

PMSM의 자속-토크 밴드를 고려한 DTC-PWM 제어 방식

김승준, 박준휘, 김지원(전기연구원), 이동희
경성대학교 메카트로닉스 공학과

DTC-PWM control method of PMSM using the flux-torque Band

SeungJun Kim, JunHwi Park, Ji won Kim*, Dong Hee Lee
Kyungsung University, KERI(Korea Electrotechnology Research Institute)

ABSTRACT

This paper presents a DTC PWM(Direct Torque Control Pulse Width Modulation) method of PMSM(Permanent Magnet Synchronous Motor) using the flux torque hysteresis band. In order to keep the flux and torque error of the PMSM within the hysteresis band, the optimal PWM duty ratio is calculated by the error of the flux and torque with the flux and torque vector of the selected voltage vector. According to the flux duty ratios and the torque duty ratios, the optimized duty ratio to reduce the errors is selected by the calculated duty ratios. In the proposed method, the selected voltage vector is divided into d q axis components with a simple method. And the flux duty ratios and torque duty ratios are estimated by the applied voltage vector.

The proposed DTC PWM for PMSM was 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] [3]} PMSM이 적용되는 응용 분야의 특성상 높은 제어성을 구현하기 위한 다양한 연구들이 진행되었다.^{[4] [7]}

그 중에서 가장 일반적으로 사용되는 것이 PI 제어를 사용하는 SVPWM(Space Vector Pulse Width Modulation) 제어 방식이다. SVPWM 제어방식의 우수성에도 불구하고, PMSM의 전체 제어 성능은 PI 제어기의 제어 이득에 의존적이며, 또한 공간 벡터의 수식이 복잡한 계산을 요구하는 단점이 있다.

직접토크제어(Direct Torque Control)방식은 SVPWM 제어 방식과 달리 PI제어기와 같은 제어 이득의 산정이 별도로 필요하지 않으며 매우 간단한 구조를 가지지만, 운전 조건에 따라 스위칭 주파수가 불규칙하게 나타나는 단점이 있다. 그리고, 토크 리플의 크기는 제어 샘플링 주기 및 전동기의 운전상태와 링크단 전압의 크기에 의존적이다. 토크 리플을 감소시키기 위해서는 매우 짧은 제어 주기를 적용하여야 하며, 이에 따른 스위칭 손실이 증가하는 단점이 있다.

본 논문에서는 기존의 DTC 제어 방식의 불규칙적으로 발생

하는 스위칭 주파수 문제와 DTC SVM(Direct Torque Control Space Vector Modulation) 제어방식의 복잡한 연산방법을 사용하지 않는 개선된 DTC PWM 제어방식을 제안한다. 제안하는 DTC PWM(Direct Torque Control Pulse Width Modulation) 제어방식은 기존의 DTC 제어방식에의 토크 추정기와 자속 추정기를 적용하고, 토크, 자속 지령치와 토크, 자속 추정치의 오차를 사용한다. 하지만 기존의 DTC 제어방식과는 달리 자속과 토크 모두가 히스테리시스 밴드 내에 유지되며, 자속과 토크가 최적의 상태를 유지하기 위한 듀티비를 계산하는 제어방식이다. 이를 위해서 선택된 전압벡터는 듀티비에 따라 자속과 토크를 발생시킬 수 있도록 d q축 성분으로 분리하여 토크와 자속의 변화량을 추정하는 방식이 적용되었다. 또한 기존의 DTC 제어방식에서 발생하는 불규칙적인 스위칭 주파수 대신에 PWM 제어방식에 의해 인버터가 구동하므로, 규칙적인 스위칭 주파수를 가질 수 있다. 그리고, 기본 구조는 기존의 DTC 제어방식과 동일하게 설계되므로, 별도의 PI제어기와 같은 제어 이득의 산정이 요구되지 않고, 인버터가 구동 가능한 최대의 응답성을 가질 수 있는 장점이 있다.

제안된 DTC PWM 제어방식에 의한 PMSM의 토크, 자속 제어 특성은 컴퓨터 시뮬레이션을 사용하여 그 특성을 검증하였으며, 차후 실험을 통해 그 결과를 비교하고자 한다.

