한 IA를 이용한 LFC의 PID 제어기 최적 파라미터 동조는 다른 정보들의 필요 없이 최적화의 목적함수만을 필요로 하기 때문에 제안한 알고리즘을 복잡, 대형화 된 계통에 직접적으로 쉽게 확장, 적용가능할 수 있을 것으로 본다.

본 논문에서는 전력계통의 주파수 및 연계선 조류 편차량을 허용치 이내로 수렴시키기 위해 IA를 이용한 PID 제어기 설계 방법을 제시하였다. 제안한 방법의 유

용성을 입증하기 위하여 발전량 증가율 제한이 포함된 부하주파수 제어에 적용하여 다양한 외란이 발생한 경우에 대하여 동특성을 고찰하였다. 제안한 IA를 이용한 LFC계의 PID 제어기 설계가 기존의 설계방식보다 제어 성능이 우수하며 견실한 제어기임을 보이고자한다.

2. 부하주파수 제어 모델 계통 방정식

다수의 제어 지역이 상호 연계된 전력 계통의 효율적인 주파수 제어 대책을 검토하기 위하여 2제어 지역의 모델 계통을 사용한다.

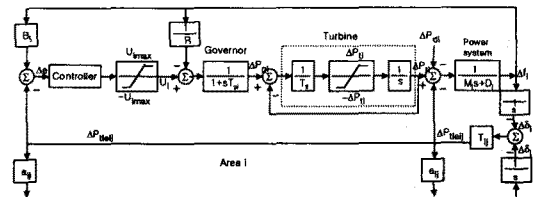


Fig. 1 Block diagram of multiarea power system with GRC

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

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

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

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

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

여기서, Δf_i 는 i지역의 주파수 편차, ΔP_{gi} 는 i지역의 터빈 출력 편차, ΔP_{ci} 는 i지역의 조속기 출력 편차, ΔP_{tieij} 는 ij지역의 연계선 조류 편차, ΔP_{ci} 는 i 지역의 속도 변환 장치 위치 증가분을 나타낸다.

3. PID 제어

일반적인 PID 제어기의 전달 함수 $G_C(s)$ 는 식 (5)와 같다.

$$G_C(s) = K_P (1 + \frac{1}{T_I s} + T_D s) \\ = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (5)$$

여기서, T_I 는 적분 시간 상수, T_D 미분 시간 상수를 나타내고, K_P , K_I 및 K_D 는 각각 비례, 적분 및 미분 파라미터를 나타낸다.

4. 면역 알고리즘(Immune Algorithm : IA)

4.1 면역 시스템(Immune system)

생체는 생체 내에 침입한 박테리아, 바이러스, 병원균을 막기 위한 면역시스템을 가지고 있다. 이 시스템은 항원에 대응하기 위하여 세포 유전자를 재구성하여 항원에 대응하는 항체를 생산하고, 항원을 배제하는 복잡한 기구이다. 이러한 방어 기능을 효율적으로 수행하기 위하여 면역시스템은 자기 자신의 세포와 외부의 세포를 구별하기 위한 패턴 인식작업을 수행해야만 한다.

면역시스템은 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.

4.2 다양도(diversity)

