

GA를 이용한 전류 앰프의 파라미터 최적화 The Parameter Optimization of Current Amplifier with GA

양주호·정황훈·김영완

J. H. Yang, H. H. Jeong and Y. W. Kim

Key Words : Current Amplifier(전류 증폭기), Genetic Algorithm(GA, 유전 알고리즘), Parameter Optimization(파라미터 최적화)

Abstract : The current type amplifier is the device that is used for an actuator as the motor's torque controller. However, it is too difficult to select the parameter value that has the desired output because the current type amplifier's transfer function is too complex. This study concern about the design of the current type amplifier with the desired output. From the modeled transfer function of the current type amplifier, the optimal parameter values of the transfer function can be selected in order to have the desired output using the Real Coded Genetic Algorithm(RCGA). The real circuit is made with the selected parameter value. The step response of the real circuit is in good agreement with the desired step response.

1. 서 론

전류형 앰프는 모터의 토크제어와 같은 능동부하의 액추에이터로 사용된다.¹⁾ 이러한 전류형 앰프에는 전압을 입력으로 하여 전류를 출력하는 형태(VCCS, voltage controlled current source)와 전류를 입력으로 하여 전류를 출력하는 형태(CCCS, current controlled current source)가 있다. 보통의 경우, DAC(Digital to Analog Converter)를 통해 출력되는 제어신호는 전압의 형태를 가지므로 본 연구에서는 VCCS로 전류형 앰프를 설계하도록 한다.²⁾

일반적으로 전류형 앰프의 전달함수는 복잡한 형태를 가지고 있기 때문에 희망하는 출력을 갖도록 파라미터 값을 선택하는 것은 쉽지 않다. 현장에서 제조회사로부터 제공 되어지는 데이터 시트를 이용하여 안정한 출력을 갖는 파라미터 값을 선정한다. 하지만 이러한 방법을 이용할 경우, 개발자가 희망하는 임의의 출력을 갖도록 파라미터 값을 선정하는 것은 힘들다. 전달함수를 이용하여 개발자가 의도하는 출력을 갖도록 전류형 앰프를 설계하는 경우, 최적의 파라미터 값을 선택하기 위하여 넓은 해 영역을 살펴야하는 어려움이 있다.

본 연구에서는 모터 등과 같이 저항과 인덕턴스를 갖는 부하를 구동하는 전류형 앰프의 설계를 목표로 하였다. 이를 위하여 먼저 하드웨어적인 VCCS 회로를 구성하였고, 이를 수학적인 모델링(전달함수)을 구하였다. 구해진 전달함수의 응답이 설계자가 희망하는 응답이 되도록 전달함수의 각 파라미터 값들을 RCGA(Real Coded Genetic Algorithm)를 이용하여 선정하였다. 선정된 파라미터 값을 이용하여 실제 회로를 구성하였고, 구성된 회로의 스텝응답을 측정하여 검토함으로써 개발자가 희망하는 전류 앰프 회로의 설계가 가능함을 확인하였다.

2. VCCS회로의 구성과 모델링

2.1 VCCS 회로의 모델링

Fig. 1은 본 연구에서 구성한 VCCS의 회로를 나타낸 것이다. Fig. 1에서의 V_{IN} 은 전압형 입력이고, I_O 는 부하에 흐르는 출력전류이며 LOAD로 표시된 것은 저항 R 과 인덕턴스 L 을 갖는 전기적 부하(모터 등)를 표시하고 있다. Fig. 1에 표현된 VCCS는 기본적인 전력용 연산증폭기 회로에 출력 전류를 측정하기 위한 저항 R_S 를 추가하고, 회로의 과도특성을 개선하기 위하여 연산증폭기의 부(-)입력과 출력 사이에 C_f , R_d 를 첨가한 회로이다. 그리고, R_F 는 출력전류 I_O 의 피드백 저항이다.

