

직접토크제어에 의한 리럭턴스 동기전동기의 고성능 위치제어 시스템

論 文
51B-3-7

A High-Performance Motion Control System of Reluctance Synchronous Motor with Direct Torque Control

金 玟 會* · 金 男 燦** · 崔 景 好***
(Min-Huei Kim · Nam-Hun Kim · Kyeong-Ho Choi)

Abstract - This paper presents preliminarily an implementation of digital high-performance motion control system of Reluctance Synchronous Motor (RSM) drives with direct torque control (DTC). The system consist of stator flux observer, torque estimator, two hysteresis band controllers, an optimal switching look-up table, IGBT voltage source inverter, and TMS320F240 DSP controller made by Texas Instruments. The stator flux observer is based on the combined voltage and current model with stator flux feedback adaptive control, and the input of the observer are the stator voltage and current of motor terminal for wide speed range. The rotor position and speed sensor used 6000 pulse/rev encoder. In order to prove rightness of the suggested control algorithm, we have some simulation and actual experimental system at ± 20 and ± 2000 rpm. The developed digitally high-performance motion control system+ are shown a good response characteristic of control results and high performance features using 1.0kW RSM which has 2.57 Ld/Lq salient ratio.

Key Words :DTC, RSM, High-Performance Motion Control, Stator Flux/Torque Observer

1. 서 론

최근 급속도로 발전되고 있는 산업분야에서 서보구동용 제어시스템은 고도의 정밀도와 빠른 응답특성을 갖는 시스템이 필수적이다. 이를 위해 종전에 사용되어온 직류전동기 대신 교류전동기에 벡터제어 이론을 도입한 제어시스템이 여러 분야에서 많이 적용되고 있다. 벡터제어는 난해하고 많은 연산이 요구되는 제어 알고리즘으로 인하여 필수적으로 복잡한 하드웨어와 고속의 프로세서를 사용하여야만 구현이 가능하였다.^{[1]-[4]}

최근에는 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하면서 벡터 제어에서처럼 많은 제어기와 복잡한 연산을 요구하지 않고, 토크의 동적 특성이 전동기의 정수변화에 영향이 적으며, 록업 테이블에 의하여 직접 전동기의 토크와 고정자 자속을 독립적으로 제어 할 수 있는 직접 토크제어 구동 시스템에 대한 연구에 관심이 집중되고 있다.^{[5]-[12]}

고성능 제어용 전동기로는 유도전동기와 동기전동기가 산업용으로 많이 적용되고 있으나, 유도전동기는 복잡한 제어 알고리즘으로 구현에 어려움이 따르며, 동기전동기는 회전자

에 영구자석을 사용함으로 인한 가격상승과 구조적인 문제점이 따르게 된다. 최근 경제적인 측면에서 저렴하며, 정밀 속도제어가 용이한 리럭턴스 동기전동기(RSM, Reluctance Synchronous Motor)가 산업의 발전과 제작기술의 향상으로 유도전동기에 버금가는 특성을 가지는 전동기가 개발 제작되고 있다. 이 전동기는 회전자의 구조가 유도전동기 형태를 가지면서 영구자석을 사용하지 않고 회전자의 자기적 틀극성에 따라 발생하는 동기 리럭턴스 토크에 의해 구동되는 원리를 가진다.

이에 따라 본 연구에서는 유도전동기의 구조로서 영구자석 동기전동기의 특성을 가지는 미래 지향적인 리럭턴스 동기전동기를 직접토크제어 방식을 적용하여 고성능 정밀제어를 할 수 있는 디지털 제어 시스템을 구현하는데 있다.^{[13]-[16]} 일반적으로 전동기 제어시스템은 저속영역에서 부하 맥동에 따른 고성능 운전특성을 얻기가 어렵다. 이를 해결하기 위하여 넓은 영역에서 안정되고 우수한 특성이 얻어지는 고정자 자속 피드백형 자속 추정기를 적용하여 고정자 자속과 토크를 직접 제어하여 빠른 응답특성이 이루어지는 직접 토크제어에 의한 리럭턴스 동기전동기 정밀 위치제어시스템을 제시하였다. 제시된 제어알고리즘과 시스템의 운전특성은 시뮬레이션을 통하여 파라미터의 결정과 타당성을 입증하였으며, 연구용으로 설계제작된 회전자의 리럭턴스비(Ld/Lq)가 2.57인 1.0Kw, 리럭턴스 동기전동기를 적용하여, TMS320F240 DSP 제어기와 IGBT 전압형 인버터에 의해 구동된 제어시스템에서 위치제어의 응답특성을 고찰한 결과 우수한 특성의 고성능이 얻어짐을 확인하였다.

* 正 會 員 : 嶺南理工大學 電氣科 教授 · 工博

** 正 會 員 : 嶺南大學校 大學院 電氣工學科 博士課程

*** 正 會 員 : 嶺南大學校 大學院 電氣工學科 卒業 · 工博

接受日字 : 2001年 9月 19日

最終完了 : 2002年 1月 16日

2. RSM의 특성과 제어

2.1 RSM의 구조 및 특성

고성능 전동기 정밀제어분야는 비동기형 유도기로부터 동기형 전동기로 전환이 급속하게 진행되고 있다. 동기전동기는 회전자 구조에 따라 표면영구자석형(SPM)과 매입영구자석형(IPM) 및 리럭턴스 동기전동기(RSM)로 크게 분류된다. SPM과 IPM은 영구자석의 자체를 이용함으로 소형 고효율 전동기로 널리 이용되고 있으나 가격상승과 영구자석을 사용함으로 인한 문제점이 대두되고 있다. RSM은 영구자석을 사용하지 않고 회전자의 자기적 돌극성에 의해 발생하는 리럭턴스 토크를 이용한 전동기이므로 가격적인 면과 정밀속도제어가 용이하다는 장점으로 최근 관심이 집중되고 있다. RSM의 고정자 구조는 농형 유도전동기와 같은 형태이며, 회전자는 구조에 따라 분절형(segmental)과 자속장벽형(Flux barrier) 및 축이방향 적층형(Axially laminated anisotropic, ALA)으로 크게 구분된다. 본 연구에 적용된 전동기의 회전자는 ALA형으로 제작된 것이다^[10].

