

역기전력 추정법을 이용한 브러시리스 직류 전동기의 홀센서 상전류 전환시점 보상 방법

박제욱¹, 김종훈², 김장목[†]

Position Correction Method for Misaligned Hall-Effect Sensor of BLDC Motor using BACK-EMF Estimation

Je-Wook Park¹, Jong-Hoon Kim², and Jang-Mok Kim[†]

Abstract - This paper proposes a new position compensation method for misaligned Hall-effect sensors of BLDCM(Brushless DC Motor). If the Hall-effect sensors are installed at wrong position, the exact rotor position cannot be obtained. Therefore, when the BLDCM is controlled with this wrong position, the torque ripple can be increased and the average torque also decreases. The back-EMF of BLDCM can be obtained by using the voltage equation and by multiplying the back-EMF constant and rotor speed. At a constant speed, the estimated back-EMF by using the multiplication of the back-EMF constant and rotor speed is constant, but the estimated back-EMF from the voltage equation decreases at the commutation point because the line-to-line back-EMF of two conducting phases is start to decrease at this point. Therefore, by using the difference between these two estimated back-EMFs, the commutation point of the phase current can be determined and position compensation can be carried out. The proposed position correction method doesn't require additional hardware circuit and can be easily implemented. The validity of the proposed position compensation method is verified through several experiments.

Keywords: brushless DC motor, hall-effect sensors, back-EMF, commutation point

1. 서 론

일반적으로 3상 브러시리스 직류 전동기(BLDC, Brushless DC Motor)는 구조가 간단하고 큰 토크를 낼 수 있으며, 높은 전력 밀도 및 고효율 등의 장점들로 인하여 산업분야에서 그 사용이 증가하고 있다.

BLDC 전동기는 정확한 속도 및 토크 제어를 위해 회전자의 속도뿐만 아니라 회전자의 위치정보가 반드시 필요하다. 회전자의 위치 및 속도 정보는 엔코더나 레플렉터와 같이 높은 분해능을 갖는 위치 센서를 전동기의 축에 직접 설치함으로써 얻을 수 있지만 시스템의 가격

상승과 사이즈, 부피 증가를 야기 시킨다. 특히 엔코더의 경우에는 초기의 위치정보를 위한 추가적인 알고리즘이 필요하다.^{[1]-[3]}

반면 홀센서의 경우에는 축에 직접 설치되는 센서들과는 달리 가격이 저렴하고 전동기 내부에 설치되어 공간적 제약을 크게 받지 않는 장점이 있다. 일반적으로 3개의 홀센서를 사용할 경우 홀센서는 전기적으로 60°의 분해능을 갖는 절대 위치를 제공한다. 그러나 각 상의 홀센서들이 이상적인 120°의 전기각 간격으로 설치되지 않고 그림 1과 같이 각각 θ_a , θ_b , θ_c 의 각 오차를 가지고 설치된 경우 잘못된 회전자 위치 정보를 획득하게 되며 이러한 위치로 BLDC 전동기를 제어할 경우 토크 맥동이 상승하고 및 평균 토크의 크기가 감소하게 된다.^{[4]-[5]} 그림 2는 잘못 설치된 홀센서에 의해 발생하는 위치오차를 나타낸 것이다.

기존의 홀센서 위치 오차 보상 알고리즘으로는 Vector Tracking Observer를 이용하는 방식^[4], 외삽법과 평균 필터를 이용하는 방식^[5] 이 있다. 이러한 알고리즘

Paper number: TKPE-2012-17-3-8 ISSN: 1229-2214

[†] Corresponding Author : jmok@pusan.ac.kr, Department of Electric Engineering., Pusan Nat'l Univ.

Tel: +82-51-510-2366 Fax: +82-51-513-0212

¹ Department of Electric Engineering., Pusan Nat'l Univ.

