

## 영구자석형 동기전동기의 직접토크제어 시뮬레이션

\*김재형, \*박건태, \*차득근  
\*동의대학교 전기공학과

### Simulation of Direct Torque Control of PM Synchronous Motor Drive

\*Park gun-tae, \*Kim jae-hyung, \*Cha Duk-keun  
\*Dong-eui University

#### ABSTRACT

In this paper, a mathematical model of permanent magnet synchronous motor (PMSM) fed by inverter with Direct Torque Control (DTC). Dynamic and steady state characteristics of PMSM is simulated and analyzed: electro-magnetic torque response, speed response, locus of the stator flux linkage. It is mathematically proven that the increase of electromagnetic torque in a permanent magnet motor is proportional the increase of the angle between the stator and rotor flux linkages, and, therefore, the fast torque response can be obtained by adjusting the rotating speed of the stator flux linkage as fast as possible. The simulation results verify the proposed control and also show that the torque response under DTC is much faster than the PWM current controlled drive.

#### 1. 서 론

영구자석형 동기전동기(PMSM)는 빠른토크응답과 고성능이 요구되는 로봇틱스나 수치제어공작기계, 전기자동차등에 많이 사용된다. 이러한 PMSM의 토크제어는 전자기적 토크(Electro-magnetic Torque)가 전기자전류에 비례하기 때문에 전기자전류를 제어하는 기법이 일반적이다. 그러나 이 전류제어는 인덕턴스의 고조파성분의 영향과 자속포화, 영구자석에 미치는 온도변화 등등으로 전류제어에 의한 토크응답은 한계성을 가지게 된다. 근래에는 Direct Torque Control (DTC)이라 불리는 토크제어방식이 유도기에 사용되고 있다. DTC의 기본원리는 고정자 전압벡터의 적절한 선

택으로 고정자 쇄교자속을 직접적으로 제어하여 토크를 제어하는 기법이다. 벡터제어에 의한 토크제어보다 알고리즘이 단순하고, PWM전류제어기에 의한 토크응답보다 빠르다. 본 논문에서는 DTC에 관련한 고정자 쇄교자속의 크기와 회전 제어를 설명할 것이며, "SIMNON"(시뮬레이션 툴)을 사용하여 PWM 전류제어기에 의한 토크응답과의 비교로써 DTC에 의한 토크응답이 더 빠름을 증명하고자 한다.<sup>[1]</sup>

#### 2. 고정자 자속기준 좌표계에서의 토크 방정식<sup>[2]</sup>

고정자 쇄교자속벡터  $\phi_{s\alpha}$ , 회전자 쇄교자속벡터  $\phi_{r\beta}$ , 정지좌표계(DQ), 고정자 자속기준좌표계(xy), 회전자 자속기준좌표계(dq)를 그림 1에 나타내었다.

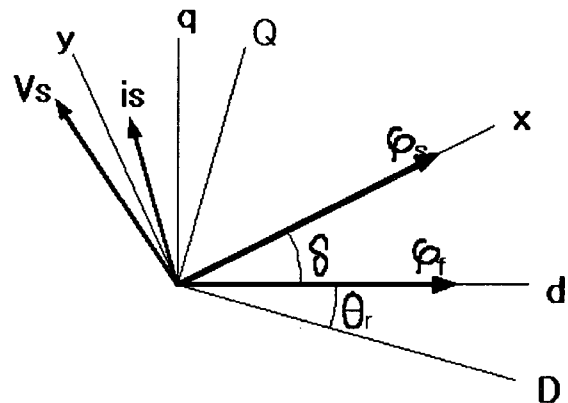


그림 1 각 좌표계에서의 고정자 쇄교자속벡터와 회전자 쇄교자속벡터

회전자 자속기준 좌표계(dq)에서의 고정자 쇄교자속방정식은

$$\phi_d = L_d i_d + \phi_f \quad (2-1)$$

$$\phi_q = L_q i_q \quad (2-2)$$

토크방정식은

$$\tau = \frac{3}{2} P (\phi_d i_q - \phi_q i_d) \quad (2-3)$$

여기서, P는 극수이다.

비돌극형 PMSM의 경우  $L_d = L_q = L_s$  이므로, 식 (2-3)을 고정자 자속 기준좌표계로 변환하면,

$$\tau = \frac{3P}{2L_s} \phi_s \phi_f \sin \delta = \frac{3P}{2L_s} \phi_s \phi_f \sin \delta t \quad (2-4)$$

여기서,  $\delta = \frac{d\delta}{dt}$  는 고정자 쇄교자속의 각속도를 나타낸다.

