

모델과 퍼지기법을 기반으로 한 DC 모터시스템의 속도제어

김 병 만¹⁾, 진 강 규²⁾

Speed Control of DC Motor Systems Based on Its Model and the Fuzzy Technique

B. M. Kim , G. G. Jin

Abstract

In this paper, a speed controller for DC motor systems based on inverse dynamics and a fuzzy technique is presented. The proposed controller consists of a prefilter, the inverse dynamic model of a DC motor system and a fuzzy logic 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 fuzzy logic controller regulates the error between the reference input and the system output which may be caused by disturbances, and it simultaneously traces the change of the reference input. The parameters of the model are estimated by a genetic algorithm. An experimental work on a DC motor system is carried out to verify the performance of the proposed controller.

1. 서론

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 PID 제어, 선형화 모델에 기초한 상태궤환 제어 방식을 채용하는 경우가 많다. 이들은 제어환경에 따라 설정치 변경에 대한 시스템의 추종성능을 개선하거나, 외란에 대한 제거성능이 만족스럽도록 설계되는데, 만약 서로 다른 환경에서 운전되거나 설정치 변경과 외란이 동시에 존재하면 만족스런 제어성능을 기대하기 어렵다.

이러한 문제점을 해결할 수 있도록 본 연구에서는 DC 모터의 역동역학과 퍼지제어기를 결합한 2자유도 제어기 (Two-Degree-of-Freedom Controller : TDFC)⁽⁴⁾를 제안한다. 제안한 방법은 내부모델 제어(Internal Model Control : IMC)⁽³⁾의 한 형태로서 DC 모터로부터 구한 비선형 역동역학 모델, 역동역학 모델에 의해 유발될 수 있는 고주파 영향을 막아주기 위한 Prefilter, 그리고 모델의 불확실성, 외란 등으로 발생할 수 있는 오차를 보상하기 위한 퍼지제어기 등으로 구성된다. 퍼지제어기는 기준 입력 변화에 대한 시스템의 추종성능과 외란에 대한 제거성능을 동시에 개선하기 위하여 다수의 PI 제어기가 퍼지 결합된 형태이다. 또한 모델과 PI 제어기들의 파라미터는 실수코딩 유전알고리즘(Real-Coded Genetic Algorithm : RCGA)^(5,6)으로 동조된다. 제안된 기법의 유효성은 실험을 통해 검증된다

1) 한국해양대학교 대학원

2) 한국해양대학교 기계·정보공학부

2. 시스템 모델 및 파라미터 추정

2.1 시스템의 모델

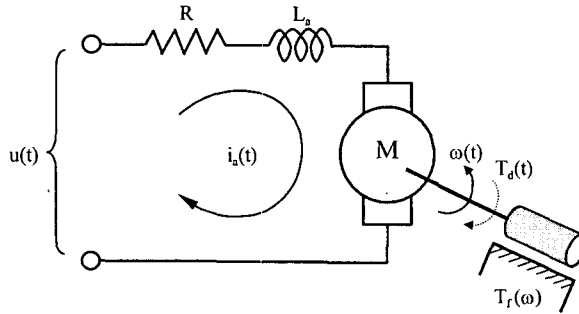


Fig. 2.1 Equivalent circuit of a DC motor

전기자 제어 DC 모터를 등가적으로 표시하면 Fig. 2.1과 같이 나타낼 수 있다. 제어목적은 전기자에 인가되는 입력전압 $u(t)$ 를 조절해서 모터의 출력 각속도 $\omega(t)$ 가 희망하는 설정치에 도달되도록 하는 것이다.

전기자 회로의 인덕턴스 L_a 의 영향이 적다고 보고, 회전체의 점성마찰과 쿨롱마찰을 동시에 고려하면 DC 모터는 다음과 같이 식 (2.1)로 표시될 수 있다.

$$J \frac{d\omega(t)}{dt} = K_t i(t) - T_d(t) - T_f(\omega) \quad (2.1)$$

$$i(t) = - \frac{K_b}{R} \omega(t) + \frac{1}{R} u(t) \quad (2.2)$$

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 특성을 가지는 비선형 마찰 모델[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 비선형 마찰모델 $T_f(\omega)$ 는 Fig. 2.2와 같고 이를 방정식으로 표시하면 다음과 같다.

$$T_f(\omega) = \begin{cases} a_1 \omega(t) + \beta_1, & \omega(t) > 0 \\ a_2 \omega(t) - \beta_2, & \omega(t) < 0 \end{cases} \quad (2.3)$$

여기서 a_1, a_2 는 점성마찰 계수, β_1, β_2 는 쿨롱마찰 계수이다.

