

고속도 BLDC 전동기의 토크 향상을 위한 개선된 전류 제어 방법

박성인, 김태성, 현동석
한양대학교 전기공학과

An Improved Current Control Method for Torque Improvement of High Speed BLDC Motor

Sung-In Park, Tae-Sung Kim, and Dong-Seok Hyun
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

ABSTRACT

In this paper, a current control method using adjustment of the phase advance angle is proposed. This proposed method improves the torque and speed response characteristic by minimizing delay of current at high speed operation, and also make reverse motoring possible. Simulated results prove the effectiveness of the proposed method through comparison with the conventional unipolar PWM method.

advance angle 제어 기법을 사용한 전류 제어 방법이다. 여기서 도입된 상 advance angle 제어 방법은 최대의 출력 토크와 정확한 속도 응답을 발생시킨다. 그러므로 상 advance angle 제어를 기초로 한 BLDC 전동기 구동 장치의 제안된 전류 제어 기법은 BLDC 전동기 구동의 최적화와 관련하여 기존의 제어 방법을 사용한 것에 좋은 대안이 된다.

제안된 제어 기법의 타당성은 기존의 유니폴라 PWM 전류제어 방법과 비교한 시뮬레이션 결과들을 통해서 증명된다.

1. 서 론

구형과의 상전류가 역기전력 파형의 평탄한 부분에 주입 되었을 때 BLDC 전동기는 이상적으로 동작된다. 그러나 실제로, 고정자 권선의 인덕턴스와 저항 성분 때문에 순간적으로 정격 전류의 수준에 도달하기는 어렵다. 낮은 속도 일 때는 인덕턴스 효과를 무시 할 수 있기 때문에 심각한 문제를 야기하지 않을 수 있다. 그러나 고속도 일 때의 전동기의 성능은 심각하게 저하 될 수 있다^[1]. 그러므로 전기 자동차와 같이 넓은 속도의 범위를 필요로 하는 산업계에서 사용되는 BLDC 전동기의 출력 토크와 속도 응답 특성을 개선하기 위해 중요한 인자가 되므로 상전류의 성능을 개선하기 위해 구동 시스템의 최적화가 필요하다.

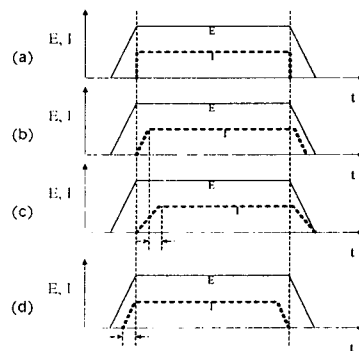
BLDC 전동기의 성능을 개선하기 위해 여러 가지 제어 방법들이 많은 연구가들에 의하여 제안되었다. 이것들은 약계자 제어 방법, 중첩의 방법과 PWM 초핑 방법 등이다^[2-5].

이 논문에서 제안된 방법은 정·역회전 할 때의 출력 토크와 속도 특성을 향상시키기 위하여 상

2. BLDC 전동기의 동작

2.1 역기전력과 전류의 관계

BLDC 전동기의 위치를 감지하는 일반적인 방법은 회전자 자석의 자속분포를 검출하기 위해 홀효과 센서를 사용한다^[6]. 그림 1은 역기전력과 권선 전류의 관계를 보여준다. 그림 1(a)는 이상적인 역기전력과 전류 파형이다. 그러나 그림 1(b)에서 보인 것처럼 고정자 권선의 저항과 인덕턴스 성분 때문에 이상적인 전류의 주입은 실제로 불가능