이 전동기의 장점은 공급되는 전압의 주파수에 따라 동기속도로 회전되며, 회전자에 전류가 흐르지 않으므로 회전자 손실이 적으며, 기동을 목적으로 회전자에 도체나 권선이 요구되지 않는 것이다. 일반적으로 리럭턴스 동기전동기의 고정자는 3상 대칭 정현파 분포 권선법이 채용되고 있으며, 회전자는 유도전동기의 형태로 비동기로 기동되어 정상상태에서는 오픈루프회로로 동기화된 속도로 운전되는 특성을 가진다. 이 전동기는 저가의 가격으로 쉬운 동기화 속도를 얻는데 비해서, 회전자 설계시 제한된 L_d/L_q 비에 의하여 역률과 출력토크가 낮은 단점을 가진다. 최근 리럭턴스 비를 증가시키는 구조의 회전자에 대한 연구로 유도전동기에 버금가는 정도의 역률과 출력토크가 얻어지고 있다^[10].

2.2 전압 및 토크방정식

리럭턴스 동기전동기의 벡터도는 그림 1에서 보여주고 있으며, 그림 2는 d-q 모델의 등가회로이다. 자기포화를 무시하면, 리럭턴스 동기전동기의 전압방정식과 운동방정식은 회전자 동기좌표계의 d-q 모델로 표시하면 다음 (1)과 (2)식으로 표시되며, 토크는 식(3)으로 유도된다. 또한 자속은 식(4)와 (5)로 표시되며, 역률은 식(6)으로 된다. 여기서 $I_{ds}^s, I_{qs}^s, \Phi_{ds}^s, \Phi_{qs}^s$ 는 정지좌표계상에서의 d축 및 q축 전류와 자속, $I_{ds}^r, I_{qs}^r, \Phi_{ds}^r, \Phi_{qs}^r$ 은 동기좌표계상에서의 d축 및 q축 전류와 자속, L_{ls}, L_{md}, L_{mq} 는 고정자 누설자속과 d축 및 q축의 자기인덕턴스, B는 마찰계수, J는 관성모멘트, 그리고 R_s 는 상당 고정자 저항이다.

$$V_{ds}^r = R_s I_{ds}^r + \frac{d\Phi_{ds}^r}{dt} - \omega_r \Phi_{qs}^r \quad (1)$$

$$V_{qs}^r = R_s I_{qs}^r + \frac{d\Phi_{qs}^r}{dt} + \omega_r \Phi_{ds}^r$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J} (T_e - T_L - B\omega_r) \quad (2)$$

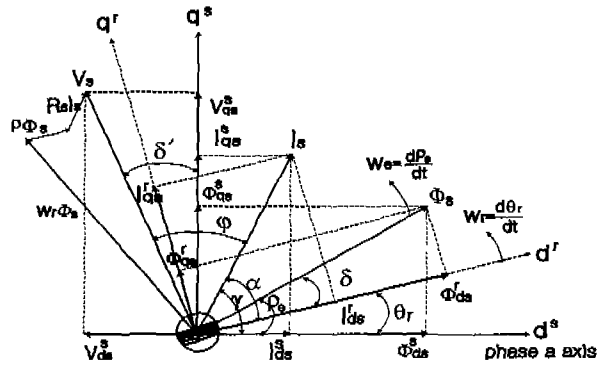


그림 1. RSM의 벡터도
Fig. 1. Vector diagram of a RSM

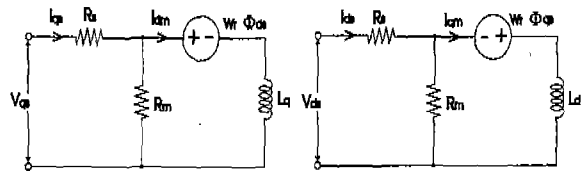


그림 2. RSM의 등가회로
Fig. 2. Equivalent circuit of a RSM

$$\begin{aligned} T_e &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\Phi_{ds}^s I_{qs}^s - \Phi_{qs}^s I_{ds}^s) \\ &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (L_d I_q^r - L_q I_d^r) \\ &= \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (L_d - L_q) I_s \frac{\sin(2\alpha)}{2} \end{aligned} \quad (3)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{ds} &= L_{ls} I_{ds}^s + L_{md} I_{ds}^s = L_d I_{ds}^s \\ \Phi_{qs} &= L_{ls} I_{qs}^s + L_{mq} I_{qs}^s = L_q I_{qs}^s \end{aligned} \quad (4)$$

$$\begin{aligned} |\Phi_s| &= \sqrt{\Phi_{ds}^2 + \Phi_{qs}^2} \\ &= I_s \sqrt{(L_q)^2 \sin^2(\alpha) + (L_d)^2 \cos^2(\alpha)} \end{aligned} \quad (5)$$

$$\cos \phi = \cos(\delta' + \pi/2 - \gamma) \quad (6)$$

2.3 RSM 제어

식(3)에서 보는 것처럼, 토크는 고정자 전류벡터 I_s 의 크기와 변위각 α 에 의존됨을 알 수 있다. 그러므로 RSM의 출력토크는 고정자 전류의 즉각적인 변화에 대응되며, 이는 유도전동기의 벡터제어에서처럼 선형적인 우수한 동적 응답특성을 얻기 위하여 일정한 자속을 유지할 필요가 없음을 의미한다. 또한 부하변화에 따라 고정자 자속을 변화시키므로 전류에 대한 토크의 비를 최대화 할 수 있다.

