

직접 토크제어에 의한 리럭턴스 동기 전동기의 센서리스 제어시스템

김민희\*, 김남훈\*\*, 백원식\*\*, 김동희\*\*  
 \*영남이공대학, \*\*영남대학교

A Sensorless control system of Reluctance Synchronous Motor with Direct Torque Control

Min-Huei Kim\*, Nam-Hun Kim\*\*, Won-Sik Baik\*\*, Dong-Hee Kim\*\*  
 \*Yeungnam collage of science & technology, \*\*Yeunanam Univ.

**Abstract** - This paper presents a digital speed sensorless control system for Reluctance Synchronous Motor (RSM) drives with direct torque control (DTC). The system consist of stator flux observer, rotor speed estimator, torque estimator, two hysteresis band controllers, an optimal switching look-up table, IGBT voltage source inverter, and TMS320C31DSP 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 speed is estimated by the observed stator flux-linkage space vector. The estimated rotor speed can be determinated by differentiation of the rotor position used only in the current model part of the flux observer for a low speed operating area. In order to prove the suggested speed sensorless control algorithm, There are some simulation and testing at actual experimental system. The developed digitally high-performance speed sensorless control system are shown a good speed control response characteristic results and high performance features using 1.0Kw RSM.

Key Words: DTC, RSM, sensorless speed Control, Stator Flux/Speed/Torque Observer

1. 서 론

최근 급속도로 발전되고 있는 산업분야에서 서보구동용 제어시스템은 고도의 정밀도와 빠른 응답특성을 갖는 시스템이 필수적이다. 이를 위해 속도검출기를 사용한 교류전동기에 벡터제어 이론을 도입한 제어시스템이 여러 분야에서 많이 적용되고 있다. 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[1]-[14].

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

다[4]-[5].

고성능 제어용 전동기로는 정밀 속도제어가 용이한 리럭턴스 동기전동기(RSM, Reluctance Synchronous Motor)가 산업기술의 발전과 제작기술의 향상으로 최근 유도전동기에 버금가는 특성이 얻어지고 있다. 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. 제시된 제어 알고리즘과 시스템의 운전특성은 시뮬레이션을 통하여 타당성을 입증하였으며, 1.0Kw 리럭턴스 동기전동기를 적용하여 TMS320C31 DSP 제어기와 IGBT 전압형 인버터에 의해 구동된 실시스템에서 응답특성을 고찰한 결과 우수한 특성이 얻어짐을 확인하였다.

2. RSM의 특성과 제어

2-1. RSM 구조 및 특성

RSM은 영구자석을 사용하지 않고 회전자와 자기극 돌극성에 의해 발생하는 리럭턴스 토크를 이용한 전동기이므로 가격적인 면과 정밀속도제어가 용이하다는 잇점으로 최근 관심이 집중되고 있다. 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 정현과 분포 권선법이 채용되고 있으며, 회전자는 유도전동기의 형태로 비동기로 기동되어 정상상태에서는 오픈루프로 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. 하지만 최근 리럭턴스 비를 증가시키는 구조의 회전자에 대한 연구로 유도전동기에 버금가는 정도의 역률과 출력토크가 얻어지고 있다[7][8][14].

2-2. 전압 및 토크방정식

자기포화를 무시하면, 리럭턴스 동기전동기의 전압 방정식과 운동방정식은 회전자 동기좌표계의 d-q 모델로 표시하면 다음 (1)로 표시되며, 토크는 식(2)으로 유도된다. 또한 자속은 식(3)으로 표시된다. 여기서  $L_{ls}$ ,  $L_{md}$ ,  $L_{mq}$ 는 고정자 누설자속과 d축 및 q축의 자기인덕턴스이며,  $R_s$ 는 상당 고정자 저항이다[7][8][14].

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

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

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

$$\begin{aligned}\phi_{ds} &= L_{ls} I_{ds} + L_{md} I_{ds} = L_d I_{ds} \\ \phi_{qs} &= L_{ls} I_{qs} + L_{mq} I_{qs} = L_q I_{qs}\end{aligned}\quad (3)$$

### 3. 자속 및 위치 추정법

#### 3-1. 고정자 자속 관측기

그림 1은 본 연구에서 적용한 넓은 속도 제어범위에서 우수한 특성이 얻어지는 전압전류 모델로, 안정된 자속을 얻기 위하여 고정자 자속을 피이드백 하여 적용하는 자속 관측기이다. 여기서 각 부분의 수식은 (4)-(8)에서 나타내었다(6).