(a) 이상적인 파형 (b) 실제파형 (c) 고속도일 때 파형
(d) 상 advance angle을 사용하였을 때의 파형

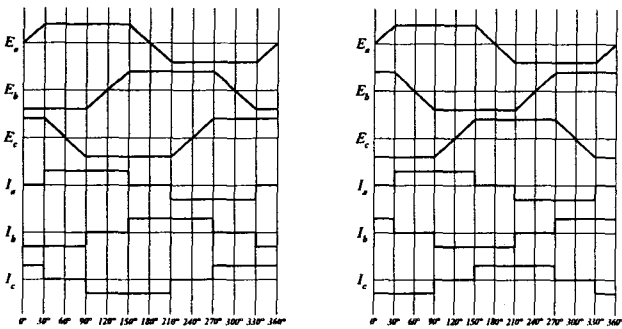
그림 1 역기전력과 상전류의 관계

Fig. 1 The relation of back-EMF and phase current

하다. 더군다나 속도가 증가함에 따라 그림 1(c)에서 보인 것처럼 상전류는 θ 만큼의 보다 많이 지연된다. 그림에도 불구하고, 그림 1(d)에서 보인 것처럼 홀효과 센서로부터 회전자 자속을 예측하는 방법에 의하여 상전류는 정격 전류의 수준에 빠르게 도달할 수 있다. 즉, ϕ 의 상 advance angle을 통해서 이를 수 있다.

2.2 BLDC 전동기의 정·역회전 동작

여섯 개의 스위치로 된 인버터 시스템을 갖는 BLDC 전동기의 정·역회전 동작을 고려하였다.



(a) 정회전 모드 (b) 역회전 모드

그림 2 정·역회전 하는 동안의 역기전력과 상전류
Fig. 2 Back-EMFs and phase currents waveform during forward and reverse motoring

그림 2(a)에서 보여주는 정회전의 상순은 a-b-c를 유지하고 유기된 역기전력이 120°의 평탄한 영역을 갖는 부분에 전류가 유입된다. 그림 2(b)는 역회전을 나타내고 역회전 방향은 상순을 a-c-b 방향으로 변화시킴으로써 구할 수 있다. 다시 말해서 이 모드는 정회전하는 방법과 매우 유사하다.

3. 최적의 상 advance angle을 구하기 위한 연구

저속도일 때, 전류는 구형파에 근접하고 전류 수준을 변화시키기 위해서 각상의 시작과 끝에서 짧은 펄스를 갖는 전압이 적용된다. 각 구간동안, 권선의 저항에 걸리는 전압 강하를 같게 함으로써 평균 전압은 역기전력을 약간 초과하게 된다.

고속도일 때, 권선의 유도성 리액턴스는 현저한 시간 지연을 발생시키고 결과적으로 전류가 정격값으로 도달하는데 걸리는 시간이 상 도통 구간의 큰 부분을 차지하게 되고 정격 전류 수준은 구간의 끝에서만 도달하게 된다. 전류의 크기가 작고 역기전력의 평탄한 범위 외부에서 도통 전류가 흐르기 때문에 구동 시스템의 출력토크는 감소하게 된다. 전류의 도통 위치는 각상을 일찍 변화시킴으로써 약

간의 범위를 보상할 수 있다. 만일 상을 전진 시키는 절차가 사용된다면 전동기 권선의 상전류는 역기전력이 일정 수준에 도달하기 전에 상승하게 될 것이다^[7].

제안된 방법에 의하여 각상에 대한 최적의 전류 파형은 다음과 같이 구할 수 있다. 먼저, a-b-c 기준 좌표계의 역기전력은 d-q-0 기준 좌표계로 변환된다.

$$\begin{bmatrix} e_d \\ e_q \\ e_0 \end{bmatrix} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \sin\phi & \sin(\phi - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\phi + \frac{2}{3}\pi) \\ \cos\phi & \cos(\phi - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\phi + \frac{2}{3}\pi) \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서, ϕ 는 고정자 전류와 회전자 쇄교자속 사이의 각변위이고 일반적으로 0이다. 또한, 전류에 대한 d-q-0 기준 좌표계의 변형은 위의 식과 같은 방법으로 구해진다.

