

직접토크제어에 의한 리럭턴스 동기전동기의 고성능 제어시스템

°김민화\*, 김남훈\*\*, 김민호\*\*  
 \*영남이공대학 전기전지계열, \*\*영남대학교 대학원

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

°Min-Huei Kim\*, Nam-Hun Kim\*\*, Min-Ho Kim\*\*  
 \*Yeungnam College of Science & Technology, \*\*Yeungnam University  
 Tel: (053)650-9263, Fax: (053)624-4736, E-mail: mhkim@ync.ac.kr

**Abstract** - This paper presents a high-performance control system for Reluctance Synchronous Motor (RSM) drives with direct torque control (DTC). The system consist of stator flux observer, rotor position/speed estimator, torque estimator, two hysteresis band controllers, an optimal switching look-up table, IGBT voltage source inverter, and F240/C31DSP controller by using fully integrated control software. The stator flux observer is based on the combined voltage and current model with stator flux feedback adaptive control that inputs are current and voltage sensing of motor terminal with estimated rotor angle for wide speed range. The rotor position is estimated by the observed stator flux-linkage space vector. The estimated rotor speed can be determined by differentiation of the rotor position used only in the current model part of the flux observer for a low speed operating area. To prove the suggested control algorithm, we have a simulation and testing at actual experimental system. The developed digitally high-performance position sensorless control system are shown a good motion control response characteristic results and high performance features using 1.0Kw RSM.

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

1. 서론

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 프로세서를 사용해야만 구현이 가능하였다[1]-[3]. 그러나 속도 검출기나 위치 검출기는 시스템을 복잡하게 하고 가격과 유지비를 증가시키며 기계적 강인성과 신뢰성을 떨어뜨릴 뿐 아니라 적용 환경에 따라 존재하는 잡음에 매우 취약하기 때문에 속도 검출기나 위치 검출기 없는 제어 기법에 대한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

최근에는 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하면서 벡터제어에서처럼 많은 제어기와 복잡한 연산을 요구하지 않고, 토크의 동적 특성이 전동기의 정수변화에 영향을 적으며, 룩 업 테이블에 의하여 직접 전동기의 토크와 고정자 자속을 독립적으로 제어 할 수 있는 직접 토크제어 구동 시스템에 대한 연구에 관심이 집중되고 있다[4]-[10].

고성능 제어용 전동기로는 정밀 속도제어가 용이한 리럭턴스 동기전동기(RSM, Reluctance Synchronous Motor)가 산업기술의 발전과 제작기술의 향상으로 최근 유도전동기에 버금가는 특성이 얻어지고 있다. 이 전동기는 회전자의 구조가 유도전동기 형태를 가지면서 영구자석을 사용하지 않고 회전자의 자기적 돌극성에 의해 발생하는 동기 리럭턴스 토크에 의해 구동된다.

이에 따라 본 연구에서는 유도전동기와 영구자석 동기전동기의 특성을 가지면서 미래 지향적인 리럭턴스 동기전동기를 직접토크제어 방식을 적용하여 고성능 정밀제어를 할 수 있는 디지털 제어 시스템을 구현하는데 있다[11]-[13]. 일반적으로 전동기 제어시스템은 저속영역에서 부하 맥동에 따른 고성능 운전특성을 얻기가 어렵다. 이를 해결하기 위하여 넓은 영역에서 안정되고 우수한 특성이 얻어지는 고정자 자속 피이드백형 자속 추정을 적용하여 고정자 자속과 토크를 직접 제어하여 빠른 응답특성이 이루어지는 직접 토크제어에 의한 위치검출기가 없는 리럭턴스 동기전동기 정밀 제어시스템을 제시하였다. 제시된 제어알고리즘과 시스템의 운전특성은 시뮬레이션을 통하여 타당성을 입증하였으며, 1.0Kw 리럭턴스 동기전동기를 적용하여 F240/C31 DSP 제어기와 IGBT 전압형 인버터에 의해 구동된 실시시스템에서 응답특성을 고찰한 결과 우수한 특성이 얻어짐을 확인하였다.

