

공학석사 학위논문

RCGA를 이용한
직류모터의 속도제어기 설계

Design of Speed Controller for DC Motor Using RCGA

지도교수 소명옥

2005년 2월

한국해양대학교 대학원

메카트로닉스공학과 최우철

목 차

Abstract	ii
Nomenclature	iii
제 1 장 서론	
1.1 연구배경	1
1.2 연구목적 및 구성	2
제 2 장 직류모터의 모델링	
2.1 직류모터의 수학적 모델링	3
2.2 RCGA를 이용한 직류모터 모델의 파라미터 추정	6
2.3 모델링 검증	11
제 3 장 PID 제어기 설계	
3.1 종래의 PID 제어기 동조규칙	13
3.2 RCGA 기반의 동조	16
제 4 장 시뮬레이션 및 실험	
4.1 모델에 대한 PID 제어기의 응답	18
4.2 실험장치에 대한 PID 제어기의 응답	28
제 5 장 결론	44
참고문헌	45
감사의 글	

Design of Speed Controller for DC Motor Using RCGA

Woo-Chul Choi

*Department of Mechatronics Engineering, Graduate School
Korea Maritime University*

Abstract

Over the past 60 years, the PID(Proportional-Integral-Derivative) controller has been especially popular in industrial processes, such as chemical, petroleum, power, manufacturing industries, DC motors due to its simple structure and robustness. Since the performance of the PID controller depends highly on its three parameters, the proper tuning of the parameters is required to guarantee acceptable control performance. Therefore, a number of tuning methods based on experience and experiment, such as the Ziegler-Nichols method, the Cohen-Coon method, the IMC method, and the Lopez-ITAE method have been proposed to obtain parameters for the PID controller.

DC motors are also widely used in many industrial fields as the actuator of the robot and the driving power motors of the electrical vehicles.

In this paper, a methodology for designing a controller for speed control of DC motors is presented.

Firstly the parameters of a given DC motor plant are identified using the model adjustment technique and the real coded genetic algorithm(RCGA).

Secondly three parameters of PID controller are also tuned using RCGA.

The two processes are combined for the speed control of a DC motor.

Finally the effectiveness of the proposed controller is verified through computer simulation and experiment to a DC motor system.

Nomenclature

e	error
e_b	Back emf of DC motor
f	Friction (coulomb, viscous) coefficient of DC motor
i_a	Armature current of DC motor
i_f	Field current of DC motor
J_o	Objective function
J	Inertial moment of <i>the</i> armature of DC motor
k	Gain of DC motor
K_b	Back emf coefficient of DC motor
K_d	Derivative gain
K_f	Air gap flux constant
K_i	Integral gain
K_p	Proportional gain
K_t	Torque constant of DC motor
K_I	constant
L	Time delay
L_a	Armature inductance
N	Population size
P_C	Crossover rate
P_m	Mutation rate
R_a	Armature winding resistance
T	Torque of DC motor
T_d	Derivative time
T_i	Integral time
u	Control input of DC motor system and adjustable model
u_a	Control input voltage of DC motor
ω_p	Rotor angular velocity of DC motor

ω_m	Rotor angular velocity of adjustable model
η	Reproduction constant
τ	Time constant
Ψ	Air gap flux

제 1 장 서 론

1.1 연구배경

속도제어가 비교적 쉬운 직류모터는 최근 큰 관심의 대상이 되고 있는 로봇 분야에서 뿐만 아니라 다른 여러 분야에서 폭넓게 사용되고 있다.

일반적으로 직류모터의 속도 제어는 계자 제어법, 저항 제어법, 전기자 전압 제어법 등이 있는데, 계자 제어법은 고속에서 정류가 나빠지는 단점 등이 있고, 저항 제어법은 전력 효율이 나빠 비경제적이다. 따라서 직류전동기의 속도 제어에는 연속적인 제어가 가능하고 효율이 좋으며 전압의 가감이 쉬운 전기자 전압 제어법이 주로 사용된다.

제어 이론과 기술의 발전에도 불구하고 아직도 산업 현장에서는 PID 제어가 여러 산업공정에 사용되고 있다[1]. 이러한 상황은 전동기 속도제어 분야에서도 예외가 아니다. 이는 PID 제어기의 구조가 단순하여 하드웨어적으로 실현하기가 쉽고 동조할 파라미터가 적어 다루기가 용이하기 때문이다. PID 제어기의 성능을 결정짓는 중요한 요소는 비례이득(Proportional gain), 적분시간(Integral time), 미분시간(Derivative time)인데, 주어진 설계사양을 만족하도록 이들을 적절히 조정하는 동조(tuning)는 필수적이다.

PID 제어기 동조에는 여러 방식이 적용될 수 있으나 경험적이고 실험적인 접근법이 보편적이었다. 대표적으로 Ziegler와 Nichols(Z-N)의 개루프 동조법과 페루프 동조법, Cohen-Coon(C-C) 동조법 등이 있다. 이와 같은 고전적인 방법은 실제 시스템 응답이 외란이나 잡음에 대해 민감하여 정확한 매개변수를 결정하기 어렵고, 특히 Z-N의 페루프 동조법은 시스템 안정성을 증시하는 한 적용하기 어렵다는 단점이 있다.

이런 문제점을 보완하면서 불확실한 시스템의 PID 제어기의 파라미터를 결정하는 방법으로는 릴레이 궤환입력에 대한 응답을 이용하는 방법[2], 초기 파라미터의 실시간 적응동조 방법[3], 패턴을 이용한 전문가 동조법[4], 모델기반 동조법 등이 있다. 최근에는 진화적 기법을 이용하여 오프라인으로 최적의 파라미터를 구하고자 하는 연구가 진행되고 있다.

1.2 연구목적 및 구성

본 논문에서는 추종성과 적응성이 좋은 PID 제어를 설계하기 위해 실수코딩 유전알고리즘(Real-coded genetic algorithm; RCGA)[5]을 이용하는 방법을 제안한다. 시스템 입출력 데이터와 실수코딩 유전알고리즘을 이용하여 직류모터의 수학적 모델을 얻고, 종래의 여러 가지 동조 규칙과 RCGA에 의해 PID 제어기의 세 가지 파라미터 비례이득, 적분이득, 미분이득을 구한 후 시뮬레이션과 실험을 통해 제안한 동조법의 우수성을 검증하고자 한다. 실험에 사용된 시스템은 Feedback 사의 “Precision Servo Workshop 33-008” 모델이다.

본 논문은 총 5장으로 구성되어 있다. 제1장은 서론이며, 제2장에서는 일반적인 직류모터의 수학적 모델링 과정을 알아보고, 제어대상인 실제 모터를 RCGA를 이용하여 모델링 한다. 그리고 수학적 모델과 실험장치의 응답 비교를 통해 모델링을 검증한다. 제3장에서는 종래의 동조규칙과 제안된 동조규칙을 사용하여 PID 제어를 동조한다. 제4장에서는 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 제어기의 성능을 확인하고, 제5장에서는 최종적으로 얻어진 결론을 요약한다.

제 2 장 직류모터의 모델링

2.1 직류모터의 수학적 모델링

직류모터의 구조는 크게 계자(Stator)와 전기자(Armature)로 구분할 수 있으며 모터의 등가 회로는 Fig. 2.1과 같이 표현된다[6].

계자는 모터의 내부에 일정한 자기장을 만드는 역할을 하게 되고, 전기자는 외부로부터 전류를 공급받아 회전자계를 만드는데 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 모터의 출력 각속도 $\omega_p(t)$ 를 희망하는 값으로 조정하는 것이다.

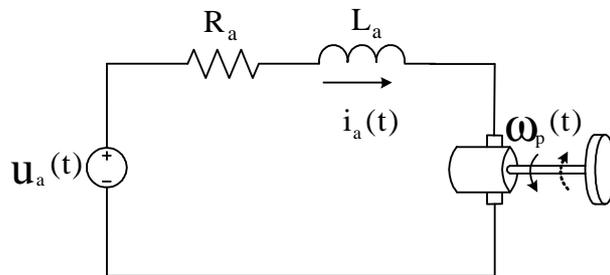


Fig. 2.1 Equivalent circuits of a DC motor

Fig. 2.1에서 $u_a(t)$ 는 전기자에 인가되는 입력전압이고, $i_a(t)$ 는 전기자 전류, R_a 와 L_a 는 각각 전기자 회로 저항과 인덕턴스 성분이다.

직류모터의 발생토크 T 는 전기자 전류 $i_a(t)$ 와 공극자속 Ψ 의 곱에 비례하고,

공극자속 Ψ 는 계자전류 i_f 에 비례한다.

그러므로 발생하는 토크는 다음과 같다.

$$T \propto \Psi i_a(t) \quad (2.1)$$

$$\Psi = K_f i_f(t) \quad (2.2)$$

$$T = K_t K_f i_f(t) i_a(t) \quad (2.3)$$

여기서 K_f 와 K_t 는 상수이다.

계자가 영구 자석(Permanent magnet)인 경우, 토크는 전기자 전류에 비례하고, 이 토크에 의해 모터가 회전하게 되므로 토크 식은 다음과 같다.

$$T = K_t i_a(t) = J \frac{d\omega_p}{dt} + f\omega_p \quad (2.4)$$

K_t 는 토크 상수, J 는 회전자 및 부하의 관성능률, f 는 쿨롱 마찰과 점성마찰을 고려한 마찰계수이다.

전기자가 회전할 때, 자속과 각속도의 곱에 비례하는 전압이 전기자에 유도된다. 자속이 일정하면 유도되는 역기전력은 다음과 같다.

$$e_b(t) = K_b \omega_p(t) \quad (2.5)$$

여기서 K_b 는 모터의 역기전력 상수이다.

직류모터 내부에 흐르는 전류는 입력전압 $u_a(t)$ 에 의해 제어되고, 전기자 회로에 키르히호프 전압법칙을 적용하면 다음과 같은 식을 얻을 수 있다.

$$u_a(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} + e_b(t) \quad (2.6)$$

따라서 Fig. 2.1과 같은 등가회로로 표현되는 전기자 전압제어 직류모터의 관계식을 정리하면 다음과 같다.

$$u_a(t) - e_b(t) = R_a i_a(t) + L_a \frac{di_a(t)}{dt} \quad (2.7)$$

$$e_b(t) = K_b \omega_p(t) \quad (2.8)$$

$$T(t) = K_t i_a(t) = J \frac{d\omega_p}{dt} + f\omega_p(t) \quad (2.9)$$

여기서 R_a , L_a , K_b , K_t , J 및 f 가 일정하고, 모든 초기 조건이 영이라고 가정하고 (2.7)~(2.9)를 라플라스(Laplace) 변환하면 다음과 같다.

$$U_a(s) - E_b(s) = (R_a + L_a s)I_a(s) \quad (2.10)$$

$$E_b(s) = K_b \Omega_p(s) \quad (2.11)$$

$$T(s) = K_t I_a(s) = (J s + f)\Omega_p(s) \quad (2.12)$$

(2.10)~(2.12)를 정리하여, $U_a(s)$ 에서 $\Omega_p(s)$ 로의 전달 함수를 관계식으로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\Omega_p(s)}{U_a(s)} = \frac{K_t}{L_a J s^2 + (R_a J + L_a f)s + R_a f + K_t K_b} \quad (2.13)$$

일반적으로 L_a 는 작은 값이므로 무시하면, 위식은 다음과 같은 일차시스템으로 표현된다.

$$\frac{\Omega_p(s)}{U_a(s)} = \frac{K_t}{R_a J s + R_a f + K_t K_b} \quad (2.14)$$

여기에서 쿨롱마찰과 점성마찰을 무시하면 직류모터는 다음과 같은 전형적인 선형모델로 표현될 수 있다[7].

$$\frac{\Omega_p(s)}{U_a(s)} = \frac{b_m}{s + a_m} \quad (2.15)$$

여기서, $a_m = K_t K_b / R_a J$, $b_m = K_t / R_a J$ 이다.

2.2 RCGA를 이용한 직류모터 모델의 파라미터 추정

본 논문에서 사용하는 유전알고리즘(GA)은 1975년 J. H. Holland[8]가 제안한 것으로 “우성생식”과 다윈의 “자연선택”을 알고리즘 형태로 구현한 최적화 탐색 기법 중의 하나이다. 잠정적인 해 집단에서 육종(Breeding)과 선택(Selection)을 구현하기 위해 재생산, 교배, 돌연변이와 같은 유전연산자를 사용하여 개체를 개량하고[9], 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 탐색공간에 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[10]. 따라서 본 논문에서는 이러한 단점을 극복하고 제약조건이 있는 경우에도 적합한 실수코딩 유전알고리즘(RCGA)을 사용한다.

제안된 알고리즘의 유효성을 검증하기 위해 Feed back 사의 "Precision Servo workshop 33-008"을 사용하였고, Fig. 2.2에서와 같이 실험장치는 직류모터, 모터 구동용 증폭기, 속도 센서(Tacho Generator), 전압 공급장치(Power Supply)등으로 구성되어 있다. 제어 알고리즘을 구현하는 제어기로는 AD/DA 변환기(PCI1711 Card)가 내장된 개인용 PC가 사용되었다.

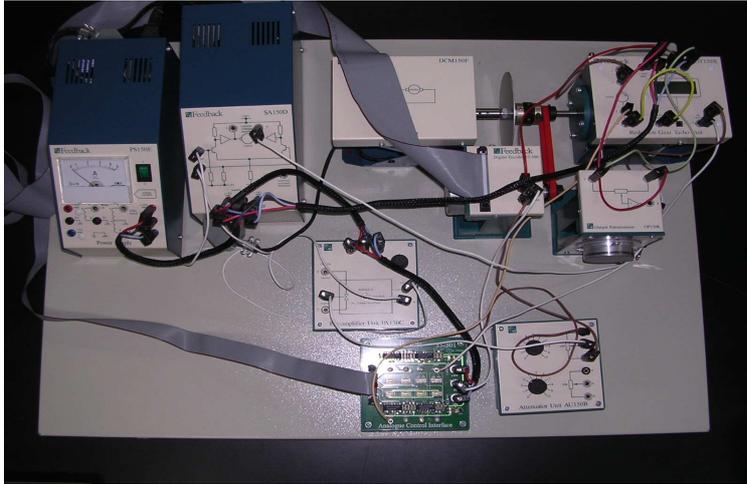


Fig. 2.2 Precision Servo workshop 33-008

이제 Fig. 2.2를 간단히 블록화 하여 Fig. 2.3과 같이 나타내었고, (2.15)를 기준으로 하여 Fig. 2.3에 있는 증폭기의 이득을 포함한 전달함수로 나타내면 다음과 같다.

$$\frac{\Omega_p(s)}{U(s)} = \frac{b_m}{s + a_m} = \frac{k}{1 + \tau s} \quad (2.16)$$

여기서 $\tau = \frac{1}{a_m}$ 로 시정수이며, $k = \frac{b_m}{a_m}$ 으로 정상상태 이득이고 b_m 은 Fig. 2.3의 증폭기의 이득을 포함한 값이다.

