

# 전동기 친화형 출력필터를 이용한 영구자석 동기전동기의 센서리스 구동 성능 향상

부한영<sup>1</sup>, 백승훈<sup>1</sup>, 한상훈<sup>1</sup>, 조영훈<sup>†</sup>

## Performance Improvement of Sensorless PMSM Drives using Motor Friendly Output Filter

Han-Young Bu<sup>1</sup>, Seung-Hoon Baek<sup>1</sup>, Sang-Hoon Han<sup>1</sup>, and Young-Hoon Cho<sup>†</sup>

### Abstract

A back-electromotive force (back-EMF) estimator for a permanent magnet synchronous motor (PMSM) uses the three-phase voltage references of a current controller to estimate rotor position. However, owing to voltage drops caused by the nonlinear characteristics of switches and passive components, the actual voltage in the motor and the three-phase voltage reference may not match. This study proposes a sensorless control method using a sine-wave output filter applied between the motor drive system and PMSM. The precise voltage in the motor can be measured with the sine-wave output filter and applied to the input of the estimator. Moreover, given that the voltage in the motor can be measured precisely at extremely low speeds, the stable operation range of the back-EMF estimator can be secured. Experimental results show that the proposed sensorless control method has stable operation at extremely low speeds compared with conventional sensorless control.

**Key words:** Back-EMF-based estimator, Permanent magnet synchronous motor, Sine-wave output filter

### 1. 서 론

영구자석 동기전동기(Permanent Magnet Synchronous motor, PMSM)의 속도 및 토크를 제어하기 위해서 회전자 위치 정보를 필요로 하는데, 이는 레졸버, 홀센서, 엔코더 등의 위치 센서를 통하여 구현할 수 있다. 그러나 이러한 위치센서는 가격, 수명, 또는 전동기가 설치되는 위치의 공간 및 환경적인 제약에 따라 사용하기 어려운 경우가 많다. 따라서 이와 같이 위치센서가 설치되기 어려운 조건에서도 전동기를 구동하기 위하여 센서리스 구동 기법이 연구되어 왔다<sup>[1]-[5]</sup>.

영구자석 동기전동기의 센서리스 제어 기법 중 전동기 모델을 이용하는 방법은 전동기의 수학적 모델을 이

용하므로 전동기 제정수 외에도 영구자석 동기전동기의 3상 전압 및 전류 정보를 필요로 한다. 일반적으로 3상 전류는 전류센서를 이용하여 쉽게 측정할 수 있는데 반하여 3상 전압은 PWM(Pulse-width Modulation) 형태로 인가되기 때문에 센서를 이용하여 측정하기가 어렵다. 따라서 대부분 3상 전압은 전류 제어기 출력인 3상 지령전압을 이용하여 추정기 입력으로 사용한다. 그러나 실제 전력변환기의 출력전압은 전력용 반도체의 전압 강하, 케이블의 임피던스, 그리고 전력변환기에 요구되는 데드타임으로 인하여 추정기의 입력으로 사용되는 지령전압과 다른 값을 갖고 이로 인한 추정각 오차가 발생된다. 이를 보상하기 위해 전압측정회로를 사용하여 실제 전동기에서의 전압을 측정하고 이를 추정기에 적용하는 방법이 제시되었다.<sup>[4,5]</sup> 논문 [4]에서는 전압측정회로와 데드타임 보상을 통해 전력변환기의 PWM 전압을 직접 측정하는 방법이 제시되었고 실험을 통해 저속에서도 안정적으로 자속 기반 추정기가 동작함을 검증하였다. 논문 [5]에서는 과변조 영역에서 지령전압이 실제 출력전압보다 커지는 현상을 해결하기 위해 비교기를 사용하여 극전압과 직류링크 전압을 측정 및 비교하고

Paper number: TKPE-2020-25-4-11

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: yhcho98@konkuk.ac.kr, Dept. of Electrical and Electronics Eng., Konkuk University  
Tel: +82-2-450-0519 Fax: +82-2-457-8895

<sup>1</sup> Dept. of Electronic Electronics Eng., Konkuk University  
Manuscript received Feb. 24, 2020; revised Mar. 9, 2020;  
accepted Mar. 31, 2020

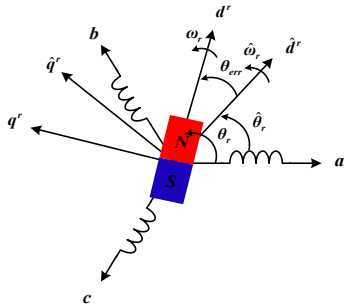


Fig. 1. Definitions of reference frames.