2. RSM의 특성과 제어

2-1. RSM 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)으로 크게 분류된다. SPM과 IPM은 영구자석을 이용함으로써 소형 고효율 전동기로 널리 이용되고 있으나 가격상승과 영구자석 사용으로 인한 문제점이 대두되고 있다. RSM은 영구자석을 사용하지 않고 회전자의 자기적 돌극성에 의해 발생하는 리럭턴스 토크를 이용한 전동기이므로 가격적인 면과 정밀속도제어가 용이하다는 잇점으로 최근 관심이 집중되고 있다. RSM의 고정자 구조는 농형 유도전동기와 같은 형태이며, 회전자는 구조에 따라 분절형(segmental)과 자속장벽형(Flux barrier) 및 축이방향축층형(Axially laminated anisotropic, ALA)으로 크게 구분된다.

이 전동기의 장점은 공급되는 전압의 주파수에 따라 동기속도로 회전하며, 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 오픈루프모드 동기화된 속도

로 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.

### 2-2. 전압 및 토크방정식

리럭턴스 동기전동기의 벡터도는 그림 1에서 보여주고 있으며, 그림 2는 d-q 모델의 등가회로이다. 자기포화를 무시하면, 리럭턴스 동기전동기의 전압 방정식과 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  $L_{ls}$ ,  $L_{md}$ ,  $L_{mq}$ 는 고정자 누설자속과 d축 및 q축의 자기 인덕턴스이며,  $R_s$ 는 상당 고정자 저항이다.

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

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

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

$$T_e = \left(\frac{3}{2}\right) \left(\frac{P}{2}\right) (\Phi_{ds} I_{qs} - \Phi_{qs} I_{ds}) \quad (3)$$

$$\Phi_{ds} = L_{ls} I_{ds} + L_{md} I_{ds} = L_d I_{ds} \quad (4)$$

$$\Phi_{qs} = L_{ls} I_{qs} + L_{mq} I_{qs} = L_q I_{qs}$$

$$|\Phi_s| = \sqrt{\Phi_{ds}^2 + \Phi_{qs}^2} = I_s \sqrt{(L_q)^2 \sin^2(\gamma) + (L_d)^2 \cos^2(\gamma)} \quad (5)$$

