

# 파라미터 오차 보상을 통한 3상 BLDC 전동기의 DC 전류 모델 기반 센서리스 제어

지종성, 문종주, 박상우, 김장목  
부산대학교

## DC current model based 3 phase BLDCM sensorless control through Parameter error Compensation

Ji Jong Seong, Moon Jong Joo, Park Sang Woo, Kim Jang Mok  
Pusan National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 파라미터 오차 보상을 통한 3상 BLDC 전동기의 DC 전류 모델 기반의 센서리스 제어 방식을 제안한다. 기존의 DC 전류 모델 기반의 센서리스 제어 방식은 상 전환 구간마다 발생하는 실제 전류와 모델 전류의 오차로 인해 추정된 역기전력과 속도, 위치에 오차가 그대로 나타난다. 이 오차 성분을 줄이기 위해 본 논문에서는 기계 방정식을 이용하여 개선된 역기전력 추정 식을 제안하였다. 또한 개선된 역기전력 추정 식에 파라미터 오차가 없다면 센서리스 제어가 가능하지만, 오차가 존재한다면 센서리스 제어가 불안정해진다. 이를 극복하기 위한 파라미터 오차 보상 알고리즘도 제안하였다. 제안한 방법은 시뮬레이션을 통해 검증하였다.

### 1. 서론

영구자석 동기 전동기(PMSM)의 센서리스 제어의 경우, 가상의  $\theta$ 로 실제 전류와 모델 전류를 좌표 변환한다. 이 때,  $\gamma$ 축 실제와 모델 전류의 오차로 위치를 추정하고,  $\delta$ 축 실제와 모델 전류의 오차로 속도를 추정한다.<sup>[1]</sup> 그러나 BLDC 전동기의 경우, DC 전류 모델을 기반으로 실제 전류와 모델 전류의 오차를 이용해 속도와 위치를 추정한다.<sup>[2],[3]</sup>

DC 전류 모델 기반의 역기전력 추정 방식은 상 전환 구간마다 실제 전류와 추정 전류의 오차 성분이 발생하고, 이 오차 성분이 속도 추정에 영향을 미치게 된다. 이러한 오차를 줄이기 위해서 기존의 논문<sup>[3]</sup>에서는 LPF를 이용하여 오차를 줄였다. 하지만 본 논문에서는 기계 방정식을 이용해 획득한 성분을 기존의 역기전력 추정 식에 대입함으로써 상 전환 구간마다 발생하는 오차 성분을 줄일 수 있다.

모델 전류 생성 시 모델 전류 식의 파라미터[R, L, Ke]의 값에 오차가 있을 때 정확한 속도와 위치 추정이 어려우므로 파라미터 오차를 보상해 줄 수 있는 알고리즘이 필요하다. 본 논문에서는 실제 토크와 추정 토크의 오차 성분을 파라미터 오차의 보상 성분으로 이용하였다.

본 논문에서 제안한 방식은 시뮬레이션을 통해 확인하였다.

### 2. 기존의 DC 전류 모델 기반 역기전력 추정[3]

BLDC 전동기는 DC 전류를 기반으로 역기전력을 추정한다.

역기전력 추정을 위해 실제 전류(1)와 모델 전류(2)의 차를 이용한다. 이때, 모델 전류는 실제 전류와 동일하다고 가정하므로 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$i^{n+1} = i^n + \frac{T}{L}[v - Ri^n - e] \quad (1)$$

$$i_m^{n+1} = i^n + \frac{T}{L}[v - Ri^n - e_m^n] \quad (2)$$

실제 전류와 모델 전류의 오차는 (3)과 같다. 이를 정리하면 추정 역기전력은 (4)와 같고, 속도와 위치는 (5)와 (6)과 같다.

