벡터 제어 PMSM 구동장치의 전류 센서 오차 보상

이광운*, 김상일**
* 국립목포해양대학교 해양메카트로닉스학부, ** 국립순천대학교 전기공학과

Compensation of Current Sensor Error in Vector-Controlled PMSM Drives

Kwang-Woon Lee*, Sang-Il Kim**
* Mokpo National Maritime University, ** Sunchon National University

ABSTRACT

상 전류 측정을 목적으로 복수의 전류 센서가 사용되는 전류 벡터 제어 방식의 교류 전동기 구동장치에서 전류 센서 각각의 스케일이 서로 다른 경우 전동기의 전기 각 주파수의 2배에 해당하는 주파수를 갖는 토크 맥동이 발생된다. 본 논문에서는 PMSM 구동장치에서 회전자를 특정 방향으로 정렬시키는 과정에서의 인버터 전압 지령 크기를 이용하여 전류 센서 사이의 스케일 오차를 교정할 수 있는 방식을 제안한다. 또한 실험을 통해 제안된 방식의 가능성을 살펴보고, 제안된 방식이 실제로 적용되었을 때 나타날 수 있는 문제점에 대해 기술한다.

1. 서 론

영구자석 교류전동기(PMSM)의 전류 벡터 제어를 위해서는 인버터를 통해 전동기에 공급되는 상 전류를 정확하게 측정해야 한다. 3상 영구자석 교류전동기의 상 전류 측정을 위해 일반적으로 복수의 전류 센서 또는 션트 저항이 이용된다. 2개 또는 3개의 전류 센서를 이용하는 경우 3상 교류 전동기의 상 전류를 직접 검출할 수 있는 장점이 있다. 션트 저항을 이용하는 경우 전류 센서 방식 대비 비교적 저렴한 비용으로 전류 측정을 할 수 있으나, 인버터의 PWM 동작에 의해 전류 측정이 제한되는 단점이 있다.[1]

기존의 전류 센서 또는 션트 저항을 이용하는 전류 측정 방식에서는 주위 온도의 변화, 전자 부품의 편차 등의 다양한 요인으로 인한 측정 오차가 필연적으로 발생한다. 전류 측정 오차는 옵셋 오차와 스케일 오차로 분류된다. 옵셋 오차는 영 전류에 측정 값 오차를 의미하며, 전류 측정에 옵셋 오차가 존재하는 경우 전동기의 전기 각 주파수와 동일한 주파수의 토크 맥동을 발생시킨다. 스케일 오차는 복수의 전류 센서가 사용되는 경우 각각의 전류 센서의 스케일이 서로 다른 것을 의미하며, 스케일 오차가 존재하는 경우 전동기의 전기 각 주파수의 2배 주파수를 갖는 토크 맥동을 유발한다.[2] 교류 전동기 구동 시스템에서 전류 측정 오차의 영향 보상하는 방법에 대해서 많은 연구가 진행되어 왔으며, 옵셋 오차의 경우 동적 응답 특성에서도 상당히 만족스러운 보상 성능을 보이고 있다.[3] 스케일 오차의 경우 PMSM의 회전자를 고정한 상태에서 3상의 전류 센서 스케일 오차를 보상하는 방식이 제시되었다.[4]

본 논문에서는 PMSM의 강제 정렬 과정에서 인버터의 전압 지령을 이용하여 스케일 오차를 보상하는 방식에 대해 제시하고, 실험을 통해 제시된 방식의 가능성을 보인다.

2. 강제 정렬 과정에서의 스케일 오차 보정

PMSM의 동기 좌표계 전압 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s + pL_d & -\omega_e L_q \\ \omega_e L_q & r_s + pL_q \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_e \lambda_{PM} \end{bmatrix} \quad (1)$$

식 (1)에서 v_d, v_q는 d-q 축 전압, i_d, i_q는 d-q 축 전류, r_s는 고정자 저항, L_d, L_q는 d-q 축 고정자 인덕턴스, ω_e는 전기 각 속도, λ_{PM}은 영구자석의 자속을 나타낸다. PMSM의 회전자가 구속되지 않은 상태에서 회전자 위치(θ_e)가 0도가 되도록 PMSM에 일정한 상 전류를 공급하는 강제 정렬 과정을 거치면 정상 상태에서 PMSM의 전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_d \\ v_q \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} r_s & 0 \\ 0 & r_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_d \\ i_q \end{bmatrix} \quad (2)$$