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

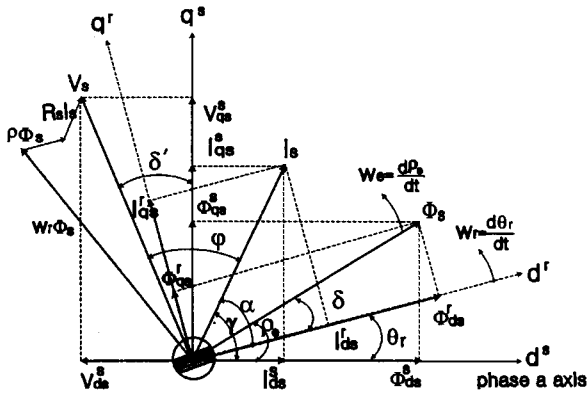


Fig. 1. Vector Diagram of a RSM

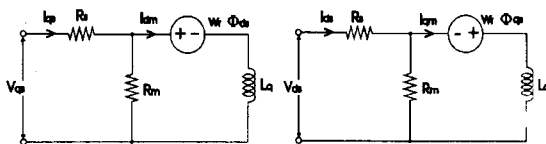


Fig. 2. Equivalent Circuit of a RSM

### 2-3. RSM 제어

식(3)에서 보는 것처럼, 토크는 고정자 전류벡터  $I_s$ 의 크기와 변위각  $\gamma$ 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  $\gamma$ 를 일정하게 제어하는 기법은 고속 영역과 큰 토크가 요구되는 시스템에서 장점을 가지는 것으로, 최대 토크제어를 위해서는  $\gamma = \pi/4$  ( $45^\circ$ )로 유지되도록 제어하며, 토크의 최대 변화율은  $\gamma = \text{Arc Tan}(L_d/L_q)$  일 때 얻어지며, 최대 역률제어는  $\gamma = \text{Arc Tan} \sqrt{L_d/L_q}$  일 때 얻어진다.  $\gamma$ 를 가변 시키는 기법은 저속영역과 낮은 토크제어가 요구되는 시스템에서 장점을 가지며,  $I_{ds}$  전류는 일정하게 유지하고  $I_{qs}$  전류는 토크에 따라  $\gamma$ 를 제어한다. d축 인덕턴스  $L_d$ 는 과부하 시에는 전류가 증가하고 자기포화의 영향이 크게 일어나므로 급격히 저하된다. 또한 부하전류가 증가하면 전류 위상각  $\gamma$ 가 증가하여  $45^\circ$  보다 크게된다.

위치 또는 속도 검출기 없는 리럭턴스 동기전동기의 고성능 제어에서, 회전자 또는 자속의 정보가 필수 적으로 요구된다. 이에 따라 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, 퍼자-뉴럴 회로를 이용하여 추정하는 방법들이 적용되고 있으며, 전동기의 파라미터는  $R_s$ 와  $L_d$  및  $L_q$ 의 3개가 사용된다. 본 연구에서는 전동기 단자로부터 얻어진 전압과 전류를 사용하여 고정자 쇄교자속 공간벡터를 추정하는 방법을 적용한다.

### 3. 자속 및 위치 추정법

#### 3-1. 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.

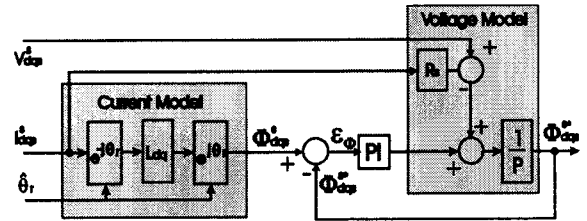


Fig. 3. Stator Flux Observer for RSM

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

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

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

$$\Phi_{qds}^s = \int [(V_{qds}^s - R_s I_{qds}^s) + \epsilon_0 (K_P + \frac{K_I}{P})] dt \quad (10)$$

$$\epsilon_0 = (\Phi_{qds}^{s*} - \Phi_{qds}^s) \quad (11)$$

#### 3-2. 위치 및 속도추정

동기전동기에서  $\theta_r$ 을 미분함으로써 속도를 추정할 수 있다. 본 논문에서는 관측된 고정자 자속정보를 이용하여 속도를 추정한다.

그림 1의 벡터도에서, 정지좌표계에서 고정자 전류와 쇄교자속을 회전자 좌표계의 성분을 정리하여 표시하면 식 (12)와 (13)이 유도된다. 이때 자속각  $\rho_e$ 는 식(14)로 되며, 회전자와 쇄교자속 사이의 각  $\delta$ 는 식 (15)로 된다. 그러므로 추정된 고정자 및 회전자 쇄교자속으로부터 전동기의 속도와 회전자의 위치를 식(16)를 사용하여 추정 할 수 있다. 그림 4는 제시된 시스템의 위치 및 속도추정의 불력도를 나타낸 것이다.

$$\begin{aligned} I_{qds}^s &= I_{qds}^r \text{Exp}(j\theta_r) \\ &= |I_{qs}| \text{Exp}(j(\alpha + \theta_r)) = |I_{qs}| \text{Exp}(j\gamma) \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} \Phi_{qds}^s &= \Phi_{qdr}^r \text{Exp}(j\theta_r) \\ &= |\Phi_s| \text{Exp}(j(\delta + \theta_r)) = |\Phi_s| \text{Exp}(j(\rho_e)) \end{aligned} \quad (13)$$

$$\rho_e = \delta + \theta_r = \tan^{-1} \left( \frac{\Phi_{qs}^s}{\Phi_{ds}^s} \right) \quad (14)$$

$$\begin{aligned} \delta &= \sin^{-1} \left( \frac{\Phi_{qs}^s}{|\Phi_s|} \right) \\ &= \sin^{-1} \left[ \frac{L_q I_{qs}}{\sqrt{(L_d I_{ds})^2 + (L_q I_{qs})^2}} \right] \\ &= \left( \frac{1}{2} \right) \sin^{-1} \left[ \frac{\left( \frac{4}{3P} \right) (L_d L_q) T_e}{|\Phi_s|^2 (L_d - L_q)} \right] \end{aligned} \quad (15)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\rho_e}{dt} - \frac{d\delta}{dt} \quad (16)$$

