

# 단일 전류 센서를 이용한 표면부착형 영구자석 동기전동기 고속 제어 시 상전류 측정 오차 보상

노용호, 이육진  
충남대학교

## Phase current reconstruction error compensation for single current sensor SPMSM drives at high speed region

Yong-Ho Noh, Wook-Jin Lee  
Chungnam National University

### ABSTRACT

본 논문에서는 단일 전류센서를 이용한 영구자석 동기전동기 낮은 주파수 변조 지수 제어 시 발생하는 상전류 측정 오차를 보상하는 방법에 대해 제안한다.

단일 전류센서를 이용하여 모터를 제어하게 되면 2상의 전류를 샘플링 하여 나머지 1상의 전류를 복원하게 되는데 이때 2상의 전류를 샘플링 하는 시점이 다르게 되면 전류 복원 시 시점 차이로 인한 오차가 발생하게 되고 이러한 전류 측정 상 오차는 모터 제어의 성능에 악영향을 끼친다.

따라서 본 논문에서는 전류 샘플링 오차가 모터 제어에 어떤 문제를 발생시키는지에 대해 분석하고 그 오차를 보상하여 샘플링 시점 차이에 따른 오차가 없는 3상전류를 복원한다. 본 논문의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 1. 서 론

영구자석 동기전동기 제어 시 기존에는 2,3개의 전류센서를 통해 상전류를 측정했지만 최근에는 원가 절감과 신뢰성 향상을 위하여 단일 전류 센서를 이용하여 전류를 측정 및 복원하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

단일 전류 센서를 이용하여 전류 측정을 하게 되면 유효 전압 벡터가 인가되는 동안 2개의 상전류를 측정하고 나머지 한 상을 전류를 복원하게 된다. 이때 2상의 전류를 측정하는 시점이 다르게 되면 전류 복원 시 시점차이로 인한 오차가 발생하게 되고 이러한 전류 측정 상 오차는 모터 제어의 성능에 악영향을 끼친다.<sup>[1]</sup> 특히, 모터가 고속으로 운전할 시에는 이러한 오차가 커지게 되어 정확한 3상전류를 복원할 수 없게 된다.

본 논문에서는 단일 전류 센서 이용 시 전류 측정 오차가 모터 제어에 어떤 문제를 발생시키는지에 대해 분석하고 그 오차를 보상하여 전류 측정 시점에 의한 오차가 없는 3상전류를 복원한다. 본 논문의 타당성은 시뮬레이션을 통해 검증한다.

### 2. 본 론

#### 2.1 단일 전류 센서 이용 시 전류 측정 오차

그림1은 단일 전류 센서 이용 시의 3상 인버터 회로도이고 이때 단일 전류 센서를 통해 샘플링 되는 전류는 표1 과 같다. 따라서 한 구간에서 두 개의 유효 전압 벡터가 인가될 때 샘플링 할 수 있는 전류는 두 상의 전류이고 평형 시스템에서 3상

전류의 합이 0임을 이용하여 나머지 한 상의 전류를 계산한다. 그림 2는 지령 전압 벡터가 스위칭 상태 (1,0,0),(1,1,0)에 해당할 때의 스위칭 상태 및 a상전류를 나타낸 그래프이다. Symmetrical SVPWM 방식으로 3개의 전류 센서를 이용하여 전류를 샘플링할 경우 영 전압 벡터 인가 시에 전류를 샘플링하여 한 스위칭 주기 내의 평균전류를 얻을 수 있다. 하지만 단일 전류 센서를 이용하여 3상 전류를 복원할 경우 그림2와 같이 유효 전압 벡터 인가 시에만 전류를 샘플링 할 수 있고 이는 영전압 벡터 인가 시 샘플링한 전류와 차이가 있다. 그러므로 유효 전압 벡터인가 시에 샘플링한 전류로 복원한 3상 전류를 영 전압 벡터 인가 시에 샘플링한 3상 전류로 만들어주기 위해서는 그 차이를 보상해주어야 한다.