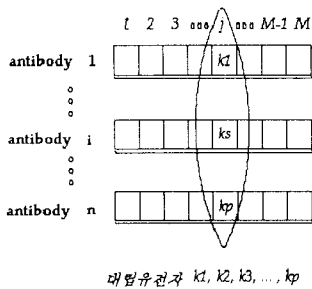


Fig. 2 The data structure of antibodies

면역시스템에서 다양한 항체의 생성은 매우 방대한 양의 항원에 대응하기 위해 매우 중요하다. 다양한 항체의 생성기구와 자기 조절 기구에 의해 다양한 항체를 생성하는 것은 해의 탐색공간에서 최적해를 탐색하는데 있어 필수적인 것이다. 면역 알고리즘에 있어서 항원은 어떤 목적함수를 나타내며, 항체는 적당한 해를 의미한다. Fig. 2는 유전자의 데이터 구조를 나타내고 있다. 그림에서 항체 집단은 M개의 유전자를 가지는 N개의 항체들로 구성되어 있음을 나타내고 있다. 그리고, k_1 , k_s , k_p 와 같이 표현된 것은 j 번째 유전자의 대립유전자들을 나타낸다. 정보 이론으로부터 면역 시스템에서의 j 번째 유전자의 정보 엔트로피(entropy)는 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_j(N) = \sum_{i=1}^N p_{ij} \cdot \log\left(\frac{1}{p_{ij}}\right) \quad (6)$$

여기서, P_{ij} 는 i 번째의 대립유전자가 j 번째 유전자 좌에 나타날 확률을 의미한다.

만일 j 번째 유전자의 모든 대립유전자들이 동일하다면 그 유전자의 엔트로피는 0이 된다. 그리고 다양성의 평균정보 엔트로피는 식 (7)와 같이 계산될 수 있으며, 이러한 식으로부터 면역시스템의 다양도를 평가할 수 있다. 여기서 다양도라는 것은 면역시스템에 있어서 항체들이 얼마나 다양하게 존재하는지의 측도가 된다.

$$E(N) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_j(N) \quad (7)$$

4.3 친화도(affinity)

면역시스템에서는 항체와 항원 또는 항체와 항체가 서로 결합하고 반응함에 따라 항체의 생성을 스스로 조절하며 다양한 항체를 생성하는데, 이들의 결합력은 친화도에 의해 추측이 가능하며 친화성은 항체의 유사성의

척도가 된다. 이러한 친화도의 계산을 통하여 다양성의 계산이 가능하다. 여기서는 두 가지의 친화도 계산이 수행된다. 하나는 항체와 항원사이의 관계를 나타내기 위한 것으로서 항체들 상호간의 다양성이 평가될 수 있다. 항체 v와 항체 w 사이의 친화도는 식 (8)과 같이 정의된다.

$$ay_{v,w} = \frac{1}{(1 + E(2))} \quad (8)$$

여기서, $E(2)$ 는 항체 i와 항체 j 만의 정보 엔트로피이다. 이 친화도의 값은 0에서 1의 값을 가지며 $E(2)$ 의 값이 0이 되면 항체 i와 항체 j의 유전자가 완전히 일치함을 나타낸다.

항원과 항체 v와의 친화도는 식 (9)와 같이 나타낼 수 있다.

$$ax_v = opt_v \quad (9)$$

여기서, opt_v 는 항체의 평가치로서 항원과 항체 v와의 결합 강도를 나타내며, ax_v 는 친화도로서 GA에서의 적합도에 상응한다. 본 논문에서와 같이 평가치의 최소값 탐색 문제의 경우에는 식 (9)는 식 (10)과 같이 된다.

$$ax_v = \frac{1}{(1 + opt_v)} \quad (10)$$

4.4 면역 알고리즘

본 절에서는 소매틱 이론(somatic theory)과 네트워크 가설(network hypothesis)을 기초로 한 면역시스템의 항체생성 세포와 자기 조절 기구를 실현하는 IA 수행방법에 대해서 설명한다. 이 알고리즘을 최적화 문제의 해 탐색 알고리즘과 대응시켜 보면 항원은 최적화 문제의 제약 조건과 목적 함수이며, 항체가 최적화 문제의 해가 되며 항원과 항체의 친화도가 해의 적합도 값에 해당된다.

IA의 각 각의 계산 단계는 다음과 같다.

STEP 1) 항원의 인식 : 목적함수와 제약 조건등을 항원으로 하고 이를 입력 데이터로 한다. 이는 최적화 문제를 정의하는 단계이다.

STEP 2) 초기 항체집단의 생성 : 최초의 과정에서 유효한 항체를 무작위로 발생시켜 이들 중 우수한 항체들을 기억세포로 저장한다. 본 논문에서는 PID 제어기의 파라미터들이 항체로 표현된다.

