

역동력학을 이용한 DC 모터의 속도제어

김병만* · 손영득** · 하윤수*** · 진강규***

Speed Control of DC Motors Using Inverse Dynamics

B. M. Kim* · Y. D. Son** · Y. S. Ha*** · G. G. Jin***

Key words : Inverse dynamics(역동력학), PI controller(PI 제어기), Genetic algorithms (유전 알고리즘), DC motor speed control(DC모터 속도제어)

Abstract

In this paper, a methodology for designing a controller based on inverse dynamics for speed control of DC motors is presented. The proposed controller consists of a prefilter, the inverse dynamic model of a system and the PI controller. The prefilter prevents high frequency effects from the inverse dynamic model. The model of the system is characterized by a nonlinear equation with coulomb friction. The PI controller regulates the error between the set-point and the system output which may be caused by modeling error, variations of parameters and disturbances. The parameters of the model and the PI controller are adjusted offlinely by a genetic algorithm. An experimental work on a DC motor system is carried out to illustrate the performance of the proposed controller.

1. 서 론

산업현장에서 생산성 향상과 품질개선을 위한 공장 자동화, 기계화가 가속됨에 따라 전기적 에너지를 기계적 에너지로 전환시켜줄 수 있는 모터의 사용이 크게 늘고 있고, 이를 제어하는 방법은 모터의 종류와 특성에 따라 여러 가지가 있다^(1,2,3).

일반적으로 DC 모터의 속도제어는 선형화 모델에 기초한 PID 제어 방식을 채용하는 경우가 많다.

PID 제어기는 시스템이 변동하지 않고 외란을 고려하지 않은 경우에는 기준입력에 시스템의 출력이 잘 추종하지만, 운전 도중 외란이 존재하는 경우에는 만족할만한 제어 특성을 기대하기 어렵다.

이러한 문제점을 해결할 수 있도록 본 연구에서는 DC 모터의 역동력학을 이용한 2자유도 제어기(Two-Degree-of-Freedom Controller : TDFC)⁽⁴⁾를 제안한다. 제안한 방법은 내부모델 제어(Internal Model Control : IMC)⁽⁵⁾의 한 형태로서

* 한국해양대학교 대학원 제어제측공학과(원고접수일 : 2000년 7월)

** (일)고베상선대학대학원 전자기계공학부

*** 한국해양대학교 기계·정보공학부

DC 모터로부터 구한 비선형 역동력학 모델, 역동력학 모델에 의해 유발될 수 있는 고주파 영향을 막아주기 위한 Prefilter, 그리고 모델의 불확실성, 외란 등으로 발생할 수 있는 오차를 제거하기 위한 PI 제어기 등으로 구성된다. 한편 모델의 파라미터 추정과 PI 제어기의 파라미터 동조에서 발생하는 최적화 문제는 실수코딩 유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithm : RCGA)^{5,6}을 사용하여 해결한다. 제안된 기법의 유효성은 실험을 통해 검증하도록 한다.

2. 시스템 모델링 및 파라미터 추정

2.1 시스템의 모델링

전기자 제어 DC 모터를 등가적으로 표시하면 Fig. 1과 같이 나타낼 수 있다. 제어목적은 전기자에 인가해 주는 입력전압 $u(t)$ 를 조절해서 모터의 출력 각속도 $\omega(t)$ 가 희망하는 설정치에 도달하도록 하는 것이다.

전기자 회로의 인덕턴스 L_a 의 영향이 적다고 보고, 회전체의 점성마찰과 쿨롱마찰을 동시에 고려하면 DC 모터는 다음과 같이 표시될 수 있다.

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = K_t i(t) - T_d(t) - T_f(\omega) \quad (1)$$

$$i(t) = \frac{K_b}{R} \omega(t) + \frac{1}{R} u(t) \quad (2)$$

여기서 $u(t)$ 는 전기자에 인가되는 입력전압[V]이고 $i(t)$ 는 전기자에 흐르는 전류[A], R 은 전기자의 권선 저항[Ω], $\omega(t)$ 는 회전자의 각속도[rad/s], $T_d(t)$ 는 외란[N·m], $T_f(\omega)$ 는 ω 에 따라 다른 특성

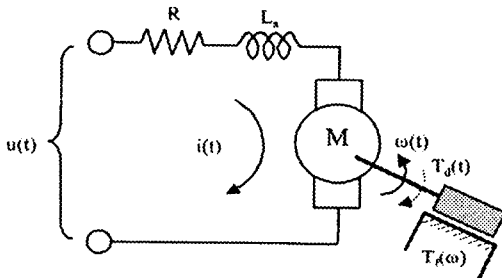


Fig. 1 Equivalent circuit of a DC motor

을 가지는 비선형 마찰모델[N·s/m]이며, K_t 는 토크 상수[N·m/A], K_b 는 역기전력 정수[V·s/rad], J 는 회전자의 등가 관성모멘트[Kg·m²]이다.