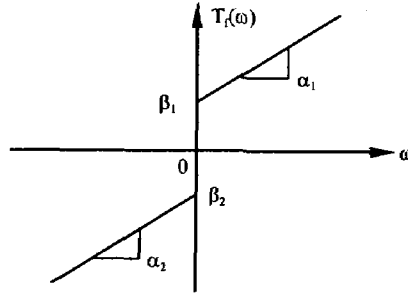


Fig. 2.2 Nonlinear friction model

의란 $T_d(t)$ 를 제외하고 식 (2.1)-(2.3)을 결합하면 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\dot{\omega}(t) = \begin{cases} -a_1 \omega(t) + bu(t) - c_1, & \omega(t) > 0 \\ -a_2 \omega(t) + bu(t) + c_2, & \omega(t) < 0 \end{cases} \quad (2.4)$$

여기서 $a_1 = (\alpha_1 R + K_t K_b) / JR$, $a_2 = (\alpha_2 R + K_t K_b) / JR$, $b = K_t / JR$, $c_1 = \beta_1 / J$, $c_2 = \beta_2 / J$ 이다. 식 (2.4)의 입출력 관계를 다음 식으로 간단히 표시한다면

$$\omega(t) = \Phi(\omega(0), u(t); \psi) \quad (2.5)$$

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

2.2 모델의 파라미터 추정

식 (2.4)의 모델에서 미지의 파라미터는 ψ 로서, 이는 시스템의 입출력 데이터와 탐색 알고리즘을 이용하여 다음의 목적함수가 최소값을 갖도록 결정된다.

$$J(\psi) = \int_0^{t_f} |\omega_p(t) - \omega(t)| dt \quad (2.6)$$

여기서 $\omega_p(t)$ 와 $\omega(t)$ 는 각각 시스템과 모델의 출력이고, t_f 는 최종 적분시간으로서 이 이후의 적분값이 무시되어도 좋을 정도로 충분히 큰 값이다.

Fig. 2.3은 파라미터를 추정하는 과정을 나타낸 것으로서 시스템과 모델을 병렬로 연결하고 동일한 입력을 인가한 후 각각의 출력으로부터 계산되는 식 (2.6)의 목적함수가 최소값을 갖도록 적응자가 모델의 파라미터를 조정하게 된다. 여기서 일어나는 최적화 문제는 RCGA⁽⁶⁾로 해결한다.

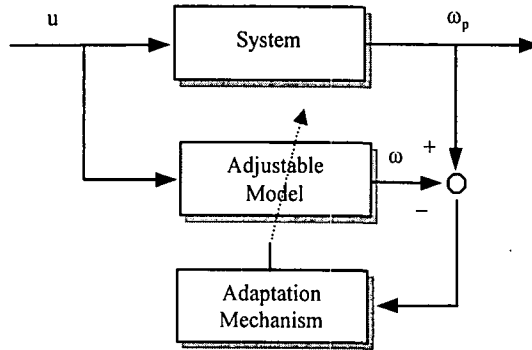


Fig. 2.3 Parameter estimation of a DC motor using a RCGA

3. 역동력학을 이용한 2자유도 피지제어기 설계

3.1 모델 기반 제어

모델을 기반으로 하는 제어의 한 기본적인 개념은 Fig. 3.1과 같이 개루프 제어시스템의 역동력학 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. 이 기법을 DC 모터의 속도제어에 적용할 경우에도 부하변동, 온도, 마찰 등으로 파라미터가 변하면 모델과 실제 시스템간의 차이가 발생하고 이로 인한 오차가 유발된다. 따라서 이들을 보완해줄 수 있는 메커니즘이 필요하게 된다.