RSM 제어시스템은 전동기의 토크와 자속 및 속도를 제어하는 것이다. 일반적으로 α 를 일정하게 제어하는 기법은 고속영역과 큰 토크가 요구되는 시스템에서 장점을 가지는 것으로, 최대 토크제어를 위해서는 $\alpha = \pi/4(45^\circ)$ 로 유지되도록 제어하며, 토크의 최대 변화율은 $\alpha = \text{Arctan}(L_d/L_q)$ 일 때 얻어지며, 최대 역률제어는 $\alpha = \text{Arctan}\sqrt{L_d/L_q}$ 일 때 얻어진다. α 를 가변 시키는 기법은 저속영역과 낮은 토크제어가

요구되는 시스템에서 잠점을 가지며, I_{ds}^r 전류는 일정하게 유지하고 I_{qs}^r 전류는 토크에 따라 α 를 제어한다. d축 인덕턴스 L_d 는 과부하 시에는 전류가 증가하고 자기포화의 영향이 크게 일어나므로 급격히 저하된다. 또한 부하전류가 증가하면 전류 위상각 α 가 증가하여 45°보다 크게 된다[16].

직접 토크제어에 의한 리럭턴스 동기전동기의 고성능 제어에서는 회전자 위치 또는 자속의 정보가 필수적으로 요구된다. 이들을 얻는 방법에 따라, 고정자의 단자전압과 전류를 사용하여 고정자 쇄교자속 공간벡터의 속도를 추정하는 방법, 단자전압이 포함하고 있는 포화된 제3고조파 성분을 사용하여 추정하는 방법, 인덕턴스 변화를 이용하여 추정하는 방법, 칼만필터 등 관측기를 사용하여 추정하는 방법, 퍼지-뉴럴회로를 이용하여 추정하는 방법들이 적용되고 있으며, 전동기의 파라메타는 R_s 와 L_d 및 L_q 의 3개가 사용된다. 본 연구에서는 전동기 단자로부터 얻어진 전압과 전류를 사용하여 고정자 쇄교자속 공간벡터를 추정하는 방법을 적용한다.

3. 고정자 자속 관측기

그림 3은 본 연구에서 적용한 넓은 속도 제어범위에서 우수한 특성이 얻어지는 전압전류 모델로, 안정된 자속을 얻기 위하여 고정자 자속을 피드백 하여 적용하는 자속 관측기이다. 여기서 각 부분의 수식은 (7)-(11)에서 나타내었다[7].

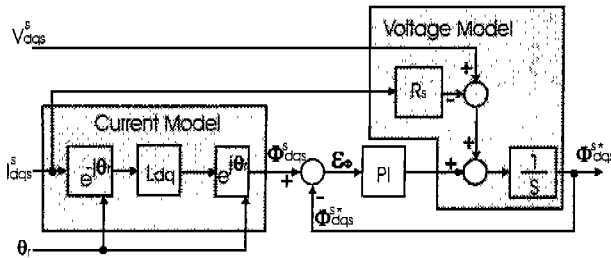


그림 3. RSM의 고정자 자속관측기
Fig. 3. Stator flux observer for RSM

$$I_{qds}^r = \text{Exp}(-j\theta_r) I_{qds}^s \quad (7)$$

$$\Phi_{qds}^r = L_{qd} I_{qds}^r \quad (8)$$

$$\Phi_{qds}^s = \Phi_{qds}^r \text{Exp}(j\theta_r) \quad (9)$$

$$\Phi_{qds}^{s*} = \int [(V_{qds}^s - R_s I_{qds}^s) + \epsilon_\theta (K_P + \frac{K_I}{P})] dt \quad (10)$$

$$\epsilon_\theta = (\Phi_{qds}^s - \Phi_{qds}^{s*}) \quad (11)$$

여기서, I_{qds}^r 은 동기좌표계상에서의 전류, I_{qds}^s 는 정지좌표계상의 전류, Φ_{qds}^r 는 동기좌표계상의 자속, Φ_{qds}^s 는 정지좌표계상에서 전류모델의 자속, Φ_{qds}^{s*} 는 정지좌표계상에서의 실제 자속, K_P 와 K_I 는 자속관측기의 이득을 나타낸다.

4. RSM의 직접 토크제어

4.1 직접 토크제어의 특성

동기전동기의 직접 토크제어(DTC, Direct Torque Control)는 인버터에 가해지는 최적 스위칭 모드 선택에 의하여 전동기에 공급되는 단자전압제어에 의하여 이루어지므로 직접적으로 고정자의 자속과 발생하는 토크를 서로 독립적으로 제어할 수 있다. 빠른 토크응답과 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 토크응답과 유연성 있는 제어를 이룰 수 있다. 이 기술의 주 장점은 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하다는 것이며, 토크의 동적 특성이 전동기 회전자 파라메타 변동에 영향이 적으며, 많은 제어기의 채용과 복잡한 알고리즘 계산에 요구되는 연산시간을 감소시킬 수 있는 특징을 가지고 있어 빠른 동적 응답특성이 요구되는 시스템에 큰 장점을 가지는 제어방식이다[6]-[9]. 일반적으로 고정자 자속의 크기는 가능한 정상적인 안정상태로 유지하고 토크는 고정자와 회전자 사이의 각에 의하여 제어된다.

