

## 직접토크 제어에 의한 SPMSM 속도제어시스템 개발

(Development of Speed Control System for SPMSM with Direct Torque Control)

김동희\* · 임태훈 · 백원식 · 김민희

(Dong-Hee Kim · Tae-Hoon Lim · Won-Sik Baik · Min-Huei Kim)

### 요 약

최근 급속도로 발전되고 있는 산업분야에서 서보시스템은 빠른 응답특성과 고도의 정밀성이 요구되고 있다. 이러한 특성의 요구로 인하여 산업용 서보전동기 구동시스템에 고정자 혹은 회전자 자속벡터의 순시위치와 고정자 전류를 검출하여 좌표변환에 의해 고정자 전류를 여자성분과 토크성분으로 분리 제어하는 벡터제어 이론이 많이 적용되고 있다. 벡터제어에서는 좌표변환과 SVPWM 발생을 위해 많은 연산을 요구하므로 디지털 제어시스템에서 DSP에 많은 부담을 주고 있다. 그러나 직접토크제어(DTC) 알고리즘은 디지털 제어 구조로 토크와 고정자 자속 성분의 전류제어에 특업 테이블을 사용하므로 벡터제어처럼 많은 제어기와 복잡한 연산을 필요로 하지 않고, 동적 응답특성이 전동기의 정수변화에 영향이 적으면서 직접 전동기의 토크와 고정자 자속을 독립적으로 제어할 수 있는 장점을 가진다. 따라서 본 논문에서는 표면 부착형 영구자석 동기전동기(SPMSM)를 사용하여 DTC에 의한 서보전동기 제어와 벡터제어에 의한 서보 제어시스템 결과를 비교하여 직접토크제어 알고리즘의 산업용 서보 시스템로의 적용 가능성을 확인하였다.

### Abstract

This paper presents an implementation of digital servo speed control system of SPMSM(Surface-mounted Permanent Magnet Synchronous Motor) for industrial application with Direct Torque Control(DTC) using TMS320F2812 DSP. Although, the vector control scheme is adapted in many industrial servo system, but the DSP calculation ratio is increased by reference frame transformation and SVPWM of vector control. Therefore, this paper investigate the possibility of DTC scheme for industrial servo drive system instead of vector control scheme. DSP calculation ratio is compared between vector control and DTC algorithm in addition to the characteristic of speed control response. The suggested SPMSM control system shows the possibility of DTC scheme for industrial servo motor drive system instead of a vector control algorithm.

Key Words : SPMSM Control, DTC, F2812 DSP, Industrial Servo Drive System

\* 주저자 : 영남대학교 전기공학과 교수  
Tel : 053-810-2488, Fax : 053-810-4629  
E-mail : dhkim@yu.ac.kr  
접수일자 : 2005년 1월 25일  
1차심사 : 2005년 1월 27일  
심사완료 : 2005년 3월 8일

### 1. 서 론

최근 급속도로 발전되고 있는 산업분야에서 고도의 정밀도와 빠른 응답특성을 갖는 서보제어 시스템

템이 필수적이다. 이에 따라 구조가 간단한 영구자석 동기전동기에 벡터제어 이론을 도입한 제어 및 구동시스템이 산업용 전동기 제어분야에서 많이 적용되고 있다. 그러나 벡터제어 알고리즘은 전동기 전류의 여자 성분과 토크 성분으로 분리제어하기 위한 제어기와 좌표변환 및 SVPWM 구현에 필요한 많은 연산과정이 요구되므로 복잡한 소프트웨어 구성과 고성능의 빠른 특성을 가지는 프로세서를 사용하여야만 구현할 수 있는 문제점을 가지고 있다[1]-[5].

이러한 벡터제어 알고리즘을 적용한 전동기 구동시스템의 구현에 따른 문제점은 서보시스템의 가격 상승을 가져오는 중요한 요인이 되고 있으며, 현재 산업용 구동 시스템에 필수 구성요소로 자리매김하고 있는 통신에 의한 네트워크 서보 제어시스템 등과 같은 추가 요소를 장착하기 위해서는 제어용 프로세서의 부담률을 감소 시켜주어야만 하는 연구과제가 대두되고 있는 실정이다. 이런 이유로 인하여 최근에는 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하면서 벡터 제어에서처럼 많은 제어기와 복잡한 연산을 요구하지 않고, 토크의 동적 특성이 전동기의 정수 변화에 따른 의존성이 낮으며, 토크제어 및 자속제어를 위해 히스테리시스 제어를 적용하고, SVPWM의 방법을 대신하여 프로세서 부담률을 줄일 수 있는 직접 토크제어 (DTC) 구동 시스템에 대한 연구에 관심이 집중되고 있다[6][7]. 따라서 본 연구에서는 기존의 벡터제어 알고리즘으로 구현되고 있는 제어시스템에 추가적인 하드웨어를 사용하지 않고, DC 링크 전압을 측정할 수 있는 한 개의 전압 센서와 전동기 제어에 필요한 두 개의 전류 센서를 사용한 직접 토크제어 구동 시스템을 구성하여 산업용 서보 전동기 구동시스템을 제시하였다. 전동기 제어용으로 개발된 TI사의 32비트 DSP인 TMS320F2812 DSP를 적용하고, 현재 산업 현장에서 사용되고 있는 서보 시스템의 전력변환 부분과 400[W] 표면 부착형 영구자석 동기전동기 (SPMSM)를 이용하여 직접토크 제어 알고리즘이 벡터 제어를 대신하여 산업용 서보 전동기 구동시스템으로 적용될 수 있는 가능성을 실험을 통하여 비교 검토하였다.

