

센서리스 BLDC 전동기의 구동 특성

김태현, 김병국, 황동원, 이인재, 조원영, 조윤현
 동아대학교

Drive Characteristic of a Sensorless BLDC Motor

Tae-Hyun Kim, Byong-Kuk Kim, Dong-Won Hwang, In-Jae Lee, Won-Young Jo, Yun-Hyun Cho
 Donga-A University

Abstract - This paper is investigated the drive for sensorless BLDC motor using back EMF with ATMEGA-128. Since the BLDC motor should be commutated according to a rotor position. But the sensors increase cost and volume, complicate the motor configuration, and do not operate properly in some operating environments such as high temperature conditions, so that the necessity of sensorless commutation algorithm is getting increased. This paper is proposed the methode to drive BLDC motor without position sensor using Back EMF.

1. 서 론

BLDC 전동기는 DC 전동기에서 브러시, 정류자 등 기계적인 접촉부를 들어내고 이것을 전기적으로 바꾸어 놓은 직류 전동기를 말한다. 그러므로 전기적, 기계적 노이즈가 작고 브러시를 보수, 유지할 필요가 없다. 또한 브러시를 사용한 정류를 할 때 발생하는 스파크가 없기 때문에, 폭발 위험성이 있는 곳에서도 사용이 가능하다.

BLDC 전동기의 최대의 특징은 원리적으로 브러시리스(Brushless)로 인해 노이즈가 발생하지 않는다는 것이다. 여기에 기계적인 접촉부가 없으므로 고속회전형, 장수명형 전동기의 실현도 가능해진다. BLDC 전동기는 브러시가 없기 때문에, DC 전동기와 달리 회전자의 위치에 따라 그에 따른 정류를 수행하여야 한다. 이와 같은 구조의 특성 때문에 BLDC 전동기는 정류시 회전자의 위치 정보가 필요하고, 보통 위치 검출 센서를 부착하여 위치 정보를 얻는다. 위치 검출 센서로는 리졸버(resolver) 및 광학 엔코더, 홀센서 등이 있다. 위치 검출 센서는 전동기의 가격 및 크기를 증가 시키고, 전동기의 구조를 복잡하게 할 뿐만 아니라, 주변 온도나 습도 등 작동 환경에 제한을 받는다. 이러한 이유로 위치 검출 센서가 없는 BLDC 전동기를 작동 시키는 방법이 연구되어 지고 있다.

센서리스 BLDC 전동기 구동에 가장 많이 쓰이는 방법이 역기전력(back EMF)을 이용하는 것이다. 전동기의 회전자에 회전하면 코일에 역기전력이 발생하는데, 권선의 각 상에서 발생하는 역기전력은 회전자의 위치에 따라 주기적으로 발생하기 때문에 이를 통해서 위치 정보를 얻을 수 있다.

역기전력을 사용하는데 있어서 두 가지의 문제점이 있다. 첫째, 전동기를 구동시키는 별도의 시동 알고리즘이 필요하고 둘째, 저속에서 구동시의 문제이다. 두 가지 모두 회전 속도에 비례하는 역기전력의 특성에 기인한다. 따라서, 정지시나 저속 회전시 충분한 역기전력이 발생하지 않기 때문에 이와 같은 문제점이 발생된다.

본 논문에서는 BLDC 전동기에서 발생하는 역기전력의 ZCP에 의해서 회전자의 상대위치를 검출하고 넓은 속도 범위에서도 안정적인 구동을 할 수 있는

도록 연구를 수행하였다.

2. BLDC 전동기의 해석 모델 및 특성식

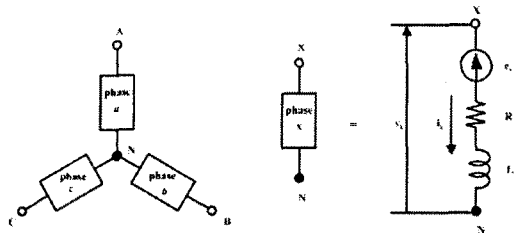


그림 1 Y-connected phase winding

저항 R과 인덕턴스 L을 집중 정수 모델(lumped-param eter model)로 설정하고, x상의 상전압, 상전류, 상역기전력의 방향을 그림 1과 같이 정의한다.

