

불연속 PWM 기반 단일 전류 센서를 이용한 인버터의 평균 입력 전류 추정 방법

정부문, 이상민, 백현준, 이학준
삼성전자

Average Input Current Estimation Method with DPWM in Inverter Using Single Current Sensor

Bumun Jung, Sangmin Lee, Hyunjun Baek, Hak-Jun Lee
Samsung Electronics

ABSTRACT

본 논문에서는 불연속 PWM을 기반으로 단일 전류 센서가 장착된 전압형 인버터에서 상전류 지연 오차를 보상하고, 직류단 평균 전류를 추정하는 방법을 제안한다. 2개의 유효 벡터가 인가될 때 측정된 직류단 전류와 전동기 파라미터를 이용하여 모터 평균 상전류를 추정하고, 직류단 평균 전류를 추정한다. 제안된 방법은 직류단 전류 센서 출력에 저역 통과 필터 추가 없이 평균 전류를 측정하고, 이를 이용하여 일정한 소비전력으로 전동기를 구동할 수 있다. 본 논문의 효과는 시뮬레이션을 통해 입증한다.

1. 서론

최근에 영구자석 전동기 구동을 위해 직류단 단일 전류 센서를 이용한 전압형 인버터가 많이 사용되고 있다. 기존의 2개 또는 3개의 상전류 센서를 사용하는 시스템과 달리 하나의 전류 센서로부터 3상의 전류를 복원하는 방법으로 시스템 가격을 줄일 수 있고, 다수의 센서에서 발생할 수 있는 오프셋 에러를 제거 할 수 있는 장점이 있다. 하지만 PWM 한 주기 동안 2개의 각각 다른 시점에서 상전류를 샘플링하기 때문에 상전류 지연 오차가 발생한다. 따라서 상전류 지연 오차를 보상하는 방법들이 연구 되고 있다^[1]. 또한, 전동기를 최대 효율점에서 동작시키거나 일정한 소비전력으로 구동시키기 위해 인버터 입력 소비전력 측정이 요구된다. 따라서 입력 전압 및 전류 센서가 필수적이다. 특히, 직류단 전류는 직류단 전류 센서에 저역 통과 필터 회로를 구성하여 입력 평균 전류를 측정한다^[2].

본 논문에서는 표면부착형 영구자석 전동기 모델을 바탕으로, 120도 불연속 PWM이 사용될 때, 직류단 전류 센서로부터 복원된 전류를 이용하여 모터 평균 상전류를 추정하고, 저역 통과 필터 없이 직류단 평균 전류 또한 추정하는 방법을 제안한다.

2. 본론

1.1 상전류 복원 및 직류단 평균 전류 측정 방법

120도 OFF DPWM이 사용될 경우, 3개의 유효벡터가 인가되고, 앞의 두개의 유효 벡터에서 직류단 전류를 측정한다. 표 1과 같이, 스위칭 상태에 따른 직류단 전류와 전동기 상전류의 관계에 따라 2개의 상전류를 복원한 후 3상

표 1 스위칭 상태에 따른 직류단 전류와 전동기 상전류 관계

Table 1 Relationship between dc-link and phase currents depending on the switching states

Duty max, mid phase	a, b	b, a	b, c	c, b	c, a	a, c
I_{dc}	$i_a, -i_c$	$i_b, -i_c$	$i_b, -i_a$	$i_c, -i_a$	$i_c, -i_b$	$i_a, -i_b$

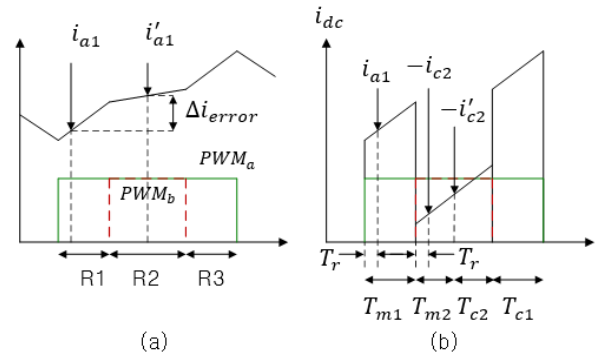


그림 1 섹터 1에서 (a) 전동기 a상 상전류, (b) dc-link 전류
Fig.1 (a) A-phase and (b) dc-link currents in Sector 1

전류의 평형 조건을 이용하여 나머지 전류를 얻는다. 유효벡터동안 전류를 센싱하기 위해서 유효벡터 최소 인가 시간이 필요하다. 또한, 스위칭 주기의 중간에서 전류를 샘플링할 수 없고, 2개의 유효벡터구간에서 샘플링 시점이 다르기 때문에 그림 1(a)와 같이 실제 평균 상전류와 센싱한 상전류간 오차가 발생한다. 그림 1(b)와 같이 두 전류를 샘플링하는 시점이 다르기 때문에, 3상 전류의 평형 조건을 적용할 때에도 오차가 발생한다.