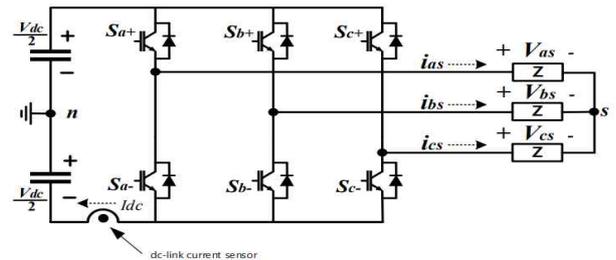


그림 1 단일전류센서를 이용한 3상 인버터  
Fig. 1 Three phase inverter with a single current sensor

Sa,Sb,Sc	000	100	110	010	011	001	101	111
Idc	0	ia	-ic	ib	-ia	ic	-ib	0

표 1 스위칭 상태에 따른 상전류  
Table 1 Phase current according to the switching-states

$$i_{xs}(t) = \frac{\lambda_f \omega_r}{R_s^2 + (\omega_r L_s)^2} (\omega_r L_s \cos \omega_r t - R_s \sin \omega_r t) + \frac{V_{xs}}{R_s} + C_x e^{-\frac{L_s}{R_s} t}$$

(x = a, b, c)

(1)

식(1)에서  $i_{xs}(t)$ 는 상전류,  $R_s$ 는 상전압,  $L_s$ 는 모터 인덕턴스,  $\omega_r$ 은 전기 각속도,  $\lambda_f$ 는 역기전력,  $C_x$ 는 상전류의 초기값을 나타낸다.

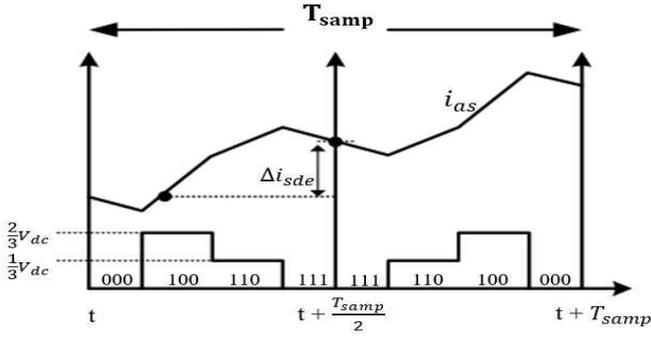


그림 2 스위칭 상태에 따른 a상 전류  
Fig. 2 a-phase current according to the switching state

위와 같은 전류 오차를 구하기 위하여 표면부착형 영구자석 동기전동기의 전압방정식을 통해 각 상 전류를 표현하면 식(1)과 같다. 이때, 상전압은 표 2와 같이 스위칭 상태에 따라서 정해진다.

$S_a S_b S_c$	000/ 111	100	110	010	011	001	101
Vas	0	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$
Vbs	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$
Vcs	0	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$-\frac{2V_{dc}}{3}$	$-\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$	$\frac{2V_{dc}}{3}$	$\frac{V_{dc}}{3}$

표 2 스위칭 상태에 따른 3상 전압  
Table 2 3-phase voltage according to the switching-state

표1에 의하여 스위칭 상태가 (1,0,0), (1,1,0)일 때 샘플링할 수 있는 전류는 a,c상전류이다. 그림2와 같이 영전압 벡터 인가 시에 샘플링한 전류와 유효전압 벡터 인가 시 샘플링한 전류의 오차를  $\Delta i_{sde}$  (sampling delay error) 라고 표현할 수 있다. 샘플링 반주기에서의 시간을  $tz$ 라 하고 a,c상 전류가 샘플링 되는 시점을 각각  $t_1, t_2$  라고 하면 전류 오차는 식(2)와 같다.

$$\begin{aligned} \Delta i_{A-SDE} &= i_a(t_z) - i_a(t_1) \\ \Delta i_{C-SDE} &= i_c(t_z) - i_c(t_2) \end{aligned} \quad (2)$$

식(2)에서 구한 값을 이용하여 유효전압 전압 인가 시에 샘플링한 전류와 영전압 벡터 인가 시에 샘플링한 전류의 관계를 식(3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} i_{A-meas} &= i_A - \Delta i_{A-SDE} \\ i_{B-rec} &= i_B + \Delta i_{A-SDE} + \Delta i_{C-SDE} \\ i_{C-meas} &= i_C - \Delta i_{C-SDE} \end{aligned} \quad (3)$$

