

전류 전환각에 따른 BLDC 전동기의 토크 리플 특성 해석

이인재, 문지우, 김병국, 한성진, 조윤희
 동아대학교

Torque Ripple Characteristics Analysis of BLDC Motor
 According to Current Commutation Angle

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

Abstract - In this paper, analysis of BLDC motor torque characteristic according to current commutation angle. The ideal rectangular current wave and the trapezoidal current wave by current commutation angle and BLDC back-EMF are analyzed mathematically using Fourier series. Moreover, the simulation is performed by Matlab/simulink to compare with experiment results and analyze BLDC motor characteristics.

1. 서 론

최근 각종 산업기기 및 자동차기계에 널리 사용되고 있는 서보 전동기는 영구 자석으로 구성된 브러쉬리스(Brushless) 서보전동기의 사용이 급증하고 있는 추세이다. 이 중에서 영구 자석형 BLDC(Brushless DC) 전동기는 일반 DC 전동기에서 브러쉬, 정류자 등 기계적인 접촉부를 빼고 이것을 전기적으로 바꾸어 놓은 직류 전동기를 말한다. 그래서 BLDC 전동기를 무정류자 전동기라고도 한다. BLDC 전동기는 정류를 위한 브러쉬가 없기 때문에 전기적 기계적 노이즈가 작고 브러쉬를 보수, 유지할 필요가 없다. 브러쉬를 사용한 정류를 할 때 발생하는 스파크가 없기 때문에, 폭발 위험성이 있는 곳에서도 사용이 가능하다.

사다리꼴 형태의 역기전력을 갖는 BLDC 전동기는 이론적으로 120° 도통의 구형과 전류를 공급하면 직류 전동기처럼 전류에 비례하는 일정한 토크를 발생시킬 수 있지만 전환에 따른 비전환상에 전류 리플이 나타나며, PWM 전압원 인버터로 구동되는 BLDC 전동기의 토크 리플 성분은 전류 리플 및 전환에 의한 영향으로 나눌 수 있다. 전환에 의한 리플 성분은 전기자 권선의 저항과 인덕턴스 및 제한된 직류단 전압의 영향으로 인하여 스위치가 동작되는 상의 전류의 상승과 감쇠가 순간적으로 이루어지지 않고 일정한 지연시간을 상 전환됨에 따라 발생하는 성분으로써 전류 제어기에 의해 쉽게 저감될 수 없으며 역기전력 및 전동기 정수에 의한 전류와의 관계를 해석하여야 한다.

이에 본 논문에서는 이상적인 직사각형 형태의 전류와 전류 전환 각에 따른 사다리꼴 형태의 전류 및 BLDC 전동기의 역기전력을 Fourier series로 풀어내고, 그 특성을 수학적으로 분석하였다. 또한 그에 따른 BLDC 전동기의 특성을 Matlab/simulink를 이용해 시뮬레이션 하여, 마이플라 PWM 방식을 이용한 전류의 전환 각(commutation angle)에 따른 BLDC 전동기의 토크 리플 변화 특성 실험 결과와 비교, 분석하였다.

2. BLDC 전동기의 모델링 및 토크리플

2.1 BLDC 전동기 모델링

BLDC 전동기의 상 전압 방정식은 식 (1)과 같으며, 발생하는 토크는 식 (2)로 나타낼 수 있다.

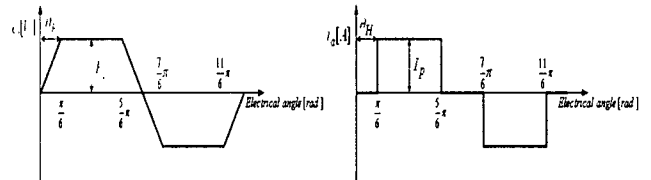
$$\begin{bmatrix} V_{ap} \\ V_{bp} \\ V_{cp} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T_c = \frac{(e_a \cdot i_a + e_b \cdot i_b + e_c \cdot i_c)}{\omega_m} \quad (2)$$

여기서, V_{ap}, V_{bp}, V_{cp} : 모터의 상 전압, R_s : 상의 전기자 저항, i_a, i_b, i_c : 상전류, L_s : 상의 전기자인덕턴스, e_a, e_b, e_c : 상의 역기전력, ω_m : 각속도이다.

