Journal of the Korean Institute of Illuminating and Electrical Installation Engineers Vol. 19, No.5, pp. 54~59 July 2005 논문 19-5-8

센서리스 구동 브러시리스 DC 모터의 기동 특성 개선에 관한 연구

(A Study on Starting Characteristics Improvement of Sensorless BLDC Motor)

홍선기*
(Sun-Ki Hong)

요 약

브러시리스 직류 전동기(Brushless DC Motor : BLDCM)는 기존의 직류 전동기의 단점인 브러시를 제거한 것으로 제어가 간단하면서도 넓은 범위에서 속도 제어가 가능하고 효율이 높으며 경제적으로 제어기 제작이 가능하여 산업용 뿐 아니라 가전에까지 널리 사용된다. 그러나 BLDCM을 구동하는데 필수적인 센서는 제품 가격을 증가시킬 뿐만 아니라 운전 환경이 열악한 곳에서는 동작 오류를 발생하는 원인이 되고 있다. 본 논문에서는 BLDCM의 센서리스 구동에서 정상상태 운전뿐만 아니라 안정된 초기 구동에 관한 연구를 수행한다. 정상상태 운전은 측정된 역기전력을 이용하여 회전자의 위치를 결정함으로써 이루어지며, 초기 구동을 개선하기 위해 환류 다이오드로부터 측정된 전류 신호를 이용하여 초기 구동을 하게 된다. 이것은 실험을 통해 타당성을 확인하였다.

Abstract

Brushless DC motor is a motor which is modified from DC brush motor and it does not have brushes. BLDCM is easy to contro, has wide speed range, high efficiency. However it needs speed sensor like encoder which increases the motor price and cause some faults in poor surroundings. In this paper, for the sensorless control, the driving techniques for the initial stable start and the steady state are studied. For the steady state, the rotor position is determined using the measured back-EMF. To enhance the initial stating performance, the current signal from the free-wheeling diode is used. The results are conformed through the experiments.

Key Words : Capacitor-run, Single phase, Permanent magnet, Synchronous motor

1. 서 론

BLDCM의 역기전력은 120[°]의 도통 구간을 갖는 사다리꼴 형태로 이루어지기 때문에 회전자의 위치 정보는 전기각으로 60[°]마다 바뀐다. 따라서 BLDCM을 센서리스로 구동하기 위해서는 회전자 위치 정보를 전기각으로 60[°]마다 검출해야 한다[1].

* 주저자 : 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수
Tel : 041-540-5674, Fax : 041-540-5693
E-mail : skhong@office.hoseo.ac.kr
접수일자 : 2005년 3월 30일
1차심사 : 2005년 4월 4일, 2차심사 : 2005년 5월 4일
심사완료 : 2005년 5월 12일

BLDCM을 센서리스로 운전하는 방법에는 여러 가지가 있으나 본 논문에서는 그중 역기전력 검출법[2]과 프리휠링 다이오드 전류 검출법을 이용하였다.

역기전력 검출법은 고정자 권선에 유도된 역기전력을 이용하여 회전자 위치를 결정한다[2]. 3상 BLDCM의 역기전력은 한 상이 120[°]인 사다리꼴 파형이며 이 파형을 대역통과 필터를 이용하여 90[°] 위상 지연 시키면 회전자의 위치를 알 수 있다. 이 방법은 고속 영역에서 모터의 속도 변화에 상관없이 일정하게 위상지연이 일어남으로써 안정적으로 회전자 위치를 찾을 수 있는 장점이 있다. 그러나 역기전력 검출 회로가 위치 신호를 감지할 수 있을 때까지 임의의 주파수로 모터를 가속시켜야 하므로 저속 영역에서 역기전력을 검출하기 어려운 단점이 있다.

프리휠링 다이오드 전류 검출법은 스위칭 소자에 역 병렬로 연결된 프리휠링 다이오드의 도통 상태를 검출하여 회전자의 위치 정보를 얻는다[3]. 위치 정보는 매 60[°]마다 프리휠링 다이오드의 도통 상태를 검출하여 얻는데 역기전력에 의해 프리휠링 다이오드에 전류가 흐르는 것은 모터의 기동 초기부터 발생하므로 저속에서도 회전자의 위치 정보를 파악할 수 있다. 그러나 이 방법은 고속 운전시 회전자 위치의 검출 분해능이 저하되는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 두 방법의 장점을 응용하여, 초기 기동과정에서는 프리휠링 다이오드에 흐르는 전류를 검출하여 회전자의 위치를 파악하며 기동 이후에서 고속 운전시에는 역기전력 검출법에 의해 회전자 위치 정보를 파악하여 모터가 전 영역에서 안정하게 구동되는 방법을 제안한다.

