

PMSM 적응 센서리스 제어기의 속도/위치 추정기의 특성 분석

이진우
두원공과대학교 전기과

Analysis of characteristics of position/speed estimator of an adaptive sensorless controller for PMSM

Jin-Woo Lee

Doowon Technical University College, Dept. of Electrical Engineering

ABSTRACT

This paper deals with the analysis of characteristics of position and speed estimator of an adaptive sensorless control algorithm for PMSM drives. The analysis shows that the back emf constant variation results in the position estimation error, but does not the speed estimation error. The simulation and experimental results are shown to verify the analysis result and the usefulness of the back emf constant estimator.

1. 서론

영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)는 고효율 밀도와 고효율로 인하여 서보(servomotor) 제어장치, 세탁기, 압축기, 터보 블로워(turbo blower) 등에 적용되고 있으며, 터보 블로워와 같이 위치센서를 장착할 수 없는 응용분야에서는 센서리스제어 방법을 사용하고 있다.^[1-5] 센서리스 제어방법은 고주파 신호 주입법과 전동기 모델 기반방법으로 분류할 수 있으며, 고주파 신호 주입법은 저속에서 우수한 성능을 보이거나 주입신호에 의한 소음 및 손실이 발생하는 단점이 있다. 한편, 전동기 모델 기반방법은 저속 성능이 떨어지거나 고주파 주입 없이 고속에서 안정한 운전특성을 보이고 있다.^[3]

전동기 모델 기반방법은 저속 특성을 보완하기 위해 개루프 제어방법을 이용하여 기동한 후에 센서리스제어 하는 방법으로 압축기, 터보 블로워 등에 적용되고 있다.^{[2][4][5]} 한편, 위치정보만을 이용한 센서리스 제어방법에 대하여 전동기 상수 오차, 비선형성에 의한 인버터 전압오차와 제어기 시지연에 따른 위치 추정오차 발생에 대한 연구 결과가 발표되었다.^[4]

본 논문에서는 전동기 모델 기반방법으로 위치 및 역기전력 정보를 이용하는 적응 센서리스 제어방법^[5]의 속도 및 위치 추정기의 특성을 분석하여 역기전력 상수오차에 의한 위치오차 발생을 규명하고, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 확인하고자 한다.

2. 속도/위치 추정기의 특성

전류모델기반 센서리스 제어기의 추정 dq축 전류오차 및 위치오차는 각각 식 (1) 및 식 (2)와 같으며, 속도/위치 추정기의 입력으로 추정 dq축 전류오차를 이용한다.^[5]

$$\begin{bmatrix} \Delta i_d^{n+1} \\ \Delta i_q^{n+1} \end{bmatrix} = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} e^n \Delta \theta^n \\ -e^n + e_M^n \end{bmatrix} = \frac{T}{L} \begin{bmatrix} e^n (\theta^n - \hat{\theta}^n) \\ -e^n + e_M^n \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$\Delta \theta = \theta - \hat{\theta} \quad (2)$$

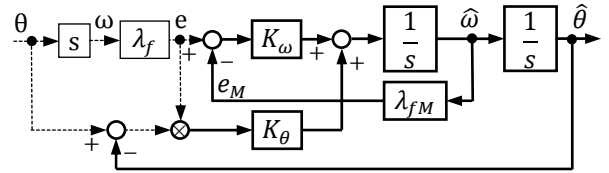


그림 1 적응 센서리스 제어기의 속도/위치 추정기

그림 1은 적응 센서리스 제어기의 속도/위치 추정기를 나타낸 것으로 점선 부분은 센서리스 제어기내에서 실제로 알 수 없는 부분을 나타낸 것이며, 식 (1)의 추정 dq축 전류오차를 통하여 간접적으로 구성하는 부분이다. 먼저 그림 1과 같이 역기전력 및 위치 오차를 사용하는 경우를 살펴보면 다음과 같다.

$$\omega = \theta s, \quad \hat{\theta} = \hat{\omega} \frac{1}{s}, \quad e = \omega \lambda_f, \quad e_M = \hat{\omega} \lambda_{fM} \quad (3)$$

$$\{(e - e_M)K_\omega + (\theta - \hat{\theta})eK_\theta\} \frac{1}{s} = \hat{\omega} \quad (4)$$

식 (4)에 식 (3)을 대입하여 추정 위치에 대한 전달함수를 구하면 식 (5)와 같으며, 추정 위치는 저주파 통과 필터의 특성을 가짐을 알 수 있다.