## 2. SPMSM의 직접 토크제어

### 2.1 동기전동기의 전압방정식

3상 교류전동기는 전압방정식을 3상 고정좌표계에서 2상 동기 회전좌표계로 표현함으로써 벡터제어 뿐만 아니라 직접 토크제어가 가능하다. 동기 회전좌표계의 d-q 좌표축은  $\omega_s$ 라는 동기 속도로 회전하고 있으므로 이 좌표축에서 볼 때 동기속도로 회전하고 있는 d-q축의 전류 및 전압벡터는 일정한 방향과 크기를 가지게 된다. 그림 1은 3상 고정좌표계와 2상 동기 회전좌표계의 관계를 나타내고 있으며, 2상 동기 좌표계는 d-q축에 직류전압과 전류를 포함하고  $\omega_s$ 의 속도로 회전하고 있음을 알 수 있다. 식 (1)은 d-q축의 전압 방정식을 나타내고 있다. 여기서,  $\omega_s = \omega_r = d\theta_r/dt$ ,  $L_d = L_q$ 이다[1][2].

$$\begin{pmatrix} v_{ds} \\ v_{qs} \end{pmatrix} = \begin{pmatrix} R_s + pL_d & -\omega_s L_q \\ \omega_s L_d & R_s + pL_d \end{pmatrix} \begin{pmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{pmatrix} + \begin{pmatrix} 0 \\ \omega_s \lambda_f \end{pmatrix} \quad (1)$$

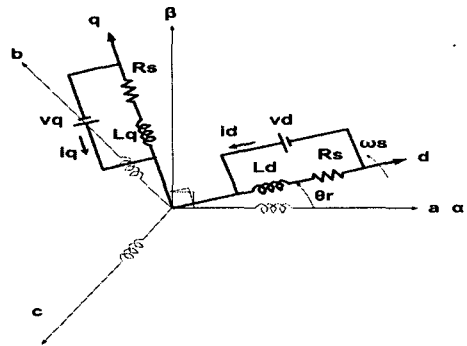


그림 1. 영구자석형 동기전동기의 기준 좌표계  
Fig. 1. Reference frame of permanent magnet synchronous motor

또한 식 (1)을 식 (2)와 같이 표현하게 되면  $v_{ds}$ ,  $v_{qs}$ 는 식 (3)과 같은 2상 동기 회전좌표계의 식으로 표현 가능하다. 그리고 식 (3)의 마지막 항은 속도에 비례하는 전압성분으로 역기전력을 나타낸다.

$$\begin{aligned} \lambda_q &= L_q i_{qs} \\ \lambda_d &= L_d i_{ds} + \lambda_f \end{aligned} \quad (2)$$

## 직접토크 제어에 의한 SPMSM 속도제어시스템 개발

$$\begin{aligned} v_{ds} &= R_s i_{ds} + p\lambda_d - \omega_s \lambda_q \\ v_{qs} &= R_s i_{qs} + p\lambda_q + \omega_s \lambda_d \end{aligned} \quad (3)$$

또한 전동기의 발생 토크는 식 (4)와 같이 된다. 여기서 P는 전동기의 극수이다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f i_{qs} \quad (4)$$

식 (4)에서 보듯이 표면부착형 영구자석 동기전동기의 발생토크는 회전자 영구자석에 의한 쇄교자속  $\lambda_f$ 와 고정자 전류의 q축 성분  $i_{qs}$ 의 곱에 비례한다. 따라서 표면부착형 영구자석 동기전동기 제어에서 영구자석에 의한 쇄교자속  $\lambda_f$ 는 일정하므로 자속 발생에 기여하는 d축의 전류는 0으로 제어될 수 있게 자속제어 히스테리시스 밴드폭을 결정하고, q축 성분 전류가 기여하는 토크를 제어하기 위한 토크제어 히스테리시스 밴드폭을 결정한다면 선형적인 토크제어 특성을 얻을 수 있어 직접 토크 제어를 가능케 한다.

## 2.2 직접 토크 제어

동기전동기의 직접 토크 제어(DTC)는 인버터에 가해지는 최적 스위칭 모드 선택에 의하여 전동기에 공급되는 단자전압제어에 의하여 이루어지므로 직접적으로 고정자의 자속과 발생하는 토크를 서로 독립적으로 제어할 수 있다. 빠른 토크응답 특성과 낮은 인버터 스위칭 주파수 및 적은 고조파 손실을 얻기 위하여 요구되는 스위칭 모드 선택은 고정자의 자속과 토크의 히스테리시스 밴드 안에서 오차 제한에 의하여 만들어지며, 이 때 토크는 고정자의 쇄교자속 벡터를 제어함으로써 빠르게 변화시킬 수 있다. 이에 따라 직접토크제어 방식은 전동기의 빠른 토크응답 특성과 유연성 있는 제어를 이룰 수 있다. 이 기술의 주 장점은 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하다는 것이며, 토크의 동적 특성이 전동기 회전자의 파라미터 변동에 영향이 적으며, 많은 제어기의 채용과 복잡한 알고리즘 계산에 요구되는 연산 시간을 감소시킬 수 있는 특징을 가지고 있어 빠른

동적 응답특성이 요구되는 시스템에 큰 장점을 가지는 제어방식이다. 일반적으로 고정자 자속의 크기는 가능한 정상적인 안정상태로 유지하고 토크는 고정자와 회전자 사이의 각에 의하여 제어된다[1].