² Dept. of Digital Control, Production engineering research institute, LG Electronics

Manuscript received Oct. 11, 2011; accepted Feb. 29, 2012

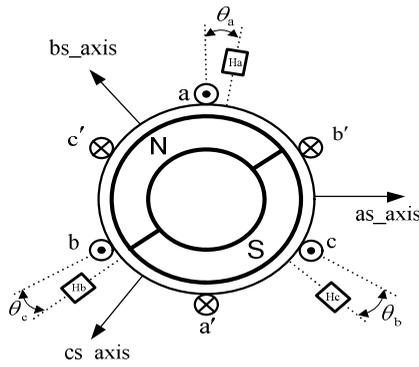


Fig. 1 BLDCM with misaligned Hall-effect sensors

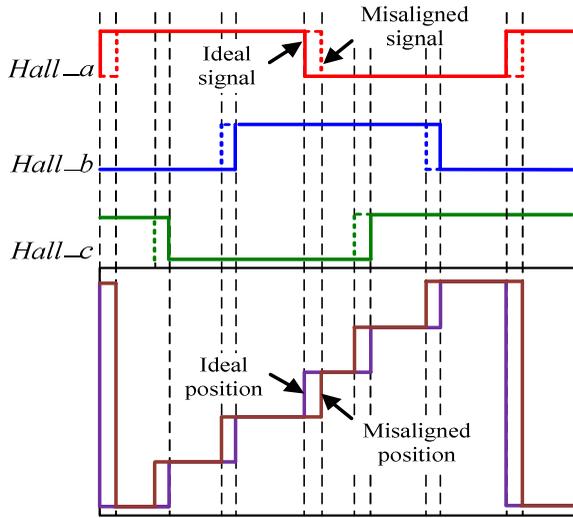


Fig. 2 The rotor position signals from the Ideal Hall-effect sensors and the misaligned Hall-effect sensor

은 많은 복잡한 계산을 해야 하거나 구조가 복잡하고 연산량이 많아지는 단점이 있다.

본 논문은 위치 오차를 갖는 홀센서가 부착된 BLDC 전동기 제어에서 상전류 전환시점 오차에 따라 발생하는 토크 맥동과 효율에 대해서 알아보고 상전류 전환시점 오차를 보상하는 알고리즘을 제안한다. 제안한 전환시점 오차 보상 방법은 전압방정식과 속도와 역기전력 상수와의 곱으로 추정된 역기전력의 크기를 비교함으로써 보다 정확한 상전류 전환시점을 판별하여 오차를 보상 할 수 있다. 제안한 알고리즘은 구현이 간단하고 위치 보상을 위한 추가적인 하드웨어가 요구되지 않는다. 실험을 통해 제안한 알고리즘의 타당성을 검증한다.

2. 3상 BLDC 전동기의 모델링 및 위치 오차의 영향

2.1 3상 BLDC 전동기 모델링

Y-결선된 3상 BLDC 전동기와 PWM 인버터의 등가 회로는 그림 3과 같다.

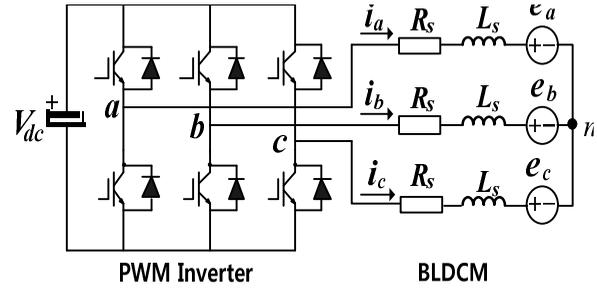


Fig. 3 The equivalent circuit of BLDCM and PWM inverter

그림 3을 통하여 BLDC 전동기의 전압 방정식을 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} L_s & 0 & 0 \\ 0 & L_s & 0 \\ 0 & 0 & L_s \end{bmatrix} \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (1)$$

여기서 v_a, v_b, v_c 는 상전압이고, i_a, i_b, i_c 는 각 상의 상전류를 나타낸다. 그리고 R_s 는 상당 저항을 L_s 는 상당 자체 인덕턴스를 나타내며 e_a, e_b, e_c 는 상당 역기전력을 나타낸다.