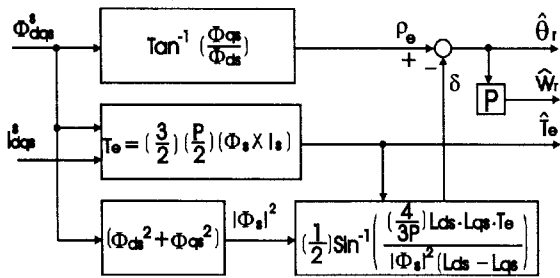


Fig. 4. Position, Speed and Torque Estimator

#### 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 회전자의 파라미터 변동에 영향이 적으며, 많은 제어기의 채움과 복잡한 알고리즘 계산에 요구되는 연산시간을 감소시킬 수 있는 특징을 가지고 있어 빠른 동적 응답특성이 요구되는 시스템에 큰 장점을 가지는 제어방식이다[5]-[8]. 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  $\Delta\Phi_s = 1$ 로, 감소가 요구될 때에는  $\Delta\Phi_s = 0$ 으로 나타낼 때, 2 레벨 자속 히스테리시스 비교기의 디지털 출력

신호는 식(17)의 조건에서 결정되며, 토크의 증가가 요구될 때에는  $\Delta T_e = 1$ , 감소가 요구될 때에는  $\Delta T_e = -1$ , 토크변화가 없을 경우에는  $\Delta T_e = 0$ 으로 나타낼 때, 3 레벨 토크 히스테리시스 비교기의 디지털 출력 신호는 정 방향 일 경우는 식(18)로, 역 방향 일 경우는 식(19)의 조건을 적용한다[10] 이 식을 이용하여 최적 스위칭 전압벡터의 룩업 테이블이 구성된다.

$$\Delta\Phi_s = 1, \quad \text{if } |\overline{\Phi}_s| \leq |\overline{\Phi}_s^*| - |\Delta\overline{\Phi}_s| \quad (17)$$

$$\Delta\Phi_s = 0, \quad \text{if } |\overline{\Phi}_s| \geq |\overline{\Phi}_s^*| + |\Delta\overline{\Phi}_s|$$

$$\Delta T_e = 1, \quad \text{if } |T_e| \leq |T_e^*| - |\Delta T_e| \quad (18)$$

$$\Delta T_e = 0, \quad \text{if } T_e \geq T_e^*$$

$$\Delta T_e = -1, \quad \text{if } |T_e| \geq |T_e^*| + |\Delta T_e| \quad (19)$$

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

#### 5. 시스템 구성

직접 고정자 자속과 토크제어에 의한 검출기 없는 리턴스 동기전동기의 제어 시스템을 구현하기 위하여 그림 5와 같은 제어시스템을 구성하였다. 위치제어는 PD제어기를, 속도제어는 IP 제어기를 사용하였으며, 토크 및 고정자 자속 추정은 전동기 단자에서 측정된 전압전류를 사용한 전압전류모델 관측기를 이용하였으며, 자속은 2레벨로, 토크는 3레벨의 히스테리시스 밴드 제어를 사용하였다.

