

# 면역알고리즘을 이용한 전동기 제어용 PID 제어기루프의 외란제거 및 최적화 튜닝

김동화, 조재훈

국립 한밭대학교 제어계측 공학과

## Optimal tuning and Disturbance Rejection on PID controller loop for motor control using Immune Algorithm

Dong Hwa Kim and Jea Hoon Cho

Dept. of Control Instrumentation Engineering, Hanbat National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 PID제어기를 이용해 외란이 존재하는 2차시스템 특성을 갖는 전동기를 제어하는 경우 외란제거와 최적제어가 동시에 될 수 있는 PID파라미터를 면역알고리즘을 통해 구하였다. 외란제거를 위해  $H_{\infty}$ -norm을 응용하여 제어시스템의 외란제거 조건들을 제시하고 이 조건들을 만족하는 전동기 제어용 PID제어기를 설계하였다. 설계된 PID제어기의 최적 파라미터를 구하기 위해 면역알고리즘을 적용하였고 최적 파라미터를 평가하기 위하여 ITSE(Integral of time weighted squared error)성능지수를 이용하여 만족할 만한 결과를 얻었다.

### 1. 서 론

PID(Proportional-Integral-Derivative)제어기는 1940년대 Ziegler-Nichols가 개발한 이래 대부분의 플랜트에서 많이 이용되어 왔다. 최근에 마이크로프로세서 용량이 급격히 증대하고 처리 속도가 빨라짐에 따라 PID제어기의 성능 및 그 특성도 급격히 개선되어 다방면의 생산현장에 사용할 수 있게 되었고, 또한 기본으로 다른 제어기와 조합하여 고도의 제어 계통에도 융통성 있게 사용되고 있다. 그러나 다중 루프를 가진 시스템에서는 루프간의 상호 간섭 영향 등으로 부하 변화에 따라 요구되는 제어 시스템 요구 조건들을 PID 제어기만으로 만족시키면서 제어 하는 것은 어렵다.

$H_{\infty}$  최적화 기법은 모델의 불확실성이나 외란의 불확실성에 대하여 강건한 제어 시스템을 설계하기 위한 기법이다.  $H_{\infty}$  최적화 기법은 많은 연구가 진행 되어왔다. 그러나 복잡한 계산 과정과 제어기 설계가 쉽지 않아 실제 산업 현장에 적용한 예는 많이 없었다. 이러한 문제점들을 보완하기 위하여 제안된 최적화 기법 중의 한 방

법이  $H_2/H_{\infty}$ 을 이용한 최적화 기법이다.

$H_2/H_{\infty}$ 을 이용한 최적화제어 설계는 제어기의 파라미터 섭동(perturbation)과 불명확한 외란 속에서도 시스템의 강건한 성능을 가지도록 하는 유용한 설계 기법 중의 하나이다. 그러나 이 최적기법 또한 복잡한 계산과 산업 현장에 대한 적용문제는 여전히 남아 있다.<sup>[2]</sup>

생체의 면역 시스템은 생체방어를 위해 복잡한 기능을 갖고 있어 그 기능에 대한 현상을 밝히기 위해 현재에도 많은 연구가 이루어지고 있다. 면역 시스템은 척추동물의 기본적인 생체방어 기능으로 생체에 대해 이 물질이 침입한 경우 항원 하나하나를 식별하여 배제하고 기억하는 항원 특이성이 있다. 각각의 항원에 대해 이러한 특이한 항원 결정특성은 면역계통에 있어서 고유 특징이 되는데 이러한 특성은 한번 식별하면 두 번째는 식별에 신경을 쓰지 않는 척추동물의 가장 특이한 면역특성이 된다. 이러한 기능을 가지는 것은 두 종류의 임파구로 구성된 T세포 및 B세포 세포표면, B세포에 의해 생산되고 면역 중심적인 기능을 갖고 있는 항체로 구성되어 있다. 면역 계통은 병렬 처리하는 특징을 가지고 있으나 아직 그의 동작 특성에 대한 정확한 현상은 밝혀지고 있지 않다.