토크는 다음과 같이 유도된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{\omega_e} (e_d i_d + e_q i_q + e_0 i_0) \quad (2)$$

여기서, p 는 극수이고 ω_e 는 전동기의 각주파수, 그리고 ω_e/p 는 전동기의 기계적인 속도이다. 토크는 p-축 전류 i_q 에 의하여 생성되고 계자와 관련되는 전류 i_d 와 i_0 는 일반적으로 0이다. 그러므로 다음의 식이 구해진다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{p}{\omega_e} e_q i_q \quad (3)$$

위의 식으로부터 i_q 성분은 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_q = \frac{2}{3} T_e \frac{\omega_e}{p} \frac{1}{e_q} \quad (4)$$

영구자석에 의하여 생성되는 공극의 자속을 감소시키기 위하여 고정자 전류의 계자 성분을 이용함

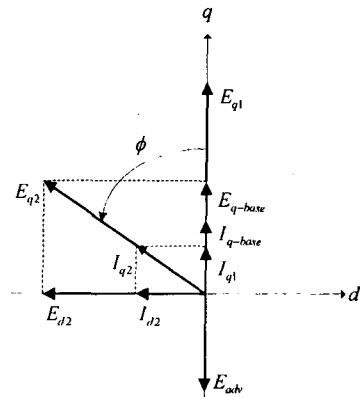


그림 3 상 advance angle 제어 위한 벡터도
Fig. 3 Vector diagram for advance angle control

으로써 BLDC 전동기는 일정한 파워 동작에 도달하게 된다. 제안된 상 advance angle 제어 방법의 원리는 그림 3에서 보여 지고 있다.

고속도에서 전동기가 동작할 때 역기전력의 q-축 성분은 E_{q-base} 에서 E_{q1} 으로 증가하고 전류의 q-축 성분은 I_{q-base} 에서 I_{q1} 으로 감소된다. 그러나 역기전력과 전류의 q-축 성분은 상 advance angle ϕ 에 의하여 각각 E_{q2} 와 I_{q2} 로 이동한다. 또한, 자속은 전류의 (-)d-축 성분이 되는 I_{d2} 에 의하여 생성되는 $(-)E_{adv}$ 때문에 감소한다. 그러면 q-축 성분의 역기전력은 E_{adv} 에 의하여 E_{q-base} 로 유지될 수 있다. 이들 관계는 다음과 같은 식들에 의하여 설명된다.

$$T_e \frac{\omega_e}{p} = \frac{3}{2} e_q i_q = P_m = const. \quad (4)$$

여기서 P_m 은 기계적인 출력이다.

상 advance angle 제어 방법이 사용되었을 때 i_{d2} 에 의하여 생성되는 역기전력 e_{adv} 는 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$e_{adv} = \frac{\omega_r}{\omega_b} e_{q-base} \quad (5)$$

여기서 ω_r 은 상 advance angle 제어 방법이 사용되었을 때의 회전자 속도이고 ω_b 는 기준 속도이다. 그리고 e_{q-base} 는 전동기가 기준 속도에서 동작되었을 때의 q-축 성분의 역기전력이다.

그러면 I_{q1} 는 같은 절차에 의하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$i_{q1} = \frac{2}{3} T_e \frac{\omega_e}{p} \frac{1}{e_{adv}} \quad (6)$$

결과적으로, 상 advance angle ϕ 는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\phi = \frac{e_{adv}}{e_{q-base}} = \cos^{-1} \frac{\omega_b}{\omega_r} \quad (7)$$

BLDC 전동기 구동 장치의 토크 성능 및 속도 특성은 제안된 제어 방법을 사용함으로써 넓은 속도 영역에 걸쳐 개선된다.

4. 시뮬레이션 결과

제안한 상 advance angle 제어 방법을 증명하기 위하여 다음의 시뮬레이션이 수행되었다. 인버터의 스위치 동작은 6개의 이상적인 스위치를 사용함으로써 모델링 하였다. Table 1은 시뮬레이션 조건을 보여준다. 그림 4, 6과 5, 7은 3000rpm에서 기존의 제어 기술을 사용한 결과와 18°의 상 advance angle을 사용한 제안된 제어 기술의 결과를 각각 보여주고 있다. 그림 4(a)와 그림 6(a)은 기존의 상 전류 제어 방법이 사용되었을 때의 정회전과 역회전하는 역기전력과 전류 파형을 시뮬레이션 한 것

표 1 BLDC 전동기의 파라미터

Table 1 Parameter of BLDC motor

정격 전압	V	310[V]
정격 토크	T_e	2[Nm]
저항	R_s	7.3[Ω]
인덕턴스	L_s	20.3[mH]
역기전력 상수	k_e	0.3[v/(rad/sec)]
극	P	4