2.2 BLDC 전동기의 토크리플

그림 1은 이상적인 BLDC 전동기의 역기전력과 전류 파형을 나타내고 있다



<그림 1> BLDC의 역기전력 및 전류

주기적인 파형은 Fourier series로 나타낼 수 있으며, 그림 1의 역기전력과 전류 역시 Fourier series로 나타내면 식(3), 식 (4)와 같이 된다.

$$e_a(t) = \frac{4E_b}{\pi\theta_F} \left(\sin\theta_F \sin\omega t + \frac{\sin 3\theta_F \sin 3\omega t}{3^2} + \frac{\sin 5\theta_F \sin 5\omega t}{5^2} + \dots \right) \quad (3)$$

$$i_a(t) = \frac{4}{\pi} \left(\cos\theta_H \sin\omega t + \frac{\cos 3\theta_H \sin 3\omega t}{3} + \frac{\cos 5\theta_H \sin 5\omega t}{5} + \dots \right) \quad (4)$$

위의 두식에서 3의 배수 고조파들은 전동기의 권선이 Y결선이므로 상쇄된다. 따라서 일정 토크는 3의 배수 항들을 제외한 전류와 역기전력의 홀수 고조파 항들의 상호 작용으로 발생한다.

전류와 역기전력의 기본 고조파에 의한 토크 식을 구하면 다음과 같다.

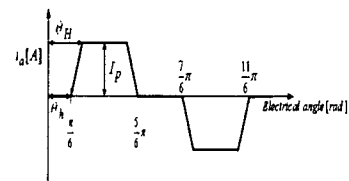
$$T_{e1} = \frac{16E_p}{\pi^2\theta_F} \left\{ \sin\theta_F \sin\omega t \cos\theta_H \sin\omega t + \sin\theta_F \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) \cos\theta_H \sin\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + \sin\theta_F \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \cos\theta_H \sin\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \right\} \quad (5)$$

그림 1에서 $\theta_F = \theta_H = \frac{\pi}{6}$ 이므로, 토크는 다음 식과 같이 된다.

$$T_{e1} = \frac{96E_p}{\pi^3} \sin\frac{\pi}{6} \cos\frac{\pi}{6} \left\{ \sin^2\omega t + \sin^2\left(\omega t - \frac{2}{3}\pi\right) + \sin^2\left(\omega t + \frac{2}{3}\pi\right) \right\} = 2.011E_p \quad (6)$$

같은 방법으로 전류와 역기전력의 제 5 고조파 성분에 의한 토크를 구하면 $T_{e5} = -0.016E_p$ 이고, 제 7 고조파 성분에 대한 토크는 $T_{e7} = 0.005862E_p$ 가 된다. 차수가 커질수록 토크에 미치는 영향은 작아지며, 전류와 역기전력의 기본 고조파 성분이 토크에 가장 많은 영향을 미친다.

그림 2는 전환 각(Commutation Angle)에 따른 사다리꼴 모양의 전류를 나타내고 있다.



<그림 2> 사다리꼴 전류

그림 2의 전류를 앞서의 방법과 동일하게 Fourier series로 나타내면 식 (7)과 같이 된다

$$i_a(t) = \frac{4I_p}{\pi(\theta_H - \theta_h)} \left\{ (\sin\theta_H - \sin\theta_h) \sin\omega t + \frac{(\sin 5\theta_H - \sin 5\theta_h) \sin 5\omega t}{5^2} + \dots \right\} = I_{m1} \sin\omega t + I_{m5} \sin 5\omega t + I_{m7} \sin 7\omega t + \dots \quad (7)$$

토크를 구하기 위해 식 (3)과 식 (7)의 역기전력과 전류를 곱하면 다음 식 (8)과 같이 된다.

$$e_A(t) i_A(t) = P_0 + P_2 \cos 2\omega t + P_4 \cos 4\omega t + \dots \quad (8)$$

$e_B(t) i_B(t)$ 는 $e_A(t) i_A(t)$ 와 $\frac{2}{3}\pi$, $e_C(t) i_C(t)$ 는 $e_A(t) i_A(t)$ 와 $-\frac{2}{3}\pi$ 의 위상차가 생긴다. 위상차를 고려하여 계산하면 토크는 각 차수 중에 6배수 차수만이 존재하고 나머지는 0으로 되어 식 (9)와 같이 나타내어진다.

