

RCGA와 모델조정기법을 이용한 직류 전동기의 파라미터 동정

소명옥·오세준·유희한·이상태⁺·최우철⁺⁺

Parameter identification of DC Motor Using a RCGA and model adjustment technique

Myung-Ok So, Sea-June Oh, Hee-Han Yoo, Sang-Tae Lee⁺ and Woo-Chel Choi⁺⁺

Abstract : PID controller is widely used in industries until now. The reason is that the structure is very simple, and that it is easily estimated in terms of hardware, and that it doesn't need a lot of parameters which should be tuned. Therefore, DC motor also uses PID controller. In this paper, a method is proposed to identify parameters of a DC motor system using a RCGA prior to design of PID controller. The model identified using a RCGA is verified through simulations.

Key words : DC motor(직류 전동기), RCGA(실수코딩 유전알고리즘), identification(동정), Parameter(파라미터)

기호설명

e_b : Back emf of DC motor
 i_a : Armature current of DC motor
 J : Inertial moment of the armature of DC motor
 k : Gain of DC motor
 K_b : Back emf coefficient of DC motor
 L_a : Armature inductance
 τ : Time constant
 ω_p : Rotor angular velocity of DC motor

1. 서론

산업 현장에서는 아직도 PID 제어가 산업공정을 비롯한 석유, 화학 등의 다양한 분야에서 많이 이용되고 있다^[1]. 이것은 구조가 단순하여 하드웨어적으로 실현하기가 쉽고 동조할 파라미터의 수가 적어 다루기가 용이하기 때문이다. 경험적이고 실험적인 제어기 설계기법들의 문제점을 보완하면서 불확실한 시스템의 PID 제어기의 파라미터를 결정하기 위한 방법으로 릴레이 궤환입력에 대한 응답을 이용하는 방법^[2],

초기 파라미터의 실시간 적응동조 방법^[3], 패턴을 이용한 전문가 동조법^[4], 모델기반 동조법 등이 제안되었고 최근에는 진화적 기법을 이용하여 오프라인(Off-line)으로 최적의 파라미터를 구하고자 하는 연구도 진행되고 있다. 그러나 제어기의 파라미터를 결정하기에 앞서 제어대상의 시스템 파라미터를 동정하는 연구가 선행되어야 한다.

본 연구에서는 속도제어가 비교적 쉽고 로봇분야뿐만 아니라 다른 여러 분야에서 폭넓게 사용되고 있는 직류 전동기의 파라미터를 동정하는 문제를 다룬다. 실험장치는 Feedback 사의 "Precision servo workshop 33-008"을 사용하였으며, 이때 발생하는 직류 전동기의 파라미터 동정은 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded Genetic Algorithm; RCGA)^[5]을 이용하기로 한다.

2. 직류 전동기의 수학적 표현

일반적으로 직류 전동기의 속도 제어는 계자 제어법, 저항 제어법, 전기자 전압 제어법 등이 있는데, 계자 제어법은 고속에서 정류가 나빠지는 단점 등이 있고, 저항 제어법은 전력 효율이 나빠 비경제적이

⁺ 소명옥, 오세준, 유희한, 이상태(한국해양대학교 선박전자기공학과), E-mail: smo@mail.hhu.ac.kr, Tel: 051)410-4248
⁺⁺ 최우철(한국해양대학교 대학원 메카트로닉스공학과)

다. 따라서 직류 전동기의 속도 제어에는 연속적인 제어가 가능하고 효율이 좋으며 전압의 가감이 쉬운 전기자 전압 제어법이 주로 사용된다. 직류 전동기의 구조는 크게 계자(Stator)와 전기자(Armature)로 구분할 수 있으며 전동기의 등가 회로는 Fig. 1과 같이 표현된다^[6]. 계자는 전동기의 내부에 일정한 자기장을 만드는 역할을 하고, 전기자는 외부로부터 전류를 공급받아 회전자계를 만들며, 여기에는 구동권선이 이용되고 있다. 전기자에는 연속적으로 전류를 공급하기 위해 브러쉬(Brush)와 정류자(Commutator)가 있으며, 브러쉬는 전원으로부터 공급되는 전류를 정류자에 보내고 정류자는 브러쉬에서 공급되는 전류를 일정한 방향으로만 흐르게 한다.

제어 목적은 전기자에 인가해 주는 입력전압 $u_a(t)$ 를 조절하여 전동기의 출력 각속도 $\omega_p(t)$ 를 희망하는 값으로 조정하는 것이다.