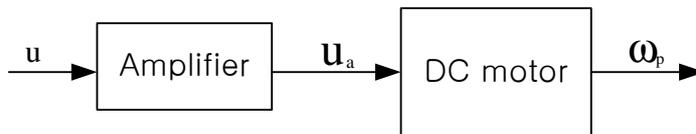


Fig. 2.3 Block diagram of a DC motor system

본 연구에서는 직류모터의 증폭기에 인가한 전압 u 와 회전속도 ω_p 의 데이터를 가지고, (2.16)에 표현된 미지의 파라미터인 이득 k 와 시정수 τ 를 구하기 위해, Fig. 2.4와 같이 실험장치인 모터와 모델을 병렬로 연결한 모델조정기법 (Model adjustment technique)을 사용한다. 조정 메카니즘으로는 RCGA가 이용되는데, 이때 RCGA는 (2.17)의 목적함수가 최소값을 갖도록 k 와 τ 를 주어진 영역에서 탐색한다.

$$J_o = \int_0^{t_f} |\omega_p(t) - \omega_m(t)| dt \quad (2.17)$$

여기서 $\omega_p(t)$ 와 $\omega_m(t)$ 는 각각 실험장치인 모터와 모델의 출력 각속도이고, t_f 는 최종적분 시간으로 이 시간 이후의 적분 값은 무시해도 좋을 정도의 충분히 큰 값이다.

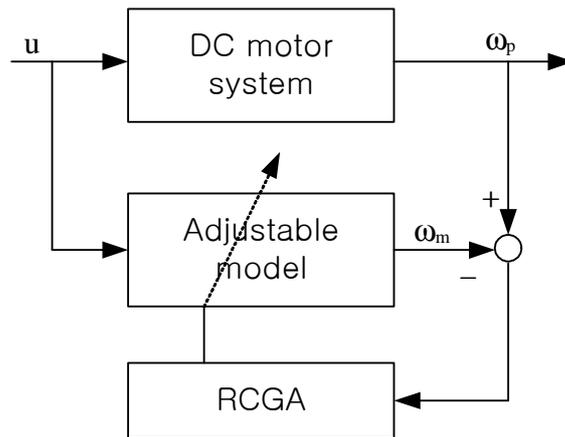


Fig. 2.4 Parameter identification of a DC motor system using RCGA

제어대상의 동작점에 따라 모델이 매우 다를 때는 여러 동작점에서 모델링을 해야 하지만 직류모터의 경우 각 동작점에서의 모델이 크게 변하지 않는다. 따라서 실험장치에 0.36[V]의 계단상 입력을 가하였을 때의 모터 회전속도 데이터

를 측정하여, 실험장치의 파라미터인 이득과 시정수를 동정하는데 이용하였다. Fig. 2.5는 0.36[V]의 계단입력에 대한 응답을 나타내고 있다.

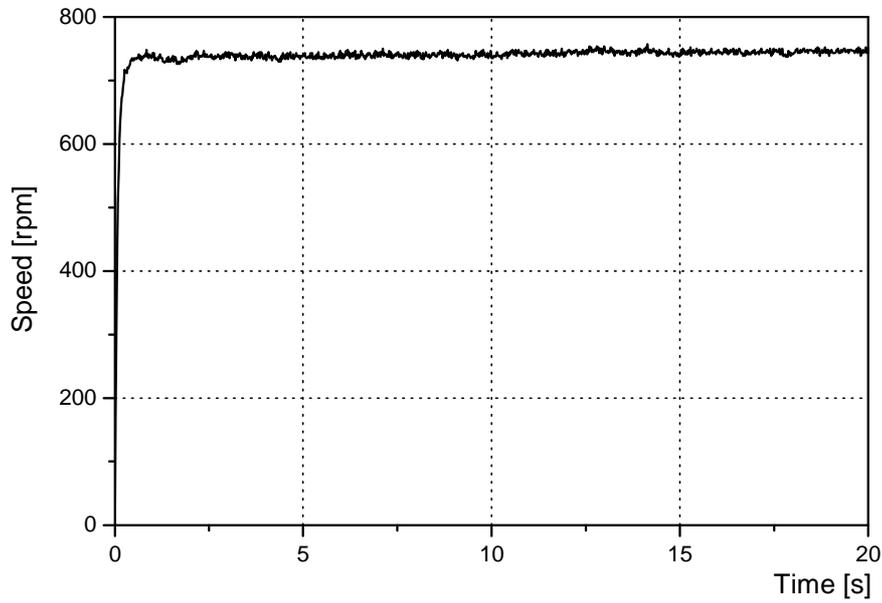
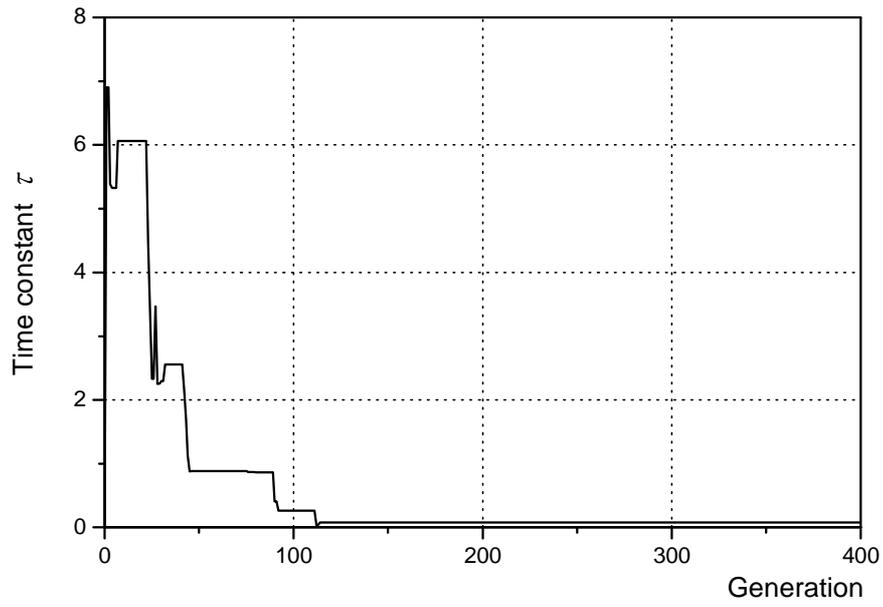


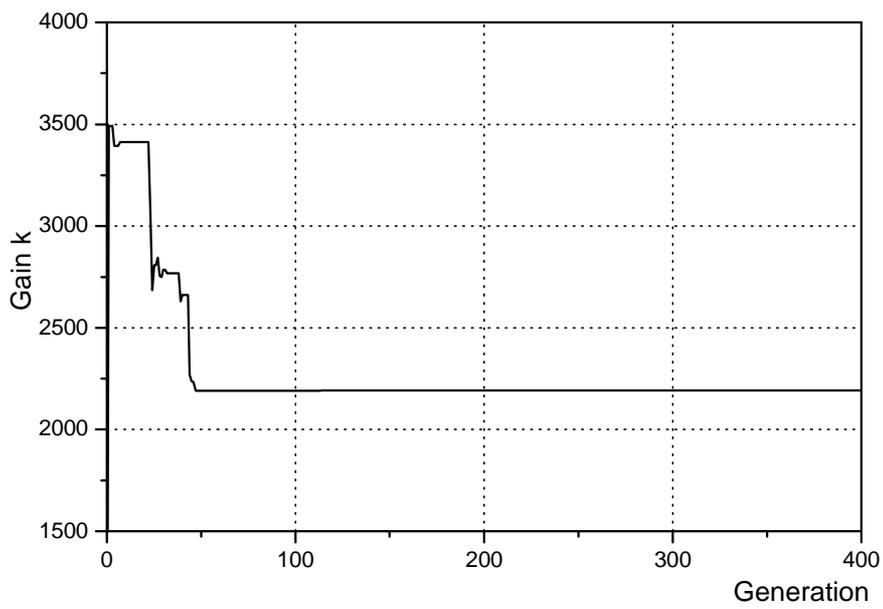
Fig. 2.5 Step response of a DC motor to 0.36[V]

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.

Fig. 2.6은 RCGA가 실험장치의 파라미터를 탐색해 가는 과정을 보여주며, 최종적으로 $\tau = 0.076684$, $k = 2191.206$ 을 얻었다.



(a) Parameter τ



(b) Parameter k

Fig. 2.6 Parameter identification using RCGA

2.3 모델링 검증

RCGA가 동정한 모델을 검증하기 위해 동정된 모델과 실험장치에 동일한 입력을 인가하여 출력을 비교하였다. 입력으로 사용된 신호는 계단상 입력인 $u = 0.36$ [V]과 임의의 곡선과 $u = 0.031 + 0.42\sin(0.5t) + 0.23\sin(1.4t) + 0.15\sin(2.5t)$ [V]이 사용되었다.

두 개의 다른 입력에 대해 모델과 시스템의 출력이 양호하게 일치하는 것을 Fig. 2.7과 Fig. 2.8을 통해 확인할 수 있다.

그러나 Fig. 2.8의 10.5[s] 부근에서 모델의 출력은 부드러운 곡선으로 표시되나 실제 실험장치의 회전속도가 0인 것은 실험장치의 각종 점성마찰 또는 쿨롱마찰에 의한 것으로 생각된다.

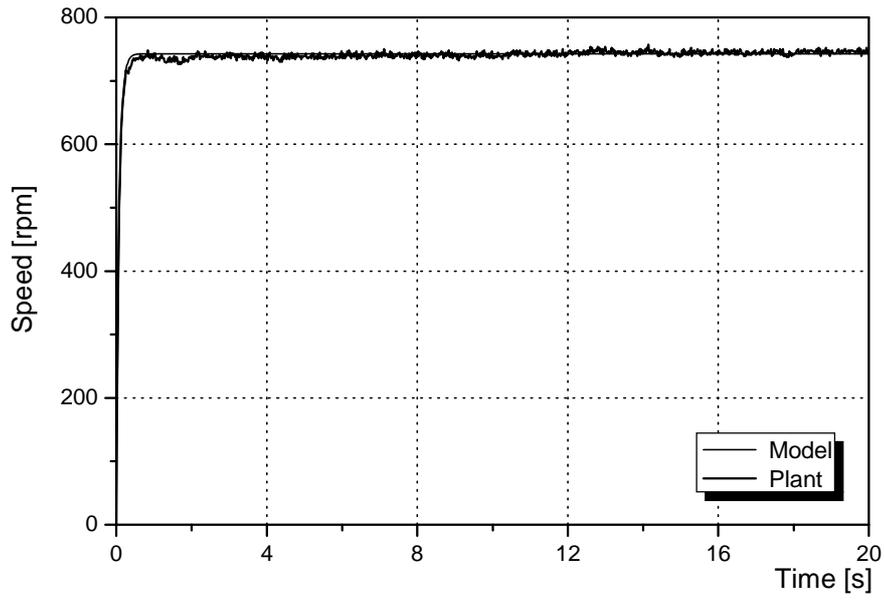


Fig. 2.7 Validation of identified model

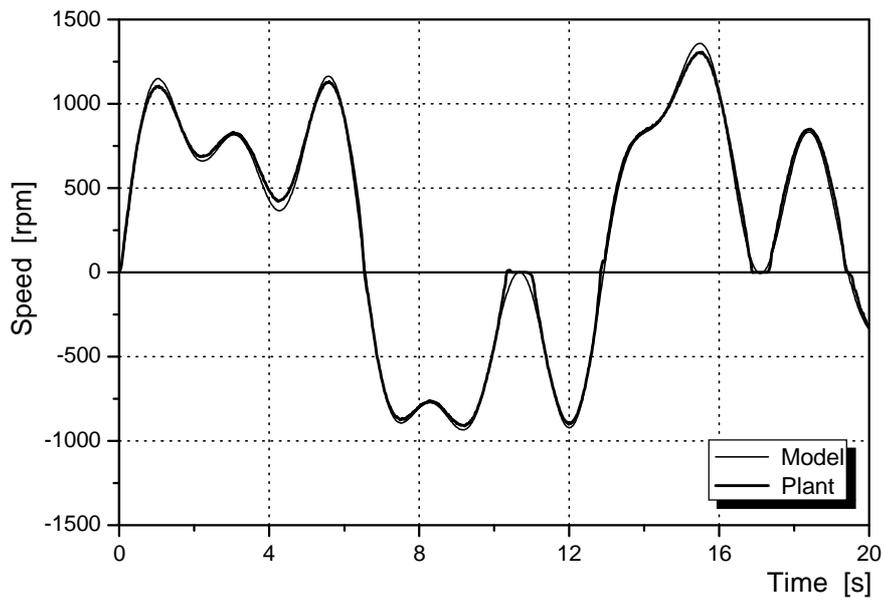


Fig. 2.8 Validation of identified model

제 3 장 PID 제어기 설계

3.1 종래의 PID 제어기 동조 규칙

3.1.1 PID 제어기

전형적인 PID 제어시스템은 Fig. 3.1과 같이 PID 제어기와 제어대상으로 구성된다.

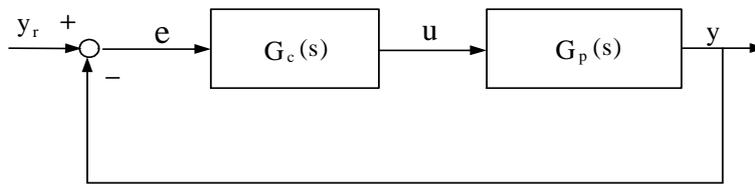


Fig. 3.1 PID control system

PID 제어기는 비례제어(Proportional control), 적분제어(Integral control), 미분제어(Derivation control)의 결합으로 그 전달함수는 다음과 같다.

$$G_c(s) = K_p \left(1 + \frac{1}{T_i s} + T_d s \right) = K_p + \frac{K_i}{s} + K_d s \quad (3.1)$$

여기서 $K_i = \frac{K_p}{T_i}$, $K_d = K_p T_d$ 이다.

3.1.2 기존의 동조규칙

종래에 많이 사용되었던 Ziegler-Nichols(Z-N)동조법[11], Cohen-Coon(C-C)동조법[12], IMC(Internal model control)동조법[13], Lopez ITAE(L-ITAE)동조법[14]은 1차 시간지연 시스템에서 사용되는 동조규칙들이며, 위의 동조규칙들을 Table 3.1에서 Table 3.4에 나타내었다. Table 3.5는 이러한 동조규칙으로 구한 값을 나타낸다.

Table 3.1 Z-N open-loop tuning rule

Parameter Controller	K_p	T_i	T_d
Tuning rule	$1.2 \frac{\tau}{KL}$	2.0L	0.5L

Table 3.2 Cohen-Coon tuning rule

Parameter Controller	K_p	T_i	T_d
Tuning rule	$\frac{\tau}{KL} \left(\frac{4}{3} + \frac{L}{4\tau} \right)$	$L \frac{32 + 6 \frac{L}{\tau}}{13 + 8 \frac{L}{\tau}}$	$L \frac{4}{11 + 2 \frac{L}{\tau}}$

Table 3.3 IMC tuning rule

Parameter Controller	K_p	T_i	T_d
Tuning rule	$\frac{2\tau + L}{2K(\lambda + L)}$	$\tau + \frac{L}{2}$	$\frac{\tau L}{(2\tau + L)}$

Table 3.4 L-ITAE tuning rule

Parameter Controller	K_p	T_i	T_d
Tuning rule	$\frac{0.965}{K} \left(\frac{\tau}{L} \right)^{0.850}$	$\frac{\tau}{0.769 - 0.1465 \left(\frac{L}{\tau} \right)}$	$0.308 \left(\frac{L}{\tau} \right)^{0.929}$

여기서 K 는 정상이득, τ 는 시정수, L 은 지연시간, λ 는 필터포함 계수로서 0.25L을 사용하였다.