최적의 스위칭 전압벡터는 출력의 토크와 고정자 자속의 상태 모두를 동시에 만족하게 하는 특수한 고정자의 전압벡터를 선택하는 것이다. 이것은 전압원 인버터(VSI)에서 만들 수 있는 6개의 전압벡터와 2개의 영 전압벡터로 구성된다. 부하 및 속도가 가변되어 고정자 쇄교자속 전류의 증가가 요구될 때에는  $dI_{de} = 1$ 로, 감소가 요구될 때에는  $dI_{de} = 0$ 으로 나타낼 때, 2 레벨 자속 히스테리시스 비교기의 디지털 출력 신호는 식 (5)의 조건에서 결정되며, 토크의 증가가 요구될 때에는  $dT_e = 1$ , 감소가 요구될 때에는  $dT_e = -1$ , 토크변화가 없을 경우에는  $dT_e = 0$ 으로 나타낼 때, 3 레벨 토크 히스테리시스 비교기의 디지털 출력 신호는 정방향일 경우는 식 (6)으로, 역방향일 경우는 식 (7)의 조건을 적용한다[4][8][9].

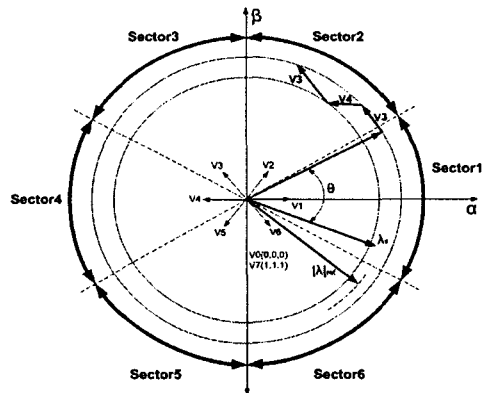


그림 2. 직접 토크제어의 개념도  
Fig. 2. Concept of direct torque control

$$dI_{de} = 1, \text{ if } |dI_{de}| \leq \Delta I_{de} \quad (5)$$

$$dI_{de} = 0, \text{ if } |dI_{de}| \geq \Delta I_{de}$$

$$dT_e = 1, \text{ if } |T_e| \leq |T_e^*| - |\Delta T_e| \quad (6)$$

$$dT_e = 1, \text{ if } T_e \geq T_e^*$$

$$dT_e = -1, \text{ if } |dT_e| \geq |T_e^*| + |\Delta T_e| \quad (7)$$

$$dT_e = 0, \text{ if } T_e \leq T_e^*$$

여기서  $dI_{de}$ 는 자속 전류 히스테리시스 제어기의 밴드폭이고,  $dT_e$ 는 토크 히스테리시스 제어기의 밴드폭을 나타낸다.

그림 2는 고정자 자속벡터가 섹터 1에 위치하는 경우로서 자속과 토크제어의 원리를 나타내고 있다. 이 그림처럼 자속과 토크를 일정 밴드 안으로 유지하기 위하여 표 1에 나타난 최적 스위칭 전압벡터의 룩업 테이블에 따라 결정되는 것이다.

표 1. 최적 전압 스위칭 벡터의 룩업 테이블  
Table 1. Look-up table of optimal voltage switching vector

$dI_{de}$	$dT_e$	Sect.1	Sect.2	Sect.3	Sect.4	Sect.5	Sect.6
1	1	V2	V3	V4	V5	V6	V1
	0	V7	V0	V7	V0	V7	V0
	-1	V6	V1	V2	V3	V4	V5
0	1	V3	V4	V5	V6	V1	V2
	0	V0	V7	V0	V7	V0	V7
	-1	V5	V6	V1	V2	V3	V4

### 3. 시스템 구성

본 연구에서는 현재 산업 현장에서 사용되고 있는 상용화된 서보 시스템의 인버터 부분을 사용하여 TMS320F2812 DSP로 400[W] 서보 전동기 제어 시스템에 벡터제어이론과 직접 토크제어이론을 적용하였다. 표 2는 연구에 사용된 400[W] 표면부착형 영구자석 동기전동기의 설계상수를 보이고 있다.

전동기를 정밀하게 제어하기 위해서는 2상 이상의 전류가 정확히 검출되어야 하며 전류의 정확도에 따라 시스템의 운전 특성이 결정된다. 본 논문에서는 전류 검출을 위하여 HC-PDA10V4B15를 사용하였다. DSP의 ADC 인터페이스 회로 설계 시 고려될 사항으로는 DSP의 I/O 전압 허용범위가 0~3.3[V]인데 반해, ADC의 입력 전압 범위가 0~3[V]인 점을 고려하여 센서에서 받은 아날로그 정보가 이 범위의 값을 가지도록 연산 증폭기의 이득과 오프셋을 적당히 조정하여 전류 센서의 출력 값인  $\pm 4[V]$ 를 0~3[V]로 재조정 하여야 한다. 본 연구에서는 연산 증폭기를 사용하여 20[kHz]의 제어 주기로 전류 반

전 증폭을 하여  $\pm 1.5[V]$ 의 값으로 스케일링 후 다시 1.5[V]의 오프셋을 주어 0~3[V]의 값이 되도록 하였다. 따라서 실제 전류 값은 입력된 디지털 값에 -1을 곱해주어야 된다. 그림 3은 검출된 전류 값의 반전 증폭 과정과 오프셋 처리 및 프로그램 상에서의 스케일 과정을 보이고 있다[3].

