

전류오차보상에 의한 직류전동기의 센서리스 속도제어

함형철† · 오세진* · 김종수**

(원고접수일 : 2003년 9월 28일, 심사완료일 : 2003년 10월 16일)

Sensorless Speed Control of Direct Current Motor using Current Error Compensation

Hyung-Chel Ham† · Sae-Gin Oh* · Jong-Su Kim**

Key words : sensorless speed control(센서리스 속도제어), current error compensation(전류오차보상), numerical model(수식모델)

Abstract

A new method of direct current motor drive, which requires neither shaft encoder nor speed estimator, is presented. The proposed scheme is based on decreasing current gap between a numerical model and an actual motor. By supplying the identical instantaneous voltage to both model and motor in the direction of reducing the current difference, the rotor approaches to the model speed, that is, reference value.

The performance of direct current motor drives without speed sensor is generally poor at very low speed. However, in this system, it is possible to obtain good speed performance in the low speed range.

기호설명			
		p	: 미분연산자
		r_a	: 전기자저항 [Ω]
i_a, i_{am}	: 전동기 및 모델의 전기자전류 [A]	r_f	: 계자저항 [Ω]
i_f, i_{fm}	: 전동기 및 수식모델의 계자전류 [A]	T_e	: 출력토크 [Nm]
L_{AA}	: 전기자 자기인덕턴스 [H]	T_L	: 부하토크 [Nm]
L_{FF}	: 계자 자기인덕턴스 [H]	v_a, v_{am}	: 전동기 및 모델의 전기자전압 [V]
L_{AF}	: 상호인덕턴스 [H]	v_f, v_{fm}	: 전동기 및 모델의 계자전압 [V]

† 책임저자(한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과(석사과정)) E-mail : michaelham@bcline.com.
T : 051)410-4265

* 한국해양대학교 대학원 기관시스템공학과 졸업(박사)

** 한국해양대학교 해사산업연구소 전임연구원

- V_{dc} : 직류링크전압 [V]
- ω_r, ω_{rm} : 전동기 및 모델의 각속도 [r/s]
- J : 전동기 관성능률 [$Kg\ m^2$]
- K_{pv}, K_{tv} : 상수

1. 서 론

직류전동기는 전동기 중에서 속도제어가 가장 용이하며 광범위하고 정밀한 속도제어가 가능하기 때문에 수천(kW)의 대용량 전동기에서 수(mW)의 서보용 미니 전동기에 이르기까지 각종 용도에 사용되고 있으며, 자동제어의 발전과 더불어 그 역할이 증대되고 있다.

기존의 직류전동기 속도제어에는 아날로그제어 방식이 적용되었으나, 최근에는 마이크로프로세서를 이용한 디지털제어 방식으로 전환되고 있다. 직류전동기 속도제어에는 정도가 높은 속도 검출기가 요구되는데 그 가격이 고가이기 때문에 전체시스템의 가격을 크게 상승시킨다. 그리고 시스템에 이러한 검출기를 사용하게 되면 검출기로부터 신호를 받아 처리를 해야 하기 때문에 부가적인 회로가 추가되어 시스템도 복잡해진다. 또한, 검출기의 구조는 기본적으로 광 센서와 빛을 투과하는 유리판, 광 신호를 입력받아 외부로 보내는 전송회로 등으로 구성되는데 이러한 구조로 인하여 주위 온도가 고온, 저온으로 될 경우나 작동환경에 진동, 분진, 습기 등이 심하게 될 경우에는 검출기가 오동작 할 확률이 충분히 있어 신뢰성에 문제가 발생된다. 그리고 대부분의 검출기는 전동기 축의 한쪽 끝에 커플러를 이용하여 부착되도록 제작이 되어 전동기 설계 가공이 복잡해지고 전동기 축방향 크기가 길어지는 단점이 생긴다⁽⁴⁻⁵⁾.

이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 속도검출기를 사용하지 않는 제어 즉, 센서리스 속도제어에 대한 연구가 진행되어 왔다. 그러나 센서리스 속도제어는 주로 유도전동기를 대상으로 하고 있으며 직류전동기의 경우 실험적으로 그 응용가능성을 제시한 경우는 드물고 시뮬레이션에 그치고 있다⁽¹⁻³⁾.

기존의 센서리스 속도제어는 전기자 전압, 전류 및 계자전류로부터 전동기의 회전수를 추정하고

속도제어법으로는 전압제어법이 널리 사용된다⁽⁷⁾.

