

# PMSM 파라미터 변화에 영향을 받지 않는 데드타임 보상기법

박동민·김경화 \*

서울과학기술대학교 전기공학과

## Dead Time Compensation Scheme Insensitive to PMSM Parameter Variations

Dong-Min Park, Kyeong-Hwa Kim \*

Department of Electrical Engineering, Seoul National University of Science and Technology

### ABSTRACT

PMSM 구동을 위한 PWM 인버터에서는 DC 링크의 단락으로 인한 스위칭 소자의 과피를 방지하기 위하여 인버터에 데드타임을 적용하며, 이는 인버터의 출력 전압과 전류 왜곡, 토크 리플을 일으키는 원인이 된다. 이러한 문제를 해결하기 위해 파라미터 변화에 무관한 데드타임 보상기법이 제안되며 제안된 기법의 타당성이 시뮬레이션을 통해 입증된다.

### 1. 서론

인버터 한 arm에서 두 스위치가 동시에 도통 되면 전력소자가 파괴가 될 수 있다. 이를 방지하기 위해 데드타임을 사용하는데, 이 구간 동안 두 스위치는 모두 turn off 된다. 이는 인버터 출력 전압 왜곡과 토크 리플을 발생하는 원인이 된다.<sup>[1]-[4]</sup>

본 논문에서는 파라미터 변화에 무관한 데드타임 보상기법을 제시한다. MRAC 기법으로 추정된 외란에는 파라미터 변화와 인버터 비선형성에 의한 외란을 모두 갖고 있으며 이 때 데드타임 및 인버터 비선형성에 의한 외란은 6차 고조파 성분으로 나타나게 된다. 파라미터 변화에 무관하게 데드타임 및 인버터 비선형성을 보상하기 위하여 6차 고조파 성분이 고조파 해석을 통하여 구해지며 구해진 외란 성분은 정지 좌표계 상에서 외란이 보상되도록 제어가 설계된다.

### 2. 데드타임 분석

데드타임과 인버터 비선형성에 의한 a상의 외란전압은 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$V_{a,dead} = V_{dead} \cdot \text{sgn}(i_{as})$$

(1)

여기서  $\text{sgn}(i_{as})$ 는 부호함수이며,  $V_{dead}$ 는 스위칭 소자의 전압 강하, turn on 및 off 시간을 고려하여 다음과 같이 쓸 수 있다.<sup>[3]</sup>

$$V_{dead} = \frac{T_{dead} + T_{on} - T_{off}}{T_s} \cdot (V_{dc} - V_{sat} + V_d) + \frac{V_{sat} + V_d}{2}$$

여기서  $T_s$ 는 PWM 주기,  $T_{dead}$ 는 데드타임,  $T_{on}$ ,  $T_{off}$ 는 스위칭 소자의 on, off time,  $V_{dc}$ 는 DC 링크 전압,  $V_{sat}$ 은 소자의

포화전압강하,  $V_d$ 는 다이오드의 전압 강하를 나타낸다.

### 3. MRAC 전류 제어

Nominal 값을 사용한 PMSM의 전압 방정식은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{bmatrix} v_{qs} \\ v_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + L_s s & L_s \omega_e \\ -L_s \omega_e & R_s + L_s s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \lambda_m \omega_e + f_{qs} \\ f_{ds} \end{bmatrix}$$

여기서  $f_{qs}$ 와  $f_{ds}$ 는 파라미터 변화에 의한 외란 성분을 나타내고 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$\begin{bmatrix} f_{qs} \\ f_{ds} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \Delta R_s + \Delta L_s s & \Delta L_s \omega_e \\ -\Delta L_s \omega_e & \Delta R_s + \Delta L_s s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{qs} \\ i_{ds} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \Delta \lambda_m \omega_e \\ 0 \end{bmatrix}$$

PMSM의 파라미터 변화 시  $f_{qs}$ 와  $f_{ds}$ 는 제어 모델에 외란으로 작용하며 MRAC 제어 기법을 통해 가변 모델과 기준 모델의 오차를 이용하면 다음과 같이 외란 추정을 위한 적용 규칙을 구할 수 있다.

