

전류예측 기반 저인덕턴스 BLDC 전동기의 토크 리플 저감

박도현, 이동춘
영남대학교 전기공학과

Torque Ripple Compensation Scheme Based on Current Prediction for Low-inductance BLDC Motor Drives

Do Hyeon Park, Dong Choon Lee
Dept. of Electrical Eng., Yeungnam University

ABSTRACT

본 논문에서는 인덕턴스가 작은 BLDC 전동기에서 상전환시에 나타나는 토크 리플을 저감하는 기법을 제안한다. BLDC 전동기의 홀센서 신호전환 시점에서 상전류를 예측하고 이 전류가 지령치에 미치지 못할 경우 지령전류를 보정하여 스위칭의 듀티비를 새로 계산한다. 제안된 기법은 실험으로 검증된다.

1. 서론

대부분의 BLDC 전동기는 회전자의 위치에 따라 상단의 스위치 하나와 다른 상의 하단의 스위치 하나를 턴온시켜 고정자 권선에 전류를 흘려 토크를 발생시키는 2상 여자 방식으로 구동된다. 이 경우 전동기의 인덕턴스와 역기전력으로 인해 상전류가 정확한 시점에서 전환되지 않아 토크 리플이 발생한다. 또한, 토크 리플은 진동과 소음을 야기하므로 이에 대한 적절한 대책이 필요하다.

토크 리플을 저감하기 위해 기존에 많은 연구들이 발표되었다. BLDC 전동기에서 코깅 토크나 고정자 슬롯으로 인한 자속의 고조파를 감소시키기 위해 유효 공극을 크게 설계한다.^[1] 이 경우, 전동기의 인덕턴스가 작아지게 되고 이는 상전환에 필요한 시간이 짧아져 토크 리플을 적절히 보상할 수 없는 문제가 있다. 이에 대한 대책으로 직류링크에 별도의 초퍼를 추가하여 해결하는 방법이 제시되었으나 비용 및 하드웨어가 추가되는 단점이 있다^[2]

본 논문에서는 상전환 구간에서 다음 샘플링 시점에서의 상전류를 예측하고 이를 지령전류와 비교하여 이에 미치지 못하면 지령전류를 보정하여 스위치의 듀티비를 새로 계산하는 토크 리플 저감법을 제안하고 실험으로 그 타당성을 검증한다.

2. 본론

2.1. BLDC 전동기의 수학적 모델링

본 연구에서는 그림 1에 주어진 바와 같이 델타 결선형 BLDC 전동기 구동시스템을 고려한다. V_{dc} 는 입력 직류 전압, $Q_1 \sim Q_6$ 은 스위치, $i_{a, \text{line}}, i_{b, \text{line}}, i_{c, \text{line}}$ 은 선전류, $i_{a, \text{ph}}, i_{b, \text{ph}}, i_{c, \text{ph}}$ 는 상전류, R_s, L_s, e_{abc} 는 각각 상저항, 인덕턴스, 역기전력을 나타낸다.

그림 2는 구간에 따른 각 상의 역기전력과 상전류를 보인다. 상전류는 상호간 120도의 위상차를 가지고 크기는 여섯 구간에 걸쳐 각각 $2I_{dc}/3, I_{dc}/3, I_{dc}/3, 2I_{dc}/3$ 으로 변한다. 구간 II에서

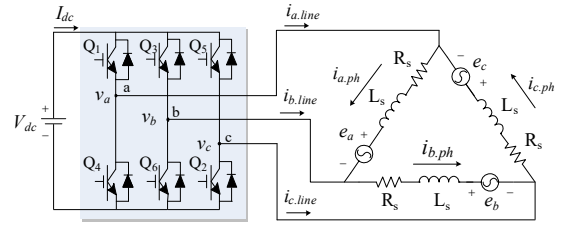


그림 1. BLDC 전동기 구동 시스템

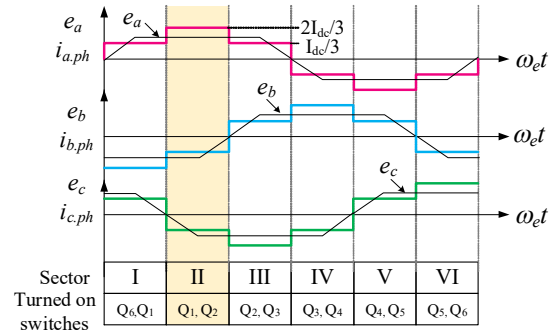


그림 2. 구간에 따른 각 상의 역기전력 및 전류

a상 전압방정식을 나타내면 다음과 같다.