2. 직접토크 제어방식

PMSM의 토크는 쇄교자속과 상 권선의 전류에 의해 발생된다. 이때, 공극 쇄교자속은 주로 회전자의 영구자속으로부터 발생되고, 상권선의 전류 벡터에 따라 쇄교자속이 증가하거나 감소하게 된다. PMSM의 DTC 제어방식은 공극 쇄교자속을 일정하게 유지시키고, 토크가 지령치를 추종하는 방향으로 스위칭 패턴을 결정함으로써, 상권선 전류와 쇄교자속에 의한 토크가 지령치를 추종하도록 제어된다. 이때, 토크의 발생방향은 자속의 오차에 따라 달라지게 되므로, 스위칭 패턴은 같은 토크 오차에 대해서 달라지게 된다. 따라서, 직접토크 제어에서는 토크의 오차와 쇄교자속의 오차를 현재 전동기의 벡터에서 유효한 전압벡터를 교번적으로 스위칭 해야 하므로, 쇄교자속 및 토크 정보를 필요로 하게 된다.

그림1은 PMSM의 토크 제어를 위한 기존의 DTC 제어방식의 제어 블록도를 나타내고 있다. PMSM의 DTC 제어 블록은 크게 공극 쇄교자속을 추정하는 자속 추정기(Flux estimator)와 출력 토크를 추정하는 토크 추정기(Torque estimator), 토크

오차 및 자속오차를 결정하는 히스테리시스 제어기와 토크제어를 위한 스위칭 테이블로 구성된다.

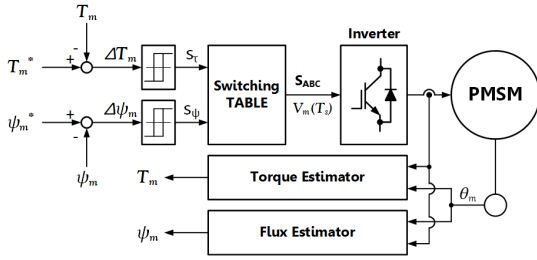


그림 1 기존의 DTC 제어 블록도
Fig. 1 A conventional DTC block diagram

그림 1에서 PMSM의 쇄교자속 및 토크는 순시전압 방정식으로부터 다음과 같이 계산된다.

$$V_{dr} = R_s i_{dr} + L_s \frac{di_{dr}}{dt} - L_s \omega_e i_{qr} \quad (1)$$

$$V_{qr} = R_s i_{qr} + L_s \frac{di_{qr}}{dt} + L_s \omega_e i_{dr} + \omega_e \psi_{pm} \quad (2)$$

$$\psi_{dm} = L_{ds} i_{dr} + \psi_{pm} \quad (3)$$

$$\psi_{qm} = L_{qs} i_{qr} \quad (4)$$

$$T_m = \frac{3}{2} p \psi_{dm} i_{qr} \quad (5)$$

단, ψ_{dm} 및 ψ_{qm} 는 고정자 쇄교 자속(ds 및 ds축)을 나타내고, i_{dr} 과 i_{qr} 은 고정자 전류의 d q축 성분을 나타내고 있다. 또한, V_{dr} 과 V_{qr} 은 고정자 전압의 d q축 성분이며, L_s 와 R_s 는 PMSM의 상권선 인덕턴스 및 저항을 의미한다. T_m 은 PMSM의 발생 토크이며, K_e 는 역기전력 상수이고, ω_e 는 전기적 각속도를 나타낸다. p 는 PMSM의 극 쌍수이다.

추정된 토크는 토크 지령치와 비교하여, 자속의 영역에 따라 샘플링 주기 동안 스위칭 규칙에 따라 인버터의 스위치를 제어하게 되는데, 그림 1의 제어 블록도에서 S_T 및 S_p 는 히스테리시스 비교기에 의해서 토크 및 자속 오차의 부호를 나타내며, 수식 (6),(7)과 같이 각각 1과 -1로 표현된다.

$$S_T = \text{sign}(T_{m(k)}^* - T_{m(k)}) \quad (6)$$

$$S_p = \text{sign}(\psi_{m(k)}^* - \psi_{m(k)}) \quad (7)$$

고정자 쇄교자속은 3상 인버터 구동회로에서 각 상에 인가되는 전압 벡터에 따라 다음 그림 2와 같은 벡터도로 표현될 수 있다.