BLDC 전동기의 전압 방정식은 다음과 같은 행렬 형태로 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, v_a, v_b, v_c 는 상전압(phase voltage)이고, R은 코일의 저항, i_a, i_b, i_c 는 상전류(phase current), ψ_a, ψ_b, ψ_c 는 권선의 쇄교 자속(flux linkage)이다.

권선의 쇄교 자속 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \psi_a \\ \psi_b \\ \psi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ac} \\ M_{ba} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (2)$$

여기서 Φ_x 는 영구 자속에 의한 x상의 코일과 쇄교하는 쇄교 자속이고, L_{xx} 는 x상의 자기 인덕턴스(self inductance), M_{xy} 는 x상과 y상의 상호 인덕턴스(mutual inductance)이다.

식 (1)과 식 (2)를 이용하여 다음과 같은 회로 방정식(circuit equation)을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_{aa} & M_{ab} & M_{ca} \\ M_{ab} & L_{bb} & M_{bc} \\ M_{ca} & M_{cb} & L_{cc} \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix}$$

$$\cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} \quad (3)$$

회전각에 대해서 회전자의 자기 저항(reluctance)이 변하지 않는다고 가정하면 다음과 같다.

$$L_{aa}=L_{bb}=L_{cc}=L \quad (4)$$

$$M_{ab}=M_{ba}=M_{ca}=M_{ac}=M \quad (5)$$

식 (3)의 마지막 항 $\frac{d}{dt}[\Phi_a, \Phi_b, \Phi_c]^T$ 은 Faraday의 법칙에서 역기전력인 식 (6)으로 정의된다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \Phi_a \\ \Phi_b \\ \Phi_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

따라서, 식 (3)은

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L & M & M \\ M & L & M \\ M & M & L \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (7)$$

로 나타낼 수 있다. Y 결선 전동기에서

$$i_a + i_b + i_c = 0 \quad (8)$$

이므로, 식 (7)은 다음과 같이 정리된다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L-M & 0 & 0 \\ 0 & L-M & 0 \\ 0 & 0 & L-M \end{bmatrix} \cdot \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (9)$$

전압 방정식에서는 식 (9)를 적분해서 각 상에서의 전류를 구한다.

토크는 손실을 무시한다면 다음의 전기 에너지와 기계 에너지의 변환식에서 BLDC 전동기의 토크를 구할 수 있다.

$$T_e = (e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c) / \omega \quad (10)$$

여기서, T_e 는 발생 토크이고 ω 는 전동기의 회전 각속도이다. 식 (10)에서 좌변은 기계 에너지이고, 우변은 전기 에너지이다.

i_a, i_b, i_c 는 전압 방정식 식 (10)을 통해 구하고, e_a, e_b, e_c 는 식 (3)에서 구한다. 각 상의 전류와 역기전력의 곱을 모두 합한 값을 전동기의 회전 속도로 나눈으로써 토크 T_e 를 구할 수 있다.

뉴턴의 제 2 법칙에서 다음과 같은 방정식을 얻을 수 있다.

$$T_e - T_l = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega \quad (11)$$

여기서 T_l 은 부하 토크이고, J 는 회전자의 관성, B 는 마찰 계수이다. 동역학 방정식에서는 적분을 통해 전동기의 속도 ω 를 구할 수 있다.

3. 센서리스 BLDC 전동기 제어

3상 BLDC 전동기는 한 정류 단계에 두 상에만 전류가 흐르고, 나머지 한 상에는 전류가 흐르지 않는다. 회전자가 회전하면 각 상에는 역기전력이 발생한다. 이 역기전력을 이용하여 회전자의 위치 검출에 사용할 수 있다. 순수 역기전력 성분만을 직접 측정할 수 없기 때문에, 단자 전압을 측정함으로써 그 속에 포함된 역기전력 성분의 특성을 이용해 위치 검출을 할 수 있다.