접수일 : 2006년 9월 1일, 채택확정 : 2006년 10월 20일
양주호(책임저자) : 부경대학교 기계공학부
E-mail : yangjh@pknu.ac.kr Tel : 051-620-1580
정황훈, 김영완 : 부경대학교 대학원

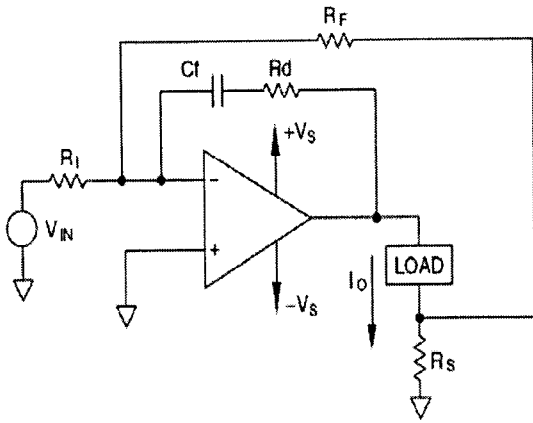


Fig. 1 VCCS for floating load

Fig. 1의 회로에서 전압 V_{IN} 을 입력으로 하고, 부하전류 I_O 를 출력으로 선정하였을 때의 전달함수 $G(s)$ 는 식(1)과 같이 유도된다. 단, A 는 연산증폭기의 개루프 이득(open loop gain)이다.

$$G(s) = \frac{I_O}{V_{IN}} = \frac{-n_1s - n_2}{(a_1a_2 - a_3)s^2 + (a_1b_1 + a_2b_2 - b_3)s + b_1b_2 - c_1} \quad (1)$$

여기서,

$$n_1 = \left(\frac{R_S}{A} + R_S + R_f\right)R_f R_d C_f$$

$$n_2 = \left(\frac{R_S}{A} + R_S + R_f\right)R_f$$

$$a_1 = (b_2 R_d C_f + \frac{R_1 R_f}{A} C_f + R_1 R_f C_f)$$

$$a_2 = (R_S + R_f)L$$

$$a_3 = \left(\frac{R_S}{A} + R_S + R_f\right)R_1 R_d C_f L$$

$$b_1 = (R_S R + R_f R_S + R_f R)$$

$$b_2 = \left(\frac{R_f}{A} + \frac{R_1}{A} + R_1\right)$$

$$b_3 = \left(\frac{R_S}{A} + R_S + R_f\right)R_1 (R_d C_f R + L)$$

$$c_1 = \left(\frac{R_S}{A} + R_S + R_f\right)R_1 R$$

3. RCGA에 의한 VCCS의 파라미터 최적화

3.1 파라미터 선정법

VCCS의 파라미터 값을 구하는 방법에는 제조회

사로부터 주어지는 데이터 시트 내의 자료를 통해 미리 선정된 영역의 값을 사용하는 방법과 사용하고자 하는 회로를 수학적 모델링(전달함수)을 구하고 이를 이용하여 파라미터 값을 선정하는 방법이 있다.

첫 번째 방법은 데이터 시트로부터 입력전압과 부하의 형태, 용량 등으로부터 이용하고자 하는 회로의 파라미터를 선형보간법 등을 이용하여 구하는 방법이다. 이 경우, 제조사에서 의도한 안정한 응답은 얻을 수 있으나, 개발자가 원하는 출력을 갖는 파라미터 값을 얻기는 힘들다.

두 번째 방법은 설계된 회로에 대한 전달함수를 구하고, 원하는 사양에 맞는 전달함수를 구하는 것이다. 이 경우, 개발자가 희망하는 출력을 갖는 회로의 파라미터 값을 구할 수는 있으나, 그 파라미터 값을 구하기 위해 넓은 영역의 해영역을 탐색해야 할 경우도 있다. 그러나 최근에 개발된 최적화 기법인 RCGA를 이용하면 이 점은 간단히 극복될 수 있다.

본 연구에서는 개발자가 희망하는 형태의 출력을 가지는 파라미터 값을 선정하는데 있어 RCGA를 이용하여 보다 쉽게 찾을 수 있는 방법을 제시한다.