4.2 최적 스위칭 전압벡터

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 가변 되어 고정자 쇄교자속의 증가가 요구될 때에는 $d\Phi_s = 1$ 로, 감소가 요구될 때에는 $d\Phi_s = 0$ 으로 나타낼 때, 2 레벨 자속 히스테리시스 비교기의 디지털 출력 신호는 식(12)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 정 방향 일 경우는 식(13)로, 역 방향 일 경우는 식(14)의 조건을 적용한다[12]. 이 식을 이용하여 표1의 룩업 테이블에서 최적 전압벡터를 선택한다[8].

$$\begin{aligned} d\Phi_s = 1, & \text{ if } |\overline{\Phi}_s| \leq |\overline{\Phi}_s^*| - |\Delta\overline{\Phi}_s| \\ d\Phi_s = 0, & \text{ if } |\overline{\Phi}_s| \geq |\overline{\Phi}_s^*| + |\Delta\overline{\Phi}_s| \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} dT_e = 1, & \text{ if } |T_e| \leq |T_e^*| - |\Delta T_e| \\ dT_e = 0, & \text{ if } T_e \geq T_e^* \end{aligned} \quad (13)$$

$$\begin{aligned} dT_e = -1, & \text{ if } |T_e| \geq |T_e^*| + |\Delta T_e| \\ dT_e = 0, & \text{ if } T_e \leq T_e^* \end{aligned} \quad (14)$$

여기서, $\Delta\Phi_s$ 는 자속 히스테리시스 제어기의 밴드폭이고, ΔT_e 는 토크 히스테리시스 제어기의 밴드폭을 나타낸다.

표 1. 최적 전압 스위칭 벡터의 룩업 테이블

Table 1. Look-up table of optimum voltage switching vector

$d\Phi_s$	dT_e	Sector	Sector	Sector	Sector	Sector	Sector
		1	2	3	4	5	6
1	1	\overline{V}_2	\overline{V}_3	\overline{V}_4	\overline{V}_5	\overline{V}_6	\overline{V}_1
	0	\overline{V}_7	\overline{V}_0	\overline{V}_7	\overline{V}_0	\overline{V}_7	\overline{V}_0
	-1	\overline{V}_6	\overline{V}_1	\overline{V}_2	\overline{V}_3	\overline{V}_4	\overline{V}_5
0	1	\overline{V}_3	\overline{V}_4	\overline{V}_5	\overline{V}_6	\overline{V}_1	\overline{V}_2
	0	\overline{V}_0	\overline{V}_7	\overline{V}_0	\overline{V}_7	\overline{V}_0	\overline{V}_7
	-1	\overline{V}_5	\overline{V}_6	\overline{V}_1	\overline{V}_2	\overline{V}_3	\overline{V}_4

5. 시스템 구성

직접 고정자 자속과 토크제어에 의한 고성능 리럭턴스 동기전동기의 제어 시스템을 구현하기 위하여 그림 4와 같은 제어시스템을 구성하였다. 위치제어는 PD제어기를, 속도제어는 IP 제어기를 사용하였으며, 토크 및 고정자 자속 추정은 전동기 단자에서 측정된 전압전류를 사용한 전압-전류모델 관측기를 이용하였으며, 자속은 2레벨로, 토크는 3레벨의 히스테리시스 밴드 제어기를 사용하였다. 디지털 제어를 위한 제어기는 전동기제어 전용으로 개발된 F240 DSP를 사용하였다.^[21]

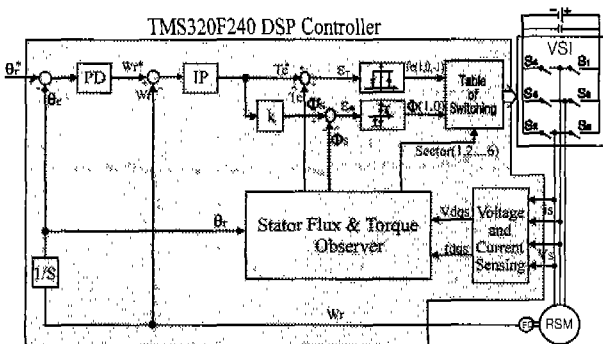


그림 4. 제시된 RSM 제어시스템
Fig. 4. Proposed control system of RSM

표 2. 적용된 RSM의 특성
Table 2. Applied RSM specifications

고정자 외경	128 mm	정격출력	1010 W
고정자 내경	79.46 mm	정격회전수	2400 rpm
공극	0.3 mm	정격부하	4.2 N.m
회전자 두께	65 mm	정격전류	5.0 A
관성모멘트	0.003 Kg.m ²	Ld	36.0 mH
고정자 극수	4	Lq	14.0 mH
회전자 극수	4	Rs	1.0 Ω

6. 시뮬레이션

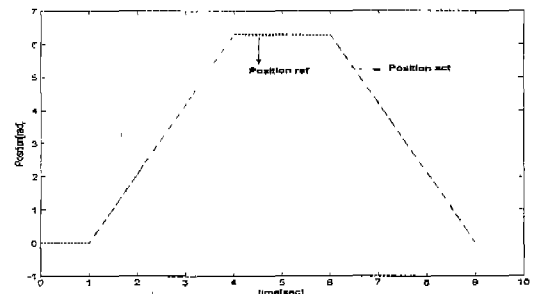
연구에 적용하기 위하여 제작된 RSM의 구조 및 특성은 표 2와 같다. 이 RSM을 적용하여 제시된 제어알고리즘과 구동 시스템의 성능을 평가하기 위하여 Matlab Simulink 프로그램을 사용하여 시뮬레이션을 실시하였다. 시행오차에 의하여 얻어진 제어기의 이득은 표2에 나타내었다. 회전자의 속도와 위치를 검출하기 위해서는 6000 Pulse/rev의 엔코더를 사용하였다.