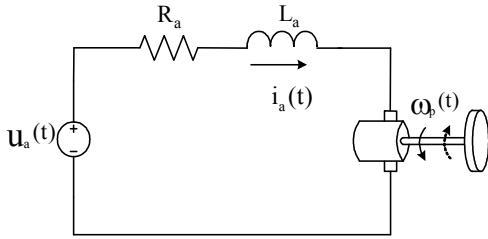


Fig. 1 Equivalent circuits of a DC motor

Fig. 1과 같이 등가회로로 표현되는 전기자 전압제어 직류 전동기의 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$u_a(t) - e_b(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (1)$$

$$e_b(t) = K_b \omega_p(t) \quad (2)$$

$$T(t) = K_t i_a(t) = J \frac{d\omega_p}{dt} + f \omega_p(t) \quad (3)$$

여기서 R_a , L_a , K_b , K_t , J 및 f 가 일정하고, 모든 초기 조건이 영(Zero)이라고 가정하고 (1)~(3)를 라플라스 변환하면 다음과 같다.

$$U_a(s) - E_b(s) = (R_a + L_a s) I_a(s) \quad (4)$$

$$E_b(s) = K_b \Omega_p(s) \quad (5)$$

$$T(s) = K_t I_a(s) = (J s + f) \Omega_p(s) \quad (6)$$

(4)~(6)를 정리하여, $U_a(s)$ 에 대한 $\Omega_p(s)$ 의 전달 함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\Omega_p(s)}{U_a(s)} = \frac{K_t}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a f) s + R_a f + K_t K_b} \quad (7)$$

일반적으로 L_a 는 매우 작은 값이므로 무시하면 (7)은 (8)과 같은 일차식으로 표현이 가능하다.

$$\frac{\Omega_p(s)}{U_a(s)} = \frac{K_t}{R_a J s + R_a f + K_t K_b} \quad (8)$$

여기에서 점성마찰, 쿨롱마찰을 무시하면 직류 전동기는 다음과 같은 전형적인 선형모델로 표현될 수 있다^[7].

$$\frac{\Omega_p(s)}{U_a(s)} = \frac{b}{s + a} \quad (9)$$

여기서 $a = K_t K_b / R_a J$, $b = K_t / R_a J$ 이다.

3. 직류 전동기의 파라미터 동정

3.1 실험적 방법

본 연구에서 사용한 실험장치인 Feed back 사의 "Precision servo workshop 33-008"은 직류 전동기, 전동기 구동용 증폭기, 속도 센서(Tacho generator), 전압 공급장치(Power supply)등으로 구성되어 있으며 Fig. 2는 실제 모습을 보여준다.

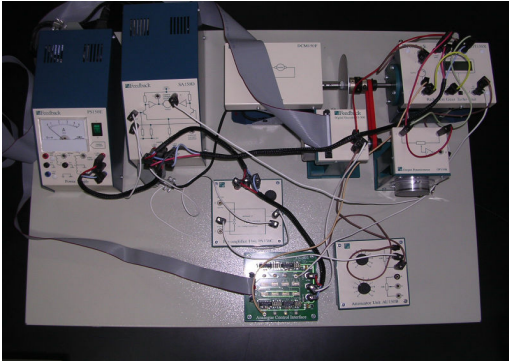


Fig. 2 Precision Servo workshop 33-008

Fig. 2를 간단히 블록화 하면 Fig. 3과 같이 나타낼 수 있다.

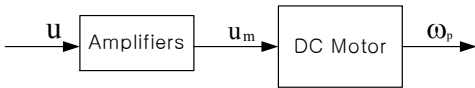


Fig. 3 Block diagram of a DC motor system

이것을 (9)를 사용해 다시 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{\Omega_p(s)}{U(s)} = \frac{b}{s+a} = \frac{k}{1+\tau s} \quad (10)$$

여기서 $\tau = \frac{1}{a}$ 로 시정수이며, $k = \frac{b}{a}$ 로 정상 상태 이득이고, b 는 Fig. 3의 증폭기의 이득을 포함한 값이다.

