

교류-직류시스템의 안정화를 위한 면역알고리즘을 이용한 최적 PID제어기 설계

· 정 현 화*, 허 동 렬*, 이 정 필*, 정 형 환*

Design of PID Controller using Immune Algorithm for AC-DC Power System

Hyun-Hwa Chung, Dong-Ryol Hur, Jeong-Phil Lee, Hyeng-Hwan Chung

* 동아대학교 전기공학과

Abstract : In this paper, a method for optimal design of PID controller using the immune algorithm(IA) has been proposed to improve the stability of A.C.-D.C. power system. The process of this study is composed of formulation of basic controls on HVDC transmission system, mathematical model preparation for stability analysis, and supplementary signal control by an optimal PID controller using the IA. The dynamic property was verified through computer simulations regarding transient stability.

Key words: Immune algorithm(면역알고리즘), HVDC(초고압직류송전), PID(비례-적분-미분)

1. 서론

급격한 경제성장과 더불어 전력수요가 크게 증대하면서 전력 시스템은 거대화되고 복잡해지고 있다. 이로 인하여 전력 시스템은 점차 연계된 시스템으로 변화하고 있으나 안정도는 오히려 저하하기 때문에 안정적인 전력공급을 위해서 지속적인 대책이 요구되고 있다. 또한 교류송전에서는 무효전력의 발생, 선로에 의한 전력손실 및 전력 제어의 어려운 점등이 단점으로 대두되고 있다. 초고압직류송전(HVDC : High Voltage Direct Current)은 전력 전송을 능동적으로 지속적으로 제어할 수 있고, 교류선로의 단락용량 증대를 억제할 수 있어 교류송전의 한 대안으로 대두되고 있다. 이러한 특성 때문에 우리 나라에서는 제주와 해남을 연결하는 초고압 직류송전 선로가 건설되어 운전 중에 있다. 또한 통일된 후 남·북한간의 전력연계가 실현될 경우, 북한의 전력시스템이 취약하여 안정도 문제가 야기될 수 있으므로, 초고압 직류송전은 남·북한간의 전력시스템 연계에 가장 적절한 수단이 될 것으로 기대된다.

교류-직류 연계 시스템의 안정도를 향상시키기

위한 노력의 일환으로 선형 최적 제어 이론 및 PID(Proportional-Integral-Derivative)제어기 적용하고자 하는 연구가 진행되어 왔다. 특히 PID 제어기는 그 구조가 간단하며 우수한 제어성능을 나타내므로 현대 산업 공정 제어에 많이 사용되고 있다. 그러나 PID제어기의 성능은 제어대상 및 제어기의 매개변수 변화에 대하여 제어기의 파라미터가 재조정되어야 하는 단점이 있다. 즉 이러한 방법들은 시스템 매개변수를 정확히 알아야 하며, 만일 동작 중에 시스템 매개 변수들이 변하면 PID 제어기 파라미터들을 다시 조정해 주어야 하며 또한 제어 루프가 많은 산업 시스템의 경우 각 루프 별로 PID 제어기 계수들을 조정해 주어야 하는 어려움이 있다. 이러한 문제점들을 해결하기 위하여 자연의 진화과정을 모의한 유전 알고리즘(Genetic Algorithm : GA)이 최적 설계 문제에 적용되고 있으며, 여러 연구결과로부터 최적화 문제의 적용가능성이 입증되었고 보다 개선된 성능의 알고리즘이 계속 연구되고 있다.

본 논문에서는 GA에서 발생 할 수 있는 조기 수렴문제와 수렴속도의 향상을 위하여 인간의 면역 체계를 모의한 면역 알고리즘(Immune

Algorithm : IA)을 이용한 교류-직류 시스템의 최적 PID제어기의 파라미터 선정을 위한 새로운 접근 방법을 제시하였다. 제안한 IA의 장점은 시스템에 대한 다른 정보들이 필요 없으며 최적화의 목적함수만을 필요로 하기 때문에 비 선형성을 많이 포함하는 제어계의 설계에 매우 유용하며, 기억 학습 기구와 다양성이 있는 항체를 유지함으로 인하여 GA에서 발생할 수 있는 조기 수렴 문제를 해결 가능하고 고속으로 해를 구할 수 있다는 것이다.

