

영구자석 직류전동기의 센서리스 속도제어에 관한 연구

오세진¹ · 김현철² · 김종수³ · 윤경국[†]

(원고접수일 : 2012년 4월 27일, 원고수정일 : 2012년 6월 5일, 심사완료일 : 2012년 6월 5일)

A Study on the Sensorless Speed Control of Permanent Magnet Direct Current Motor

Sae-Gin Oh¹ · Hyun-Chel Kim² · Jong-Su Kim³ · Kyoung-Kuk Yoon[†]

요약 : 본 논문은 수식모델과 히스테리시스 제어기를 사용하여 엔코더, 속도추정기 및 PI 제어기가 필요 없는 새로운 영구자석 직류전동기 센서리스 속도제어 방법을 제안한다. 본 논문의 제어는 영구자석 직류전동기와 수식모델의 토크 차이를 억제하도록 전압을 인가함으로써 전동기의 속도를 설정치인 수식모델의 속도에 추종시키는 방법이며, 순시 토크 제어에 히스테리시스 제어기를 사용하였다. 히스테리시스 제어기는 수식모델 토크 지령치와 전기자전압 및 전류 정보를 이용하여 추정된 전동기 토크를 비교하여 오차를 계산한 후, 히스테리시스 밴드를 거쳐 그 오차를 최소화하는 전압을 선정하여 전동기에 출력하는 방법이다. 본 논문은 제안한 방식의 이론적인 배경 및 타당성에 대해 기술하였으며 실험을 통해 제안된 방식의 우수성을 검증하였다.

주제어 : 영구자석 직류전동기, 센서리스 제어, 수식모델, 히스테리시스 제어기

Abstract: This paper proposes a new sensorless speed control scheme of permanent magnet DC motor using a numerical model and hysteresis controller, which requires neither shaft encoder, speed estimator nor PI controllers. By supplying the identical instantaneous voltage to both model and motor in the direction of reducing torque difference, the rotor speed approaches to the model speed, namely setting value and the system can control motor speed precisely. As the numerical model whose electric parameters are the same as those of the actual motor is adopted, the armature rotating speed can be converged to the setting value by controlling torque on both sides to be equalized. And the hysteresis controller controls torque by restricting the torque errors within respective hysteresis bands, and motor torque are controlled by the armature voltage. The experiment results indicate good speed and load responses from the low speed range to the high, show accurate speed changing performance.

Key words: Permanent magnet DC motor, Sensorless control, Numerical model, Hysteresis controller

1. 서론

전동기 중에서 직류전동기는 자속 및 토크 제어가 간단하고 속도제어가 용이하며 과도응답 특성이 우수하여 수천[kW]의 대용량 전동기에서 수 [mW]의 서보용 소형 전동기에 이르기까지 산업체

각 분야에서 광범위하게 사용되고 있다. 그리고 기존 직류전동기 속도제어에는 아날로그제어 방식이 적용되었으나, 최근에는 마이크로프로세서를 이용한 디지털제어 방식으로 전환되고 있는 추세이다 [1-10].

† 교신저자((주)지디스, E-mail: navy2@paran.com, Tel: 010-5541-0424)