2. 본 론

2.1 시스템 구성

그림 1은 전체 시스템의 기본 구성은 나타내고 있다. 시스템은 크게 모터 구동부와 회전자 위치 측정 회로, 마이크로 컴퓨터부로 구성된다. 모터 구동부는 마이크로 컴퓨터에서 발생한 스위칭 신호에 의해 모터에 전원을 인가한다. 회전자 위치 측정 회로는 두 가지로 구성되는데 첫째는 프리휠링 다이오드에 흐르는 전류를 검출하는 회로이며 둘째는 역기전력으로부터 위치 신호를 얻어내는 필터 회로이다. 마이크로 컴퓨터는 역기전력 검출 회로에서 얻어진 회전자 위치 신호와 프리휠링 다이오드의 신호를 이용하여 모터 구동을 위한 PWM을 발생시키며, 전체적인 시스템 구동을 하게 된다.

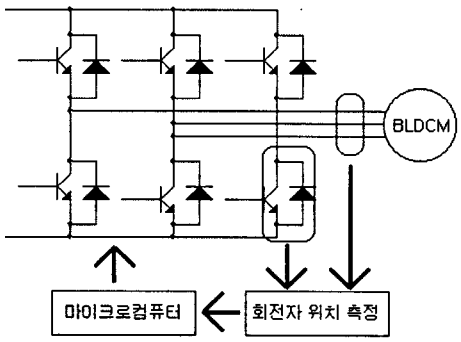

그림 1. 시스템 구성도
Fig. 1. System configuration

2.2 회전자 위치 측정

모터가 정지한 상태에서는 역기전력이 0[V]이다. 따라서 초기 기동을 위해서는 역기전력을 이용할 수 없으며, 다른 방법이 필요하다. 기존의 역기전력 검출법에서는 회전자 위치를 판단 할 수 있을 만큼의 역기전력 파형을 얻을 수 있을 때까지 동기기처럼 임의의 주파수로 가속시켰다[4]. 그러나 이 방법은 초기 기동시 초기 위치를 모르므로 부드러운 기동이 곤란하다. 본 논문에서는 이러한 방법 대신 프리휠링 다이오드에 흐르는 전류를 검출함으로써 기존의 역기전력 검출법에 의한 방법보다 훨씬 앞선 시점에서 센서리스 구동을 할 수 있게 한다.

기동방법은 먼저 임의의 두 상을 도통시킨 후 다음 신호에 120[°] 앞선 구동 신호를 출력한다. 이 때 프리휠링 다이오드에 흐르는 전류를 검출해서 구동 신호를 출력하면 센서리스 제어가 시작된다.

2.2.1 프리휠링 다이오드 전류 검출법

그림 2는 A+와 B-에 구동 신호가 주어졌을 때의 간략화된 회로이다. 이 경우 C상이 개방상태가 된다.

만약 A+가 오프되면 전류는 프리휠링 다이오드 D_a를 통해서 계속 흐르다가 감소한다. 이때 C상의 전압은 다음과 같이 주어진다[3].

$$v_c = e_c + \frac{V_{CE} - V_F}{2} - \frac{e_a + e_b}{2} \quad (1)$$

V_{CE}와 V_F는 트랜지스터와 다이오드의 순방향 전압강하이다. 프리휠링 다이오드 D_c가 도통할 조건은 다음과 같다.

$$v_c < -V_F \quad (2)$$

역기전력이 사다리꼴이므로 e_c가 0인 근처에서 e_a와 e_b의 합은 0에 가깝다. 그러므로 프리휠링 다이오드 D_c의 도통 상태는 다음과 같다.

$$e_c < -\frac{V_{CE} + V_F}{2} \quad (3)$$

C상의 역기전력이 음이 되면, 개방된 상의 전류는 마이너스측 다이오드 D_{c-}를 통하여 흐른다. 이 경우는 결국 전류가 A상에서 C상으로 전류가 흐르고 있음을 알 수 있게 된다. 이러한 경우는 6가지가 존재하게 되고, 각각 인버터 운전의 6가지 모드를 나타내게 되므로, 프리휠링 다이오드 전류를 검출하여 회전자 자석의 위치를 알 수 있게 되는 것이다. 따라서, 초기기동 서 3상 중 2상을 강제로 여자시키면 식 (3)을 만족키는 경우 다이오드 전류가 검출되어 초기위치를 검출하게 된다.

