

# 근사 전압함수를 기반으로 하는 PMSM의 6-섹터방식의 DTC-PWM 제어 방식

곽윤창, 이동희

경성대학교 메카트로닉스 공학과

## A DTC-PWM Control Scheme of PMSM based on an Approximate Voltage Function

YUNCHANG KWAK, DONG-HEE LEE

Dept. of Mechatronics Engineering Kyungshung University

### ABSTRACT

본 논문에서는 직접토크 제어에서 자속과 토크의 오차에 따라 결정된 전압벡터와 회전자 위치에 따른 실제 인가될 수 있는 d q축 전압을 근사 전압함수로 근사화하여, 자속 및 토크오차와 전동기의 속도에 따라 듀티비를 결정하는 방식을 제안한다. 이러한 방식은 선택된 전압벡터가 일정한 상수 크기의 전압을 인가하는 것으로 가정된 기존의 직접토크 제어 방식에 비해 정밀한 전압 기준을 바탕으로 펄스폭의 듀티비를 결정함으로써, 동일한 스위칭 주파수 내에서 토크 및 자속오차의 크기를 감소 시킬 수 있는 장점이 있다.

### 1. 서론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 출력 대비 크기가 매우 작고, 효율이 높으며, 제어 성능이 매우 우수하여 산업용 제어장치, 로봇 분야 및 고정밀 제어 장치 등에 널리 사용되고 있다[1 2]. PMSM의 높은 제어성능을 위한 토크 제어 방식은 벡터제어(Vector Control)과 직접토크제어(DTC, Direct Torque Control) 방식이 사용되고 있다. [1 3].

본 논문에서는 직접토크 제어에서 자속과 토크의 오차에 따라 결정된 전압벡터와 회전자 위치에 따른 실제 인가될 수 있는 d q축 전압을 근사 전압함수로 근사화하여, 자속 및 토크오차와 전동기의 속도에 따라 듀티비를 결정하는 방식을 제안한다. 제안된 방식에서 선택된 전압벡터는 한 샘플링 구간동안 발생할 수 있는 두 개의 전압 성분으로 근사화 되고, 이 근사 전압함수는 자속오차와 토크 오차를 감소시키기 위한 듀티비의 연산에서 분모성분으로 사용된다. 이러한 방식은 선택된 전압벡터가 일정한 상수 크기의 전압을 인가하는 것으로 가정된 기존의 직접토크 제어 방식에 비해 전압 기준을 바탕으로 펄스폭의 듀티비를 결정함으로써, 동일한 스위칭 주파수 내에서 토크 및 자속오차의 크기를 감소 시킬 수 있는 장점이 있다. 제안된 방식은 비교 실험을 통하여 그 유효성을 검증하였다.

### 2. 직접 토크제어 방식의 인가 전압 해석

PMSM의 자속 및 토크 특성은 벡터제어 이론에서 d q축으로 분리된 자속성분 전류  $i_{dr}$  과 토크성분 전류  $i_{qr}$  에 의해 해

석될 수 있다. 이때, 토크성분 전류  $i_{qr}$  은 전동기의 토크를 발생하는 전류 성분에 해당하고,  $i_{dr}$  은 회전자의 영구자석의 자속성분  $\Psi_m$  에 자속을 더하거나 감소시키는 성분으로 작용하게 된다. PMSM에서 두 성분의 전류를 발생시키기 위한 전압은 순시 전압방정식으로 다음과 같다 [2].

$$v_{dr} = R_s \cdot i_{dr} + L_s \frac{di_{dr}}{dt} - L_s \cdot \omega_{re} \cdot i_{qr} \quad (1)$$

$$v_{qr} = R_s \cdot i_{qr} + L_s \frac{di_{qr}}{dt} + L_s \cdot \omega_{re} \cdot i_{dr} + K_e \cdot \omega_{re} \quad (2)$$

그림 1은 각 섹터의 전압 해석 결과이다. 회전자 위치에 따라  $v_{qr}$  은  $0.408 V_{dc}$  에서  $0.816 V_{dc}$  사이에서 변동되고,  $v_{dr}$  은 0 에서  $0.7071 V_{dc}$  사이에서 변동하게 된다.