식(3)에서  $i_A, i_B, i_C$ 는 영전압 벡터 인가 시 샘플링한 전류이고  $i_{A-meas}, i_{C-meas}$  및  $i_{B-rec}$  은 유효 전압 벡터 인가 시 샘플링한 전류 및 복원한 전류이다.

$$\begin{pmatrix} i_{d-cal}^r \\ i_{q-cal}^r \end{pmatrix} = T(\theta_r) \begin{pmatrix} i_{A-meas} \\ i_{B-rec} \\ i_{C-meas} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} i_d^r + \Delta i_d^r \\ i_q^r + \Delta i_q^r \end{pmatrix} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} \Delta i_d^r &= -\frac{1}{\sqrt{3}} k_A \cos(2\theta_r - \frac{\pi}{3} + \alpha + \sigma_A) + \frac{1}{\sqrt{3}} k_A \cos(\pi - \alpha - \sigma_A) \\ &+ \frac{2}{\sqrt{3}} \sin(\theta_r - \frac{\pi}{3}) \cdot C_A (e^{-\frac{R_s t_z}{L_s}} - e^{-\frac{R_s t_1}{L_s}}) - \frac{1}{\sqrt{3}} k_c \cos(2\theta_r - \pi + \alpha + \sigma_c) \\ &+ \frac{1}{\sqrt{3}} k_c \cos(-\frac{\pi}{3} - \alpha - \sigma_c) + \frac{2}{\sqrt{3}} \sin\theta_r \cdot C_c (e^{-\frac{R_s t_z}{L_s}} - e^{-\frac{R_s t_2}{L_s}}) \\ &+ \frac{4V_{dc}}{9R} \cos\theta_r - \frac{4V_{dc}}{9R} \cos(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (5)$$

$$\begin{aligned} \Delta i_q^r &= -\frac{1}{\sqrt{3}} k_A \sin(2\theta_r - \frac{\pi}{3} + \alpha + \sigma_A) + \frac{1}{\sqrt{3}} k_A \sin(\pi - \alpha - \sigma_A) \\ &+ \frac{2}{\sqrt{3}} \cos(\theta_r - \frac{\pi}{3}) \cdot C_A (e^{-\frac{R_s t_z}{L_s}} - e^{-\frac{R_s t_1}{L_s}}) + \frac{1}{\sqrt{3}} k_c \sin(2\theta_r + \pi + \alpha + \sigma_c) \\ &- \frac{1}{\sqrt{3}} k_c \sin(-\frac{\pi}{3} - \alpha - \sigma_c) + \frac{2}{\sqrt{3}} \cos\theta_r \cdot C_c (e^{-\frac{R_s t_z}{L_s}} - e^{-\frac{R_s t_2}{L_s}}) \\ &- \frac{4V_{dc}}{9R} \sin\theta_r + \frac{4V_{dc}}{9R} \sin(\theta_r + \frac{2\pi}{3}) \end{aligned} \quad (6)$$

단, 식(5),(6)에서

$$\begin{aligned} \alpha &= \tan^{-1}(\frac{\omega_r L_s}{R_s}) \quad \Delta\theta_A = \omega_r(t_z - t_1) \quad \Delta\theta_C = \omega_r(t_z - t_2) \\ \sigma_A &= \frac{\sin\Delta\theta_A}{1 - \cos\Delta\theta_A} \quad \sigma_C = \frac{\sin\Delta\theta_C}{1 - \cos\Delta\theta_C} \text{이다.} \end{aligned}$$

식(3)을 동기좌표계 d-q 변환하여 정리하면 식(4)와 같이 나타낼 수 있다.  $\theta_r$  는 좌표축의 회전각  $\theta_r = \int \omega_r t dt$  이다.

식(4)에서  $i_{d-cal}^r, i_{q-cal}^r$ 은 식(3)의 유효 전압 벡터 인가 시 샘플링한 전류 및 복원한 전류를 동기좌표계 d-q축 변환한 값이고 영전압 벡터 인가 시 샘플링한 3상 전류를 동기좌표계 d-q축 변환한  $i_d^r, i_q^r$ 과 식(5),(6)과 같이 전류 샘플링 시점 차이로 인한 맥동 성분이 포함되어 있음을 알 수 있다. 표면부착형 영구자석 동기전동기에서 토크는 q축 전류에 비례하므로 위와 같은 전류 오차는 토크의 맥동을 발생시킨다.