본 논문에서는 AC-DC 시스템 동특성을 향상시키기 위해 IA를 이용하여 PID파라미터를 선정하는 방법을 제시하였고, 제안한 방법의 유용성을 입증하기 위하여 다양한 외란이 발생한 경우에 대한 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 기본제어기와 동특성을 비교·고찰하였으며 제안한 제어기의 강인성을 입증하였다

2. 교류-직류 시스템의 수학적 모델

본 연구에서 고찰하고자 하는 대표적인 초고압 직류송전 시스템 모델은 그림 1과 같으며 이는 직류 시스템의 제어기 성능평가에 널리 사용되는 시스템이다. 또한 교류 시스템은 IEEE Type I 여자기 및 조속기를 사용하였고 직류시스템은 전력을 양방향으로 전송할 수 있는 초고압 직류 시스템을 사용하였다.

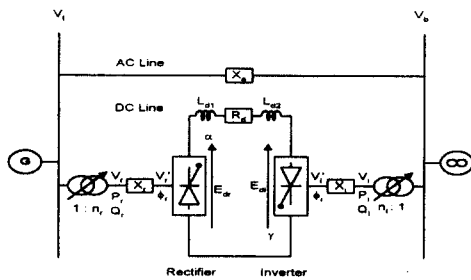


Fig. 1 Simplified single machine infinite bus A.C.-D.C. power system

2.1 교류 시스템

그림 1에서 발전기 회전자 운동 방정식은 식 (1), (2)와 같고 IEEE type I 여자기 및 조속기에 대한 동특성 방정식은 식 (3)-(9)와 같다.

$$\dot{\omega} = \frac{1}{M}(P_m - D_w) - \frac{1}{M} P_e \tag{1}$$

$$\dot{\delta} = 2\pi f_0 \omega \tag{2}$$

$$\dot{E}'_q = -\frac{1}{K_3 T_{do}} E'_q - \frac{K_4}{T_{do}} \delta + \frac{1}{T_{do}} E_{fd} \tag{3}$$

$$\dot{V}_r = \frac{K_5 K_r}{T_r} E'_q + \frac{K_5 K_r}{T_r} \delta - \frac{1}{T_r} V_r \tag{4}$$

$$\dot{V}_{d'} = -\frac{1}{T_f} V_{d'} + \frac{K_f}{T_f T_e} V_a - \frac{K(S_e + K_e)}{T_f T_e} E_{fd} \tag{5}$$

$$\dot{V}_a = \frac{K_a}{T_a} V_r - \frac{K_a}{T_a} V_{d'} - \frac{1}{T_a} V_a \tag{6}$$

$$\dot{E}_{fd} = \frac{1}{T_e} V_a - \frac{S_e + K_e}{T_e} E_{fd} \tag{7}$$

$$\dot{P}_m = \frac{1}{T_t} P_m + \frac{1}{T_t} X_{gv} \tag{8}$$

$$\dot{X}_{gv} = -\frac{1}{RT_{gv}} \omega - \frac{1}{T_{gv}} X_{gv} + \frac{1}{T_{gv}} P_d \tag{9}$$

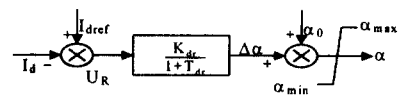
2.2 직류 시스템

변환기용 변압기의 저항, 변환기의 양극 전압강하 및 내부 등가저항은 무시하고, 그림 1을 기초로 한 변환기의 교류전류 \$I\$와 직류전류 \$I_d\$는 식(10), (11)와 같이 된다.

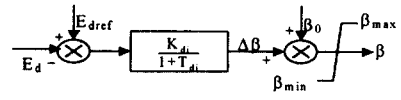
$$I \cong \sqrt{6} I_d / \pi \tag{10}$$

$$I_d = \frac{3\sqrt{2}(V_r \cos \alpha - V_i \cos \gamma)}{\pi R_d + 3(X_r - X_i)} \tag{11}$$

여기서 \$X_r\$, \$X_i\$는 전류 리액턴스(commutation reactance), \$R_d\$는 직류선로 저항, \$\gamma\$는 여유각, \$V_r\$, \$V_i\$는 변환기의 교류측 전압이다.