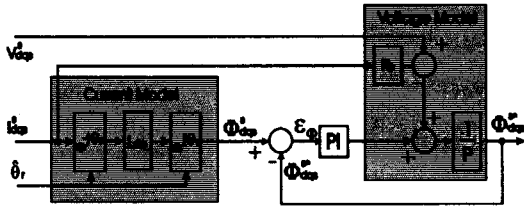


Fig. 1. Stator Flux Observer for RSM

$$I_{qd}^r = \text{Exp}(-j\theta_r) I_{qs}^s \quad (4)$$

$$\phi_{qdr}^r = L_{qd} I_{qd}^r \quad (5)$$

$$\phi_{qds}^s = \phi_{qdr}^r \text{Exp}(j\theta_r) \quad (6)$$

$$\phi_{qds}^s = \int [(V_{qs}^s - R_s I_{qds}^s) + \epsilon_\theta (K_P + \frac{K_I}{P})] dt \quad (7)$$

$$\epsilon_\theta = (\phi_{qds}^{*s} - \phi_{qds}^s) \quad (8)$$

#### 3-2. 속도추정

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

$\rho_e$ 는 자속각을 나타내고 식(9)와 같으며, 회전자의 회전속도는 식(10)으로 나타낼 수 있고, 회전자와 쇄고자속 사이의 각  $\delta$ 는 식(11)으로 된다. 그러므로 추정된 고정자 및 회전자 쇄고자속으로부터 전동기의 속도와 회전자의 위치를 식(12)를 사용하여 추정할 수 있다(7)(10)(12)(14). 그림 2는 제시된 시스템의 속도추정의 불력도를 나타낸 것이다.

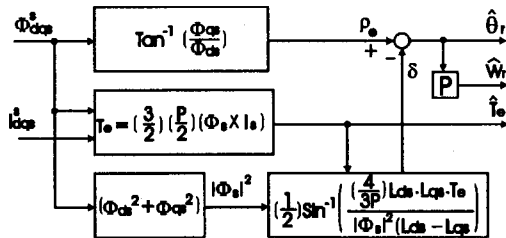


Fig. 2. Speed and Torque Estimator

$$\rho_e = \tan^{-1} \left( \frac{\phi_{qs}^s}{\phi_{ds}^s} \right) \quad (9)$$

$$\hat{\theta}_r = \rho_e + \delta \quad (10)$$

$$\delta = \left( \frac{1}{2} \right) \sin^{-1} \left[ \frac{\left( \frac{4}{3P} \right) (L_d L_q) T_e}{|\phi_{qs}^s|^2 (L_d - L_q)} \right] \quad (11)$$

$$\omega_r = \frac{d\theta_r}{dt} = \frac{d\rho_e}{dt} - \frac{d\delta}{dt} \quad (12)$$

## 4. RSM의 직접 토크제어

### 4-1. 직접 토크제어의 특성

직접 토크 및 자속 제어는 인버터에 가해지는 최적 스위칭 모드 선택에 의하여 전동기에 공급되는 단자전압 제어에 의하여 이루어지므로 직접적으로 고정자의 자속과 발생하는 토크를 서로 독립적으로 제어할 수 있다. DTC의 장점은 제어구조가 디지털 형태로 아주 단순하고, 토크의 동적 특성이 전동기 회전자의 파라미터 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(7), (14).

### 4-2. 최적 스위칭 전압벡터

최적의 스위칭 전압벡터는 출력 토크와 고정자 자속의 상태 모두를 동시에 만족하게 하는 특수한 고정자의 전압벡터를 선택하는 것이다. 이것은 전압원 인버터에서 만들 수 있는 6개의 유효 전압벡터와 2개의 영 전압벡터로 구성된다.