$$\Delta i = i^{n+1} - i_m^{n+1} = \frac{T}{L}[-e + e_m^n] \quad (3)$$

$$e_m^{n+1} = e_m^n - \frac{L}{T}\Delta i = e_m^n + \Delta e \quad (4)$$

$$w_m = \frac{e_m^{n+1}}{K_e} = \frac{e_m^n - \frac{L}{T}\Delta i}{K_e} = \frac{e_m^n + \Delta e}{K_e} \quad (5)$$

$$\theta_m^{n+1} = \theta_m^n + \frac{e_m^{n+1}}{K_e}T \quad (6)$$

### 3. 제안한 DC 전류 모델 기반의 역기전력 추정을 통한 센서리스 제어

#### 3.1 제안한 DC 전류 모델 기반 역기전력 추정

기존의 DC 전류를 기반으로 한 센서리스 방식은 상 전환 구간마다 발생하는 실제 전류와 모델 전류의 오차 성분이 추정 속도에 그대로 나타난다. 본 논문에서는 이를 줄이기 위해 실제 토크(7)와 모델 토크(8)의 오차 성분(9)을 이용한다. 부하 토크는 동일하므로 (9)에서 상쇄되고, 마찰 계수 B는 0이라고 가정한다.

$$T = \widehat{K}_T i = J \frac{dw}{dt} + Bw + T_L \quad (7)$$

$$T_m = \widehat{K}_T i_m = J \frac{dw_m}{dt} + Bw_m + T_L \quad (8)$$

$$\Delta T = \widehat{K}_T \Delta i = J \frac{d\Delta w}{dt} \quad (9)$$

$$\Delta w = \frac{\Delta e}{K_e} \quad (10)$$

이 때, (10)을 (9)에 대입 후 정리하면 (11)과 같다.

$$\Delta e = \frac{K_T K_e T}{J} \Delta i \quad (11)$$

(11)를 (4)에 삽입하면 (12)과 같이 개선된 형태의 역기전력 추정 식을 만들어 낼 수 있다. 이때 속도와 위치는 (13), (14)와 같다.

$$e_m^{n+1} = e_m^n - \frac{K_e K_T L}{J} \Delta i \quad (12)$$

$$w_m = \frac{e_m^{n+1}}{K_e} = \frac{e_m^n - \frac{K_e K_T L}{J} \Delta i}{K_e} = \frac{e_m^n + \Delta e}{K_e} \quad (13)$$

$$\theta_m^{n+1} = \theta_m^n + \frac{e_m^{n+1}}{K_e} T \quad (14)$$

### 3.2 제안한 파라미터 오차 보상 알고리즘

3.1에서 제안한 역기전력 추정 식은 파라미터 오차가 없을 때 센서리스 제어가 가능하지만, 파라미터 오차가 있으면 센서리스 제어가 불안정해진다. 그러므로 센서리스 제어의 안정성을 위해 반드시 파라미터 오차 보상이 필요하다.

본 논문에서 제안하는 파라미터 오차 보상 알고리즘은 실제 토크와 모델 토크의 오차(9)를 전기적인 60°마다 적분(15)하면 속도의 오차 성분(16)으로 나타낼 수 있고 이를 역기전력 상수의 보상 성분으로 이용했다. 역기전력 상수의 오차뿐만 아니라 R, L의 오차가 있을 때에도 오차 성분이 (16)의  $\Delta e$  성분에서 나타나므로 보상이 가능하다.

$$\int_0^{\frac{1}{6f}} \Delta T dt = J \int_0^{\frac{1}{6f}} \frac{\Delta w}{dt} dt = J \int_{w_1}^{w_2} d\Delta w \quad (15)$$

$$\int_0^{\frac{1}{6f}} \Delta T dt = J[\Delta w_2 - \Delta w_1] = J \left[ \frac{\Delta e_2 - \Delta e_1}{K_e} \right] \quad (16)$$

(16)은 속도의 오차 성분이므로 전기적인 60°의 주기 값 ( $\frac{1}{6f}$ )을 곱해 추정 위치에 보상해줌으로써 추정된 위치 오차를 줄일 수 있다.

### 3.3 제안한 센서리스 제어 블록 다이어그램

그림 1은 제안한 센서리스 제어 블록 다이어그램이다.