특히 회전체의 마찰모델 $T_f(\omega)$ 는 Fig. 2와 같고 이를 방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$T_f(\omega) = \begin{cases} \alpha_1 \omega(t) + \beta_1, & \omega(t) > 0 \\ \alpha_2 \omega(t) - \beta_2, & \omega(t) < 0 \end{cases} \quad (3)$$

여기서 α_1, α_2 는 점성마찰 계수, β_1, β_2 는 쿨롱마찰 계수이다.

외란 $T_d(t)$ 를 제외하고 식 (1),(2) 및 (3)을 결합하여 다시 쓰면 다음과 같다.

$$\dot{\omega}(t) = \begin{cases} -a_1 \omega(t) + b u(t) - c_1, & \omega(t) > 0 \\ -a_2 \omega(t) + b u(t) + c_2, & \omega(t) < 0 \end{cases} \quad (4)$$

여기서 $a_1 = (a_1 R + K_t K_b) / J R$, $a_2 = (\alpha_2 R + K_t K_b) / J R$, $b = K_t / J R$, $c_1 = \beta_1 / J$, $c_2 = \beta_2 / J$ 이다. 식 (4)의 입출력 관계를 다음 식으로 간단히 표시한다면

$$\dot{\omega}(t) = \Phi(\omega(0), u(t); \psi) \quad (5)$$

여기서 $\psi = [a_1 / a_2 / b / c_1 / c_2]^T$ 이다.

만약 식 (4)에서 $a_1 = a_2 = a$ 이고, $c_1 = c_2 = 0$ 이라면 이는 전형적인 선형 모델식과 일치한다.

2.2 모델의 파라미터 추정

식 (4)의 모델에서 미지의 파라미터는 ψ 로서, 이는 시스템의 입출력 데이터와 탐색 알고리즘을 이용하여 다음의 목적함수가 최소값을 갖도록 결정된다.

$$J(\psi) = \int_0^{t_f} |\omega_p(t) - \omega(t)| dt \quad (6)$$

여기서 $\omega_p(t)$ 와 $\omega(t)$ 는 각각 시스템과 모델의 출

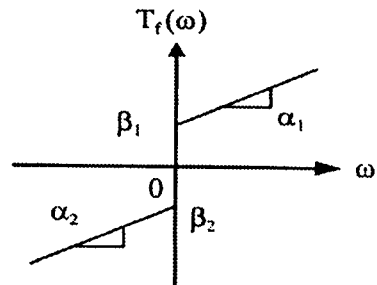


Fig. 2 Friction model

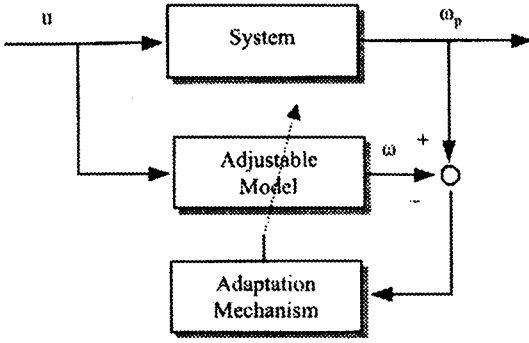


Fig. 3 Parameter estimation of a DC motor using a RCGA

적이고, t_n 는 최종 적분시간으로서 이 이후의 적분값이 무시되어도 좋을 정도로 충분히 큰 값이다.

Fig. 3은 파라미터를 추정하는 과정을 나타낸 것으로서 시스템과 모델을 병렬로 연결하고 동일한 입력을 인가한 후 각각의 출력으로부터 계산되는 식 (6)의 목적함수가 최소값을 갖도록 적응자가 모델의 파라미터를 조정하게 된다. 여기서 일어나는 최적화 문제는 RCGA로 해결한다.

3. 역동역학을 이용한 2자유도 제어기 설계

모델을 기반으로 하는 제어의 한 기본적인 개념은 Fig. 4와 같이 개회로 제어시스템의 역동역학 모델을 시스템의 제어기로 사용함으로써 설정치와 출력이 일치하도록 하는 것이다.