표 2. 표면부착형 영구자석 동기전동기의 설계상수  
Table 2. Design parameters of SPMSM

상/극수	3상/4극
정격출력	400[W]
정격회전속도	3,000[rpm]
회전자관성	0.688[ $kg \cdot cm \cdot s^2$ ]
토크 정수	4.797[Kgf · cm/A]
상 저항	1.209[ $\Omega$ ]
상 인덕턴스	7.610[mH]
역기전압정수	29.29[V/Krpm]

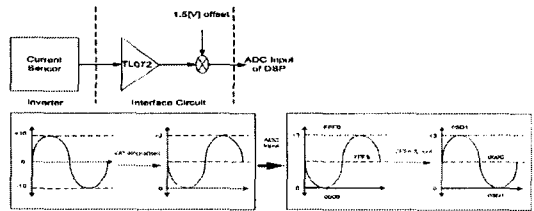


그림 3. 검출된 전류 값의 양자화  
Fig. 3. Quantization of feedback current value

그림 4는 속도 측정을 위한 블록도이다. 속도 및 회전자 위치는 3개의 엔코더 출력(A, B, Z)이 DSP 제어기의 QEP단자로 바로 입력되어 소프트웨어적인 연산에 의하여 측정된다. 실험에 사용된 엔코더는 3000[ppr]이며 속도제어주파수는 2[kHz]이다.

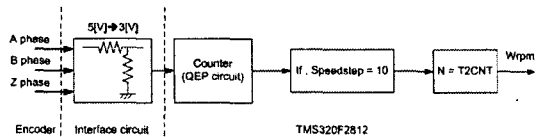


그림 4. 위치 및 속도 추정 블록 다이어그램  
Fig. 4. Block diagram of position & speed estimation

그림 5는 시스템 흐름의 구성도를 나타낸 것으로 시스템의 구성 조건은 모두 동일하고 단지 벡터 제

직접토크 제어에 의한 SPMSM 속도제어시스템 개발

어와 직접 토크 제어로 나누어진다는 것을 알 수 있다. 블록도를 살펴보면 직접 토크 제어의 블록도가 벡터 제어의 블록도보다 조금 더 복잡해 보이지만, 실제 히스테리시스 제어기와 최적 스위칭 벡터의 룩업 테이블을 사용하였기 때문에 계산량은 벡터 제어에 비하여 현저하게 떨어진다고 할 수 있다.

의한 직접 토크 제어에 비하여 훨씬 계산량을 줄일 수 있는 장점이 있다. 사진 1은 실제 제작된 전압형 인버터 및 DSP 제어보드를 나타내고 있으며, 사진 2는 실험에 적용된 400[W]급 표면부착형 영구자석 동기전동기를 나타내고 있다.

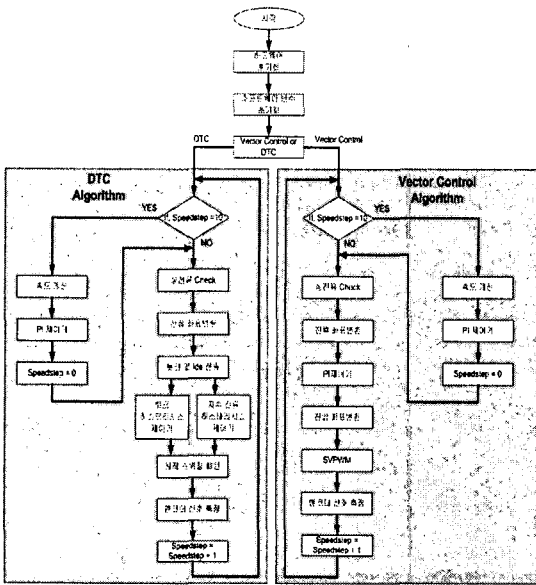
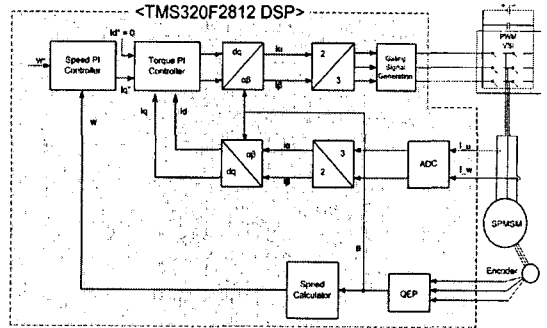


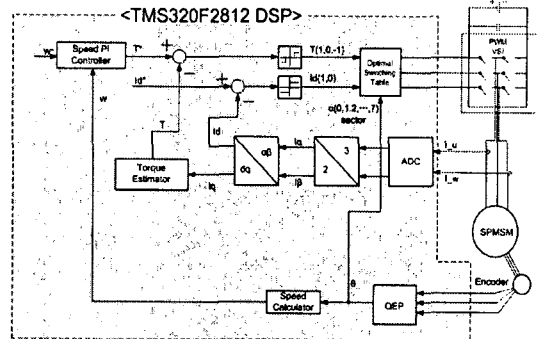
그림 5. 직접토크제어와 벡터제어의 제어 흐름도  
Fig. 5. Control flowchart of DTC & vector control

본 연구에서 사용된 벡터 제어의 속도 제어 블록 다이어그램을 나타낸 것이 그림 6의 (a)와 같고, 그림 6의 (b)는 직접 토크 제어의 속도 제어 블록 다이어그램을 나타낸 것이다. 또한 직접 토크 제어는 자속의 값을 구하여 자속의 값을 제어하는 것이 일반적인 기법으로 알려져 있다. 하지만 이 방식은 두 개의 전류 센서뿐만 아니라 두 개의 전압 센서를 필요로 하고, 순수 적분에 의하여 자속을 추정할 시에는 자속 포화 등의 문제로 인하여 자속 PI제어기, 또는 필터등과 같은 복잡한 계산량이 더 필요하게 된다.

