

센서리스 구동 방식을 이용한 BLDC 전동기의 토크리플 저감에 관한 연구

문지우, 이민재, 김병국, 조윤현
동아대학교

A study on the reduction of Torque ripple of the sensorless controlled BLDC

Ji-Woo Moon, In-Jae Lee, Byong-Kuk Kim, Yun-Hyun Cho
Dong-A University

Abstract - BLDC(Brushless DC) 전동기는 브러시(bush) 방식 DC 전동기의 브러시와 정류자를 반도체 소자를 이용한 인버터로 대체한 것으로 높은 효율과 제어의 용이성 때문에 최근 많이 사용되고 있다. 하지만 회전자의 위치 정보에 의해 정류를 하므로 회전자 위치 센서가 필요하고 그에 따라 전동기의 구조가 복잡하게 되고 작동 환경에 제한을 받게 된다. 본 논문에서는 위치 센서 없이 고정자의 권선에 유기되는 역기전력을 이용한 센서리스(sensorless) BLDC 전동기의 토크리플 저감에 대하여 연구하였다. BLDC 전동기를 수학적으로 모델링하여 센서리스 BLDC 전동기의 토크리플 제어 알고리즘을 구성하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 그 결과를 검토하였다. 또한 기존 센서 부착형 BLDC 전동기와 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

1. 서 론

BLDC 전동기는 일반 DC 전동기에 비해 정류자가 없으며 Brush에 의한 마찰이 없어 마모가 없고 수명이 길며 소음과 유지비가 적다는 장점을 가진다. 또한 제어가 용이하여 고 신뢰성을 요구하는 산업 분야에서 널리 사용되고 있다.[1]

BLDC 전동기는 정류시 회전자의 위치신호가 필요하며 위치 정보를 얻기 위해 위치 검출 센서로 홀센서, 엔코더, 리졸버등을 사용한다. 위치 검출 센서는 전동기의 가격 및 크기를 증가시키며 전동기의 구조를 복잡하게 하며 주변 온도, 습도 등 작동 환경에 제한을 받는다. 이런 이유로 위치 검출 센서 없이 BLDC 전동기를 구동 시키는 센서리스 구동 방법이 연구되어져 센서리스 방식의 드라이버가 제작되고 있다.[5]

본 연구에서는 TMS320LF2407A DSP controller의 AD변환을 이용하여 단자전압을 측정하고 연산을 통해 위치 검출 센서를 대체하는 방식을 사용하였다. 또한 Hard-chopping PWM 방식을 이용하여 전류 리플을 감소시켰으며, 이를 Matlab/Simulink를 이용한 시뮬레이션 및 실험을 통해 증명하였다.

2. BLDC 전동기의 모델링

Y결선된 BLDC 전동기에서 전압방정식은 식 (1)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)을 상태 공간 형태의 미분 방정식으로 나타내면 각상에서의 전류는 식 (2)와 같이 얻을 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{1}{L_s} & 0 & 0 \\ 0 & \frac{1}{L_s} & 0 \\ 0 & 0 & \frac{1}{L_s} \end{bmatrix} \left\{ \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} R & 0 & 0 \\ 0 & R & 0 \\ 0 & 0 & R \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \right\} \quad (2)$$

손실을 무시한다면 BLDC 전동기의 발생 토크는 식 (3)과 같이 구할 수 있다.

$$T_e = \frac{(e_a i_a + e_b i_b + e_c i_c)}{\omega_r} \quad (3)$$

여기서, v_a, v_b, v_c : 모터의 상 전압, R 은 상의 전기저항, i_a, i_b, i_c : 상전류, L_s : 상의 전기자 인덕턴스, e_a, e_b, e_c : 상의 역기전력 ω_m : 각속도 이다.

각 상의 전류와 역기전력이 같다고 가정하면 토크는 식 (4)이고,

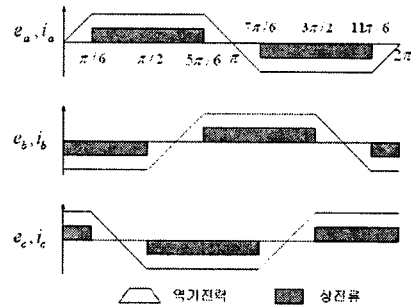
$$T_e = \frac{2EI}{\omega_m} \quad (4)$$

기계적 운동, 토크 방정식은 식 (5)와 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (5)$$

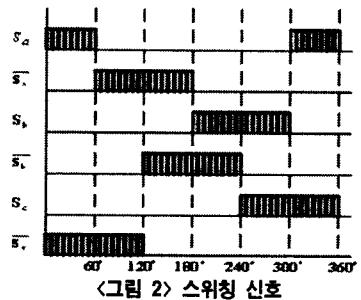
여기서, T_L 은 부하 토크, J 는 관성 모멘트, B 는 마찰계수이다.

