

영구자석 동기전동기의 확장 역기전력 기반 센서리스 제어와 자속기반 센서리스 제어의 파라미터 오차의 영향 분석

박완서, 조관열*, 김학원
한국교통대학교 제어계측공학과

Analysis of influence of parameter error for extended EMF based sensorless control and flux based sensorless control of PM synchronous motor

Wan-Seo Park, Kwan-Yuhl Cho*, Hag-Wone Kim

Dept. of Control & Instrumentation Engineering, Korea National University of Transportation

요약 영구자석 동기전동기는 벡터제어를 통해 우수한 효율로 다양한 산업분야에 적용되고 있다. 영구자석 동기전동기의 벡터제어를 위한 회전자 위치정보는 회전자 위치센서 또는 회전자 위치 추정기를 이용하여 검출한다. 회전자 위치추정기를 이용한 센서리스 제어로 가장 많이 적용되고 있는 모델기반 센서리스 제어는 역기전력기반의 센서리스 제어와 영구자석의 자속기반 센서리스 제어로 구분할 수 있다. 역기전력 기반의 센서리스 제어는 역기전력이 속도에 비례하므로 저속에서 회전자 위치 추정성능이 떨어지는 단점이 있다. 자속기반 센서리스 제어의 경우 회전자 위치추정을 위한 영구자석의 자속의 크기는 속도에 관계없이 일정하기 때문에 넓은 속도 영역에서 회전자의 위치 추정성능이 우수하다. 하지만 모델기반 센서리스 제어는 영구자석 동기전동기의 수학적 모델을 이용하기 때문에 전동기 상수의 변화에 따라 회전자 위치 추정 성능이 영향을 받는다. 본 논문에서는 두 가지 모델기반 센서리스 제어 방법에 대해 고정자 저항 및 인덕턴스의 전동기 상수 오차가 -30% ~ 30%로 변동하였을 때 역기전력 추정 성능, 자속 추정 성능, 회전자의 위치추정 성능을 이론적으로 비교, 분석하고 모의해석 및 실험으로 검증하였다.

Abstract The PM synchronous motor drives with vector control have been applied to wide fields of industry applications due to its high efficiency. The rotor position information for vector control of a PM synchronous motor is detected from the rotor position sensors or rotor position estimators. The sensorless control based on the mathematical model of PM synchronous motor is generally used and it can be classified into back EMF -based sensorless control and magnet flux-based sensorless control. The rotor position estimating performance of the back EMF-based sensorless control is deteriorated at low speeds since the magnitude of back EMF is proportional to the motor speed. The magnitude of the magnet flux for estimating rotor position in the flux-based sensorless control is independent on the motor speed so that the estimating performance is excellent for wide speed ranges. However, the estimation performance of the model-based sensorless control may be influenced by the motor parameter variation since the rotor position estimator uses the mathematical model of the PM synchronous motor. In this paper, the rotor position estimation performance for the back EMF based- and flux-based sensorless controls is analyzed theoretically and is compared through the simulation and experiment when the motor parameters including stator resistance and inductance are varied.

Keywords : Sensorless Control, PMSM, Parameter Variation, Back EMF, Magnet Flux

본 연구는 2018년도 산업통상자원부의 재원으로 한국에너지기술연구원(KETEP)의 에너지인력양성사업으로 지원받아 수행한 인력양성 성과입니다. (No. 20184030202270)

*Corresponding Author : Kwan-Yuhl Cho(Korea National University of transportation.)

Tel: +82-43-841-5329 email: kycho@ut.ac.kr

Received December 28, 2018

Revised January 28, 2019

Accepted March 8, 2019

Published March 31, 2019

1. 서 론

벡터제어를 적용한 영구자석 동기전동기는 높은 효율과 우수한 제어성능으로 인해 다양한 산업분야에 적용되고 있다. 영구자석 동기전동기의 벡터제어를 위해서는 회전자의 위치정보가 필요하다. 기존에는 레졸버, 홀센서 및 엔코더 등의 회전자 위치검출 센서를 이용하여 회전자의 위치정보를 검출하였으나 위치센서 추가로 인한 비용상승, 취부오차 등의 단점을 보완하기 위하여 회전자 위치센서를 사용하지 않는 센서리스 제어가 많은 산업분야에서 적용되고 있다. 영구자석 동기전동기의 센서리스 제어로 가장 많이 적용되고 있는 전동기 모델기반의 센서리스 제어는 전동기의 수학적 모델을 이용하여 역기전력 또는 영구자석의 자속으로부터 회전자의 위치정보를 추정한다[1-3]. 그러나 전동기 모델 기반의 센서리스 제어는 전동기 모델의 파라미터가 변하면 역기전력 또는 영구자석의 자속추정에 오차가 발생함으로써 회전자 위치 추정에 문제가 될 수 있다[4].

본 논문에서는 속도가 증가함에 따라 부하가 증가하는 팬 타입의 표면부착형 영구자석동기전동기의 파라미터 변화에 대하여 확장 역기전력 기반 센서리스 제어와 자속 기반 센서리스 제어의 회전자 위치추정 특성을 비교, 분석하고 시뮬레이션을 통하여 검증한다.

