

고정자 전류벡터를 이용한 리럭턴스 동기전동기의 직접토크제어

김남훈, 김민회*, 백원식, 김동희, 황돈하**
 영남대학교, *영남이공대학, **한국전기연구원

A Direct Torque Control of Reluctance Synchronous Motor with Stator Current Space Vector

Nam-Hun Kim, Min-Huei Kim*, Won-Sik Baik, Dong-Hee Kim, Don-Ha Hwang**
 Yeungnam University, *Yeungnam College of Sci. & Tech., **KERI

ABSTRACT

This paper presents an implementation of Direct torque control(DTC) of Reluctance Synchronous Motor(RSM) drives for an industrial servo drive system with stator current space vector. The estimation of the stator flux magnitude are obtained by using the neural network from measuring the modulus and angle of the stator current space vector. The developed digitally high-performance control system are shown a good response characteristic of control results and high performance features using 1.0kW RSM.

Key Words: DTC, RSM, Neural Network,

1. 서 론

최근 급속도로 발전되고 있는 산업분야에서 정밀하고 빠른 응답 특성을 갖는 전동기 제어시스템이 필수적으로 요구됨에 따라 여러 가지 형태의 제어시스템 개발이 연구되어 오고 있다. 이를 위해 제어 구조가 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 제어할 수 있는 직접 토크제어(Direct Torque Control, DTC) 구동 시스템에 대한 연구에 관심이 집중되고 있다^{[1][15]}. 유도전동기의 경우 회전자 자속이 여자분 전류에 대하여 2차 시정수로 1차지연을 가지므로 반드시 자속관측기를 사용하여야 한다^{[3][6][7]}. 그러나 리럭턴스 동기전동기의 경우는 자속이 전류에 직접 비례하므로 자속관측기를 사용하지 않고 전류벡터만을 이용해 직접 자속을 제어할 수 있다는 장점이 있다^{[9][13]}. 따라서 본 논문에서는 신경

회로망을 이용하여 전류와 위치정보만을 가지고 직접 자속과 토크를 제어하는 직접토크제어 시스템을 제시하였다. 개발된 제어 프로그램과 시스템의 운전특성을 조사하기 위하여 IGBT 전압원 인버터에 연구용으로 설계 제작된 1.0[Kw] 동기전동기를 적용하여 시스템의 동특성을 확인하였다.

2. RSM의 특성과 제어

2.1 전압 및 토크방정식

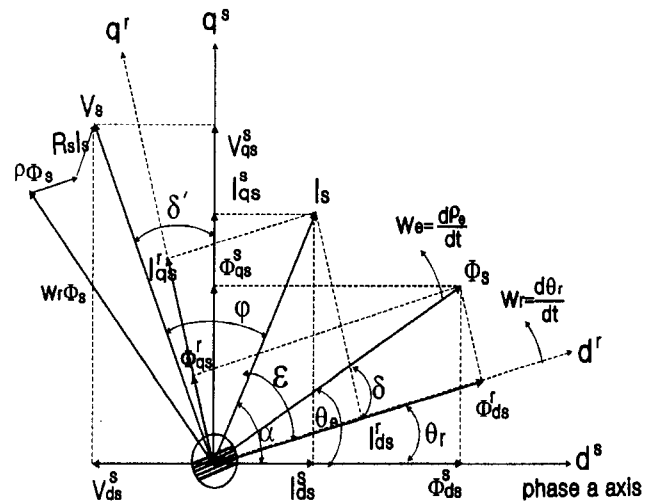


그림 1. RSM의 벡터도
 Fig. 1. Vector diagram of a RSM

리럭턴스 동기전동기의 벡터도는 그림 1에서 보여주고 있다. 자기포화를 무시하면, 회전자 동기좌표계에서 리럭턴스 동기전동기의 전압 방정식과 운동방정식은 다음 식(1)로 표시되며 토크는 식(2)로 유도되고, 그리고 자속은 식(3)과 (4)로 표시된다. 여기서 L_{ls} , L_{md} , L_{mq} 는 고정자 누설자속과 d축 및 q축의 자기 인덕턴스이며, R_s 는 해당 고정자 저항이다^[9].

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

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

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

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

$$\begin{aligned} |\Phi_s| &= \sqrt{\Phi_{ds}^2 + \Phi_{qs}^2} \\ &= I_s \sqrt{(L_q)^2 \sin^2(\varepsilon) + (L_d)^2 \cos^2(\varepsilon)} \end{aligned} \quad (4)$$

2.2 RSM의 직접토크제어

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],[8],[9]}.

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

2.3 신경회로망을 이용한 자속 계산

그림 2는 실 시스템을 이용하여 부하전류의 크기와 변위각(ε)에 따른 고정자 쇄교자속의 비선형적인 변화곡선을 나타내었다. 위 그림에서 알 수 있는 바와 같이 부하 전류벡터와 전류각의 변화에 따라 자속이 복잡하게 비선형적으로 변화된다. 이를 제어 시스템에 적용하기 위하여 그림 3과 같이 Back Propagation Training의 신경회로망을 설계하였으며, 학습을 위하여 NeuralWare사의 Neural Works Professional II/plus V. 5.4를 사용하였다. 신경회로망의 입력은 부하전류의 크기와 변위각이며 출력은 고정자 자속과 보상된 Ld 및 Lq이며, Hidden layer는 6으로 설정하였다^{[6],[10]}.