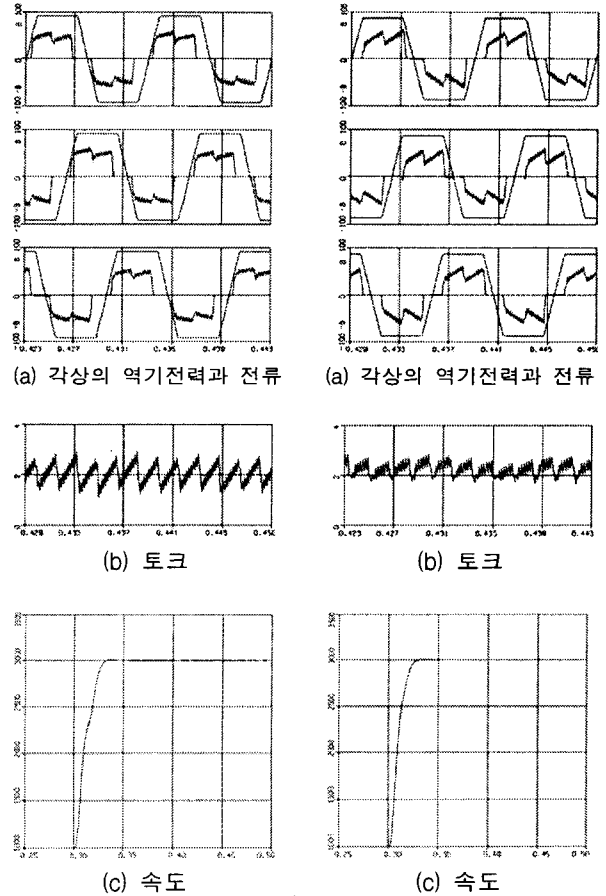


그림 4 기존의 전류제어에 의한 정회전

Fig. 4 Forward motoring with conventional current control method

그림 5 제안된 전류제어에 의한 정회전

Fig. 5 Forward motoring with proposed current control method

이다. 회전자가 역회전 했을 때의 상순은 a-b-c에서 a-c-b로 변하게 된다. 상전류의 앞부분은 권선의 인덕턴스 때문에 순간적으로 변하지 않는다. 제안된 제어 방법을 사용한 전형적인 전동기를 위한 시뮬레이션 결과는 그림 5(a)와 7(a)에서 주어졌다. 제안된 방법을 사용한 상전류는 그림 5(a)와 7(a)에서 보인 것처럼 보다 구형파에 근접하게 된다. 토크와 속도 응답 특성 면에서 제안된 상 advance angle의 효과는 그림 4(b), (c), 5(b), (c), 6(b), (c)와 7(b), (c)에서 각각 설명 된다 그림 5(b)와 7(b)

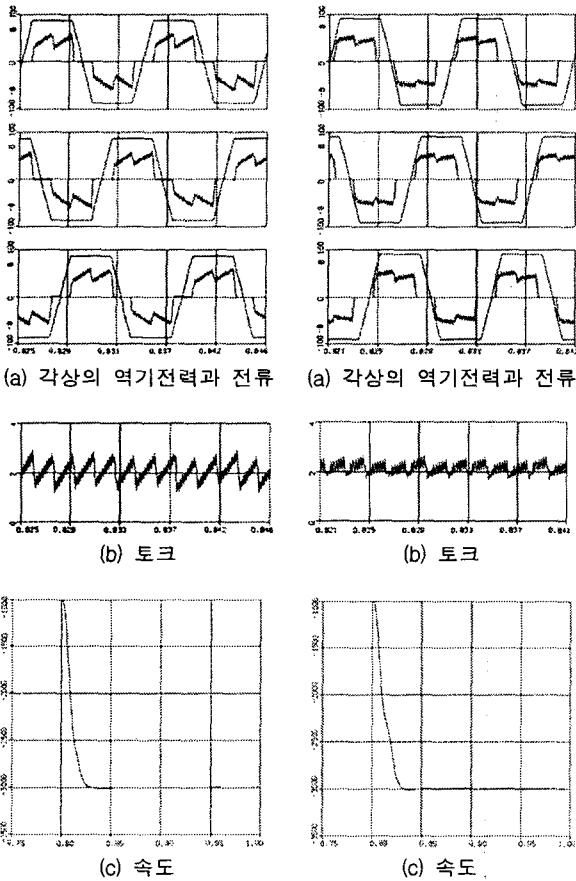


그림 6 기존의 전류제어에 의한 역회전
Fig. 6 Reverse motoring with conventional current control method