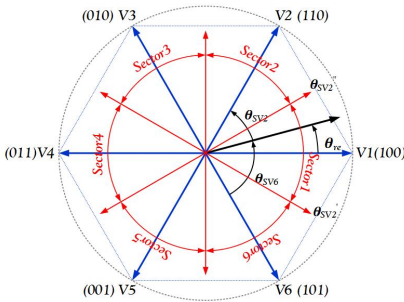


그림 2 자속 제어를 위한 인버터 전압 벡터
Fig. 2 The voltage Vector for stator flux linkage

그림2에서 Sector 1 ~ Sector 6는 각각 쇄교자속의 구간을 나타내며, V1 ~V6는 전압형 3상 인버터의 전압 벡터를 나타낸다. 쇄교자속의 제어는 각 쇄교자속 구간에 인접한 두 전압 벡터의 스위칭에 의해 제어되며, 각 구간에서 쇄교자속과 토크 오차의 부호에 따른 스위칭 벡터는 다음 표 1과 같다.

표 1 DTC 제어 방법에서의 스위칭 규칙
Table 1 Switching rule for DTC control

S_T	S_p	쇄교 자속의 벡터					
		1	2	3	4	5	6
1	1	V_2	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1
	-1	V_3	V_4	V_5	V_6	V_1	V_2
-1	1	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4	V_5
	-1	V_5	V_6	V_1	V_2	V_3	V_4

DTC 제어 방식은 식 (1)~(5)로 계산되는 쇄교자속 및 토크와 지령치의 오차에 대하여 표 1의 전압 벡터를 순시적으로 인가하는 방식이며, 매우 단순하다는 장점이 있다. 이때, 토크 제어 성능은 히스테리시스 밴드의 설정에 의존적이며, 히스테리시스 밴드가 작을수록 토크오차가 감소하게 된다. 하지만, 밴드 폭이 감소하게 되면 스위칭 주파수가 증가하게 되고 이에 따른 스위칭 손실도 증가한다.

3. 제안된 DTC-PWM 제어 방식

기존의 DTC PWM 제어방식은 매우 간단한 방식으로 듀티비를 연산할 수 있고, 이에 따라 스위칭 전압이 자속 및 토크 리플을 억제 할 수 있는 장점이 있지만, 자속 및 토크 전압에 따른 실제 자속 및 토크의 크기는 운전속도에 따라 달라지게 된다. PMSM은 운전속도에 따라 역기전력이 증가하게 되고, 동일한 듀티비에 의한 평균전압이 인가되지만, 운전속도가 증가하게 되면 토크 성분 전류가 감소하게 되는 문제가 발생한다. 다음 식 (1)와 식(2)의 d q축으로 표현되는 전압 방정식에서 자속 및 토크는 각각 i_{dr} 전류 및 i_{qr} 에 비례한 성분으로 발생하게 되며, 이 d q축 전류는 d q축 전압에 비례하여 발생하게 된다.

그림 3은 본 논문에서 제안된 DTC PWM 제어방식의 제어 블록도를 나타낸다. 그림 3에서 제안된 DTC PWM 제어방식은 기존의 DTC 제어방식에서 사용하고 있는 자속 추정기와 토크 추정기 및 비교기를 사용하고 있으나, 선택된 전압벡터는 듀티비에 따라 자속과 토크를 발생할수 있도록 d q축 성분으로 분리하여 토크와 자속의 변화량을 추정하는 방식이 적용되었다.

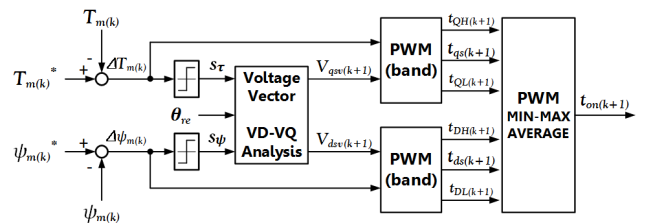


그림 3 제안된 DTC-PWM 방식의 제어 블록도
Fig. 3 A block diagram of proposed DTC-PWM method

자속과 토크 모두가 히스테리시스 밴드 내에 유지 될 수 있도록 하기 위해서 자속과 토크를 제어하는 듀티비를 제어 값과 밴드 값에 따라 식(8)~(13)로 계산한다.

