

PMSM의 DTC-PWM 방식에 의한 고성능 토크 제어

왕혜균, 이상훈, 이동희, 안진우
경성대학교 전기전자 메카트로닉스 공학부

A High Performance Torque Control of PMSM using DTC-PWM Method

Huijun Wang, Sang-Hun Lee, Dong-Hee Lee, Jin-Woo Ahn
Dept. EE and Mechatronics of Kyung Sung University

ABSTRACT

In this paper, an advanced DTC(Direct Torque Control) scheme for PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) is presented. The proposed DTC method uses a conventional torque estimator and torque error. But the switching signal is generated by PWM method according to the switching rules and torque error. A simple calculation of PMW without any complex determination of space vector can assure the constant switching frequency with an excellent control performance.

The proposed torque control scheme for PMSM is verified by computer simulation.

1. 서론

PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor)은 고효율 특성과, 높은 토크 및 제어성으로 인하여 산업용, 가정용 및 로봇 응용 분야에 널리 적용되고 있다^{[1]-[4]}.

PMSM이 적용되는 응용 분야의 특성 상, 높은 제어성을 구현하기 위한 다양한 연구들이 진행 되었는데^[3-8], 그 중에서 가장 일반적으로 적용되고 있는 것이 PI 전류 제어기를 포함하는 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) 방식이다. SVPWM 방식의 우수성에도 불구하고, PMSM의 전체 제어 성능은 PI 제어기의 제어 이득에 의존적이며, 또한 공간 벡터의 복잡한 계산이 요구되는 단점이 있다. 이러한 복잡한 계산이나 제어 이득의 산정 없이 PMSM의 토크를 직접 제어하기 위한 DTC(Direct Torque Control) 방식이 연구되었다.

DTC 방식은 SVPWM에 비해 매우 간단한 구조를 가지며, PI 제어기와 같은 제어 이득의 산정이 별도로 필요하지 않는 반면에, 토크 리플은 오차 대역의 설정에 의존적이다. 따라서, 고성능 토크 제어를 위해서는 매우 높은 스위칭 주파수 및 샘플링이 필요하며, 운전 조건에 따라 스위칭 주파수가 랜덤하게 나타나는 단점이 있다. 이러한 스위칭 주파수의 불규칙으로 인하여 EMI/EMC를 억제하기 위한 라인 필터의 설계를 매우 어렵게 하는 문제를 야기 시킨다.

본 논문에서는 이러한 DTC의 문제를 해결하기 위한 개선된 DTC-PWM 방식을 제안한다. 제안하는 DTC-PWM 방식은 기존의 DTC 방식에서 적용하는 토크 추정기를 적용하고 있으며, 토크 지령치와 토크 추정치의 오차를 사용한다. 하지만 기

존의 DTC 방식과 달리 스위칭 패턴은 스위칭 규칙과 토크 오차에 따라 스위칭의 펄스폭을 가변하는 구조로 설계된다. 이때, 스위칭 펄스폭의 결정은 매우 간단한 수식에 의해 결정되므로, 공간 벡터의 계산과 같은 복잡한 연산이 요구되지 않는다. 또한 기존의 DTC에서 발생하는 불규칙적인 스위칭 주파수 대신에 PWM 방식에 의해 인버터가 구동하므로, 규칙적인 스위칭 주파수를 가질 수 있다.

한편, 제안된 DTC-PWM 방식의 기본 구조는 기존의 DTC와 동일하게 설계되므로, 별도의 제어 이득의 산정이 요구되지 않고, 인버터가 구동 가능한 최대의 응답성을 가질 수 있는 장점이 있다.

제안된 DTC-PWM 방식에 의한 PMSM의 토크 제어 특성은 컴퓨터 시뮬레이션을 통하여 검증하였으며, 차후 실험을 통하여 그 결과를 비교하고자 한다.^[1]

2. PMSM의 직접 토크제어 방식

그림 1은 PMSM의 토크 제어를 위한 기존의 DTC 방식의 제어 블록도를 나타내고 있다.