2. 센서리스 제어의 파라미터 오차 영향

영구자석 동기전동기의 dq축 전압 방정식은 식 (1)과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{aligned} v_d &= R_s i_d + L_d \frac{di_d}{dt} - \omega_r L_q i_q \\ v_q &= R_s i_q + L_q \frac{di_q}{dt} + \omega_r L_d i_d + \omega_r \phi_f \end{aligned} \quad (1)$$

여기서 R_s 는 고정자 저항, L_{dq} 는 고정자 인덕턴스이고, ϕ_f 는 쇠교 자속이다. 역기전력은 회전자 위치정보를 갖는 영구자석의 자속에 의해 유도되어 발생하게 되고, 역기전력을 추정함으로써 위치정보를 추정하게 된다. 또한 자속기반 센서리스 제어에서는 영구자석의 자속을 추정함으로써 위치정보를 추정하게 된다.

2.1 확장역기전력 기반 센서리스 제어

영구자석 동기전동기의 확장 역기전력 기반의 센서리스 제어에서 역기전력 추정식은 식 (2)와 같다[4].

$$\begin{aligned} \hat{e}_{\gamma\delta m} &= \frac{\omega_{est}}{s + \omega_{est}} \frac{\hat{L}_d s + \hat{R}}{L_d s + R} e_{\gamma\delta} + \frac{\omega_{est}}{s + \omega_{est}} [v_{\gamma\delta}^* \pm \hat{\omega}_r \hat{L}_q i_{\delta}^* \\ &\quad - \frac{\hat{L}_d s + \hat{R}}{L_d s + R} (v_{\gamma\delta} \pm \omega_r L_q i_{\delta\gamma} \pm (\hat{\omega}_r - \omega_r) L_q i_{\delta\gamma}^*) \end{aligned} \quad (2)$$

$$\begin{aligned} \hat{R} &= R + \Delta R, \hat{L}_d = L_d + \Delta L_d, \hat{L}_q = L_q + \Delta L_q \\ v_{\gamma}^* &= v_{\gamma} + \Delta v_{\gamma}, v_{\delta}^* = v_{\delta} + \Delta v_{\delta} \end{aligned} \quad (3)$$

식 (3)의 파라미터 오차 성분을 추가하여 식 (2)를 다시 쓰면 식 (4)와 같이 된다. 여기서 전압에 의한 오차는 주로 deadtime 등에 의한 6차 고조파 성분이고 이 고조파 성분은 회전자 위치 추정에 포함된 저역통과필터(LPF)에 의해 필터링 되므로 전압오차의 영향은 무시할 수 있다.

$$\begin{aligned} \hat{e}_{\gamma\delta m} &= \frac{\omega_{est}}{s + \omega_{est}} \frac{\hat{L}_d s + \hat{R}}{L_d s + R} e_{\gamma\delta} \\ &\quad - \frac{\omega_{est}}{s + \omega_{est}} \frac{\Delta L_d s + \Delta R}{L_d s + R} (v_{\gamma\delta} \pm \omega_r L_q i_{\delta\gamma}^*) \\ &\quad + \frac{\omega_{est}}{s + \omega_{est}} (\Delta v_{\gamma\delta} \pm \omega_r \Delta L_q i_{\delta\gamma}^*) \end{aligned} \quad (4)$$

식 (2)와 식 (4)로부터 추정 역기전력의 오차는 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} \Delta e_{\gamma\delta m} &= \frac{\omega_{est}}{s + \omega_{est}} \frac{\Delta L_d s + \Delta R}{L_d s + R} \\ &\quad (e_{\gamma\delta} - v_{\gamma\delta} \mp \omega_r L_q i_{\delta\gamma}^*) + \frac{\omega_{est}}{s + \omega_{est}} \omega_r \Delta L_q i_{\delta}^* \end{aligned} \quad (5)$$

영구자석 표면부착형 동기전동기는 d축 및 q축 인덕턴스가 같으므로 d축 전류는 영(Zero)으로 제어하고, q축 전류로 토크를 제어한다. 식 (5)에서 γ 축 역기전력을 추정할 때에는 δ 축 전류가 포함된 항이 주로 오차에 관여하고, δ 축 역기전력을 추정할 때에는 γ 축 전류는 영(Zero)에 가깝기 때문에 역기전력과 전압의 차이가 주로 관여하게 된다. 또한 속도가 증가함에 따라 부하가 증가하는 팬 부하 시스템에서는 속도가 증가함에 따라 전압은 속도에 비례하여 증가하고, 전류는 속도의 제곱에 비례하여 증가하므로 역기전력의 추정오차도 증가하게 된다. Fig. 1은 식 (4)에서 고정자 저항 R 값의 오차가 없을 때와 $-30\% \sim +30\%$ 오차가 발생했을 경우에 대한 보드

선도(Bode plot)을 나타낸다. 보드선도로부터 고정자 저항 오차에 대해서 추정 역기전력의 오차는 저속에서 영향이 더 크게 나타나고, 고정자 저항의 오차가 증가할수록 추정 역기전력의 오차도 커지는 것을 알 수 있다.