이 방법은 시스템이 최소위상(Minimum phase)이고 모델이 실제 시스템과 차이가 없을 경우에는 만족스러운 성능을 제공한다. 그러나 대부분의 제어 환경에서는 외란이 존재하고, 모델링 오차가 불가피하며, 시스템의 정확한 파라미터를 얻는 것은 어려울 뿐만 아니라, 얻는다 해도 운전도중에 변하게 된다. 따라서 이들을 보완해줄 수 있는 메커니즘이 필요하게 된다.

이 기법을 DC 모터의 속도제어에 적용할 경우에도 부하변동, 온도, 마찰 등으로 파라미터가 변하면 모델과 실제 시스템간의 차이가 발생하고 이로 인한 오차가 유발된다. 따라서 본 연구에서는 설정치와 시스템 출력간의 오차를 PI 제어기로 보정해 주는 역동역학을 이용한 제어기를 설계한다.

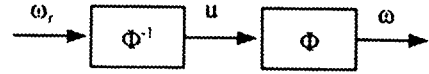


Fig. 4 Model-based control

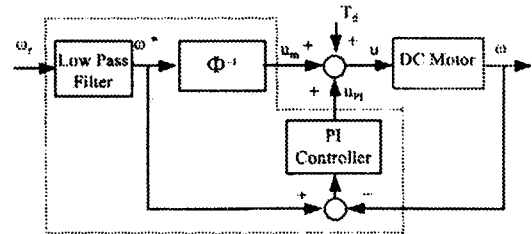


Fig. 5 Block diagram of the proposed controller using inverse dynamics

DC 모터 속도제어를 위한 전체 제어시스템은 Fig. 5의 점선 내부와 같이 구성된다.

이 제어기는 Sugie와 Yoshikawa에 의해 제안된 TDFC(Two-Degree-of-Freedom-Controller)^[4]의 변형된 형태로서, 입력단에 1차 저역통과 필터와 역동역학 Φ^{-1} , 기준입력과 시스템 출력간의 오차를 보정해 줄 수 있는 PI 제어기로 구성되어 있다. 제안된 제어기의 출력은 다음과 같다.

$$u = u_m + u_{PI} \tag{7}$$

$$u_m = \Phi^{-1}(\omega_r^*, \omega_r^*; \psi) \tag{8}$$

$$= \begin{cases} \frac{1}{b} (\omega_r^* + a_1 \omega_r^* + c_1), & \omega_r^* > 0 \\ \frac{1}{b} (\omega_r^* + a_2 \omega_r^* - c_2), & \omega_r^* < 0 \end{cases}$$

$$u_{PI} = K_P(\omega_r^* - \omega) + K_I \int (\omega_r^* - \omega) dt \tag{9}$$

$$\dot{\omega}_r^* = \frac{-\omega_r^* + \omega_r}{\tau} \tag{10}$$

여기서 K_P , K_I 는 각각 PI 제어기의 비례이득, 적분이득이고, τ 는 설정치가 갑작스럽게 변경될 때 역동역학 모델의 출력이 과도하게 커지는 것을 방지하기 위한 필터의 시정수로서 작은 값으로 설정된다.

앞에서도 언급하였듯이 PI 제어기는 모델의 불확실성과 외란으로 발생하는 기준입력과 시스템 출력간의 추종 오차를 제거하기 위한 것이다. 이 중에서도 부하변화가 시스템에 미치는 영향이 크

기 때문에 본 연구에서 PI 제어기의 파라미터는 계단상의 부하변화에 대해 다음의 목적함수가 최소가 되도록 유전알고리즘으로 조정된다.

$$J(K_P, K_I) = \int_0^{t_f} (|\omega_r - \omega| + \alpha |u|) dt \quad (11)$$

여기서 α 는 하중계수이고, t_f 은 충분히 큰 값이다.

4. 실험 및 결과 고찰

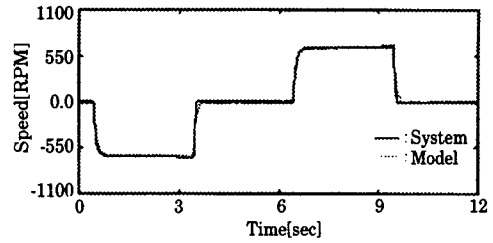
실험에 사용된 시스템은 Feedback사의 모델 MS150이고 속도 제어시스템은 전기자 제어 DC 모터, 구동용 증폭기, 속도 검출 Tacho Generator 와 AD/DA 변환기가 내장된 PC 기반 제어기로 구성된다.