Table 3.5 PID parameters using various tuning methods

Tuning methods	Parameters		
	K_p	K_i	K_d
Z-N	0.030000	3.750000	0.000060
C-C	0.033646	3.490249	0.000048
IMC	0.020500	0.250000	0.000040
L-ITAE	0.015390	0.151700	0.000293

3.2 RCGA 기반의 동조

RCGA는 염색체를 실수로 표현하며, 염색체의 실수 유전자를 PID 제어기의 각 이득과 일대일로 대응시킨다. Fig 3.2는 RCGA를 이용한 모델의 PID 제어기 동조과정을 나타내며 (3.2)의 목적함수가 최소가 되도록 PID 제어기의 이득을 주어진 영역에서 탐색한다.

Fig. 3.3은 RCGA가 PID 제어기의 이득 값을 탐색해 가는 과정을 보여주고 있다. 수정단순 교배와 동적 돌연변이를 선택하고 엘리트전략을 이용한 RCGA의 매개변수로는 집단의 크기 $N=40$, 재생산계수 $\eta=1.7$, 교배확률 $P_C=0.9$, 돌연변이 확률 $P_m=0.05$ 을 사용하였으며, 탐색결과 $K_p=0.625663$, $K_i=5.477814$, $K_d=0.000769$ 가 선정되었다.

$$J_o = \int_0^{t_f} e^2(t)dt \quad (3.2)$$

단 $e(t) = y_r(t) - y(t)$

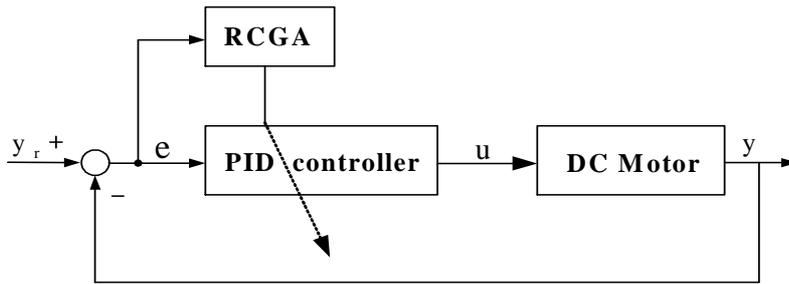
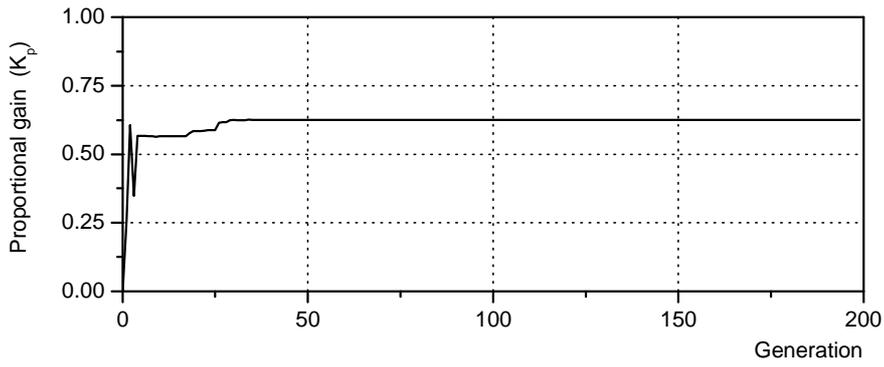
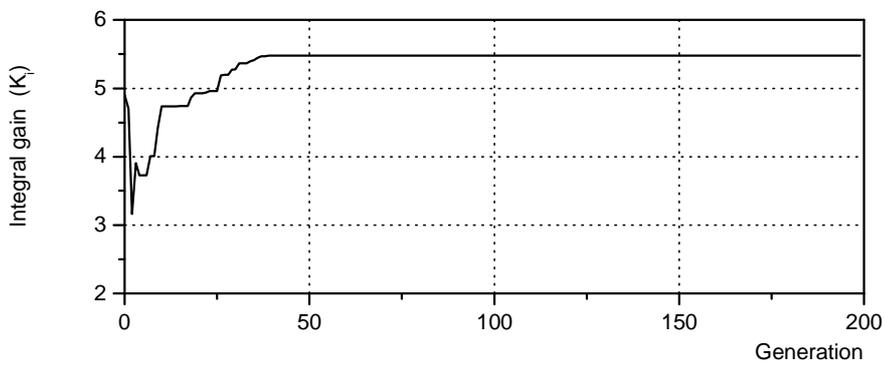


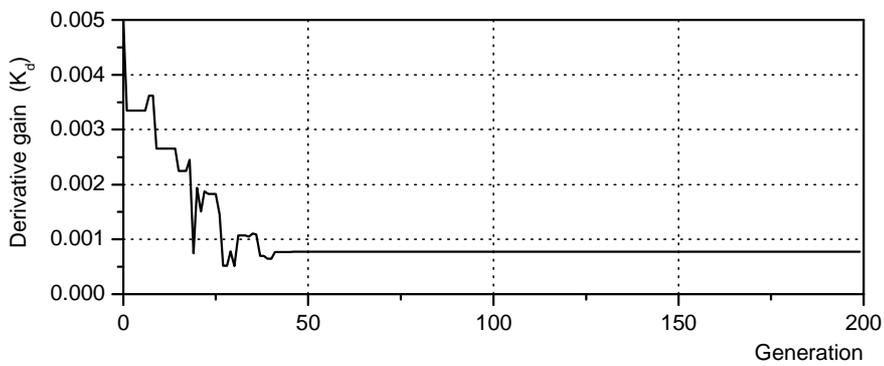
Fig. 3.2 RCGA-based tuning of PID controller parameters



(a) Parameter K_p



(b) Parameter K_i



(c) Parameter K_d

Fig. 3.3 Tuning of PID controller using RCGA

제 4 장 시뮬레이션 및 실험

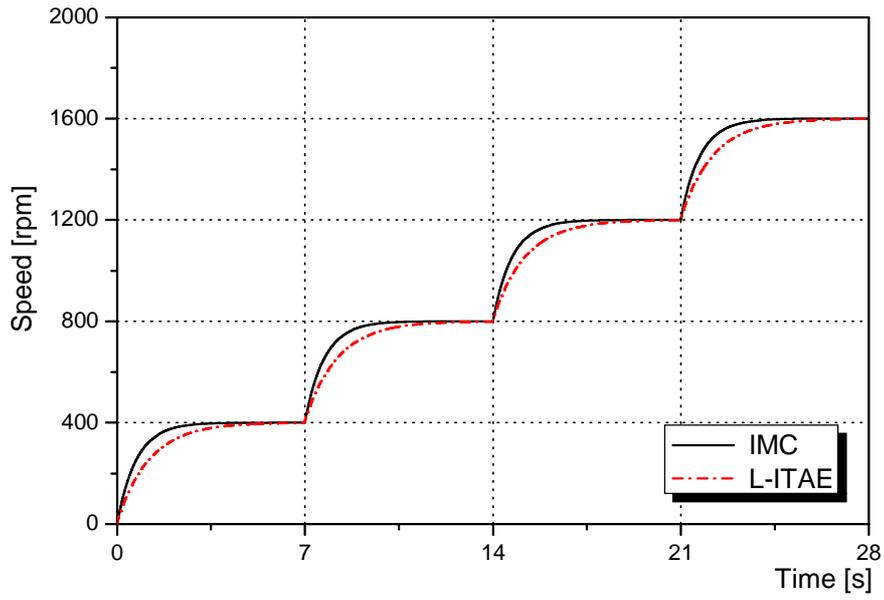
4.1 모델에 대한 PID 제어기의 응답

4.1.1 종래의 제어기와 RCGA의 제어기 응답비교

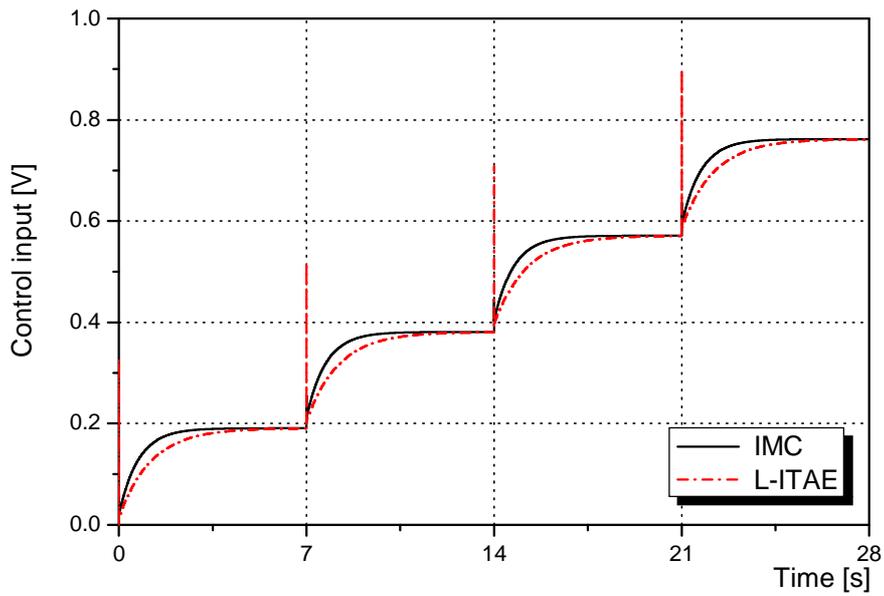
Fig. 4.1에서 Fig. 4.4는 종래에 많이 사용되었던 동조규칙인 Z-N 동조법, C-C 동조법, IMC 동조법, L-ITAE 동조법과 본 논문에서 제안한 RCGA동조법을 이용한 PID 제어기에 의한 응답과 제어 입력을 비교한 것이다.

IMC제어기와 L-ITAE제어기는 각각 3초와 5초가 지나도 정상상태에 도달하지 못한 늦은 응답을 보이고, Z-N제어기는 IMC 제어기와 L-ITAE 제어기에 비해 빠른 응답을 보이나 RCGA 제어기에 비해 정상상태 도달 시간이 느리며 오버슈트가 큰 것을 확인할 수 있다. 제안한 RCGA제어기는 가감속의 모든 회전수 영역에서 기존의 제어기에 비해 오버슈트도 없고 빠른 응답을 보이고 있다.

본 논문에서 C-C에 의한 제어기의 응답 결과는 Table 3.5와 같이 Z-N에 의한 제어기의 파라미터 값과 비슷하여 생략하였다.