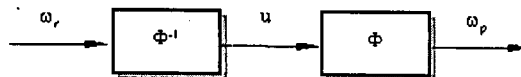


Fig. 3.1 Model-based control using inverse dynamics

3.2 피지제어기 설계

본 연구에서는 모델과 시스템간의 오차를 보정해 주는 피지제어기를 역동력학과 결합한 2자유도 제어기를 설계한다. DC 모터 속도제어를 위한 전체 제어시스템은 Fig. 3.2의 점선 내부와 같이 구성된다. 이 제어기는 Sugie와 Yoshikawa에 의해 제안된 TDFC(Two-Degree-of-Freedom-Controller)⁽⁴⁾의 변형된 형태로서, 입력단에 1차 저역통과 필터와 역동력학 Φ^{-1} , 피지제어기(FLC)로 구성되어 있다.

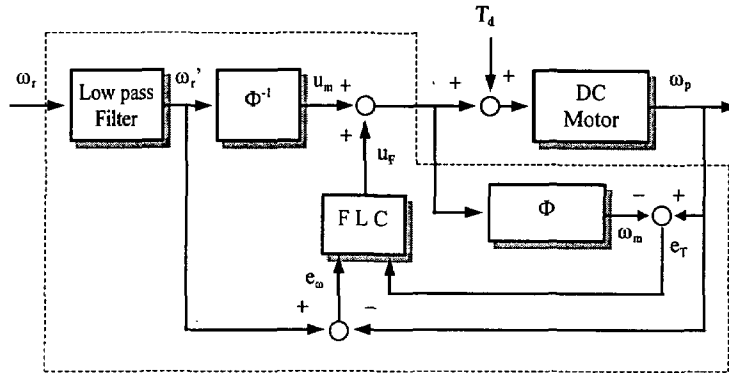


Fig. 3.2 Block diagram of the proposed controller using inverse dynamics

제안된 퍼지제어기의 결론부는 Takagi-Sugeno 형태로서 식 (3.1)과 같이 다수의 PI 제어기로 구성되어 있다. 각각의 PI 제어기 파라미터는 설정치 변경에 대한 시스템 추종성능과 부하변동과 같은 외란에 대한 제거성능을 개선하도록 최적 조정된다. 이때 제어기는 두 종류의 환경에 적응적으로 동작하기 위해 시스템에 병렬로 연결된 모델의 출력을 비교하여 외란의 크기를 추정하고 이를 입력변수로 사용하게 된다.

$$R^j : \text{If } e_T \text{ is } F^j, \text{ then } u_F^j = K_p^j e_\omega + K_i^j \int e_\omega dt \quad (1 \leq j \leq \ell) \quad (3.1)$$

여기서 ℓ 은 퍼지규칙의 수이고, e_T 는 시스템과 모델간의 오차, e_ω 는 시스템의 출력과 기준 입력의 차이이고, F^j ($1 \leq j \leq \ell$) 는 퍼지집합, K_p^j 와 K_i^j ($1 \leq j \leq \ell$) 는 각각 j 번째 PI 제어기의 비례이득, 적분이득이며 유전알고리즘을 이용하여 동조된다.

전진부의 입력변수 공간을 퍼지분할하는 퍼지집합의 소속함수로는 시그모이드 형과 가우시안 형의 함수를 사용하였고 이를 나타내면 식 (3.2)과 같다.

$$F^j(x) = \frac{1}{1 + e^{-\mu_j(x - \alpha_j)}} \quad (j=1 \text{ 또는 } \ell) \quad (3.2a)$$

$$F^j(x) = e^{-\frac{(x - m_j)^2}{2(\sigma_j)^2}} \quad (2 \leq j \leq \ell - 1) \quad (3.2b)$$

식 (3.1)의 전체 규칙에 대한 추론 결과는 다음과 같다.

$$u_F = \sum_{j=1}^{\ell} \xi^j u_F^j \quad (3.3)$$

여기서 $\xi^j = \rho^j / \sum_{k=1}^{\ell} \rho^k$ 이며, $\rho^j = F^j(e_T)$ 이고 항상 $\sum_{k=1}^{\ell} \rho^k > 0$ 의 관계가 성립하는 것으로 가정한다.