따라서 본 논문에서는 사용된 SPMSM의 특성상 자속에 의한 제어가 아닌 자속 발생에 기여하는 d축 성분의 전류를 0으로 제어하는 방식을 선택하였다. 이 방식은 자속을 제어하는 방식에 비하여 전압 센서가 필요 없고, 자속을 계산하기 위한 PI제어기나 필터 등의 요소를 필요로 하지 않기 때문에 자속에



(a) 벡터제어기법  
(a) Vector control scheme



(b) 직접 토크제어 기법  
(b) Direct torque control scheme

그림 6. 속도제어시스템의 블록도  
Fig. 6. Block diagram of speed control system

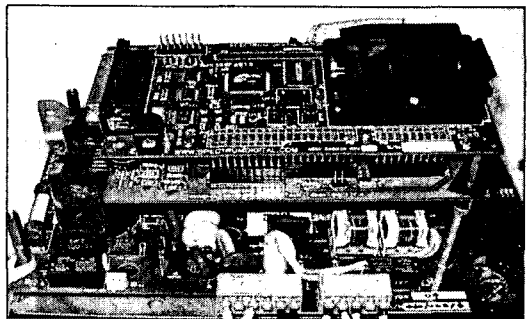


사진 1. 전압형 인버터 및 DSP 제어보드  
Photo 1. VSI inverter & DSP control board

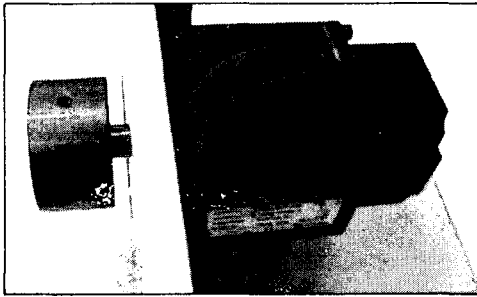


사진 2. 영구자석 동기전동기와 관성부하(400[W])  
Photo 2. SPMSM & inertia load(400[W])

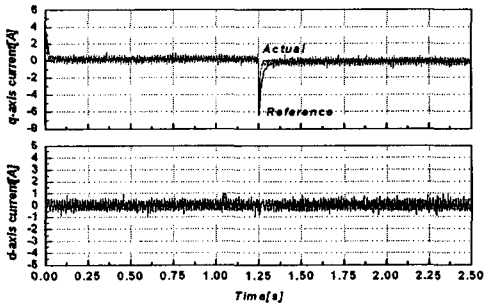
## 4. 실험 결과

### 4.1 벡터제어 실험 결과

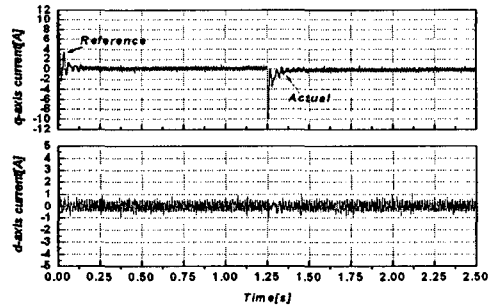
벡터제어의 속도응답 특성실험을 수행하기 위해

여, 스위칭 주파수 20[kHz], 전류 제어 주파수 20[kHz], 속도 제어 주파수 5[kHz]로 설정하였으며, 무부하와 관성부하 조건에서 속도지령을 정방향 1000[rpm]에서 역방향 1000[rpm]으로 정역운전 지령을 하였을 때 응답특성을 관측하였다. 본 연구에서는 서보 구동시스템의 응답특성에 많은 영향을 미치는 관성부하로, 회전자 관성의 3배 관성을 사용하였으며, 관성부하와 무부하의 측정조건은 동일하게 하였다.

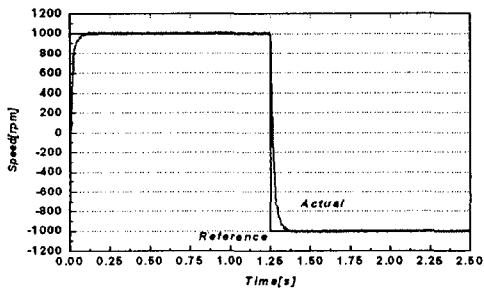
그림 7은 무부하에서 속도지령이 정방향 1000[rpm]에서 역방향 1000[rpm]으로 정역운전 시 동기 회전좌표계의 d-q축 전류와 속도 응답파형을 나타낸 것이다. 그림 (a)에서 나타난 바와 같이 자속성분에 기여하는 d축 성분 전류는 0[A]로 잘 추종함을 알 수 있고, 토크 성분에 기여하는 q축 성분 전류는