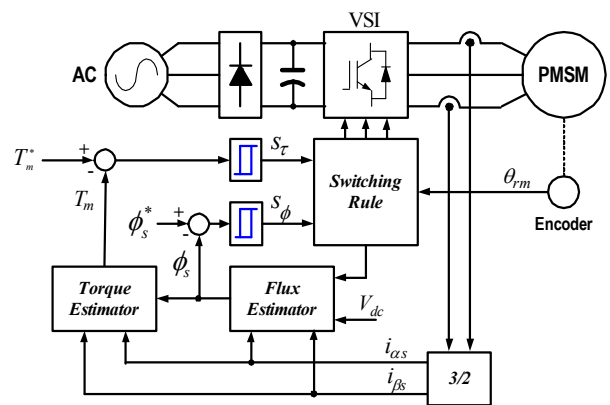


그림 1 PMSM의 일반적인 DTC 제어 블록도
Fig. 1 A conventional DTC block diagram of PMSM

PMSM의 토크는 회전자 위치의 따라, 자속이 일정한 토크를 발생하도록 제어해야 한다. 그림 1에서 자속 추정기(Flux Estimator)는 전압과 전류로부터 PMSM의 공간 자속을 추정하는 블록으로, 자속의 추정은 다음과 같다.

$$\psi_{\alpha s} = \int (v_{\alpha s} - R_s \cdot i_{\alpha s}) \cdot dt \quad (1)$$

$$\psi_{\beta s} = \int (v_{\beta s} - R_s \cdot i_{\beta s}) \cdot dt \quad (2)$$

$$\psi_s = \sqrt{\psi_{\alpha s}^2 + \psi_{\beta s}^2} \quad (3)$$

단, $\psi_{\alpha s}, \psi_{\beta s}$: 고정자 쇄교 자속(αs 및 βs 축)

ψ_s : 공간 자속

$i_{\alpha s}, i_{\beta s}$: PMSM의 고정자 전류

$v_{\alpha s}, v_{\beta s}$: PMSM의 고정자 전압

R_s : 전기자 저항

또한, PMSM의 토크는 다음과 같이 연산된다.

$$T_m = \frac{3}{2} \cdot \frac{p}{2} \cdot (\psi_{\alpha s} \cdot i_{\beta s} - \psi_{\beta s} \cdot i_{\alpha s}) \quad (4)$$

단, T_m : PMSM의 토크 [Nm]

p : PMSM의 극수

추정된 토크는 토크 지령치와 비교하여, 자속의 영역에 따라 샘플링 주기 동안 스위칭 규칙에 따라 인버터의 스위치를 제어하게 된다. 그림 1의 제어 블록도에서 s_τ 및 s_ψ 는 토크 및 자속 오차의 부호를 나타내며, 각각 1과 -1로 표현된다.

고정자 쇄교자속을 제어하기 위한 3상 인버터의 벡터는 그림 2와 같다.

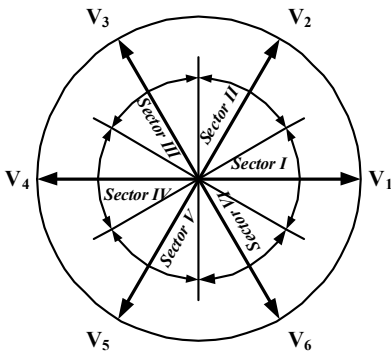


그림 2 자속 제어를 위한 인버터 전압 벡터

Fig. 2 The voltage vector for stator flux linkage

그림 2에서 Sector I ~ Sector VI는 각각 쇄교 자속의 구간을 나타내며, V1 ~ V6는 전압형 3상 인버터의 전압 벡터를 나타낸다. 쇄교자속의 제어는 각 쇄교 자속 구간에 인접한 두 전압 벡터의 스위칭에 의해 제어되며, 각 구간에서 쇄교자속과 토크 오차의 부호에 따른 스위칭 벡터는 다음 표 1과 같다.

표 1 PMSM의 DTC 방식에서의 스위칭 규칙

Table 1 Switching rule for DTC PMSM

s_ψ	s_τ	쇄교 자속의 섹터					
		I	II	III	IV	V	VI
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	-1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
-1	1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

3. 제안된 DTC-PWM 방식

그림 3은 본 논문에서 제안된 DTC-PWM 방식의 제어 블록도를 나타내고 있다.