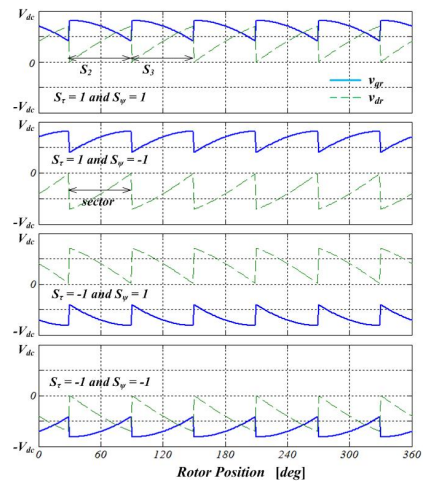


그림 1. 전압벡터의 각 섹터에서의 d-q축 전압 성분 해석  
Fig. 1 The d-q axis voltages of selected voltage vector

이때, 각 d q축으로 해석된 전압은 토크오차 및 자속오차의 부호와 회전자 위치에 따라 규칙적으로 변동하게 된다. 따라서, 매 샘플링 구간에서 선택된 전압을 인가하더라도, 일정한 성분의 전압이 인가되지 않고, 회전자 위치에 따라 다른 크기의 전압 성분이 인가된다. 특히, 각 섹터가 변동하는 교차점 부근에서는 낮은 q축 전압과 영전압 근처의 d축 전압이 인가되어 원하는 크기의 자속 및 토크를 생성하기에 부족할 수 있으며, 높은 q축 전압과 높은 d축 전압은 높은 자속 및 토크 리플을 만들게 된다.

### 3. 제안된 근사전압함수에 의한 듀티비 연산 방식

본 논문에서는 전압벡터의 d q축 전압 성분을 근사 2차 함수로 하여, 자속오차와 토크오차에 따라 듀티비를 연산하는 방식이다. 제안된 방식에서 섹터에서 선택된 전압벡터는 부호를 제외하고는 회전자 위치에 따라 매우 규칙적인 2차 함수의 일부 구간으로 표현될 수 있다. 각 섹터 구간에서의 회전자 위치를  $\theta_{rc}$ 라고 가정하는 경우에 섹터 회전각도  $\theta_s$ 는 다음과 같이 결정된다.

$$\theta_s = \theta_{rc} - \left( (N_s - 1) \cdot \frac{\pi}{6} \right) \quad (3)$$

이때, 각 섹터에서 토크 및 자속 오차의 부호에 따라 선택된 전압벡터는 정해지기 때문에, 근사전압 함수는 절대치로 하여 다음과 같이 근사화 할 수 있다.

$$V_{db}(\theta_s) = (a_d \cdot \theta_s^2 + b_d \cdot \theta_s + c_d) \times V_{dc} \quad (4)$$

$$V_{qb}(\theta_s) = (a_q \cdot \theta_s^2 + b_q \cdot \theta_s + c_q) \times V_{dc} \quad (5)$$

단,  $V_{db}(\theta_s)$ 와  $V_{qb}(\theta_s)$ 는 섹터 회전각도  $\theta_s$ 에 따른 d축과 q축 성분의 근사전압함수를 의미한다. 표 1은 섹터 회전각도  $\theta_s$ 와 자속 및 토크 조건에 따른 d q축 근사 2차 전압 함수의 계수를 나타내고 있다.