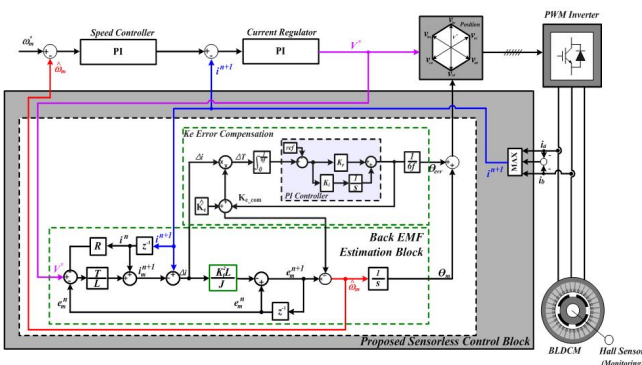


그림 1 제안한 DC 전류 모델 기반 센서리스 알고리즘 블록도  
Fig. 1 Proposed DC current model based sensorless control Algorithm Block

### 4. 시뮬레이션

제안한 역기전력 추정 방식과 파라미터 오차 보상 알고리즘

을 이용해 역기전력 상수의 오차가 10% 클 경우에 대해 시뮬레이션을 했다. 속도 지령은 1000 rpm이고, 부하는 0.1Nm로 세 경우 모두 동일하다. (a)는 파라미터 오차가 없을 때의 속도, 전류, 위치 파형이다. (b)는 오차 존재 시 오차 보상을 하지 않은 경우이다. (c)는 오차 존재 시 오차 보상을 했을 경우이다. 사용한 전동기의 파라미터는 표 1과 같다.

표 1 3상 BLDC 전동기의 파라미터

Table 1 The parameter of 3 Phase Brushless DC motor

| Rated Power | 100 [W]  | Rated current | 5 [A]                |
|-------------|----------|---------------|----------------------|
| Pole        | 10 [극]   | L             | 565 [uH]             |
| R           | 0.25 [Ω] | Ke            | 0.08952465 [V/rad/s] |

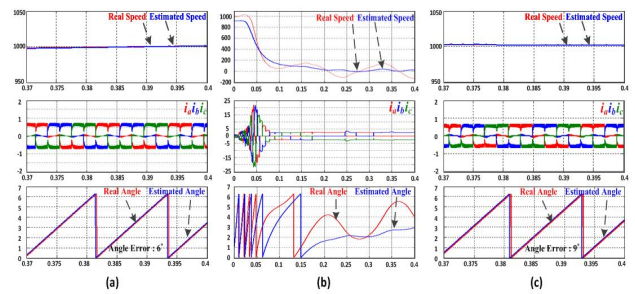


그림 2 조건에 따른 속도, 전류, 위치 시뮬레이션 파형. (a) 파라미터 오차가 없는 경우, (b) 역기전력 상수 오차 시 보상 안할 경우, (c) 역기전력 상수 오차 시 보상 할 경우

Fig. 2 Speed, Current, Angle simulation waveform depending on simulation condition. (a) not exist parameter error, (b) exist parameter error but do not compensation, (c) exist parameter error and do compensation.

### 5. 결론

본 논문에서는 파라미터 오차 보상을 통한 DC 전류 모델 기반의 센서리스 제어 방식을 제안하였다. 제안한 방식은 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

이 논문은 부산대학교의 연구비 지원에 의하여 연구되었음

### 참고 문헌

- [1] Nobuyuki Matsui, "Sensorless PM Brushless DC Motor Drives" Industrial Electronics, IEEE Transactions on, vol 43, no.2, pp.300-308, Apr 1996
- [2] 안우영, "DC 전류 모델 기반 BLDCM의 센서리스 제어 알고리즘", 부산대학교 전자전기공학과 공학 석사 학위 논문, 2012년 8월
- [3] Won Sang Im, Wenxin Liu, Jang Mok Kim, "Sensorless control of 3 Phase BLDC motors using DC current model" Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), 2014 IEEE, pp. 4484-4490, Sept 2014