본 연구에서는 PID제어기가 가지고 있는 단순성과 강인성을  $H_2/H_{\infty}$ 을 이용하여 외란 제거 능력을 가지는 건설한 제어기로 설계하고 생체 면역알고리즘을  $H_2/H_{\infty}$  최적화 기법에 도입하여 PID 파라미터의 자동 동조에 적용하고 ITSE(Integral of time weighted squared error)를 통해 파라미터 최적화에 우수한 성능을 보였음을 입증하였다.

### 2. 면역 알고리즘을 이용한 외란제거 PID튜닝

#### 2.1 외란제거 조건

본 논문에서 도입하고자 하는  $H_{\infty}$ -norm을 이용한 외란 조건은  $R(s)=0$  일 때

$$\max_{d_y(t) \in L_2} \frac{\|y\|_p^p}{\|d_y\|_p^p} = \left\| \frac{w_d(s)}{1 + c(s, k)G_0(s)} \right\| < \gamma \quad (1)$$

이고 여기서  $\gamma < 1$ 의 요구되는 제거 정도에 따라서  $\|\cdot\|_\infty = H_\infty - norm$ 을 아래와 같이 정의한다.

$$\|G(s)\|_\infty = \max_{w \in [0, \infty)} |G(jw)| \quad (2)$$

$w_d(s)$ 는 외부외란  $d_y(t)$ 의 응답주파수를 제거하는 것과 같은 저역통과필터로 구성되는 가중함수이다.<sup>[3]</sup>  $H_\infty - norm$ 을 이용하면 외란제거조건은 식(3)으로 이루어진다.

$$\begin{aligned} \left\| \frac{w_d(s)}{1 + c(s, k)G_0(s)} \right\|_\infty &= \\ \max_{w \in [0, \infty)} \frac{w_d(jw)w_d(-jw)}{(1 + c(jw, k)G_0(jw))(1 + c(-jw, k)G_0(-jw))} &= \\ = \max_{w \in [0, \infty)} (\alpha(w, k))^{0.5} & \quad (3) \end{aligned}$$

여기서

$$\alpha(w, k) = \frac{\alpha_z(w, k)}{\alpha_n(w, k)} = \frac{w_d(jw)w_d(-jw)}{(1 + c(jw, k)G_0(jw))(1 + c(-jw, k)G_0(-jw))} \quad (4)$$

따라서 외란제거조건은 주파수 영역에서 아래와 같이 정의된다.

$$\max_{w \in [0, \infty)} (\alpha(w, k))^{0.5} < \gamma \quad (5)$$

$\alpha(w, k)$ 함수는 아래와 같이 표현된다.

$$\alpha(w, k) = \frac{\alpha_z(w, k)}{\alpha_n(w, k)} = \frac{\sum_{j=0}^p \alpha_{zj}(k)w^{2j}}{\sum_{i=0}^q \alpha_{ni}(k)w^{2j}} \quad (6)$$

두 다항식  $\alpha_z(w, k)$ 와  $\alpha_n(w, k)$ 는 주파수의 세기만을 가지는 함수가 되고 계수는  $k$ 의 함수이다.<sup>[2]</sup>

## 2.2 면역 알고리즘

생체 면역계는 생체 내부로 침투한 외부 물질(바이러스, 기생균, 박테리아 등)을 제거하여 생체의 방어 및 유지를 수행하는 시스템이다. 이러한 방어 기능을

효율적으로 수행하기 위하여 면역 체계는 자기 자신의 세포와 외부의 세포를 구별하기 위한 패턴 인식(Pattern Recognition) 작업을 수행하며, 이 과정을 통해 한번 배제한 항원에 대해서는 그 항원을 기억하여 이것을 배제하는 항체를 조속히 생성하는 기억 학습 능력을 갖고 있다.

면역 알고리즘은 다른 일반적인 최적화 알고리즘들과 비교하여 다음과 같은 특징을 갖는다.