1 한국해양대학교 운항훈련원, E-mail: osgengen@hhu.ac.kr, Tel: 010-4581-7725

2 한국해양대학교 대학원, E-mail: soyun47@nate.com, Tel: 010-4031-9262

3 한국해양대학교 기관시스템공학부, E-mail: jongskim@hhu.ac.kr, Tel: 010-7280-1197

직류전동기 속도제어에는 정도가 높은 속도센서가 요구되는데 그 가격이 고가이기 때문에 전체시스템의 가격을 크게 상승시킨다. 그리고 속도센서를 사용할 경우 회전자의 속도를 연속적으로 검출할 수 있다는 장점이 있으나, 부가적인 회로와 프로그램이 추가되어 전체 시스템이 복잡해진다. 또한, 속도센서의 구조는 기본적으로 광센서와 빛을 투과하는 유리판, 광 신호를 외부로 보내는 전송회로 등으로 구성되는데 이러한 구조로 인하여 주위 온도가 고온, 저온으로 될 경우나 작동환경에 진동, 분진, 습기 등이 심하게 될 경우에는 속도센서가 오동작할 확률이 많아 신뢰성에 문제가 발생된다. 그리고 대부분의 속도센서는 전동기 축의 한쪽 끝에 커플러를 이용하여 부착하도록 제작이 되어 전동기 설계 가공이 복잡해지고 전동기 축 방향 크기가 길어지는 단점이 생긴다[4-5]. 이와 같은 문제점들을 해결하기 위해 속도센서를 사용하지 않는 제어 즉, 센서리스 속도제어에 대한 연구가 진행되어 왔으며[1,3,6,8,10], 이것에는 전기자전압, 전류 및 계자전류로부터 전동기의 회전수를 추정하는 방법이 많이 사용되어 왔다. 본 논문에서는 양호한 제어특성을 얻을 수 있으며 간단하면서도 강인한 특성을 갖는 새로운 직류전동기 센서리스 속도제어 방법을 제안한다. 이 방법은 전동기 속도를 추정하는 방식으로 수식모델을 이용하며, 전동기 토크제어를 위해 히스테리시스제어 알고리즘을 사용한다.

본 논문의 센서리스 속도 제어방식은 실제 직류전동기와 수식모델의 전기자전류 차이를 억제하도록 전압을 인가함으로써 전동기의 속도가 설정치인 모델의 속도를 추종하도록 하는 방식인데, 이 방법은 기존의 방식에서 사용된 속도추정을 필요로 하지 않고 다만 실제 직류전동기와 수식모델의 전기자전류 차이를 영으로 수렴시킴으로써 간접적으로 속도제어를 실현하는 센서리스 속도 제어방식이다. 히스테리시스제어는 순시 토크를 제어하는 방법으로 토크 지령치와 직류전동기의 전기자전압, 계자전압 및 전류 정보를 이용하여 추정된 현재의 토크를 비교하여 오차를 계산한 후 히스테리시스 밴드를 거쳐 매 연산 주기마다 그 오차를 가장 최소화하기 위한 전압을 선정하여 출력하는 방법이다. 본

논문에서 제안한 방식은 속도센서를 사용하지 않으며, 제어에 PI제어기도 사용하지 않기 때문에 직류전동기 제어시스템을 용이하게 제작할 수 있으며 속도제어 실행도 간단하게 된다.

2. 영구자석 직류전동기 센서리스 속도제어

2.1 제어 알고리즘

영구자석 직류전동기의 과도상태 전압방정식, 발생토크 및 속도는 다음과 같다.

$$\frac{di_a}{dt} = \frac{1}{L_{aa}}(v_a - K_i w_r - r_a i_a) \tag{1}$$

$$T_e = K_i i_a \tag{2}$$

$$\frac{dw_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_l) \tag{3}$$

여기서, v_a 는 전기자전압[V], i_a 는 전기자전류[A], r_a 는 전기자저항[Ω], L_{aa} 는 전기자 자기인덕턴스[H], K_i 는 토크상수[N·m/A], w_r 은 회전자 각속도[rad/s], T_e 는 출력토크[N·m], T_l 은 부하토크[N·m] 및 J 는 관성모멘트[Kg·m²]이다.

식 (1)~(3)에 의해 직류전동기는 전기자전압, 계자전압을 입력으로 받아 전기자전류, 계자전류 및 회전자 속도를 출력으로 내보내는 시스템으로 간주할 수 있다. 이것을 그림으로 나타내면 **Figure 1**과 같다.

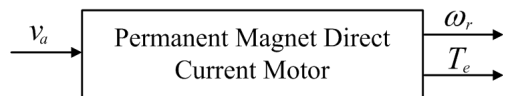


Figure 1: Input and output variables of DC motor.

영구자석 직류전동기의 동특성을 정확하게 나타내는 수식모델을 고려해보자. **Figure 2**와 같이 수식모델의 입력은 전기자 전압과 속도, 출력은 발생토크로 간주한다. **Figure 2**에서 첨자 m 은 수식모델의 값을 나타낸다.