Fig. 2는 식 (4)에서 고정자 인덕턴스 L 값의 오차가 없을 때와 $-30\% \sim +30\%$ 오차가 발생했을 경우에 대한 보드선도를 나타낸다. 보드선도로부터 인덕턴스 오차에 대해서 추정 역기전력의 오차는 저속에서 영향이 거의 나타나지 않고, 고속에서 영향이 더 크게 나타나는 것을 알 수 있다. 또한 인덕턴스의 오차가 커질수록 추정 역기전력의 오차도 증가하는 것을 알 수 있다[4].

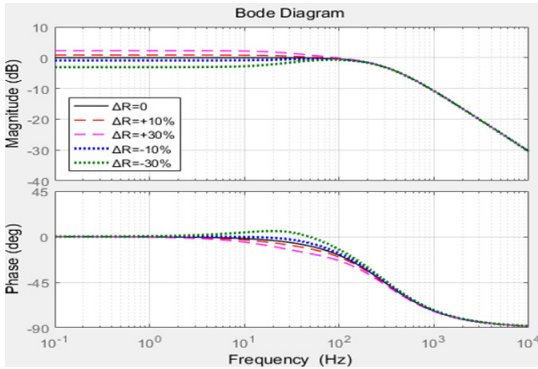


Fig. 1. Estimated δ axis back-EMF for R variation

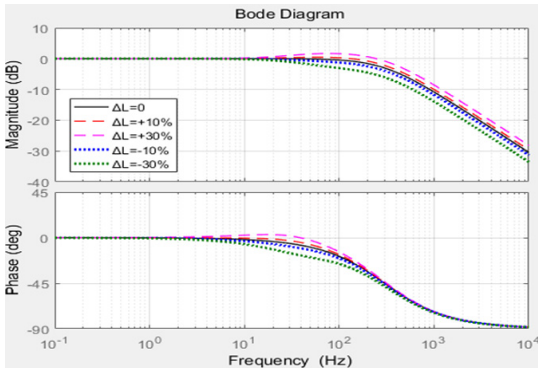


Fig. 2. Estimated δ axis back-EMF for L variation

2.2 자속기반 센서리스 제어

자속기반 센서리스 제어에서 영구자석의 자속 추정식은 전압방정식으로부터 식 (6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\lambda}_{m\alpha\beta} = \int (v_{\alpha\beta}^* - \hat{R}i_{\alpha\beta}) dt - \hat{L}_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} \quad (6)$$

여기서 식 (3)과 같은 파라미터 오차의 영향을 고려하면 식 (6)은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\hat{\lambda}_{m\alpha\beta} = \int (v_{\alpha\beta} + \Delta v_{\alpha\beta} - (R + \Delta R)i_{\alpha\beta}) dt - (L_{\alpha\beta} + \Delta L_{\alpha\beta})i_{\alpha\beta} \quad (7)$$

여기서 전압에 의한 오차는 앞에서 언급한 바와 같이 **deadtime** 등에 의한 6차 고조파이다. Fig. 3의 영구자석의 자속 추정기에서 추정자속의 DC 옵셋을 제거하기 위해 고역통과필터(HPF)를 사용하면 식 (7)의 적분항은 저역통과필터(LPF)의 형태가 되어 전압의 오차는 무시할 수 있다[5]. 따라서 식 (7)은 식 (8)과 같이 나타낼 수 있다.

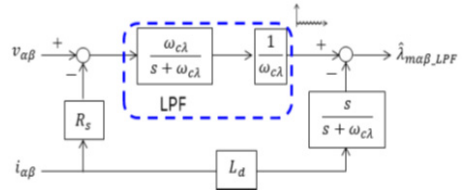


Fig. 3. Magnet flux estimator with HPF

$$\hat{\lambda}_{m\alpha\beta} = \hat{\lambda}_{m\alpha\beta} - \Delta R \int i_{\alpha\beta} dt - \Delta L_{\alpha\beta} i_{\alpha\beta} \quad (8)$$

식 (8)에 식 (9)의 고정자 전류를 대입하여 풀면 영구자석의 추정자속의 오차는 식 (10)과 같이 나타낼 수 있다.

$$i_{\alpha} = -I_m \sin \theta_r, \quad i_{\beta} = I_m \cos \theta_r \quad (9)$$

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{m\alpha} &= -\Delta R \int i_{\alpha} dt - \Delta L_{\alpha} i_{\alpha} \\ &= \sqrt{\left(\frac{I_m}{\omega_r} \Delta R\right)^2 + (\Delta L_{\alpha} I_m)^2} \\ &\quad \cos\left(\theta_r - \tan^{-1} \frac{\Delta L_{\alpha} \omega_r}{\Delta R}\right) \end{aligned} \quad (10)$$

$$\begin{aligned} \Delta \lambda_{m\beta} &= -\Delta R \int i_{\beta} dt - \Delta L_{\beta} i_{\beta} \\ &= \sqrt{\left(-\frac{I_m}{\omega_r} \Delta R\right)^2 + (-\Delta L_{\beta} I_m)^2} \\ &\quad \sin\left(\theta_r + \tan^{-1} \frac{\Delta L_{\beta} \omega_r}{\Delta R}\right) \end{aligned}$$

식 (10)의 영구자석 추정자속의 오차식으로부터 고정자 저항 R 변화에 따른 추정자속의 영향은 속도에 반비례하고 전류의 크기에 비례한다. 속도가 증가함에 따라 부하가 증가하는 팬 부하에서 전류의 크기는 속도에 제곱에 비례하므로 R_s 오차의 영향은 속도가 증가할수록 선형적으로 증가하게 된다. 고정자 인덕턴스 L 의 변화에 따른 추정자속의 오차는 전류의 크기에 비례하므로 속도가 증가할수록 증가하게 된다.