실제로 전동기에 인가되는 평균전압을 추정기의 입력으로 사용하여 센서리스 구동 성능을 개선하였다.

한편, 최근 활발히 연구되고 있는 WBG(Wide Bandgap) 소자를 이용한 전동기 구동 시스템의 경우 스위칭 주파수와 효율을 향상시킬 수 있는 장점이 있지만, 스위칭 소자의 높은 dv/dt 특성으로 인한 전동기 내 부유 커패시턴스를 통한 누설전류의 증가, 전동기 권선의 열화 및 절연 성능 저하, 그리고 전압 반사에 의한 전자파 방해 현상의 악화등과 같은 단점이 존재한다. 따라서 이를 해결하기 위한 대책으로 dv/dt 필터, 정현파 필터 등과 같은 전동기 친화형 출력필터에 대한 연구가 진행되고 있다. 이 중 정현파 필터는 공진 주파수를 기본 주파수와 스위칭 주파수 사이에 위치하도록 선정하여, 순수한 정현파 전압을 전동기에 인가하여 상기 언급한 문제를 해결하는데 매우 적합하다.

본 논문에서는 이와 같이 WBG 소자 기반 전동기 구동시스템에서 이미 사용되는 정현파 출력 필터의 출력 전압을 직접 측정하고 이를 추정기의 입력으로 사용하여 회전자 위치 및 속도 추정성능을 향상시킨 센서리스 구동 알고리즘을 제안한다. 제안하는 방법은 정현파 출력필터를 적용한 3상 매트릭스 컨버터로 구동되는 영구자석 동기전동기에 적용하여 기존방법으로는 불가능했던 정격 속도의 3%에서도 센서리스 구동이 가능함을 확인하였다.

## 2. 역기전력 기반 센서리스 구동 알고리즘

본 논문에서는 전동기의 회전자 위치를 얻는 방법으로, 전동기의 수학적 모델을 이용하는 확장 역기전력 모델을 사용한다. 그림 1은 영구자석 동기전동기에서의 실제 회전자 dq축 및 추정된 회전자 dq축을 보여준다.  $\omega_r$ ,  $\theta_r$ 은 실제 회전자 각속도 및 회전자 위치를,  $\hat{\omega}_r$ ,  $\hat{\theta}_r$ 는 추정된 회전자 각속도 및 회전자 위치를 나타낸다. 영구자석 동기전동기의 실제 회전자 dq축 전압방정식은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^r \\ v_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{dL_d}{dt} & -\omega_r L_q \\ \omega_r L_d & R_s + \frac{dL_q}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^r \\ i_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_{ds} \\ e_{qs} \end{bmatrix} \quad (1)$$

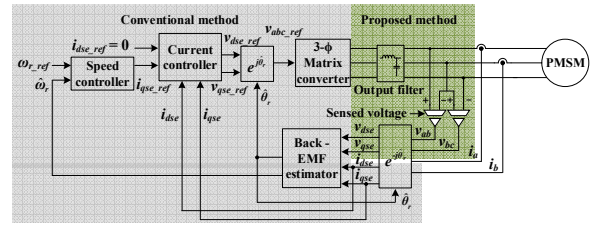


Fig. 2. Proposed sensorless drive scheme.

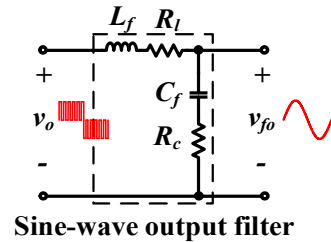


Fig. 3. Equivalent circuit of the sine-wave output filter.

추정된 회전자 dq축은 실제 회전자 dq축과  $\theta_{err}$ 만큼 각 오차가 있는 임의의 축으로, 추정된 회전자 dq축의 전압 방정식은 식 (1)과 유사하게 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (3)은 추정된 회전자 dq축의 역기전력을 나타내며,  $\lambda_f$ 는 영구자석의 자속이다.