만약 토크의 증가가 요구될 때에는 최적의 스위칭 전압벡터는 고정자 자속을 벌선 방향으로 끌어올리는 방향으로 작용하며 회전자의 자속은 반대방향으로 발생되는 한 개의 고정자 전압벡터( $V_n$ )를 선택한다. 이때 만들어진 사이각은 발생 토크를 효과적으로 증가시킨다. 반대로 토크를 감소시킬 때 최적의 스위칭은 토크를 감소시키는 전압벡터를 선택하여 토크를 감소시킨다. 이와 같은 원리를 적용하여 최적 스위칭 전압벡터의 룩업 테이블 작성한다(2)-(14).

## 5. 시스템 구성

직접 토크제어에 의한 위치 검출기 없는 리터턴스 동기전동기의 제어 시스템을 구현하기 위하여 그림 3과 같은 제어 시스템을 구성하였다. 속도제어는 PI 제어기를 사용하였으며, 토크 및 고정자 자속 추정은 전동기 단자에서 측정된 전압전류를 사용한 전압전류모델 관측기를 이용하였으며, 자속은 2레벨로, 토크는 3레벨의 히스테리시스 밴드 제어기를 사용하였다.

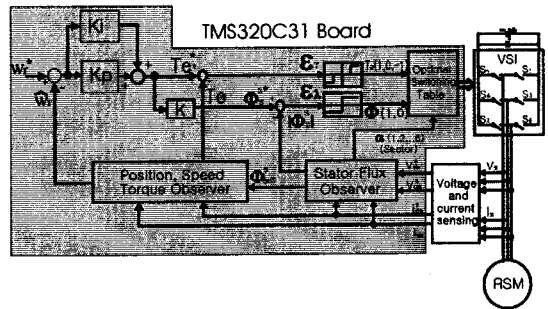


그림 3. Proposed Sensorless Control System of RSM

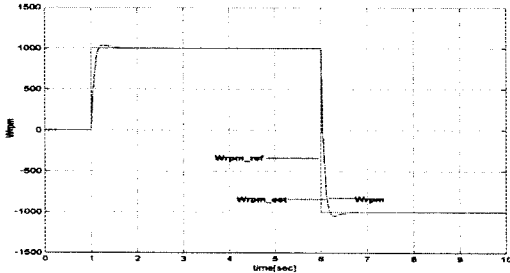
## 6. 시뮬레이션

모의 실험에 적용된 RSM의 특성은 표1과 같다. 제시된 제어알고리즘과 시스템의 성능을 평가하기 위하여 시뮬레이션을 실시하였다.

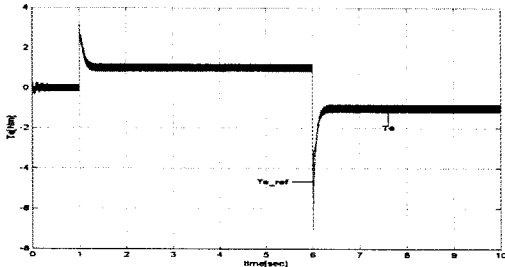
Table 1. Applied RSM

정격부하	4.2(N.m)	정격전류	5.0(A)
관성모먼트	0.003(Kg.m <sup>2</sup> )	Ld	36(mH)
고정자 극수	4	Lq	14(mH)
회전자 극수	4	Rs	1.0(Ω)

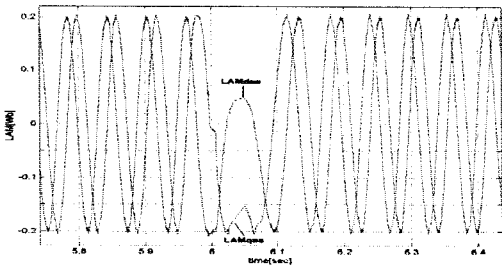
그림 4는 1000에서 -1000(rpm)의 명령을 주었을 경우, 위치검출기 없는 시스템의 응답특성으로 (a)는 속도 응답특성, (b)는 토크 응답특성, (c)는 정지좌표계에서의 고정자 자속파형, (d)는 고정자 자속파형의 리사쥬도형, (e)는 정지좌표계에서의 고정자 전류파형을 보여준 것이다.