(a) ACR in Rectifier



(b) AVR in Inverter

Fig.2 Block diagram

본 연구에서 고찰한 순 변환기와 역 변환기의 운전 제어 방식은 정전류-정전압 제어방식으로써 이러한 제어방식의 블록선도는 그림 2와 같다. 그리고 직류선로에서의 평할 코일 L_d 를 가지는 전압방정식은 식 (12)와 같고, 그림 2의 블록선로부터 각 제어방식의 동특성은 식 (13)-(16)과 같다.

$$\frac{dI_d}{dt} = \frac{1}{L_d} (E_{dr} - E_{di} - R_d I_d) \quad (12)$$

$$E_{dr} = (3\sqrt{2}/\pi) V_r \cos \alpha - (3/\pi) X_r I_d \quad (13)$$

$$E_{di} = (3\sqrt{2}/\pi) V_i \cos \beta + (3/\pi) X_i I_d \quad (14)$$

$$T_{DC1} \frac{d\alpha}{dt} + \alpha = K_{DC1} (T_{dref} - I_d) \quad (15)$$

$$T_{DC3} \frac{d\beta}{dt} + \beta = K_{DC3} (T_{diref} - E_{di}) \quad (16)$$

3. 면역 알고리즘

3.1 면역 시스템

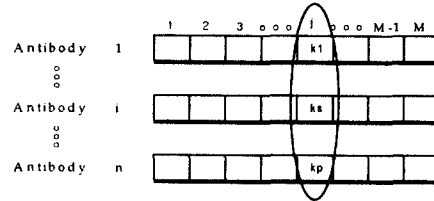
생물학적 측면에서 볼 때 면역 시스템은 외부의 병원체에 대응하여 방어하기 위한 체계를 가진 매우 복잡한 시스템으로서 신체 내부의 모든 세포를 인식하고, 이러한 세포들을 자기(self)와 생체 내부 또는 외부에서 발생된 암세포와 바이러스 등과 같은 비자기(non-self)로 분류하여 자기 세포로 분류되지 않는 세포나 물질을 제거해 나간다. 모든 생물은 이 방어 체계를 이용하여 불확실한 외부 환경에 대해 강건하게 대처하여 환경에 적응한다. 면역 시스템에서의 기본적인 구성 요소는 림프구(lymphocytes)와 항체(antibody)로 이루어진다. 항체는 항원(antigen)을 제거하는 역할을 하지만, 림프구는 클론 증식을 통하여 항체를 생성하는 역할을 하며, 그 구성요소는 크게 B-세포와 T-세포의 두 가지로 분류된다. 여기서 B-세포는 항체를 생성하고, T-세포는 B-세포가 항체를 만들어주는 것을 도와주는 역할을 하며 바이러스에 감염된 세포를 파괴하고 면역 반응의 정도를 조절해 준다.

3.2 다양도(diversity)와 친화도(affinity)

면역계에서 다양한 항체의 생성은 매우 방대한 양의 항원에 대응하기 위해 매우 중요하다. 다양한 항체의 생성기구와 자기 조절 기구에 의해 다

양한 항체를 생성하는 것은 해의 탐색공간에서 최적해를 탐색하는데 있어 필수적인 것이다.

그림 3은 유전자의 데이터 구조를 나타내고 있다. 그림에서 항체 집단은 M개의 유전자를 가지는 N개의 항체들로서 구성되어 있음을 나타내고 있다. 그리고 k_1, k_s, k_p 와 같이 표현된 것은 j번째 유전자의 대립유전자들을 나타낸다. 정보 이론으로부터 면역 시스템에서의 j번째 유전자의 정보 엔트로피(entropy)는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.



k_1, k_s, k_p : 대립유전자

Fig. 3 The data structure of antibody

$$E_j(M) = \sum_{i=1}^N P_{ij} \log \left(\frac{1}{P_{ij}} \right) \quad (17)$$

여기서, P_{ij} 는 i번째의 대립유전자가 j번째 유전자 좌에 나타날 확률을 의미한다. 그리고 다양성의 평균정보 엔트로피는 식 (18)와 같이 계산될 수 있으며, 이러한 식으로부터 면역계의 다양성을 평가할 수가 있다.