그림 5는 저속영역인 20[rpm]에서 10초 동안 정역운전으로 위치제어를 한 경우로, (a)는 위치제어 응답특성, (b) 속도제

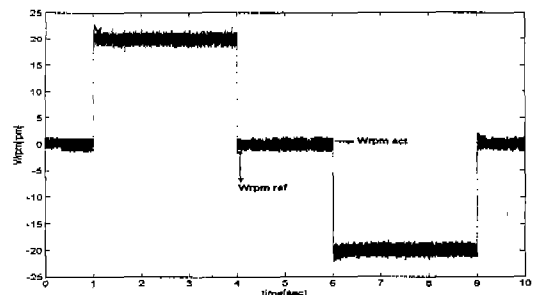
표 2. 적용된 제어기 이득

Table 2. Applied controller gain

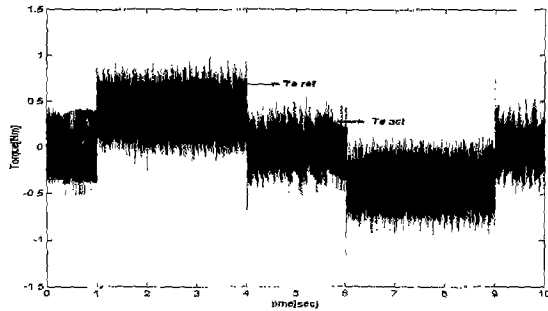
구분	Parameters
자속 Hys. 밴드폭	$ \Phi_s^* \times 0.05$
토크 Hys. 밴드폭	$ T_e^* \times 0.05$
자속 관측기	Kp= 40 Ki= 400
속도제어기	Kp= 4 Ki=10
위치제어기	Kp= 4000 Kd= 5000



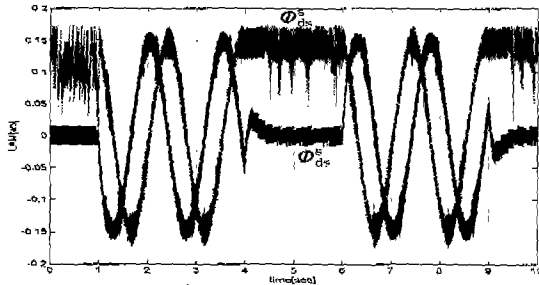
(a) 위치제어 응답특성
(a) Response characteristics of position control



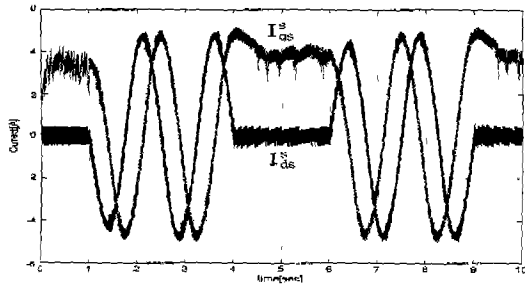
(b) 속도제어 응답특성
(b) Response characteristics of speed control



(c) 토크제어 응답특성
(c) Response characteristics of torque control



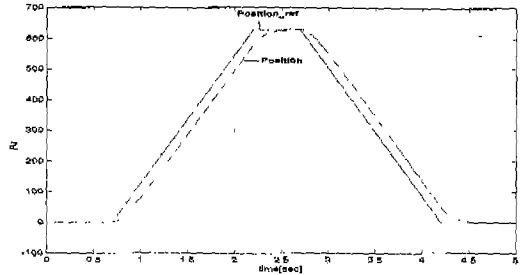
(d) d-q축 고정자 자속파형
(d) Stator flux waveform of d-q axes



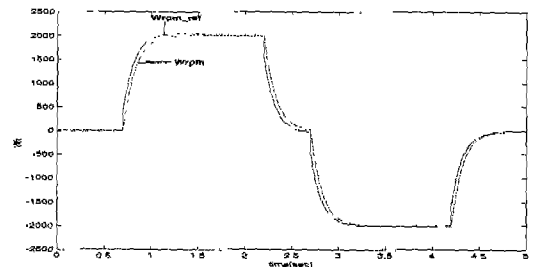
(e) d-q축 고정자 전류파형
(e) Stator current waveform of d-q axes

그림 5. 정상상태 ±20 rpm에서의 시뮬레이션 결과
Fig. 5. Simulation results at ±20 rpm

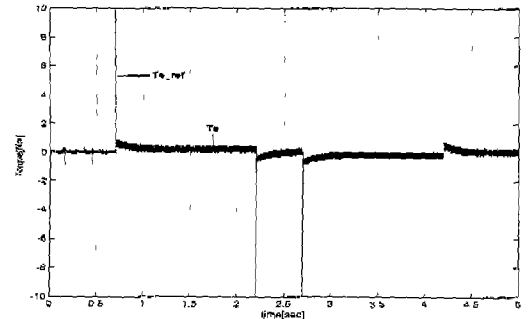
어 응답특성, (c) 토크 응답특성, (d) 고정자 자속파형, (e)는 고정자 d-q축 전류파형의 동작상태를 보여준 것이다. 그림 6은 고속영역인 2000[rpm]에서 10초 동안 정역운전으로 위치제어를 한 경우로, (a)는 위치제어 응답특성, (b) 속도제어 응답특성, (c)는 토크 응답특성을 보여준 것이다.