$$\hat{f}_{ds} = (k_1 + k_2/s) \cdot (-e^T P B_1)$$

$$\hat{f}_{ds} = (k_1 + k_2/s) \cdot (-e^T P B_2)$$

### 4. 데드타임 보상 기법

데드타임과 인버터 비선형성에 의한 외란 전압은 동기 좌표계에서 6차 고조파 성분이 큰 주기적인 파형 특성이 있다<sup>[3]</sup>. 따라서 동기 좌표계에서는 지속적으로 변하는 주기 파형을 추종해야 하는 어려움이 있으므로 본 논문에서는 변화가 급격하지 않는 slowly-varying 특징을 갖는 정지 좌표계 상에서 데드타임과 인버터 비선형성에 의한 외란을 추정하고 dq 변환을 통해 이를 보상하고자 한다.

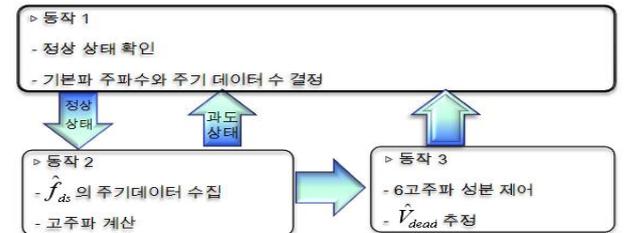


그림 1 동작 모드

Fig. 1 Operating mode

그림 1은 제안된 데드타임 및 인버터 비선형성의 추정 방식

\* 교신저자, k2h1@seoultech.ac.kr

을 나타낸다. 동작 1에서는 현재속도와 이전 스텝의 속도를 비교하여 정상상태에 도달 하였는지를 다음과 같이 비교한다.

$$|\omega_r - \omega_{r,prev}| \leq |0.01 \cdot \omega_{r,prev}| \quad (7)$$

동작 2에서는  $\hat{f}_{ds}$ 의 주기데이터를 수집하여 고조파를 계산한다. 동작 3에서는  $\hat{f}_{ds}$ 에서 구해진 6차 고조파 성분의 크기가 0으로 유지되도록 PI제어를 통해  $\hat{V}_{dead}$ 을 추정한다.

$$\hat{V}_{dead} = (k_P + k_I/s) \cdot (0 - h_{\hat{f}_{d6}}) \quad (8)$$

## 5. 시뮬레이션 결과

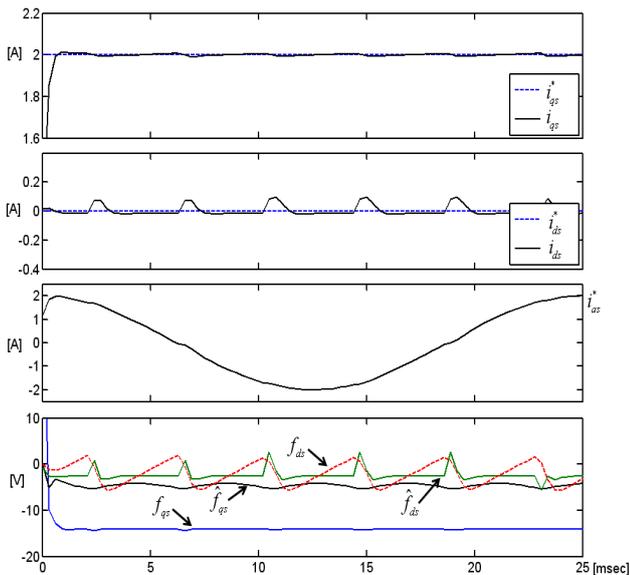
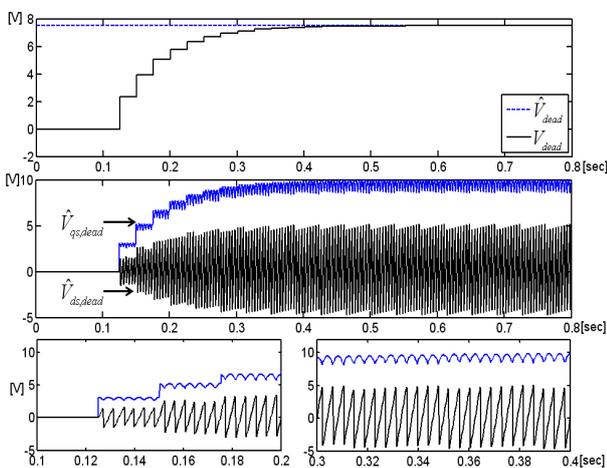