$$E(M) = \frac{1}{M} \sum_{j=1}^M E_j(M) \quad (18)$$

또한 면역계에서는 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 목적함수와 해와의 결합정도를 알 수 있다. 다른 하나는 항체와 항체사이의 관련정도를 나타내기 위한 것으로서 항체들 상호간의 다양성이 평가될 수 있다. 항체 v 와 항체 w 사이의 친화도는 식 (19)와 같이 정의된다.

$$ay_{v,w} = \frac{1}{(1+E(2))} \quad (19)$$

여기서, $E(2)$ 는 항체 i 와 항체 j 만의 정보 엔트로피이다. 그리고 항원과 항체 v 와의 친화도는 식 (20)과 같이 나타낼 수 있다.

$$ax_v = opt_v \quad (20)$$

여기서, opt_v 는 항체의 평가치로서 항원과 항체 v 와의 결합 강도를 나타내며, ax_v 는 친화도로서 GA에서의 적합도에 상응한다. 본 논문에서와 같이 평가치의 최소값 탐색 문제의 경우에는 식 (20)은 식 (21)과 같이 된다.

$$ax_v = \frac{1}{(1+opt_v)} \quad (21)$$

3.3 면역 알고리즘

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 특징으로는 다양한 항체의 생성기구와 자기 조절 기구에 의해 다양한 항체를 생성할 수 있고, 항원과의 친화도가 높은 항체를 보다 많이 남기는 항체 생성기구에 의해 유효한 항체를 대량으로 생성하여 그 근방의 병렬 탐색이 가능하게 되며, 최적해를 고속으로 구할 수 있다.

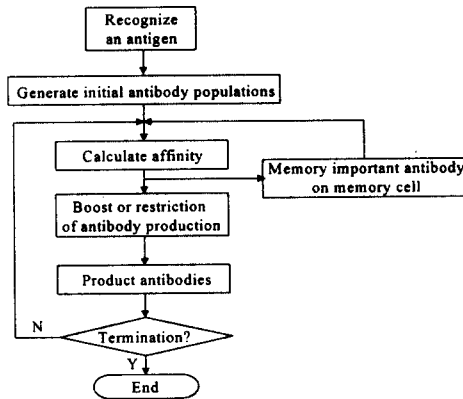


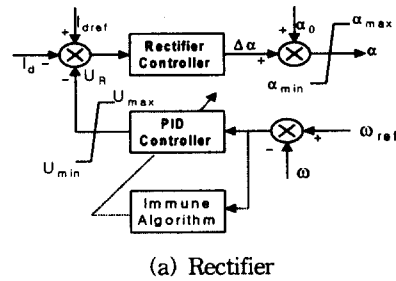
Fig. 4 Flowchart of IA

또한 과거에 배제한 항원에 대응하는 항체를 재빨리 생성하기 때문에 시스템의 초기 상태에 비해 최적해가 고속으로 구해지는 것이 기대된다. 그러므로 GA와 비교하여 IA는 기억학습 기구와 다양성이 있는 항체를 유지함으로 인하여 GA에서의 초기 수렴문제를 해결 가능하고, 고속으로 해를 구할 수 있을 것으로 기대된다. IA의 계산절차는 그림 4와 같이 나타낼 수 있다.

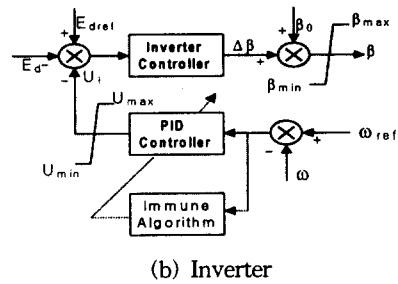
4. IA를 이용한 최적 PID제어기 설계

본 장에서는 PID제어기의 파라미터를 최적화하기 위하여 비선형 최적화 문제에 강인한 IA를 이용한 방법을 제시한다. 여기서 사용한 PID제어기를 전달함수 형태로 나타내면 식 (22)와 같다. 그림 5는 IA를 적용한 PID제어기를 가지는 시스템의 블록선도를 나타내고 있다.

$$PID = K_P + \frac{K_I}{s} + K_D s \quad (22)$$



(a) Rectifier



(b) Inverter

Fig. 5 Optimal PID controller using IA in D.C. control system

최적화 하고자 하는 순·역변환기 PID제어기의 파라미터는 K_{Pr} , K_{Ir} , K_{Dr} , K_{Pi} , K_{Ii} , K_{Di} 가 되며 이러한 6개의 파라미터를 동시에 최적화하기 위해 사용된 목적함수로는 정상상태오차와 오버슈터 및 저주파 진동을 최소화하도록 식 (23)과 같이 선정하였다.