- 1) 면역 알고리즘은 하나의 가능해를 가지고 최적화 과정을 수행하는 것이 아니라, 동시에 여러 개의 가능해로써 최적화를 진행하는 병렬 분산 처리를 한다. 따라서 최적해를 고속으로 병렬 탐색할 수 있다.
- 2) 면역 알고리즘은 해의 값 자체를 그대로 사용하는 것이 아니라, 코드화(Encoding)된 수의 배열을 사용한다.
- 3) 면역 알고리즘과 마찬가지로 생물의 진화 기구를 모방한 정보 처리 모델에 유전 알고리즘이 있지만, 그 본질적인 차이는 기억 학습 기구와 다양성이 있는 항체의 유지 기구로 인해 과거에 배제한 항원에 대응하는 항체를 재빨리 생성하기 때문에 시스템의 초기 상태와 비교해서 최적해가 고속으로 구해진다.
- 4) 실제 면역계의 다양성을 구현하기 위한 진화도 계산 과정이 있다.
- 5) 항원에 대한 '기대치'의 계산에 의해 면역계의 자기 조절 기능을 수행한다.
- 6) 최적화의 목적 함수를 그대로 사용한다. 다른 알고리즘은 목적 함수의 미분값과 다른 정보들을 이용하기도 한다. 마지막으로, 면역 알고리즘은 비 결정론적 알고리즘이다.

## 3. 시뮬레이션 및 고찰

그림 1에 보여진 2차 시스템의 전달함수는

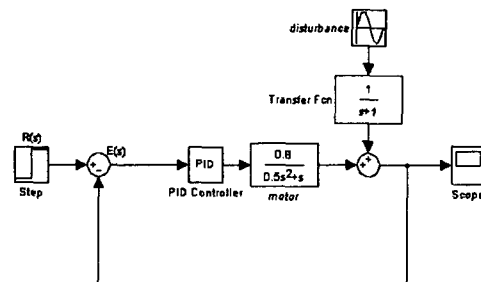


그림 1. 2차 시스템 모델 블록선도.

Fig. 1. Block diagram of second system.

$$G_0 = \frac{0.8}{s(0.5s+1)} \quad (7)$$

가중함수  $w_d(s)$ 는 아래와 같이 결정되어 졌다. [3]

$$w_d = \frac{1}{s+1} \quad (8)$$

외부외란의 상태를 고찰하기 위해 외란은

$d_y(t) = 0.1 \sin(t)$  일 때와  $d_y(t) = 0$  일때를 비교 하였다. 식(1),(5)에서 정의된 외란 감쇠 레벨  $\gamma = 0.1$ 이고  $c(s, k)$ 는 아래의 전달함수로 표시된다.

$$c(s, k) = k_1 + \frac{k_2}{s} + k_3 s \quad (9)$$

제어기 파라미터의 벡터  $k$ 는 아래와 같이 주어졌다.

$$k = [k_1, k_2, k_3]^T = [k_p, k_i, k_d]^T \quad (10)$$

입력신호가 단위 계단 입력일 때  $E(s)$ 는 식 (11)과 같이 주어진다.

$$E(s) = \frac{d_0 s^2 + d_1 s + d_2}{a_0 s^3 + a_1 s^2 + a_2 s + a_3} \quad (11)$$

식 (11)에서 각 계수는

$a_0 = 0.5, a_1 = (1 + 0.8k_3), a_2 = 0.8k_1, a_3 = 0.8k_2$   
 $d_0 = 0.5, d_1 = 1, d_2 = 0$  가 된다.

ITSE  $I_3(k)$ 는

$$I_3(k) = \frac{d_2^2}{4a_3^2} - \frac{d_0 d_1 + d_1 d_2 \frac{a_1}{a_3}}{2(a_1 a_2 - a_0 a_3)} + \quad (12)$$

$$\frac{d_0^2(a_2^2 + a_1 a_3) + (d_1^2 - 2d_0 d_2)(a_0 a_2 + a_1^2) + \frac{d_2^2}{a_3}(a_0^2 a_3 + a_1^2)}{2(a_1 a_2 - a_0 a_3)^2}$$

가 되고 식 (6)에서 정의된 외란제거조건

$$\alpha(w, k) = \frac{\alpha_z(w, k)}{\alpha_n(w, k)}$$

$$\alpha_z(w, k) = w^4 + 0.25^6 \quad (13)$$

$$\alpha_n(w, k) = 0.25w^8 + (1.25 + 1.6k_3 + 0.64k_3^2 - 0.8k_1) + (1 + 1.6k_3 + 0.64k_3 - 1.6k_2 - 1.28k_3k_2 - 0.8k_1 + 0.64k_1^2)w^4 + (-1.6k_2 - 1.28k_3k_2 + 0.64k_2^2 + 0.64k_1^2)w^2 + k_2^2$$

PID 제어기 파라미터는 아래의 범위에서 찾아진다.

$$k_1 = [0 \ 30] \quad k_2 = [0 \ 10] \quad k_3 = [0 \ 30]$$

표1. 면역알고리즘 파라미터

Table 1. Parameter of immune algorithm.