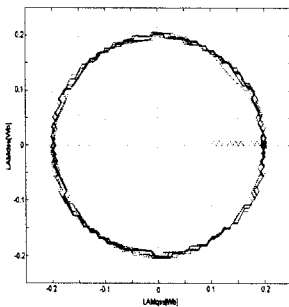
(a) Response Characteristics of Speed Control



(b) Waveform of torque control



(c) Waveform of Stator Flux



(d) Lissajous Figure for Stator Flux

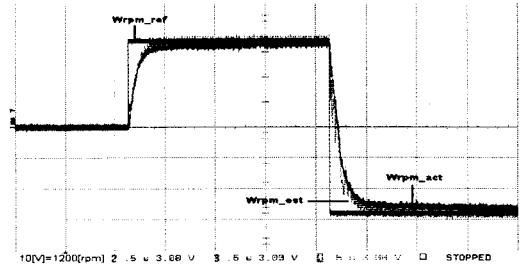
Fig. 4. Simulation Results of proposed sensorless system at  $\pm 1000$ {rpm}

## 7. 실험결과

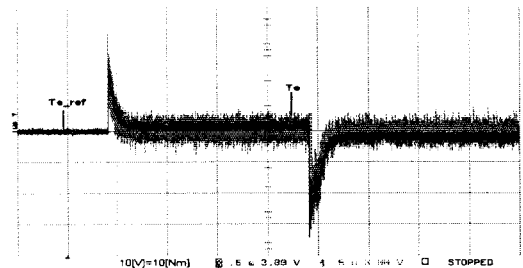
제안된 시스템을 확인하기 위해서, 1.0Kw 리럭턴스 동기전동기를 적용하여 TMS320C31 DSP 제어기와 IGBT 전압형 인버터에 의해 구동하였다. 표1은 적용된 시스템 파라미터를 나타낸다. 그림 5은 본 연구에서 제안하는 위치검출기 없는 RSM 고성능 제어시스템의  $\pm 1000$ rpm 정역운전에서 속도제어 실험결과를 보여준 것으로, (a)는 속도 제어 응답특성, (b)는 토크제어 응답특성, (c)는 고정자 자속파형, (d)는 고정자 자속의 리사쥬도형을 보여준 것이다.

Table 2. Applied system parameters

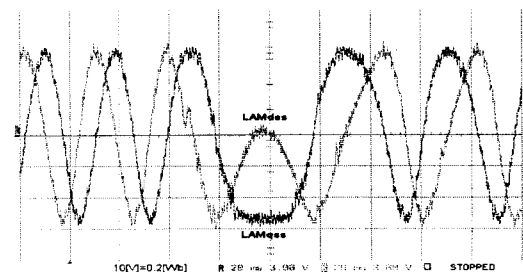
Current sampling time	0.1(msec)
Theta estimation time	0.1(msec)
Speed estimation time	1(msec)
Torque Hys. Band	$0.05 \times \text{LAM}_{ref}$
Flux Hys. Band	$0.05 \times \text{Te}_{ref}$



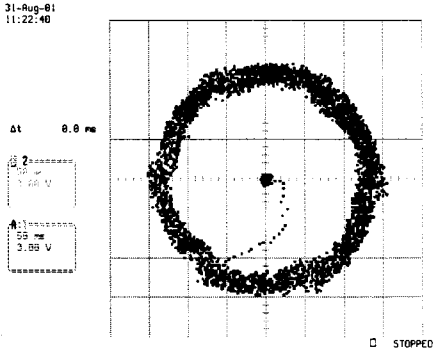
(a) Response Characteristics of Speed Control



(b) Response Characteristics of Torque Control



(c) Waveform of Stator Flux



(d) Lissajous Figure for Stator Flux

Fig. 5. Experiment Results of Proposed Sensorless Drive system at  $\pm 1000\text{rpm}$

### 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 고속영역에서 정역 운전의 우수한 동적 특성이 얻어짐을 보여 주었다.

### 참 고 문 헌

[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, Oct 2000

[3] D. W. Novotny, T. A. Lipo "Vector control and dynamic of AC drives" Oxford University Press, 1996  
 [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] Iron 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  
 [14] Iron Boldea "Reluctance Synchronous Machines and Drives", CLARENDON Press,1996