Faraday의 법칙에서 알 수 있듯이 역기전력은 회전자와 고정자의 상대위치에 대한 함수로 사다리꼴 모양으로 나타나게 된다. 따라서 전류가 인가되지 않는 상에서는 반드시 역기전력의 부호가 바뀌는 Zero-Crossing Point가 존재하게 된다. 이 ZCP에 의해서 홀센서 없이 간접적으로 회전자의 위치를 파악할 수 있다. 역기전력의 ZCP를 검출하기 위해서 Comparator를 사용하여 단자전압과 중성점을 비교하였다. Comparator에 의해 중성점을 기준으로 하여 ZCP의 순간을 파악함으로써 마이크로프로세서에서는 회전자의 위치를 파악할 수 있게 된다. 하지만 ZCP순간과 실제 정류 순간은 전기적으로 30°의 위상차를 가지게 된다. 그래서 BLDC 전동기 구동시 전기각 30°를 보상해 주어야 하는데 정확한 전기각 30°의 위상차를 보상하는 방법은 현재 속도에 대한 정보를 바탕으로 전기각 30°에 해당하는 시간, 즉 쉬프트 타임을 계산하는 것이다. 현재 속도에 따른 위상차이가 차지하는 시간을 계산하여 ZCP 순간에서 그 시간만큼을 기다린 후에 다음의 정류신호로 정류하는 방법으로 정확한 정류의 순간을 계산할 수 있다.

4. 실험 장치 및 구성

4.1 실험 장치

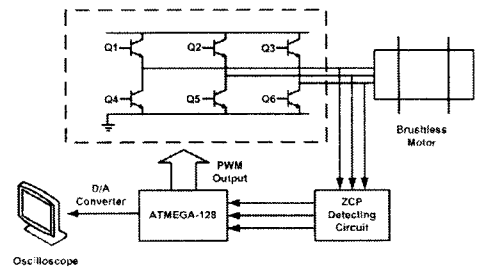


그림 2 실험 장치

그림 2는 실험 장치를 간단한 개략도로 나타낸 것이다. 실험 장치는 크게 인버터, ZCP 검출 회로, 마이크로프로세서, 대상 전동기로 나눌 수 있다. 센서리스 BLDC 전동기를 구동하기 위해 역기전력의 ZCP를 검출하고 그 펄스의 개수에 의해서 마이크로프로세서(ATMEGA-128)에서는 현재 속도를 계산하여 정확한 ZCP와 전기각 30°의 위상차를 delay 하여 정류하게 하였다. 처음 전동기를 기동시킬 경우에는 속도가 0이기 때문에 역기전력을 검출할 수가 없다. 그러므로 초기 임의의 한 정류신호에 의한 회전자 정렬을 수행하여 다음 정류신호를 인가하는 별도의 알고리즘을 사용하여 유인한 구동을 수행하였다. 그림 3은 실제 제작한 실험장치의 모습이다.

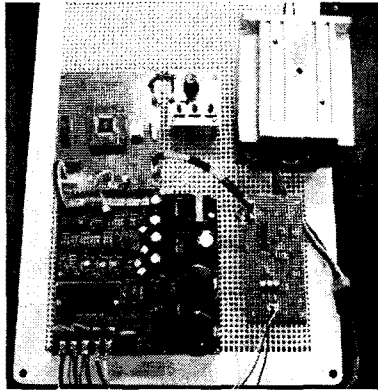
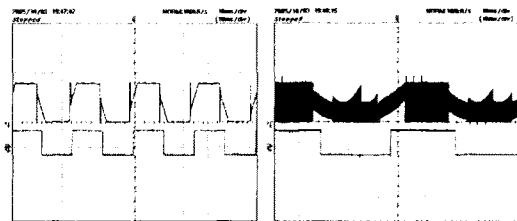


그림 3 실험 장치

4.2 실험 결과

그림 4는 역기전력과 ZCP 검출회로의 출력 값을 나타낸 것이다. (a)는 PWM duty비가 100%이고 (b)는 50%이다. 두 조건 모두 ZCP가 정확하게 검출되는 것을 확인할 수 있다.