그림 4와 같이 120° 도통 방식으로 BLDC 전동기를 제어할 경우 상전류와 직류단 전류는 같아짐을 알 수 있다. 따라서 (1)은 상위 스위치 도통상에 대한 전압 방정식으로 간략화하여 (2)와 같이 나타낼 수 있다

$$v = R_s i + L_s \frac{di}{dt} + e \quad (2)$$

여기서 v 와 i 는 상위 스위치 도통상의 전압과 전류를 나타내며, e 는 도통된 두 상의 선간 역기전력을 나타낸다.

2.2 위치 오차의 영향

잘못된 위치 정보로 BLDC 전동기를 제어할 경우 평균 토크 맥동이 증가하고 평균 토크 출력이 감소하게 된다. 그림 5는 위치 오차가 전기적 토크에 미치는 영향을 나타낸 것으로, 전기적 각도 θ_e 만큼의 위치 오차가 발생하면 평균 토크의 맥동이 증가하게 되고 평균 출력이 감소함으로써 전체 시스템 효율이 감소하게 된다.

위치 오차로 인하여 발생하게 되는 효율의 감소는 (3)과 같이 나타 낼 수 있다.^[6]

$$\frac{2ei + \left(\frac{3}{\pi}\right)^2 ei\theta_e^2}{2ei} \times 100 [\%] \quad (3)$$

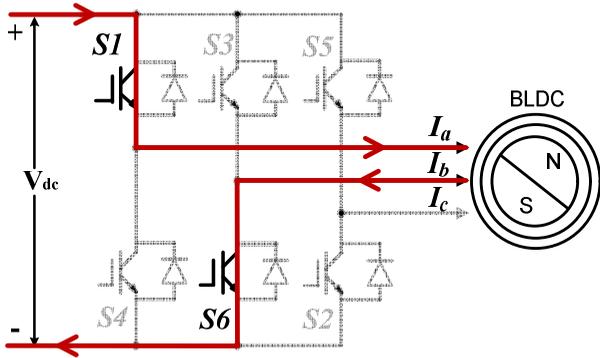


Fig. 4 The torque ripples due to the position error.

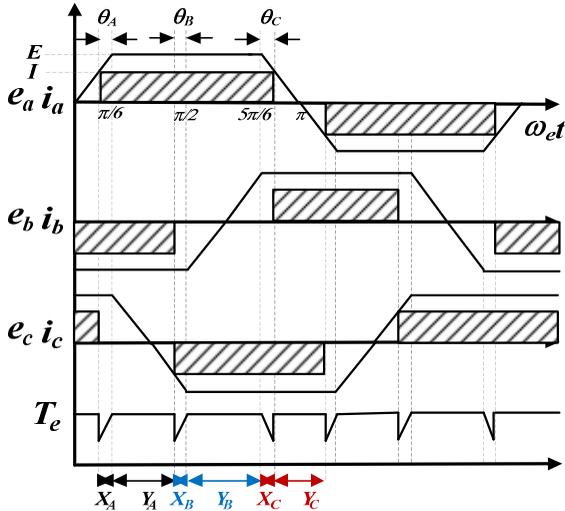


Fig. 5 The torque ripples due to the position error.

3. 제안한 역기전력 추정을 이용한 홀센서 위치 오차 보상 알고리즘

3.1 역기전력 추정을 이용한 상전류 전환시점 검출

하나의 홀센서를 이용할 경우 회전수 정보만을 출력하므로 위치 오차의 영향을 받지 않고 전동기의 속도를 추정할 수 있다. 따라서 회전자 전기각속도는 하나의 홀센서를 이용한 MT 방식으로 획득한다.^[7] 추정된 전기각속도로부터 BLDC 전동기의 역기전력은 (4)와 같이 역기전력 상수 k_e 와 회전자의 전기각 속도 ω_e 의 곱으로 나타 낼 수 있다.