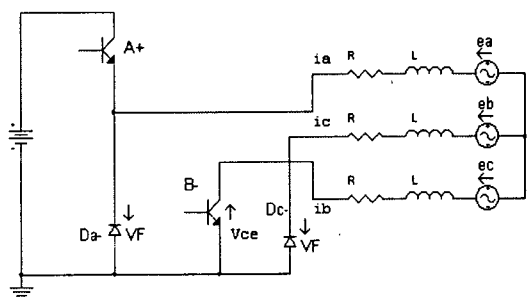

그림 2. A+와 B-에 구동신호 때의 간략화된 회로
Fig. 2. Simplized circuit for A+ and B- signal

2.2.2 역기전력 검출법

프리휠링 다이오드 전류 검출법을 이용한 구동은 기동 시는 유리하지만 어느 정도 역기전력을 검출할 수 있는 속도 이상에서는 역기전력 검출에 의한 센서리스 구동이 유리하다. 역기전력에 의한 변환시기를 결정하는 방법은 그림 3과 같이 측정된 B상의 역기전력 파형이 필터를 통과한 파형 Sa와 인버터에 인가하는 신호 B+신호와의 차이가 δ보다 작아지면 변환한다.

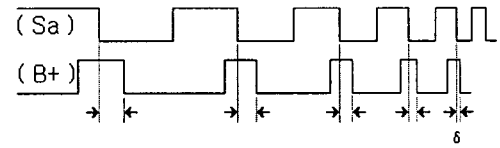

그림 3. 정상상태 구동으로의 변환 시점
Fig. 3. Transtion points to steady state driving

모터의 역기전력으로 센서 신호를 충분히 만들어 낼 수 있다고 판단되어지면, 마이크로 컴퓨터는 세 개의 회전자 위치 검출 신호들을 받아서 논리적으로 여섯 단계의 인버터 신호를 만들어 낸다.

세 개의 회전자 위치신호(S_a, S_b, S_c)를 통해 인버터에 인가할 구동 신호를 생성하게 된다. 생성 공식은 아래와 같다.

$$A+ = S_b^- \cdot S_c,\ B+ = S_a \cdot S_c^-,\ C+ = S_a^- \cdot S_b \quad (4)$$

$$A- = S_b \cdot S_c^-,\ B- = S_a^- \cdot S_c,\ C+ = S_a \cdot S_b^- \quad (5)$$

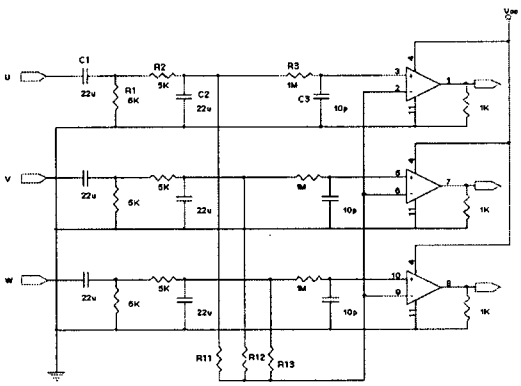

그림 4. 회전자 위치 검출용 필터 회로
Fig. 4. Filter circuit for detecting the rotor position

역기전력이 측정되면 구동 신호는 90[°] 위상지연 시킨 신호를 바로 스위칭 신호로 쓸 수 있다. 회전자 위치 검출용 필터 회로는 그림 4와 같다. 필터를 나누어서 보면 첫째단이 대역통과 필터이며 둘째단은 고주파 잡음을 줄이기 위한 저역통과 필터이다.

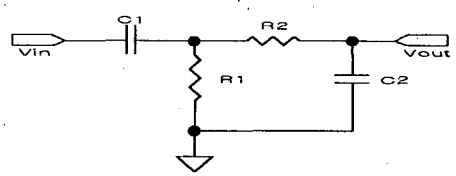

그림 5. 대역통과 필터
Fig. 5. Band-pass filter

대역통과 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_1(s) = \frac{R_1C_1s}{R_1R_2C_1C_2s^2+(R_1C_1+R_1C_2+R_2C_2)s+1} \quad (6)$$

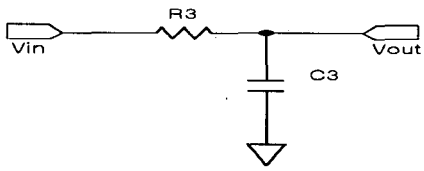

그림 6. 저역통과 필터
Fig. 6. Low-pass filter

한편, 저역통과 필터의 전달함수는 다음과 같다.

