

BLDC 전동기의 토크리플 저감에 대한 연구

남기용* (한국전기연구원), 홍정표(창원대학교 전기공학과),
이춘만(창원대학교 기계설계공학과), 정원지(창원대학교 기계설계공학과)

Research of Torque Ripple Reduction of BLDC Motor

K. Y. Nam(Applied Supperconductivity Group, KERI), J. P. Hong(Dept. of Electrical Engineering, CNU),
C. M. Lee(Dept. of Mechanical Manufacturing Design, CNU), W. J. Chung(Dept. of Mechatronics, CNU)

ABSTRACT

This paper presents the method of reducing torque ripple of Blushless Direct Current(BLDC) motor. In the BLDC motor, the torque is decided by the back-EMF and current waveform. If the back-EMF is constant, the torque ripple depends on the current ripple during commutation period. The current in commutation period is acquired by circuit analysis and then the torque ripple simply can be reduced by varying input voltage to flow the current continuously. And suggested method is confirmed by dynamic with parameters of 500W BLDC motor.

Key Words : BLDC 전동기(Blushless Direct Current Motor), 역기전력(Back-EMF), 전류리플(Current Ripple), 토크리플(Torque Ripple), 프리휠링(Freewheeling), 빌드업(Buid-up)

1. 서론

Blushless Direct Current(BLDC) 전동기는 인버터와 컨트롤러를 필요로 하므로 일반적인 Direct Current(DC) 전동기보다 가격적으로 높다는 단점을 가지고 있다. 하지만 고평가와 고효율을 가지며 간단한 제어방식으로 구동시킬 수 있고 브러쉬를 가지지 않으므로 유지, 보수에 추가적인 비용이 들지 않는다는 장점을 가지므로, BLDC 전동기는 컴퓨터, 가전제품, 자동차 부품 등 산업제품 전반에 걸쳐서 사용되고 있다[1][2].

이상적인 BLDC 전동기는 사다리꼴의 역기전력 파형을 가지며, 일정한 입력전압을 인가하였을 때 전류는 입력전압과 위상차를 가지지 않으며 고정자 권선의 저항에 의해 제한되는 정상상태의 전류까지 순간적으로 상승한다. 그러므로, 이상적인 BLDC 전동기에서 발생하는 토크는 항상 일정하며 토크리플을 가지지 않는다. 그러나 실제적인 BLDC 전동기는 고정자 권선의 인덕턴스에 의해서 전류의 상승이 순간적으로 이루어지지 않기 때문에 이상적인 BLDC 전동기처럼 토크리플을 가지지 않는 일정한

토크를 발생시키지 못한다. Fig. 1은 실제 BLDC 전동기가 구동할 때의 전류파형을 나타내고 있으며, 프리휠링 구간에서 상승하는 전류와 하강하는 전류의 시정수 차이에 의해서 전류리플이 발생함을 알 수 있다. 그리고, 고정자 권선의 인덕턴스에 의해 발생하는 전류리플은 토크리플에 직접적인 영향을 주게 된다[3].

본 연구에서는 전류리플을 줄임으로써 토크리플을 줄일 수 있는 방법을 제시하고 동적 시뮬레이션을 통하여 검증하였다.

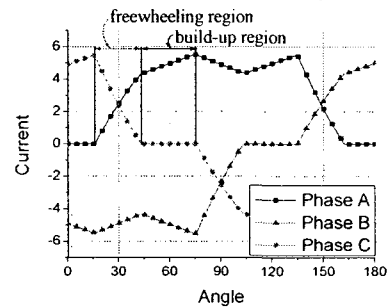


Fig. 1 Actual current waveform in BLDC motor.

2. 회로해석 및 토크리플 저감 방법

2.1 회로해석

Fig. 2는 C 상으로부터 A 상의로의 상전환이 일어날 때, 인버터에 흐르는 전류 경로를 나타내고 있으며, Fig. 2(a)와 2(b)는 각각 Fig. 1의 프리휠링 구간과 빌드업 구간에서 전류 경로를 나타낸다[4].