$$e = k_e \times \omega_e \tag{4}$$

식 (2)의 BLDC 전동기 전압방정식으로부터 역기전력의 크기를 추정하면 (5)와 같이 나타 낼 수 있다.

$$\hat{e} = v^* - R_s i - L_s \frac{di}{dt} \tag{5}$$

여기서 \hat{e} 는 추정된 역기전력의 크기 이고 v^* 는 도통된

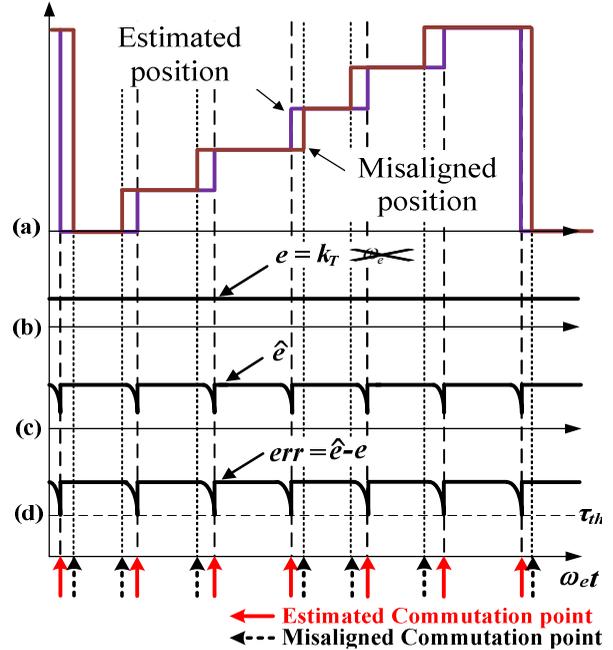


Fig. 6 (a) Estimated and misaligned commutation point
 (b) Calculated back-EMF from multiplication of back-EMF constant and the rotor speed
 (c) Estimated back-EMF from voltage equation at the commutation point
 (d) Difference of two back-EMFs and the threshold value

상의 전압 지령이다.

본 논문에서는 전류 샘플링 주기를 $100\mu s$ 로 설정하였으며 미분 연산은 (6)과 같이 한 샘플링 주기 이전의 전류와 현재 획득된 전류의 차를 이용하여 구현하였다.

$$\hat{e}(n) = v^*(n) - R_s i(n) - L_s \frac{i(n) - i(n-1)}{T_s} \tag{6}$$

여기서 T_s 는 전류의 샘플링 주기이다.

그림 6에 (4)와 (5)로 부터 추정한 각각의 역기전력을 이용하여 상전류 전환시점을 판별하는 방법을 나타내었다. 속도가 일정할 때 그림 6의 (b)에서 볼 수 있는 것과 같이 역기전력 상수와 속도와의 곱을 통하여 구한 역기전력의 크기는 항상 일정하다. 하지만 그림 6의 (c)에서 나타난 것처럼 전압방정식으로부터 추정한 역기전력의 크기는 매 상전류의 전환시점에서 감소한다. 이 현상을 이용하여 두 역기전력의 차이를 구하고, 역기전력의 차이가 미리 설정한 한계값 τ_{th} 이하가 될 때 상전류의 전환시점으로 판별 한다. 상전류의 전환시점은 한계값에 의하여 결정된다.

3.2 홀센서 위치 오차 보상

제안한 홀센서 위치 오차 보상 순서는 다음과 같다. 저속에서 BLDC 전동기를 구동하여 하나의 홀센서로부

터 회전자의 전기각속도를 검출한다. 검출된 전기각속도를 이용하여 (4)와 (6)으로부터 각각 추정된 역기전력간의 차를 구한다. 추정된 두 역기전력의 차가 τ_{th} 이하가 되는 시점을 검출한다. 이 시점은 정확한 상전환 시점이므로 샘플링 된 홀센서 신호 $pst(n)$ 가 변하는 시점과 비교하여 두 시점 사이의 시간차를 프로세서의 타이머로 카운트하여 각각의 구간별 위치 오차를 계산한다. 이러한 과정을 전기각 한바퀴에 대해 수행하여 홀 센서의 위치 오차를 계산하여 보정 할 수 있으며 보정된 각으로 BLDC 전동기를 구동한다. 제안한 알고리즘을 순서도로 나타내면 그림 7과 같다.