3.2 GA를 이용한 파라미터 선정

유전알고리즘은 자연선택과 유전학에 기초한 최적화 기법으로 모의진화를 통해 최적의 해를 확률적으로 구하는 알고리즘으로, TSP(Travelling Salesman Problem, 순회판매원 문제)와 같이 직관적으로 해의 존재는 알 수 있으나, 해를 찾기 위해 많은 연산이 필요하고, 찾고자 하는 해가 넓은 영역에 분포한 경우, 적은 연산을 통해 최적해를 구할 수 있는 특징을 가진 알고리즘이다.³⁾

유전 알고리즘은 임의로 선정된 범위 내에서 구해진 초기 집단을 적합도에 따라 우열을 결정하고, 재생산, 교배와 돌연변이를 일으켜 전체 집단이 보다 적합한 형태의 값을 갖도록 모의진화를 진행하여 해집합을 찾는 것을 목적으로 한다.⁴⁾

유전알고리즘의 종류는 염색체를 구성하는 요소의 형태에 따라 BCGA(Binary Coded Genetic Algorithm), SCGA(Symbolic Coded Genetic Algorithm), RCGA 등으로 나누고 있다. 가장 기초적인 형태의 이진코딩 유전알고리즘은 간단한 형태라는 이점 때문에, 초기에 설계된 유전알고리즘임에도 불구하고 현재에도 많이 사용되어지고 있다. 하지만, 이진코딩 유전알고리즘으로써 정밀도를 향상시키고자 할 때에는 염색체 길이의 증가, 해밍절

벽과 같은 단점이 발생하기 때문에 근래에는 이진 코딩 유전알고리즘 대신에 최적화 문제 해결에 적합한 RCGA를 널리 이용하고 있다.^{5,6)}

본 연구에서는 RCGA를 이용하여 식(1)과 같이 주어진 전류형 앰프 전달함수의 응답을 개발자가 원하는 형태로 출력할 수 있도록 파라미터 값을 선정하고자 한다.

4. 파라미터 최적화

4.1 최적화 될 파라미터

식(1)에서 보는 것처럼 VCCS에 대한 전달함수 내에서 변수가 될 수 있는 파라미터는 R_1 , R_f , R_d , C_f 이다. R_s 는 전류를 측정하기 위한 측정센서로서 주어지는 값이며, L 과 R 은 사용하고자 하는 부하에 의해 결정되어지는 임의의 값이다. 또한, R_1 , R_f 는 폐회로 전달함수의 DC gain으로부터 식(2)과 같은 관계를 가진다.

$$R_f = -R_1 R_s \frac{I_O}{V_{IN}} \quad (2)$$

본 연구에서는 $V_{IN} : I_O = 1 : 1$ 이 되는 VCCS를 설계하도록 한다. 이로부터 R_1 와 R_f 의 관계는 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$R_f = R_1 R_s \quad (3)$$

따라서, 전달함수 내의 파라미터 중 RCGA의 염색체가 될 수 있는 파라미터(최적화 될 파라미터)는 R_1 , R_d , C_f 이다.

4.2 스텝입력에 대한 희망하는 출력의 선정

4.2.1 희망하는 전달함수 선정

VCCS의 출력을 임의의 함수에 맞도록 파라미터를 선정하기 위해서는 먼저 임의의 전달함수를 정의하는 것이 중요하다.

먼저, 구하고자 하는 임의의 전달함수는 VCCS의 전달함수와 동일한 형태의 전달함수여야만 한다. VCCS의 전달함수와 다른 형태일 경우, 내부 파라미터를 변경하는 것으로는 구하고자 하는 임의의 함수에 근접한 결과를 얻기 힘들기 때문이다. 이를 위해 본 연구에서는 식(1)과 같은 형태를 갖는 목표 전달함수 $G_r(s)$ 를 식(4)와 같이 선정한다.

$$G_r(s) = \frac{e_1 s + e_0}{s^2 + d_1 s + d_0} \quad (4)$$

식(4)로 주어지는 전달함수의 스텝응답이 상승시간(rise time)은 0.001초 이하이고, 백분율 오버슈트(over shoot)가 5% 이하가 되도록 시행착오법을 통하여 구한 것이 식(5)이다. 그리고, Fig. 2는 이 희망하는 스텝응답을 그린 것이다.