Fig. 2(a)의 프리휠링 구간에서 Q3 스위치가 턴온된다. 이때, C 상의 전류는 Q5, Q6 스위치의 역방향 다이오드를 통하여 프리휠링하면서 하강하고, A 상의 전류는 상승한다. 그러므로, C 상의 전류가 0이 될 때까지 A, B, C 세 개의 상이 모두 도통되어 있는 상태가 된다. 여기서 프리휠링하는 C 상의 전류가 Q6 스위치의 역방향 다이오드를 턴온 시키고 있기 때문에, A 상에서 상승하는 전류는 BLDC 전동기의 직렬 연결된 A 상과 병렬 연결된 B, C 상으로 흐른다. 그러므로 프리휠링하는 C 상의 전류는 상승하는 A 상의 전류보다 빠르게 감소하게 되며, 이로 인하여 전류 및 토크리플이 발생하게 된다. 그리고 Fig. 2(b)는 빌드업 구간에서의 전류의 흐름을 나타내고 있으며 프리휠링 구간에서 C 상의 전류가 0이 되어 A 와 B 상의 전류만이 흐르며 빌드업 한다.

이와 같이 BLDC 전동기는 Fig. 2 와 같은 상전환을 반복하면서 구동하며, Fig. 3(a)와 (b)는 라플라스 변환한 각각의 등가회로를 나타낸다.

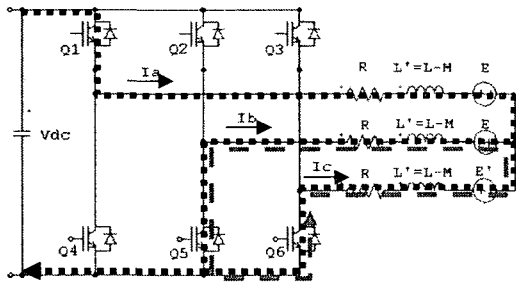


Fig. 2(a) Current flow when commutation is occurred from phase C to A in the freewheeling region

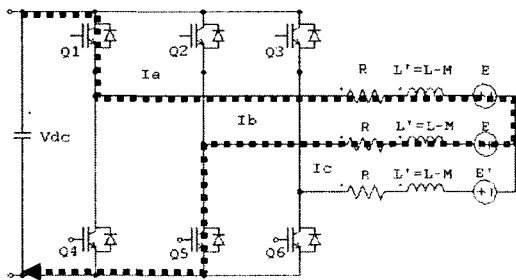


Fig. 2(b) Current flow when commutation is occurred from phase C to A in the build-up region

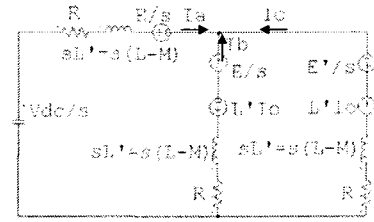


Fig. 3(a) Equivalent circuit of Fig. 2(a) with Laplace conversion.

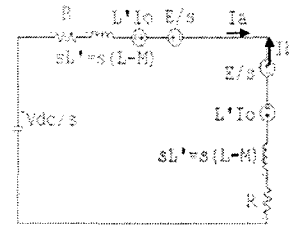


Fig. 3(b) Equivalent circuit of Fig. 2(b) with Laplace conversion.