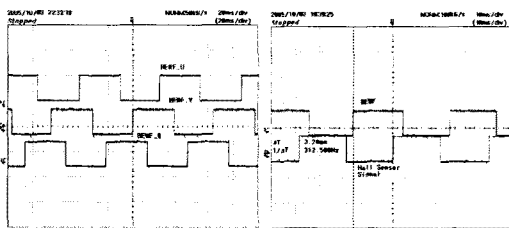


(a) PWM duty 100% (b) PWM duty 50%

그림 4 역기전력과 ZCP
(20V/div, 5V/div)

그림 5의 (a)는 3상 역기전력의 ZCP 출력 값이다. 3상이 정확하게 120°의 위상차를 가지는 것을 알 수 있다. (b)는 홀센서 신호와 ZCP의 출력 값이다. ZCP가 홀센서 신호보다 정확하게 30° delay되는 것을 볼 수 있다.

위의 결과에 의해서 BLDC 전동기 역기전력의 ZCP를 이용해 전기각 30°의 위상차를 보상해주면 회전자의 상대위치를 검출하여 전동기를 구동하는 것이 가능함을 확인할 수 있다.

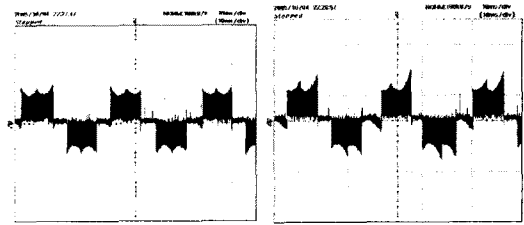


(a) 3상 ZCP (b) ZCP와 홀센서 신호

그림 5 BLDC 전동기의 ZCP
(5V/div)

그림 6은 홀센서를 부착한 BLDC 전동기와 센서리스 BLDC 전동기를 구동하였을 때 각각의 상전류를 측정하

여 비교한 것이다. 그림에서 알 수 있듯이 센서리스 BLDC 전동기의 경우 전류가 약간 뒤는 부분이 발생하기는 하지만 홀센서를 사용하는 경우와 거의 일치하는 것을 알 수 있다.



(a) 홀센서 구동의 상전류 (b) 센서리스 구동의 상전류

그림 6 BLDC 전동기 상전류
(1A/div)

5. 결론

본 논문에서는 BLDC 전동기에 별도의 위치센서 없이 역기전력의 ZCP를 검출하고 현재 속도에 의한 정류타이밍의 계산을 통해 센서리스 BLDC의 구동하고 그 특성을 확인하였다. 초기 기동시에는 독립적인 알고리즘을 수행하여 저속에서도 유연한 시동을 구현하였고 센서를 사용하여 구동하였을 경우와 비교하여 그 타당성을 검증하였다.

향후 본 논문에서 연구된 구동 특성에 효율적인 제어 기법을 추가하여 보다 안정적인 구동을 수행하는 것이 과제로 남는다.

[참고 문헌]

- [1] 차준호, "공간전압벡터 PWM방식을 이용한 영구자석형 동기전동기 순시 토크제어에 관한 연구", 동아대학교, 2004
- [2] 윤덕용, "AVR ATMEGA-128 마스터" 서울 : OHM(2004)
- [3] 조형민, "DSP를 이용한 브러시리스 DC 모터의 센서리스 구동 및 속도 제어에 관한 연구", 한양대학교, 1998
- [4] 김정환, "DSP로 리니어 모터 제어하기" 서울 : 동일(2003)
- [5] R. Krishnan, "Electric Motor Drives", New Jersey : Prentice Hall
- [6] Jianwen Shao, "A Novel Microcontroller-Based Sensorless Brushless DC(BLDC) Motor Drive for Automotive Fuel Pumps", IEEE Transactions On Industry Applications, Vol. 39, No. 6, November/December 2003, pp. 1734 1740
- [7] S. Ogasawara and H. Akagi, "An Approach to Position Sensorless Drive for Brushless DC Motor," IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 27, No. 5, Sep. 1991, pp. 928 933.