

영구자석 전동기의 전류 스케일 측정 오차 보정

최영현, 김동언, 하정익
서울대학교

Compensation of current measurement scaling error for PMSM

Young Hyun Choi, Dong Eon Kim, Jung Ik Ha
Seoul National University

ABSTRACT

본 논문에서는 전류센서 스케일 오차 발생 시 오차 보정 방식에 대해 제시한다. 전류센서 스케일 오차는 회전자 기준 동기 좌표계에서 맥동하는 전류 및 직류 전류 오차를 야기하며, 이로 인해 전류 제어 성능 및 전동기 제어 성능이 떨어진다. 본 논문에서는 전류 제어기 출력에서 나타나는 직류 전압 오차를 수식적으로 분석하고 이를 통해 스케일 계수를 추정하여 스케일 오차로 발생하는 2고조파 전류 및 직류 전류 오차를 보상하는 방식에 대해 제시한다.

서론

교류전동기는 전동기에 흐르는 상전류를 측정하고 이로부터 전압 지령을 출력하는 폐루프 제어를 통해 구동된다. 따라서 전류 측정 정밀도는 전동기의 구동 및 제어 성능에 직접적인 영향을 끼친다.

상전류의 측정은 셉트 저항에 의한 측정, 변류기에 의한 측정, 홀효과에 의한 측정으로 구분된다. 각각의 측정방식은 다른 특성을 가진다. 셉트 저항에 의한 측정은 신호 대 측정 잡음의 비가 높은 한계를 가지며, 변류기에 의한 측정은 일정 범위 이상의 전류에 대해 코어의 자기포화가 발생하여, 비선형성이 크다. 홀 효과에 의한 측정은 온도의 드리프트로 인해 전류의 측정 오차가 발생한다. 이 외에도 센서의 노후화, A/D 변환 오차 등의 이유로 전류 측정 오차가 발생하게 된다.^[1]

이러한 원인들로 인해 전류에 스케일 오차가 발생한다. 스케일 오차는 전류의 크기에 비례하는 오차가 발생하는 경우를 의미한다. 전류의 스케일 오차는 회전자 자속 기준 동기 좌표계에서 고정자 전기각 주파수에 2배 주파수의 맥동 전류 및 직류 전류 오차를 발생시킨다.

기존 연구에서는 맥동하는 2고조파 전류를 외란 관측기를 통해 보상하거나, 전류 제어기 출력으로부터 2고조파 전류에 의해 발생하는 전압 오차를 분석하고 이를 통해 스케일 계수를 추정하였다^[2]. 각각의 방식들은 2고조파 전류에 의한 맥동토크만을 보상하며, 직류 전류 오차에 의한 토크 옵셋을 보상할 수 없다.

속도 제어 제품의 경우, 2고조파 맥동 전류 보상을 통해 맥동 토크를 제거하며, 직류 전류 오차에 의한 토크 옵셋은 전류 제어기의 상위 제어기인 속도 제어기를 통해 제어를 할 수 있다. 하지만 전류제어의 제품의 경우, 전류 제어기 위의 상위 제

어가 없기 때문에, 2고조파 맥동 전류 보상으로 토크 옵셋을 제거할 수 없다.

따라서 이러한 토크 옵셋을 제거하기 위해서는 스케일 오차에 의해 발생하는 2고조파 전류 뿐만 아니라 직류 옵셋을 보상하는 알고리즘이 필요하다.

본 논문에서는 스케일 오차로 발생하는 전류 오차를 수식적으로 분석하고, 이러한 전류 오차 중 직류 성분과 전류제어기 출력으로부터 계산한 직류 전압 오차 사이의 관계를 분석하여, 스케일 계수를 추정한다. 각각의 스케일 계수를 독립적으로 추정하여 스케일 오차로 발생하는 2고조파 전류 및 직류 전류 오차를 보상하는 장점을 가진다. 제안된 시스템의 유효성은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