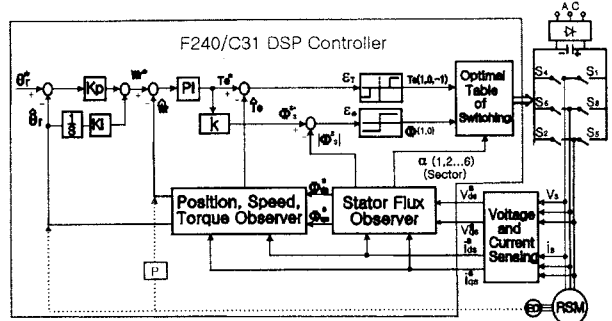


Fig. 5. Proposed Sensorless Control System of RSM

Table 1. Applied RSM

고정자 외경	128mm	정격출력	1000W
고정자 내경	79.46mm	최대회전수	2400rpm
공극	0.3mm	정격부하	4.2N.m
회전자 두께	65mm	정격전류	5.0A
관성모멘트	0.003Kg.m <sup>2</sup>	Ld	36mH
고정자 극수	4	Lq	14mH
회전자 극수	4	Rs	1.0Ω

#### 6. 시뮬레이션

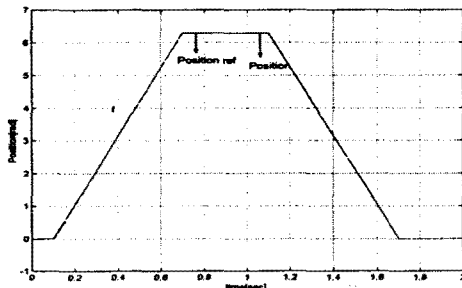
모의 실험에 적용된 RSM의 특성은 표1과 같다. 제시된 제어알고리즘과 시스템의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다. 이때 적용된 제어기의 이득은 표 2에 나타내었다.

그림 6은 저속영역인 100[rpm]에서 속도검출기를 이용하여 위치제어를 한 경우로, (a)는 위치제어 응답특성, (b)는 속도제어 응답특성, (c)는 토크 응답특성, (d)는 고정자 자속파형, (e) 고정자 d-q축 전류파형, (f)는 3상 전류파형을 보여준 것이다. 그림 7은 위치검

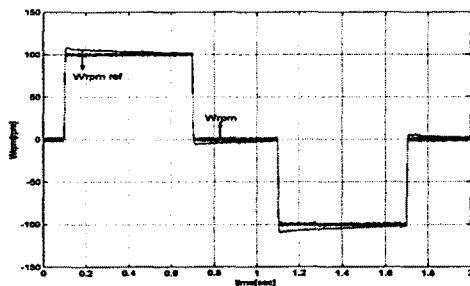
출기 없는 시스템의 시뮬레이션을 위하여 Simulink로 작성된 블록도이다. 그림 8은 제시된 위치제어 없는 제어 시스템에 의하여 100[rpm]에서 위치제어를 한 경우로, (a)는 위치제어 응답특성, (b)는 속도제어 응답특성, (c)는 토크 응답특성, (d)는 고정자 자속파형, (e) 고정자 d-q축 전류파형, (f)는 3상 전류파형을 보여준 것이다.

Table 2. Applied Controller Gain

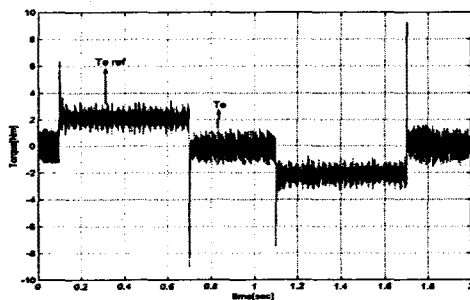
구분	Using Encoder	Sensorless(Actual)
자속 Hy. 밴드	$ \Phi_s^*  \times 0.05$	$ \Phi_s^*  \times 0.05$ (0.01)
토크 Hy. 밴드	$T_e^* \times 0.05$	$T_e^* \times 0.05$ (0.01)
자속 관측기	Kwp= 40 Kwi= 400	20 (87.9) 200 (307.8)
속도제어기	Ksp= 4 Ksi=10	4 (0.3) 10 (0.12)
위치제어기	Kpp= 4000 Kpi= 5000	4000 5000



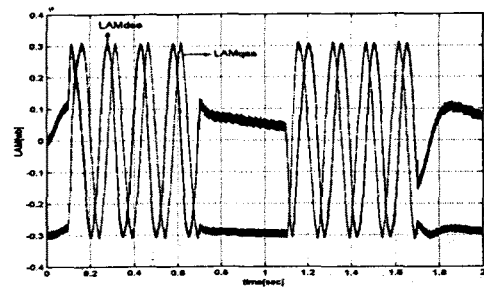
(a) Response Characteristics of Position Control