$$G_r(s) = -\frac{3000s + 2100000}{s^2 + 3600s + 2100000} \quad (5)$$

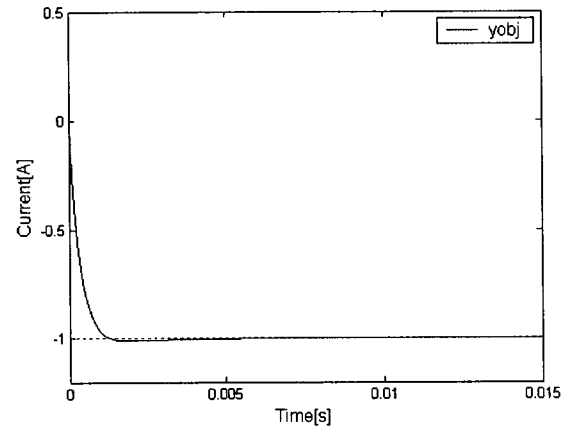


Fig. 2 The step response of the desired transfer function

4.2.2 RCGA 프로그래밍

실제 회로를 구성하기에 앞서 고려되어야 할 파라미터는 피드백 라인에 접속된 저항 R_1 과 R_f 이다. 저항 R_1 과 R_f 는 출력 전류의 증폭비를 결정하는 파라미터로 전류의 소모가 필요 없는 신호용 저항이다. 따라서, 이 저항의 값들을 포함한 파라미터 값의 탐색범위는 식(6)과 같이 선정한다.

$$\begin{aligned} 8000 < R_1 < 11000 \\ 10^{-1} < R_d < 10^6 \\ 10^{-10} < C_f < 10^{-7} \end{aligned} \quad (6)$$

RCGA를 구현하기 위하여 사용되어지는 개체집단은 50개의 염색체로 구성하였으며, 염색체는 3개의 실수로 구성된다. 교배확률은 0.9, 돌연변이 확률은 0.1, 엘리티즘(elitism)을 사용했다. 재생산 연산자는 Gradient like selection을 사용하였고, 이때 eta의 값은 1.7이다. 교배 연산자는 수정교배이며, 돌연변이 연산자는 동적 돌연변이를 이용하였다. 이외에 스케일 피팅 및 엘리티즘(elitism) 방법을 사용하였다.

VCCS의 전달함수 내에서 미리 알고 있는 파라미터 값은 Table 1과 같다.

RCGA 프로그램 내에서 사용될 목적함수는 식 (7)과 같다.

$$F_{obj} = \int e(t)^2 dt \quad (7)$$

Table 1 The known parameter value

Parameter	Value
A	$10^{(107/20)}$
L	$9.2mH$
R	6.2Ω
R_S	2Ω

여기서, $e = y_r - y_{out}$ 이고, y_r 은 희망하는 기준 출력으로 식(5)의 스텝응답이고, y_{out} 은 선택된 염색체에 의한 폐회로 전달함수의 스텝응답이다. 최적화된 파라미터의 값은 식(8)과 같다.

$$\begin{aligned} R_1 &= 9.9590 \times 10^3 \\ R_d &= 2.7223 \times 10^5 \\ C_f &= 3.5851 \times 10^{-9} \\ F_{obj} &= 1.3643 \times 10^{-8} \end{aligned} \quad (8)$$

Fig. 3는 희망하는 기준 출력과 일반적인 방법에 의한 파라미터 값들의 스텝응답, 최적화된 파라미터 값들에 의한 스텝응답 결과를 표시한 것이다. 그림에서 y_r 와 y_{out} 이 겹쳐 보이는 것은 목적함수 F_{obj} 의 값이 1.3648×10^{-8} 으로 매우 작은 값이기 때문이다.

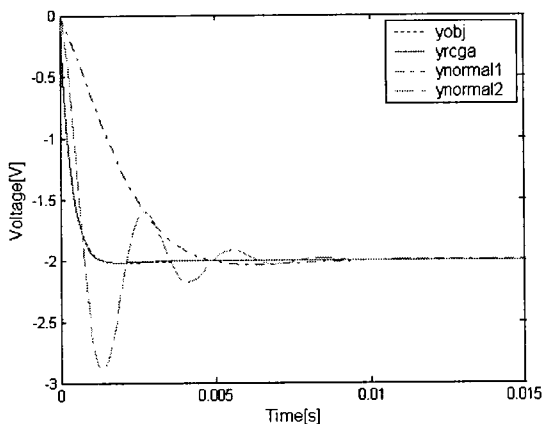


Fig. 3 The result of F-NFS from GA

Fig. 3의 $y_{normal1}$ 와 $y_{normal2}$ 는 제조회사로부터 주

어지는 방법인 "Rate of closure"으로 선정된 파라미터 값들에 의한 스텝응답 결과를 표시한 것이다. "Rate of closure"는 제조회사로부터 주어지는 부하에 대한 표로부터 안정사용 영역을 결정하고, 앰프의 부(-)입력에서 출력까지의 open loop gain 그래프를 이용하여 안정한 영역에 해당하는 소자를 선정하는 방법이다.²⁾