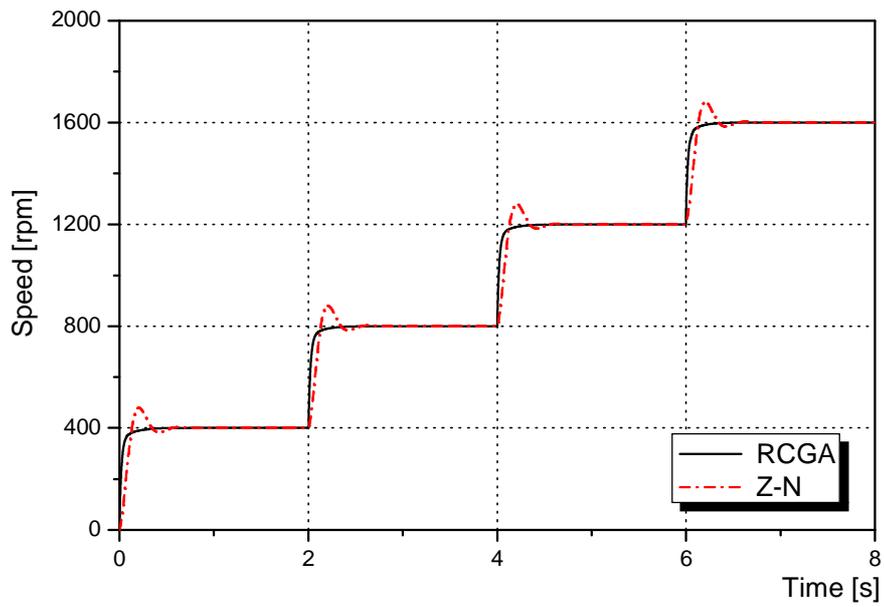


(a) Step responses

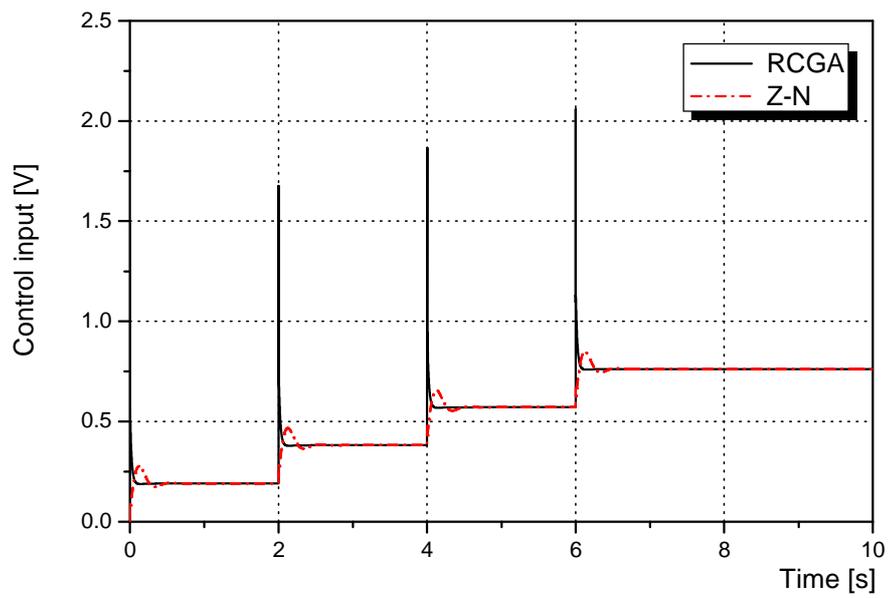


(b) Control inputs

Fig. 4.1 Step responses and control inputs of IMC and L-ITAE controller

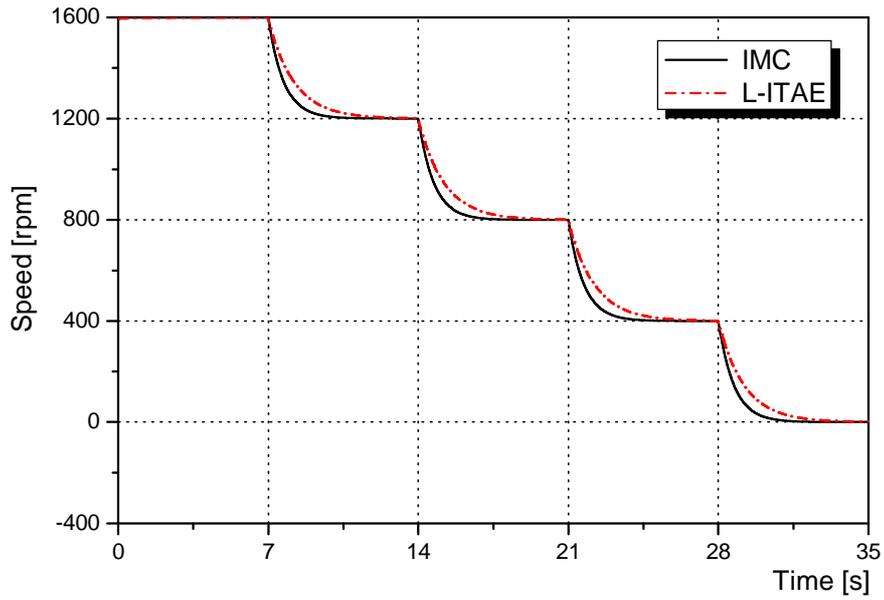


(a) Step responses

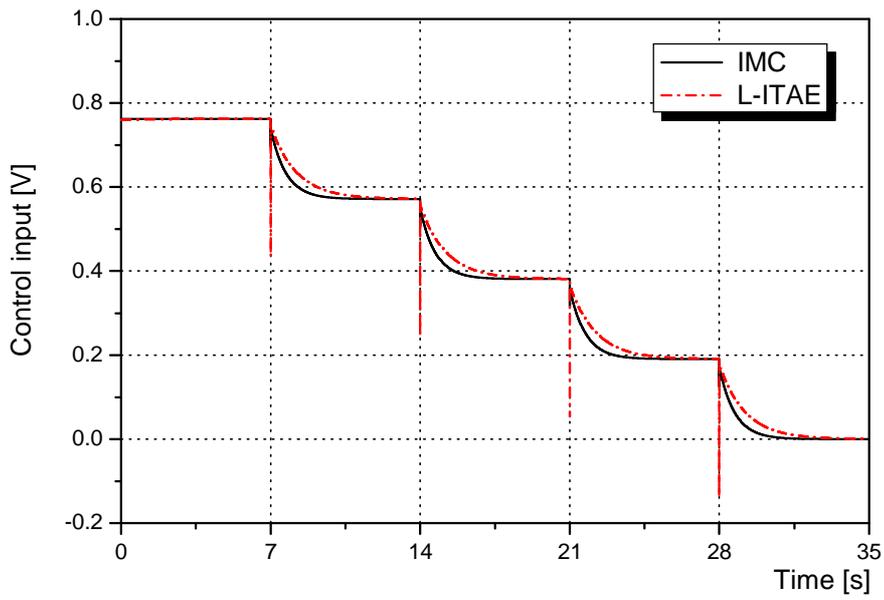


(b) Control inputs

Fig. 4.2 Step responses and control inputs of RCGA and Z-N controller

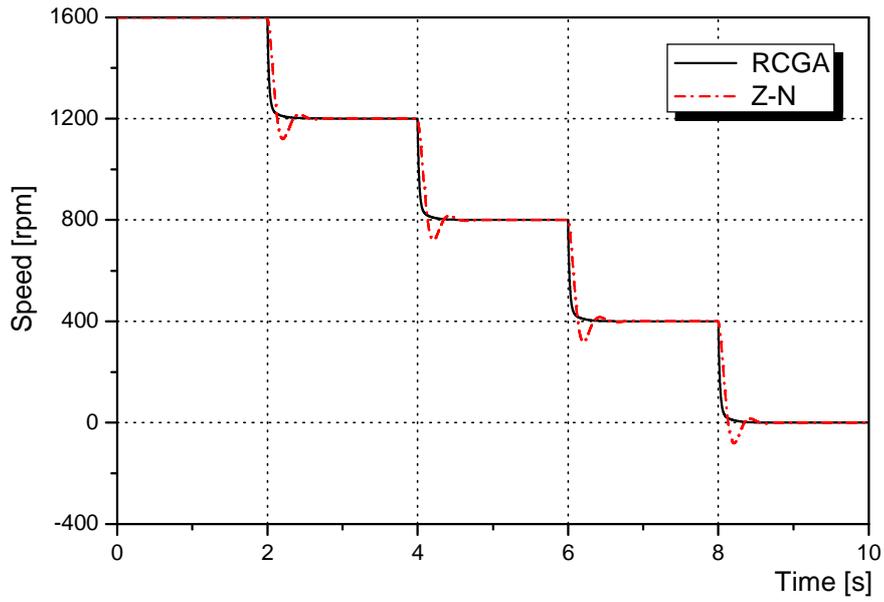


(a) Step responses

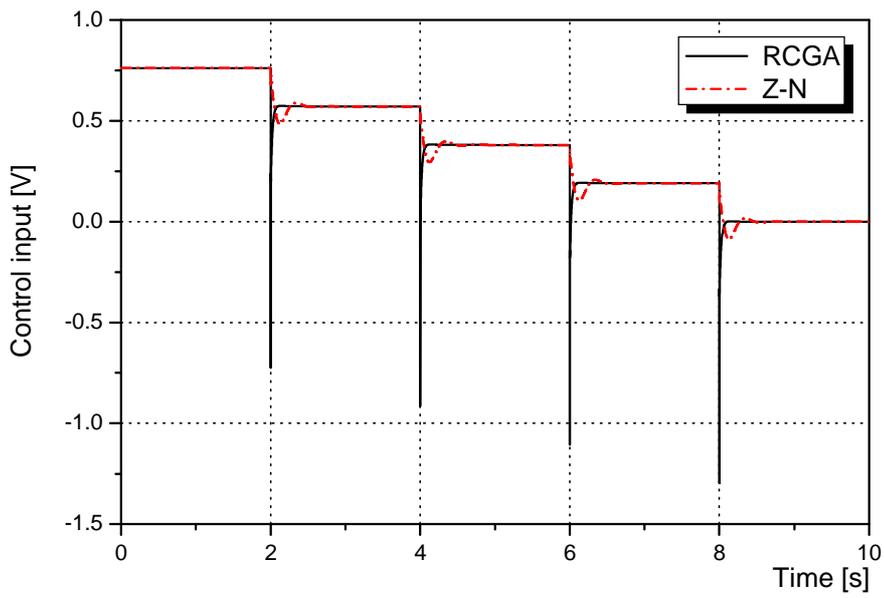


(b) Control inputs

Fig. 4.3 Step responses and control inputs of IMC and L-ITAE controller



(a) Step responses



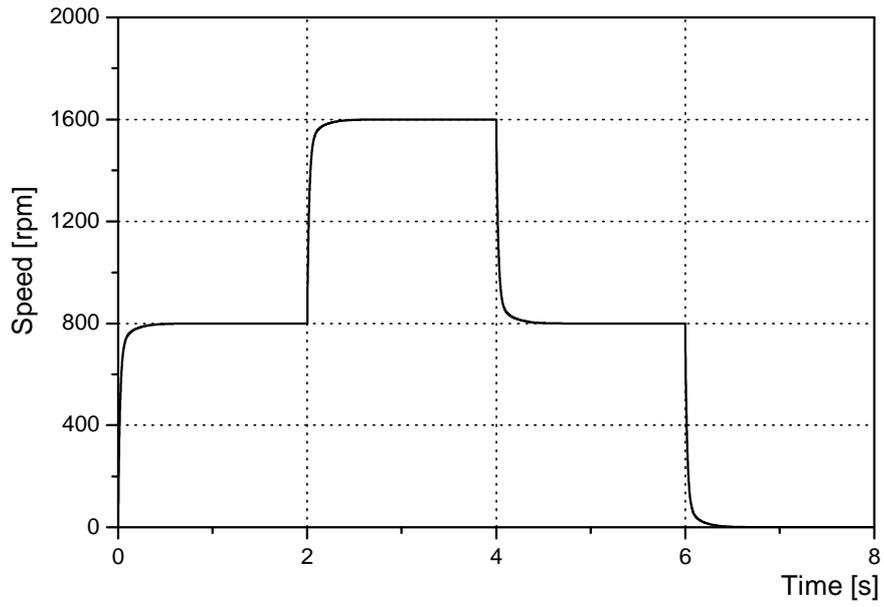
(b) Control inputs

Fig. 4.4 Step responses and control inputs of RCGA and Z-N controller

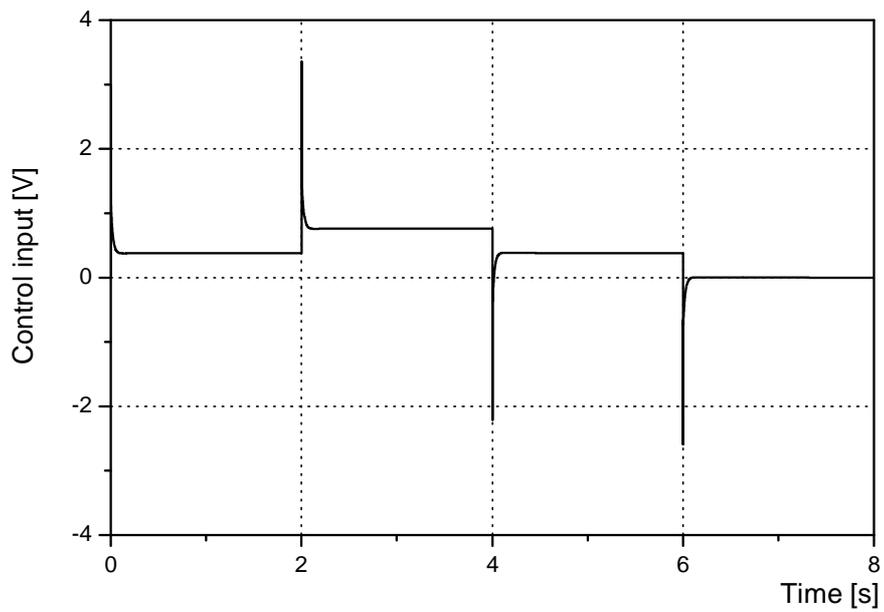
4.1.2. RCGA에 의한 제어기의 응답과 외란에 대한 검토

이제 RCGA에 의한 제어기의 성능을 알아보기 위해 계단상 큰 폭의 회전수 변동과 임의의 목표치 변화에 대한 추종 성능을 알아보려고 한다. Fig. 4.5는 큰 폭의 회전수 변동에 대한 RCGA를 이용한 제어기 응답을 보기 위해 800[rpm]의 계단상 입력을 인가한 경우이고, Fig. 4.6은 임의의 목표치 변화에 대한 추종 성능을 보기 위해 곡선과 기준입력 $y_r = 660\sin(1.5t) + 650\sin(0.7t) + 200\sin(0.25t)$ 를 인가한 경우이다.

Fig. 4.5에서 보듯이 800[rpm]의 회전수 변동에 대해서 제안한 제어기는 만족할 만한 성능을 보이고 있고, Fig. 4.6의 응답에서도 역시 임의의 목표치 변화에 대해서 거의 일치하는 추종성능을 보이고 있다.

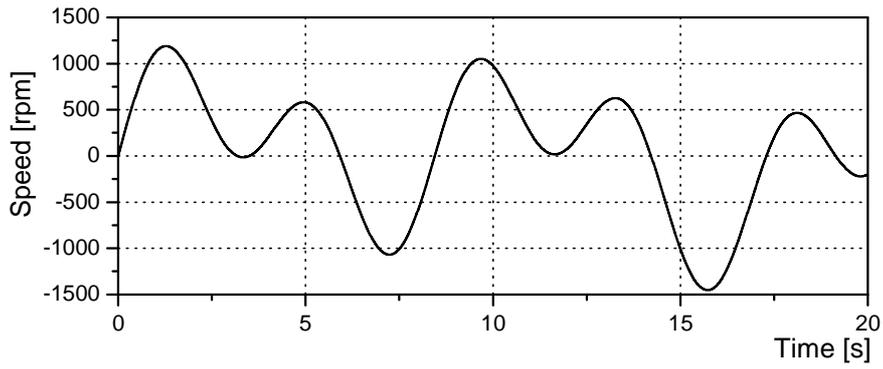


(a) Step response

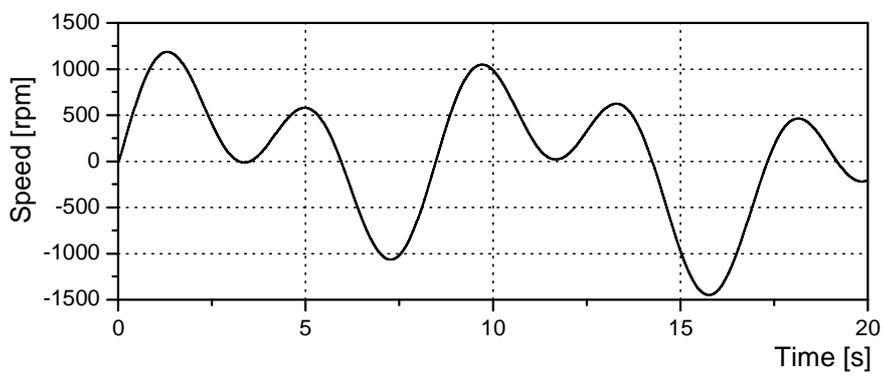


(b) Control input

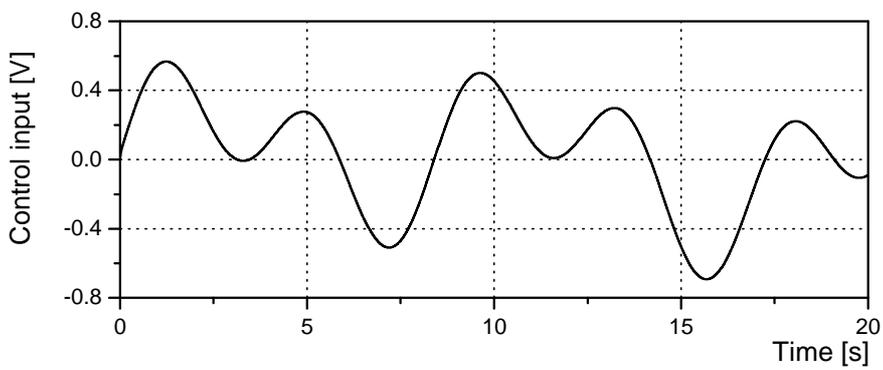
Fig. 4.5 Step response and control input of RCGA controller