(10)에서 임의의 전압 $c[V]$ 를 계단상으로 인가할 경우, 전동기의 속도는 다음과 같다.

$$\Omega_p(s) = \frac{k}{1+\tau s} \cdot \frac{c}{s} = \frac{kc}{s} - \frac{k\tau c}{1+\tau s} \quad (11)$$

이것을 역 라플라스 변환하면 다음과 같다.

$$\omega_p(t) = kc - kce^{-\frac{t}{\tau}} \quad (12)$$

속도가 정상상태에 도달한 이후 시간이 무한대로 지남에 따라 $e^{-t/\tau}$ 은 영으로 수렴하므로 (12)는 다음과 같이 표현된다.

$$\omega_p(\infty) = kc \quad (13)$$

여기서 인가한 전압 c 와 정상상태 때의 출력 속도를 이용하여 정상상태 이득 k 를 구할 수 있다.

이제 시정수 τ 를 구하기 위해 (12)와 (13)을 이용하여 다음과 같이 다시 표현한다.

$$e^{-\frac{t}{\tau}} = 1 - \frac{\omega_p(t)}{kc} = 1 - \frac{\omega_p(t)}{\omega_p(\infty)} \quad (14)$$

(14)를 다시 정리하면 다음과 같다.

$$-\frac{t}{\tau} = \ln\left(1 - \frac{\omega_p(t)}{\omega_p(\infty)}\right) \quad (15)$$

그리고 임의의 시간 ($t = t_0$)에서 속도를 측정하면 다음과 같이 시정수 τ 를 구할 수 있다.

$$\tau = \frac{-t_0}{\ln\left(1 - \frac{\omega_p(t_0)}{\omega_p(\infty)}\right)} \quad (16)$$

본 연구에서는 실제 실험 장치에 여러 개의 다른 전압 c 를 인가하여 얻은 출력 데이터를 평균하여 k 와 τ 를 결정하였으며, 그 값은 $\tau = 0.0563$, $k = 2059.73$ 이다. Fig. 4는 실제 사용된 직류 전동기 출력 데이터의 한 예를 나타낸다.

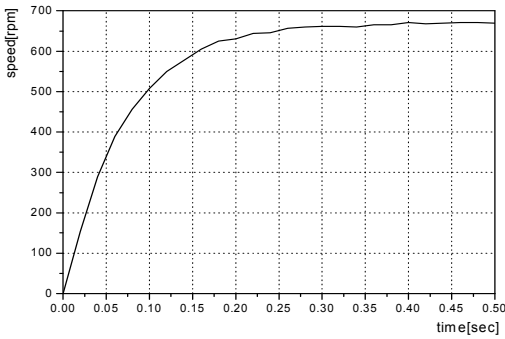


Fig. 4 An output data of actual DC motor

3.2 RCGA를 이용한 방법

유전알고리즘(GA)은 1975년 J. H. Holland^[8]가 제안한 것으로 “우성생식”과 다윈의 “자연선택”을 알고리즘 형태로 구현한 최적화 탐색기법 중의 하나이다. 잠정적인 해 집단에서 육종(Breeding)과 선택(Selection)을 구현하기 위해 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전연산자를 사용하여 개체를 개량하고^[8], 이들 간에 정보 형성과 교환을 장려하여 집단내의 개체가 해에 가까워지도록 여러 방향으로 탐색을 실행한다. GA는 구배(Gradient)에 기초한 탐색 알고리즘과는 달리 연속성, 미분가능성, 단봉성과 같은 탐색 공간에 대한 조건을 요구하지 않고, 매우 크고 복잡한 탐색 공간에서도 전역해에 수렴하는 장점 때문에 함수의 최적화, 신호 및 화상 처리, 시스템 식별 및 제어 등 다양한 분야에서 최적화 도구로 응용되고 있다^[9]. 이러한 유전알고리즘은 사용되는 코딩방법에 따라 크게 이진코딩(Binary coding), 실수코딩(Real number coding), 기호코딩(Symbolic coding)의 3가지로 구분할 수 있고, 전통적으로 염색체를 표현하는데 가장 많이 사용되어온 방법은 이진코딩 표현법이다. 그러나 탐색공간이 크거나, 고정밀도의 해가 필요한 경우, 제약조건이 존재하면 염색체의 길이를 크게 해야 하고 이는 연산부담으로 나타나며, 경우에 따라서는 탐색을 불가능하게 한다^[9]. 따라서 본 연구에서는 이러한 단점을 극복하고 제약조건이 있는 경우에도 적합한 RCGA를 사용한다.

본 연구에서는 직류 전동기의 증폭기 앞에서 인가한 전압 u 와 출력인 회전속도의 데이터를 가지고

(10)에 나타난 미지의 파라미터 k 와 τ 를 구하기 위해, Fig. 5와 같이 시스템과 모델을 병렬로 연결한 모델조정기법(Model adjustment technique)을 사용하고 조정 메카니즘으로는 RCGA를 이용한다.