표 1 섹터 회전각도에 따른 d-q축 근사전압 함수 계수  
Table 1 The coefficients of d-q axis approximate voltages

Conditions		Coefficients of $V_{db}$		
$s_\psi$	$s_\tau$	$a_d$	$b_d$	$c_d$
1	1	0.19712889	0.90123533	0.02193438
1	1	0.20317970	0.46811458	0.72105792
1	1	0.20317970	0.46811458	0.72105792
1	1	0.19712889	0.90123533	0.02193438

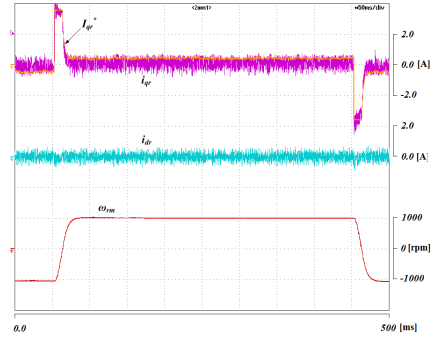
본 논문에서 자속오차 및 토크오차의 부호  $s_\psi$  및  $s_\tau$ 만을 사용하는 기존 직접토크 제어 방식[2]과 자속오차 및 토크오차에 대한 일정한 상수 비례 방식으로 듀티비를 연산하는 DTC PWM[3]와 달리, 자속오차 및 토크오차의 부호를 통하여 인가해야 하는 전압벡터를 결정하게 되지만, 자속오차 및 토크오차와 근사전압함수의 비를 통하여 듀티비를 결정하도록 하였다.

$$d = C_\psi \cdot \frac{|\Delta\psi_m|}{V_{db}(\theta_s)} + C_T \cdot \frac{|\Delta T_m|}{V_{qb}(\theta_s)} + \frac{|\omega_{rc}|}{C_\omega} \quad (6)$$

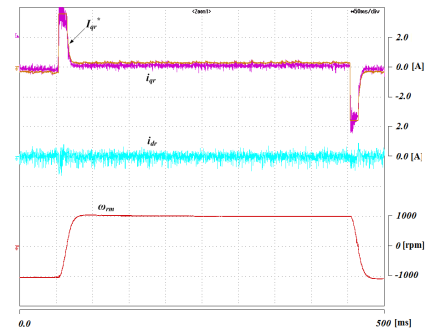
단,  $C_\psi$ ,  $C_T$  및  $C_\omega$ 는 자속과 토크 및 속도 비례 상수를 나타내고 있으며,  $\Delta T_m$ 과  $\Delta\psi_m$ 은 토크 및 자속오차 성분을 의미하며,  $V_{db}(\theta_s)$ 와  $V_{qb}(\theta_s)$ 는 근사 전압 함수를 의미한다.

### 4. 실험결과

본 논문에서는 기존 DTC PWM 방식과 제안된 DTC PWM 방식을 비교하였다.



(a) Conventional DTC-PWM method



(b) The proposed method

그림 2. 실험결과

Fig. 2 Compared experimental results

### 5. 결론

본 논문에서는 PMSM의 직접 토크제어를 위한 기존의 DTC PWM 방식을 개선하는 근사전압함수를 고려한 DTC PWM방식을 제안하였다. 제안된 DTC PWM 방식은 각 전압 벡터의 d q축 전압을 2차 함수로 근사화하여 자속 및 토크 오차에 따라 섹터 내에서 균일한 전압이 인가되도록 듀티비가 가변하게 되므로 토크 및 자속의 리플을 감소 시킬수 있다.

제안된 DTC PWM방식은 실험을 통해 그 유효성을 검증하였다.

이 논문은 교육과학기술부와 한국연구재단의 지역혁신인력양성사업(2011 07 대 01 031)의 지원으로 수행되었습니다.

### 참고 문헌

- [1] C. French and P. Acarnley, "Direct torque control of permanent magnet drives," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA 32, pp. 1080-1088, Sept./Oct. 1996.
- [2] M. Depenbrock, "Direct self control of inverter fed machine," IEEE Trans. Power Electron., vol. 3, pp. 420-429, Oct. 1988.
- [3] Yongchang Zhang, Jianguo Zhu, "Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor With Reduced Torque Ripple and Commutation Frequency", Power Electronics, IEEE Transactions, Jan. 2011, vol.26, pp. 235-248