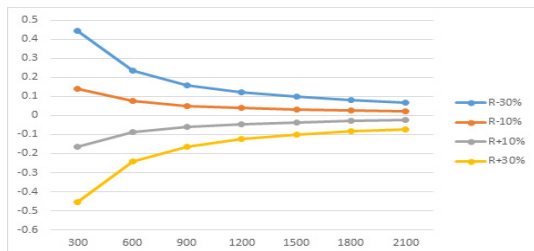
3. 시뮬레이션

시뮬레이션에 사용한 모터의 파라미터는 Table 1에 나타난 바와 같이 속도가 증가할수록 부하가 증가하는 팬 모터용 SPM 타입의 PMSM을 사용하였다.

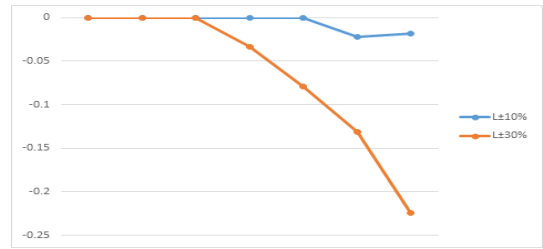
Table 1. Motor parameters

	R_s	L_s	Φ_f	Pole
Value	10m Ω	44uH	0.006wb	8

Fig. 4(a)는 고정자 저항 R_s 오차가 -50% ~ +50%로 변동 시 추정 역기전력의 오차를 나타낸다. 식 (5)로부터 속도가 증가할수록 추정 역기전력의 오차가 커지고, R_s 오차가 증가할수록 추정 역기전력의 오차가 커지는 것을 알 수 있다. Fig. 4(b)는 고정자 인덕턴스 L_s 오차가 -50% ~ +50%로 변동 시 추정 역기전력의 오차를 나타낸다. 식 (5)로부터 고속에서 L_s 오차에 대해서는 이득이 감소하여 오차가 증가한다는 것을 알 수 있으며 따라서 L_s 오차의 영향이 고속으로 갈수록 증가하는 것을 알 수 있다.

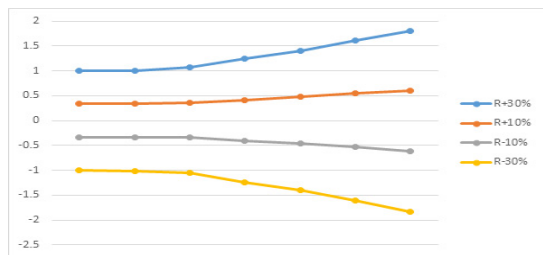


(a) R_s variation

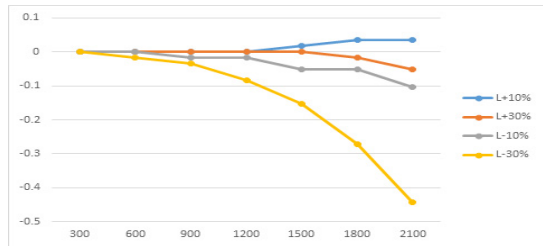


(b) L_s variation

Fig. 4. Error of Estimated back EMF according to parameter variation



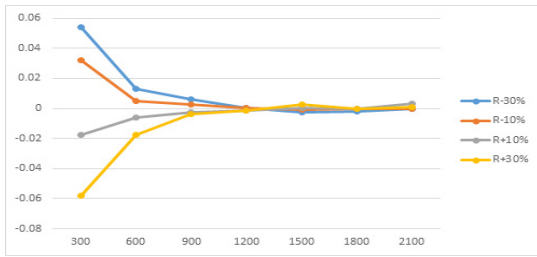
(a) R_s variation



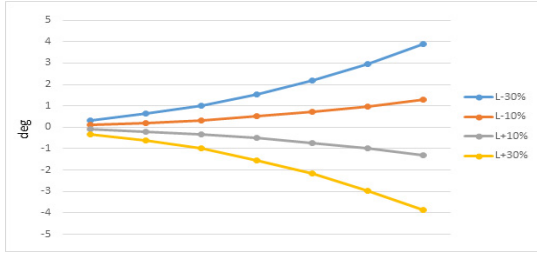
(b) L_s variation

Fig. 5. Error of Estimated magnet flux according to parameter variation

Fig. 5(a)는 고정자 저항 R_s 오차가 -50% ~ +50%로 변동할 때 추정자속의 오차로 식(10)의 결과로부터 속도가 증가하면 전류의 크기는 속도의 제곱에 비례하여 증가하게 되므로 추정자속의 오차가 직선 형태로 증가하는 모습을 볼 수 있다. Fig. 5(b)는 고정자 인덕턴스 L_s 의 오차가 -50% ~ +50%로 변동할 때 추정자속의 오차를 나타낸다. 식 (10)으로부터 L_s 오차항과 같이 전류의 크기에 비례하게 되는데 전류의 크기는 속도에 제곱에 비례하므로 자속의 오차가 2차 곡선 형태로 증가하는 모습을 확인할 수 있다. 추정자속의 오차비율을 보게 되면 역기전력 추정방식보다 고정자 저항 및 인덕턴스 변화에 의한 영향이 큰 것을 알 수 있다.