본 논문에서는 실제 직류전동기와 수식모델의 전류차이를 억제하도록 전압을 인가함으로써 전동기의 속도가 설정치인 모델의 속도를 추종하도록 하는 방식을 사용하였는데⁽⁸⁾, 이는 직접 속도를 제어하지 않고 실제 직류전동기와 수식모델의 전류차이를 영으로 수렴시킴으로써 간접적으로 속도제어를 실현하는 방식이다. 즉, 직류전동기는 전기자 전압과 계자전압을 입력으로 받아 전기자전류, 계자전류 및 속도를 출력으로 내보내는 시스템으로 간주될 수 있으므로 제어대상인 전동기와 전기적 파라메타가 동일한 수식모델을 취하여 양자의 전압 및 전류가 같아지도록 제어함으로써 직류전동기의 출력인 회전자속도를 모델의 입력인 속도지령치에 접근시킨다.

2. 전류오차보상에 의한 센서리스 속도제어

본 논문에서 사용되는 전류오차보상에 의한 속도제어는 속도추정이 필요 없고 단지 전기자전류 값만 사용되므로 시스템에 적용하기가 용이한 제어법이다. 직류전동기의 수식모델이 직류전동기를 정확하게 표현하고 고정도의 전류 추정이 가능하다면 이 제어법은 이상적인 제어법이라고 할 수 있다.

직류전동기 전압방정식은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_f \\ v_a \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_f + pL_{FF} & 0 \\ \omega_r L_{AF} & r_a + pL_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} \quad (1)$$

위의 식을 전류방정식으로 고치면 식(2)와 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} p \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} -r_f/L_{FF} & 0 \\ -\omega_r L_{AF}/L_{AA} & -r_a/L_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_f \\ i_a \end{bmatrix} \\ &+ \begin{bmatrix} 1/L_{FF} & 0 \\ 0 & 1/L_{AA} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} v_f \\ v_a \end{bmatrix} \end{aligned} \quad (2)$$

그리고 발생토크 및 속도는 아래와 같다.

$$T_e = L_{AF} i_f i_a \quad (3)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L) \quad (4)$$

식(2)~(4)에 의해 직류전동기는 전기자전압, 계자전압을 입력으로 받아 전기자전류, 계자전류 및 회전자 속도를 출력으로 내보내는 시스템으로 간주할 수 있다. 이것을 그림으로 나타내면 Fig. 1과 같다.

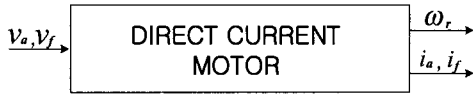


Fig. 1 Input and output variables of direct current motor.

여기서 Fig. 2와 같이 전압과 회전자 속도의 지령치를 입력으로 하고 전류를 출력으로 하는 수식모델을 가정한다.



Fig. 2 Input and output variables of numerical model.

수식모델이 실제전동기를 정확하게 표현한다면, 실제 직류전동기의 전압과 전류가 수식모델과 일치할 경우 회전자의 속도도 설정치인 수식모델의 회전자 속도와 같게 될 수 있으리라는 예측을 할 수 있다. 수식모델과 전동기의 전기자 전압방정식을 다시 쓰면 다음과 같다.

$$v_a = \omega_r L_{AF} i_f + (r_a + pL_{AA}) i_a \quad (5)$$

$$v_{am} = \omega_{rm} L_{AF} i_{fm} + (r_a + pL_{AA}) i_{am} \quad (6)$$

실제 전동기와 수식모델에 동일한 전기자전압을 공급하면 식(7)과 같은 관계가 성립한다.

$$L_{AF}(\omega_{rm} i_{fm} - \omega_r i_f) = (r_a + pL_{AA})(i_a - i_{am}) \quad (7)$$

전동기와 모델의 계자권선에 동일한 전압을 인가함으로써 $i_f = i_{fm}$ 이 된다. 따라서 만약 수식모델과 실제 전동기의 전기자전류가 일치하도록 제어된다면 식(7)에 의해 전동기의 회전자 각속도인 ω_r 이 설정치인 수식모델의 회전자 각속도 ω_{rm} 과 같게 된다.

다음으로 실제 전동기와 수식모델에 같은 전기자전압을 공급하면서 실제 전동기의 전기자전류 i_a 를 수식모델의 전기자전류인 i_{am} 과 같게 해줄 수 있는 방법을 고찰해 본다.