Fig. 3(a)의 회로를 KCL을 이용하여 풀면, 각 노드의 $V_1(s)$, $V_2(s)$, $V_3(s)$ 는 식 (1), (2), (3)과 같다.

$$V_1(s) = \frac{V_{dc} + 3E - E'}{3s} \quad (1)$$

$$V_2(s) = \frac{V_{dc} - 3E - E'}{3s} + L'I_0 \quad (2)$$

$$V_3(s) = \frac{V_{dc} + 2E'}{3s} - L'I_0 \quad (3)$$

그리고, 식 (1), (2), (3)을 이용해서 각 상의 $I_A(s)$, $I_B(s)$, $I_C(s)$ 를 구하면 식 (4), (5), (6)과 같다.

$$I_A(s) = \frac{2V_{dc} - 3E + E'}{3L'} \left(\frac{1}{s \left(s + \frac{R}{L'} \right)} \right) \quad (4)$$

$$I_B(s) = \frac{\frac{V_{dc} - 3E - E'}{3L'} + sI_0}{s \left(s + \frac{R}{L'} \right)} \quad (5)$$

$$I_C(s) = -\frac{\frac{V_{dc} + 2E'}{3L'} - sI_0}{s \left(s + \frac{R}{L'} \right)} \quad (6)$$

마지막으로, 프리휠링하는 구간에서 각 상에 흐르는 전류를 구하기 위해 식 (4), (5), (6)을 라플라스 역변환하면, 식(7), (8), (9)와 같이 된다.

$$i_a = \frac{2V_{dc} - 3E - E'}{3R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'}t} \right) \quad (7)$$

$$i_b = - \left(I_0 e^{-\frac{R}{L'}t} + \frac{V_{dc} - 3E - E'}{3R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'}t} \right) \right) \quad (8)$$

$$i_c = I_0 e^{-\frac{R}{L'}t} - \frac{V_{dc} - \frac{2}{3}E'}{3R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'}t} \right) \quad (9)$$

식 (7), (9)는 각각 프리휠링 구간에서 상승하는 전류와 하강하는 전류를 나타내는 수식이다. 식 (7)의 상승하는 전류는 시정수 L'/R 를 가지고 상승하지만, 식 (9)에서의 하강하는 전류는 상승하는 전류와 동일한 시정수를 가지고 하강하는 전류의 값에 입력전압과 역기전력에 의해 발생하는 전류가 더해져서 상승하는 전류보다 더 빠르게 하강하게 된다. 그리고 계속 도통되고 있는 B 상의 전류는 상승하는 A 상과 하강하는 C 상의 전류의 합으로 나타나는데, 상승하고 하강하는 전류의 값이 다르기 때문에 프리휠링 구간에서 전류리플이 발생하게 되고, 하강하는 C 상의 전류가 0이 될 때, B 상의 전류는 가장 작은 전류 값을 가진다.

Fig. 3(b)의 회로를 KCL을 이용하여 풀고, 각 노드의 $V_1(s)$, $V_2(s)$ 를 구한 다음 $V_1(s)$, $V_2(s)$ 을 이용하여 $I_A(s) = -I_B(s)$ 를 구하면 식 (10)과 같다.

$$I_A = -I_B = \frac{1}{2R} \left(\frac{2ER + s(V - 2RI_0)}{s \left(s + \frac{R}{L'} \right)} \right) \quad (10)$$

빌드업하는 구간에서 상에 흐르는 전류를 구하기 위해 식 (10)을 라플라스 역변화하면, 식 (11)과 같이 된다.

$$i_A = -i_B = \frac{V_{dc}}{2R} - \frac{E}{R} - \frac{V_{dc} - 2RI_0 - 2E}{2R} e^{-\frac{R}{L'}t} \quad (11)$$

식 (13)은 빌드업하는 구간에서의 상 전류를 나타내도 있으며, BLDC 전동기의 회전 속도가 증가하게 되면, 전류는 저항과 역기전력에 의해서 제한되는 정상상태까지 도달하지 못하게 된다. 결과적으로 빌드업 구간에서 전류는 계속 상승하게 되며, 프리휠링이 끝나는 구간에서 최소값을 가지는 전류의 값과 함께 전류리플과 토크리플을 증가시킨다.

2.2 토크리플 저감 방법

프리휠링 구간에서, 전류의 리플이 발생하지 못하게 하기 위한 조건은 상전환 시에 도통 상태를 유지하는 전류의 값이 일정하게 일정하면 된다. Fig. 3을 기준으로, C 상에서 A 상으로 상전환이 일어

날 때 B 상의 전류가 항상 일정하게 유지된다면 전류리플이 발생하지 않게 된다.