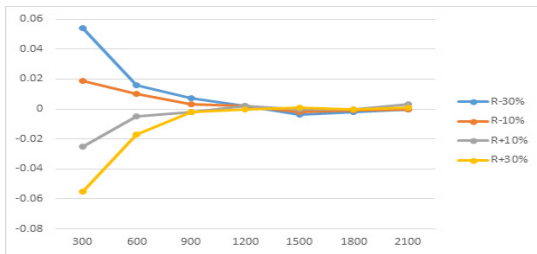


(a) R_s variation

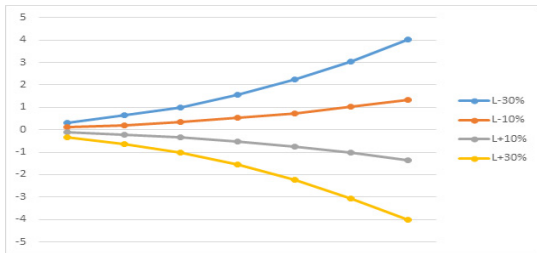


(b) L_s variation

Fig. 6. Error of estimated rotor position for back EMF estimator according to parameter variation



(a) R_s variation



(b) L_s variation

Fig. 7. Error of estimated rotor position for magnet flux estimator according to parameter variation

Fig. 6과 Fig. 7은 파라미터 변동에 따른 역기전력 추정방식과 자속 추정방식의 회전자 위치 추정오차를 나타낸다. Fig. 6(a)와 Fig. 7(a)로부터 고정자 저항오차가 추

정위치에 미치는 영향은 저속에서 크게 나타나고 고속에서 영향이 적게 나타나는 것을 알 수 있다. Fig. 6(b)와 Fig. 7(b)에 나타난 바와 같이 L_s 오차에 대해서는 L_s 오차가 증가하거나, 속도가 증가함에 따라 회전자 추정위치의 오차가 커지는 것을 알 수 있다.

4. 실험 및 고찰

실험 구성은 Fig. 8(a)와 같이 표면부착형 영구자석 동기전동기를 사용하는 자동차 라디에이터 팬을 사용하였고, 엔코더를 부착하여 회전자의 실제 위치를 검출하였다. 전동기 파라미터는 Table 1의 시뮬레이션에 사용한 파라미터 값과 같다. 제어보드는 Fig. 8(b)와 같고, 2개의 셉트 저항을 사용하여 전류를 검출하였다. 인버터의 스위칭 주파수는 20kHz, deadtime은 0.25 μ sec이다.

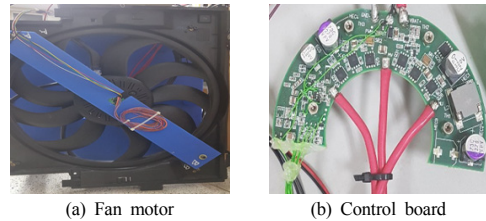


Fig. 8. Experiment set

Fig. 9는 300rpm의 저속 운전시 고정자 저항이 -30% ~ 30%로 변동할 때와 인덕턴스가 -30% ~ 30%로 변동할 때 역기전력 추정기의 파형을 나타낸다. 실험 결과를 보면 300rpm에서 q축 역기전력 값은 약0.74[V]이고, R+10% 오차가 발생했을 때 추정된 q축 역기전력 실험 결과 값은 약0.69[V]이다. R+30% 오차가 발생했을 때 실험값 약0.73[V], R-10% 오차가 발생했을 때 실험값 약0.74[V], R-30% 오차가 발생했을 때 실험값 약0.77[V], L+10% 오차가 발생했을 때 실험값 약0.75[V]이다. L+30% 오차가 발생했을 때 실험값 약0.74[V], L-10% 오차가 발생했을 때 실험값 약0.74[V]로 2절에서 해석한 바와 같이 저속에서 R오차에 의한 영향이 크게 나타나고, L오차는 영향이 적게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