수식모델의 속도가 실제 전동기의 속도보다 높다고 가정하면 실제 전동기의 토크, 전기자전류는 식(3)과 식(7)에 의하여 수식모델의 값보다 크게 된다. 이 경우 전동기와 모델의 전기자전압을 $\Delta v_a (= \Delta v_{am})$ 만큼 증가시키면 수식모델의 전기자전류의 증분은 식(8)로 표현된다.

$$\Delta i_{am} = \frac{1}{r_a + pL_{AA}} \Delta v_{am} \quad (8)$$

반면에, 실제 전동기의 경우는 아래 식과 같이 된다.

$$\Delta v_a = (r_a + pL_{AA}) \Delta i_a + L_{AF} i_f \Delta \omega_r \quad (9)$$

식(9)를 순차적으로 관찰하면, 전압이 증가한 직후 회전자의 속도는 거의 변화되지 않는다. 그러나 전기자전류는 순간적으로 증가하고 따라서 토크를 증가시키므로 회전자의 속도는 점차적으로 상승하게 된다.

결국, 전동기의 전기자전류의 상승분은 식(10)으로 다시 쓸 수 있다.

$$\Delta i_a = \frac{1}{r_a + pL_{AA}} (\Delta v_a - L_{AF} i_f \Delta \omega_r) \quad (10)$$

즉, 식(8)과 식(10)에 의해 $\Delta i_{am} > \Delta i_a$ 이 되어 실제전동기와 모델의 전기자전류가 접근하게 되며 식(7)에 의해 속도차이도 감소하게 된다.

반대로 전동기의 회전자 속도가 설정치보다 높게 되면 $v_a (= v_{am})$ 를 낮춤으로써 위에서 기술한 내용과 정반대 과정이 일어나게 된다.

결론적으로, 다음과 같이 수식모델과 실제 전동기를 위한 간단한 제어알고리즘을 구성하는 것이 가능해진다.

$$v_a^* = K_{pv}(i_a - i_{am}) + K_{tv} \int (i_a - i_{am}) dt \quad (11)$$

여기서 v_a^* 는 전동기에 인가되는 전기자 전압의 지령치이다.

Fig. 3은 전류오차보상에 의한 제어의 블록다이어그램을 나타낸다. 이 시스템은 디지털제어기, 전류제어 초퍼 및 직류전동기로 구성된다.

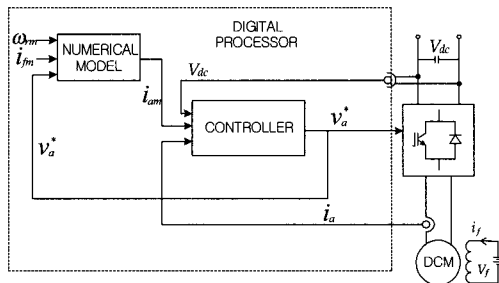


Fig. 3 The block diagram of the current error compensation control system.

3. 실험결과

실험에 사용한 전동기 상수는 Table 1과 같다.

Table 1 Parameters of direct current motor used for experiment.

정격출력	0.5[kW]	전기자저항	4.8[Ω]
정격전압	110[V]	계자저항	360[Ω]
정격전류	6.5[A]	전기자 자기인덕턴스	0.012[H]
정격속도	2000[rpm]	계자 자기인덕턴스	0.12[mH]
극수	2	상호인덕턴스	1.2[H]

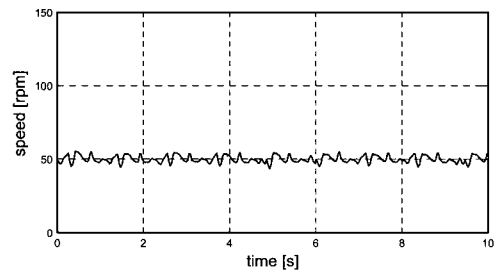
Fig. 4는 50[rpm] 정상상태시의 속도 및 이때의 실제 전동기와 수식모델의 전기자전류를 나타낸다. 실제 전동기 전기자전류 및 수식모델의 전기자전류가 일치하며 양호한 속도특성이 얻어짐을 알 수 있다.

Fig. 5는 -100[rpm]으로 운전중 100[rpm]으로 지령속도를 변경하였을 경우의 응답을 나타낸다. 속도 응답특성이 양호하며 전류 응답특성도 양호함을 알 수 있다.

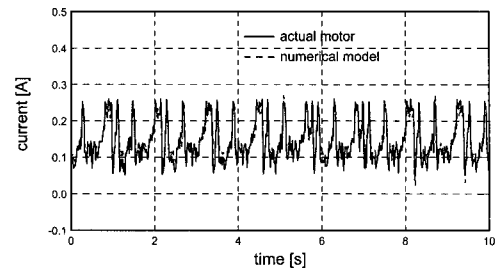
Fig. 6은 300[rpm]으로 구동 중 정격부하의 20(%)인 0.5(N·m)을 인가하였을 경우의 부하특성 및 전류특성을 나타낸다. 전류오차보상에 의한 방법으로 양호한 부하특성이 얻어짐을 알 수 있다.