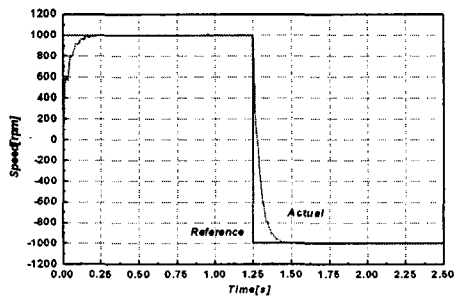
(a) 동기좌표계 d-q축 전류  
(a) d-q axis currents of synchronous reference frame



(a) 동기좌표계 d-q축 전류  
(a) d-q axis currents of synchronous reference frame



(b) 속도 응답 특성  
(b) Speed response characteristic



(b) 속도 응답 특성  
(b) Speed response characteristic

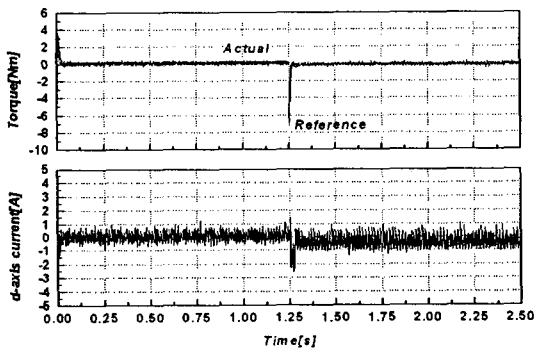
그림 7. 무부하시  $\pm 1000$ (rpm)에 대한 응답특성  
Fig. 7. Response characteristics at  $\pm 1000$ (rpm) with no-load

그림 8. 관성부하시  $\pm 1000$ (rpm)에 대한 응답특성  
Fig. 8. Response characteristics at  $\pm 1000$ (rpm) with inertia-load

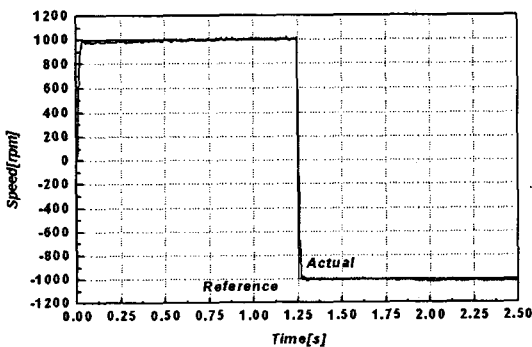
## 직접토크 제어에 의한 SPMSM 속도제어시스템 개발

속도 제어기에서 나온 q축 전류 지령치를 잘 추종함을 알 수 있다. 또한 이 결과에서 속도 지령이 0[rpm]에서 정방향 1000[rpm]으로 변화할 때 q축 전류는 3[A]정도이지만 정방향에서 역방향으로 속도 지령이 변화할 때는 약 2배의 전류가 흐름을 알 수 있다.

그림 8은 회전자의 3배 관성부하의 조건에서 속도 지령이 정방향 1000[rpm]에서 역방향 1000[rpm]으로 정역운전시 동기 회전좌표계의 d-q축 전류와 속도 응답파형을 나타낸 것으로, 그림 (a)에서 나타난 바와 같이 자속 성분에 기여하는 d축 성분 전류는 무부하 조건과 동일하게 0[A]로 잘 추종함을 알 수 있고, 토크 성분에 기여하는 q축 성분 전류는 속도 제어기에서 나온 q축 전류 지령치를 잘 추종함을 알 수 있다.



(a) 토크 및 d축 전류 파형  
(a) Torque and d-axis current waveform



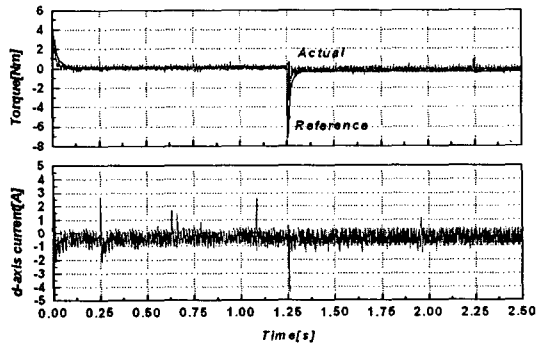
(b) 속도 응답 특성  
(b) Speed response characteristic

그림 9. 무부하시  $\pm 1000$ (rpm)에 대한 응답특성(DTC)  
Fig. 9. Response characteristics at  $\pm 1000$ (rpm) with no-load(DTC)

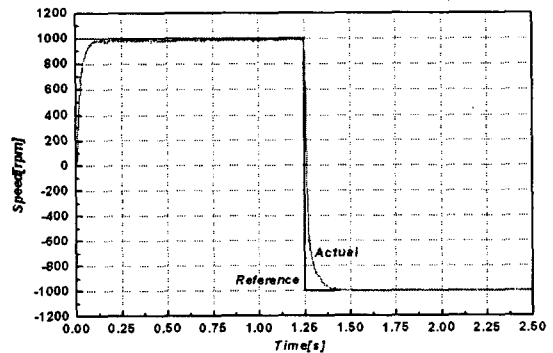
## 4.2 직접 토크제어 실험 결과

직접 토크제어는 벡터제어 시와 그 결과를 비교하기 위하여 실험 조건을 동일하게 스위칭 주파수 20[kHz], 속도 제어 주파수 5[kHz]로 구성하였다. 벡터제어의 전류 제어기를 대신하여 자속 성분전류 2레벨 히스테리시스 제어기와 토크 성분 3레벨 히스테리시스 제어기를 사용하여, 정방향 1000[rpm]과 역방향 1000[rpm]에서 무부하 시와 회전자 3배 관성부하를 사용하여 응답특성을 관측하였다.