Fig. 3의 $y_{normal1}$ 는 안전사용 영역 내에서 개발자가 원하는 출력을 갖는 파라미터 값을 찾기 위하여 앞에서 언급한 open loop gain 그래프 상의 절점주파수가 227.36Hz되도록 선정된 파라미터 값들에 의한 스텝응답 결과이다. 선정된 $y_{normal1}$ 는 정상상태 때의 응답이 목표하는 출력 값과 같지만, 과도상태 때의 응답속도가 느리다. 일반적으로 절점주파수를 높일 경우, 응답속도가 향상되기 때문에 $y_{normal2}$ 는 $y_{normal1}$ 에 비해 높은 절점주파수(2.2736kHz)를 가지는 파라미터 값들을 선정하였다. 절점주파수를 높인 $y_{normal2}$ 는 $y_{normal1}$ 에 비해 빠른 응답속도를 가지게 되었으나, 큰 오버슈트(over shoot)를 가지게 되어 개발자가 원하는 출력과는 상이한 결과를 나타냈다.

이상에서의 결과로부터 제조회사에서 제공하는 "Rate of closure" 방법을 사용하여 개발자가 원하는 출력을 갖는 앰프의 파라미터 값들을 찾는 것은 힘들다는 것을 알 수 있다. Fig. 3에서 보는 것처럼 RCGA를 이용하여 개발자가 원하는 출력을 갖는 파라미터 값을 구하는 경우, 일반적인 방법에 비해 조건에 맞는 파라미터 값들을 보다 용이하게 선정할 수 있다.

5. 회로 제작 및 실험결과

5.1 회로 제작

시뮬레이션으로부터 구하여진 VCCS 회로의 파라미터 값으로부터 실제 회로를 구성하여 그 응답을 측정하여 회로의 타당성을 확인하기로 한다.

시뮬레이션과 동일한 회로를 구성하기 위해서는 시뮬레이션에서 구한 파라미터의 값과 같은 소자를 사용하여야만 하지만 실제 구입 가능한 제품에서는 시뮬레이션으로 구한 값과 동일한 소자는 판매되지 않는다. 따라서 회로를 구성하기 위한 소자의 값은 최대한 시뮬레이션과 비슷한 값을 갖는 상용화된 소자들을 Table 2와 같이 선정하였다.

Table 2 The component selection

Component	Simulation	Value
R_1	99590Ω	10kΩ
R_f	$2 * R_1$	20kΩ
R_d	2.7223e+005Ω	273kΩ
R_s	2Ω(10W)	2Ω(10W)
C_f	3.5851e-009 F	3.57nF
L	6.2Ω/10mH	6.2Ω/10mH

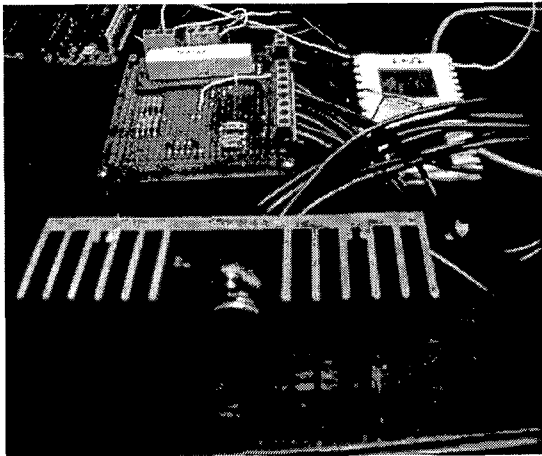


Fig. 4 The circuit of VCCS

R_1 과 R_f , R_s 는 기본적으로 구입 가능한 저항값이다. 또한, L 과 R 은 사용하고자 하는 부하의 특성값으로 미리 구하여진 값이기 때문에 변동되지 않는다.