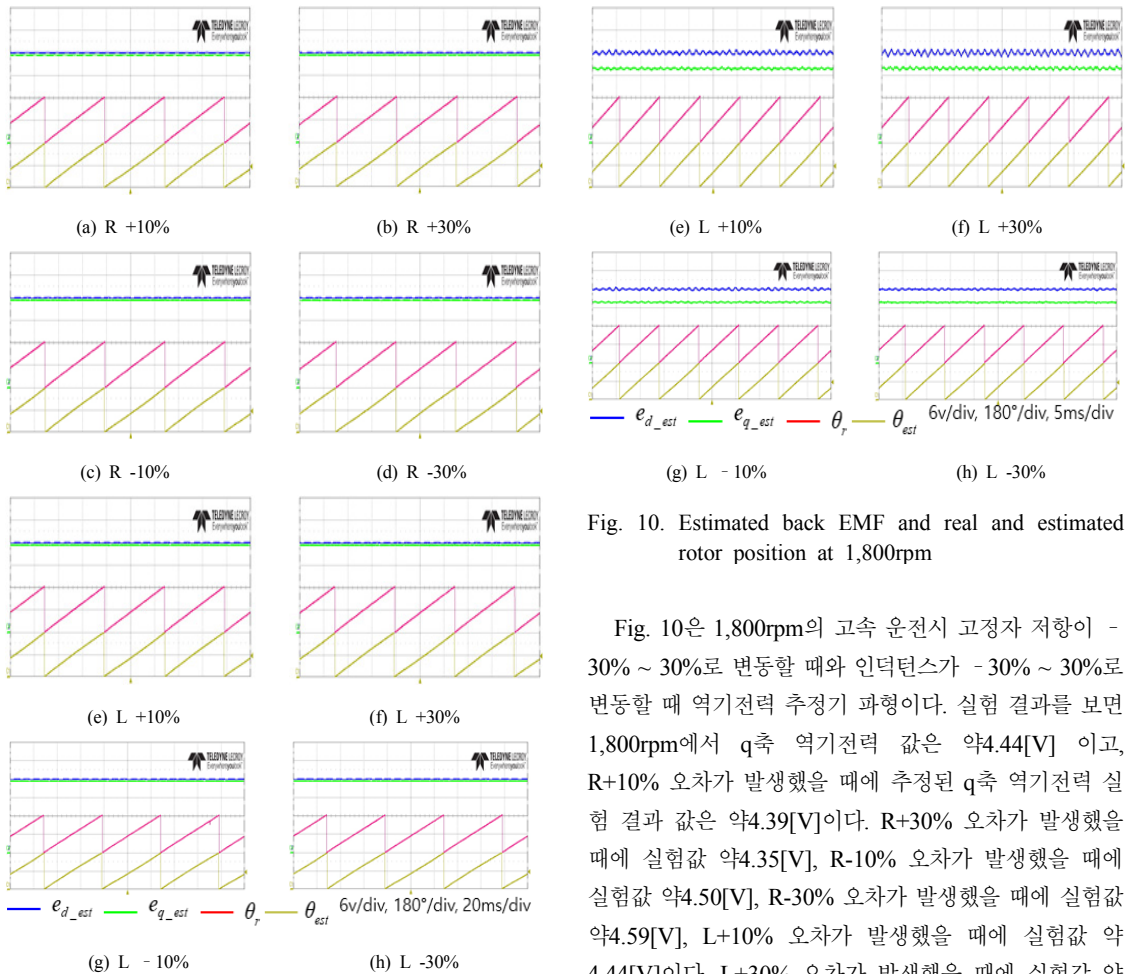


Fig. 9. Estimated back EMF and real and estimated rotor position at 300rpm

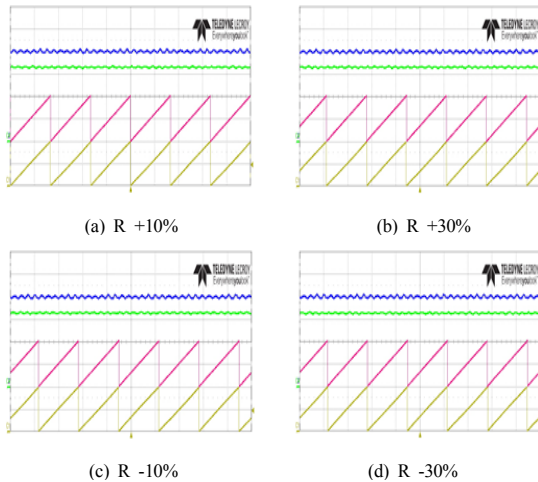
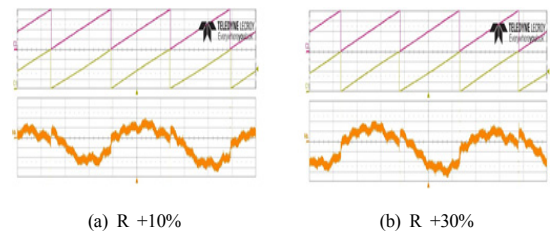


Fig. 10. Estimated back EMF and real and estimated rotor position at 1,800rpm

Fig. 10은 1,800rpm의 고속 운전시 고정자 저항이 -30% ~ 30%로 변동할 때와 인덕턴스가 -30% ~ 30%로 변동할 때 역기전력 추정기 파형이다. 실험 결과를 보면 1,800rpm에서 q축 역기전력 값은 약4.44[V] 이고, R+10% 오차가 발생했을 때 추정된 q축 역기전력 실험 결과 값은 약4.39[V]이다. R+30% 오차가 발생했을 때 실험값 약4.35[V], R-10% 오차가 발생했을 때 실험값 약4.50[V], R-30% 오차가 발생했을 때 실험값 약4.59[V], L+10% 오차가 발생했을 때 실험값 약 4.44[V]이다. L+30% 오차가 발생했을 때 실험값 약 4.39[V], L-10% 오차가 발생했을 때 실험값 약 4.48[V], L-30% 오차가 발생했을 때 실험값 약 4.48[V]로 2절에서 해석한 바와 같이 고속에서 R오차에 의한 영향이 작게 나타나고, L오차는 영향이 크게 나타나는 것을 확인할 수 있다.