식 (2-4)로부터 만약 고정자 쇄교자속의 크기가 일정하다면,  $\delta$  의 증가로써 토크는 증가된다. 그리고  $\delta$  는  $-\frac{\pi}{2} \sim \frac{\pi}{2}$  내에서 제어되어진다. 최대토크는  $\pm \frac{\pi}{2}$  에서  $\delta = \delta_m$  이 되었을 때 발생됨을 알 수 있다.

돌극형 PMSM의 경우  $L_d \neq L_q$  이므로, 식 (2-3)을 고정자 자속 기준좌표계로 변환하면,

$$\tau = \frac{3P\phi_s}{4L_s} [2\phi_f L_q \sin \delta - \phi_s (L_q - L_d) \sin 2\delta] \quad (2-5)$$

식 (2-5)에서 첫 번째항은 여자토크(excitation torque)이고, 두 번째항은 릴럭턴스토크(reluctance torque)이다.

$t=0$  에서, 식 (2-5)를 시간에 관하여 미분하면,

$$\frac{dT}{dt} \Big|_{t=0} = \frac{P\phi_s}{2L_d L_q} [\phi_f L_q \delta - \phi_s (L_q - L_d) \delta] \quad (2-6)$$

양의  $\frac{d\delta}{dt}$  값을 가지기 위해서는

$$\phi_s < \frac{L_q}{L_q - L_d} \phi_f \quad (2-7)$$

을 만족해야 한다. 그리고 고정자 쇄교자속의 크기가 증가하면  $\delta_m$ 가 증가하므로,  $\delta$ 는  $\delta_m$ 을 넘지 않아야 한다.

$$\delta_m = \cos^{-1} \left( \frac{a/\phi_s - \sqrt{(a/\phi_s)^2 + \delta}}{4} \right) \quad (2-8)$$

$$a = \frac{\phi_f L_q}{L_q - L_d} \quad (2-9)$$

## 2.2 고정자 쇄교자속의 회전과 크기제어

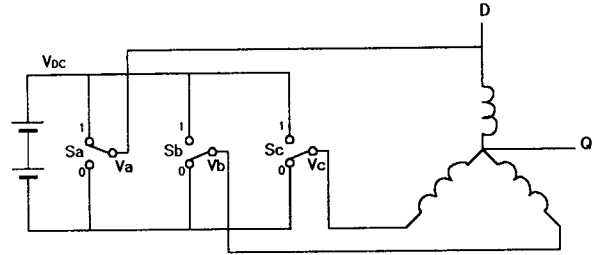


그림 2 인버터 등가회로

Inverter에서는 PMSM에 공급되는 6개의 전압벡터  $V_1(100)$ ,  $V_2(110)$ ,  $V_3(101)$ ,  $V_4(011)$ ,  $V_5(001)$ ,  $V_6(101)$ 와 제로전압벡터  $V_7(000)$ ,  $V_8(111)$ 를 만들어 낸다. 이들 전압벡터는  $\theta_1 \sim \theta_6$ 의 6개의 영역으로 나누어진 평면위에 배치되어 있으며, 고정자 쇄교자속벡터가 위치한 영역에 따라 두 개의 적절한 전압벡터가 선정되어 인가되면, 고정자 쇄교자속벡터는 크기를 일정하게 유지하면서 회전하게 된다.

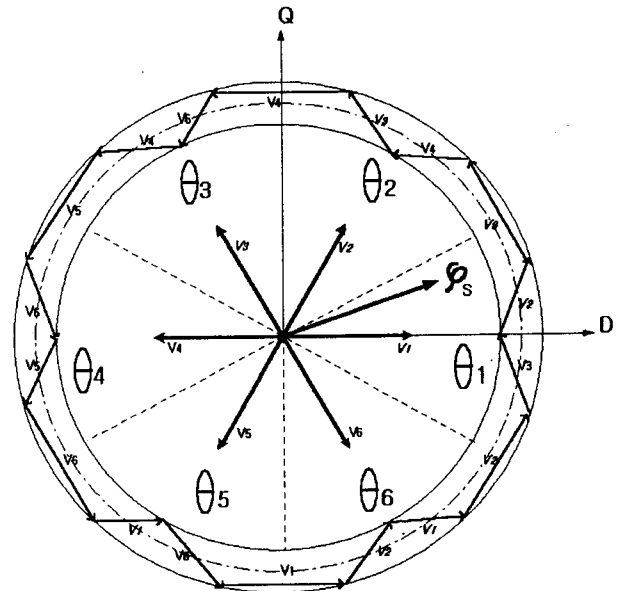


그림 3 고정자 쇄교자속의 크기제어

그림 3은 고정자 쇄교자속 크기제어 히스테리시스 밴드가 표현된 전압벡터도이다. 예를 들어 고정자 쇄교자속벡터  $\phi_s$  가 영역  $\theta_1$  에 있고, 시계반대방향으로 회전하면서 토크를 증가시킨다고 가정한다면, 전압벡터  $V_2$ 와  $V_3$ 이 선택되어진다.