강제 정렬 이전에 상 전류 센서의 값을 여러 번 읽어 들여 평균하면 전류 센서의 옵셋 오차를 보정할 수 있다. a상과 b상의 상 전류(i_{as}, i_{bs})만을 검출하는 경우 옵셋 오차가 0이라고 가정하면 a상과 b상의 측정 전류(i_{asm}, i_{bsm})는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{asm} &= (1 + k_a) i_{as} \\ i_{bsm} &= (1 + k_b) i_{bs} \\ i_{cs_m} &= -(i_{asm} + i_{asm}) \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)에서 k_a 와 k_b 는 a상과 b상의 전류 센서 스케일 오차를 나타낸다. 이상적인 경우 k_a 와 k_b 는 0이나, 서로 같은 값을 갖는 경우 스케일 오차에 의한 토크 맥동이 나타나지 않는다. 강제 정렬에서 d축 전류 지령(i_d^*)의 크기를 I, q축 전류 지령(i_q^*)의 크기를 0이라고 하면 정상 상태에서 측정된 상 전류의 d-q축 전류(i_{dm}, i_{qm})는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} i_{dm} &= (1 + k_a) i_{as} = I \\ i_{qm} &= 0 \end{aligned} \quad (4)$$

식 (4)로부터 실제 a상과 b상의 전류를 구하면 다음과

같다.

$$i_{as} = \frac{I}{(1+k_a)} \qquad (5)$$
$$i_{bs} = -\frac{I}{2(1+k_b)}, i_{cs} = \frac{I}{2(1+k_b)} - \frac{I}{(1+k_a)}$$

인버터의 q축 전압 출력이 지령 값과 동일하다고 가정하면 강제 정렬의 정상 상태에서 스케일 오차에 따른 q축 전류 제어기의 출력 전압(v_q^*)은 다음과 같은 관계를 갖는다.

$$\begin{aligned} k_a = k_b &\rightarrow v_q^* = r_s i_{qm} = 0 \\ k_a > k_b &\rightarrow v_q^* = r_s i_{qm} < 0 \\ k_a < k_b &\rightarrow v_q^* = r_s i_{qm} > 0 \end{aligned} \qquad (6)$$

식 (6)의 관계를 이용하면 강제 정렬의 정상 상태에서 q축 전류 제어기의 출력이 0이 되도록 a상 또는 b상 전류의 이득에 곱해지는 변수를 조정함으로써 전류 센서의 스케일 차이를 보정할 수 있다. 본 논문에서 제시한 방식을 응용하면 3상의 전류를 모두 검출하는 경우에도 전류 센서의 스케일 차이를 보정할 수 있다.

3. 실험 결과

950[W]급의 SPMSM을 대상으로 2개의 상 전류를 검출하는 조건에서 상 전류 센서의 스케일 오차(차이)가 q축 전류 제어기의 출력에 미치는 영향을 실험을 통해 알아보았다. 실험에 사용한 SPMSM은 8극으로, 상 저항은 0.46[Ω]이고, 상 인덕턴스는 3.5 [mH], 영구자석의 자속은 0.0912[Wb]이다. 인버터의 스위칭 주파수는 16[kHz]이고, 전류 제어기의 대역폭은 500[Hz]로 설정하였다. 강제 정렬에서 d축 전류 지령(i_d^*)은 1[A]로, q축 전류 지령(i_q^*)은 0[A]로 설정하였다. 그림 1은 a상과 b상 전류 센서 사이의 스케일 차이가 거의 없는 조건으로 q축 전류 제어기의 출력 전압(v_q^*) 평균이 거의 0[V] 근처임을 알 수 있다. 그림 2는 a상 전류 센서의 스케일 이득을 임의로 20[%] 키운 경우로 식 (6)의 분석 결과와 같이 q축 전류 제어기의 출력 전압(v_q^*) 평균이 음의 값을 가짐을 확인할 수 있다. 따라서 q축 전류 제어기 출력을 적분하여 그 값이 0이 되도록 전류 센서의 스케일 이득을 조정하면 전류 센서 사이의 스케일 오차를 교정할 수 있다.