$$T_e = \frac{1}{\omega} \{ e_A(t) i_A(t) + e_B(t) i_B(t) + e_C(t) i_C(t) \} \\ = T_0 + T_6 \cos 6\omega t + T_{12} \cos 12\omega t + T_{18} \cos 18\omega t + \dots \quad (9)$$

위의 식에서 알 수 있듯이 BLDC 전동기에서 토크는 6의 배수 고조파 항들로 구성된다. 예를 들어 6차 고조파 토크를 만들기 위해 전류의 기본 고조파는 역기전력의 5차 고조파, 7차 고조파와 상호작용하게 된다. 토크리플이 없는 일정한 토크를 발생하기 위해서는 같은 차수의 전류와 역기전력의 고조파가 상호작용해야 하지만, 실제 BLDC 전동기의 구조에서는 다른 차수의 고조파들끼리 상호작용함으로써 토크리플이 발생하게 된다.

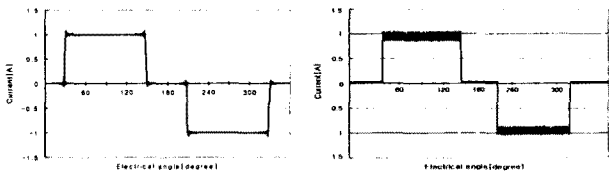
3. 시뮬레이션 및 실험결과

그림 3(a)는 BLDC 전동기를 이상적으로 제어하여 시뮬레이션한 전류 파형이며, 그림 3(b)는 바이폴라(bipolar) PWM 방식을 이용하여 전류의 전환 각을 최소화하여 실험한 실제 전류 파형이다. 그림 1에 나타난 이상적인 전류 파형과 매우 유사함을 알 수 있다.

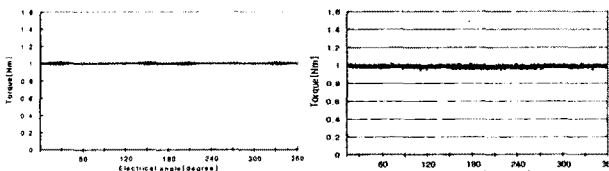
이상적인 역기전력을 가진 BLDC 전동기는 직사각형 형태의 전류를 인가하면 전류와 역기전력 고조파의 같은 항들 사이의 상호작용으로 인해 BLDC 전동기는 토크 리플이 없음을 Fourier series를 통해 확인하였다. 그림 4는 이러한 토크 파형을 나타내고 있다. 그림 4(a)는 시뮬레이션 한 결과를 나타낸다. 약간의 토크 리플이 발생하지만 무시할만한 수준이며 이는 이론과 일치함을 보여준다. 그림 4(b)는 실험을 통하여 얻은 실제 토크 파형을 나타내고 있다. 이는 시뮬레이션 결과와 크게 다르지 않음을 보여준다.

전동기의 역기전력은 그대로 유지하고, 전환 각을 조절하여 그림 2에서 정의된 $\theta_H - \theta_n$ 의 값을 전기각 5°로 했을 경우 시뮬레이션한 전류 파형을 그림 5(a)에 나타내었다. 앞서의 직사각형 전류에 비해 전류의 상승시간과 하강시간이 길게 발생함을 알 수 있다. 그림 5(b)는 실제 실험 파형이다.

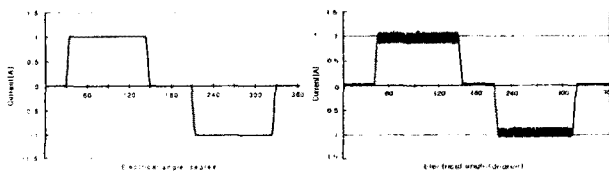
그림 6(a)는 전환 각 5°의 사다리꼴 형태 전류에서 발생하는 토크를 시뮬레이션한 결과이고, 그림 6(b)는 실제 실험 토크 파형이다. 이는 식 (9)에서 확인한바와 같이 전류와 역기전력의 서로 다른 차수 항들의 작용으로 인해 직사각형 모양의 전류에 비해 토크 리플이 많이 발생함을 알 수 있다.