$$v_{ab} = (S_1 - S_3) V_{dc} = R_s i_{a, \text{ph}} + L_s \frac{di_{a, \text{ph}}}{dt} + e_a \quad (1)$$

여기서 S_1 과 S_3 은 각각 스위치 Q_1 과 Q_3 의 스위칭 함수로, 턴온이면 1, 턴오프이면 0이다. 식 (1)로부터,

$$\frac{di_{a, \text{ph}}}{dt} = \frac{(S_1 - S_3) V_{dc} - R_s i_{a, \text{ph}} - e_a}{L_s} \quad (2)$$

2.2. 전환 구간에서의 상 전류 예측

그림 3은 상전환이 일어나는 구간에서 a상 전류와 Q_1 의 스위칭 파형을 보인다. 여기서, k 는 샘플링 시점, T_s 는 샘플링 주기, S_{ah} 는 Q_1 의 스위칭 파형, i_{a1}, i_{a2}, i_{a3} 는 스위칭이 일어나는 순간의 a상 전류, I_{dc}^* 는 직류 지령전류, i_{ph}^* 는 상전류 지령으로 $\pm 2I_{dc}^*/3$ 혹은 $\pm I_{dc}^*/3$ 가 된다. i_{a0} 는 상전환 직전 샘플링 시점에서의 전류와 동일하며 정상상태에서는 $I_{dc}^*/3$ 이다. 바이폴라 PWM인 경우, 구간 II에서 S_1 과 S_3 는 서로 반대의 스위칭 상태를 갖는다. 따라서, 스위치의 도통 상태에 따라 식 (2)로부터 다음과 같이 전류 값을 계산할 수 있다.

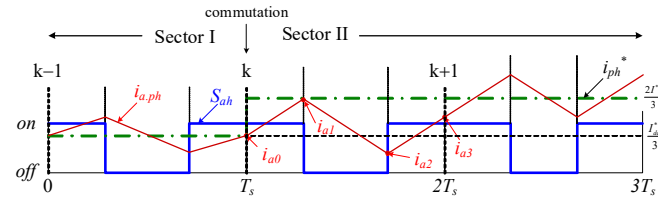


그림 3. 상전환 구간에서 a상 전류와 스위칭 파형

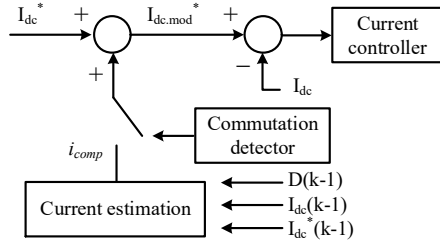


그림 4. 제안하는 전류 보상 기법의 블록선도

$$i_{a1} = i_{a0}(k) + \left(\frac{V_{dc} - R_s i_{a0}(k) - e_a(k)}{L_s} \right) \frac{(1 - D(k-1)) T_s}{2} \quad (3)$$

$$i_{a2} = i_{a1} + \left(\frac{-V_{dc} - R_s i_{a1} - e_a(k)}{L_s} \right) D(k-1) T_s \quad (4)$$

$$i_{a3}(k+1) = i_{a2} + \left(\frac{V_{dc} - R_s i_{a2} - e_a(k)}{L_s} \right) \frac{(1 - D(k-1)) T_s}{2} \quad (5)$$

여기서, D 는 S_{ah} 의 듀티비이다.

2.3. 지령전류 보정

상전환이 발생하면 ($k-1$)시점에서 계산된 듀티비와 (k)시점에서 측정된 전류를 이용하여 i_{a3} 을 추정한다. 이 추정된 \hat{i}_{a3} 은 상전류 지령과 비교된다. 토크 리플이 발생되지 않으려면 \hat{i}_{a3} 은 상전류의 지령치인 $2I_{dc}^*/3$ 와 같아야 한다. 이 조건에서 보상전류 i_{comp} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$i_{comp} = K_{comp} \times \left(\frac{2}{3} I_{dc}^* - \hat{i}_{a3} \right) \quad (6)$$

여기서, K_{comp} 는 보정계수로 전류제어기의 응답 특성에 따라 조절되는데 본 연구에서는 1.5로 설정하였다.