$P_c$ (교배율)	0.35
$P_m$ (돌연변이율)	0.02
Popsize IA(집단크기)	100
Max_Generation IA(최고세대수)	50

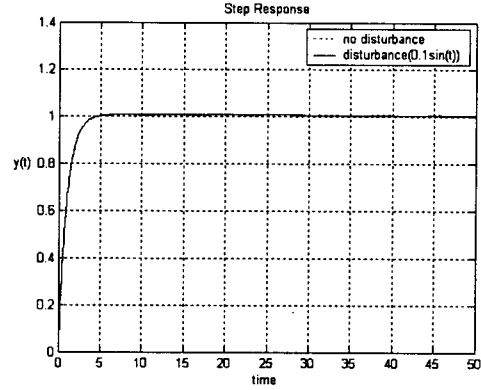


그림 2. 면역알고리즘 제어 결과(외란 존재: 0.1sin(t))

Fig. 2. Control result by immune algorithm. (no disturbance)

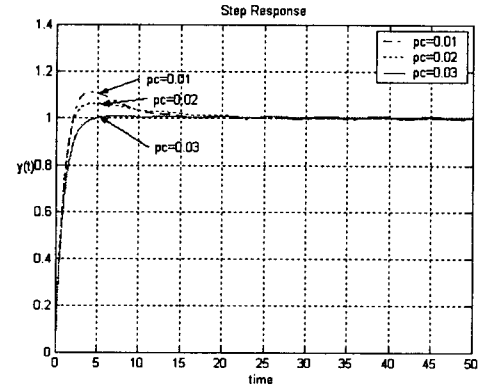


그림 3. 면역알고리즘 교배율 변화에 따른 응답 특성.

Fig. 3. Characteristics of response by variation of mutation.

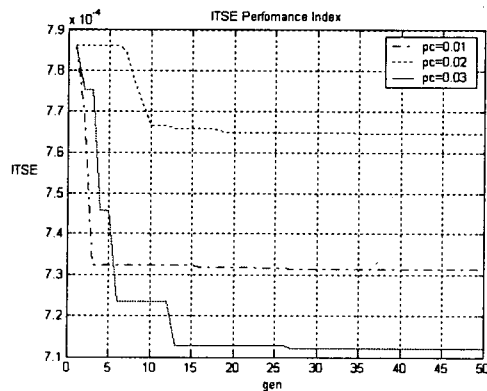


그림 4. 교배율 변화에 따른 각 세대의 ITSE성능지수 특성.

Fig. 4. Characteristics of ITSE to crossover.

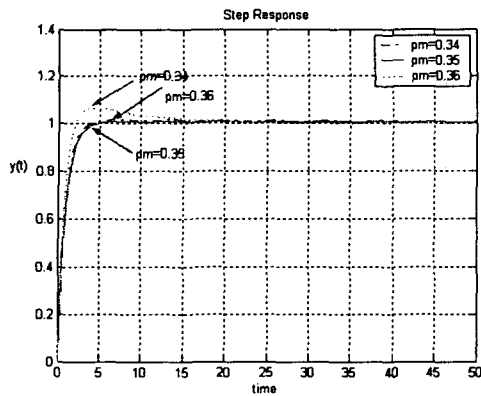


그림 5. 돌연변이율 변화에 따른 응답 특성.  
Fig. 5. Response to mutation.

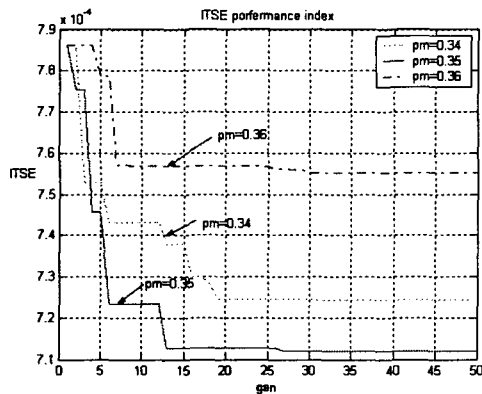


그림 6. 돌연변이 변화에 따른 각 세대의 ITSE성능지수 특성.  
Fig. 6 Characteristics of ITSE to mutation.