Fig. 7은 1000[rpm]의 속도지령에 응답하는 전동기속도와 전기자전류를 나타낸다. 중속영역에서도 우수한 속도특성이 얻어진다.

Fig. 8은 운전 중 지령속도의 변화 및 이때의 전류 응답을 나타낸다. 속도지령은 0→100[rpm]→300[rpm]→500[rpm]→300[rpm]→100[rpm]이며 그림에서 볼 수 있듯이 지령속도 추종성능이 양호하며 전류응답도 우수함을 알 수 있다.

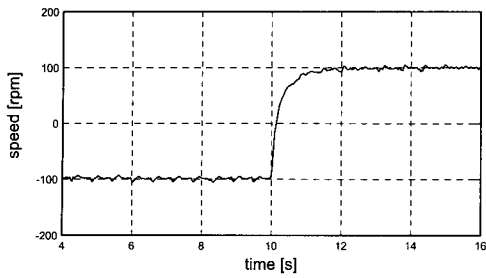


(a) motor speed

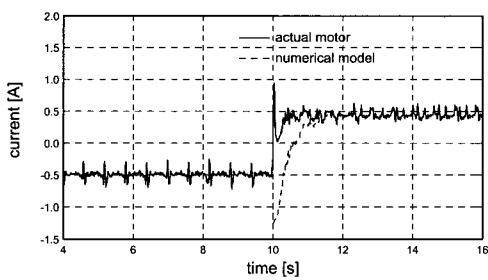


(b) armature current

Fig. 4 Characteristics of operation(50[rpm]).

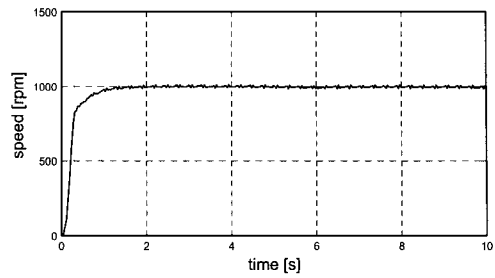


(a) motor speed

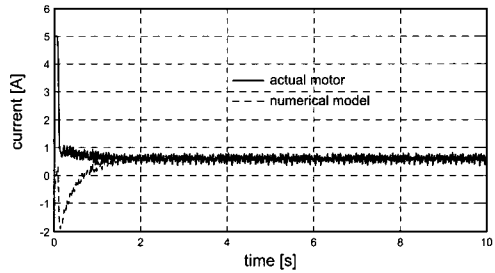


(b) armature current

Fig. 5 Experimental responses for step change of speed setting(-100→100[rpm]).

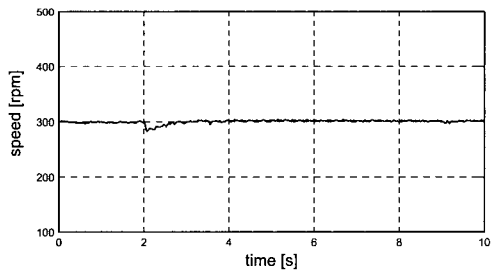


(a) motor speed

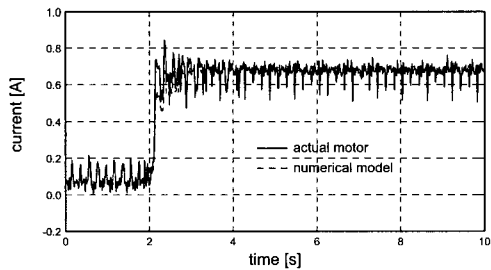


(b) armature current

Fig. 7 Experimental responses for step change of speed setting(0→1000[rpm]).

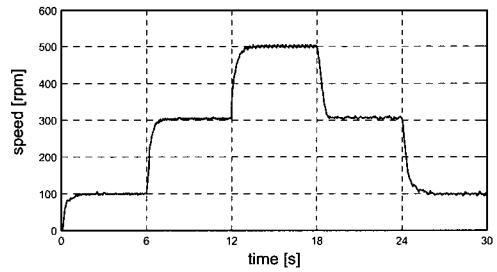


(a) motor speed

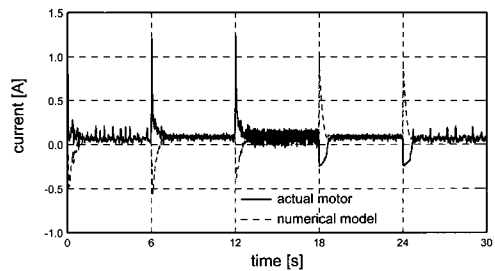


(b) armature current

Fig. 6 Experimental responses for step change of load torque(0→1[N·m]).