처음  $V_2$ 가 인가되면,  $\phi_s$ 는 반시계방향으로 회전 하면서 크기가 점차 커지게 되고 바깥쪽 원에 닿는 순간  $\phi_s$ 의 크기를 줄이기 위해  $V_3$ 이 인가되게 된다. 영역  $\theta_2$ 에 들어선  $\phi_s$ 는 안쪽 원에 닿게되어 다시 크기를 줄이기 위해  $V_4$ 가 인가된다.

이러한 스위칭 과정을 테이블로 나타내어 보면,

$\phi$ \ $\tau$ \ $\theta$	$\theta(1)$	$\theta(2)$	$\theta(3)$	$\theta(4)$	$\theta(5)$	$\theta(6)$	
$\phi=1$	$\tau=1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$
	$\tau=0$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$	$V_5$
$\phi=0$	$\tau=1$	$V_3$	$V_4$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$
	$\tau=0$	$V_5$	$V_6$	$V_1$	$V_2$	$V_3$	$V_4$

테이블 1 스위칭 테이블

- $\phi=1$  : 고정자 쇄교자속크기 증가
- $\phi=0$  : 고정자 쇄교자속크기 감소.

- $\tau=1$  : 시계반대방향으로 회전.
- $\tau=0$  : 시계방향으로 회전.

정지좌표계에서 고정자권선의 고정자 쇄교자속은

$$\phi_s = v_s t - r \int i_s dt + \phi_s |_{t=0} \quad (2-10)$$

여기서,  $\phi_s |_{t=0}$ 는 고정자 자속벡터의 초기값이다.

이 시스템에는 두 개의 히스테리시스 제어기가 사용된다. 토크 히스테리시스 제어기는 수직축에 대하여 대칭을 이루도록 하고, 고정자 쇄교자속히스테리시스 제어기는 모두 양의 값을 갖도록 하여 항상 기준값보다 크게 한다.

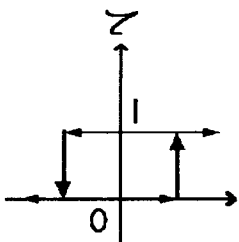


그림 4 토크 제어기

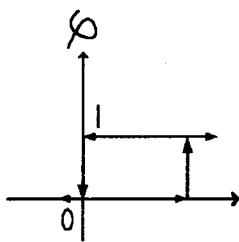


그림 5 고정자 쇄교자속 제어기

전압벡터와 스위칭 주파수는 두 개의 히스테리시스 제어기의 밴드폭에 의해 결정되는데 밴드폭이 너무 작으면 스위칭 주파수가 높아진다. 그러므로, 경험에 의해 토크의 밴드폭은 정격토크의 5%, 고정자 쇄교자속 밴드폭은 정격 고정자 쇄교자속의 15%로 선택하는 것이 적절하다. 그림 2.6은 회전좌표계에서의 PMSM의 DTC 시스템 구성도이다.

### 2.3 시뮬레이션

시뮬레이션에서 기준토크는  $t=0.1s$  이전에는  $2[Nm]$  이고,  $t=0.1s$  이후에서는  $-2[Nm]$ 이 인가된다.

샘플링 타임  $T_s=10\mu s$  이다.

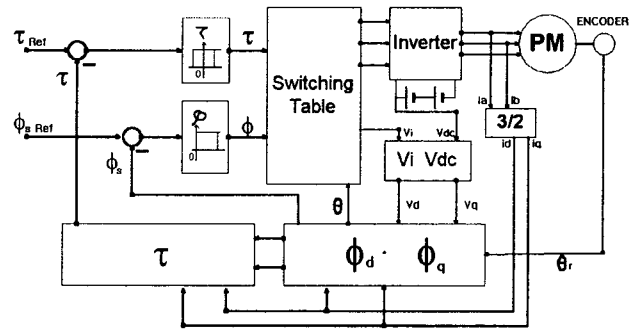


그림 6 시스템 구성도

Data of PMSM	
Pole pair p	2
R	18.6Ω
$\phi_r$	0.447Wb
$L_d$	0.3885H
$L_q$	0.4755H
V	240V
I	1.6A
$\omega_b$	1500rpm