최종적으로, 제안된 제어기의 출력은 다음과 같다.

$$u = u_m + u_F \tag{3.4}$$

$$u_m = \Phi^{-1}(\dot{\omega}_r, \omega_r; \psi) \tag{3.5}$$

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

$$\ddot{\omega}_r = -\frac{\omega_r - \omega_r}{\tau} \tag{3.6}$$

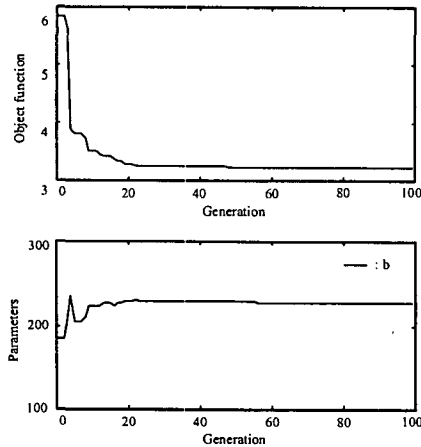
여기서 τ 는 설정치가 갑작스럽게 변경될 때 역동력학 모델의 출력이 과도하게 커지는 것을 방지하기 위한 필터의 시정수로서 일반적으로 작은 값으로 설정된다.

4. 실험 및 결과 고찰

실험에 사용된 시스템은 Feedback사의 모델 MS150 DC 모터시스템으로서 속도 제어시스템은 전기자 제어 DC 모터, 구동용 증폭기, 속도 검출 Tacho Generator와 AD/DA 변환기가 내장된 PC 기반 제어기로 구성된다.

4.1 시스템 파라미터 추정 및 퍼지제어기 동조

본 연구의 최적화 문제에 사용되는 RCGA의 매개변수로는 집단의 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. 4.2(a)의 응답을 사용하였다. Fig. 4.1은 RCGA가 최적 파라미터를 탐색해 가는 과정을 보여 주고 있다.



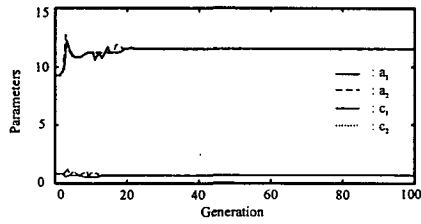
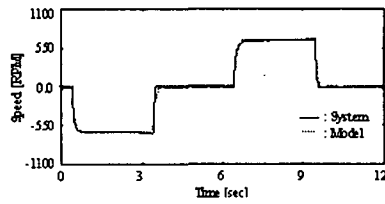
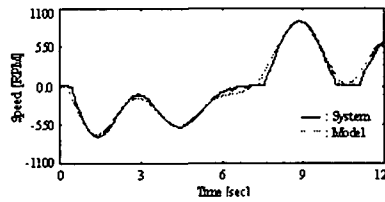


Fig. 4.1 Parameter estimation using a RCGA

RCGA는 100세대 이후에 추정치 $a_1= 11.444$, $a_2= 11.426$, $b= 227.431$, $c_1= 0.850$, $c_2= 0.728$ 를 추정하였다. 추정된 모델은 입출력 데이터 쌍을 가지고 검증되었다. Fig. 4.2(a)는 추정에 사용된 입출력 데이터를 가지고 시스템과 모델의 출력을 그린 것이고, Fig. 4.2(b)는 $u= 0.12\sin(0.5t)+0.05\sin(1.4t)+ 0.05\sin(2t)$ 에 대해 그린 것이다.



(a) with the input-output pairs used in estimation



(b) with the input-output pairs not used in estimation

Fig. 4.2 Estimated model verification

퍼지제어의 전건부 입력변수 공간은 F^1 , F^2 , F^3 로 퍼지분할 되었고 이들은 각각 NB, ZO, PB로 표기되었으며, 시행착오적인 반복 실험을 통하여 Fig. 4.3과 같이 분할되었다. 이 때의 파라미터는 $\mu_1=-8.0$, $\sigma_1=-1.0$, $m_2=0.0$, $\sigma_2=0.5$, $\mu_3=8.0$, $\sigma_3=1.0$ 이다.