(a) Reference input



(b) Response

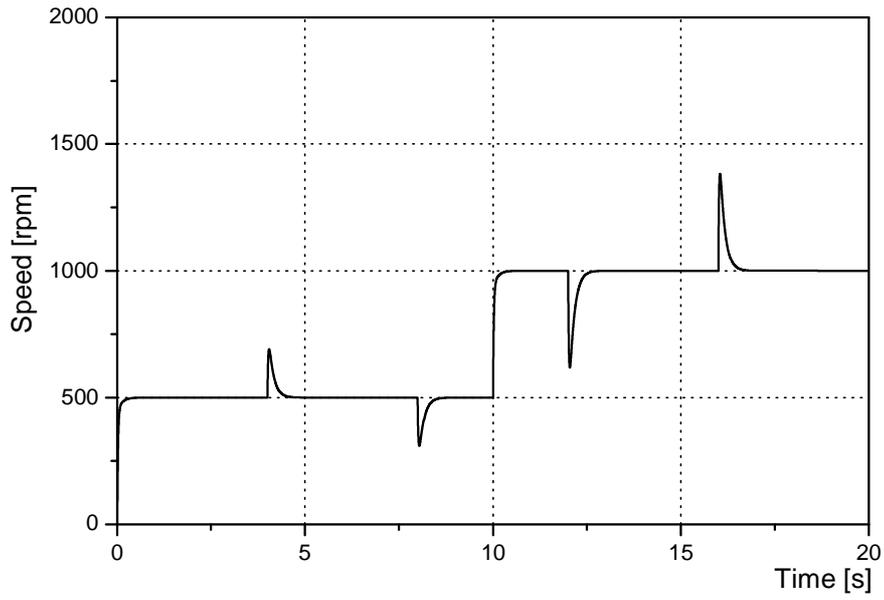


(c) Control input

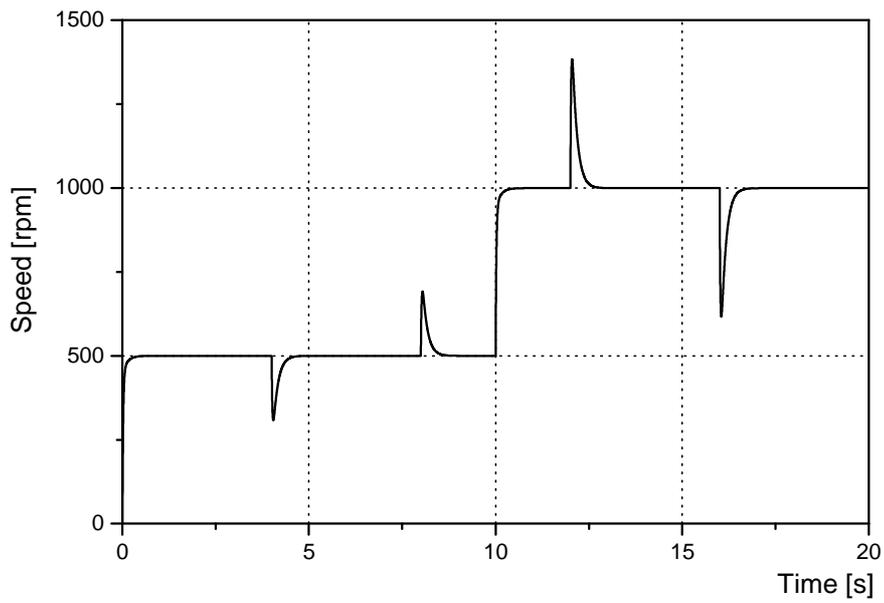
Fig. 4.6 Response and control input of RCGA controller to reference input

외란에 대한 성능을 알아보기 위해 우선 500[rpm]으로 운전 중 4[s]에서 0.5[V]에 해당하는 부하를 4초간 계단상으로 제거하였다가 8[s]에서 다시 부하를 투입하였고, 다음으로 1000[rpm]으로 운전 중 12[s]에서 1[V]에 해당하는 부하를 4초간 계단상으로 가하였다가 16[s]에서 다시 제거해 보았다. Fig. 4.7의 (a)에서 보듯이 외란이 가해진 후 0.6초 만에 정상상태로 돌아오는 양호한 제어 성능을 보이고 있다.

이번에는 반대로 500[rpm]으로 운전 중 4[s]에서 0.5[V]에 해당하는 부하를 4초간 계단상으로 가하였다가 8[s]에서 다시 제거하였고, 다음으로 1000[rpm]으로 운전 중 12[s]에서 1[V]에 해당하는 부하를 4초간 계단상으로 제거하였다가 16[s]에서 다시 부하를 투입해 보았다. Fig. 4.7의 (b)에서 보듯이 외란이 가해진 후 0.6초 만에 정상상태로 돌아오는 양호한 제어 성능을 보이고 있다.



(a) Response



(b) Response

Fig. 4.7 Response of RCGA controller to disturbance

4.2 실험장치에 대한 PID 제어기의 응답

이 절에서는 본 논문에서 설계한 RCGA를 이용한 PID제어기를 실험장치에 적용하여 그 우수성을 검증하고, 만족할 만한 성능을 보이는지 알아본다.

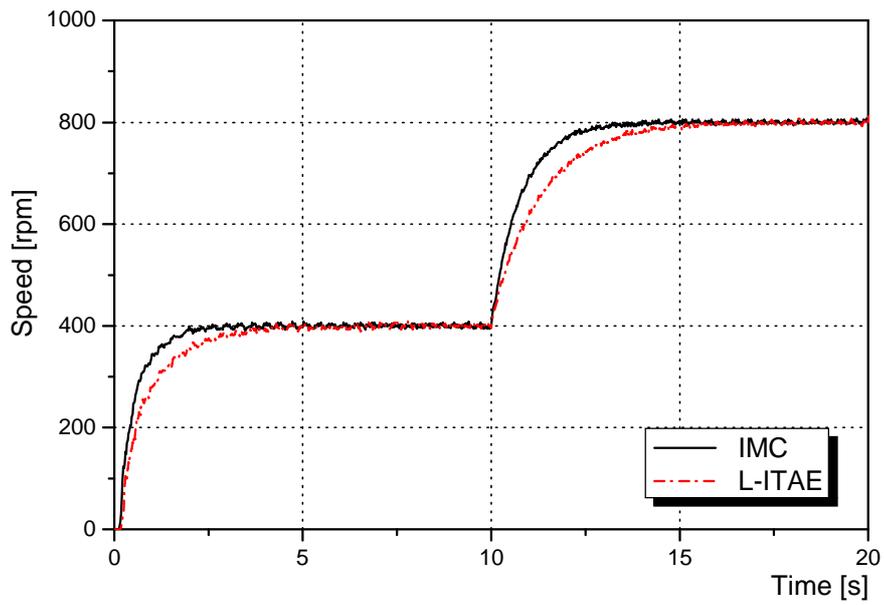
4.2.1 종래의 제어기와 RCGA를 이용한 제어기 응답비교

제어기의 성능을 알아보기 위해 400[rpm]씩 변화하는 계단상의 기준 입력을 사용 하였으며, 종래에 많이 사용된 동조규칙에 의한 제어기와 본 논문에서 제안한 PID 제어기의 응답을 비교하였다.

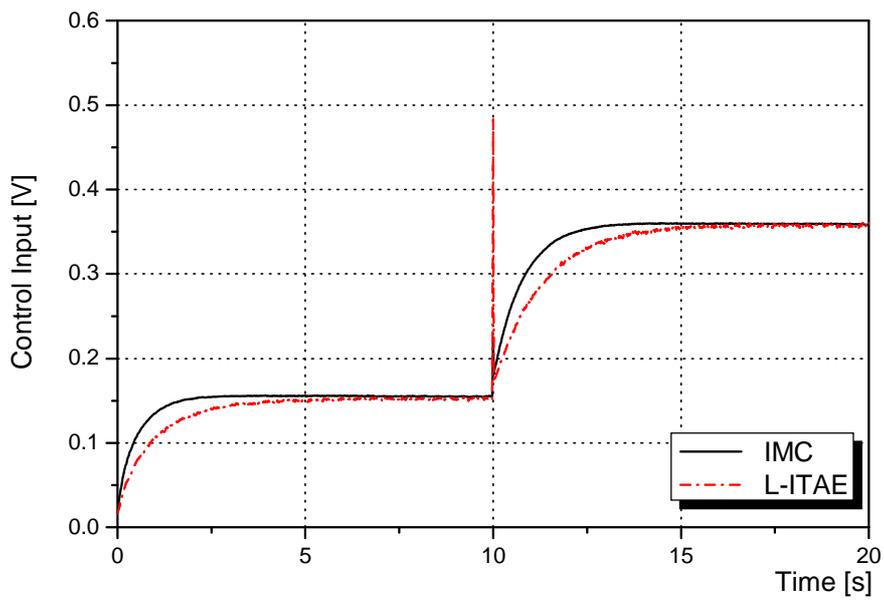
종래에 사용 되었던 제어기들과 제안된 제어기의 성능을 비교하기 위해 Fig. 4.8과 Fig. 4.9는 0[rpm]에서 800[rpm]의 구간까지 계단상으로 400[rpm]씩 증속 운전하는 것을 보이고 있고, Fig. 4.10과 Fig. 4.11은 800[rpm]에서 1600[rpm]의 구간까지 계단상으로 400[rpm]씩 증속 운전하는 것을 보이고 있다. 감속시의 응답 성능을 알아보기 위해 Fig. 4.12와 Fig. 4.13은 1600[rpm]에서 800[rpm]의 구간까지 계단상으로 400[rpm]씩 감속 운전하는 것을 나타내고 있고, Fig. 4.14와 Fig. 4.15는 800[rpm]에서 0[rpm]의 구간까지 계단상으로 400[rpm]씩 감속 운전하는 것을 나타내고 있다.

동작점마다 IMC제어기와 L-ITAE제어기는 각각 3초와 5초가 지나도 정상상태에 도달하지 못하는 늦은 응답을 보이고 있으며, Z-N제어기는 IMC 제어기와 L-ITAE 제어기에 비해 빠른 응답을 보이나 RCGA 제어기에 비해 느리며 오버슈트가 크다. 제안한 RCGA제어기는 가감속의 모든 회전수 영역에서 종래의 제어기에 비해 오버슈트도 없고 빠른 응답을 보이고 있다.

본 논문에서 C-C에 의한 제어기의 응답 결과는 Table 3.5와 같이 Z-N에 의한 제어기의 파라미터 값과 비슷하여 생략하였다.