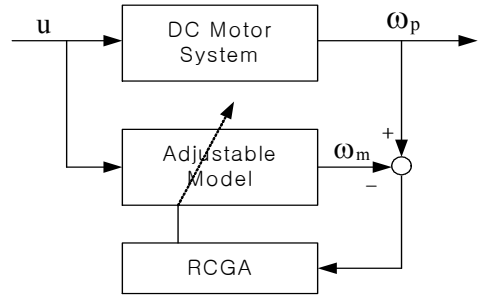


Fig. 5 Parameter estimation of a DC motor system using a RCGA

이때 RCGA는 (17)의 목적함수가 최소값을 갖도록 k 와 τ 를 주어진 영역에서 탐색한다.

$$J(\phi) = \int_0^{t_f} |\omega_p(t) - \omega_m(t)| dt \quad (17)$$

여기서 $\omega_p(t)$ 와 $\omega_m(t)$ 는 각각 실제 실험장치와 조정모델의 회전속도이고, t_f 는 최종 적분시간으로 이 시간 이후의 적분 값은 무시해도 좋을 정도의 충분히 큰 시간이다.

제어대상의 동작점에 따라 모델이 매우 다를 때는 여러 동작점에서 모델링을 해야 하지만 직류 전동기의 경우 각 동작점에서의 모델이 크게 변하지 않는다. 따라서 실험장치에 0.36[V]의 계단상 입력을 가하였을 때의 전동기 회전속도 데이터를 측정하여, 실험장치의 파라미터인 이득과 시정수를 동정하는데 이용하였다. Fig. 6는 0.36[V]의 계단입력에 대한 응답을 나타내고 있다.

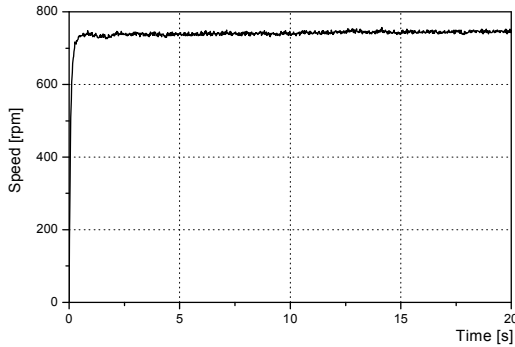
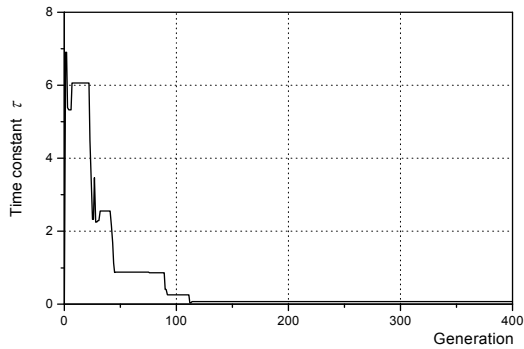
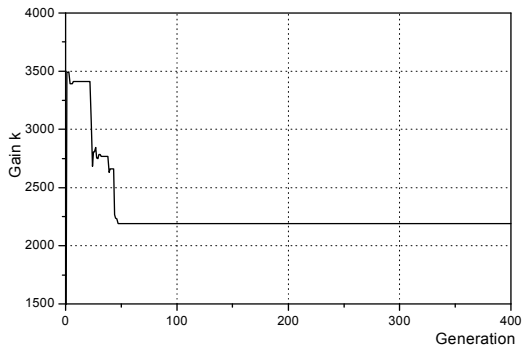


Fig. 6 Step response of a DC motor to 0.36[V]

산술적 교배와 동적 돌연변이를 선택하고 엘리트 전략을 이용한 RCGA의 매개 변수로는 집단크기 $N = 40$, 재생산계수 $\eta = 1.7$, 교배확률 $P_c = 0.9$, 돌연변이 확률 $P_m = 0.01$ 이 사용되었다.



(a) Parameter τ



(b) Parameter k

Fig. 7 Parameter estimation using a RCGA

Fig. 7은 RCGA가 실험장치의 파라미터를 탐색해 가는 과정을 보여주며, 최종적으로 $\tau=0.076684$, $k=2191.206$ 을 얻었다. 실험적 방법으로 얻은 값과 비교해 볼 때 거의 비슷함을 확인 할 수 있다.