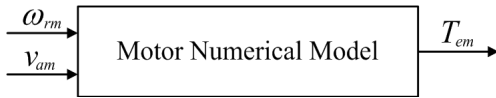


Figure 2: Input and output variables of numerical model.

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.

$$v_a = w_r K_t + (r_a + pL_{aa})i_a \tag{4}$$

$$v_{am} = w_{rm} K_t + (r_a + pL_{aa})i_{am} \tag{5}$$

여기서 p 는 미분연산자이고 첨자 m 은 수식모델의 값을 의미한다.

실제 전동기와 수식모델에 동일한 전기자전압을 공급하면 식 (6)과 같은 관계가 성립한다.

$$K_t(w_{rm} - w_r) = (r_a + pL_{aa})(i_a - i_{am}) \tag{6}$$

$T_e = K_t i_a$, $T_{em} = K_t i_{am}$ 이므로 식 (6)은 식 (7)이 된다.

$$K_t(w_{rm} - w_r) = \frac{1}{K_t}(r_a + pL_{aa})(T_e - T_{em}) \tag{7}$$

따라서, 수식모델과 실제 전동기의 토크차이가 감소하는 방향으로 수식모델과 전동기의 전기자에 동일한 전압을 인가한다면 식 (7)에 의해 전동기 회전자 각속도인 w_r 이 설정치인 수식모델의 회전자 각속도 w_{rm} 과 같게 된다.

예를 들어 설정치인 모델의 속도가 실제 전동기의 속도보다 높은 경우 전동기의 토크가 모델의 토크보다 크게 된다. 이 경우 제어기에 의해 양자에 공급되는 동일한 전기자 전압을 상승시키면 전동기 속도는 증가하여 모델의 속도에 접근하게 되고, 결국 양자의 토크차이도 감소하게 된다. 앞의 상황과 반대인 경우는 전기자 전압을 감소시켜 동일한 효과를 기대할 수 있다.

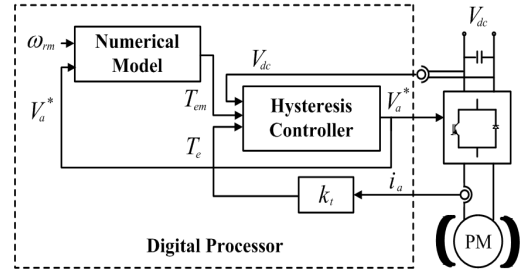


Figure 3: The block diagram of sensorless speed control system by the hysteresis control.

본 논문에서는 실제 전동기와 수식모델에 같은 전기자전압을 공급하면서 실제 전동기의 토크 T_e 를 수식모델의 토크인 T_{em} 과 같게 해줄 수 있는 방법으로 히스테리시스 제어를 통한 제어알고리즘을 제안한다(Figure 3).

2.2 히스테리시스 제어

Figure 4는 본 시스템에서 적용하고자 하는 히스테리시스 제어를 나타내고 있다. 토크 지령에 대해 모두 추종이 가능하도록 출력 ΔT_e 는 3단계 (-1, 0, 1)가 된다.

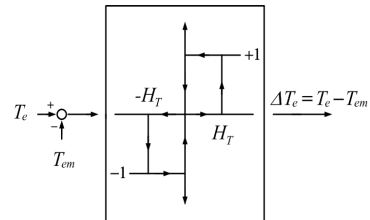


Figure 4: Characteristics of torque hysteresis comparator.

즉, 토크의 지령치와 실제 토크와의 오차인 ΔT_e 가 H_T 보다 클 경우($\Delta T_e > H_T$) 전압을 상승(+1)시키고, ΔT_e 가 $-H_T$ 보다 작을 경우($\Delta T_e < -H_T$) 전압을 감소(-1)시킨다. $-H_T < \Delta T_e < H_T$ 인 경우 Figure 4와 같이 바로 이전 제어루틴에서의 출력 전압값에 따라 전압상승(+1), 영전압(0) 및 전압감소(-1)를 다양하게 취함으로써 출력전압의 변동횟수를 감소시킨다. 이와 같은 히스테리시스 루프를 통하여 ΔT_e 값에 따라 3가지 종류의

출력 전압을 취함으로써 보다 유연한 제어가 가능해진다.