그림 9는 무부하시 속도 지령이 정방향 1000[rpm]에서 역방향 1000[rpm]으로 정역운전 지령을 하였을 때 토크응답과 자속에 기여하는 d축 전류, 그리고 속도 응답특성을 나타낸 곡선이다. 그림 (a)에서 보



(a) 토크 및 d-axis 전류 파형  
(a) Torque and d-axis current waveform



(b) 속도 응답특성  
(b) Speed response characteristic

그림 10. 관성부하시  $\pm 1000$ (rpm)에 대한 응답특성  
Fig. 10. Response characteristics at  $\pm 1000$ (rpm) with inertia-load

듯이 0[rpm]에서 정방향 1000[rpm]으로 지령 변화시 토크는 3.5[Nm]이고, 역방향 1000[rpm]으로 속도 지령 변화시 약 7[Nm]임을 알 수 있다. 이는 벡터 제어의 무부하시 토크에 비해 약 2배 가까운 토크를 발생함을 알 수 있으며, 가속 성분의 d축 전류는 0[A]로 지령치를 잘 추종함을 알 수 있다.

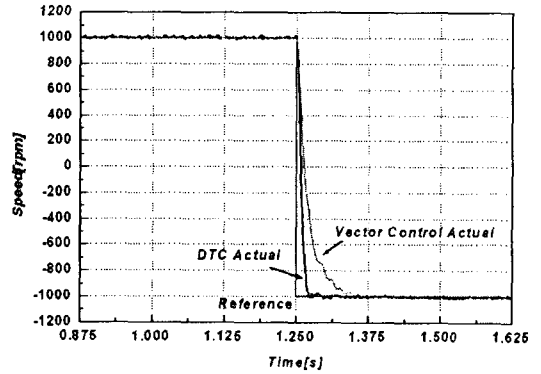
그림 10에서 나타난 것과 같이 회전자 3배 관성부하 실험에서 가속 성분의 d축 전류는 지령 전류 0[A]에 잘 추종함을 알 수 있고, 토크 성분의 크기는 무부하 실험 때와 동일하게 나타남을 볼 수 있다. 또한 벡터제어의 관성부하 실험과 비교하였을 경우 0.5배 정도 임을 알 수 있었다.

### 4.3 실험결과 검토

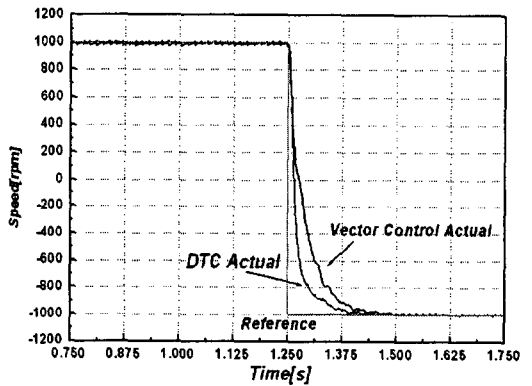
앞에서 보여준 실험결과에서 직접 토크 제어를 사용하였을 경우는 벡터제어에서 보다 무부하에서는 토크 성분의 q축 전류가 더 큼을 알 수 있다. 그러나 관성부하의 실험 결과에서 보듯이 벡터제어에서는 관성에 따라 q축 전류가 증가하지만, 직접 토크 제어에서는 무부하시와 비슷한 토크를 발생시킴을 알 수 있다.

그림 11에서 보듯이 정방향 1000[rpm]에서 역방향 1000[rpm]으로 정역운전 속도 지령을 하였을 때 무부하에서는 응답시간이 벡터제어 방식에 비하여 0.25배 정도의 짧은 시간이 소요되고, 관성부하에서는 정상상태의 90[%]정도에 도달하는 시간이 약 0.5 배 정도 소요됨을 보여주고 있다. 이는 직접 토크 제어 방식이 벡터제어 방식보다 동적응답특성인 속도 응답특성이 빠름을 확인할 수 있다. 그러나 직접 토크 제어방식의 제일 큰 문제점인 저속영역 속도제어에서 토크맥동 저감에 대한 연구와 비교 검토는 현재 실험 중에 있다.

그림 12는 그림 5의 제어 흐름도에 따라 각 제어에 요구되는 DSP의 계산 부담률을 나타내고 있다. 그림에서 보듯이 DTC의 토크 계산 및 히스테리시스 제어를 위해 소요되는 연산시간은 벡터 제어에서 필요한 전류 PI제어기 및 좌표변환에 필요한 연산시간의 50[%] 정도에 해당하므로 DSP의 연산 부담률이 저감될 수 있음을 알 수 있다.