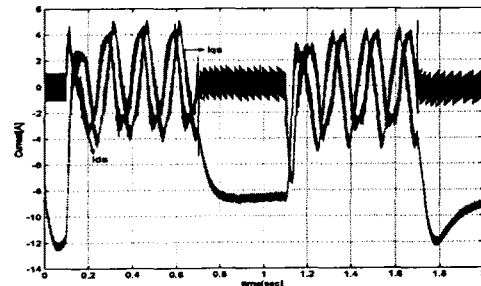
(b) Response Characteristics of Speed Control



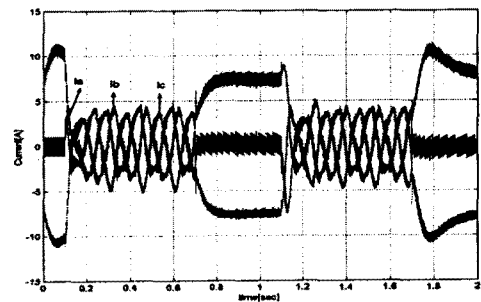
(c) Response Characteristics of Torque Control



(d) Waveform of Stator Flux  $\Phi_{qs}^s$



(e) Waveform of Stator Current  $I_{qs}^s$



(f) Waveform of 3-Phase Current

Fig. 6. Simulation Results using Encoder

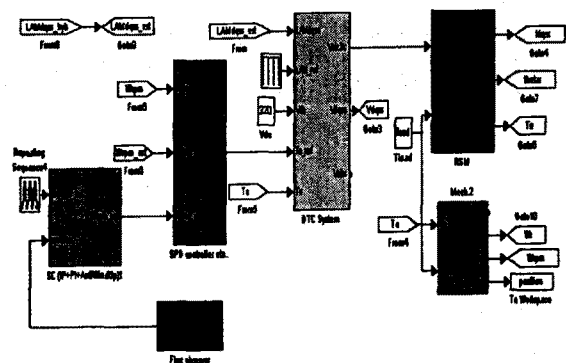
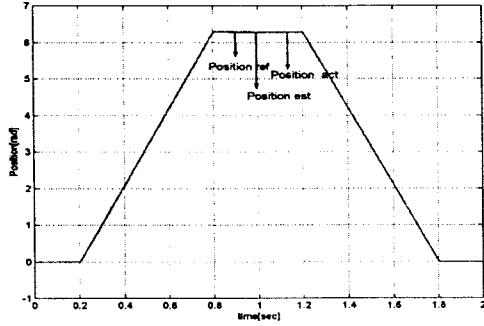
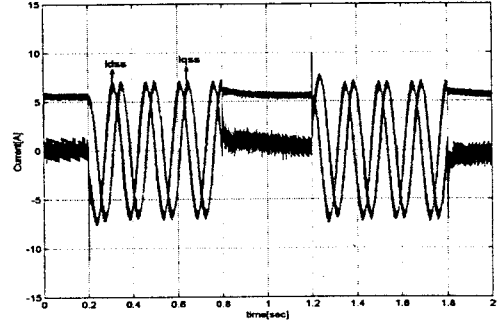


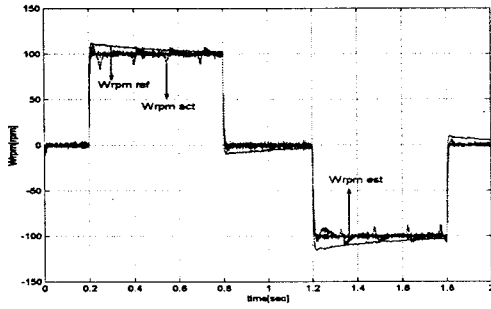
Fig. 7. Block Diagram using Matlab Simulink