## 2.2 전류 오차 보상 방법

스위칭 한 주기 내에서 인가되는 상전압과 인가 시간을 알 수 있기 때문에 전류 변화량을 계산하여 유효 전압 벡터 인가 시 샘플링한 상전류를 영 전압 벡터 인가 시점에서의 전류로 보정할 수 있다.<sup>[1]</sup> 하지만, 모터가 고속영역에서 운전하여 주파수 변조 지수가 낮아지게 되면 한 스위칭 주기 내에서 자속각이 크게 변하여 역기전력 또한 크게 변하게 되므로 전류의 변화량에 미치는 영향이 커지게 된다. 따라서, 이에 대한 추가적인 보상이 필요하다.

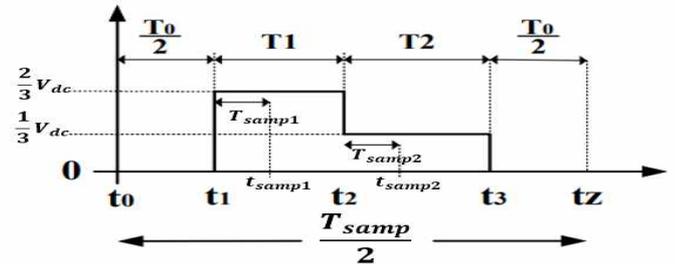


그림3. 스위칭 상태에 따른 전압 벡터  
Fig.3 Voltage vector according to the switching-state

그림3과 같이 특정한 전압 벡터가 인가될 때의 시점을 모두 알 수 있고<sup>[2]</sup> 한 스위칭 주기 내에서 모터의 운전 속도가 일정하다면 식(7)을 통하여 매 전압 벡터 인가 시점마다의 전류를 구할 수 있다.

$$i_{\phi}(t_y) = i_{\phi}(t_x) + \frac{1}{L_s} \cdot [-R_s i_{\phi}(t_x) \cdot (t_y - t_x) + \lambda_f \{ \cos(\omega_r t_x) - \cos(\omega_r t_y) \}] + v_{\phi} \cdot (t_y - t_x) \quad (7)$$

식(7)에서  $i_{\phi}, v_{\phi}$ 는 각 상전류, 상전압이다.  $\phi = a, b, c$  또한,  $t_x, t_y$ 는 각 스위칭에서의 시점을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \omega_r t_0 &= \theta_r \\ \omega_r t_1 &= \theta_r + \omega_r \cdot \left(\frac{T_0}{2}\right) \\ \omega_r t_{smp1} &= \theta_r + \omega_r \cdot \left(\frac{T_0}{2} + T_{smp1}\right) \\ \omega_r t_2 &= \theta_r + \omega_r \cdot \left(\frac{T_0}{2} + T_1\right) \\ \omega_r t_{smp2} &= \theta_r + \omega_r \cdot \left(\frac{T_0}{2} + T_1 + T_{smp2}\right) \\ \omega_r t_3 &= \theta_r + \omega_r \cdot \left(T_2 - \frac{T_0}{2}\right) \\ \omega_r t_z &= \theta_r + \omega_r \cdot T_z \end{aligned} \quad (8)$$

식(8)은 그림3과 같이 스위칭 시점에서의 회전각을 나타낸다.  $T_0, T_1, T_2$ 는 영전압 벡터 및 유효 전압 벡터 인가시간이고  $T_{smp1}, T_{smp2}$ 는 유효 전압 벡터 인가 시 2개의 상전류를 샘플링하는 시간이다.

식(7),(8)을 통해 단일 전류 센서를 통하여 샘플링한 전류를 영전압 벡터 인가 시점의 전류로 계산할 수 있다. 따라서, 매 스위칭 주기마다 단일 전류 센서로 샘플링한 전류에 보상식을 적용해주면 샘플링 시점 차이로 인한 오차를 보상할 수 있다.