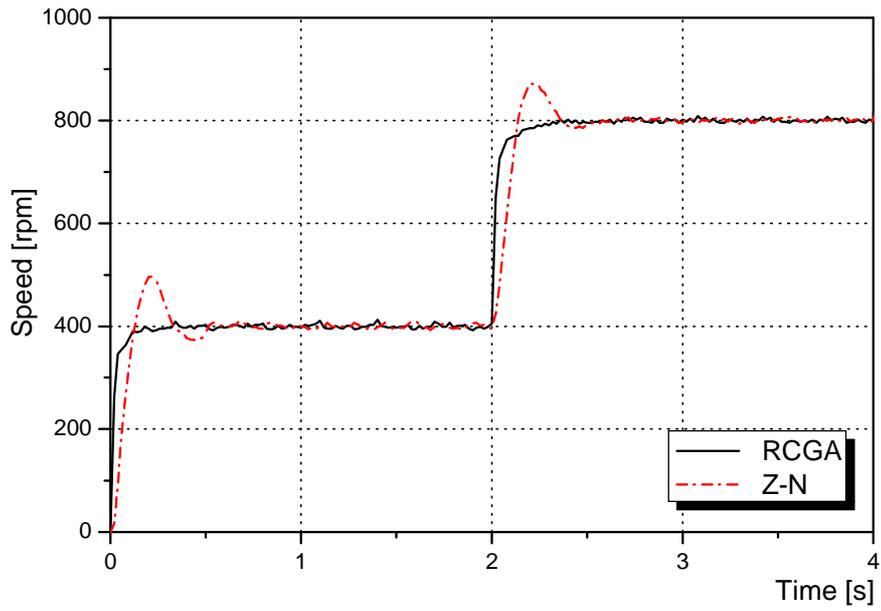


(a) Step responses

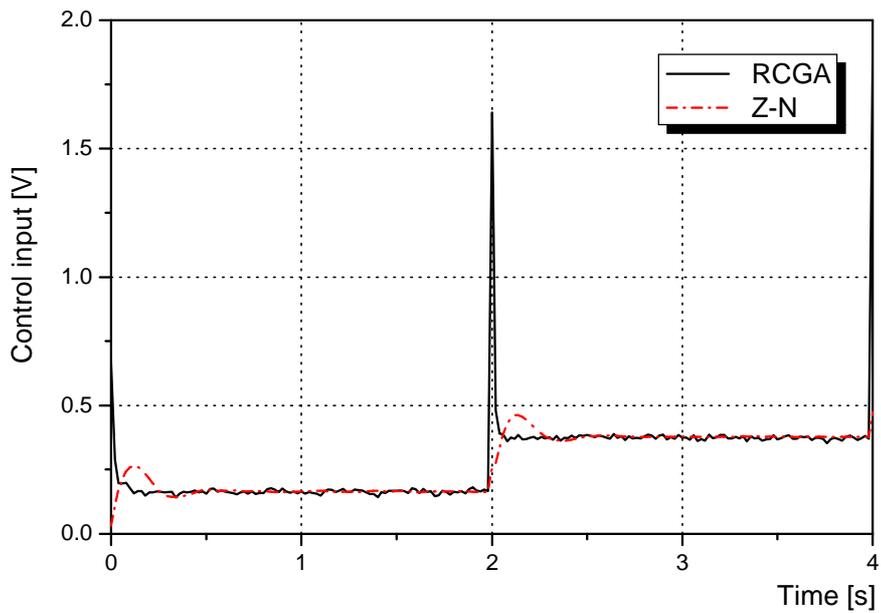


(b) Control inputs

Fig. 4.8 Step responses and control inputs of IMC and L-ITAE controller

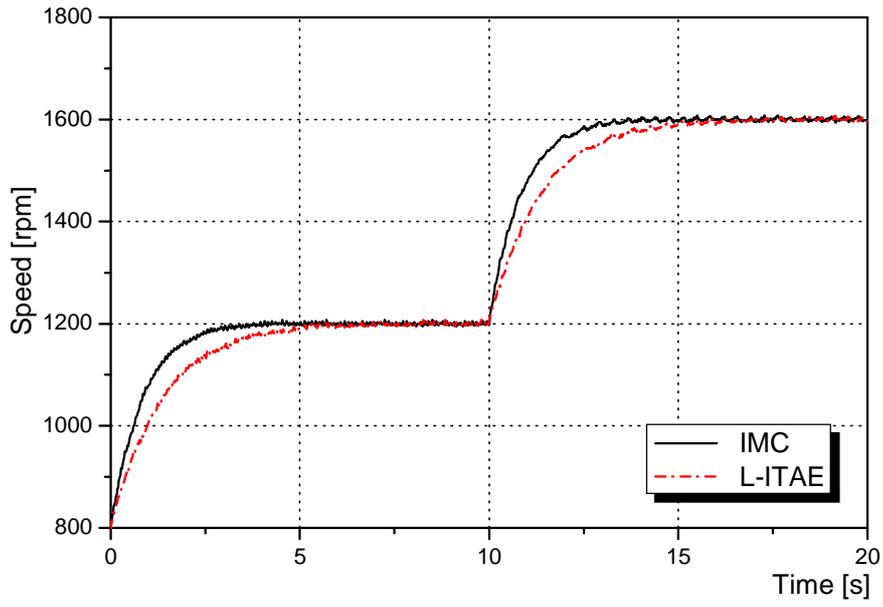


(a) Step responses

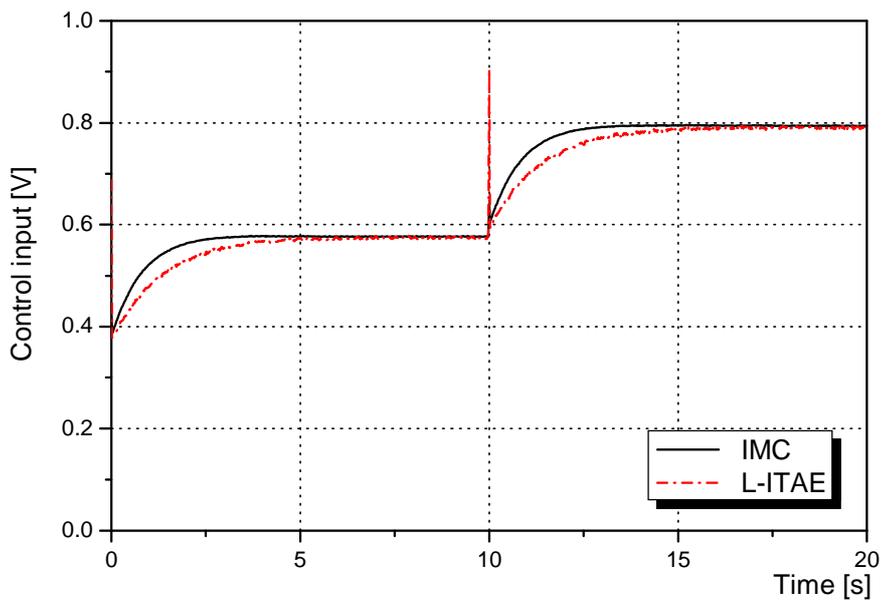


(b) Control inputs

Fig. 4.9 Step responses and control inputs of RCGA and Z-N controller

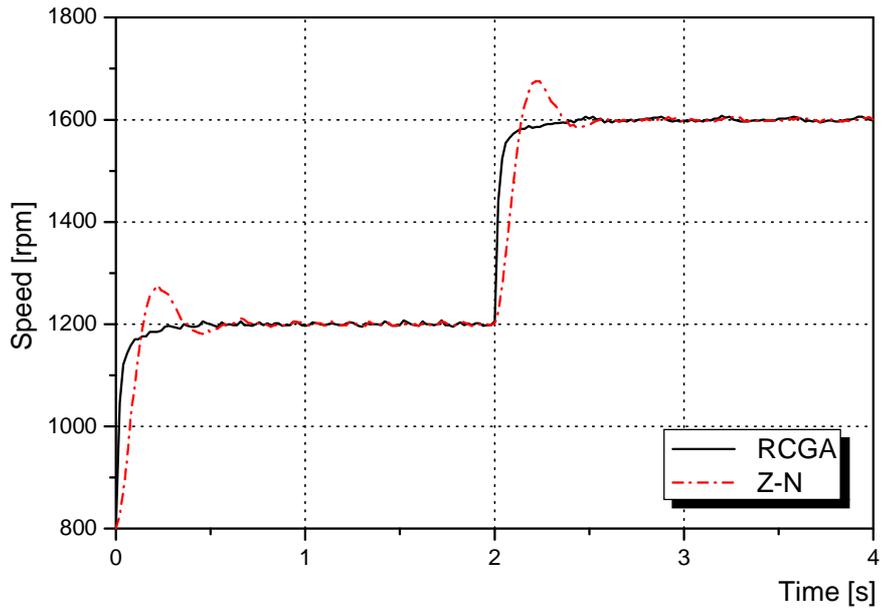


(a) Step responses

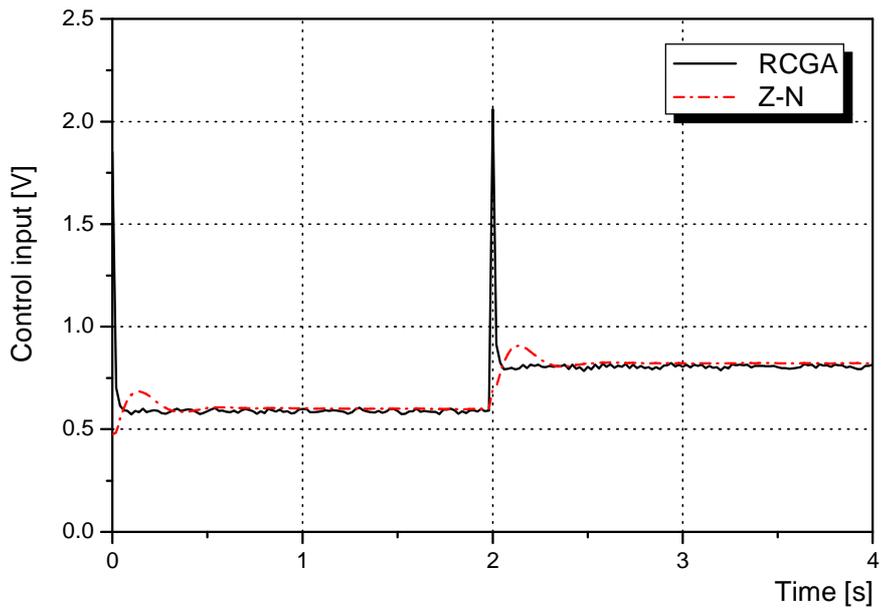


(b) Control inputs

Fig. 4.10 Step responses and control inputs of IMC and L-ITAE controller

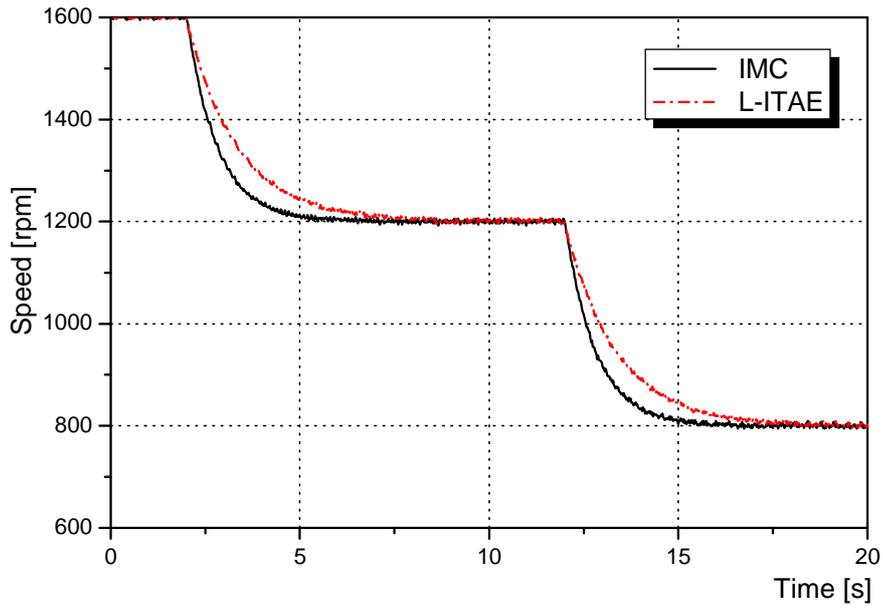


(a) Step responses

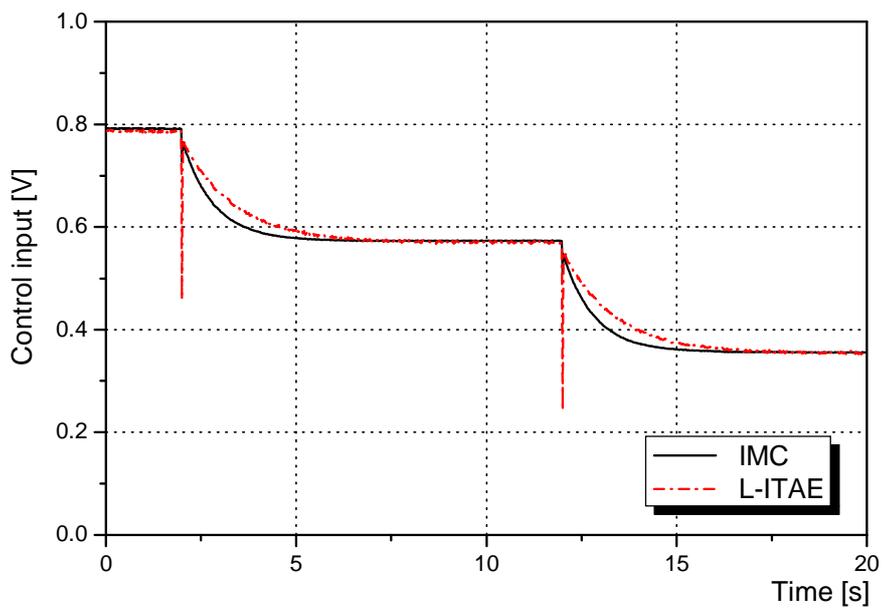


(b) Control inputs

Fig. 4.11 Step responses and control inputs of RCGA and Z-N controller

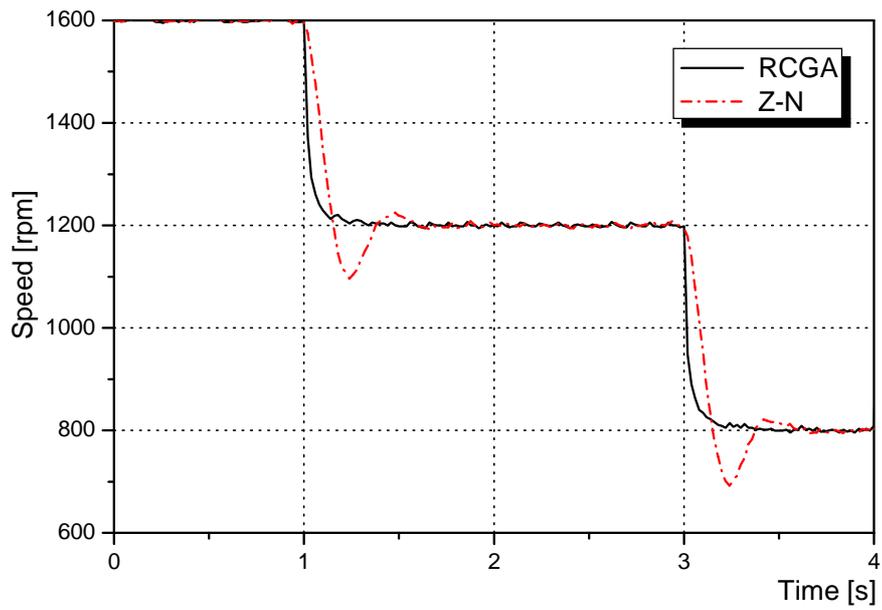


(a) Step responses

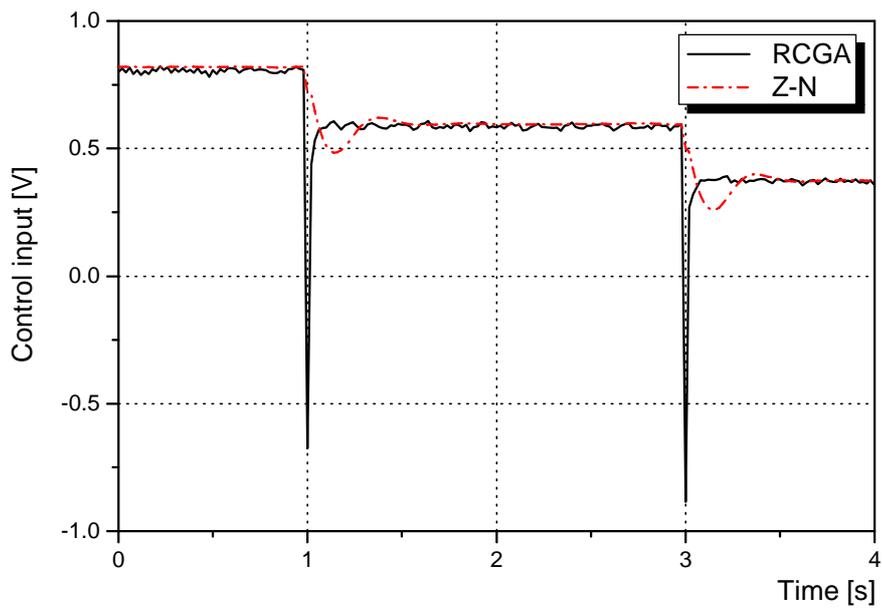


(b) Control inputs

Fig. 4.12 Step responses and control inputs of IMC and L-ITAE controller

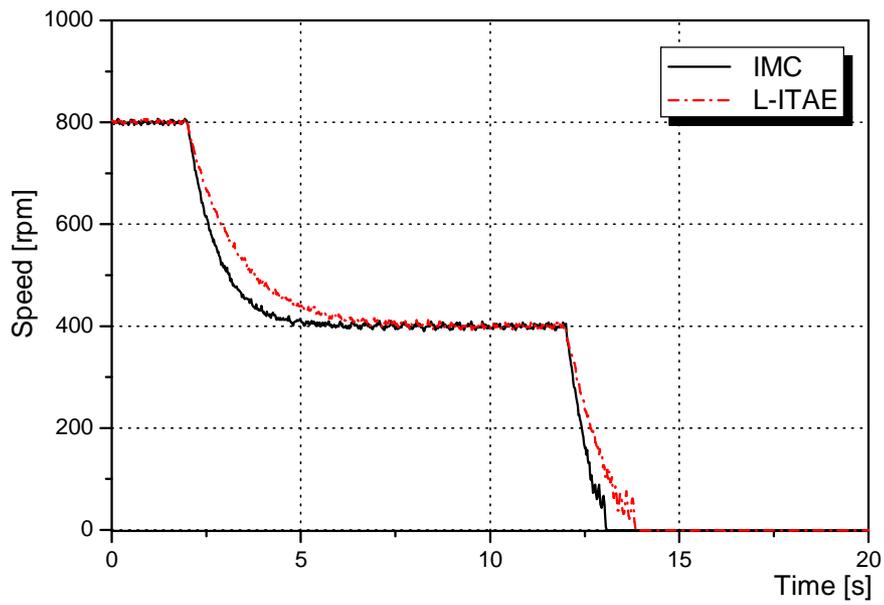


(a) Step responses

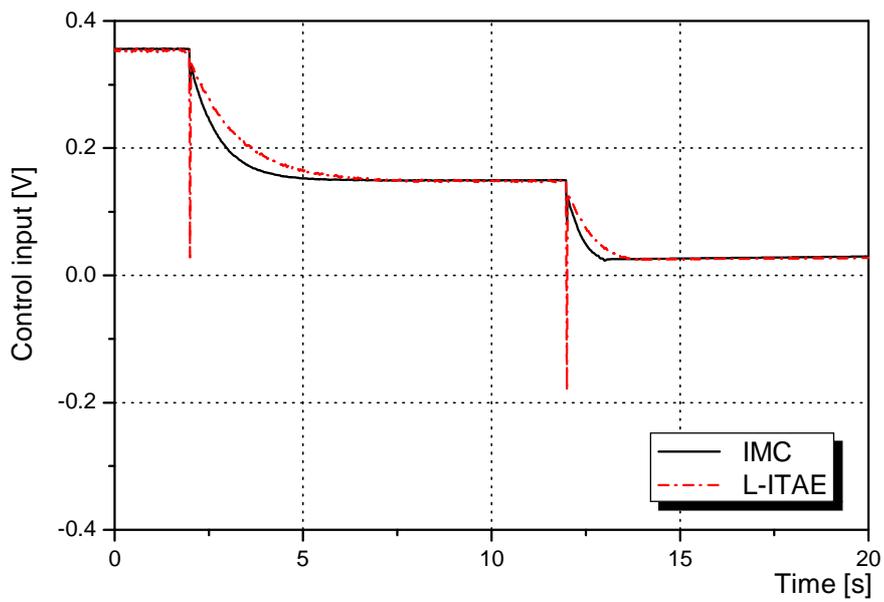


(b) Control inputs

Fig. 4.13 Step responses and control inputs of RCGA and Z-N controller

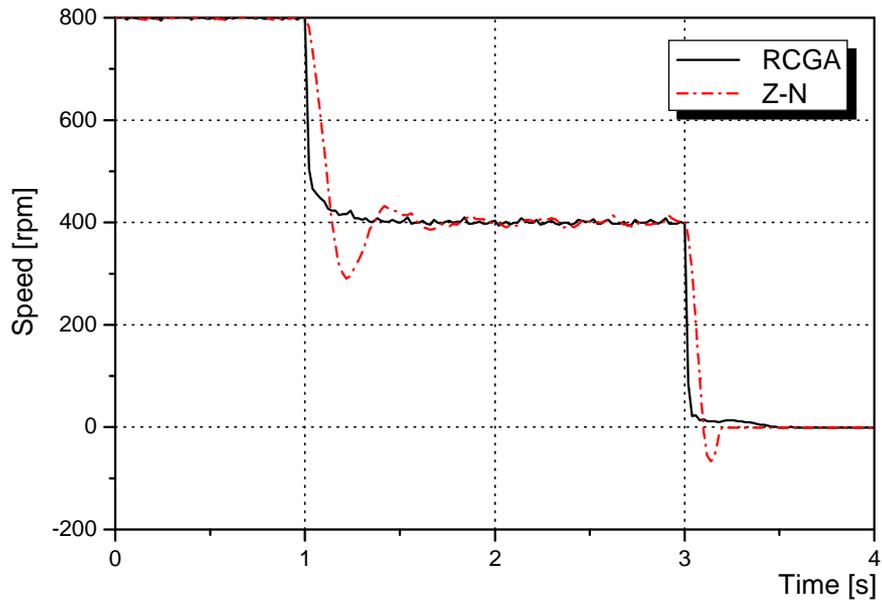


(a) Step responses

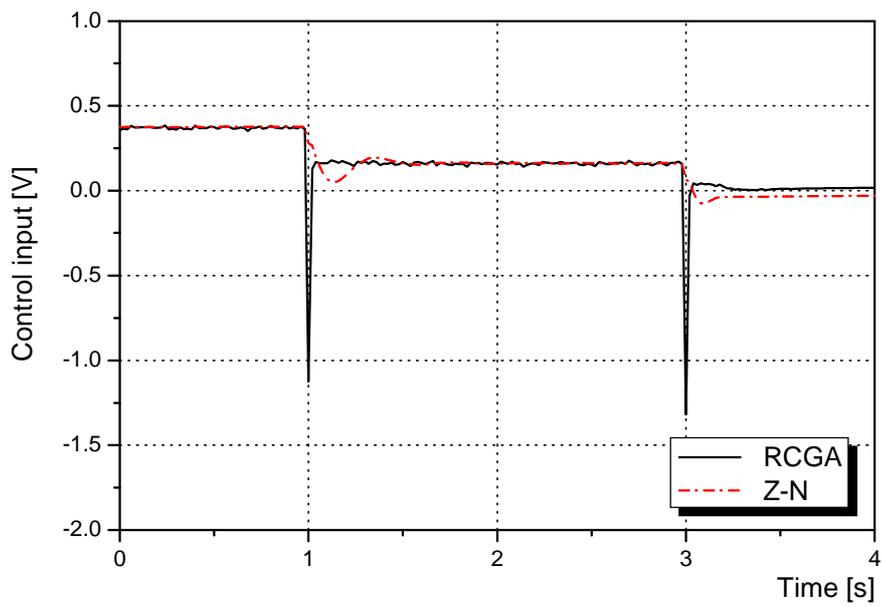