$$opt_i = \int_{t=0}^{t=Te} |t\Delta\omega| + |t\Delta v_i| dt \quad (23)$$

IA를 이용하기 위해서 순·역변환기의 PID제어기 파라미터들은 항체가 되며, 각각의 파라미터들은 문자열로써 그림 6과 같이 코드화 되고 초기의 항체 집단들이 랜덤하게 선택되어 진다. 그리고 3.3절에서 제시한 알고리즘을 통하여 파라미터들은 식 (23)을 최소화시키는 값들이 선택되는데 이것은 식 (22)에서 항체와 항원의 친화도가 커짐을 의미하며, 따라서 친화도가 가장 높은 파라미터 항체가 본 연구에서의 최적 해가 된다. IA에서의 항체와 항원의 친화도는 GA에서의 적합도에 대응된다.

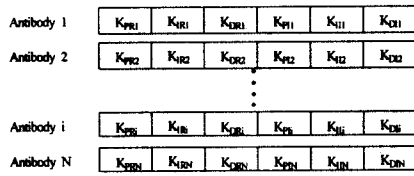


Fig. 6 Structure of Antibody

5. 시뮬레이션 결과 및 고찰

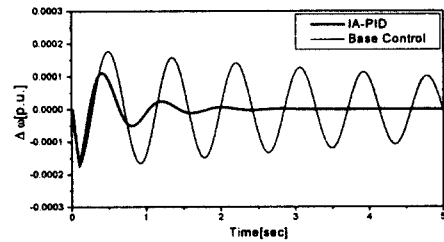
본 연구에서는 교류시스템 방정식과 직류시스템의 순·역 변환기의 기본특성, 동작특성 제어특성에 관한 이론을 정식화하였다. 교류-직류시스템의 안정화를 위하여 직류 제어시스템의 순·역 변환기에 대한 PID제어기를 설계하였으며, PID제어기의 파라미터를 최적화 하기 위하여 IA를 이용하여 설계하였다. 본 연구에서 사용되어진 IA의 파라미터는 표 1과 같다

Table 1 IA parameters

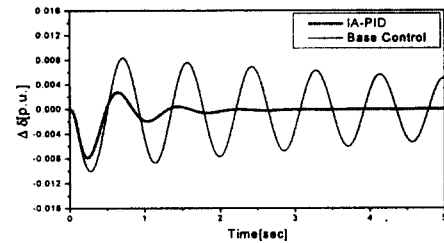
Generations number	Antibody number	Crossover rate	Mutation rate
200	100	0.85	0.01

5.1 사례연구 1 : 전력을 증가시킨 경우

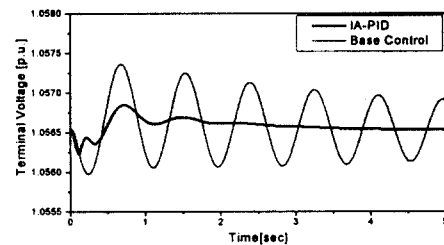
제안한 방법의 성능을 검증하기 위하여 부하가 0.1[sec] 사이에 정격 출력의 3[%] 증가한 경우에 직류 제어 시스템의 순·역변환기에 IA를 이용하여 PID제어기를 설계하고 시뮬레이션을 통해 제어기의 성능을 비교·고찰하였다. 그림 7은 기본 제어시와 IA-PID 제어기 적용시에 있어서 교류시스템의 각속도, 회전자각, 단자전압을 나타내었다. 제안한 IA-PID를 이용한 경우 발전기의 각속도, 회전자각, 단자전압의 초기과도상태에서 우수한 응답을 나타내었고, 정정시간이 우수하게 나타났다. 따라서 직류 제어 시스템의 보조 제어 신호에 IA-PID 제어기 적용이 시스템의 안정도를 향상시키며 안정운전에 크게 기여함을 알 수 있다.



