

# 교류 전동기 구동 시스템에서 인버터의 입력전력 추정

김도현, 김상훈

강원대학교 BIT 의료전기전자융합공학

## Input Power Estimation of an Inverter in AC Motor Drive System

Do-Hyun Kim, Sang-Hoon Kim

BIT Electrical & Medical Convergent Eng., Kangwon National Univ.

### ABSTRACT

본 논문에서는 교류 전동기 구동 시스템에서 인버터의 입력 전력 추정 기법을 제안하였다. 인버터의 입력전력 정보를 얻기 위해서는 DC link 전압 센서 및 입력전류 센서와 같은 측정 장치가 요구되는데, 전동기의 상전류 정보 및 인버터의 스위칭 패턴을 이용하면 입력전류 센서를 사용하지 않고 인버터의 입력전력을 추정할 수 있다. 1kW SPMSM(Surface mounted Permanent Magnet Synchronous Motor) 구동 시뮬레이션 및 실험을 통해 입력전력 추정 기법의 유효성을 확인하였다.

### 1. 서 론

인버터를 이용한 교류 전동기 구동 시스템은 청소기와 같은 소용량 시스템부터 철도 차량과 같은 대용량 시스템까지 그 적용 분야가 다양하다. 그중에 전기 자동차와 같은 견인 구동 시스템은 배터리로부터 견인 구동에 필요한 전력을 공급받기 때문에 주행거리 및 주행시간을 늘리기 위해서는 배터리에 저장된 에너지를 효율적으로 사용해야 한다.

이를 위해 전동기 구동 시 인버터의 입력전력이 최소가 되도록 제어하는 방법이 연구되었다.<sup>[1]</sup> 이러한 방법은 입력전력 정보를 얻기 위한 측정 장비가 요구된다는 단점이 있다.

본 논문에서는 인버터의 입력전류 센서를 사용하지 않고 전동기의 상전류 및 인버터의 스위칭 패턴을 이용하여 인버터의 입력전력을 추정하는 기법을 제안하였다. 추정된 입력전력 정보는 입력전력을 최소로 제어하는 최대 효율 제어 기법 등에 적용될 수 있다.

### 2. 인버터의 입력전력 추정

#### 2.1 인버터의 입력전류와 상전류

그림 1에 전압 벡터가  $V_1(1,0,0)$ 일 때 인버터의 입력전류 경로가 보인다. 인버터의 입력전류는 6개 스위치의 온, 오프 상태에 따라 결정되며 인버터가 출력 가능한 8개의 전압 벡터에 따른 입력전류는 표 1과 같다.

#### 2.2 입력전력 추정 방법

그림 2는 전압 변조 주기 동안의 극전압 지령, 상전류 및 입력전류 파형의 예를 보여준다. 여기서  $v_{1st}^*$ ,  $v_{2nd}^*$ ,  $v_{3rd}^*$ 은 극전압 지령을 크기 순서대로 나타낸 것이며 각 상에 해당하는 전류는

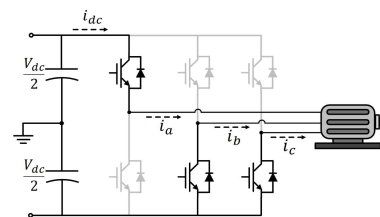


그림 1 전압 벡터가  $V_1(1,0,0)$ 일 때 입력전류 경로

표 1 전압 벡터에 따른 입력전류

Voltage Vector	$V_0$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_7$
	(0,0,0)	(1,0,0)	(1,1,0)	(0,1,0)	(0,1,1)	(0,0,1)	(1,0,1)	(1,1,1)
$i_{dc}$	0	$i_a$	$-i_c$	$i_b$	$-i_a$	$i_c$	$-i_b$	0

$i_{1st}$ ,  $i_{2nd}$ ,  $i_{3rd}$ 이다.  $v_{1st\_eff}$ ,  $v_{2nd\_eff}$ ,  $v_{3rd\_eff}$ 는 데드 타임 동안 발생하는 전압 오차를 고려한 출력 극전압을 나타낸다.