(a) motor speed



(b) armature current

Fig. 8 Experimental responses for step change of speed setting(0→100[rpm]→300[rpm]→500[rpm]→300[rpm]→100[rpm]).

4. 결 론

제어시스템에 엔코더 등의 속도센서를 사용하면 제어시스템의 가격을 상승시키고 센서의 부착으로 직류전동기의 설계가 복잡해지며 센서의 오동작 등으로 강인한 제어특성을 얻기가 어렵다. 따라서 본 연구에서는 속도센서를 사용하지 않는 직류전동기의 센서리스 속도제어에 관해서 연구를 진행하였다.

본 논문에서는 전류오차보상에 의한 방법을 사용하였는데 이 방법은 전기자전압, 전류 및 계자전류를 이용하여 회전자속도를 추정하는 기존의 방식들과는 달리 실제 직류전동기와 직류전동기 수식모델의 전기자전류 차이를 억제하도록 전압을 인가함으로써 전동기의 속도가 설정치인 모델의 속도를 추종하도록 하는 제어방법이다.

실제 실험을 통하여 직류전동기 저속 및 중속영역에서의 안정된 운전특성과 우수한 부하특성 및 제어특성을 입증하였다. 전류오차보상에 의한 센서리스 속도제어 방법은 기존 제어방법보다 제어 알고리즘을 구성하는 것이 쉽고 그 결과도 보다 우수하다.

참고문헌

[1] R. Joetten and G. Maeder, "Control Methods for Good Dynamic Performance Induction Motor Drives Based on Current and Voltages as measured Quantities", *IEEE*, IA-19, No. 3, pp.356-363, 1983.

[2] S. Tamai, H. Sugimoto and M. Yano, "Speed Sensorless Vector Control of Induction Motor with Model Reference Adaptive System", *IEEE/IAS*, pp.185-195, 1997.

[3] A. Gastli, M. Tomita, T. Takeshita and N. Matsui, "Improvement of a Stator Flux-Oriented Speed Sensorless Control of an Induction Motor", *IEEE PCC*, pp. 415-420, 1993.

[4] F. Briz, J. A. Cancelas, and A. Diez, "Speed Measurement Using Rotary Encoders for high Performance AC Drives", *Proc. of the 20th International Conference on Industrial Electronics, Control and Instrumentation, IECON'94*, Vol. 1, pp. 538-542, 1994.

[5] K. Lizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo and K. Mohri, "Microcomputer Control for Sensor-less Brushless Motor", *IEEE Trans. Indus. Appl.*, Vol. IA-21, No. 4, pp. 595-601, 1985.

[6] Nobuyuki Matsui and Masakane Shigyo, "Brushless dc motor control without position and speed sensors", *IEEE Trans. On Ind. Appl.*, Vol. 28, No. 1, Jan/Feb. 1992.

[7] N. Ertugrul and P.P Acarnley, "A New Algorithm for Speed Operation of Permanent Magnet Motors", *IEEE IAS Conf. Rec.*, pp. 414-421, 1992.

[8] Sae-Gin Oh, Jong-Su Kim and Sung-Hwan Kim, "Sensorless Speed Control of Induction Motor using Current Compensation", *Journal of the Korean Society of Marine Engineers*, Vol. 27, No. 4, 2003.

[9] Katsuhiko Ogata, "Modern Control Engineering", 문운당, 1993.

[10] Benjamin C. Kuo, "Automatic Control Systems", Prentice Hall, 1991.

저 자 소 개



함형철 (咸亨喆)

1972년 1월생, 1994년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 1998년~현재 동대학원 기관공학과 석사과정, 현재 미국선급협회 검사관



오세진 (吳世眞)

1972년 5월생, 1996년 한국해양대학교 기관공학과 졸업, 2001년 동 대학원 졸업(석사), 2003년 동 대학원 기관시스템공학과 졸업(박사)



김종수 (金宗洙)

1970년 4월생, 1994년 한국해양대학교 기관공학과 졸업(공학사), 1998년 한국해양대학교 기관공학과 대학원 졸업(공학석사), 2002년 한국해양대학교 기관공학과 대학원 졸업(공학박사), 현재 한국해양대학교 전임연구교수