실제 회전자 위치와 추정된 회전자 위치의 오차는 식 (4)와 같이 추정된 회전자 dq축 역기전력  $\hat{e}_{ds}$ ,  $\hat{e}_{qs}$ 을 이용하여 구할 수 있다.

$$\begin{bmatrix} \hat{v}_{ds}^r \\ \hat{v}_{qs}^r \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + \frac{dL_d}{dt} & -\hat{\omega}_r L_q \\ \hat{\omega}_r L_d & R_s + \frac{dL_q}{dt} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \hat{i}_{ds}^r \\ \hat{i}_{qs}^r \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \hat{e}_{ds} \\ \hat{e}_{qs} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} \hat{e}_{ds} \\ \hat{e}_{qs} \end{bmatrix} = \hat{\omega}_r \lambda_f \begin{bmatrix} -\sin\theta_{err} \\ \cos\theta_{err} \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\theta_{err} = \arctan\left(-\frac{\hat{e}_{ds}}{\hat{e}_{qs}}\right) \quad (4)$$

## 3. 제안하는 센서리스 구동 방법

그림 2는 제안하는 센서리스 구동 방법을 나타낸다. 기존 역기전력 기반 센서리스 구동 방법에서 추정기의 입력으로 전류제어기의 출력인 지령전압을 사용하는 것과 달리 제안하는 센서리스 구동 방법에서는 정현파 출력필터를 사용하여 전동기에 인가되는 실제 정현파 전압을 역기전력 추정기의 입력으로 사용한다.

이와 같은 방법은 역기전력 추정기의 성능을 보장할 수 없는 극저속 구간에서도 전동기에 인가되는 정확한 전압값을 추정기의 입력으로 사용하므로, 기존의 지령전압을 사용하는 방법에 비해 정확한 회전자 위치추정이 가능하다. 전압 측정을 위해 정현파 출력필터 뒷단에 2개

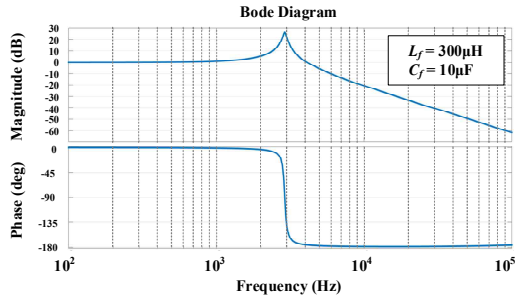


Fig. 4. Bode plot of the sine-wave output filter.

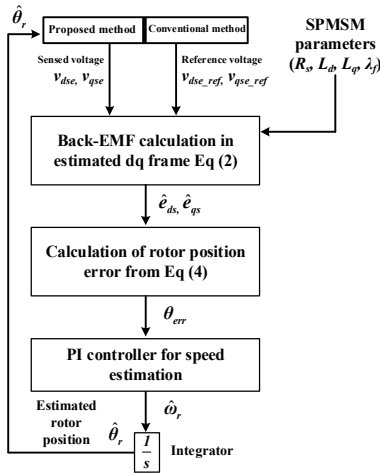


Fig. 5. Flow chart for position and speed estimation.

의 차동전압 센서를 이용하여 선간전압을 측정하고 상 전압을 복원하여 이를 추정기의 입력으로 사용한다.

그림 3은 정현파 출력필터의 등가회로를 나타내며, 정현파 출력필터는 전동기 구동 시스템의 출력 구형파 전압을 정현파 출력전압으로 변환할 수 있다. 그림 4는 정현파 출력필터의 주파수 응답 그래프를 나타내며, 스위칭 주파수에서의 충분한 크기 저감효과를 얻기 위해 공진주파수를 스위칭 주파수의 약 14%에 위치하도록 선정하였다. 그림 4에 의하면, 공진주파수 이하 주파수 대역에서는 전압의 크기 및 위상 변화가 없다. 따라서 해당 대역의 영구자석 동기전동기 동작 주파수 범위에서는 지령전압과 동일한 기본파 전압을 얻을 수 있다. 따라서, 지령 전압이 전동기에 인가되는 전압과 같다는 가정이 유효하다.

그림 5는 역기전력 기반 센서리스 제어의 위치 및 속도 추정 알고리즘 블록도를 나타내고 있다. 역기전력 추정기 입력에 사용되는 전압에 따라 기존 방법과 제안한 방법으로 나눠 센서리스 제어를 수행할 수 있다.