또한, 일정한 소비전력 또는 최대 효율점에서 전동기를 구동하기 위해 직류단 전류센서에 저역 통과 필터 회로를 구성하여 직류단 평균 전류를 측정하여 입력 소비전력을 측정한다.

1.2 상전류 측정 오차 보상 방법

그림 1(a)에서 첫번째 유효벡터에 해당하는 상의 R1, R2 구간의 기울기를 얻으면 평균 전류를 구할 수 있고, 그림 1(b)와 같이 두번째 유효벡터에 해당하는 상의 R2 구간의 기울기를 얻으면 평균 전류를 알 수 있다. 3상 abc 프레임에서 전동기 전압 방정식은 다음과 같다.

$$v_{abc} = r_s i_{abc} + L_{abc} \frac{d}{dt} i_{abc} - E_{abc} \quad (1)$$

$$\mathbf{L}_{abc} = \begin{bmatrix} L_{ms} + L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ls} \\ -\frac{1}{2}L_{ls} & L_{ms} + L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ls} \\ -\frac{1}{2}L_{ls} & -\frac{1}{2}L_{ls} & L_{ms} + L_{ls} \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\mathbf{E}_{abc} = K_e \omega_e \begin{bmatrix} \sin \theta_e \\ \sin(\theta_e - 2\pi/3) \\ \sin(\theta_e + 2\pi/3) \end{bmatrix} \quad (3)$$

i_{abc} 는 상전류, K_e 는 역기전력 상수, ω_e 는 전기 각속도, θ_e 는 회전자 전기각, L_{ms} 는 고정자 상호 인덕턴스 이고 L_{ls} 는 누설 인덕턴스 이다. 식 (1)로부터 상전류의 기울기는 다음과 같다.

$$\frac{d}{dt} \mathbf{i}_{abc} = \frac{1}{L_s} (\mathbf{v}_{abc} - r_s \mathbf{i}_{abc} + \mathbf{E}_{abc}) \quad (4)$$

$L_s = \frac{3}{2}L_{ms} + L_{ls}$ 이다. 식 (4)를 이용하여 R1 구간에서 상전류의 기울기를 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{di_{R11}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left\{ \frac{2}{3}V_{dc} - r_s i_{dc1} + E_{x1} \right\} \quad (5)$$

i_{dc1} 는 R1 구간에서 측정된 직류단 전류이며, E_{x1} 은 R1 구간에 해당하는 상의 역기전압이다. R1에 해당하는 상전류의 R2 구간에서의 기울기는 다음과 같다.

$$\frac{di_{R12}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left\{ \frac{1}{3}V_{dc} - r_s (i_{dc1} + \frac{di_{R11}}{dt} (T_{m1} - T_r)) + E_{x1} \right\} \quad (6)$$

T_{m1} 은 R1 구간의 시간이고 T_r 은 ADC 트리거 시간이다. 따라서 식(5)와 (6)으로부터 첫번째 유효벡터에 해당하는 상전류의 평균전류를 다음과 같이 얻을 수 있다.

$$i'_{x1} = i_{dc1} + \frac{di_{R11}}{dt} (T_{m1} - T_r) + \frac{di_{R12}}{dt} \left(\frac{T_{m2} + T_{c2}}{2} \right) \quad (7)$$

R2 구간에서 해당하는 상전류의 기울기는 다음과 같다.

$$\frac{di_{R22}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left\{ -\frac{2}{3}V_{dc} + r_s i_{dc2} + E_{x2} \right\} \quad (8)$$

i_{dc2} 는 R2 구간에서 측정된 직류단 전류이며, E_{x2} 는 R2 구간에 해당하는 상의 역기전압이다. 식 (8)로부터 나머지 상전류의 평균 전류를 얻을 수 있다.

$$i'_{x2} = i_{dc2} + \frac{di_{R22}}{dt} \left(\frac{T_{m2} + T_{c2}}{2} - T_r \right) \quad (9)$$

$$i'_{x3} = -(i'_{x1} + i'_{x2}) \quad (10)$$

1.3 평균 입력 전류 추정 방법

평균 입력 전류 측정을 위해서 R3 구간에서의 평균 전류를 얻어야 한다. 그림 2와 같이 R3 구간에 해당하는 상은 R1과 같은 경우와 다른 경우로 나눌 수 있다. 같은 경우 R3 구간에서 상전류 기울기는 다음과 같다.