(a) Angular velocity



(b) Rotor angle

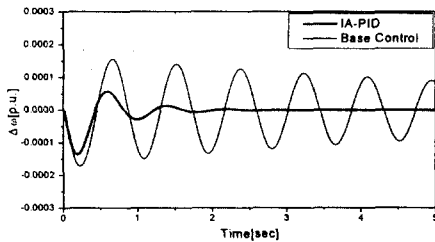


(c) Terminal voltage

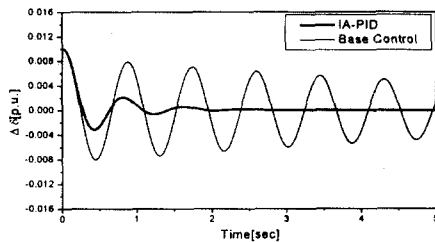
Fig. 7 Dynamic responses to increasing power3%

5.2 사례연구 2 : 회전자 각이 증가한 경우

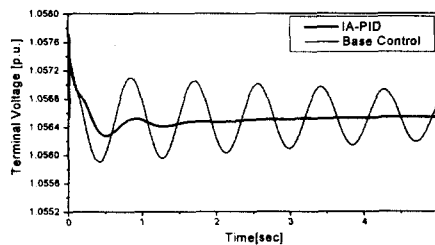
두 번째 사례연구로 초기에 회전자각 편차를 $\Delta\delta=0.01[\text{p.u.}]$ 만큼 증가한 경우에 시뮬레이션을 통하여 동특성을 비교·고찰하였다. 그림 8은 기본제어기와 IA-PID제어기 적용시 각 제어방식에 있어서 교류시스템의 회전자각, 각속도, 단자전압의 동특성을 나타내고 있다. 그림 8에서 나타난 바와 같이 제안한 IA-PID를 이용한 제어 방식이 보다 우수한 동특성을 보이고 있음으로 인해 교류시스템의 안정도를 향상됨을 알 수 있다. 따라서 제안한 IA-PID 제어기는 다양한 외란에 대해서도 매우 강인한 동특성을 나타내었으며 시스템의 안정도 향상에 크게 기여함을 알 수 있다.



(a) Angular velocity



(b) Rotor angle



(c) Terminal voltage

Fig 8 Dynamic responses to rotor angle step change 0.01[p.u.]

6. 결론

본 논문에서는 교류-직류시스템의 안정도를 향상시키기 위해 사용된 PID제어기의 최적 파라미터를 선정하기 위해 IA를 이용하는 방법을 제시하였다. 다양한 외란 발생시 컴퓨터 시뮬레이션에 의한 동특성을 비교·고찰함으로써 IA의 유용성을 입증하였다. 중요한 결과는 다음과 같다.

- ① IA를 이용하여 국부적인 최적해가 많이 존재하는 다변수 최적화 문제를 쉽게 해결할 수 있었다.
- ② IA를 이용한 PID제어기의 파라미터 선정이 매우 효과적임을 알 수 있었다.
- ③ IA는 기억 학습 기구와 다양성이 있는 항체를 유지함으로 인하여 GA에서 발생할 수 있는 조기 수렴 문제를 해결 가능하고 고속으로 해를 구할 수 있었다.
- ④ 제안한 IA를 이용한 PID설계 방법은 다양한 외란 발생시에도 매우 우수한 제어 성능과 강인성을 보였으며, 전력시스템 안정도에 크게 기여함을 알 수 있었다.

참고문헌

- 1) F. Karecik-Maier, "A new closed loop control method for HVDC transmission", IEEE, Vol. 11, No. 4, pp.1995-1960, 1996.
- 2) S. M. Badran, "Design of modulation controllers for AC/DC power systems", IEEE, Vol. 8, No. 4, pp.1490-1496, 1993.
- 3) H. A. Peterson, "An analog computer study of a parallel AC and DC Power System", IEEE, Vol. Pas-85, No. 3, pp.191-209 1966.
- 4) W. Lei, "The immune evolutionary algorithm", IEEE, pp.99-102, 1999.
- 5) S. Endoh, "Immune algorithm for n-TSP" IEEE, pp.3844-3849, 1998.
- 6) 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.
- 7) 정형환, 이정필, 정문규, 이광우, "면역 알고리즘을 이용한 전력계통 안정화 장치의 최적 파라미터 선정" 대한전기학회 논문지 Vol. 49A, No. 9, pp. 433-444.