본론

1.1 스케일 오차 분석

스케일 오차는 각 상전류에 비례하는 오차가 발생하는 경우를 말한다. 아래의 식과 같이 상전류에 K_a, K_b 의 스케일 오차가 발생하는 경우 각 상전류값을 식(1)로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{as\ sen} &= K_a I \cos(\omega_e t + \theta) \\ i_{bs\ sen} &= K_b I \cos(\omega_e t - \frac{2\pi}{3} + \theta) \end{aligned} \quad (1)$$

$$i_{cs\ sen} = -(i_{as\ sen} + i_{bs\ sen})$$

회전자 자속 기준 동기 좌표계에서 전류 오차는 식(2),(3)과 같이 전기각 주파수에 2배주파수의 맥동 전류와 직류 전류 옵셋으로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta i_{ds}^e &= \frac{I}{\sqrt{3}} \left(\left(\frac{1}{K_b} - \frac{1}{K_a} \right) \sin(2\omega t + \frac{1}{K_a}) \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{1}{K_a} \right) \sin\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \left(1 - \frac{1}{K_b} \right) \sin\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right) \right) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \Delta i_{qs}^e &= \frac{I}{\sqrt{3}} \left(\left(\frac{1}{K_b} - \frac{1}{K_a} \right) \cos(2\omega t + \frac{1}{K_a}) \right. \\ &\quad \left. + \left(1 - \frac{1}{K_a} \right) \cos\left(\frac{\pi}{3} - \theta\right) + \left(1 - \frac{1}{K_b} \right) \cos\left(\frac{2\pi}{3} - \theta\right) \right) \end{aligned} \quad (3)$$

회전자 자속 기준 동기 좌표계에서의 전류 맥동과 직류 옵셋은 전동기에 맥동 토크 및 토크 옵셋으로 나타나게 된다.

1.2 스케일 오차 보정

스케일 오차에 의해 발생하는 직류 전류 오차는 식(4),(5)같이 표현할 수 있다.

$$\Delta v_{ds}^e = \frac{I}{2} \left(2 - \frac{1}{K_a} - \frac{1}{K_b}\right) \cos(\theta) - \frac{I}{2\sqrt{3}} \left(\frac{1}{K_a} - \frac{1}{K_b}\right) \sin(\theta) \quad (4)$$

$$\Delta v_{qs}^e = \frac{I}{2} \left(2 - \frac{1}{K_a} - \frac{1}{K_b}\right) \sin(\theta) - \frac{I}{2\sqrt{3}} \left(\frac{1}{K_a} - \frac{1}{K_b}\right) \cos(\theta) \quad (5)$$

전류의 오차는 K_a, K_b 의 함수이지만, 전류 측정 오차를 알 수 없다. 직류 전류 오차는 전류제어기 출력에서 직류 전압 오차를 발생시킨다. 따라서 전동기 전압 방정식에 해당하는 직류 전류 오차를 대입하여 발생하는 직류 전압 오차를 식(7),(8)로 표현할 수 있다.

$$\Delta v_{ds}^e = v_{ds}^{*e} - i_{ds}^{*e} R_s = R_s \Delta i_{ds}^e - \omega_e L_s \Delta i_{qs}^e \quad (7)$$

$$\Delta v_{qs}^e = v_{qs}^{*e} - i_{qs}^{*e} R_s = R_s \Delta i_{qs}^e + \omega_e L_s \Delta i_{ds}^e \quad (8)$$

식(4),(5)를 식(7),(8)에 대입하여 식을 정리하면, 전동기 정수 및 전류와 속도가 일정할 때, 전압 오차는 식(9),(10)과 같이 K_a, K_b 의 함수로 주어진다.

$$\Delta v_{ds}^e = \frac{I}{\sqrt{3}} \sqrt{R^2 + (\omega_e L_s)^2} \left(2 - \frac{1}{K_a} - \frac{1}{K_b}\right) \frac{\sqrt{3}}{2} \cos\alpha + \frac{I}{\sqrt{3}} \sqrt{R^2 + (\omega_e L_s)^2} \left(\frac{1}{K_b} - \frac{1}{K_a}\right) \frac{1}{2} \sin\alpha \quad (9)$$

$$\Delta v_{qs}^e = \frac{I}{\sqrt{3}} \sqrt{R^2 + (\omega_e L_s)^2} \left(2 - \frac{1}{K_a} - \frac{1}{K_b}\right) \frac{\sqrt{3}}{2} \sin\alpha - \frac{I}{\sqrt{3}} \sqrt{R^2 + (\omega_e L_s)^2} \left(\frac{1}{K_b} - \frac{1}{K_a}\right) \frac{1}{2} \cos\alpha \quad (10)$$

$$G = \begin{pmatrix} \cos\alpha & \sin\alpha \\ \sin\alpha & -\cos\alpha \end{pmatrix}, \alpha = \tan^{-1} \left(\frac{R_s}{\omega_e L_s} \right) \quad (11)$$

따라서 주어진 전압 오차로부터 $2 - \frac{1}{K_a} - \frac{1}{K_b}$ 와 $\frac{1}{K_b} - \frac{1}{K_a}$ 를 계산하고, 이를 통해 각각의 K_a, K_b 를 추정할 수 있다.