Fig. 11과 Fig. 12는 저속과 고속에서의 파라미터 값 변동에 대한 회전자 위치 추정 오차를 나타낸다.



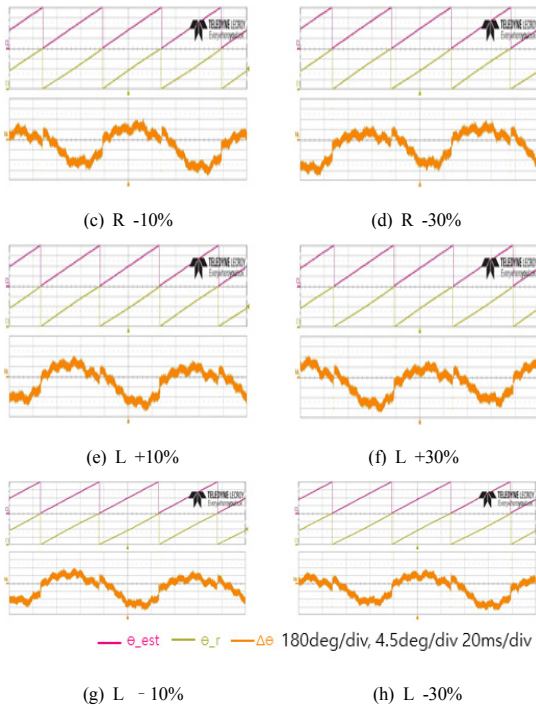


Fig. 11. Estimated rotor position error at 300rpm

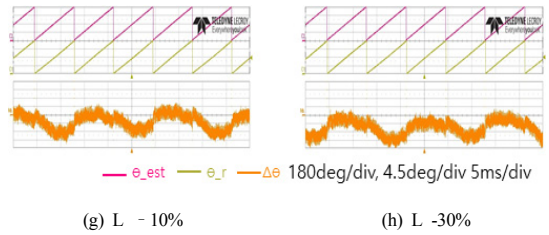


Fig. 12. Estimated rotor position error at 1,800rpm

Fig. 13은 저항값 변동에 따른 회전자 추정위치의 오차 값으로 2절에서 해석한 바와 같이 300rpm 에서의 R 오차 발생시 위치오차는 평균적으로 약 0.8° 정도 영향이 나타나고 1,800rpm에서는 약 0.2° 정도로 고속으로 갈수록 영향이 적어지는 것을 알 수 있다. 오차값의 크기가 작은 이유는 타겟 모터의 저항값이 0.01옴으로 매우 작은 값이기 때문에 오차의 크기 또한 작게 나타난 것으로 저항이 큰 시스템일 경우 오차 역시 커질 것이다.

Fig. 14는 인덕턴스 값 변동에 따른 회전자 추정위치 오차 값으로 2장에서 해석한 바와 같이 300rpm에서 L 오차 발생시 위치오차는 평균적으로 약 0.2° 정도이나, 1,800rpm에서의 위치오차는 약 0.7° 정도로 저속에서의 영향이 적게 나타나고, 고속에서의 영향이 커지는 것을 알 수 있다.

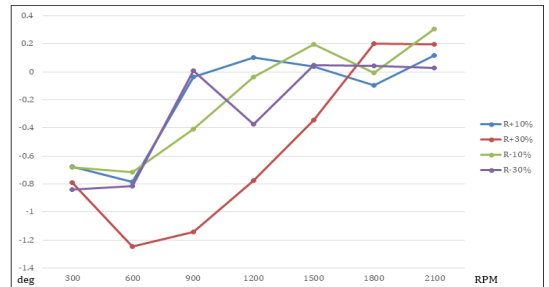
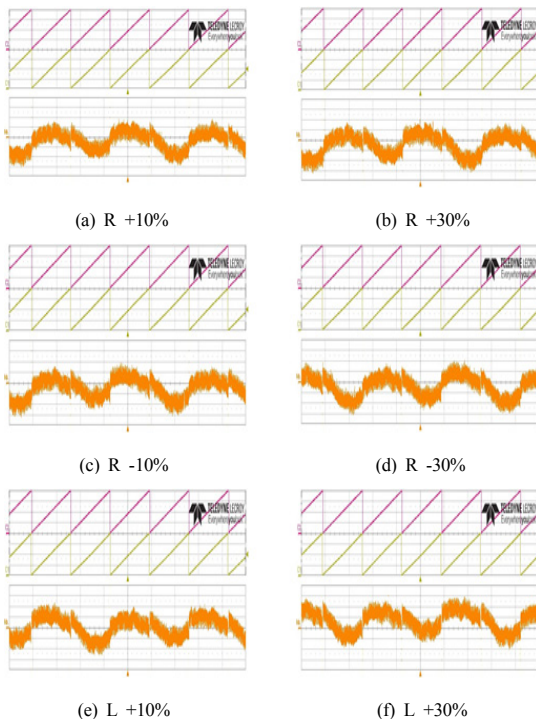