3. 실험장치 구성

본 센서리스 속도제어시스템의 전체 구성도를 Figure 5에 도시한다. 시스템을 구현하기 위한 하드웨어의 구성은 세부적으로 주 제어 시스템, 고속 병렬통신보드 및 PWM 인버터로 나누어진다.

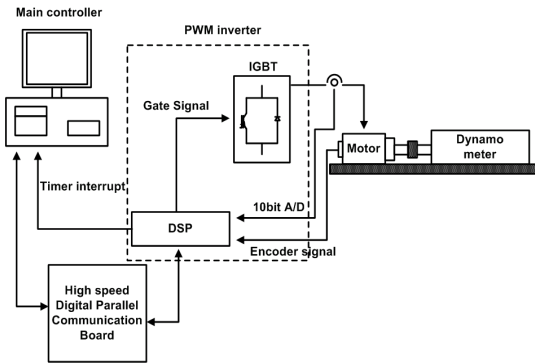


Figure 5: Overall permanent magnet direct current drive system.

주 제어 시스템은 80586 마이크로프로세서가 장착된 IBM PC를 사용하였으며, 주변기기와의 데이터 입출력을 위하여 PCL-818 카드를 설치하여 이용하였다. PCL-818 카드는 12비트의 A/D 컨버터 입력, 16비트 디지털 입력, 16비트의 디지털 출력 그리고 외부 인터럽트 입력기능 등을 가지고 있다. 본 논문에서는 전동기의 상전류와 DC 링크 전압은 PWM 인버터에 내장되어 있는 10비트 고속 A/D 컨버터를 이용하여 검출하였으므로 PCL-818 카드는 16비트 디지털 데이터 입출력과, IBM PC 와 PWM 인버터의 통신 동기를 맞추기 위한 타이머 인터럽트 입력용으로 사용되었다.

PWM 인버터는 마이크로칩(MICROCHIP)사의 dsPIC30F6010A를 사용하여 구성하였다. dsPIC30F6010A는 DSP 모듈을 내장한 16비트 마이크로 컨트롤러로서 최대 30 MIPS로 동작할 수 있고, 4개의 sample & hold 모듈을 내장한 10비트 A/D 컨버터, 속도 검출용 엔코더 입력, 전동기제어를 위한 PWM 출력 모듈 등을 내장하고 있다.

전동기의 상전류 검출은 두 개의 절연형 전류센서를 사용하였다. 전류센서는 램(LEM)사의 LAH 25-NP를 사용하였다. 전원은 양 전원을 사용하였고, 전류출력이므로 출력단자에 저항을 설치하여 전압출력으로 전환한 후, OP Amp인 TL082를 이용하여 전류센서 출력을 dsPIC30F6010A의 A/D 입력 범위인 0 ~ 5[V]로 변환하였다.

직류링크전압 검출은 절연형 전압검출센서인 램(LEM)사의 LV 25-P를 사용하였다. 전압검출센서 역시 전류 출력형이므로 출력단자에 저항을 설치하고 전류센서와 같은 방식으로 dsPIC30F6010A의 A/D 입력에 연결하였다. 인버터부는 IGBT모듈을 사용하여 구성하였다. IGBT 모듈은 페어차일드(FAIRCHILD)사의 FSAM30SH60A라는 파워 모듈을 사용하였다. 이 모듈은 600[V] 30[A] IGBT 6개로 구성되어 있고, IGBT 게이트 드라이버가 내장되어 있으며 부트스트랩 기능으로 게이트 드라이브단의 전원부를 간편하게 구성할 수 있다. 추가적으로 IGBT모듈의 온도 모니터링 기능과 과전류에 의한 IGBT모듈 손상을 방지하기 위한 이상 신호 생성 기능들이 있다. 그리고 속도제어 실험의 검증을 위하여 속도검출회로를 구성하였다. 본 실험에서는 출력펄스간의 시간간격을 측정함으로써 속도를 계산하는 T방식을 적용하였고 360[pulses/rev]의 엔코더를 사용하였다(Figure 6).