그림1은 스케일 오차 보정 블록도이다. 제어기의 출력 전압 오차에 저역 필터를 통과 시켜 직류 전류 오차에 의한 전압 성분에 식(11)에서 제시된 G 행렬을 곱하여 스케일 계수를 추정한다. 해당 제어기의 최종 출력을 현재 측정하고 있는 전류에 곱하여 스케일 오차로 발생하는 전류 오차를 보상한다.

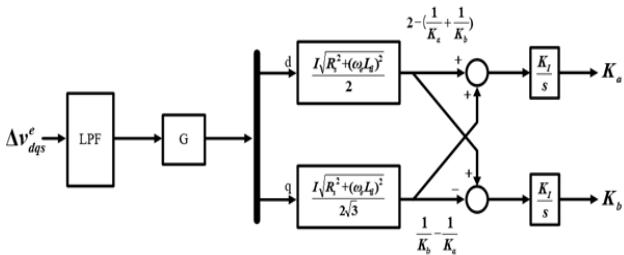


그림 1 스케일 오차 보정 블록도

1.3 시뮬레이션

a상과 b상에 각각 $K_a = 0.8, K_b = 1.1$ 의 스케일 오차가 발생한 경우 발생하는 동기좌표계 전류 오차는 다음과 같이 고정자 전기각 주파수의 2배 주파수와 직류 윗셋이 발생한다. 그림

3을 통해 0.5초 스케일 오차가 발생한 것을 확인할 수 있으며, 그림 4를 통해 1초에 전압 오차를 보상하는 제어가 사용되었다. 추정된 스케일 계수가 실제값과 같음을 통해 제어기의 유효성을 검증할 수 있다.

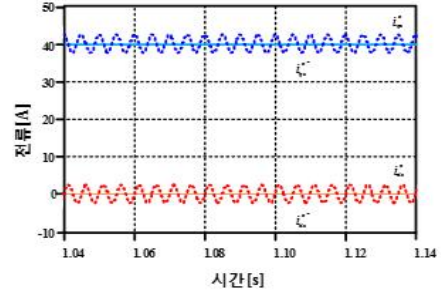


그림 2 스케일 오차 동기좌표계 측정 전류

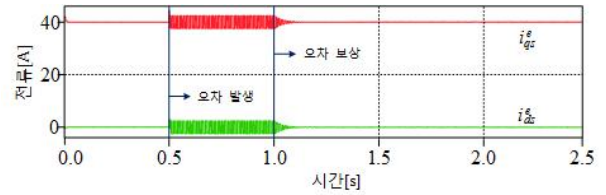


그림 3 스케일 오차 보상 전후 동기좌표계 측정 전류

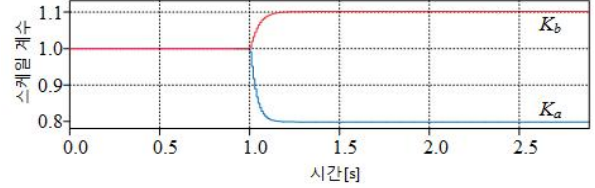


그림 4 스케일 오차 보상 전후 동기좌표계 측정 전류

표 1 시뮬레이션 조건

f_{sw}	10kHz	기본파 주파수	100Hz
R_s	0.013 Ω	L_s	32 μ H
V_{DC}	12V	I_{rated}	40A
λ_f	0.005207V/rad \cdot s		

결론

스케일 오차 발생 시 전동기는 고정자의 전기각 주파수의 2배 주파수의 토크 맥동 및 토크 윗셋이 발생한다. 이를 해결하기 위해서 본 논문에서는 출력 전압 오차에 저역 필터를 취하여 직류 전압 오차를 구하고 이를 통해 스케일 계수를 추정하였다. 설계한 제어기는 회전자 자속 기준 동기 좌표계에서 발생하는 직류 오차 및 2고조파 맥동 전류를 보상하는 방법을 제시하였으며 시뮬레이션에서 통해 검증하였다.

참고 문헌

- [1] 설승기 저 “전기기기 제어론” 홍릉과학출판사, pp.190 pp.194
- [2] M.Kim, S. K.Sul, and J.Lee, "Compensation of Current Measurement Error for Current Controlled PMSM Drives", *IEEE Trans. on Industry Applications*, 2014.