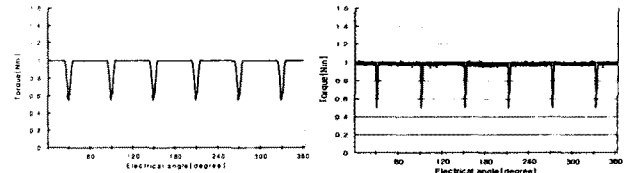
(a) 시뮬레이션 결과 (b) 실험 결과
〈그림 3〉 이상적인 BLDC 전류 파형



(a) 시뮬레이션 결과 (b) 실험결과
〈그림 4〉 이상적인 전류 파형에 의한 토크



(a) 시뮬레이션 결과 (b) 실험결과
〈그림 5〉 전환각 5° 일 경우의 전류 파형



(a) 시뮬레이션 결과 (b) 실험결과
〈그림 6〉 전환각 5° 일때의 토크 파형

이상의 결과에서 전류의 전환 각이 커져 전류의 상승 시간과 하강 시간이 길어질수록 토크리플이 더 심해지며 평균 토크 또한 감소함을 알 수 있다. 이러한 사실을 바탕으로 다양한 형태의 전류에 따라 토크 리플을 일정하게 유지하기 위한 역기전력의 형태를 예측할 수 있으며, 반대로 역기전력의 형태가 다양하게 변화할 때 토크 리플 없이 일정한 토크를 얻기 위한 최적의 전류 형태도 예측 가능하다.

4. 결 론

BLDC 전동기의 토크는 전류와 역기전력의 함수이므로 리플 없는 토크를 얻기 위해서는 전류제어의 측면뿐만 아니라 전류와 역기전력과의 상호관계를 고려하여야 한다.

본 논문에서는 BLDC 전동기의 전류 전환 각과 역기전력에 따른 토크리플 특성에 대해 고찰하였다. 역기전력을 일정하게 유지하고 이상적인 직사각형 전류와 전류 전환 각을 조절한 사다리꼴 전류를 Fourier series로 풀어내어 그 특성을 분석하였다. 여기서 전류와 역기전력의 같은 고조파 항들끼리 상호작용하여 토크 리플이 없는 일정한 토크가 발생함을 확인 하였다. Matlab/simulink를 이용하여 시뮬레이션 결과들은, 실제 실험을 통해서 비교하였다. 그 결과 전류의 전환 각이 커질수록 즉, 스위치의 동작시간에 따른 전류의 상승 시간과 하강 시간의 오차가 커질수록 토크 리플이 더 크게 발생하게 되고, 토크 리플은 전류의 전환 각이 생길 때 전류와 역기전력 고조파의 서로 다른 차수 항들 사이의 상호작용에 의한 것임을 확인하였다.

이러한 사실을 바탕으로 전류의 형태는 일정하게 유지하고 다양한 역기전력의 형태에 따른 BLDC 전동기의 토크 리플 변화 특성 또한 예측 할 수 있으며, 반대로 역기전력의 형태가 다양하게 변화할 때 토크 리플 없이 일정한 토크를 얻기 위한 최적의 전류 형태도 예측 가능하다. 앞으로 토크 리플의 주요한 원인인 스위치의 동작에 따른 전류의 상승 시간과 하강 시간을 완벽히 제어할 수 있는 새로운 제어 기법의 도입이 필요할 것이다.

감사의 글

본 연구는 산업자원의 지원에 의하여 기초전력연구원 (R-2003-B272-0-00)주관으로 수행된 과제임

참고 문헌

- [1] P. Pillay and R. Krishnan, "Modeling, Simulation, and Analysis of Permanent - Magnet Motor Drives, Part I : The Permanent-Magnet Synchronous Motor Drive" IEEE Trnas, Ind. Applcat., Vol.25, pp.265~273, March/April 1989
- [2] Renato Carlson, Michel Lajoie-Mazenc and Joao C.dos S.Fagundes, "Analysis of Torque Ripple due to Phase Commutation In Brushless DC machines", In Conf. Rec. LAS Annual Meeting, pp.287~292, 1990
- [3] D.C. Hanselman, "Minimum Torque Ripple, Maximum Efficiency Excitation of Brushless Permanent Magnet Motors", IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 41, No. 3, pp.292~300, June 1994.
- [4] P. Pillay and R. Krishnan, "Application Characteristics of Permanent Magnet Synchronous and Brushless DC Motor for Servo Drives", IEEE IAS Annual Meeting, 1987, pp.380~390.
- [5] H. R. Bolton, Y. D. Liu and N. M. Mallison, "Investigation into a class of Brushless DC Motor with quasisquare Voltages and Current", Proc. IEEE, vol/133, Pt B, No. 2, March 1986, pp.103~111.