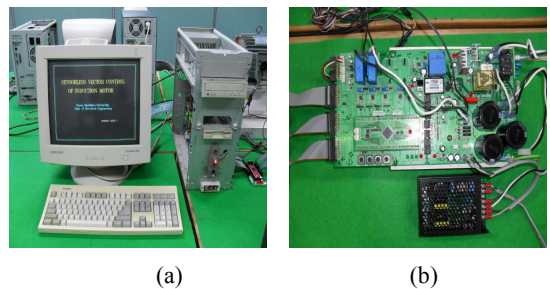


Figure 6: Configuration of the controller. (a) Main control system (b) PWM Inverter

실험에 사용한 영구자석 직류전동기의 파라미터 및 시스템 정수는 Table 1과 같다.

Table 1: Parameters of permanent magnet motor.

정격출력	2.5[HP]	정격전압	180[V]
정격전류	12.5[A]	정격속도	3800[rpm]
극수	2	전기자권선 저항	1.7[Ω]

4. 실험결과

실험은 우선 저속영역, 중속영역 및 고속영역에서의 지령속도 추종성능 및 부하특성을 알아보았으며, 그 후 중속영역에서의 회전자 반전 지령속도에 대한 응답 특성을 알아보았다.

Figure 7은 무부하 상태에서 200[rpm]의 계단상의 속도지령을 인가하였을 때의 속도응답을 나타낸다. 실험결과 상승시간이 0.4초 정도로 빠른 응답 특성과 양호한 저속영역 제어 특성을 보인다.

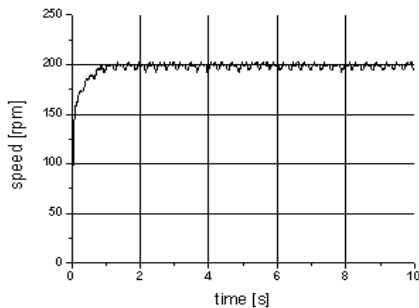


Figure 7: Experimental responses for step change of speed setting.(0→200[rpm])

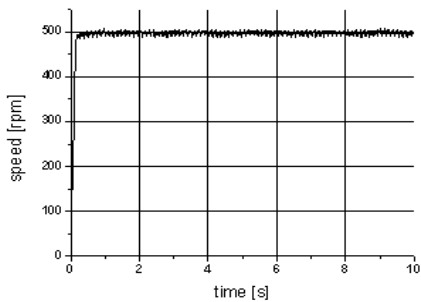


Figure 8: Experimental responses for step change of speed setting and load torque.(0→500[rpm], (0→4[N·m]))

Figure 8은 0[rpm]에서 500[rpm]으로 계단입력의 속도지령을 가했을 경우 전동기의 속도응답특성

과 구동 중 4[N·m]의 계단상의 부하토크를 인가하였을 경우의 속도응답을 나타낸다. 중속영역에서 부하가 변동하였을 경우에도 속도오차가 거의 없는 제어가 수행되는 것을 알 수 있다.

Figure 9는 0[rpm]에서 2000[rpm]으로 계단입력의 속도지령을 가했을 경우 전동기의 속도응답 특성과 구동 중 4[N·m]의 계단상의 부하토크를 인가하였을 경우의 속도응답을 나타낸다. 고속영역에서 부하가 변동하였을 경우에도 속도오차가 거의 없는 제어가 수행되는 것을 알 수 있다.

Figure 10은 1000[rpm]의 속도로 구동 중 -1000[rpm]으로 반전속도지령을 가했을 경우의 속도응답을 도시한다. 중속영역에서 속도 반전특성이 우수함을 볼 수 있다.