STEP 3) 친화도 계산 : 항원과 항체v의 친화도 ax_v 와 항체 v와 항체 w의 친화도 $ay_{v,w}$ 를 계산한다. 이는 다음 단계에서 행하는 기억 세포로의 분화를 위한 척도가 되는 것으로 식 (8)을 이용한다.

STEP 4) 기억 세포로의 분화 : STEP 3)에서 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 촉진과 억제 : 차세대에 남는 항체 i의 기대치 e_i 를 식 (11)에 의해 계산하고, 기대치가 낮은 항체를 소멸시킨다.

$$e_i = \frac{ax_i}{c_i} \quad (11)$$

여기서, c_i 는 항체의 농도로서 식 (12)와 같이 구해진다.

$$c_i = \frac{\text{항체 } i\text{와 같은 친화도를 가진 항체의 수}}{\text{항체의 총수 } N} \quad (12)$$

식 (12)에 의하면 항원과 항체의 친화도가 높은 항체

일수록 차세대에 남은 확률이 높고, 농도가 높은 항체일수록 차세대에 남은 확률이 낮다는 것을 알 수 있다. 따라서, 면역 체계는 친화도가 높은 항체의 생산을 촉진하며 면역 시스템 전체에 차지하는 배합이 높은 항체의 생성을 억제하는 면역 시스템에 있어서 다양성의 조절기구에 작용한다.

STEP 6) 항체의 생성 : STEP 5)에서 소멸된 항체에 대신하는 새로운 항체를 무작위로 생성한다. 다음에 STEP 5)에 남아있는 항체와 새로이 생성된 항체에 대하여 무작위로 쌍을 선택, 이들에 교차 조작을 실시, 차세대에 남은 항체를 증식한다. 게다가 증식된 항체에 대하여 미리 설정된 돌연변이 확률, 돌연변이 조작법에 의해 유전자를 변화시키고 STEP 3)으로 돌아간다. 이 순서에 의해 무한의 항원에 대응하는 항체를 생성할 수 있다. 단, 교차, 돌연변이 조작법 및 그 확률은 임의로 설정한다.

5. 면역 알고리즘을 이용한 PID 제어기 설계

본 논문에서는 전력계통의 부하주파수 제어를 위하여 PID 제어기의 파라미터를 최적화하는 IA를 이용한 IA-PID 제어기 설계를 한다. Fig. 3은 IA-PID 제어기를 가지는 전력 시스템의 블록선도를 나타낸다.

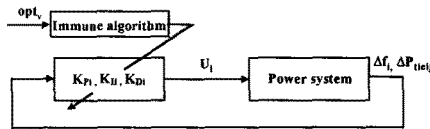


Fig. 3 Block diagram of power system with PID controller using IA

최적화 하고자 하는 PID 파라미터는 K_P , K_I , K_D 이며, 이러한 i 지역의 3개의 파라미터를 동시에 최적화 하기 위해 사용된 목적함수로는 각 지역 주파수 편차와 연계선 조류편차를 최소화하도록 식 (13)와 같이 선정하였다.

$$opt_v = (\alpha \Delta f_i * t + \beta \Delta f_i * t + \gamma \Delta P_{tiei} * t) \quad (13)$$

여기서 α , β , γ 는 가중치이다. IA를 이용하기 위해서 각각의 PID 파라미터는 항체가 되며, 각각의 파라미터는 문자열로써 Fig. 4와 같이 코드화 되고 초기의 항체 집단들이 무작위로 선택되어진다.

Antibody 1	K_{P1}	K_{I1}	K_{D1}
Antibody 2	K_{P2}	K_{I2}	K_{D2}
...
Antibody N	K_{PN}	K_{IN}	K_{DN}

Fig. 4 Structure of antibody

그리고, 3.2절에서 제시된 알고리즘을 통하여 파라미터는 식 (10)을 최소화시키는 값들이 선택되어지는데 이것은 식 (9)에서 항체와 항원의 친화도가 커짐을 의미하며, 따라서 친화도가 가장 높은 파라미터 항체가 본 연구에서의 최적해가 된다.