(a) 위치제어 응답특성
(a) Response characteristics of position control



(b) 속도제어 응답특성
(b) Response characteristics of speed control

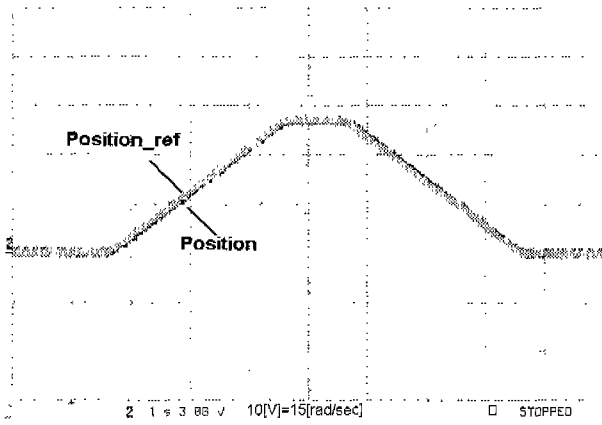


(c) 토크제어 응답특성
(c) Response characteristics of torque control
그림 6. 정상상태 ±2000 rpm에서의 시뮬레이션 결과
Fig. 6. Simulation results at ±2000 rpm

7. 실험결과

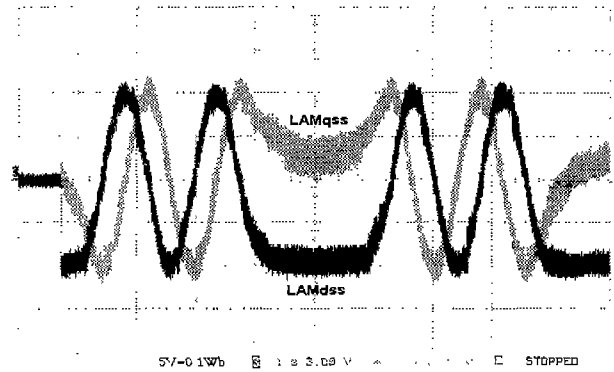
7.1 실험결과

그림 7은 본 연구에서 제안하는 RSM 고성능 제어시스템의 저속영역인 ±20rpm(0→+20→-20rpm)의 정역운전에서 위치제어 실험결과를 보여준 것이다. 이때 부하는 파워더 브레이크 동력제어 장치를 사용하였으며, 전동기의 특성을 고려하여 1/4 부하를 인가하여 실험을 실시하였다. (a)는 위치제어 응답특성, (b) 속도제어 응답특성, (c) 토크제어 응답특성, (d) 고정자 자속파형, (e)는 고정자 자속의 리사즈도형을 보여준 것이다.



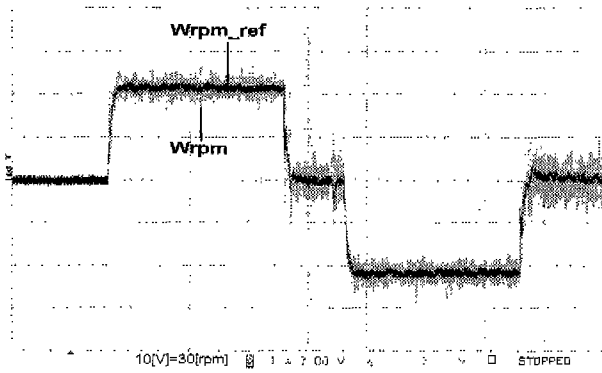
x축=1[sec/div], y축=4.5[rad/div]

(a) 위치제어 응답특성
(a) Response characteristics of position control



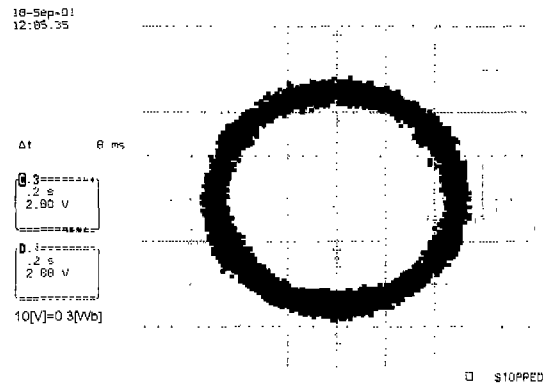
x축=1[sec/div], y축=0.065[Wb/div]

(d) d-q축 고정자 자속파형
(d) Stator flux waveform of d-q axes



x축=1[sec/div], y축=9[rpm/div]

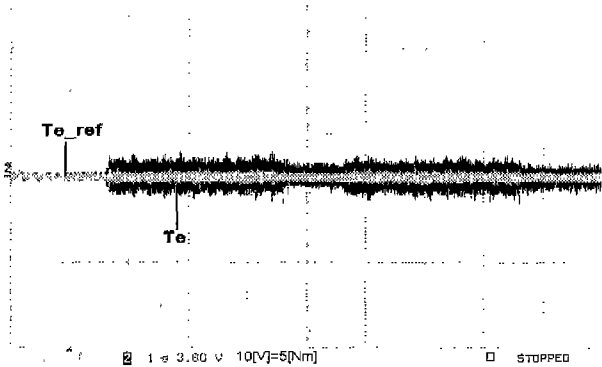
(b) 속도제어 응답특성
(b) Response characteristics of speed control



x축=1[sec/div], y축=0.065[Wb/div]