4.1 모델 파라미터의 추정 및 PI 제어기의 동조

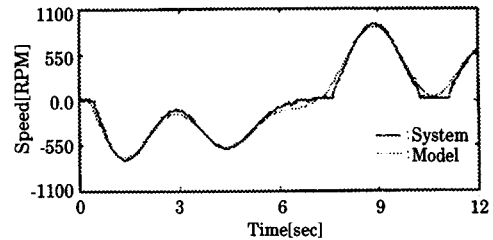
모델의 파라미터와 PI제어기를 최적 조정하기 위해 사용되는 RCGA의 매개변수로는 집단 크기 $N=20$, 재생산 계수 $\eta=1.7$, 교배확률 $P_c=0.9$, 돌연변이확률 $P_m=0.05$ 를 사용하였다^(5,6). 파라미터 추정에 사용된 입출력 데이터는 86[mV]의 계단상 입력에 대한 Fig. 6(a)의 응답을 사용하였다. Fig. 7은 RCGA가 최적 파라미터를 탐색해 가는 과정을 보여주고 있다.

RCGA는 100세대 이후에 추정치 $a_1=11.444$, $a_2=11.426$, $b=227.431$, $c_1=0.850$, $c_2=0.728$ 를 얻었다. 추정된 모델은 두 입출력 데이터 세트를 가지고 검증되었다. Fig. 6(a)는 추정에 사용된 입출력 데이터를 가지고 시스템과 모델의 출력을 그린 것이고, Fig. 6(b)는 $u=0.12\sin(0.5t)+0.05\sin(1.4t)+0.05\sin(2t)$ 에 대해 그린 것이다.

또한 PI 제어기의 파라미터도 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 구하였다. $\omega_r=0$ 으로 고정하고 계단상의 부하를 변화시킬 때 얻게 되는 입출력 데이터 (Fig. 8 참조)와 RCGA를 이용하여 식 (11)의 목적함수가 최소가 되도록 하였고, 이 결과 $K_P=0.38175$, $K_I=5.39133$ 을 구하였다. 이때 $\alpha=0.005$ 로 하였다.



(a) with input-output data used in estimation



(b) with new input-output data

Fig. 6 Model verification

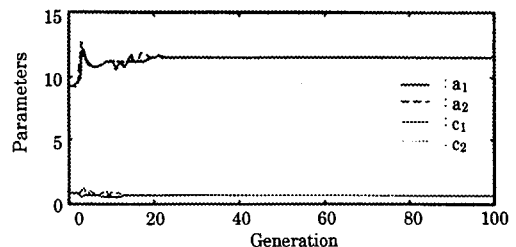
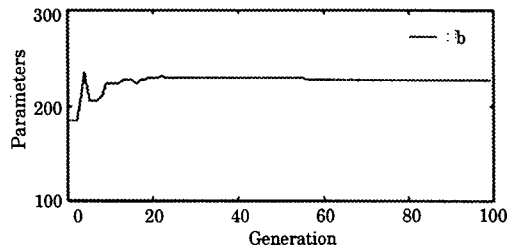
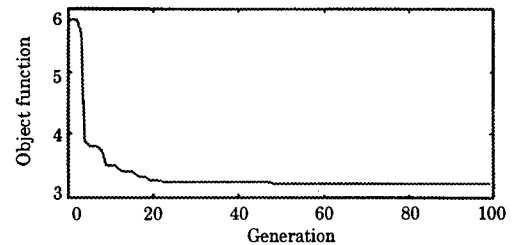