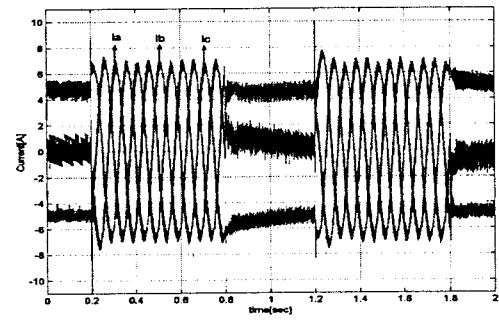
(a) Response Characteristics of Position Control



(e) Waveform of Stator Current  $I_{qds}^s$

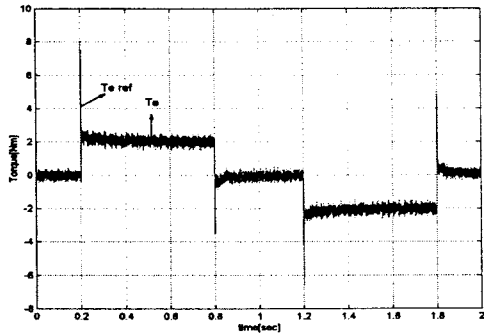


(b) Response Characteristics of Speed Control

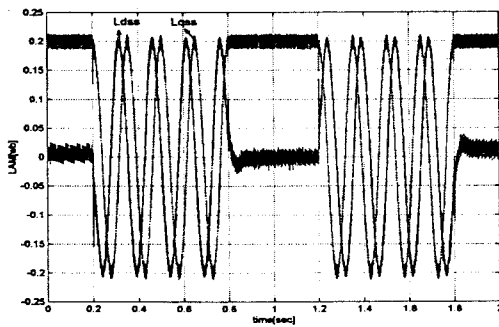


(f) Waveform of 3-Phase Current

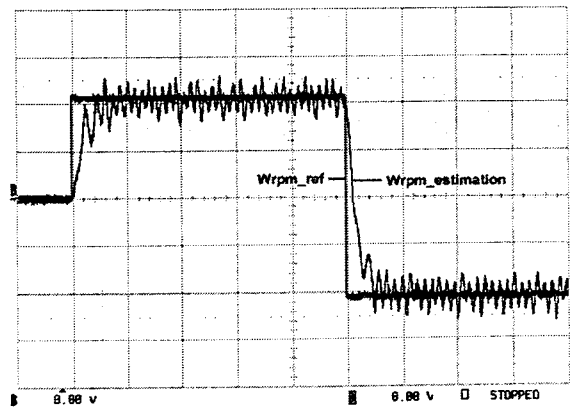
Fig. 8. Simulation Results of Proposed Sensorless



(c) Response Characteristics of Torque Control



(d) Waveform of Stator Flux  $\phi_{qds}^s$



(a) Response Characteristics of Speed Control

## 7. 실험결과

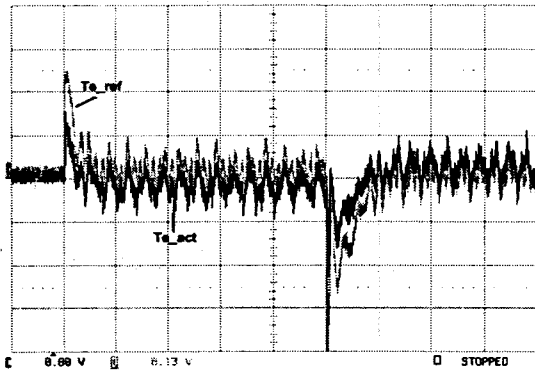
그림 9는 본 연구에서 제안하는 위치검출기 없는 RSM 고성능 제어시스템의  $\pm 200\text{rpm}$  정역운전에서 속도제어( $0 - +200 - -200\text{rpm}$ ) 실험결과를 보여준 것이다. 검출기 없는 시스템은 일반적으로 보다 많은 연산과 빠른 처리 속도를 요구하므로, F240 DSP 적용은 어려움이 있어 C31 DSP 제어기를 사용하였다. (a)는 속도제어 응답특성, (b)는 토크제어 응답특성, (c)는 고정자 자속파형, (d)는 고정자 자속의 리사즈도형을 보여준 것이다.