표 1 모터 파라미터  
Table 1 SPMSM Parameter

정격 용량	6kW	고정자 저항	0.111ohm
극 수	2pole	d축 인덕턴스	755.6uH
정격속도	50,000rpm	q축 인덕턴스	755.6uH
입력 전압	400V	역기전력 상수	28mV/(rad/s)

### 2.3 시뮬레이션 결과

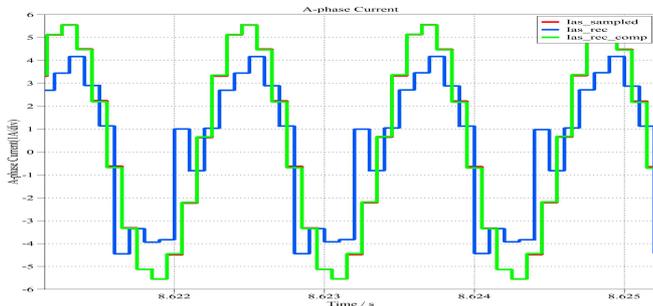


그림 4 a상 전류 비교  
Fig. 4 a-phase current comparison

그림 4는 영전압 벡터 인가시 샘플링한 a상전류  $I_{as\_sampled}$ , 유효 전압 벡터 인가시 샘플링한 a상전류  $I_{as\_rec}$ ,  $I_{as\_rec}$ 에 전류 오차를 보정한 a상 전류  $I_{as\_rec\_comp}$ 를 나타낸 파형이다.

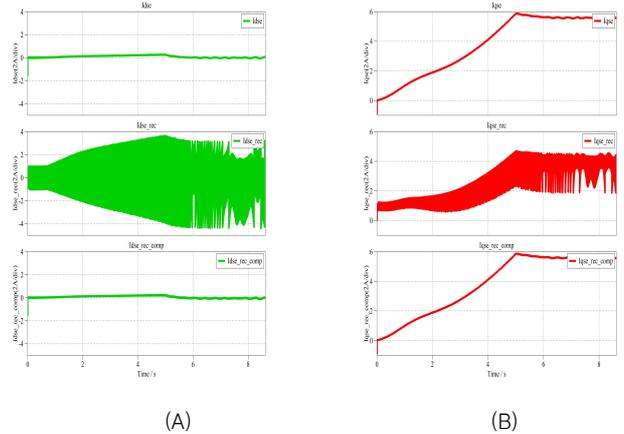


그림5 동기좌표계 d-q 축 전류 비교 (A)d축 전류 (B) q축 전류  
Fig. 5 Synchronously rotating reference frame d-q axis current comparison (A)d-axis current (B) q-axis current

그림5는 영전압 벡터 인가 시 샘플링한 상전류를 동기좌표계 d-q축으로 변환한 전류 파형을 나타낸다.

$I_{dse}, I_{qse}$ 는 영전압 벡터 인가 시 샘플링한 3상전류를 변환,  $I_{dse\_rec}, I_{qse\_rec}$ 는 유효전압 벡터 인가 시 샘플링한 전류로 복원한 3상 전류를 변환,  $I_{dse\_rec\_comp}, I_{qse\_rec\_comp}$ 는 복원한 3상 전류에 전류 오차를 보상하여 변환한 전류이다.

2.1절에서 서술하였던 동기좌표계 d-q축 전류의 맥동성분이 저속 구간부터 고속까지 전 구간에서 적절히 보상되었음을 확인할 수 있다.

### 3. 결론

본 논문에서는 단일 전류 센서를 이용하여 모터 제어 시 고속영역에서 상전류 샘플링 시점 차이로 인하여 3상 복원전류에 오차가 발생함과 이러한 오차가 모터 제어에 어떠한 영향을 주는 지에 대해 분석하였다. 또한, 매 스위칭 주기마다 전류 오차를 보상하여 샘플링 시점 차이로 인한 오차가 없는 3상 전류를 복원하였다. 시뮬레이션을 통해 본 논문의 타당성을 검증하였다.

### 참고 문헌

[1] Lianghong Zhu, "Phase Current Reconstruction Error Suppression Method for Single DC-Link Shunt PMSM Drives at Low-Speed Region", IEEE TRANSACTIONS ON POWER ELECTRONICS, VOL. 37, NO. 6, JUNE 2022

[2] Min Kim, Wook-Jin Lee, "Inverter average input power estimation algorithm in low-frequency modulation index operation of permanent mcagnet synchronous motors", Journal of Power Electronics(2023)