그림 7 Speed [rpm]

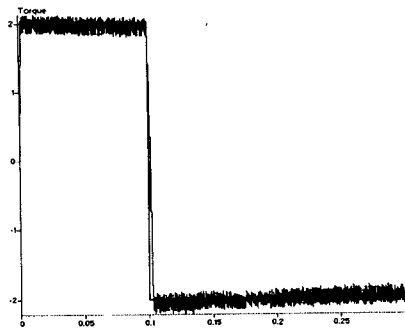


그림 8 Torque [Nm]

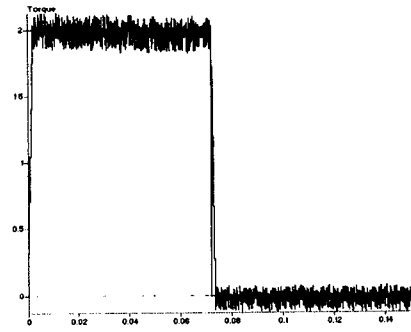


그림 11 DTC에 의한 토크응답특성

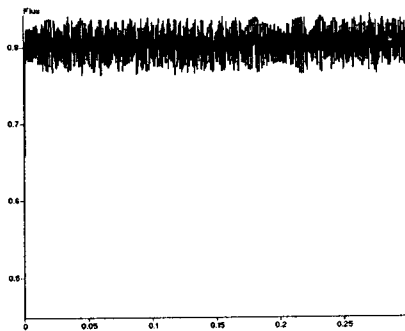


그림 9 Amplitude of Stator flux linkage

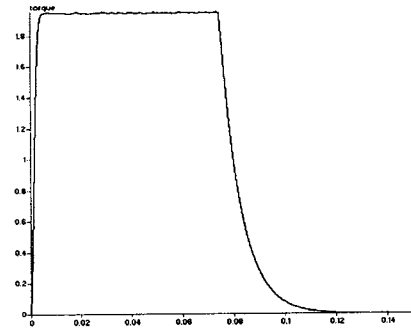


그림 12 PWM 전류제어기에 의한 토크응답특성

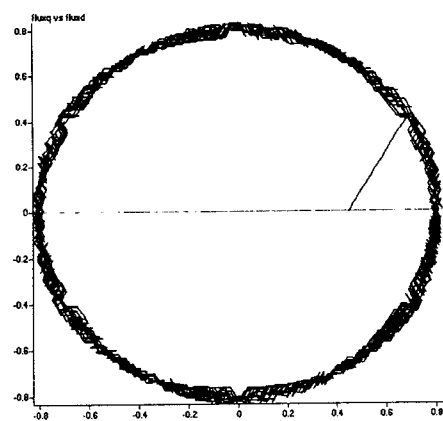


그림 10 Locus of the stator flux linkage

그림 7 에서  $t=0s$ 에서  $t=0.1s$ 까지 270rpm,  $t=0.1$  이 후 부터는 -270rpm이다. 그림 8에서  $t=0.1s$  전후로 2[Nm], -2[Nm]로 되었다. 그림 9에서 고정자 쇄교자속의 크기는 일정함을 알 수 있고, 그림 10에서는 고정자 쇄교자속의 궤적이 나타나있다.

그림 11은 DTC에 의한 토크응답곡선이며, 그림 12는 PWM 전류제어기에 의한 토크응답곡선이다. DTC에 의한 토크응답곡선에서 과도시간이 0.006s 정도인데 반해 PWM 전류제어기에 의한 토크응답곡선의 과도시간은 0.048s 정도 이므로, DTC에 의한 토크응답이 PWM 전류제어기보다 수 배정도 빠르게 응답함을 알 수있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 PMSM의 DTC에 대하여 고찰하였다. 그리고 전자기적 토크는 고정자 쇄교자속과 회전자 쇄교자속 사이의 각을 증가시킴으로써 증가함을 알 수 있었다. 시뮬레이션의 결과는 DTC특성을 입증하였고, PWM 전류제어기에 의한 토크응답과 비교하여 더 빠른 토크응답을 얻을 수 있다는 것을 알 수 있었다.

### 참 고 문 헌

- [1] M.R.Zolghadri, E.M.Olasagasti, and D.Roye, "Steady State Torque Correction of a Direct Torque Controlled PM Synchronous Machine," IEEE, MC, pp. 4.1~4.3, 1997.