BLDC 전동기는 역기전력이 그림 1과 같은 사다리꼴의 형태를 가진다. 역기전력의 값이 일정한 부분에서 구형파 형태의 상전류가 입력될 때 토크 리플이 가장 작게 발생하는 것을 알 수 있다.



<그림 1> BLDC 전동기의 각상의 역기전력 및 전류

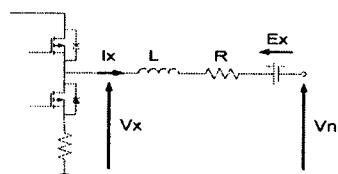
본 논문에서는 전류 응답 특성이 우수한 공간 벡터 PWM방식을 사용하였으며 이로 인한 PWM 파형은 그림 2와 같은 Hard-chopping PWM 형태가 된다.



<그림 2> 스위칭 신호

3. BLDC 전동기의 센서리스 운전원리

단자 전압의 역기전력을 이용하는 방식은 비 여자상의 역기전력 성분을 검출하는 방식이다. 역기전력은 회전자와 고정자의 상대위치에 대한 함수로 사다리꼴 모양으로 나타내게 된다. 따라서 비 여자상에서는 역기전력의 부호가 바뀌는 ZCP(zero crossing point)가 존재한다. 이 ZCP에 의해서 홀센서 없이 간접적으로 회전자의 위치를 파악할 수 있다. 역기전력의 ZCP를 검출하기 위해서 마이크로프로세서의 AD변환을 이용하여 단자 전압을 측정하여 연산하는 방식을 사용하였다. 각각의 역기전력은 전기각 360°에 두 번의 ZCP를 발생시키며 이 ZCP를 파악함으로써 회전자의 위치를 검출할 수 있다. 그림 3은 전동기의 단자 전압을 모델화한 것이다.



<그림 3> 단자 전압 모델링

V_x 는 단자전압, V_n 은 중성점 전압, E_x 는 역기전력, L 은 상 임피던스, R 은 상 저항이다.

$$V_x = RI_x + L \frac{dI_x}{dt} + E_x + V_n \quad (6)$$

각 상의 단자 전압을 합하여 정리하면

$$V_n = \frac{1}{3} * \sum_{X=1}^3 V_X \quad (7)$$

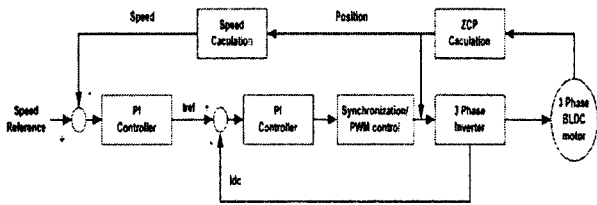
비 여자상의 역기전력은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$E_{nonfed} = V_{nonfed} - V_n = V_{nonfed} - \frac{1}{3} * \sum_{X=1}^3 V_X \quad (8)$$

위의 연산을 통하여 마이크로프로세서에서 회전자의 위치를 검출할 수 있다. 하지만 역기전력의 ZCP는 전기적으로 30°의 시간차이가 생긴다. 정확한 전기각 30°의 위상차를 보상하는 방법은 현재 속도에 대한 정보를 바탕으로 전기각 30°에 해당하는 시간차이를 계산하여 보상하였다.

4. 시뮬레이션 및 실험

본 논문에서는 Matlab/Simulink를 이용하여 시뮬레이션 하였으며, TMS320LF2407 DSP를 사용하여 알고리즘을 구현하였다. 제어 시스템 구성도는 그림 4와 같다.



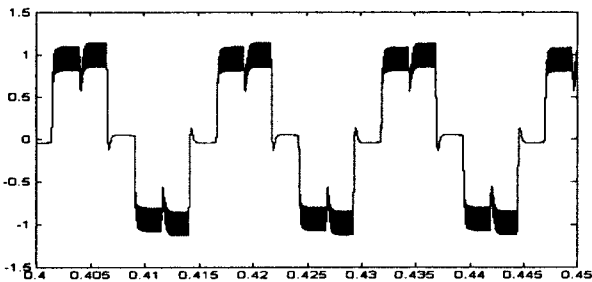
<그림 4> 제어 시스템 구성도

시뮬레이션 및 실험에 사용된 전동기 파라메타는 아래의 표 1과 같다.

<표 1>

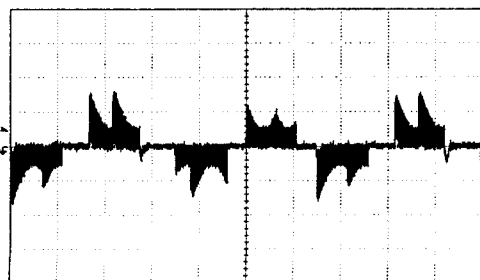
항 목	수 치
정격 용량	300[W]
정격 전압	24[V]
정격전류	16[A]
정격 속도	2400[rpm]
상 저항	0.5[Ω]
인덕턴스	10[mH]
관성 모멘트	0.033[Kg · m ² /sec]

시뮬레이션 및 실험은 1800[rpm]에서 실시하였다. 그림 5는 일반적인 BLDC 전동기의 전류 파형의 시뮬레이션 결과이다. 그림과 같이 전기자 전류의 전환시 전류리플이 발생하는 것을 확인할 수 있었다.