제안한 홀센서 위치 보상 알고리즘의 전체 블록도는 그림 8과 같다.

4. 실험결과

위치 오차를 갖는 홀센서가 설치된 3상 BLDC 전동기에 대해 상전류 전환시점 오차 보상 알고리즘을 적용하였다. 각상의 홀센서들은 약 $+10^\circ$, $+5^\circ$, -15° 의 위치 오차를 가진다. 제안한 홀센서 위치 오차 보상 알고리즘은 TI(Texas Instrument)사의 TMS320C28346를 사용하여 구현하였으며 대상 전동기의 제정수는 표 1에 나타내었다.

Table 1 Nominal parameters of the BLDCM

Rated Power	100 [w]	Number of Poles	10
Rated Voltage	24 [V]	Stator Resistance	0.5 [Ω]
Rated Torque	0.4 [N·m]	Stator Inductance	1.13 [mH]
Rated Speed	2500 [r/min]	Back EMF Constant	0.008396 [V/rad/s]

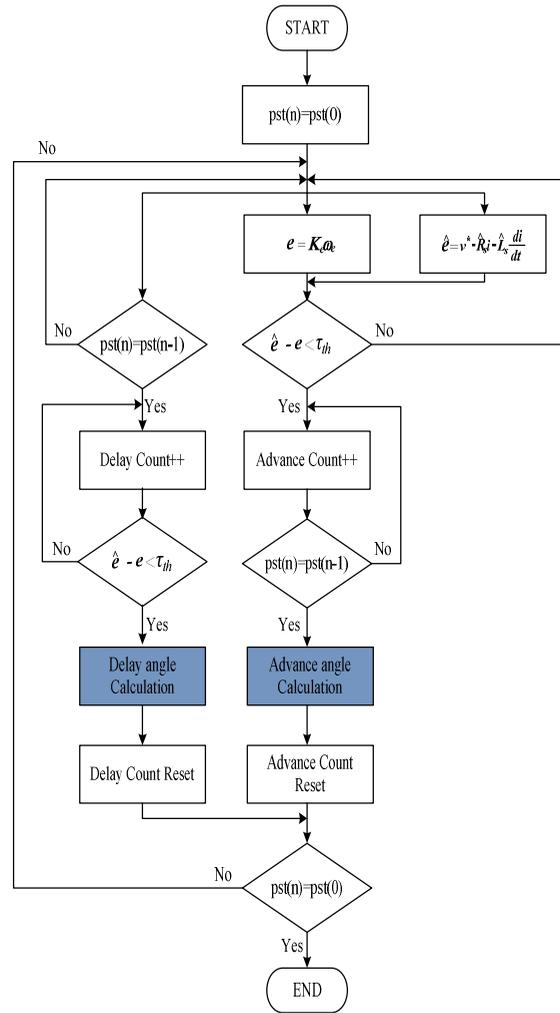


Fig. 7 Flowchart of the position error detection for each section