$$G_2(s) = \frac{1}{R_3C_3s+1} = \frac{1}{\tau s+1} \quad (7)$$

전체 전달함수는 부하효과가 무시할 만하다고 가정하면 $G(s) = G_1(s)G_2(s)$ 가 된다. 부하효과가 무시될 수 있으려면 $\frac{1}{sC_2} \ll R_3 + \frac{1}{sC_3}$ 가 성립되어야 한다. 이를 위해 $C_2 \gg C_3$가 만족되도록 한다. 또한 그림 4의 R11, R12, R13은 가상 접지를 얻기 위한 것으로 $1/C_2s$ 보다 충분히 크면 된다. 회전자 위치 검출용 필터 회로의 주파수 응답이 그림 7에 나타나 있다. 여기서 보면 모터가 구동되는 영역에서 위상이 90[°] 지연됨을 알 수 있다. 그리고 크기는 주파수가 증가함에 따라 감소하는데 역기전력이 주파수에 비례하여 증가하므로 특별한 문제는 발생하지 않는다.

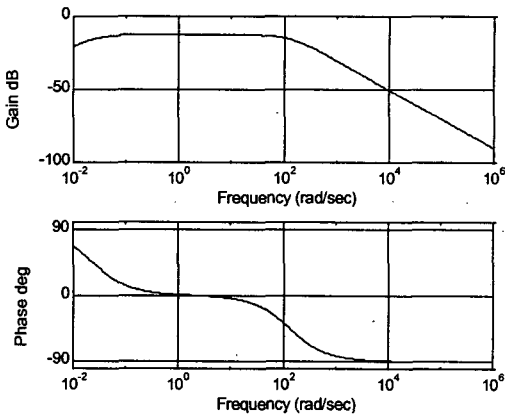

그림 7. 필터 회로의 주파수 응답
Fig. 7. Frequency response for the filter

그림 8은 그림 4의 필터 회로를 pspice로 시뮬레이션한 결과이다. A상의 역기전력이 필터에 입력되면 대역통과 필터를 통과한 신호가 비교기에 입력되어 중성점과 비교되어 구형파로 만들어진다. 이 신호는 회전자 위치에 대한 정보를 가지고 있으며 아래 그림에서 보여지듯이 역기전력에 90[°] 위상지연이 된 것을 알 수 있다.

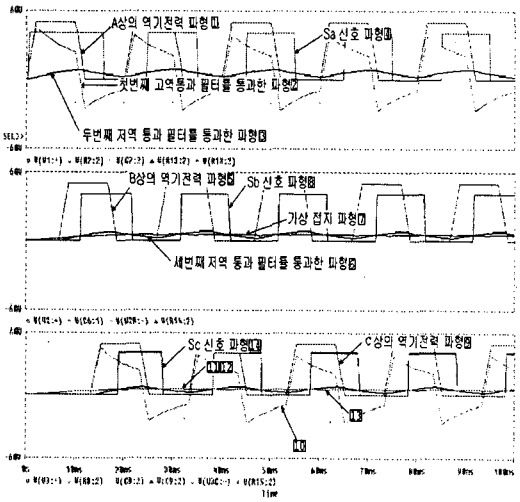

그림 8. 필터 시뮬레이션 파형
Fig. 8 Filter simulation wave forms

3. 실험 결과

이상의 제안한 방법을 이용하여 실제 모터를 구동

하였다. 대상 모터는 250[W]급 3상 16극 모터이며 일정 토크의 부하를 갖고 있으나 본 논문에서는 무부하로 실험을 하였다. 그림 9는 A상의 프리휠링 다이오드에 흐르는 전류 파형이다. 그림 10은 다이오드에 흐르는 전류를 검출하기 위한 전류 검출회로이다. 다이오드 D1에 흐르는 전류는 션트저항 R2에 걸리는 전압을 계측하여 검출된다. 그림 9에서와 같이 다이오드에 흐르는 전류폭은 수백 μs 정도이기 때문에 전류 검출회로에서 이러한 전류 파형이 검출되면 모터는 센서리스로 기동되게 된다.

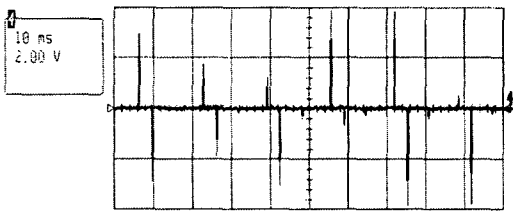

그림 9. 프리휠링 다이오드 전류 파형
Fig. 9. Freewheeling diode current waveform

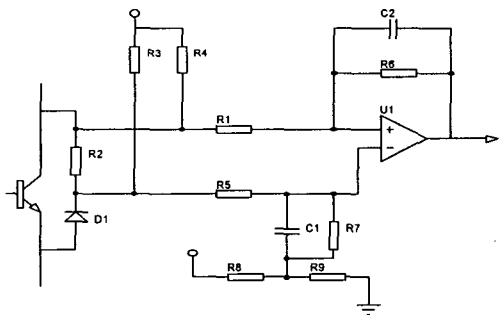

그림 10. 다이오드에 흐르는 전류 검출 회로
Fig. 10. Current detecting curcuit for diode

그림 10은 제안된 필터의 입출력 관계이다. 위 파형이 역기전력이며 아래 파형이 필터를 통과한 출력 파형이다. PWM의 영향을 받아 역기전력과 센서 신호에 고주파성분이 검출되지만 모터 구동에는 문제가 없다.