(a) 무부하시 속도 응답(±1000(rpm))  
(a) Speed response characteristics with no-load(±1000(rpm))



(b) 관성부하시 속도 응답 특성 (±1000(rpm))  
(b) Speed response characteristics with inertia-load(±1000(rpm))

그림 11. DTC와 벡터제어의 속도응답 비교  
Fig. 11. Comparisons of speed response between DTC & vector control

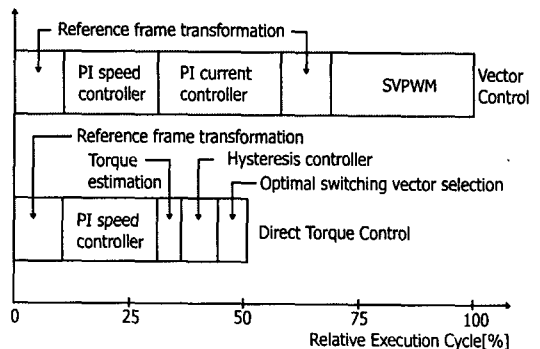


그림 12. DSP 연산 사이클 비교  
Fig. 12. Comparisons of DSP calculation cycles



## 5. 결 론

현재 산업현장에서 많이 적용되고 있는 서보 전동기 제어 알고리즘은 대부분이 벡터 제어를 사용하고 있다. 그러나 2개의 전류제어기와 좌표변환 및 SVPWM의 연산과 제어과정이 복잡하여 고성능의 DSP를 사용하여야 구현되므로 서보시스템의 가격 상승을 가져오는 중요한 요인이 되고 있으며, 앞으로 산업용 구동 시스템에 필수 구성요소로 자리매김하고 있는 통신에 의한 네트워크 서보전동기 제어 시스템 등과 같은 추가 요소를 장착하기 위해서는 제어용 프로세서의 부담률을 감소 시켜주어야만 하는 연구과제가 대두되고 있다.

따라서 본 논문에서는 이러한 문제점을 해결하고자 직접 토크 제어 알고리즘을 적용하여 산업 현장에 사용되고 있는 서보전동기 구동시스템에 추가적인 하드웨어 없이 DSP의 제어 및 연산에 요구되는 부담률을 줄이기 위한 제어시스템을 제안하였다. 제안된 시스템과 벡터제어 시스템의 속도응답 특성 실험을 비교한 결과 속도 응답 특성이 벡터제어시 보다 약 50[%] 정도의 빠른 응답특성을 얻었으며, DSP의 제어 및 스위칭 부담률도 약 50[%] 정도 줄일 수 있음을 확인하였다. 따라서 벡터제어를 대신하여 직접 토크 제어를 사용함으로써 CPU의 제어 및 스위칭 부담률을 줄일 수 있으며, 부가적인 하드웨어 없이 산업용 서보 시스템에 적용할 수 있는 가능성을 확인하였다. 빠른 동적응답 특성과 프로세서의 연산에 따른 부담률은 감소시킬 수 있었으나 직접토크제어 알고리즘의 가장 큰 문제점으로 나타나고 있는 토크맥동 저감에 대한 연구결과와 검토는 현재 연구가 진행되고 있다.

## References

- (1) Peter Vas, Sensorless Vector and Direct Torque Control, Oxford Press, 1998.
- (2) Bimal K. Boss, Modern Power Electronics and AC Drives, Prentice Hall PTR, 2002.
- (3) 김민회, 임태훈, 정장식, 김성호, "TMS320F2812 DSP를 이용한 산업용 SPMSM 정밀 제어시스템 개발", 전력전자학회 논문지, Vol. 10, No.2, pp. 138-147, 2005. 4.
- (4) 김민회, 김남훈, 백원식, "직접토크제어에 의한 위치검출기 없는 리액턴스 동기전동기의 고성능 제어시스템",

- 전력전자학회 논문지, Vol. 7, No. 1, pp. 81-90, 2002. 2.
- (5) 김민회, 김남훈, 백원식, "직접토크제어에 의한 속도검출기 없는 유도전동기의 고성능 제어시스템", 대한전기학회 논문지, Vol. 51P, No. 1, pp. 18-27, 2002. 3.
- (6) C. French, P. Acamley, "Direct torque control of permanent magnet drives", IEEE Trans. on I.A., Vol. 32, Issue 5, pp. 1080-1088, Sept./Oct., 1996.
- (7) L. Zhong, M.F. Rahman, W.Y. Hu, K.W. Lim, "Analysis of direct torque control in permanent magnet synchronous motor drives", IEEE Trans. on P.E., Vol. 12, Issue 3, pp. 528-536, May, 1997.
- (8) 김민회, 김남훈, "DSP를 이용한 유도전동기 디지털 제어 시스템", 한국산업응용학회 논문지, 제3권, 제1호, pp. 9-12, 2002. 2.
- (9) 김민회, 백원식, 김남훈, 최경호, 김동희, "디지털 히스테리시스 제어기를 이용한 SRM의 위치제어시스템", 전력전자학회 논문지, 제7권, 제3호, 2002. 6.

## ◇ 저자소개 ◇

### 김동희 (金東熙)

1950년 11월 20일생. 1973년 영남대 공대 전기공학과 졸업. 1975년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1987년 Kobe 대학 졸업(공학박). 1987년~1989년 한국전기연구원 전력전자 연구부장. 당 학회 경상지부장. 2000년 9월~2001년 2월 Kyushu 대학 교환교수. 현재 영남대 공대 전기공학과 교수.

### 임태훈 (林泰勳)

1978년 3월 27일생. 2003년 영남대 공과대학 전기전자공학부 전기공학전공 졸업. 2005년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사).

### 백원식 (白元植)

1970년 10월 20일생. 1996년 계명대 자연과학대학 수학과 졸업. 2002년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

### 김민회 (金玟會)

1951년 8월 25일생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년 3월~현재 영남이공대학 전기자동차학과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수논문상 수상. 현재 전력전자학회 감사.