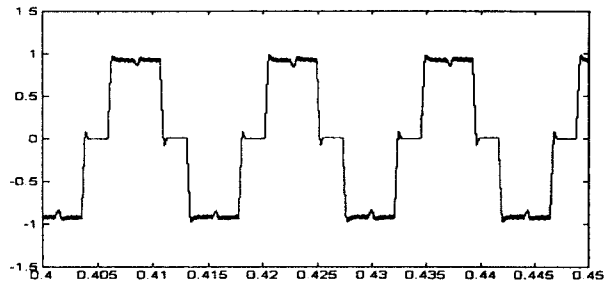
<그림 5> 일반적인 BLDC 전동기의 상전류

그림 6은 홀센서를 이용한 BLDC 전동기 구동의 상전류 파형이다. 시뮬레이션 결과와 같이 전류 리플이 발생함을 확인할 수 있다.



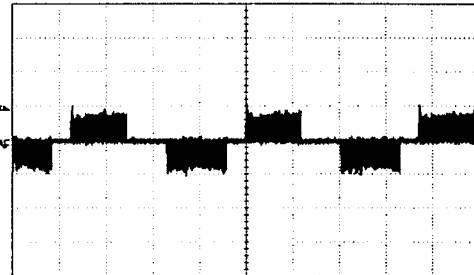
<그림 6> 홀센서를 사용한 운전방식에서의 상전류 (1800rpm, 1A/div, 5ms/div)

그림 7은 전류 리플이 발생하는 부분에서 전류를 제어한 시뮬레이션의 결과파형이다. 그림 5와 비교하여 전류리플이 감소함을 확인할 수 있다.



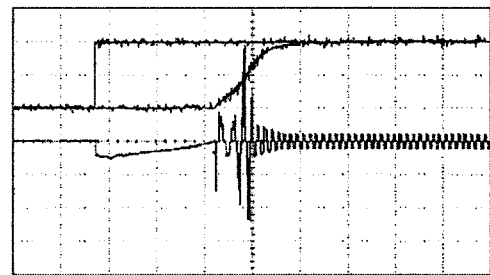
<그림 7> 제어시 BLDC 전동기의 상전류

그림 8은 센서리스 구동방식을 이용하여 전류제어를 실시한 상전류파형이다. 시뮬레이션 결과와 일치함을 확인할 수 있으며 전류리플이 현저하게 감소함을 확인할 수 있다.



<그림 8> 센서리스 운전방식에서 전류제어를 실시한 상전류 (1800rpm, 1A/div, 5ms/div)

그림 9는 지령속도 1800[rpm]에서의 전류, 속도 응답 특성이다. 동기가속이 끝난 직후부터 전류 제어를 실시하여 강제 정렬 후 300[ms]후 지령 속도인 1800[rpm]에 도달하는 것을 확인할 수 있었다.



<그림 9> 지령속도 1800[rpm]에서의 속도와 상전류 (5A/div, 200ms/div)

5. 결 론

본 논문에서는 TMS320LF2407 DSP를 이용하여 센서리스 구동 방식을 이용한 BLDC 전동기의 전류제어를 실시하였다. 제어기 구성을 위해 전동기를 모델링 하였으며 이를 바탕으로 시뮬레이션 및 실험을 실시하였다. 시뮬레이션 및 실제 실험을 통해 홀센서 부착형 BLDC 전동기와 센서리스 구동방식을 이용한 전동기를 비교하였으며 전류제어를 실시하여 전류리플이 현저히 감소됨을 확인할 수 있었다.

[참 고 문 헌]

- [1] 이인재, "DSP를 이용한 BLDC 전동기의 토크리플 저감을 위한 전류제어 기법에 관한 연구", 추계학술대회논문집, pp.186~188, 2005
- [2] Implementation of a Sensorless Speed Controlled Brushless DC drive using TMS320F240, 1997
- [3] Tea-Sung Kim, "A New current Control Algorithm for Torque Ripple Reduction of BLDC Motors", Annual Conference of the IEEE, 1521~1526, 2001
- [4] Dae-Kyong Kim, "Torque Ripple Reduction Method in a sensorless Drive for the BLDC Motor", KIEE International Transactions on EMECS, 4-B No.4, pp.196~200, 2004
- [5] 유용호, "3조조파를 이용한 PM BLDC 전동기 구동을 위한 센서리스 제어", 전력전자학회논문집, pp.323~330, 2005