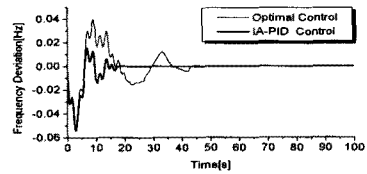
6. 시뮬레이션 결과 및 고찰

본 논문에서는 제어기의 강인성을 검증하기 위하여 발전량 증가를 제한을 고려한 2지역 전력 시스템 부하주파수 제어를 위한 IA를 이용한 PID 제어기를 설계하였고, 최적제어의 경우와 비교·고찰하였다[1]. 설계된 제어기는 각각의 지역에 적용되고, 각 발전기의 제어 입력은 조속기에 적용되며, 이 입력을 조절함으로써 인하여 주파수를 조절하도록 하고 있다. 제어기의 강인성을 검증하기 위하여 부하가 다양하게 변동될 경우의 각 사례

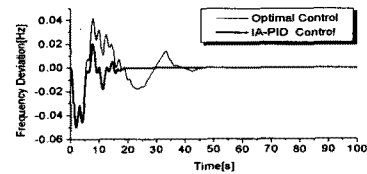
연구별로 제어성능을 고찰하였다.

6.1 1지역에 부하외란 $\Delta P_{d1} = 0.01[p.u.]$ 가 지속적으로 발생하였을 경우

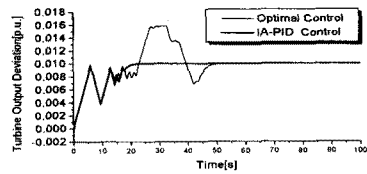
Fig 5는 1지역에 부하외란이 지속적으로 발생한 경우 시스템의 동특성을 나타내고 있다. (a), (b)는 1,2지역 주파수 응답, (c)는 연계선 조류 편차, (d), (e)는 1,2지역 터빈 출력 편차를 나타내고 있다. Fig. 5 (a)에서 최적제어의 정정시간은 약 45[sec]에 수렴하고 제안한 제어기는 약 20[sec]로 제안한 IA-PID 제어기가 약 25[sec]정도 더 빠르게 정상상태에 도달하였다. 그리고 최대편차량과 오버슈터가 현저히 감소됨을 볼 수 있었다. 역시 연계선 편차 및 터빈 출력 편차에서도 제안한 제어기법이 최적제어보다 최대편차량 및 정정시간도 현저히 감소하였다.



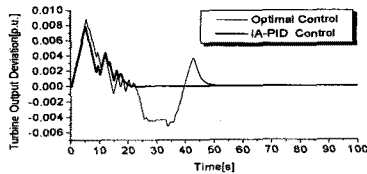
(a) Δf_1



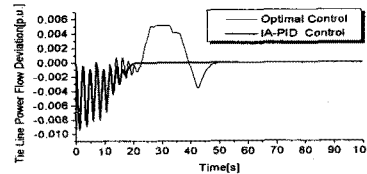
(b) Δf_2



(c) ΔP_{d1}



(d) ΔP_{e1}

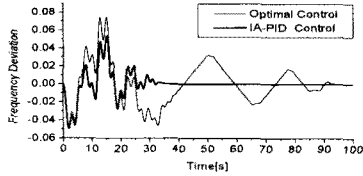


(e) ΔP_{tie2}

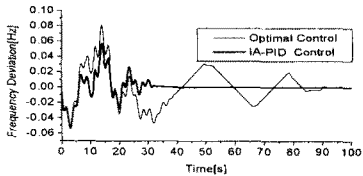
Fig. 5 Dynamic responses of power system ($\Delta P_{d1} = 0.01[p.u.]$, GRC 10(%/min))

