역기전력 모델을 이용한 BLDCM의 전류구간 토크 리플 억제

박준휘, 곽윤창, 안진우, 이동희
경성대학교 메카트로닉스 공학과

Commutation Torque Ripple Reduction of BLDCM using Estimated B.E.M.F

Junhwi Park, YunChang Kwak, Jin-Woo Ahn, Dong-Hee Lee
Dept. of Mechatronics Engineering Kyungsung University

ABSTRACT

본 논문에선 BLDCM(Brushless DC Motor)의 전류(轉流)구간에서 발생하는 토크리플을 저감시키기 위해 BLDCM의 역기전력 모델을 이용하여 상승하는 전류와 하강하는 전류의 기울기가 같아지도록 PWM의 턴 온 시간을 실시간으로 제어하는 방식을 제안한다. 제안된 방식에서는 상이 전환되는 구간에서 상전류의 변화량이 스위칭 시간에 따른 인가전압과 전동기 모델방정식 및 예측되는 역기전력 모델에 의해 예측되어지며, 인가하는 전압의 크기는 PWM의 턴 온 시간에 따라 변하게 되므로, 두 전류의 변화량이 같아지도록 하는 스위칭 시간을 계산하여 적용하는 방식이다.

제안된 방식의 유효성은 실제 BLDCM에 대한 시뮬레이션을 통하여 증명하였다.

1. 서론

BLDCM(Brushless Direct Current Motor)은 효율이 높고, 제어성이 우수하여 전기 자동차, 전기 자전거 및 가전제품 등에 널리 사용되고 있다.

BLDCM은 전류(轉流, commutation)구간에서 상 인덕턴스와 역기전력으로 인해 상승전류와 하강전류의 전류의 기울기가 같지 않아 전류리플이 발생하여, 이로 인해 토크리플이 발생하게 된다.[1~2] 특히 이러한 전류구간에서 생기는 토크리플은 고속영역에서 소음과 진동의 원인이 되며 BLDCM의 제어특성과 운전 효율을 감소시키게 되므로[1~2] 토크리플을 저감시키기 위한 연구가 지속적으로 진행되고 있다.

그림 1은 전류구간에서 발생하는 토크리플의 원인을 나타내고 있다. BLDCM의 역기전력 E는 식 1에서 속도에 비례 하며, $V = 4E$ 이 되는 임계속도일 때, di_c = 0이 되어 상승 전류와 하강 전류가 동일하게 되어 토크가 일정하게 유지되지만 $V > 4E$ 인 저속 일 때, $di_c < 0$ 이 되고, $V < 4E$ 인 고속일 때, $di_c > 0$가 되어 전류구간에서 토크 리플이 발생한다.[1]

$$E = k_e \omega_m \tag{1}$$

$$\frac{dT_e}{dt} = k_t \frac{(di_a + di_b)}{dt} = -kt \frac{di_c}{dt} \tag{2}$$

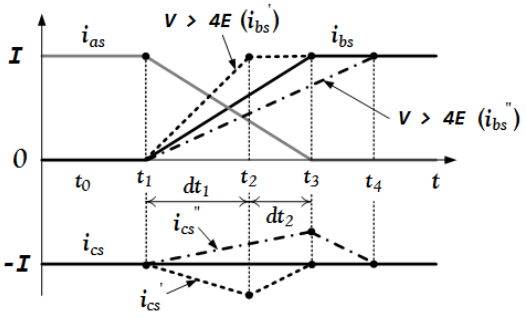

그림 1 전류구간에서의 전류 리플
Fig. 1 Current ripple in commutation region

본 논문에서는 실제 BLDCM의 비선형적인 역기전력을 모델링하여 함수로 구성하여 전류구간에서 한 샘플링 구간에서 측정되는 역기전력과 전류 그리고 모터의 속도를 이용하여 상승전류와 하강 전류의 기울기가 같아지는 턴 온 시간을 예측하여 토크리플을 저감시키고, 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

2. 본 논문에서 제안하는 제어방식

다음 그림 2는 전류구간에서의 제어 블록다이어그램이다. k 샘플링 구간에서 측정되는 회전자의 위치와 속도를 이용하여 역기전력 함수로 (k+1) 샘플링 구간의 역기전력 $\hat{e}_{m(k+1)}$을 계산하여 상승전류와 하강전류의 기울기가 같아지는 턴 온 시간을 예측하여 계산한다.

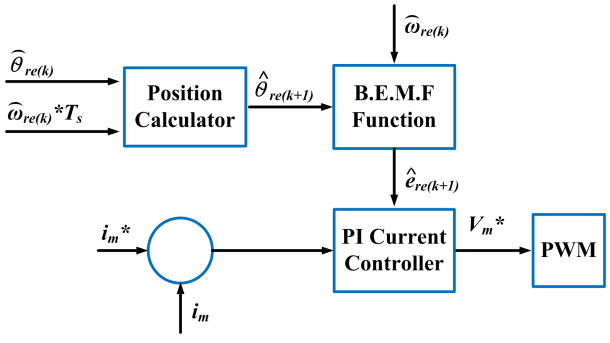

그림 2 제안된 제어 방식의 블록다이어그램
Fig. 2 Block diagram of proposed method

역기전력 함수는 BLDCM의 비선형적인 역기전력을 기반으로 구성된다. 다음 식 3은 k시점의 $\theta_{re(k)}$와 각속도 $\omega_{re(k)}$로 예측 되는 (k+1)시점의 $\theta_{re(k+1)}$에 관한 식이며, 식 4는 식 3과 역기전력 함수를 이용한 (k+1)시점의 예측되는 $\hat{e}_{m(k+1)}$에 관한 식이다.

$$\hat{\theta}_{re(k+1)} = \theta_{re(k)} + \omega_{re(k)} \bullet T_s \quad (3)$$

$$\hat{e}_{m(k+1)} = f_e(\omega_{re(k)}, \hat{\theta}_{re(k+1)}) \quad (4)$$

다음 그림 3는 $i_{m1} > 0$, $i_{m2} > 0$ 일 때 전류구간 중 샘플링 구간의 예측되는 전류의 기울기와 이를 이용하여 상승전류와 하강전류의 기울기를 같게 하는 전류 지령치를 나타낸 그림이다.