## 8. 결론

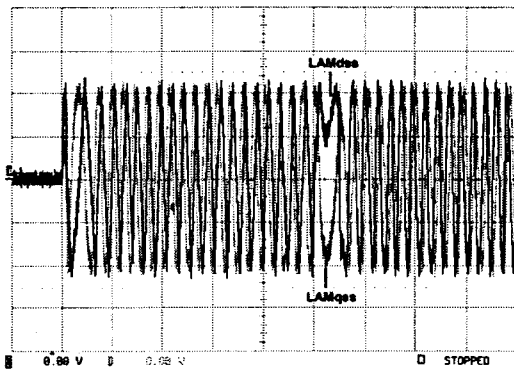
본 연구에서는 리럭턴스 동기 전동기(RSM)의 고성능 제어를 위하여 직접 토크제어에 의한 위치 검출이 없는 제어시스템을 제시하였다. 제시된 제어시스템의 특성을 검증하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 실시하였으며, 실험결과 제시된 알고리즘과 구동시스템은  $\pm 200\text{rpm}$ 의 저속영역에서도 정역 운전의 우수한 동적 특성이 얻어짐을 보여 주었다.

## 참고 문헌

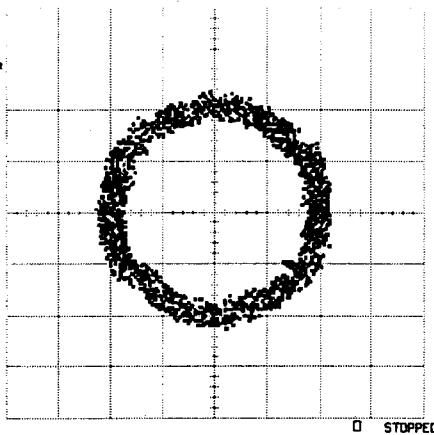
- [1] 김민희, 김남훈, "DSP를 이용한 유도전동기 디지털 제어 시스템", 한국산업응용학회 논문집, Vol. 3, No. 1, pp. 9-15, 2000
- [2] 김민희, 김남훈, 김민호, "직접 토크 및 자속 제어에 의한 유도전동기의 위치제어 시스템" 대한 전기학회 논문지, 제 49P권 제2호 pp.22-28, Cct 2000
- [3] Technosoft Co., "DSP Digital Motion Controller DMCS-ac Toolbox", 1998
- [4] Jehudi Maes, Jan A. Melkebeek, "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
- [5] Cristial Lascu, Ion Boldea, Fred Blaabjerg, "A modified Direct Torque Control for Induction Motor Sensorless Drive", IEEE Trans. IA. Vol. 36, NO. 1, pp. 122-130, Jan 2000
- [6] Bimal K. Bose, "Power Electronics and Variable Frequency Drives, IEEE Press, 1997
- [7] Peter Vas, "Sensorless Vector and Direct Torque Control", Oxford Press, 1998
- [8] Ion Boldea "Electric Drives", CRC Press, 1999
- [9] Perer Vas "Artificial-Intelligence-Based Electrical Machines and Drives", Oxford Press. 1999
- [10] 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
- [11] H-D Lee, S-J Kang, and Seung-Ki Sul, "Efficiency-Optimized Direct Torque Control of Synchronous Reluctance Motor using Feedback Linearization" IEEE Trans. on IE, Vol. 46, No. 1. pp.192-198, Feb. 1999
- [12] Alfio Consoli, Galogero Cavallaro "Sensorless Torque Control of Syncrel Motor Drives" IEEE Trans. on PE, Vol. 15, No.1, pp. 28-35, Jan. 2000,
- [13] H. Murakami, Y. Honda, S. Morimoto, 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



(b) Response Characteristics of Torque Control



(c) Waveform of Stator Flux  $\phi_{qds}^s$



(d) Lissajous Figure for Stator Flux

Fig. 9. Experiment Results of Proposed Sensorless Drive system at  $\pm 200\text{rpm}$