하지만, R_d 와 C_f 값의 경우, 실제 제조되지 않는 값을 가진 소자이기 때문에 구입 가능한 소자들의 합성을 통해 회로에 사용하였다. Fig. 4는 구입 가능한 소자들을 이용하여 제작한 회로를 나타낸 그림이다.

5.2 실험 결과

Fig. 5은 Fig. 4에서와 같이 구성된 회로의 스텝 응답을 측정한 결과를 시뮬레이션과 비교한 그림이다.

앰프회로의 제어신호는 DSP(TMS-320C32, TI)의 타이머 인터럽트를 이용하여 정상상태 때 1V를 가지는 스텝응답을 만들었으며, 전류의 측정은 전류 측정용 저항 R_s 에 걸리는 전압을 이용하였다.

Fig. 5에서 보는 것과 같이 만들어진 앰프회로의 스텝응답은 정상상태 때, 약간의 노이즈가 있으며,

설계 시 의도하고자 하는 응답에 비하여 약간의 시간지연(약 0.001초)이 있었다. 이러한 시간지연이 일어난 이유는 각 소자들의 오차 및 수학적 모델링 오차 등에 의한 것으로 생각된다. 하지만, 의도하고자 한 출력과 동일한 형태의 출력을 내면서도 비교적 빠르고 안정한 응답을 얻을 수가 있었다.

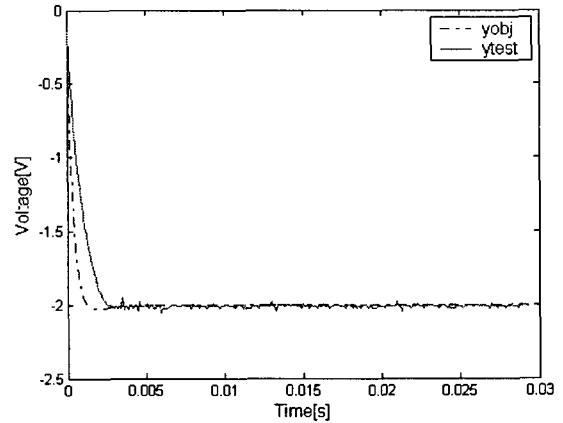


Fig. 5 The response of VCCS

6. 결 론

본 연구에서는 저항과 인덕턴스를 가지는 모터 등과 같은 부하를 제어할 전류형 앰프 설계를 연구 목표로 하여, 그 목적에 맞는 VCCS회로를 구성하였고, 구성된 회로에 대하여 전달함수를 이용한 수학적 모델을 구하였다. 구한 전달함수의 응답이 설계자가 희망하는 응답이 될 수 있도록 전달함수의 각 파라미터 값을 RCGA를 이용하여 선정하였으며, 선정된 파라미터 값에 근접한 회로를 제작하였고, 설계 제작된 앰프에 대한 스텝 응답을 측정하고 검토함으로써 개발자가 희망하는 전류형 앰프 회로 설계의 가능성을 확인하였다.

참고문헌

1. 정근정, 노정진, 2002, "Common Mode Feedback 회로를 사용한 Fully Differential Operational Amplifier의 비교 및 분석", 한양대학교 공학기술 논문집, Vol. 11, pp. 83~96.
2. Apex, 2006, "Power optional amplifier", Apex, Tucson Arizona USA, pp. 1~4.
3. 양주호, 정황훈, 최교호, 정광교, 2004, "RCGA를 이용한 F-NFS의 학습에 관한 연구" 한국동력기계학회, 추계학술대회 논문집, pp. 370~376.

4. 진강규, 유성호, 손영득, 2003, “신경회로망과 유전알고리즘을 이용한 과감쇠 시스템용 자기 동조 PID 제어기의 설계”, 한국박용기관학회지, 제 27권, 제 1호, pp. 24~33.
5. G. G. Jin, S. R. Joo, 2000, “A Study on a Real-Coded Genetic Algorithm”, Journal of Control, Automation and Systems Engineering, Vol. 6, No. 4, pp. 268 ~ 275.
6. 양주호, 정황훈, 김종대, Chang Yu, 2003, “수정 엘리티즘을 포함한 실수 코딩 유전 알고리즘에 의한 PID제어기 파라미터의 최적화”, 한국동력기계공학회 춘계학술대회 논문집, pp. 96 ~ 101.