$$dT_m = T_m^* - T_m \quad (8)$$

$$dF_m = F_m^* - F_m \quad (9)$$

$$V_{qsv} = \frac{2}{3} V_{dc} \sin(\theta_{sv} - \theta_{re}) \quad (10)$$

$$V_{dsv} = \frac{2}{3} V_{dc} \cos(\theta_{sv} - \theta_{re}) \quad (11)$$

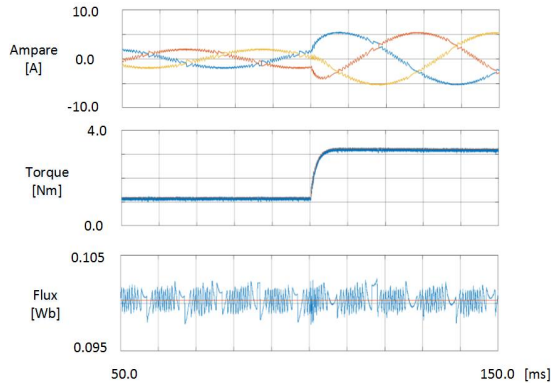
$$\theta_{sv} = (V_{\text{sec}y_r} - 1) * \pi / 3 \quad (12)$$

$$d = \left(\left| \frac{dT_m}{C_T} \right| + \left| \frac{dF_m}{C_F} \right| + \left| \frac{\omega_{re}}{C_\omega} \right| \right) / V_{qsv} \quad (13)$$

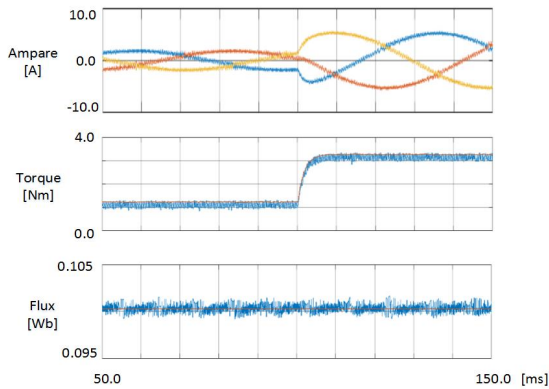
단, V_{qsv} , V_{dsv} 는 고정자 전압의 d q축 성분을 나타내고, d는 듀티비이며, C_T , C_ω 는 토크 및 속도 비례 상수를 나타낸다.

4. 시뮬레이션 결과

본 논문에서 제안한 DTC PWM 제어방식의 유효성을 검증하기 위하여 컴퓨터 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션에 적용된 PMSM의 모델은 3상 2.2[kW]로, 정격 토크가 10.5[Nm]이며, 정격 속도는 2000[RPM]이다.



(a) Conventional DTC method



(b) The proposed DTC-PWM method

그림 4 시뮬레이션 비교 결과

Fig. 4 Compared simulation results

그림 4는 기존의 DTC와 제안된 방식의 시뮬레이션 결과를 나타내고 있다. 토크 추정기의 샘플링 타임은 50[us]이며, 스위칭 주기는 100[us]로 설계하였다.

그림 4의 (a)는 기존의 DTC PWM 제어 방식의 실험 결과를 나타내고, (b)는 제안된 DTC PWM 제어방식을 적용한 시뮬레이션 결과이다. 제안된 DTC PWM 제어방식의 경우 기존의 DTC PWM 제어 방식보다 빠른 토크 응답성과 낮은 토크, 자속 리플을 가지고, 일정한 스위칭 주파수를 가지는 것을 확인할 수 있다.

5. 결론

본 논문에서는 PMSM의 DTC의 자속과 토크를 최적의 상태를 유지하기 위해 기존의 DTC 제어 방식에 PWM을 결합한 DTC PWM 제어방식에 히스테리시스 밴드 내에서 유지 될 수 있는 듀티비를 간단히 계산하는 제어 방식을 제안하였다. 그 결과 자속 리플과 토크 리플이 감소하며 일정한 스위칭 주파수를 가지는 것을 시뮬레이션을 통해 확인을 하였다. 이 시뮬레이션을 통해 제안된 DTC PWM 방식의 유효성을 검증하였고 차후 비교 실험을 수행할 계획이다.

이 논문은 전기연구원의 연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

참고 문헌

- [1] C. French and P. Acameley, "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 코룡, Jianguo Zhu, "Direct Torque Control of Permanent Magnet Synchronous Motor With Reduced Torque Ripple and Commutation Frequency," Power Electronics, IEEE Transaction, Jan. 2011, vol. 26, pp. 235 248
- [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.