데드 타임 동안의 전압 오차는 스위치가 켜지는 On sequence에서는 전류의 부호가 양일 때 발생하며, 스위치가 꺼지는 Off sequence에서는 전류의 부호가 음일 때 발생한다.<sup>[2]</sup> 그림 2는 On sequence에서  $v_{1st}$ 에만 데드 타임으로 인한 전압 오차가 발생하는 경우를 보여준다. 오차 발생 시 출력 극전압  $v_{1st\_eff}$ 은 식(1)로 표현할 수 있다.

$$v_{1st\_eff} = v_{1st}^* - \frac{t_{dead}}{T_s} V_{dc} \quad (1)$$

그림 2에서 전압 변조 주기 동안의 평균 입력전류  $|i_{dc}|$ 는 식(2)와 같고 유효벡터의 인가 시간  $T_A$ ,  $T_B$ 는 식(3), (4)와 같이 표현되며 이를 식(2)에 대입하여 정리하면 전압 변조 주기 동안의 평균 입력전력  $|P_{in}|$ 을 식(5)와 같이 구할 수 있다.

$$|i_{dc}| = \frac{T_A}{T_s} (i_{1st\_T_A\_mid}) + \frac{T_B}{T_s} (-i_{3rd\_T_B\_mid}) \quad (2)$$

$$T_A = \frac{(v_{1st\_eff} - v_{2nd\_eff})}{V_{dc}} T_s \quad (3)$$

$$T_B = \frac{(v_{2nd\_eff} - v_{3rd\_eff})}{V_{dc}} T_s \quad (4)$$

$$|P_{in}| = V_{dc} |i_{dc}| \quad (5)$$

$$= (v_{1st\_eff} - v_{2nd\_eff})(i_{1st\_T_A\_mid}) + (v_{2nd\_eff} - v_{3rd\_eff})(-i_{3rd\_T_B\_mid})$$

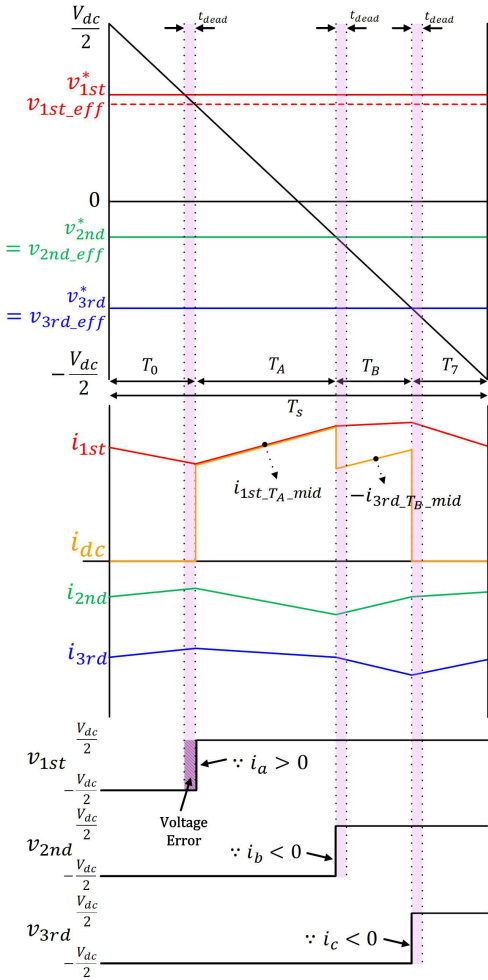


그림 2 전압 변조 주기 동안의 극전압과 상전류 및 입력전류

식(5)를 통해 알 수 있듯이, 출력 극전압 및 각 유효벡터 중간 지점에서의 상전류를 알면 평균 입력전력을 추정할 수 있다. 각 유효벡터 중간 지점에서의 상전류는 삼각파의 꼭지점에서 샘플링한 상전류와 교류 전동기의 동기 좌표계 이산모델을 이용하여 예측할 수 있다. 영구자석 동기 전동기의 경우 예측 전류 모델은 식(6), (7)과 같다.

$$i_{ds-T^*} = i_{ds\_samp} \quad (6)$$

$$+ \frac{T^*}{L_{ds}} (\langle v_{ds} \rangle - R_s i_{ds\_samp} + \omega_r L_{qs} i_{qs\_samp})$$

$$i_{qs-T^*} = i_{qs\_samp} \quad (7)$$

$$+ \frac{T^*}{L_{qs}} (\langle v_{qs} \rangle - R_s i_{qs\_samp} + \omega_r (L_{ds} i_{ds\_samp} + \lambda_{PM}))$$