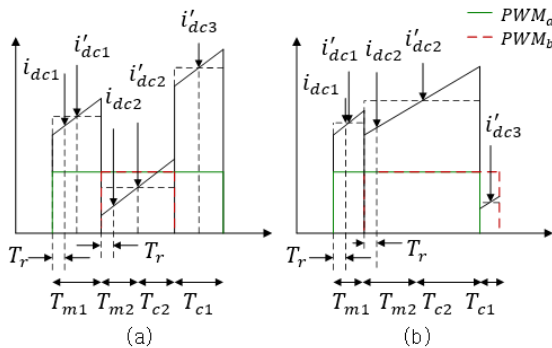


그림2 섹터 1에서 직류단 측정 전류 및 평균 추정 전류
Fig.2 Measured dc-link currents and estimated average currents

$$\frac{di_{R13}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left\{ \frac{2}{3}V_{dc} - r_s (i'_{x1} + \frac{di_{R12}}{dt} \frac{T_{m2} + T_{c2}}{2}) + E_{x1} \right\} \quad (11)$$

$$i'_{dc3} = i'_{x1} + \frac{di_{R12}}{dt} \left(\frac{T_{m2} + T_{c2}}{2} \right) + \frac{di_{R13}}{dt} (T_{c1}) \quad (12)$$

그림 2(b)의 경우 R3 구간에서 직류단 전류의 기울기 및 평균 전류는 다음과 같다.

$$\frac{di_{R32}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left\{ -\frac{1}{3}V_{dc} - r_s i'_{x3} + E_{x3} \right\} \quad (13)$$

$$\frac{di_{R33}}{dt} = \frac{1}{L_s} \left\{ \frac{2}{3}V_{dc} - r_s (i'_{x3} + \frac{di_{R32}}{dt} \frac{T_{m2} + T_{c2}}{2}) + E_{x3} \right\} \quad (14)$$

$$i'_{dc3} = i'_{x3} + \frac{di_{R32}}{dt} \left(\frac{T_{m2} + T_{c2}}{2} \right) + \frac{di_{R33}}{dt} (T_{c1}) \quad (15)$$

평균 입력 전류는 R1, R2, R3 구간에서 구해진 각 구간의 평균전류와 각 구간 듀티비의 곱을 합함으로써 얻을 수 있다.

1.4 시뮬레이션 결과

4극 표면부착형 영구자석 전동기가 사용되었고, 시뮬레이션은 PLECS를 사용하여 수행되었다. 배터리 전압은 30V이며, 스위칭 주파수는 40kHz로 설정하였다. 그림 3은 600W, 80,000 r/min으로 동작할 때 a상 전류, 복원 전류 그리고 보상된 평균 전류를 나타낸다. 실제 상전류와 비교하면, 기존의 복원 전류와 달리 평균 전류를 추정하는 것을 확인할 수 있다. 또한, 추정된 직류단 평균 전류와 필터 출력을 통해 측정된 직류단 전류를 나타낸다. 추정된 직류단 평균 전류와 필터 출력이 유사함을 확인할 수 있다.

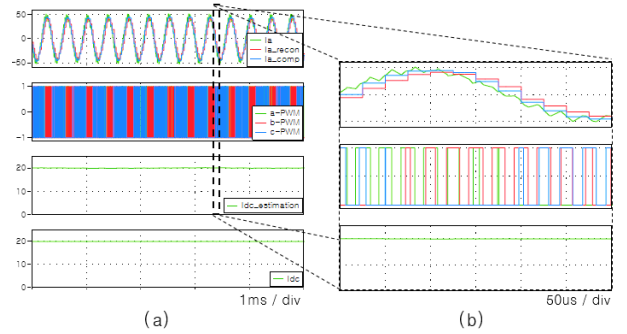


그림3 상전류, PWM 신호, 추정 dc-link 평균 전류 및 측정 dc-link 전류
Fig.3 Phase current, PWM signals, estimated and measured average dc-link currents

3. 결론

본 논문에서는 DPWM 기반의 단일 전류 센서를 사용하는 인버터의 상전류 오차 보상 및 평균 입력 전류를 추정 하는 방법을 제안하였다. 각 유효벡터 구간에서 측정된 직류단 전류 및 전동기 파라미터를 이용하여 스위칭 주기내 각 상의 평균 상전류를 복원하고, 소비전력 측정을 위해 직류단 평균 전류를 추정하여, 인버터 평균 입력 전류를 추정하였다. 시뮬레이션을 통해 본 논문의 타당성을 검증 하였다.

참고 문헌

- [1] 노용호, 이욱진, "단일 전류 센서를 이용한 표면부착형 영구자석 동기전동기 고속 제어 시 상전류 측정 오차 보상", 2023 전력전자학회 하계학술대회 논문집, pp. 189-191.
- [2] H. Choi, J. Ha and K. Lee, "Ultra-Low Inductance PMSM Drive Using a DC Current Sensor," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, vol. 71, no. 6, pp. 5597-5607, Jun. 2024.