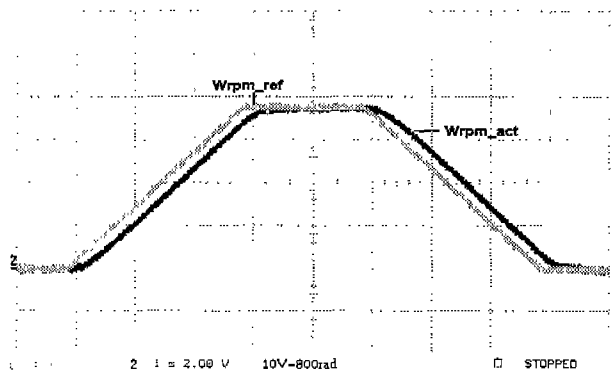
(e) 고정자 자속의 리사쥬도형
(e) Lissajous figure for stator flux

그림 7. 정상상태 ±20rpm에서의 실험결과
Fig. 7. Experiment results of proposed drive system at ±20rpm



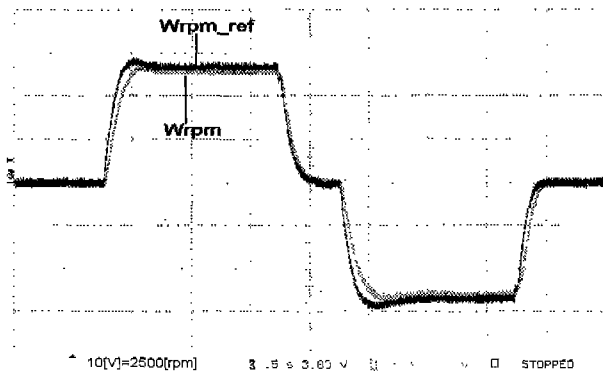
x축=1[sec/div], y축=1.5[Nm/div]

(c) 토크제어 응답특성
(c) Response characteristics of torque control

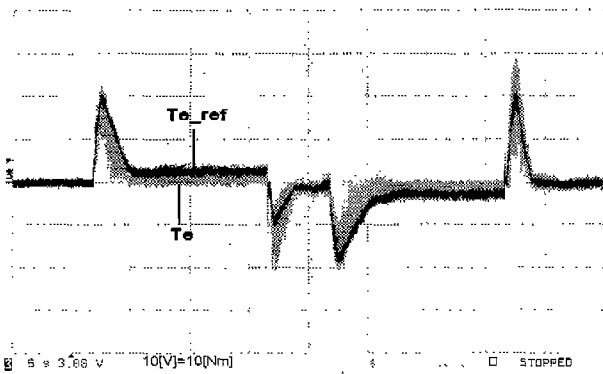


x축=1[sec/div], y축=160[rad/div]

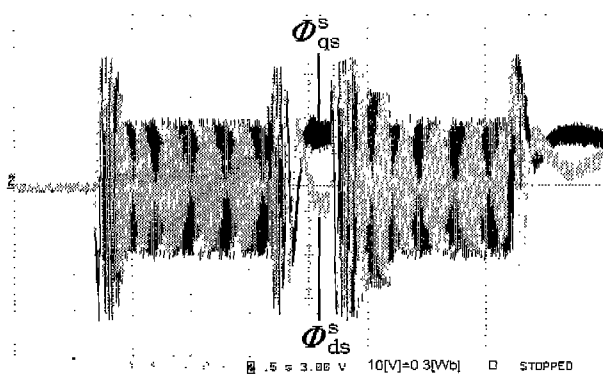
(a) 위치제어 응답특성
(a) Response characteristics of position control



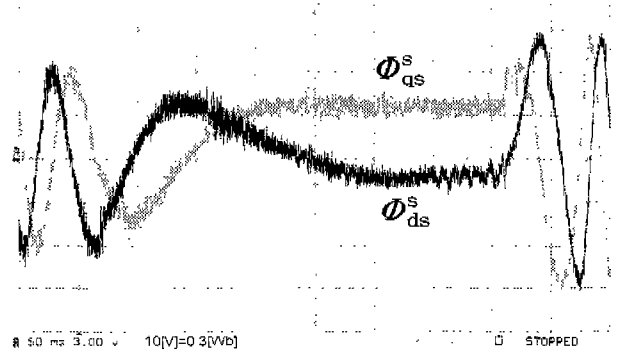
x축=1[sec/div], y축=750[rpm/div]
 (b) 속도제어 응답특성
 (b) Response characteristics of speed control



x축=1[sec/div], y축=3[Nm/div]
 (c) 토크제어 응답특성
 (c) Response characteristics of torque control



x축=1[sec/div], y축=0.09[Wb/div]
 (d) d-q축 고정자 자속파형
 (d) Stator flux waveform of d-q axes



x축=1[sec/div], y축=0.09[Wb/div]
 (e) 과도상태에서 확장된 고정자 자속파형
 (e) Extended stator flux waveform in transient state
 그림 8. 정상상태 ±2000rpm에서의 실험결과
 Fig. 8. Experiment results of proposed drive system at ±2000rpm

그림 8은 고속영역인 ±2000rpm(0-+2000--2000rpm)의 정역운전에서 위치제어 실험결과를 보여준 것이다. (a)는 위치제어 응답특성, (b) 속도제어 응답특성, (c) 토크제어 응답특성, (d) d-q축 고정자 자속파형, (e)는 과도상태에서 정역운전시 확장된 d-q축 고정자 자속의 파형을 보여준 것이다.