(b) Control inputs

Fig. 4.14 Step responses and control inputs of IMC and L-ITAE controller



(a) Step responses



(b) Control inputs

Fig. 4.15 Step responses and control inputs of RCGA and Z-N controller

4.2.2 RCGA에 의한 제어기의 응답과 외란에 대한 검토

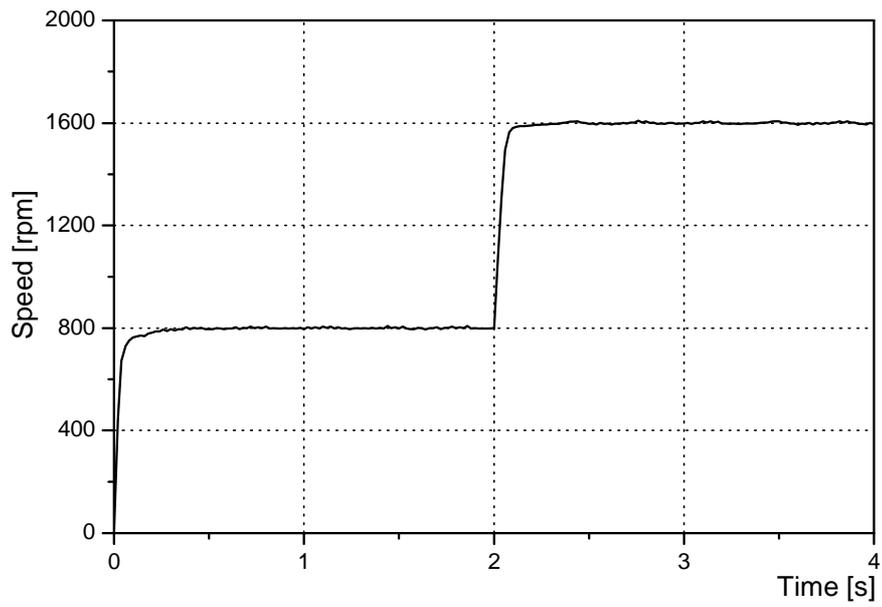
RCGA에 의한 제어기가 큰 폭의 회전수 변동에 대해 만족할 만한 성능을 보이는지 알아보기 위해, Fig. 4.16과 Fig. 4.17은 800[rpm]의 계단상 입력을 인가한 경우의 응답을 나타내고 있다. 큰 폭의 회전수 변동에 대해서도 역시 제어 입력이 순간적으로 큰 폭으로 빠르게 변하며, 오버슈트가 없는 좋은 성능을 보이고 있다.

Fig. 4.18은 입력의 변화에 대한 추종 성능을 보기 위해 임의의 곡선과 입력 $y_r = 660\sin(1.5t) + 650\sin(0.7t) + 200\sin(0.25t)$ 에 대한 응답을 비교하였다. 회전수가 0[rpm]근처인 3.5[s]와 12[s]부근에서의 출력이 점성마찰과 쿨롱마찰 때문에 곡선인 기준 입력에 대해 약간의 흔들림이 있지만 전체적으로 만족할 만한 응답을 보이고 있다.

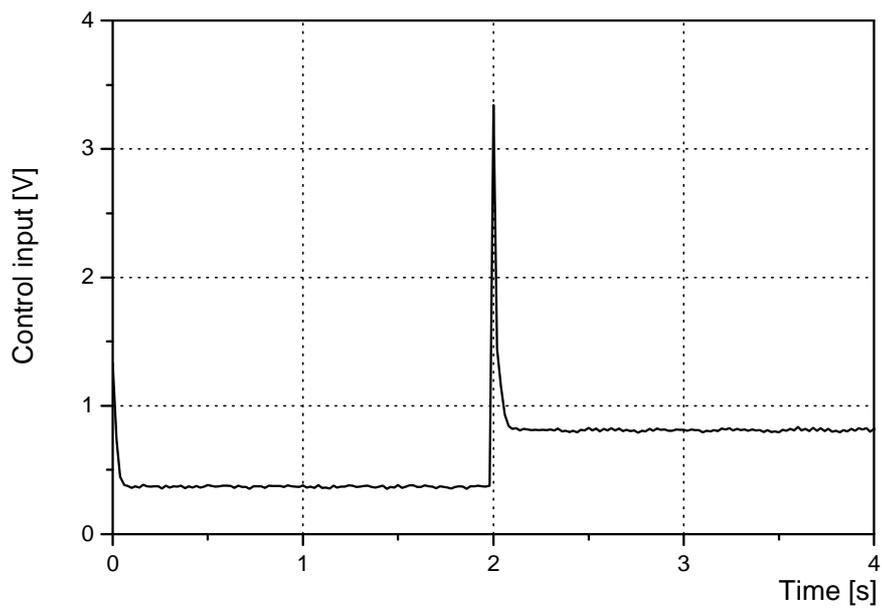
Fig. 4.19는 여러 가지 크기의 계단 입력에 대한 응답을 나타내며 역시 만족할 만한 응답 성능을 보이고 있다.

외란에 대한 성능을 알아보기 위해 우선 500[rpm]으로 운전 중 4[s]에서 0.5[V]에 해당하는 부하를 4초간 계단상으로 제거하였다가 8[s]에서 다시 부하를 투입하였고, 다음으로 1000[rpm]으로 운전 중 12[s]에서 1[V]에 해당하는 부하를 4초간 계단상으로 가하였다가 16[s]에서 다시 제거해 보았다. Fig. 4.20에서 보듯이 외란이 가해진 후 0.6초 정도 만에 정상상태로 돌아오는 양호한 제어 성능을 보이고 있다.

이번에는 회전수를 높여 1000[rpm]으로 운전 중 4[s]에서 0.5[V]에 해당하는 부하를 4초간 계단상으로 가하였다가 8[s]에서 다시 제거하였고, 다음으로 1500[rpm]으로 운전 중 12[s]에서 1[V]에 해당하는 부하를 4초간 계단상으로 제거하였다가 16[s]에서 다시 부하를 투입해 보았다. Fig. 4.21에서 보듯이 외란이 가해진 후 0.6초 정도 만에 정상상태로 돌아오는 양호한 제어 성능을 보이고 있다.