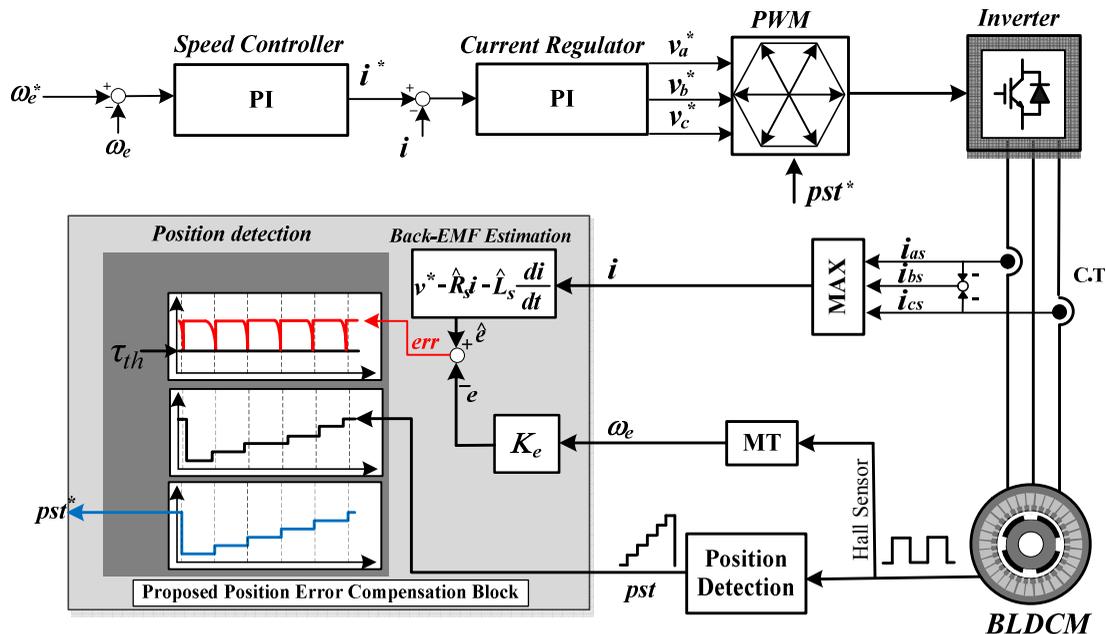


Fig. 8 Block diagram of the proposed position error compensation algorithm of the hall effect sensors

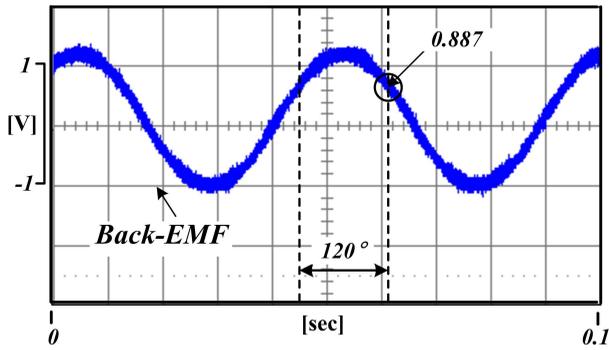


Fig. 9 A Phase back-EMF of the BLDCM (250 [r/min])

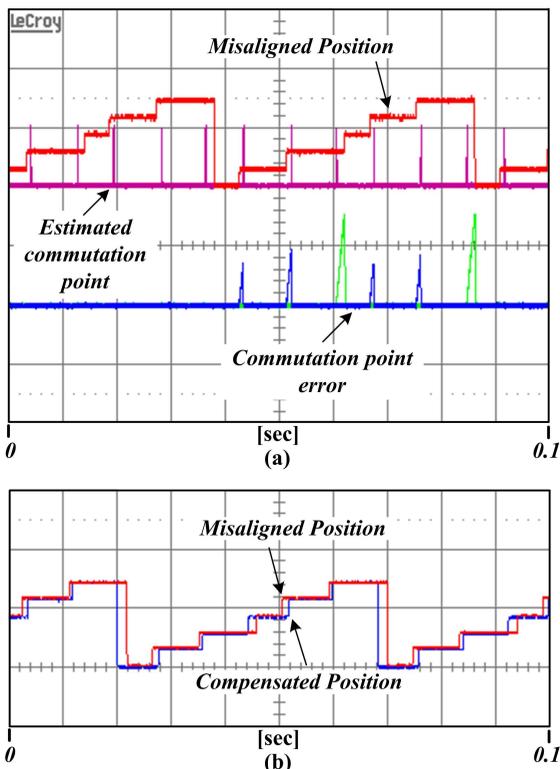


Fig. 10 (a) Estimated commutation points and commutation point error
(b) Misaligned and compensated commutation point

그림 9는 τ_{th} 를 선정하기 위하여 250 [r/min]에서 측정된 BLDC 전동기의 상 역기전력 파형이다. 상전환 구간인 120° 지점에서 역기전력이 0.887[V]이고 (4)를 통해 계산된 역기전력의 크기는 1.099[V]이므로 두 전압의 차이인 -0.212를 한계값으로 선정하였다.