Fig. 7 Parameter adaptation using a RCGA

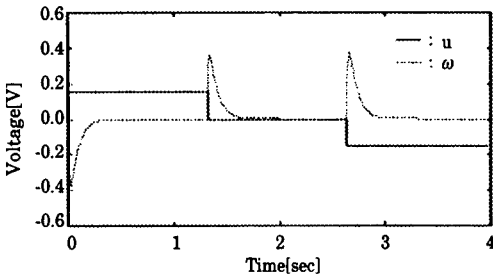


Fig. 8 Input-output data for PI controller tuning

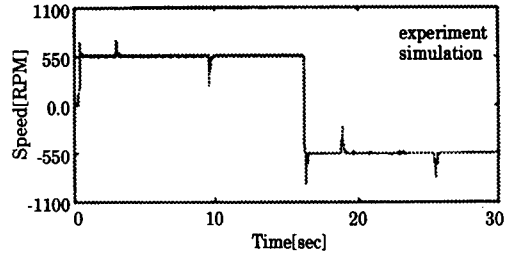


Fig. 10 Response of the system to a step-type load change

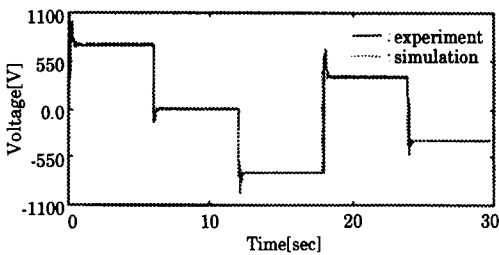


Fig. 9 Responses of the system from experiment and from simulation

4. 2 응답실험

제안된 제어기의 유효성을 검증하기 위해 실제 시스템에서 응답실험을 실시하였다. 이때 Prefilter의 시정수는 0.01을 선정하였고, 샘플링 시간은 6.6m[sec]였다.

(1) 계단상의 기준입력 변화에 대한 시스템 응답

Fig. 9는 6[sec] 간격으로 기준입력을 변경시켰을 때 DC 모터의 출력을 나타낸 것 있고, 실험과 동시에 시뮬레이션 결과도 나타내었다. 그림에서 제안된 제어기의 성능이 만족스러움을 알 수 있다.

(2) 부하변동에 대한 시스템의 응답

부하변동에 대한 제안된 제어기의 강인성을 확인하기 위하여 기준입력이 변경된 후 2초와 9초가 경과한 후 시스템 출력이 정상상태에 있을 때 각각 0.2[V]의 부하 변동으로 고려할 수 있는 계단상의 외란을 인가했을 때, 응답을 그린 것이 Fig. 10이다.

그림에서 외란 변화에도 불구하고 시스템의 출력은 즉시 기준입력에 회복되는 것을 알 수 있다.

5. 결 론

본 연구에서는 시스템의 역동력학을 이용하여 DC 모터용 속도 제어기를 설계하는 문제를 다루었다. 이는 모델을 기반으로 하는 제어의 한 기법으로서 모델링 오차, 파라미터 변동, 부하변동에 의한 오차를 제거할 수 있도록 PI 제어기가 포함된 형태이다. 모델의 파라미터와 PI제어기의 계수를 최적 조정하기 위해서 실수코딩 유전알고리즘을 사용하였다. 제안된 방법을 Feedback사의 MS150 시스템에 적용시킨 결과, 만족할만한 제어 성능을 가지고 있음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] Werner Leonhard, Control of Electrical Drives, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [2] 허남호, 남광희, "역동력학을 이용한 교류 전동기 전류제어기", 제어자동화시스템공학회지, 제6권, 제 1호, pp. 26~32, 2000
- [3] C. E. Garcia and M. Morari, "Internal Model Control 1 : A Unifying Review and Some New Result," Industrial Engineering Chemistry Research, Vol. 21, pp.308~312, 1982
- [4] T. Sugie and T. Yoshikawa, "General Solution of Robust Tracking Problem in Two-Degree-of-Freedom Control Systems," IEEE Trans. Automat. Contr., Vol. AC-31, pp. 552~554, 1986.
- [5] 주상래, 진강규, "실수코딩 유전알고리즘과 제어기 동조에 응용," 제13회 한국자동제어학술회의 논문집, pp.342~345, 1998
- [6] 진강규, 유전알고리즘과 그 응용, 교우사, 2000

저 자 소 개



김병만(金秉滿)

1974년 2월생. 1992년 2월 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 현재 한국해양대학교 대학원 제어계측공학과 석사과정재학중. 학생회원



손영득(孫榮得)

1971년 12월생. 1997년 2월 한국해양대학교 제어계측공학과 졸업(공학사). 1998년 (일) 동경공업대학 제어시스템공학부 교환연수생. 현재 (일) 고베상선대학 대학원 해양전자기계공학부 재학



하윤수(河潤秀)

1962년 4월생. 1986년 한국해양대학교 기관학과 졸업. 1990년 동 대학원 졸업(석사). 1996년 일본 쓰쿠바대학 대학원 졸업(박사). 1996년~현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 조교수.



진강규(陳康奎)

1953년 10월 12일생. 1977년 한국해양대학교 기관학과(학사). 1985년 Florida Institute of Technology, 전기·전자·컴퓨터공학과(석사). 1996년 University of Wales Cardiff, 전기·전자·시스템공학과(박사). 현재 한국해양대학교 기계·정보공학부 정교수.