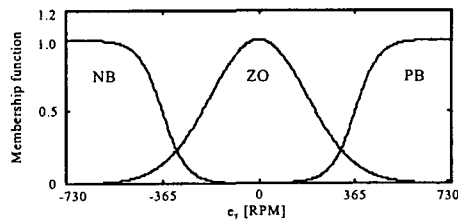


Fig. 4.3 Fuzzy partition of input space

퍼지규칙의 결론부는 모델링 오차, 외란 등으로 인한 오차를 보정하기 위한 PI 제어기와, 기준입력 변화를 추종할 수 있는 PI 제어기의 두 종류로 구성되어 있다. 전자는 전건부의 퍼지집합 NB와 PB에 해당하는 PI 제어기로서 제어기 파라미터는 부하변동이 시스템에 미치는 영향을 고려하여 계단상의 부하변동의 경우 식 (4.1)의 목적함수가 최소가 되도록 RCGA로 동조되었고, 그 결과 $K_p=0.3817$, $K_i=5.3913$ 으로 선정되었다. 후자는 ZO에 해당하는 제어기로서 무부하시 계단상의 기준입력 변화에 대해 목적함수가 최소가 되도록 동조되었고, $K_p=0.6687$, $K_i=3.9437$ 으로 선정되었다.

$$J(K_p, K_i) = \int_0^{t_f} (|\dot{\omega}_r - \dot{\omega}| + \alpha|u|) dt \quad (4.1)$$

여기서 α 는 하중계수이고, t_f 은 충분히 큰 값이다.

4.2 응답실험

제안된 제어기의 유효성을 검증하기 위해 실제 시스템에서 응답실험을 실시하였다. 이 때 선정된 Prefilter의 시정수는 0.01이고, 샘플링 시간은 5.4[msec]이다.

(1) 계단상의 기준입력 변화에 대한 응답

Fig. 4.4는 6[sec] 간격으로 기준입력을 변경시켰을 때 DC 모터의 출력을 나타낸 것으로서 제안된 제어기의 성능이 만족스러움을 알 수 있다.

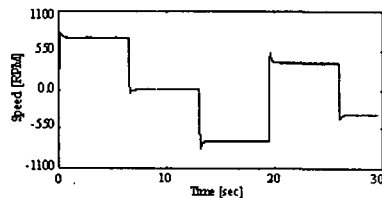


Fig. 4.4 Response of the system to reference changes

(2) 부하변동에 대한 응답

부하변동에 대한 제안된 제어기의 강인성을 확인하기 위하여 기준입력이 변경된 후 3초가 경과되어 시스템 출력이 정상상태에 있을 때, 각각 0.2[V]의 부하 변동에 해당하는 계단상의 외란을 인가했을 때 응답을 그린 것이 Fig. 4.5이다. 그림에서와 같이 외란 변화에도 불구하고 시스템의 출력은 즉시 기준입력을 추종하는 것을 알 수 있다.

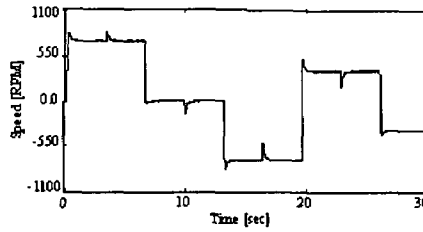


Fig. 4.5 Response of the system to step-type load changes

5. 결 론

본 연구에서는 시스템의 역동력학과 퍼지기법을 이용하여 DC 모터용 속도 제어를 설계하는 문제를 다루었다. 이는 모델을 기반으로 하는 제어의 한 기법으로서 기준입력에 대한 시스템의 추종성능과 외란에 대한 제거 성능을 동시에 만족할 수 있도록 고안되었다. 이 때 모델의 파라미터와 퍼지제어기의 계수를 최적 조정하기 위해서 RCGA를 도입하였다. 제안된 방법을 Feedback사의 MS150 DC 모터시스템에 적용시킨 결과, 만족스러운 제어성능을 얻을 수 있었음을 확인하였다.

참고문헌

- [1] W. Leonhard, *Control of Electrical Drives*, Springer-Verlag Berlin Heidelberg, 1996
- [2] 허남호, 남광희, "역동력학을 이용한 교류 전동기 전류제어기," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, 제 6권, 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, 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] 진강규, 주상래, "실수코딩 유전알고리즘에 관한 연구," *제어·자동화·시스템공학 논문지*, 제 6권, 제 4호, pp. 268-275, 2000
- [6] 진강규, *유전알고리즘과 그 응용*, 교우사, 2000