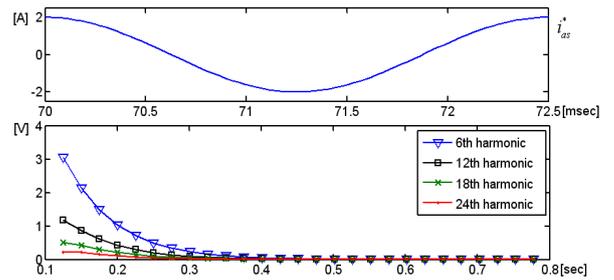
그림 2 파라미터 변화와 데드 타임이 존재할 때의 MRAC전류 제어 성능(1200 rpm)

Fig. 2 Performance of MRAC current control under both the parameter variations and inverter dead time(1200 rpm)

제안된 데드타임 보상 기법을 입증하기 위해 시뮬레이션 결과가 제시된다. 그림 2는 파라미터 변화와 데드타임이 동시에 존재할 때의 MRAC 전류 제어 성능을 나타낸다. 데드 타임과 인버터의 비선형성에 의해 주기적인 외란 전압이 파라미터 변화와 함께 dq축에 작용하여 q축, d축 및 상전류에 6차 고조파 성분의 리플이 나타남을 볼 수 있고, 외란과 외란의 추정치에 차이가 일어남을 확인할 수 있다.



(a) 데드타임에 의한 외란 추정



(b) 상전류 응답과 고조파 변화

그림 3 파라미터 변화에서 제안된 방식의 전류 제어 성능 (1200 rpm)

Fig. 3 Performance of the proposed control scheme under both the parameter variations and inverter dead time(1200 rpm)

그림 3은 파라미터 변화와 데드타임이 동시에 존재할 때의 제안된 방식의 전류 제어 성능을 나타낸다. 그림 3(a)는 데드타임과 인버터 비선형성에 의한 외란 추정을 나타내며 추정은 0.1초에서 시작하게 된다. 외란 추정이 시작되는 순간 모든 전류 오차 및 리플이 줄어들고  $\hat{f}_{qs}$ ,  $\hat{f}_{ds}$ 가 실제 외란에 수렴하는 것을 확인할 수 있다. 그림 3(b)는  $\hat{f}_{ds}$ 의 주요 고조파인 6의 배수 고조파가  $\hat{V}_{dead}$ 가 추정되어 보상됨에 따라 시간이 지날수록 줄어드는 모습을 보여준다.

## 6. 결론

본 논문에서는 파라미터 변화에도 영향을 받지 않는 데드타임 보상기법이 제안된다. 파라미터의 변화에 의한 성분이나 데드타임 및 인버터의 비선형성에 의한 성분 모두 외란의 형태로 나타내며 이는 동기 좌표계에서 6차 고조파 성분을 가져 이를 실시간으로 추정하기가 어렵다. 추정된 외란 성분에서 고조파 해석을 통해 6차 고조파 성분을 직접 추출하고 정지좌표계 상에서 이를 보상하는 방식을 사용함으로써 제안된 기법은 파라미터 변화 시에도 데드타임 및 인버터의 비선형성을 정확히 추정하여 보상할 수 있다.

## 참고 문헌

- [1] H. W. Kim, M. J. Youn, K. Y. Cho, and H. S. Kim, "Nonlinearity estimation and compensation of PWM VSI for PMSM under resistance and flux linkage uncertainty", IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 14, no. 4, pp.589-601, 2006.
- [2] S. H. Hwang, and J. M. Kim, "Dead time compensation method for voltage-fed PWM inverter", IEEE Trans. Energy Conv., vol. 25, no. 1, pp. 1-10, 2010.
- [3] H. S. Kim, K. H. Kim, and M. J. Youn, "On-line dead-time compensation method based on time delay control", IEEE Trans. Contr. Syst. Technol., vol. 11, no. 2, pp. 279-285, 2003.
- [4] S. Y. Kim, W. Lee, M. S. Rho, and S. Y. Park, "Dead time compensation method for voltage-fed PWM inverter", IEEE Trans. Ind. Elec., vol. 57, no. 5, pp. 1609 - 1614, 2010.