6.2 2지역에 부하외란 $\Delta P_{d2} = 0.01[p.u.]$ 가 10(sec)동안 발생하였을 경우

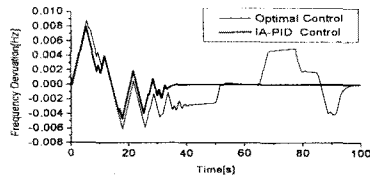
Fig. 6은 2지역에 10(sec)동안 부하외란 $\Delta P_{d2} = 0.01[p.u.]$ 가 인가된 후 제거하였을 경우 모델 계통의 동특성을 나타내었다. 제안한 제어기법이 종래의 최적제어보다 1.2지역의 주파수 편차, 연계선 조류 편차 및 1.2지역 터빈 출력 편차량이 현저히 경감시킬 수 있었고, 정정시간 또한 줄어들었다.



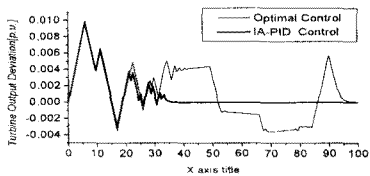
(a) Δf_1



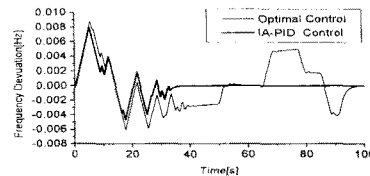
(b) Δf_2



(c) ΔP_{d1}



(c) ΔP_{d2}



(c) ΔP_{iel2}

Fig. 6 Dynamic responses of power system ($\Delta P_{d2} = 0.01[p.u.]$ during 10(sec), GRC 10(%/min))

7. 결 론

본 논문에서는 2지역으로 연계된 전력계통의 주파수 및 연계선 조류 편차를 허용치 이내로 수렴시키기 위해 IA를 이용한 PID 제어기를 설계하였다. 제안한 제어기의 유용성을 입증하기 위하여 발전량 증가를 제한을 고려하여 제어기의 성능을 고찰하였다. 본 논문의 주요 연구 결과를 요약하면 다음과 같다.

첫째, IA를 이용하여 국부적인 최적해가 많이 존재하는 다변수 최적화 문제를 쉽게 해결할 수 있었다.

둘째, IA는 기억 학습 기구와 다양성이 있는 항체를 유지함으로 인하여 초기 수렴문제를 해결가능하고 고속으로 해를 구할 수 있었다.

셋째, 2가지 경우의 사례연구를 통하여 부하외란이 지속적 그리고 초기 10(sec)동안 발생하였을 경우 제안한 IA-PID 제어기가 종래의 최적제어보다 주파수 최대 편차, 연계선 조류 편차와 터빈 출력 편차를 현저히 경감시킬 수 있었고, 정정시간 또한 현저히 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] Y. Wang, R. Zhou, C. Wen, "Robust load frequency controller design for power systems", IEE Proceedings Vol. 140, No. 1, January 1993.
- [4] H. Saadat, "Power System Analysis", McGraw-Hill, Inc, pp. 527-585, 1999.
- [5] G. S. Christensen, M. E. El-Hawary and S. A. Soliman, "Optimal control applications in electric power systems", Plenum press, 1987.
- [6] D. E. Goldberg, "Genetic Algorithms in Search, Optimization, and Machine Learning", Addison-Wesley Publishing Co. Inc., 1989.
- [7] K. Mori, M. Tsukiyama, and T. Fukuda, "Immune algorithm with searching diversity and its application to resource allocation problem", T. IEE Japan, Vol. 113-C, No. 10, 1993
- [8] D. Dasgupta, "Artificial immune systems and their applications", Springer-Verlag, 1999
- [9] 정형환, 이정필, 정문규, 이광우, "면역 알고리즘을 이용한 전력계통 안정화 장치의 최적 파라미터 선정", 대한전기학회 논문지, Vol. 49A, pp. 433-445, 9, 2000.