그림 7 제안된 전류제어에 의한 역회전
Fig. 7 Reverse motoring with proposed current control method

에서 보인 것처럼 제안된 제어 방법이 사용되었을 때 토크 맥동은 보다 감소하고 평균 토크는 보다 증가하게 된다. 또한, 정상상태 속도 응답은 그림 5(c)와 7(c)에서 보인 것처럼 보다 빠르게 나타난다. 새로운 제어 기법은 상전류, 출력 토크와 속도 응답 특성을 개선 시켰다.

5. 결 론

PWM 인버터에 의하여 스위치 되는 BLDC 전동기의 성능이 출력 토크와 속도 응답 특성을 개선하기 위한 관점으로부터 연구 되었다. BLDC 전동기 구동 시스템의 정상 상태의 성능을 예측하기 위한 실제적인 기술을 연구하는 과정이 표현되었다. 제안된 제어 방법을 사용한 전류, 토크와 속도의 성능이 시뮬레이션 되었고 상 advance angle을 사용하지 않은 기존의 제어 방법을 사용한 것과 비교 되었다. 이 결과들로부터 제안된 제어 기법의 주된

특징은 다음과 같다.

- ▶ 제안된 전류 제어 방법은 18°의 상 advance angle을 조절함으로써 간단하게 수행되었다.
- ▶ 출력 토크와 속도 응답 특성은 역기전력과 전류사이의 위상차를 감소시킴으로써 향상되었다.
- ▶ 제안된 방법은 고속도에서 정회전 및 역회전 동작이 가능하기 때문에 동작 속도의 넓은 범위를 필요로 하는 산업분야에 사용 될 수 있다.
- ▶ 제안된 방법은 고속도와 높은 출력을 위한 분야에서 사용하는데 만족 할 수 있다.

참 고 문 헌

- [1] Z.Q. Zhu, S. Bentouati and D. Howe, "Control of single-phase permanent magnet brushless DC drives for high-speed applications," *IEE Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*, no. 475, pp. 327-332, 2000.
- [2] H. Zeroug, D. Holliday, D. Grant and N. Dahnoun, "Performance prediction and field weakening simulation of a brushless DC motor," *Eighth International Conference on Power Electronics and Variable Speed Drives*, no. 475, pp. 321-326, 2000.
- [3] J. B. Chalmers, L. Musaba and D.F. Gosden, "Performance characteristics of synchronous motor drives with surface magnets and field weakening," *IEEE Conference on Industry Applications*, vol. 1, pp. 511-517, 1996.
- [4] Y. Murai, Y. Kawase, K. Ohashi, K. Nagatake and K. Okuyama, "Torque ripple improvement for brushless DC miniature motors," *IEEE Trans on Industry Applications*, vol. 25, issue 3, pp. 441-450, May-June 1989.
- [5] H.W. Park, S.J. Park, Y.W. Lee, S.I. Song and C.U. Kim, "Reference frame approach for torque ripple minimization of BLDCM over wide speed range including cogging torque," *IEEE Proceedings Industrial Electronics*, vol. 1, pp. 637-642, 2001.
- [6] R.L. Lin, M.T. Hu, S.C. Chen and C.Y. Lee, "Using phase-current sensing circuit as the position sensor for brushless DC motors without shaft position sensor," *IEEE Conference on Industrial Electronics Society*, vol. 1, pp. 215-218, May 1989.
- [7] S.K. Safi., P.P. Acarnley and A.G. Jack, "Analysis and simulation of the high-speed torque performance of brushless DC motor drives," *IEE Proceedings-Electric Power Applications*, vol. 142, issue 3, pp. 191-200, May 1995.