여기서  $i_{dqs\_samp}$ 는 삼각파의 꼭지점에서 샘플링한 d, q축 전류,  $T^*$ 는 전류 예측 시점,  $\langle v_{dqs} \rangle$ 는  $T^*$  동안 인가되는 d, q축 평균 전압,  $i_{dqs-T^*}$ 는  $T^*$  시점에서 예측된 d, q축 전류를 나타낸다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험 결과

제안된 입력전력 추정 기법의 유효성을 검증하기 위해 정격 속도 2000r/min, 정격토크 4.77N·m의 1kW SPMSM을 대상으로 시뮬레이션 및 실험을 진행하였다. 그림3은 정격속도에서 구동 중 부하 변동 시 추정된 입력전력의 시뮬레이션 결과를 보여주며 갑작스러운 부하변동에도 입력전력을 잘 추정한다.

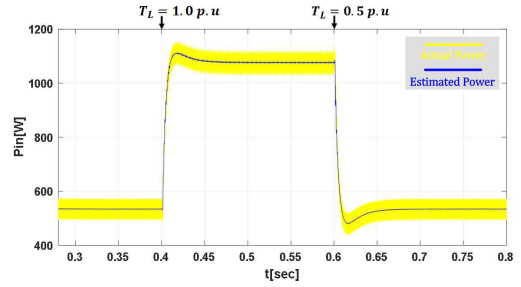


그림 3 인버터의 입력전력 추정 시뮬레이션 결과

그림 4와 5는 다양한 조건에서 전동기 구동 시 인버터의 입력전력 추정 실험 결과를 나타낸다. 다양한 구동 상황에서 추정된 입력전력은 실제값을 잘 추정하는 것을 확인할 수 있다.

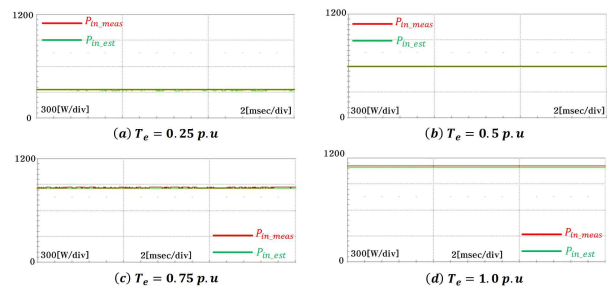


그림 4 정격속도(2000r/min)에서 인버터의 입력전력 추정 실험 결과

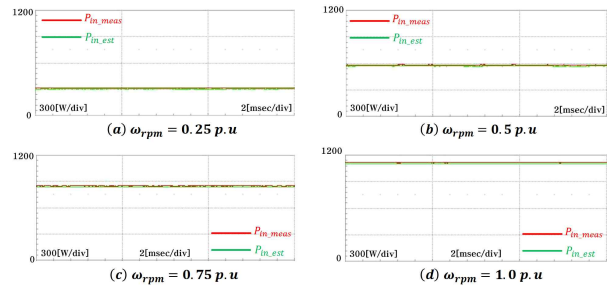


그림 5 정격토크(4.77N·m)에서 인버터의 입력전력 추정 실험 결과

## 4. 결론

본 논문에서는 교류 전동기 구동 시스템에서 인버터의 입력전력 추정 기법을 제안하였다. 제안된 기법은 입력전류 센서를 사용하지 않고 상전류 및 인버터 스위칭 패턴을 이용하여 입력전력을 추정하는 방법이다. 제안된 기법의 유효성을 1kW SPMSM에 대한 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다.

본 연구는 에너지기술평가원(에너지기술개발사업 산업기술혁신사업 : 과제번호 20183010140980)의 지원으로 수행되었습니다.

## 참고 문헌

- [1] A. Balamurali, et al., "Maximum efficiency control of PMSM drives considering system losses using gradient descent algorithm based on DC power measurement," *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 33, No. 4, pp. 2240-2249, Dec. 2018.
- [2] S. H. Kim, *Electric Motor Control, DC AC and BLDC Motors*, Elsevier Inc., Ch. 7, 2017.