#### 4. 결 론

본 논문에서는 면역 알고리즘과  $H_2/H_\infty$ 을 이용해 2차 시스템 계통의 외란제거는 물론 PID 제어기의 파라미터를 최적으로 튜닝할 수 있는 방법을 제시하고 시뮬레이션 하였다. 면역 알고리즘을 적용한 시뮬레이션 결과 외란이 있는 경우도 거의 안전한 결과를 나타내고 있다.

본 연구 결과는 2차계 시스템에 대하여 적용한 것이나 향후 유사한 제어 계통에 적용하여 실험 및 확대 연구를 진행하고자 한다.

#### 참 고 문 헌

[1] Dong Hwa Kim and Jin Ill Park, "Multi-Optimization Tuning of PID controller for a Boiler System Using Immune Algorithms", *E&RA Education & Research for Advanced Automation*, Vol.1, No.1 2003, July.  
[2] Chen, B. S, Cheng, Y. M and Lee, C. H "A Genetic Approach to Mixed  $H_2/H_\infty$  Optimal PID control," *IEEE Control Systems Magazine*, pp. 51-60, 1995.  
[3] Renato A.Krohing and Joost P.Rey "Design of Optimal

Disturbance Rejection PID Controllers Using Genetic Algorithms", *IEEE Transactions on Evolutionary Computation* Vol.5, No. 1, 78-82, 2001, February.

[4] A. Ishiguro, T. Kondo, Y. Watanabe and Y. Uchikawa, "Dynamic behavior arbitration of autonomous mobile robots using immune networks," *In Proc. of ICEC 95*, vol.2, pp.722-727, 1995.

[5] N. K. Jerne, "The immune system," *Scientific American*, vol.229, no.1, pp.52- 60, 1973.

[6] N. K. Jerne, "Idiotypic networks and other preconceived ideas", *Immunological Rev.*, vol.79, pp.5-24, 1984.

[7] Dong Hwa Kim, Jin Ill Park, "Auto-Tuning of Reference Model Based PID Controller Using Immune Algorithm", *KFIS*, Vol. 12, No. 3, pp. 246-254, 2002.

[8] Dong Hwa Kim, "Tuning of a PID controller using a artificial immune network model and fuzzy set", *IFSA*, July.

[9] Dong Hwa Kim, "Intelligent Tuning of the 2-DOF PID Controller On the DCS for Steam Temperature Control On the DCS for Steam Temperature Control of Thermal Power Plant", *IEEE Industrial Application Society. I&CPS 2002*, 2002, May,

[10] Francisco J. Varela and John Stewart, "Dynamics of a class of immune networks I. Global stability of idio-type interactions," *Journal of theoretical biology*, vol. 144, no.1, pp.93-101, 1990.

[11] Gerard Weisbuch, "A shape space approach to the dynamics of the immune system," *Journal of Theoretical Biology*, vol. 143, no. 4, pp. 507-52, 1990.

[12] J. K. Inman, "The antibody combining region: Speculations on the hypothesis of general multispecificity," *Theoretical Immunology*, 1978.

[13] J.C. Doyle, B. A. Francis, and A. R. Tannenbaum, *Feed back Control Theory*, New York: Macmillan, 1992.

[14] J. H. Westcott, "The minimum-moment-of-error squared criterion: A new performance criterion for servo mechanism," *IEE Proc. Measurement Section*, pp.471-480, 1954.

[15] R. A. Krohling, " Design of a PID controller for disturbance rejection: A genetic optimization approach," *IEE/IEEE Int. Conf. Gen. Alg. Eng Syst: Innov. Applicat.*, pp.498-503, 1997.

[16] R. A. Krohling, "Genetic Algorithms for synthesis of mixed  $H_2/H_\infty$  fixed-structure controller," in *Proc. IEEE joint Conf. Science Technology Intelligent Systems*, pp 30-35, 1994.