4. 동정된 모델의 검증

RCGA가 동정한 모델을 검증하기 위해 동정된 모델과 실험장치에 동일한 입력을 인가하여 출력을 비교하였다. 입력으로 사용된 신호는 계단상 입력인 $u = 0.36$ [V]와 임의의 정현파 $u = 0.031 + 0.42\sin(0.5t) + 0.23\sin(1.4t) + 0.15\sin(2.5t)$ [V]가 사용되었다. 두 개의 다른 입력에 대해 모델과 시스템의 출력이 양호하게 일치하는 것을 Fig. 8과 Fig. 9를 통해 확인할 수 있다.

그러나 Fig. 9의 10.5[s] 부근에서 모델의 출력은 부드러운 곡선으로 표시되나 실제 실험장치의 회전속도가 0인 것은 실험장치의 각종 점성마찰 또는 쿨롱마찰에 의한 것으로 생각된다.

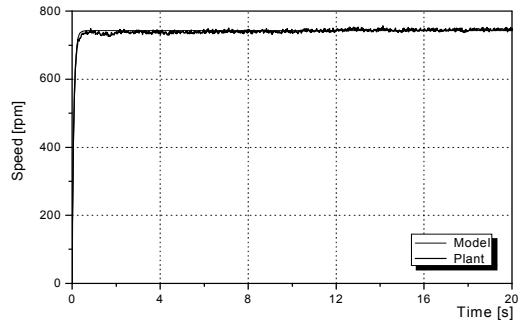


Fig. 8 Validation of identified model

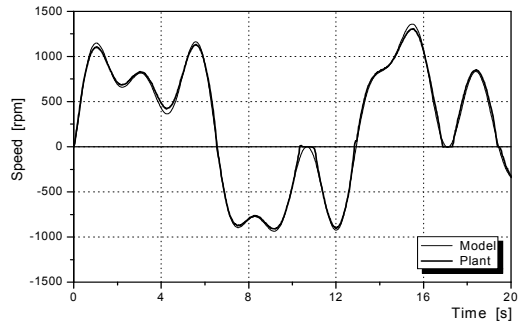


Fig. 9 Validation of identified model

5. 결 론

본 연구에서는 실제 실험장치(Feed back 사의 "Precision Servo workshop 33-008")의 입출력 데이터를 가지고 RCGA를 이용하여 시스템 파라미터를 동정하는 문제를 다루었다.

실험적 방법을 통해 얻은 시스템의 파라미터 값과 RCGA를 이용해 얻은 시스템 파라미터의 값이 거의 동일함을 확인하였다.

또한 RCGA를 이용해 동정한 시스템 파라미터와 실제 실험장치에 동일한 입력을 가할 때 출력이 잘 일치함을 확인하였다.

향후 점성마찰과 쿨롱마찰을 고려한 연구와 제어기의 설계에 관한 연구가 계속적으로 진행될 수 있을 것으로 기대하며, 또한 최근에 큰 관심의 대상이 되고 있으며 직류 전동기의 사용 빈도가 높은 로봇분야에 적용할 수 있도록 로봇 사용 환경에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

참고문헌

- [1] Y. Nozaka, "Trend of new control theory application in industrial process control(survey)", proc. IFAC 12th Triennial World Cong. Vol. 4, pp. 215-218, 1993.
- [2] K. J. Astrom and T. Hagglund, "Automatic tuning of simple regulators with specifications on phase and amplitude margins", Automatica, Vol. 20, pp. 645-651, 1984.
- [3] T. Yamamoto et al., "Intelligent tuning PID controllers", Proc. IEEE Int. conf. on SMC, Vol. 5, pp. 2610-2615, 1995.
- [4] E. H. Bristol, "Pattern recognition: an alternative to parameter identification in adaptive control", Automatica, Vol. 13, pp. 197-202, 1977.
- [5] G. Jin and S. Joo, "A study on a real-coded genetic algorithm", Journal of Control Automation and Systems Engineering, Vol. 6,

No. 4, pp. 268-275, 2000.

- [6] 이찬하, "퍼지-PID 기법을 이용한 선박용 디젤 주기관의 강인한 속도제어기 설계", 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 공학석사 학위논문, pp. 11-15, 2003.
- [7] B. C. Kuo and J. Tal, DC motors and control system, SRL Publishing Company, Champaign, Illinois, 1978.
- [8] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.
- [9] 진강규, 주상래, "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구", 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 6, No. 4, 2000.