Fig. 13. Position error when resistance error occurs

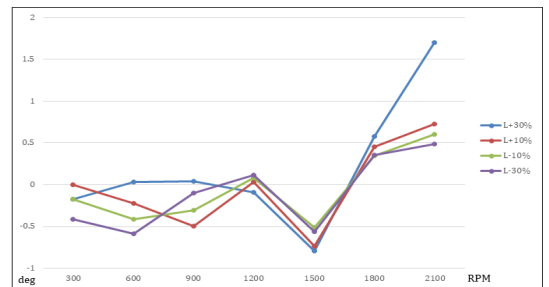


Fig. 14. Position error when inductance error occurs

5. 결론

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 동기전동기의 모델 기반 센서리스 제어 중 확장 역기전력 기반 센서리스 제어와 자속 기반 센서리스 제어에 대하여 전동기의 파라미터 변화 시 회전자 위치검출 특성을 비교분석하였다. 모델 기반 센서리스 제어는 전동기의 모델을 사용하여 위치를 추정하기 때문에 전동기의 파라미터가 변동되면 위치 추정의 문제를 초래할 수 있다. 따라서 파라미터 변동에 대한 분석을 한 결과 저항 오차에 대해서는 저속에서 약 0.8° 정도로 영향이 크고, 고속에서는 약 0.2° 정도로 영향이 적은 것을 알 수 있었고, 인덕턴스에 대해서는 저속에서 약 0.2° 정도로 영향이 작고, 고속으로 갈수록 약 0.7° 정도로 영향이 커지는 것을 시뮬레이션과 실험을 통해 확인하였다.

또한 본 논문에서 사용된 전동기의 저항값이 매우 작기 때문에 저항오차에 대한 위치오차가 작게 나타났지만, 저항값이 큰 시스템에서는 저항오차에 대한 영향이 더 크게 나타날 것이라고 예상할 수 있다. 또한 파라미터 오차에 대한 영향은 두 가지 센서리스 제어 방법이 비슷하게 나오는 것을 알 수 있다. 따라서 센서리스 제어 알고리즘을 선택하기에 앞서 파라미터 변동에 대한 강인함은 두 알고리즘이 비슷하므로 구동속도나 구동환경 등 다른 요인을 비교할 필요가 있다. 본 논문에서는 부하가 증가하는 시스템의 경우만 비교 하였으므로 향후 부하가 일정한 시스템, 저항값이 큰 시스템 등의 다양한 시스템에 대해서 비교 분석 할 필요가 있다.

References

- [1] S. Morimoto, K. Kawamoto, M. Sanada, and Y. Takeda, "Sensorless control strategy for salient pole PMSM based on extended EMF in rotating reference frame," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 38, No. 4, 1054-1061, Aug. 2002.
DOI: <https://doi.org/10.1109/tia.2002.800777>
- [2] I. Boldea, M. C. Paicu and G. Andreescu, "Active flux concept for motion-sensorless unified AC drives," IEEE Transactions on Power Electronics, vol. 23, no. 5, pp. 2612-2618, Sept. 2008.
DOI: <https://doi.org/10.1109/tpe.2008.2002394>
- [3] H. S. Lee, K. Y. Cho and H. W. Kim, "Sensorless control algorithm of a surface mounted PM synchronous motor under naturally rotating by load," Transactions of Korean Institute of Power Electronics(KIPE), Vol. 23, No. 1, pp. 16-23, Feb. 2018.
- [4] K. W. Lee and J. I. Ha, "Evaluation of back-EMF

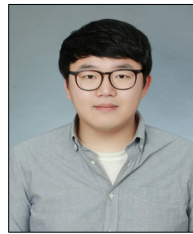
estimators for sensorless control of permanent magnet synchronous motors," Journal of Power Electronics, Vol. 12, pp. 604-614, July 2012.

DOI: <https://doi.org/10.6113/jpe.2012.12.4.604>

- [5] H. J. Kim, K. Y. Cho, H. W. Kim and K. W. Lee, "Eliminating method of estimated magnetic flux offset in flux based sensorless control algorithm of surface mounted PM synchronous motor," Transactions of Korean Institute of Power Electronics(KIPE), Vol. 23, No. 1, pp. 16-23, Jun. 2017.

박 완 서(Wan-Seo Park)

[준회원]



- 2017년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 일반대학원 제어계측공학과 (석사과정)

<관심분야>

모터 제어, 센서리스 제어

조 관 열(Kwan-Yuhl Cho)

[정회원]



- 1988년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
- 1993년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
- 1993년 3월 ~ 2004년 2월 : LG전자 DA연구소 책임연구원
- 2004년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

모터 제어, 센서리스 제어

김 학 원(Hag-Wone Kim)

[정회원]



- 1991년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학석사)
- 2005년 2월 : 한국과학기술원 전기 및 전자공학과 (공학박사)
- 1991년 3월 ~ 2008년 2월 : LG전자 DA연구소 책임연구원
- 2008년 3월 ~ 현재 : 한국교통대학교 전자공학과 교수

<관심분야>

전력변환, DC-DC컨버터