7.2 결과 검토

본 연구에서 제시된 직접토크제어에 의한 RSM의 위치제어 시스템은 시뮬레이션 결과와 실 시스템 구성에 의한 실험에서 얻어진 결과는 거의 일치됨이 확인되었으며, 일반적으로 저속영역인 ±20rpm에서 보다 고속영역인 ±2000rpm에서 더 우수한 특성이 얻어 짐을 보여주고 있다. 위치제어와 속도제어에서는 빠른 응답특성과 정밀한 제어특성이 얻어짐이 확인되었다. 그러나 시뮬레이션 결과는 물론 실험결과에서도 토크응답특성은 리플이 큰 것을 보여주고 있는데 이는 직접토크제어 기법이 가지는 결점으로 사료되며 앞으로 해결되어야 할 연구과제이다[16][17]. 이에 따라 시험에 인가된 부하는 연구목적으로 설계 제작된 d-q축 리럭턴스비가 2.57인 낮은 값의 전동기이므로 정격부하의 1/4를 적용하였다.

8. 결 론

본 연구에서는 리럭턴스 동기 전동기(RSM)의 고성능 제어를 위하여 전동기 제어용으로 개발된 F240 DSP 제어기를 사용하여 직접 토크제어에 의한 속도제어 범위가 넓은 디지털 위치제어 시스템을 제시하였다. 제시된 제어시스템의 응답특성을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 실시하였으며, 실험결과 제시된 알고리즘과 구동시스템은 ±20rpm의 저속영역과 ±2000rpm의 고속영역에서도 정역 운전의 우수한 동적 특성이 얻어짐을 보여 주었다.

이 논문은 2001학년도 영남이공대학 연구조성비 지원에 의한 것임

참고 문헌

[1] Min-Huei Kim, Nam-Hun Kim, Min-Ho Kim, and Dong-Hee Kim, "An Induction Motor Position Control System with Direct Torque Control," ISIE 2001, pp. 771-774, June 2001.

[2] 김민회, 김남훈, "DSP를 이용한 유도전동기 디지털 제어 시스템," 한국산업응용학회 논문집, Vol. 3, No.1, pp.9-15, 2000.

[3] 김민회, 김남훈, 김민호, "직접 토크 및 자속 제어에 의한 유도전동기의 위치제어 시스템," 대한전기학회 논문지, 제 49P권 제2호 pp.22-28, Oct 2000.

[4] Technosoft Co., "DSP Digital Motion Controller DMCS-ac Toolbox," 1998.

[5] Jehudi Maes, and Jan A. Melkebeek, "Speed-sensorless Direct Torque Control of Induction Motors Using an adaptive flux observer," IEEE Trans. IA., Vol. 36, NO. 3, pp778-785, May/June 2000.

[6] Cristial Lascu, Ion Boldea, and Fred Blaabjerg, "A modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive," IEEE Trans. IA., Vol. 36, NO. 1, pp. 122-130, Jan 2000.

[7] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drives," IEEE Press, 1997.

[8] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control," Oxford Press, 1998.

[9] Ion Boldea, "Electric Drives," CRC Press, 1999.

[10] Ion Boldea, "Reluctance Synchronous Machines and Drives," Oxford Science, 1996.

[11] Perer Vas, "Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives," Oxford Press. 1999.

[12] Rolf Lagerquist, Ion Boldea, and Tim J. E. Miller, "Sensorless Control of the Synchronous Reluctance Motor," IEEE Trans. on IA., Vol. 30, No. 3, pp.673-682, May, 1994.

[13] Hyeoun-Dong Lee, Seog-Joo Kang, and Seung-Ki Sul, "Feeiciency-Optimized Direct Torque Control of Synchronous Reluctance Motor using Feedback Linearization," IEEE Trans. on IE., Vol. 46, No. 1, pp.192-198, Feb. 1999.

[14] Alfio Consoli, and Galogero Cavallaro "Sensorless Torque Control of Syncrel Motor Drives," IEEE Trans. on PE., Vol. 15, No.1, pp. 28-35, Jan. 2000.

[15] H. Murakami, Y. Honda, S. Morimoto, and Y. Takeda, "Performance Evaluation of Synchronous Reluctance Motor and the Order motors with the Same Distributed Winding and Stator Configuration," T. IEEE Japan, Vol. 120-D, No.8/9, pp. 1062-1074, 2000.

[16] Kuo-Kai Shyu, Chiu-keng Lai, and John Y. Hung, "Totally Invariant State Feedback Controller for Position Control of Synchronous Reluctance Motor," IEEE Trans. on IE., pp. 615-624, Vol. 48, No. 3, June

2001.

[17]Cristia Lascu, Ion Boldea, and Fred Blaadjerg, "A Modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive," IEEE Trans. on IA., Vol. 36, No. 1, pp.122-130, Jan./Feb. 2000.

[18]Jun-Koo Kang, and Seung-Ki Sul, "New Direct Torque Control of Induction Motor for Minimum Torque Ripple and Constant Switching Frequency," IEEE Trans. on. IA., Vol. 35, No. 5, pp.1076-1082, Sep./Oct. 1999.

저 자 소 개



김민회(金玟晷)

1953년 7월 23일 생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년 3월~현재 영남이공대학 전기전자계열 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시주립대학(낙스빌) 전기공학과. 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수 논문상수상. 현재 당 학회 B부문 산학협동이사 및 본부 편집위원
Tel : (053)650-9263, Fax : (053)624-4736
E-mail : mhkim@ync.ac.kr



김남훈(金男暻)

1973년 6월 12일 생. 1998년 삼척대 제어계측공학과 졸업. 2000년 영남대 전기공학과 졸업(석사). 현재 영남대 박사과정.
Tel : 053)650-9263
E-mail : cop1288@yahoo.com



최경호(崔景好)

1967년 4월 28일생. 1991년 영남대 전기공학과 졸업. 1995년 동대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년 1월~2000년 1월 주(효성)전동기부 근무. 2001. 12 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박).
Tel : 053)650-9263
E-mail : khchoi0428@dreamwiz.com