식 (8)에서, 이전의 상에서 흐르던 초기 전류 I_0 가 원하는 토크를 발생시키고 있었다고 가정한다면, 프리휠링 구간에서 일정한 전류 I_0 를 유지하기 위해서 식 (8)은 식(12)와 같이 되어야 한다.

$$i_b = - \left(I_0 e^{-\frac{R}{L'}t} + \frac{V_{dc} - 3E - E'}{3R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'}t} \right) \right) \quad (12)$$

그러므로 일정한 전류 I_0 를 만들어내기 위한 전압 V_{dc_free} 는 식 (12)에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{dc_free} = V_{dc} = 3RI_0 + 3E + E' \quad (13)$$

V_{dc_free} 가 입력되고 있는 프리휠링 구간은 C 상의 전류가 0이 되어서 역방향 다이오드가 턴오프되는 시점까지이므로, 식 (9)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$0 = I_0 e^{-\frac{R}{L'}t} - \frac{V_{dc_free} - \frac{2}{3}E'}{3R} \left(1 - e^{-\frac{R}{L'}t} \right) \quad (14)$$

그러므로 프리휠링이 지속되는 시간 T_{free} 는 식 (14)에 의해서 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_{free} = -\frac{L'}{R} \ln \left(\frac{3V_{dc_free} + 2E'}{9RI_0 + 3V_{dc_free} + 2E'} \right) \quad (15)$$

그리고, 프리휠링 구간에서 일정하게 흐르던 전류가 빌드업 구간에서도 일정하게 흐르기 위해서 식 (11)은 식(16)과 같이 나타낼 수 있다.

$$0 = \frac{V_{dc}}{2R} - \frac{E}{R} - \frac{V_{dc} - 2RI_0 - 2E}{2R} e^{-\frac{R}{L'}t} \quad (16)$$

그러므로 빌드업 구간에서 일정한 전류를 유지시키기 위한 전압 V_{dc_build} 는 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_{dc_build} = 2(RI_0 + E) \quad (17)$$

식 (13), (17)에 의해서 계산된 전압 값을 식 (15)에 의해 계산된 시간을 기준으로 프리휠링 구간과 빌드업 구간에 각각 입력함으로써 리플을 가지지 않는 일정한 전류가 흐를 수 있으며, 전류에 의한 토크리플을 감소시킬 수 있다.

3. 시뮬레이션

Table 1은 시뮬레이션을 대상으로, 500W BLDC 전동기의 제원을 나타내고 있으며, Fig 4(a)는 일정한 전압을 입력으로 하는 일반적인 BLDC 전동기 구동 방식에서의 각 상에 흐르는 전류와 토크 파형을 나

Table 1 BLDC 전동기 제원

	Parameter	Value	Unit
1	상 저항	0.9889	[Ω]
2	자기 인덕턴스	0.0054	[mH]
3	상호 인덕턴스	-0.0013	[mH]
4	극 수	4	[극]
5	정격 속도	6660	[rpm]

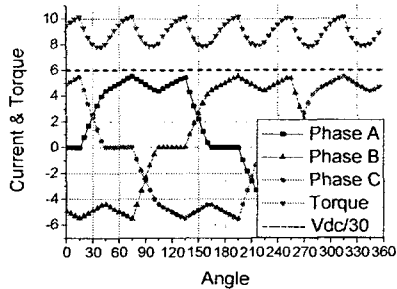


Fig. 4(a) The current and torque waveform with constant source voltage.

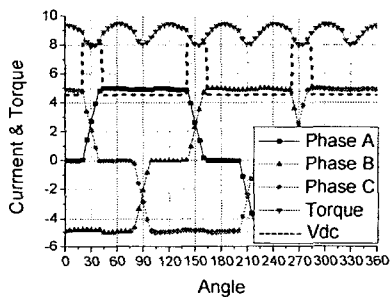


Fig. 4(b) The current and torque waveform with varying source voltage.