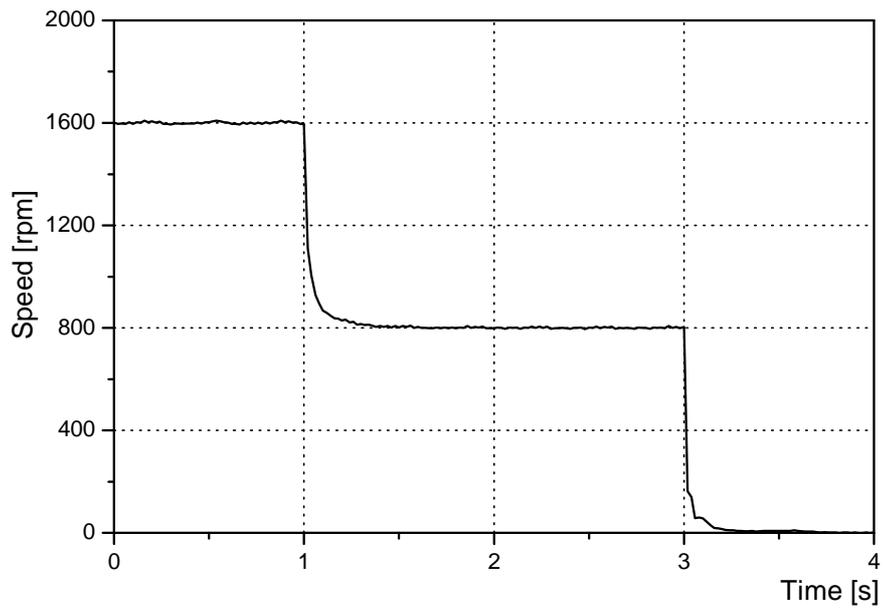


(a) Step response

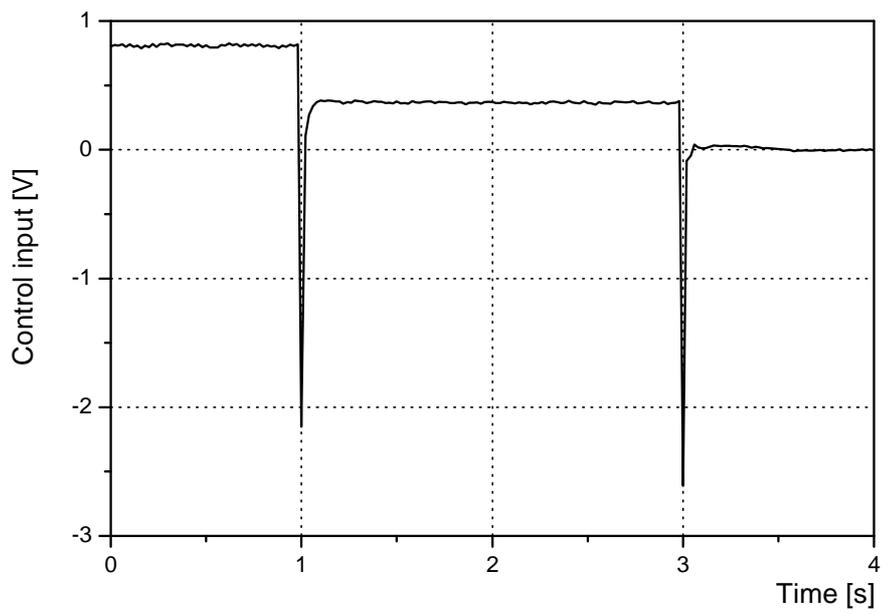


(b) Control input

Fig. 4.16 Step response and control input of RCGA controller

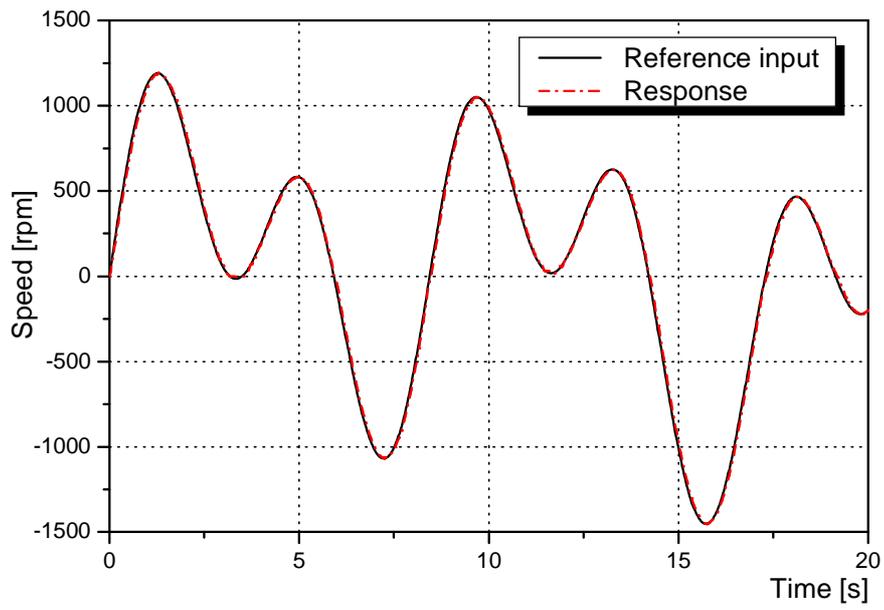


(a) Step response

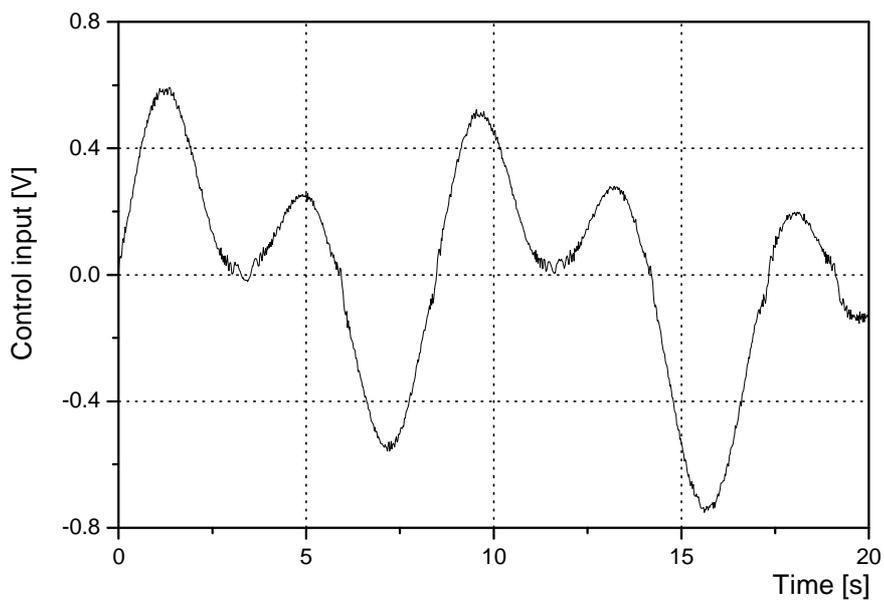


(b) Control input

Fig. 4.17 Step response and control input of RCGA controller

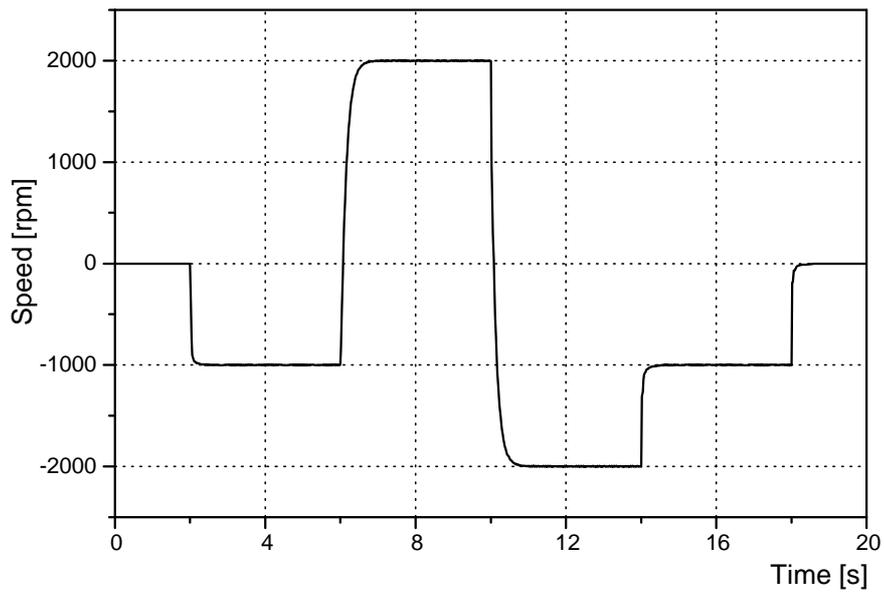


(a) Reference response

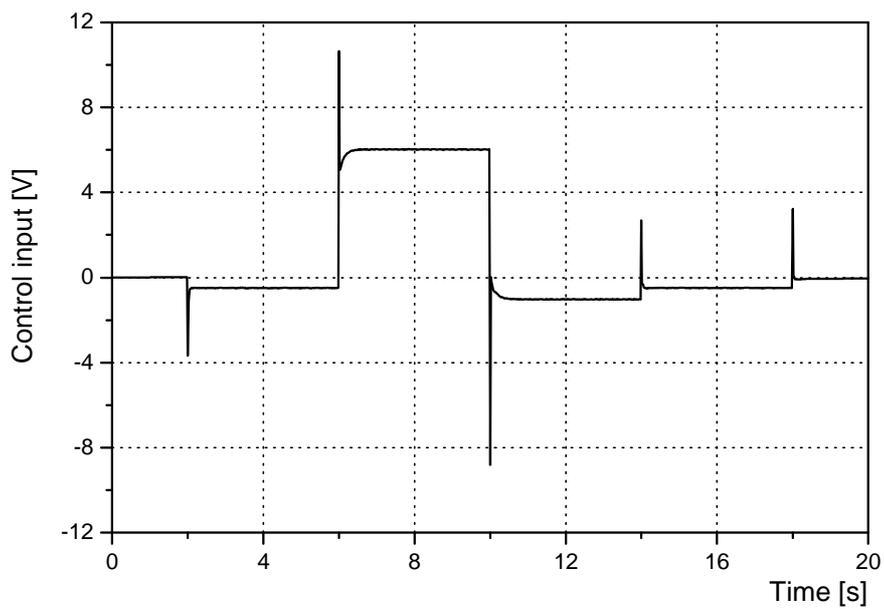


(b) Control input

Fig 4.18 Response of RCGA controller to reference input

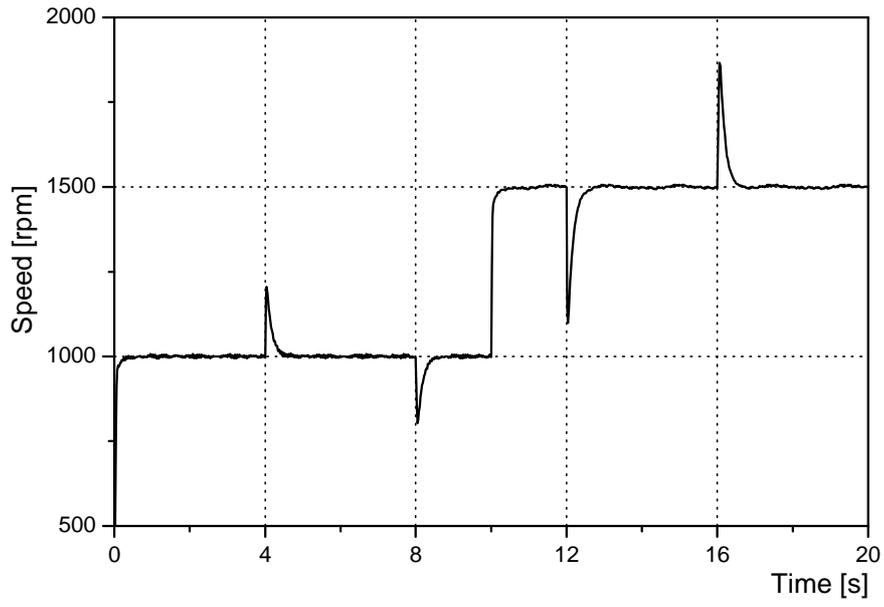


(a) Step response

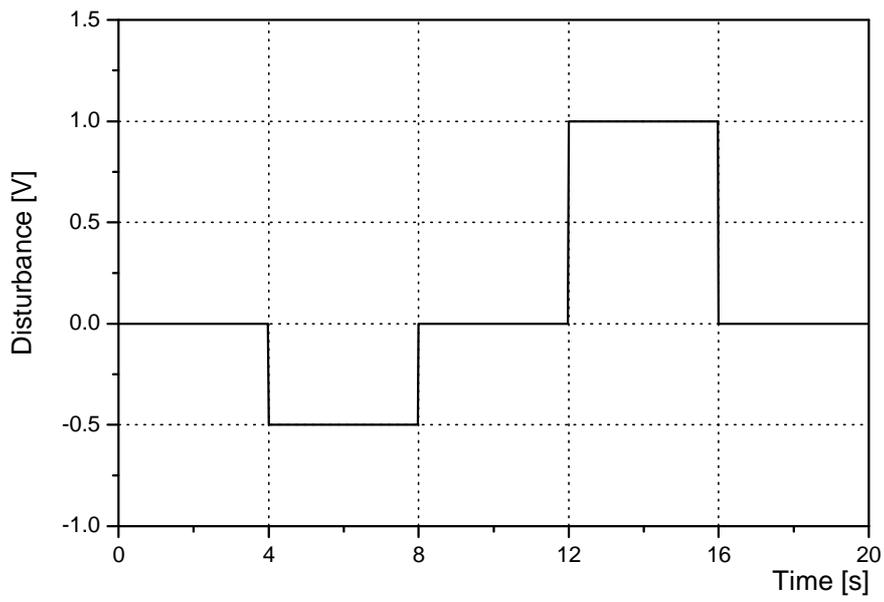


(b) Control input

Fig. 4.19 Step response and control input of RCGA controller

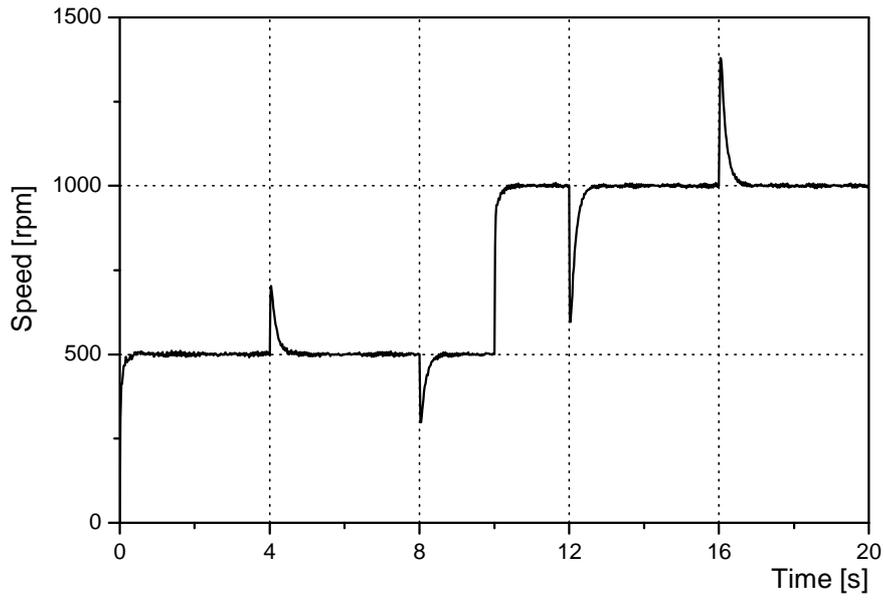


(a) Response

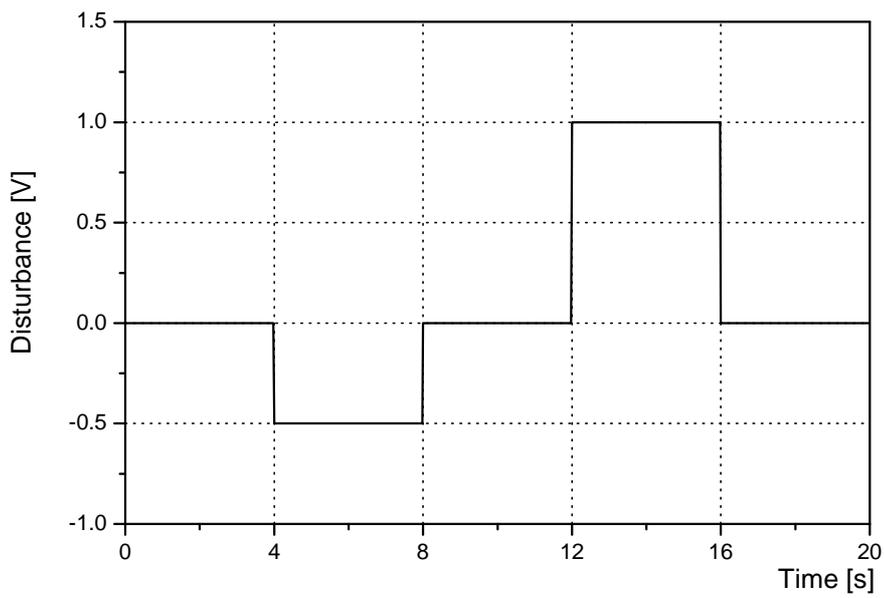


(a) Disturbance

Fig. 4.20 Response and disturbance of RCGA controller



(a) Response



(b) Disturbance

Fig. 4.21 Response and disturbance of RCGA controller

제 5 장 결 론

본 논문에서는 실수코딩 유전알고리즘을 이용하여 직류모터의 PID 제어를 설계하는 방법을 제시하였다. 먼저 직류모터의 수학적 모델링에 대해서 알아보았고, 실제 실험장치인 Feed back 사의 "Precision Servo workshop 33-008"의 입출력 데이터와 실수코딩 유전알고리즘(RCGA)을 이용하여 시스템의 파라미터를 동정하였다. 본 시스템의 경우 각 동작점에서의 모델이 크게 변하지 않으며, 실험장치와 모델의 출력 비교를 통해 제안된 알고리즘으로 얻어진 수학적 모델이 시스템과 일치함을 확인할 수 있었다.

제안한 제어기의 성능을 알아보기에 앞서 종래의 동조규칙을 이용한 PID 제어를 설계하였다. 시뮬레이션과 실험을 통해 종래의 동조규칙을 이용한 PID 제어기와 RCGA를 이용한 PID 제어기의 응답을 비교하고, 제안한 제어기의 우수성을 검증하였다.

제안한 제어기를 다양한 속도 구간과 큰 폭의 회전수 변동에 대해 적용하여 만족할 만한 응답 성능을 보이고 있음을 확인하였다. 그리고 임의의 기준입력변화에 대한 추종성능과 계단상 외란에 대한 응답 역시 양호함을 확인하였다.

향후 점성마찰과 쿨롱마찰을 고려한 연구와, 최근에 큰 관심의 대상이 되고 있으며 직류모터의 사용 빈도가 높은 로봇분야에 적용할 수 있도록 로봇 사용 환경에 대한 연구가 진행되어야 할 것으로 생각된다.

참 고 문 헌

- [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] J. H. Holland, Adaptation in Natural Artificial System, The university of Michigan Press, Michigan, 1975.
- [9] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000.
- [10] 진강규, 주상래, "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구", 제어·자동화·시스템공학 논문지, Vol. 6, No. 4, 2000.
- [11] J. G. Ziegler and N. B. Nichols, "Optimum setting for PID controllers", Trans. ASME, Vol. 64, pp. 759-768, 1942.
- [12] G. H. cohen and G. A. Coon, "Theoretical considerations of retarded control", Trans. ASME, Vol. 75, pp. 827-834, 1953.
- [13] M. Morari, E. Zafiriou, Robust process control, Prentice-Hall, Englewood Cliffs, NJ, 1989.
- [14] A. M. Lopez, C. L. Miller and C. L. Murill, "Tuning controller with error-integral criteria", instrumentation Technology, Vol. 14(2), 57-62, 1967.