그림 10은 위치 오차를 갖는 홀센서가 부착된 BLDC 전동기에 제안한 보상 알고리즘을 적용하였을 때의 실험 결과 파형을 나타낸 것이다. 그림 10(a)는 오차를 가지는 위치 신호로 BLDC 전동기를 구동하여 위치 오차를 검출하는 실험파형을 나타낸 것으로 구동 속도는 250 [r/min], τ_{th} 를 -0.212로 설정하였다. 제안한 홀센서 위치 오차 보상 알고리즘으로 추정된 전환시점과 홀센

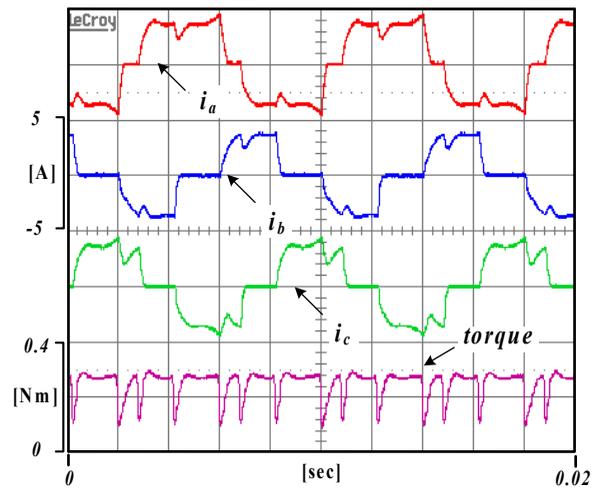


Fig. 11 Three phase currents and torque before compensation of position error at 1500[r/min]

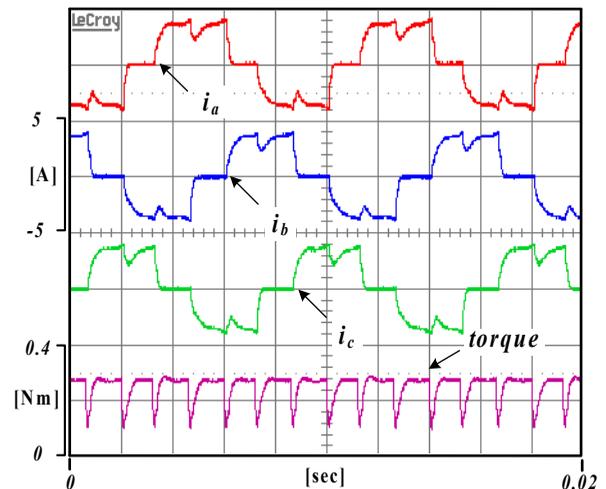


Fig. 12 Three phase currents and torque after compensation of position error at 1500[r/min]

서로부터 검출된 위치가 오차를 가지는 것을 확인 할 수 있으며 이러한 위치 오차가 발생한 구간에서 오차각을 계산하기 위해 카운트되는 것을 나타내고 있다. 그림 10(b)는 측정된 구간별 오차각을 이용하여 홀센서 신호를 기준으로 위치를 보정한 파형으로 여섯 구간이 동일한 간격으로 정확하게 추정되고 있음을 알 수 있다.