타낸 것이다. 이때, 입력 전압은 180V 이고 정격속도는 6660rpm 이다. 시뮬레이션 결과, 평균 토크는 8.906kgf-cm, 최대 토크는 10.2kgf-cm 이고, 최소 토크는 7.7kgf-cm 이다. 그러므로 일반적인 방법으로 구동될 때의 토크리플은 28%가 된다.

그리고 Fig. 4(b)는 2.2 절에서 제시한 방법으로 프리휠링이 이루어지는 구간의 시간을 계산하고, 프리휠링 구간에서의 입력되어지는 전압과 빌드업 구간에서 입력되어지는 전압을 서로 다르게 하여 구동했을 때의 각 상의 전류와 토크 파형을 나타낸다. 이때의 평균 토크는 8.89kgf-cm, 최대 토크는 9.5kgf-cm, 최소 토크는 7.9kgf-cm 이다. 그러므로 제시한 방법으로 구동될 때의 토크리플은 17.9%가 된다.

4. 결론

본 연구는 PWM 을 고려한 BLDC 전동기의 동적 모델링과 토크리플 저감에 대하여 다루었다.

BLDC 전동기의 역기전력 파형이 사다리꼴 형태일 때, 이상적인 BLDC 전동기에서의 전류는 순간적으로 상승하거나 하강하므로 토크리플이 발생하지 않는다. 하지만 실제 BLDC 전동기가 구동될 때에는 인덕턴스의 영향으로 전류리플이 발생하며, 이는 토크리플의 발생에 직접적으로 영향을 준다는 것을 보였다. 그리고 이와 같은 토크리플을 줄이기 위해서, 상전환 시의 회로를 해석하여 간단하게 토크리플을 저감시킬 수 있는 방법을 제시하였으며, 동적 모델링에 의한 시뮬레이션을 통하여 토크리플이 28%에서 17.8%로 약 10% 줄어듦을 확인했다.

마지막으로, 토크리플 저감 방법으로 구동시킨 시뮬레이션 결과에서 전류리플은 상당히 작아졌음에 불구하고 토크리플은 상대적으로 많이 줄지 않았다. 그 이유는 대상 전동기의 역기전력 파형이 완전한 사다리꼴 형태보다는 정현파에 가까웠으며, 대상 BLDC 전동기의 회로정수가 정확하게 측정되어지지 못했기 때문이라 생각된다. 측정법을 개선하여 회로정수의 측정 오차를 줄이고 사다리꼴 형태의 역기전력을 가지는 BLDC 전동기를 대상으로 한다면 보다 정확하고 작은 토크리플을 가지는 결과를 얻을 수 있을 것이다.

후 기

본 연구는 산업자원부 지방기술혁신사업[RTI04-01-03] 지원으로 수행되었습니다.

참고문헌

1. Jae-Gun Lee, Chang-So Park, Jung-Jong Lee, Geun-Ho Lee, Han-Ik Cho, Jung-Pyo Hong, *물리학적 특성 분석을 고려한 브러시리스 모터의 구동 방식에 따른 토크 리플 특성 분석*, KIEE, pp. 589-591, Jul. 2002.
2. Tae-Hyung Kim and Mehrdad Ehsani, *브러시리스 모터의 저속에서 고속까지의 제어*, IEEE Power Electronics, vol. 19, No. 5, pp. 1635-1645, Nov. 2004.
3. J. R. Hendershot JR, THE Miller, *Design of Brushless Permanent Magnet Motor*, 1rd ed., Oxford Magna Physics:1994.
4. Renato Carlson, Michel Lajoie-Mazenc, and Joao C. dos S. Fagundes, *브러시리스 모터의 토크 리플에 대한 분석*, IEEE Trans. on Industry App., Vol. 28, No. 3, pp. 632-638 May. 1992.