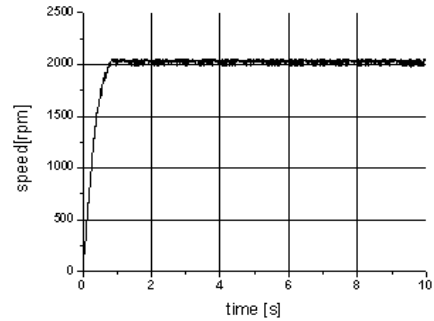


Figure 9: Experimental responses for step change of speed setting and load torque.(0→2000[rpm], (0→4[N·m]))

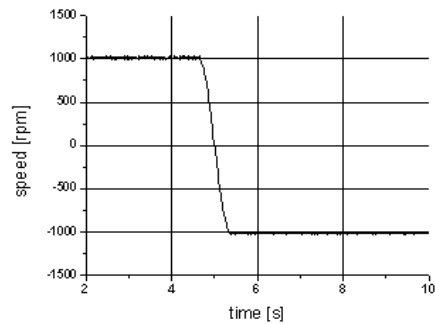


Figure 10: Experimental responses for step change of speed setting.(1000→-1000[rpm])

5. 결 론

본 논문에서는 기존의 PI제어기 대신에 히스테리

시스 제어를 통하여 순시 토크를 제어하는 방법으로 수식모델의 토크와 영구자석 직류전동기의 전류를 이용하여 추정된 현재의 토크를 비교하여 오차를 계산한 후 히스테리시스 밴드를 거쳐 수식모델의 토크와 실제 전동기의 토크 오차를 최소화하기 위한 전압을 선정하여 출력하는 방법을 제안하였다.

본 논문에서 제안한 제어방식의 제어특성을 컴퓨터 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였고, 우수한 제어특성을 입증하였다.

본 논문의 연구결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 영구자석 직류전동기의 안정된 제어특성을 얻기 위해 히스테리시스 제어를 통한 센서리스 속도 제어 방법을 제안하였다.
- 2) 저속, 중속 및 고속영역의 속도지령에 대한 응답특성이 양호함을 확인할 수 있었다.
- 3) 저속, 중속 및 고속영역의 부하특성의 우수함을 확인할 수 있었다.
- 4) 중속영역에서 반전 속도지령에 대한 전동기의 역전 운전 특성이 양호함을 확인하였다.

차후, 전동기정수와 온도변동에 따른 영향을 감소시킨다면, 본 논문에서 제시한 센서리스 속도제어방식은 운전조건 및 외란에 강인한 제어특성을 보일 것으로 사료되며 이를 향후 과제로 삼고자 한다.

참고문헌

- [1] 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.
- [2] 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, vol. 1, pp. 538-542, 1994.
- [3] K. Lizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo and K. Mohri, "Microcomputer control for sensorless brushless motor", IEEE Trans. Indus. Appl., vol. IA-21, no. 4, pp. 595-601, 1985.
- [4] N. Ertugrul and P.P. Acarnley, "A new algorithm for speed operation of permanent magnet motors", IEEE IAS Conf. Rec., pp. 414-421, 1992.
- [5] R. Joetten and G. Maeder, "Control methods for good dynamic performance induction motor drives based on current and voltage as measured quantities", IEEE Trans. Indus. Appl., vol. 19, no. 3, pp. 356-363, 1983.
- [6] U. Baader, M. Depenbrock and G. Gierse, "Direct self-control of inverter-fed induction machine: A basis for speed control without speed measurement", IEEE Trans. Indus. Appl., vol. 28, no. 3, pp. 581-588, 1992.
- [7] P. L. Jansen, R. D. Lorenz and D. W. Novotny, "Observer-Based direct field-orientation analysis and a comparison of alternative methods", IEEE Trans. Indus. Appl., vol. 30, no. 4, pp. 945-953, 1994.
- [8] S. Tamai, H. Sugimoto and M. Yano, "Speed-Sensorless vector control of induction motor with model reference adaptive system", IEEE IAS., pp. 189-195, 1987.
- [9] K. D. Hurst and T. G. Habetler, "Sensorless speed measurement using current harmonic spectral estimation in induction machine drives", IEEE Trans. Power Electron., vol. 11, no. 1, pp. 66-73, 1996.
- [10] 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 Engineering, vol. 27, no. 4, 2003.