그림 4는 제안된 보상기법의 블록선도를 보인다. 상전환 구간에서는 속도제어기에서 출력되는 지령전류에 식 (6)의 보정값을 더해 전류제어기로 입력한다. 상전환 구간이 아닌 경우에는 보정값을 더하지 않는다.

3. 실험

제안된 제어기법을 검증하기 위해 실험을 수행하였다. 파라미터를 표 1에 보인다.

전동기가 4,000[rpm]으로 구동될 때, 정격 토크의 80% 부하가 인가된다. 그림 5의 (a)는 보상하지 않은 경우, (b)는 보상한 경우의 토크와 선전류를 나타낸다. 보상 전의 큰 토크 리플이 보상 후에는 감소된 것을 확인할 수 있다.

표 2는 구동 조건에 따른 보상 전후의 토크 리플과 리플율을 나타낸다. 토크의 리플율은 식 (7)과 같이 정의된다. 여기서,

표 1 BLDC 전동기 파라미터

정격 속도	4,000[rpm]
정격 전압	28
정격 토크	0.048[Nm]
저항	1.2[Ω]
인덕턴스	470[μH]
극 수	6
스위칭 주파수	15[kHz]

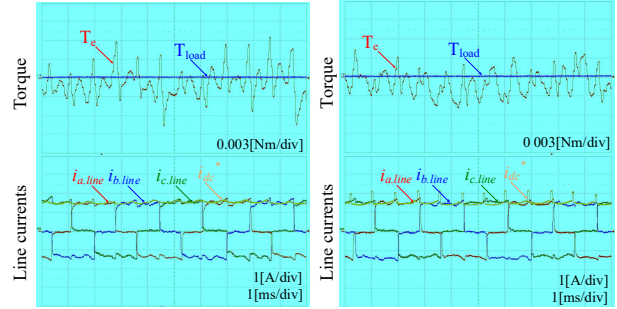


그림 5. BLDC 전동기의 토크와 선 전류
(a) 보상하지 않은 경우, (b) 보상한 경우

표 2 토크 리플 저감 성능

속도	부하	보상하지 않은 경우		보상한 경우	
		토크 리플	토크 리플율	토크 리플	토크 리플율
1000	40%	0.0043	9.0%	0.0042	8.7%
	80%	0.0174	36.4%	0.0121	25.2%
4000	40%	0.0113	23.5%	0.0088	18.4%
	80%	0.0143	29.8%	0.0093	19.3%

$$\Delta T = \frac{T_{pk} - T_{pk}}{T_{rated}} \times 100 [\%] \quad (7)$$

T_{pk} 는 토크 리플의 최대값과 최소값의 차, T_{rated} 는 정격토크이다. 40% 부하시, 전류의 크기가 작기 때문에 보상효과가 크지 않다. 그러나, 80% 부하시에는 토크 리플이 약 10% 저감되었다. 제안하는 기법은 1,000 [rpm]에서 65% 이상의 부하, 4,000[rpm]에서는 50% 이상의 부하의 경우에 보상 효과가 나타난다.

4. 결론

본 논문에서는 인덕턴스가 작은 BLDC 전동기를 대상으로 홀센서 신호전환 시점에서 상전류를 예측하고 이 전류가 지령치에 미치지 못할 경우 지령전류를 보정하여 스위칭의 듀티비를 새로 계산함으로써 토크 리플을 저감하는 기법을 제시하였다. 제안된 알고리즘을 적용하여 약 10%의 토크 리플 저감 효과를 얻었으며 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

참고 문헌

- [1] G. Su and D. J. Adams, "Multilevel DC link inverter for brushless permanent magnet motors with very low inductance," in *Proc. 36th Ind. Appl. Soc. Annu. Meet. Ind. Appl. Conf.*, 2001, vol. 2, pp. 829-834.
- [2] X. G. Wang, X. Y. Wang, T. Fu, and J. Wang, "Predictive instantaneous torque control for disc coreless permanent magnet synchronous motor with the current source chopper," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 30, no. 12, pp. 7100-7112, Dec. 2015.