그림 11은 각상의 홀센서들은 약 $+10^\circ$, $+5^\circ$, -15° 의 위치 오차를 가질 때의 각 상의 전류 및 토크 파형을 나타낸 것이다. BLDC 전동기는 1500[r/min]으로 제어 하였다. 각 상의 전류는 정확한 위치에서 상 전환이 이루어지지 않아 왜곡되는 것을 볼 수 있으며 그에 따른 토크 맥동도 일정하지 않은 것을 확인 할 수 있다. 또한 실제 전환시점보다 지연이 발생한 A상, C상이 도통되는 구간에서 역기전력 감소로 인해 다음 위치로 전환할 때 더 큰 토크 맥동이 나타남을 알 수 있다.

그림 12는 위치 오차 측정을 통하여 위치 오차를 보

상 한 후 그림 11과 동일한 조건에서의 실험 결과를 나타낸 것이다. 각 상의 전류는 왜곡 없이 출력되는 것을 알 수 있으며 토크맥동도 전환시점에 따라 일정 주파수를 가지고 나타나는 것을 알 수 있다. 전체 평균토크 0.22[N·m]에서 토크 맥동 또한 오차를 보상하기 전후 각각 0.1[N·m]에서 0.08[N·m]로 약 9% 감소한 것을 알 수 있다.

6. 결 론

본 논문은 역기전력 추정을 이용하여 위치 오차를 갖는 홀센서가 설치된 BLDC 전동기의 전환시점 오차를 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 홀 센서 설치 오차로 인해 정확한 위치에서 상 전환이 일어나지 않으면 토크의 맥동이 증가하고 평균 토크 및 시스템 효율이 감소한다. 제안한 알고리즘은 전압방정식과 역기전력 상수 및 회전자 속도를 이용하여 역기전력을 각각 추정하고 두 역기전력의 차를 이용하여 위치 오차를 검출하여 보상하는 알고리즘을 제안하였다. 제안한 알고리즘은 구현이 간단하고 위치 오차 보상을 위한 추가적인 하드웨어가 요구되지 않는다. 제안한 전환시점 오차 보상 알고리즘은 실험을 통해 그 타당성을 검증하였다.

이 논문은 부산대학교 자유과제 학술연구비(2년)에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

- [1] T. J. E Miller, "Brushless Permanent-Magnet and Reluctance Motor Drives," Oxford, 1989.
- [2] J. R. Hendershot and T. J. E. Miller, "Design of Brushless Permanent-Magnet Motors," Oxford, 1994.
- [3] T. J. E Miller, "Brushless permanent-Magnet motor drives," *Power Engineering Journal*, Vol. 2, No. 1, pp. 55-60, 1988.
- [4] Sam-Young Kim, Chinchul Choi, Kyeongjin Lee, Wootaik Lee, "An Improved Rotor Position Estimation With Vector-Tracking Observer in PMSM Drives With Low-Resolution Hall-Effect Sensors," *Industrial Electronics, IEEE Trans. on*, 1984, Vol. 58, No. 9, pp. 4078-4086.
- [5] Samoylenko N, Qiang Han, Jatskevich J, "Dynamic Performance of Brushless DC Motors With Unbalanced Hall Sensors," *Energy Conversion, IEEE Transactions on*, 2008, Vol. 23, No. 3, pp. 752-763.
- [6] Tae Hyung kim, Ehsani M, "An error analysis of the sensorless position estimation for BLDC motors," Industry Applications Conference, 2003. 38th IAS Annual Meeting. Conference Record of the, vol1, pp. 611-617.
- [7] Seung-Ki Sul, "Control of Electric Machine Drive Systems," WILEY, 2010.



박제욱(朴帝旭)

1985년 1월 2일생. 2007년 부산대 전자전기 공학과 졸업. 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년~현재 동 대학원 전자전기공학과 박사과정.



김종훈(金鍾訓)

1984년 3월 11일생. 2010년 부산대 전자전기 공학부 졸업. 2012년 동 대학원 전자전기 공학과 졸업(석사). 현 LG전자 생산기술원 디지털 제어팀 소속.



김장목(金長睦)

1988년 부산대 전기공학과 졸업. 1991년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1997년~2001년 한전 전력연구원 선임연구원. 2001년 3월~현재 부산대 전자전기공학과 교수.