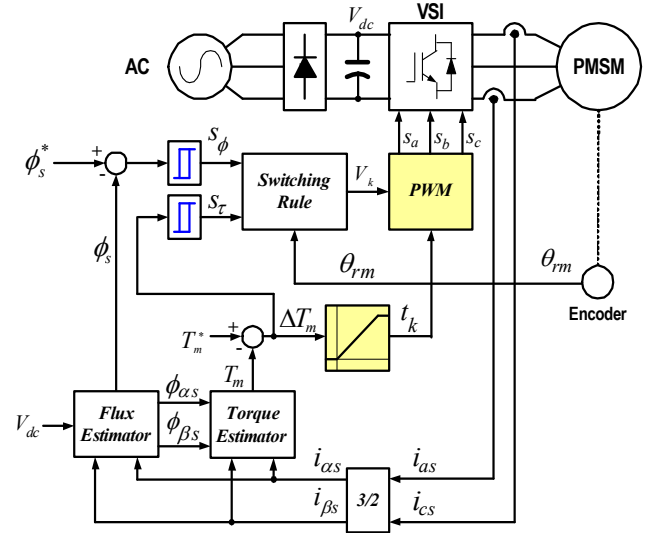


그림 3 제안된 DTC-PWM 방식의 제어 블록도

Fig. 3 A block diagram of the proposed DTC-PWM method

그림 3에서 제안된 DTC-PWM 방식은 기존의 DTC 방식에서 적용하고 있는 자속 추정기와 토크 추정기 및 비교기를 적용하고 있으나, 스위칭 규칙으로부터 각 샘플링 주기 동안에 적용 될 스위칭 벡터 V_k 와 토크 오차 ΔT_m 에 따른 스위칭 시간 t_k 에 따라 인버터의 스위칭을 결정하게 된다. 기존의 DTC 방식에서는 샘플링 주기 T_s 동안 하나의 스위칭 벡터를 일정하게 인가하는 방식에서 제안된 방식에서는 샘플링 주기내에서 토크 오차에 따라, 전압 벡터의 인가 시간이 연속적으로 제어된다. 이때, 전압 벡터의 결정은 표 1과 같이 기존의 DTC 방식과 같이 간단하게 결정되며, 스위칭 시간 t_k 는 토크 오차에 따라 비례하도록 다음과 같이 구해진다.

$$t_k = \begin{cases} \frac{\Delta T_m}{T_H} & \text{when } \Delta T_m < T_H \\ T_s & \text{when } \Delta T_m \geq T_H \end{cases} \quad (5)$$

$$t_0 = T_s - t_k \quad (6)$$

단, t_0, t_k : 유효벡터 및 제로벡터의 스위칭 시간

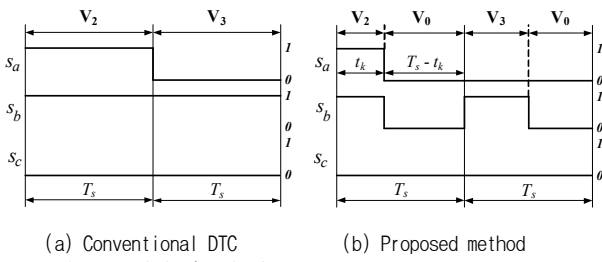
T_s : 샘플링 시간

ΔT_m : 토크 오차

T_H : 토크 대역폭

즉, 제어기의 샘플링 주기 내에서, 토크 오차에 따라 유효 벡터 V_k 와 영벡터 V_0 의 스위칭 폭을 연속적으로 제어함으로써, 토크의 리플을 억제할 수 있으며, 유효 벡터의 인가 시간을 샘플링 주기 내로 제한 함으로써, 일정한 스위칭 주파수를 구현 할 수 있다.

그림 4는 기존의 DTC 방식과 제안된 DTC-PWM 방식에서의 스위칭 신호를 비교하고 있다.