#### 4. 실험 결과

제안하는 센서리스 구동 방법을 검증하기 위해 그림 6의 시스템을 구성하고 출력필터를 제작하였다. 표 1은 실험에서 사용한 영구자석 동기전동기의 제정수를 나타

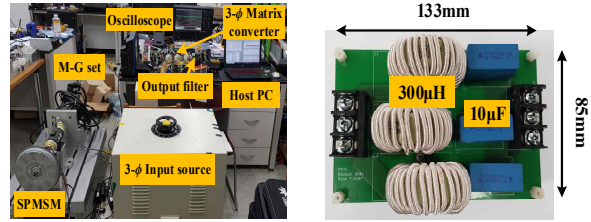


Fig. 6. Experimental setup and fabricated output filter.

TABLE I  
PARAMETERS OF SURFACE-MOUNTED PERMANENT MAGNET SYNCHRONOUS MOTOR

Parameter	Value
Stator resistance ( $R_s$ )	5.52 ( $\Omega$ )
d-axis inductance ( $L_d$ )	20.5 (mH)
q-axis inductance ( $L_q$ )	20.5 (mH)
Pole ( $P$ )	48
Permanent magnet flux ( $\lambda_f$ )	0.076819 (V/(rad·s))
Moment of inertia ( $J$ )	0.0015 ( $\text{kg}\cdot\text{m}^2$ )
Rated speed (rpm)	500 (rpm)

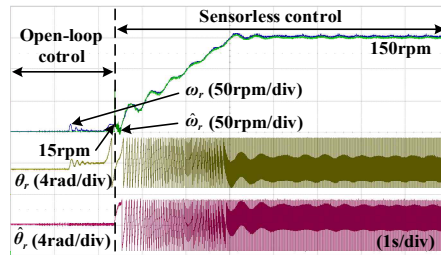


Fig. 7. Experimental result of proposed sensorless control.

낸다. 스위칭 주파수는 20kHz이며, 전동기 구동 시스템으로는 3상 직접형 매트릭스 컨버터를 사용하였다. 출력필터 인덕턴스와 커패시턴스는 각각 300µH, 10µF이다. 부하는 3.4W/rpm으로 전동기의 속도에 비례하여 증가한다.

그림 7은 무부하 정지상태에서 150rpm까지 가속한 실험파형을 나타낸다. 일반적으로 이러한 센서리스 구동 방법에서 영구자석 동기전동기의 초기구동 시에는 개루프 제어를 통해 일정 속도까지 가속한 후 센서리스 제어로 전환하게 된다. 본 논문에서 제안하는 센서리스 제어 방법은 저속에서도 정확한 전압 측정이 가능하므로, 센서리스 제어로 전환되는 속도를 정격속도 500rpm(1p u)의 3%인 15rpm(0.03pu)로 설정하였다. 실험결과에 따르면, 모드 전환 후 회전자 위치 및 속도를 오차 없이 추종하는 것을 확인할 수 있다. 그림 8은 500rpm에서 15rpm로 속도 램프 지령을 인가하였을 때의 실험결과를 나타낸다. 그림 8(a)는 제안한 방법을 사용한 경우로, 위치오차가 매우 작은 값을 가지며 안정적으로 극저속 구간에 도달하는 것을 확인할 수 있다. 반면, 그림 8(b)는 기존 방법을 사용했을 경우로 속도가 줄어들수록 위치 오차가 점점 증가하는 것을 확인할 수 있다. 15rpm의

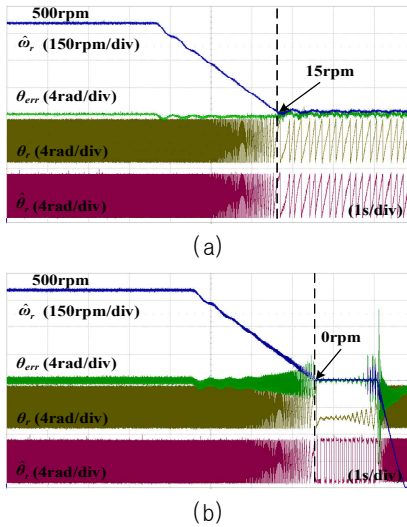


Fig. 8. Deceleration results from 500rpm to 15rpm. (a) Proposed method, (b) Conventional method.

지령속도에 도달했음에도 속도가 유지되지 않고 계속 감소하는데, 이는 기존 방법의 추정기가 저속 구간에서 제대로 동작하지 않아 추정 능력을 잃어버렸기 때문이다. 결과적으로 속도가 반대방향으로 급격하게 증가하여 속도 제어에 실패하는 것을 확인할 수 있다.