$$\hat{\theta} = \frac{s\lambda_f K_\omega + eK_\theta}{s^2 + s\lambda_{fM}K_\omega + eK_\theta} \theta \quad (5)$$

일정한 속도(ω_m)로 전동기가 회전하는 경우에 식 (6)을 이용하여 정상상태에서의 추정속도를 구하면 식 (7)과 같으며, 추정속도와 실제속도가 같음을 알 수 있다.

$$\theta(s) = \frac{1}{s} \omega(s) = \frac{1}{s} \frac{\omega_m}{s} \quad (6)$$

$$\lim_{t \rightarrow \infty} \hat{\omega}(t) = \lim_{s \rightarrow 0} s \hat{\omega}(s) = \lim_{s \rightarrow 0} s \{s \hat{\theta}(s)\} = \omega_m = \lim_{t \rightarrow \infty} \omega(t) \quad (7)$$

한편, 안정적인 운전을 하는 정상상태에서는 속도가 일정하고 속도오차도 없으므로 추정속도와 실제속도가 같으므로 식 (4)의 좌변이 영이 되어 위치오차는 식 (8)과 같이 된다.

$$\theta - \hat{\theta} = -(\lambda_f - \lambda_{fM})K_\omega / (\lambda_f K_\theta) \quad (8)$$

따라서 실제전동기와 제어기내의 모델전동기의 역기전력 상수관계에 따른 위치관계는 식 (9)와 같으며, 역기

전력 상수 오차가 없으면 위치오차도 발생하지 않는다.

$$\lambda_f > \lambda_{fM} \rightarrow \theta < \hat{\theta}, \quad \lambda_f < \lambda_{fM} \rightarrow \theta > \hat{\theta} \quad (9)$$

그림 2는 일정부하의 정상상태에서 위치 추정 오차에 따라서 추정 d축 전류가 실제 $\gamma\delta$ 축으로 배분되어 추정 q축 전류 크기에 미치는 영향을 나타낸 것으로 실험에서 관찰할 수 없는 위치오차 대신에 추정 q축 전류 크기를 관찰하는데 이용하고자 한다.

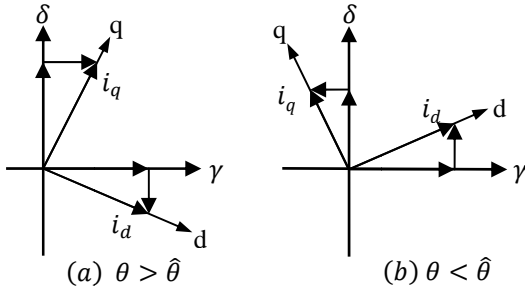


그림 2 위치오차에 따른 d축 전류의 배분 및 영향

3. 시뮬레이션 및 실험 결과

속도/위치 추정기의 해석 결과를 확인하기 위한 시뮬레이션 및 실험에 사용한 전동기의 사양은 표 1과 같으며, 인버터 스위칭주파수는 10kHz, 전류제어 및 추정기의 연산주기는 100μs이다.

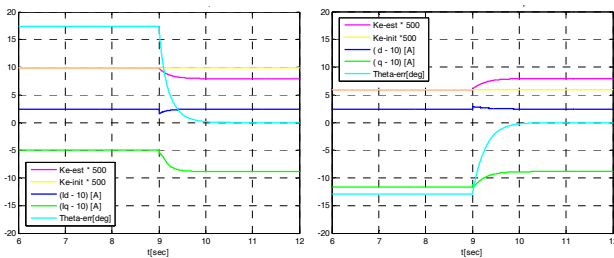
표 2는 전동기 상수오차에 따른 추정오차에 대한 시뮬레이션 결과로서 전류모델기반 센서리스 제어기는 그림 1의 추정기에 대하여 역기전력 상수 오차에 대하여 두드러진 위치오차를 발생하며, 식 (9)와 같은 오차를 나타내고 있다. 저항 및 인덕턴스 오차에 대해서는 위치오차가 상대적으로 작다. 한편, 속도 오차