(a) Conventional DTC (b) Proposed method

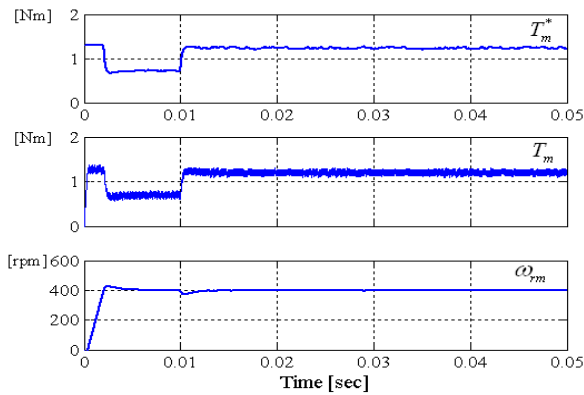
그림 4 스위칭 신호의 비교

Fig. 4 Comparisons of switching signals

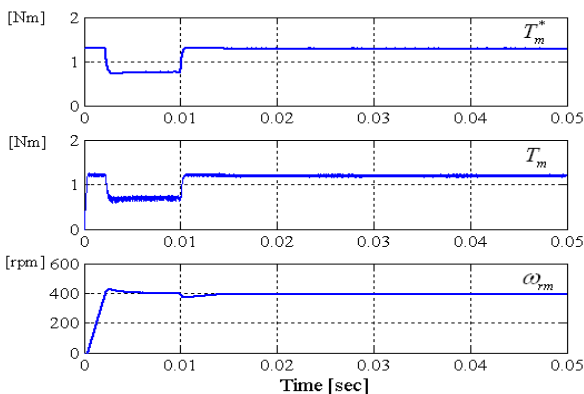
그림 4(a)에서 기존의 DTC 방식은 샘플링 주기 T_s 에서 하나의 유효 벡터를 연속적으로 스위칭하고, 제안된 방식에서는 토크 오차에 따라 유효벡터와 영벡터의 스위칭 폭을 제어하도록 인버터를 구동한다.

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 DTC-PWM 방식의 유효성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 적용된 PMSM의 모델은 3상 400[W]로, 정격 토크가 1.27[Nm]이며, 정격속도는 3,000[rpm]이다.



(a) Conventional DTC method



(b) The proposed DTC-PWM method

그림 5 시뮬레이션 비교 결과

Fig. 5 Compared simulation results

그림 5는 기존의 DTC와 제안된 방식의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 토크 추정기는 50[us]이며, 스위칭 주기는 100[us]로 설계하였다.

그림 5의 시뮬레이션 결과에서, 제안된 DTC-PWM 방식의 경우에 같은 스위칭 주파수에서 낮은 토크 리플과 일정한 스위칭 주파수를 가지는 것을 확인 할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 PMSM의 직접 토크제어를 위한 기존의 DTC 방식을 개선하는 DTC-PWM 방식을 제안하였다. 제안된 DTC-PWM 방식은 토크 오차에 따라, 유효 벡터의 스위칭 시간을 제어함으로써, 구조가 매우 간단하면서도 기존의 DTC 방식이 가지고 있던 랜덤한 스위칭 주파수 문제와 제어 성능을 높이기 위해 요구되는 매우 짧은 제어 주기의 문제를 해결 할 수 있었다. 또한 펄스 폭 제어에 의해, 토크 리플의 크기를 기존의 DTC 방식에 비해 크게 감소 시킬 수 있는 장점을 가진다.

제안된 DTC-PWM 방식은 시뮬레이션을 통하여 그 유효성을 검증하였으며, 차후 비교 실험을 수행할 계획이다.

참고 문헌

- [1] M. Depenbrock, "Direct self-control of inverter-fed machine," IEEE Trans. Power Electron., vol. 3, pp. 420-429, Oct. 1988.
- [2] I. Takahashi and T. Naguchi, "A new quick-response and high-efficiency control strategy of an induction motor," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. IA-22, pp. 820-827, Sept./Oct. 1986.
- [3] 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.
- [4] L. Zhong, M. F. Rahman, W. Y. Hu, and K. W. Lim, "Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives," IEEE Trans. Power Electron., vol. 12, pp. 528-536, May 1997.
- [5] M. F. Rahman, L. Zhong, and K. W. Lim, "A direct torque controlled interior permanent magnet synchronous motor drive incorporating field weakening," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 34, pp. 1246-1253, Nov./Dec. 1998.
- [6] I. Takahashi and T. Noguchi, "Take a look back upon the past decade of direct torque control," in Proc. IEEE-IECON'97 23rd Int. Conf., vol. 2, 1997, pp. 546-551.
- [7] D. Casadei, G. Serra, and A. Tani, "Implementation of a direct torque control algorithm for induction motors based on discrete space vector modulation," IEEE Trans. Power Electron., vol. 15, pp. 769-777, July, 2000.
- [8] C. G. Mei, S. K. Panda, J. X. Xu, and K. W. Lim, "Direct torque control of induction motor-variable switching sectors," in Proc. IEEE-PEDS Conf., Hong Kong, July 1999, pp. 80-85.