그림 9는 500rpm과 15rpm에서 각각 추정된 회전자 d 축 역기전력을 나타낸다. 그림 9(a)에서 회전자 d축 역기전력은 0V이며 실제 회전자 q축 역기전력은 식 (3)를 이용하여  $e_{qs} = \omega_r \lambda_f = 2 \times \pi \times 200 \times 0.076819 = 96.53V$ 이고, 제안한 방법을 사용하는 경우 추정된 회전자 q축 역기전력은 약 98V이다. 반면에 기존 방법을 사용하는 경우는 추정된 회전자 q축 역기전력 평균값이 약 70V이며 맥동한다. 기존 방법에서 실제 전동기 전압과 오차가 있는 지령전압이 사용되어 역기전력이 맥동하지만 추정각은 PI제어기와 적분기를 거친 성분으로, 오차가 0으로 수렴하게 되어 맥동하지 않는다. 그림 9(b)를 살펴보면 제안한 방법을 이용하는 경우 정상상태에서 추정기 성능이 계속 유지되지만, 기존 방법으로 전환했을 시 역기전력 추정에 실패하여 추정 값이 크게 진동하게 되며 결과적으로 위치 추정 능력을 상실하게 된다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 정현파 출력필터를 이용한 역기전력 기반 센서리스 구동방법을 제안하였다. 기존 역기전력 기반 센서리스 제어에서는 지령전압을 사용하므로 전동기 구동 시스템의 비선형성에 의해 지령전압과 실제 전동기에서의 전압 차이가 발생할 수 있다. 이를 해결하기 위해 본 논문에서는 정현파 출력필터를 이용하여 실제 전동기 전압을 측정하고 추정기의 입력으로 사용하였다. 특히 제안한 방법을 사용하면 정격 속도의 3%인 극저속 구간에서도 안정적으로 추정기 동작이 가능하여, 기존

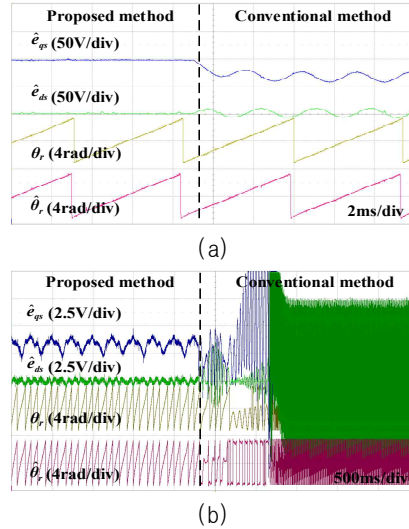


Fig. 9. Estimated back-EMF and position. (a) At 500rpm, (b) At 15rpm.

방법에 비해 넓은 속도 구간으로의 추정기 동작 영역을 확보할 수 있음을 실험을 통해 확인하였다.

이 성과는 2019년도 정부(과학기술정보통신부)의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 연구임. (No. 2017R1C1B2009425)

## References

- [1] X. Song, J. Fang, B. Han, and S. Zheng, "Adaptive compensation method for high-speed surface PMSM sensorless drives of EMF-based position estimation error," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 31, No. 2, pp. 1438-1449, Feb. 2016.
- [2] G. Wang, H. Zhan, G. Zhang, X. Gui, and D. Xu, "Adaptive compensation method of position estimation harmonic error for emf-based observer in sensorless IPMSM drives," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 29, No. 6, pp. 3055-3064, Jun. 2014.
- [3] F. Alonge, F. D'Ippolito, and A. Sferlizza, "Sensorless control of induction-motor drive based on robust kalman filter and adaptive speed estimation," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 61, No. 3, pp. 1444-1453, Mar. 2014.
- [4] Y. C. Son, B. H. Bae, and S. K. Sul, "Sensorless operation of permanent magnet motor using direct voltage sensing circuit," in *Proc. IEEE Ind. Appl. Conf. 37th IAS Annu. Meeting (Cat. No.02CH37344)*, Vol. 3, pp. 1674-1678, Oct. 2002.
- [5] H. J. Choi, H. S. Lee, K. Y. Cho, and H. W. Kim, "Sensorless control of a surface mounted PM synchronous motor in over modulation regions by detecting phase voltages," *The Transactions of the Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 22, No. 1, pp. 53-59, Feb. 2017.