표 1 7.5 kW PMSM 상수

상수	R	L	λ_f	P	정격속도
값	0.024 Ω	135 μH	0.01585Wb	2	30,000rpm

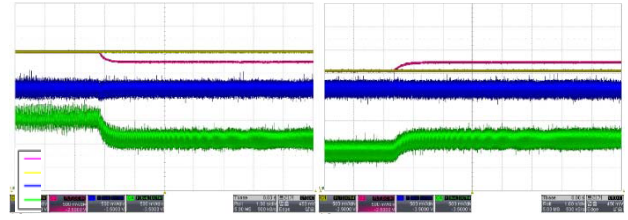
표 2 20,000RPM에서의 전동기 상수오차에 따른 추정오차

상수	R		L		λ_f	
	-20%	+20%	-20%	+20%	-20%	+20%
속도오차 [rpm]	0.002	0.045	0.035	0.039	0.009	0.034
위치오차 [°]	0.190	0.002	-1.194	1.474	-10.49	13.22



(A) 초기값 $\lambda_{f_init} = 1.25\lambda_f$ (B) 초기값 $\lambda_{f_init} = 0.75\lambda_f$

그림 3 적응 센서리스 제어기의 역기전력 상수 추정(시뮬레이션)



(A) 초기값 $\lambda_{f_init} = 1.25\lambda_f$

(B) 초기값 $\lambda_{f_init} = 0.75\lambda_f$

그림 4 적응 센서리스 제어기의 역기전력 상수 추정(실험)
(y 축: 5/div, x 축: 1sec/div)

는 정상상태에서 작아서 무시할 정도임을 알 수 있다. 그림 3은 20,000rpm 운전시의 적응 센서리스 제어기에 대한 시뮬레이션으로 9초에서 역기전력 상수 추정기가 동작 시작하여 역기전력 상수가 수렴함에 따라서 위치오차가 감소하며, 추정 q축의 전류가 그림 2에 나타낸 바와 같이 조정됨을 알 수 있다. 즉 초기에 모델의 역기전력상수가 그림 3 (A)와 같이 큰 경우에는 양의 위치오차가 발생하고, 그림 2에서 추정 d축의 전류에 의하여 음의 토크가 발생하므로 동일한 부하토크를 발생하기 위하여 더 큰 추정 q축 전류가 요구된다. 이 상태에서 역기전력 상수 추정이 진행되면 위치오차가 감소함에 따라서 음의 토크가 감소하면서 q축의 전류도 감소한다. 위치오차가 없는 경우에 d축 전류는 토크 발생에 영향을 미치지 않는다. 그림 4는 그림 3에 대응하는 실험결과로서 그림 3 (A)와 같이 그림 4 (A)에서 역기전력 상수 추정이 진행되면서 q축 전류 값이 감소함을 알 수 있으며, 또한 그림 3 (B)와 같이 그림 4 (B)에서도 역기전력 상수 추정이 진행되면서 q축 전류 값이 증가함을 알 수 있다.

4. 결론

본 논문에서는 PMSM 적응 센서리스 제어기의 속도/위치 추정기의 특성을 분석하고, 시뮬레이션 및 실험을 통하여 타당성을 검증하였다. 모델 전동기의 역기전력 상수 오차는 위치오차를 발생하며, 이로 인해 동일 부하에 대하여 전동기 전류가 증가하여 손실이 증대되어 온도가 상승한다. 이를 해결하기 위해 역기전력 상수 추정기를 사용하는 것이 필요함을 알 수 있다.

참고 문헌

- [1] N. Matsui, "Sensorless PM Brushless DC Motor Drives", IEEE Trans. on Industrial Electronics, vol. 43, no. 2, pp. 300-308, April, 1996.
- [2] A. Dianov, J.Y. Choi, K.W. Lee, and J.H. Lee, "Sensorless Vector Controlled Drive for Reciprocating Compressor", in Proc. IEEE PESC, pp. 580-586, 2007.
- [3] K.W. Lee and J.I. Ha, "Evaluation of Back-EMF Estimators for Sensorless Control of Permanent Magnet Synchronous Motors", Journal of Power Electronics, vol. 12, no. 4, pp. 604-614, July, 2012.
- [4] Y.S. Park, S.K. Sul, J.K. Ji and Y.J. Park, "Analysis of Estimation Errors in Rotor Position for a Sensorless Control System Using a PMSM", Journal of Power Electronics, vol. 12, no. 5, pp. 748-757, Sept., 2012.
- [5] J.W. Lee, "Adaptive sensorless control of high speed PMSM with back EMF constant variation", USB in ICPE 2015-ECCE Asia, WeC3-4, Jun, 2015.