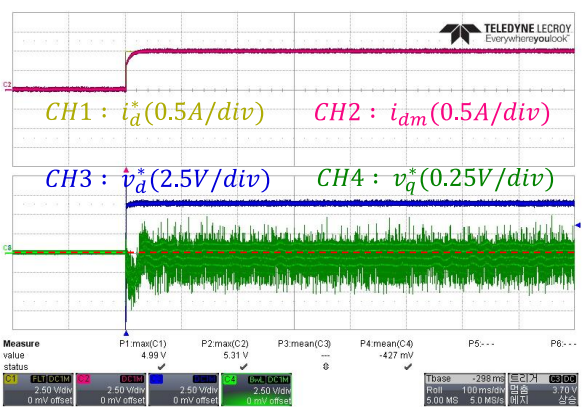

그림1 전류 센서의 스케일 차이가 없는 경우의 전류와 전압 파형

Fig.1 Current and voltage waveforms under no current sensor scale error condition

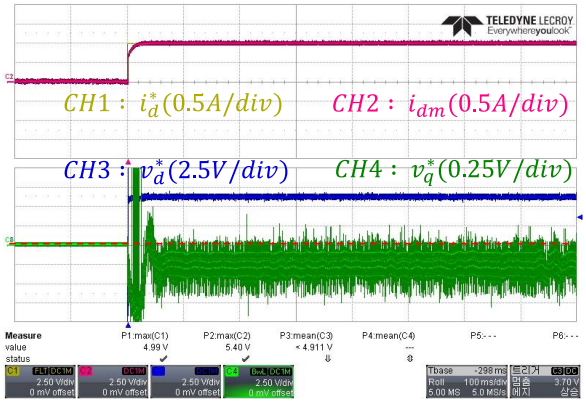

그림2 전류 센서의 스케일 차이가 있는 경우의 전류와 전압 파형

Fig.2 Current and voltage waveforms under current sensor scale error condition

4. 결 론

본 논문에서는 PMSM의 강제 정렬 과정에서 전류 센서의 스케일 차이를 보정할 수 있는 방법을 제시하고, 실험을 통해 구현 가능성을 살펴보았다. 본 논문에서 제시한 방식은 PMSM의 회전자를 특정 위치에 고정할 필요가 없기 때문에 PMSM의 기동을 위해 강제 정렬이 일반적으로 사용되는 센서리스 구동 장치에 적합하다. 그러나 PMSM의 상 저항 사이의 편차를 고려하지 않기 때문에 상 저항 편차가 존재하는 경우 전류 센서 스케일 오차 보정에 영향을 받을 수 있다. 인버터의 데드 타임(dead-time)과 스위칭 소자의 저항이 전류 센서 스케일 오차 보정에 미치는 영향에 대해서는 향후 추가 연구를 통해 밝히고자 한다.

이 논문은 ㈜어보브반도체의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

참 고 문 헌

[1] Z. Zhang, D. Leggate, and T Matsuo, “Industrial inverter current sensing with three shunt resistors: Limitations and solutions” *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 32, no. 6, pp. 4577-4586, Jun. 2017.

[2] K.-W. Lee and S.-I. Kim, “Dynamic performance improvement of a current offset error compensator in current vector-controlled SPMSM drives,” *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 66, no. 9, pp. 6727–6736, Sep. 2019.

[3] S. -I. Kim, J. -Y. Kim and K. -W. Lee, "Current Measurement Offset Error Compensation Scheme Considering Saturation of Current Controller in SPMSM Drives," *IEEE Access*, vol. 11, pp. 17233-17240, 2023.

[4] M. -S. Yoo, S. W. Park, Y. -Y. Choi, S. -H. Han and Y. -D. Yoon, "Current-Scaling Gain Compensation of Motor Drives Under Locked-Rotor Condition Considering Inequality of Phase Resistances," *IEEE Trans. Ind. Appl.*, vol. 56, no. 5, pp. 4915-4923, Sept.-Oct. 2020.