마이크로 컴퓨터는 그림 11에서 얻어진 3개의 센서 신호를 이용하여 BLDCM을 구동하기 위한 신호를 만들어 낸다. 그림 12는 이러한 신호로부터 만들어진, 회전자 위치 검출신호이다. 회전자 검출 신호는 서로 120도 위상차를 보이고 있으며, 이로부터 전동기 구동 인버터를 구동하여 BLDCM이 운전되게 된다.

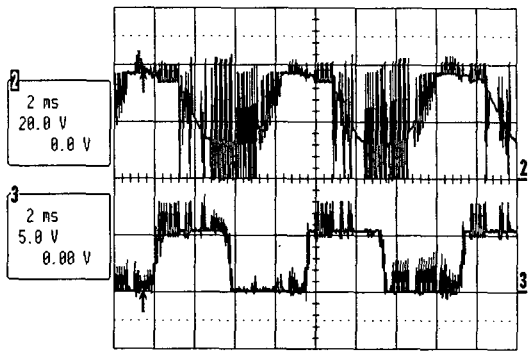

그림 11. A상의 역기전력 및 필터를 통과한 Sa 신호
Fig. 11. Back-EMF for phase A and the filtered signal Sa

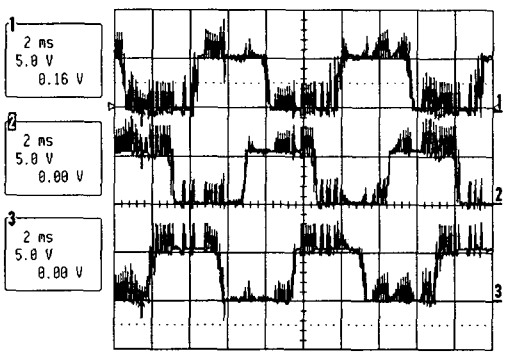

그림 12. 회전자 위치 검출 신호
Fig. 12. Rotor position signal

4. 결 론

본 논문에서는 마이크로 컴퓨터를 이용한 BLDCM의 센서리스 구동에 관한 연구를 하였다. 역기전력 검출법과 프리휠링 다이오드 전류 검출법의 장점을 이용하여 초기 구동시에는 프리휠링 다이오드 전류 검출법에 의해 회전자 위치 정보를 파악하였으며 정상상태 운전시에는 역기전력 검출법에 의해 회전자 위치 정보를 파악함으로써 기존의 역기전력 검출법에서 문제가 되었던 저속 영역에서의 센서리스 구동과 프리휠링 다이오드의 고속 영역에서의 문제를 해결하였다.

모터의 속도제어는 PWM을 이용하여 듀티비를

조정함으로써 구현하였고, 실험 결과를 통해 저속에서 고속 영역에 이르기까지 안정한 구동을 하는 것을 알 수 있었다. 이러한 구동법은 펌프용과 같이 사용이 열악한 환경에 응용될 수 있을 것으로 기대된다.

본 연구는 2004년도 호서대학교 벤쳐산학컨소시엄 연구비 지원에 의해 연구되었음.

References

[1] T. Kenjo, S. nagamori, "Permanent Magnet and Brushless DC motors", Sogo Electronics Publishing Company, 1986.
[2] K. Iizuka, H. Uzuhashi, M. Kano, T. Endo, and K. Mohri, "Microcomputer Control for Sensorless Brushless motor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.21, No.4, 595-601, 1985.
[3] S. Ogasawara, H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless dc Motors", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.27, N0.5, 928-933, 1991.
[4] Jae-Son Won, Tae-Sam Kang and Sun-Ki Hong, "A Study of Sensorless Driving for the Axial Type Double Rotor Brushless DC Motor", KIEE Annual Autumn Conference, p168-170, 1998.

◇ 저자소개 ◇

홍선기 (洪瑄基)
1965년 1월 24일생. 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1989년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1995년~현재 호서대학교 전기정보통신공학부 부교수.