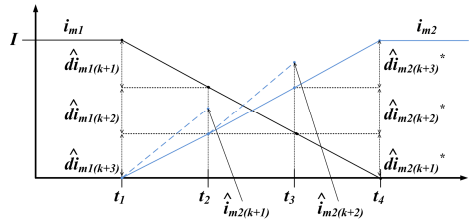

그림 3 전류구간에서의 예측되는 전류

Fig. 3 Predicted current in commutation

(k+1) 시점에서 전류는 다음 식 5와 6으로 계산 할 수 있다.

$$\hat{di}_{m1(k+1)} = \frac{1}{L_m}(v_{m1(k)} - R_m i_{m1(k)} - \hat{e}_{m1(k+1)})\, T_s \quad (5)$$

$$\hat{di}_{m2(k+1)} = \frac{1}{L_m}(v_{m2(k)} - R_m i_{m2(k)} - \hat{e}_{m2(k+1)})\, T_s \quad (6)$$

식 5와 6에서의 T_s는 MCU의 샘플링 주기를 나타낸 것이다. 전류구간에서의 상 전압은 다음 식 (7) ~ (9)로 나타낼 수 있다.

$$v_{m1} = -\frac{1}{3} V_{dc} \bullet t_{on(k)} \quad (7)$$

$$v_{m2} = \frac{2}{3} V_{dc} \bullet t_{on(k)} \quad (8)$$

$$v_{m3} = -\frac{1}{3} V_{dc} \bullet t_{on(k)} \quad (9)$$

이때, 하강전류의 기울기는 $\hat{di}_{m1(k+1)} < 0$, 상승전류의 기울기는 $\hat{di}_{m2(k+1)} > 0$ 이며, $\hat{di}_{m1(k+1)} = -\hat{di}_{m2(k+1)}$ 이다. 이를 이용하여 듀티 비에 관한 식 10을 얻을 수 있으며, $i_{m1} < 0$, $i_{m2} < 0$ 일 때도 같은 방법으로 식 11을 얻을 수 있다.

$$t^*_{on} = \frac{3R_m(i_{m2(k)} + i_{m1(k)}) + (\hat{e}_{m2(k+1)} + \hat{e}_{m1(k+1)})}{V_{dc}} \quad (10)$$

$$t^*_{on} = \frac{-3R_m(i_{m2(k)} + i_{m1(k)}) + (\hat{e}_{m2(k+1)} + \hat{e}_{m1(k+1)})}{V_{dc}} \quad (11)$$

3. 시뮬레이션 결과

그림 4와 5은 1000RPM에서의 기존 PI 제어 방식과. 제안된 제어방식의 전류구간을 나타낸 그림이다. 그림 4는 상승전류와 하강전류의 기울기가 달라 토크리플이 발생하며, 그림 5에서는 상승전류와 하강전류의 기울기가 같아 전류리플이 줄어들었으며 토크리플이 감소되었음을 확인할 수 있다.

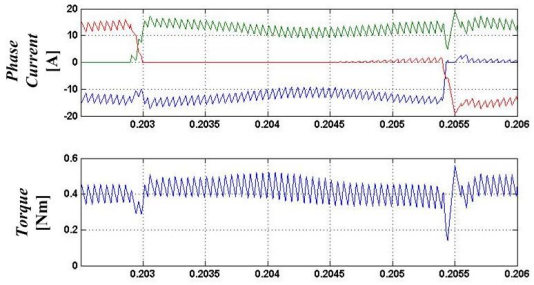

그림 4 PI 제어 방식 시뮬레이션 결과

Fig. 4 Simulation result of an conventional PI control

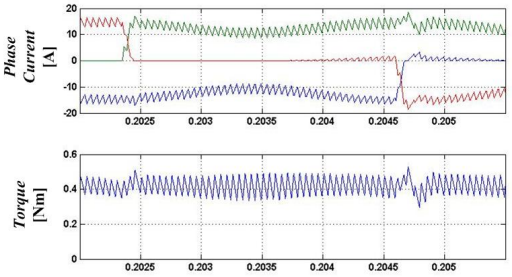

그림 5 제안된 제어 방식 시뮬레이션 결과

Fig. 5 Simulation result of the proposed method

5. 결론

본 논문에서는 BLDCM의 실제 역기전력 모델링을 이용하여 전류구간의 토크리플을 저감 하는 제어 방식을 제안하였으며, 제안된 방식의 시뮬레이션을 통하여 전류구간에서 상승 전류와 하강 전류의 변화율이 동일하도록 하여 토크리플이 감소되었음을 확인하였다.

본 연구는 BK21+ 사업으로 수행된 연구 결과입니다.

참 고 문 헌

[1] R.CARLSON, L M. Michel, and J. C. Fagundes, "Analysis of Torque Ripple due to Phase Commutation In Brushless DC machines", IEEE Trans, Ind. Applicat, Vol. 28, No. 3, pp632 638, 1992, May

[2] H. Lu, L, Zhang and W. Qu, "A New Torque Control Method for Torque Ripple Minimization of BLDC Motors With Un Ideal Back EMF", IEEE Trans, Power Electron. Applicat., Vol. 23, No. 2, pp. 950 958, 2008, March