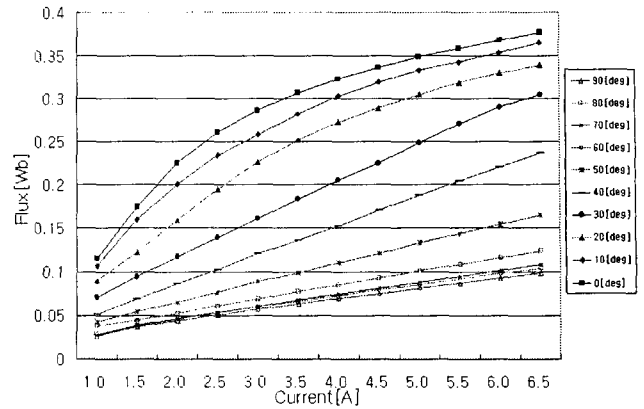


그림 2. 고정자 전류와 변위각 변화에 따라 측정된 자속곡선
Fig. 2. Measured flux curves for different stator current amplitudes and angular displacement

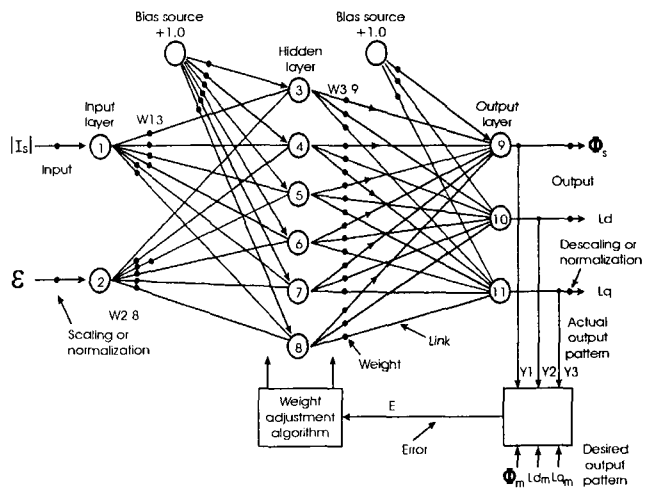


그림 3. 고정자 자속을 위한 역전파 학습기의 구조
Fig. 3. Structure of Back Propagation Training for stator flux linkage

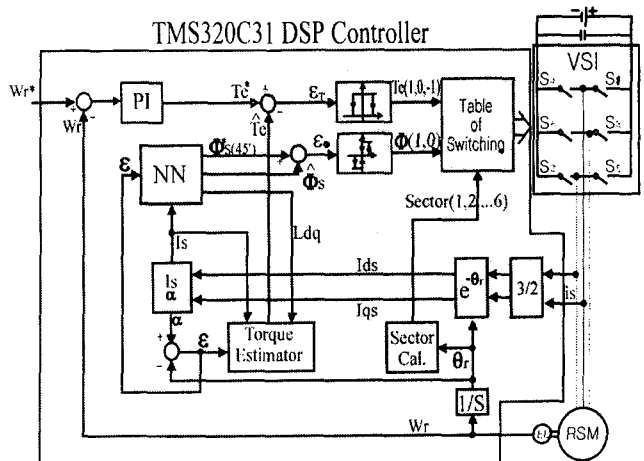


그림 4. 제시된 RSM 제어시스템
Fig. 4. Proposed control system of RSM

3. 시스템 구성

직접 토크제어에 의한 리럭턴스 동기전동기의 제어 시스템을 구현하기 위하여 그림 4와 같은 제어 시스템을 구성하였다. IGBT Voltage Source Inverter를 사용하였고 DSP는 TI사의 TMS320C31을 이용하였다. 속도제어는 PI 제어기를 사용하였으며, 토크 및 고정자 자속 추정은 전동기 단자에서 측정된 전류와 변위각을 입력으로 하여 인공신경망을 이용하여 추정하였으며, 자속은 2레벨로, 토크는 3레벨의 히스테리시스 밴드 제어기를 사용하였다.

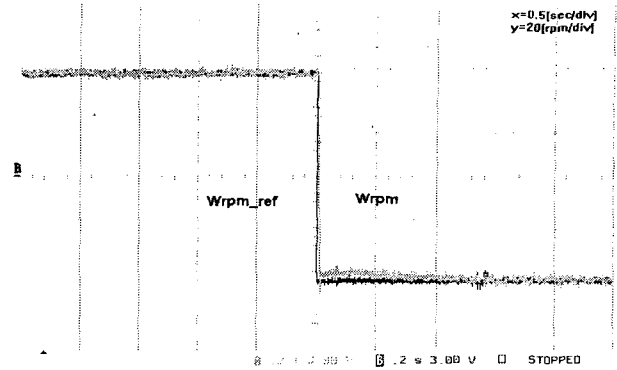
4. 실험결과

표 1은 본 연구에서 적용된 시스템의 파라미터를 나타낸 것이다. 그림 5는 본 연구에서 제안하는 RSM 제어시스템의 저속영역 (+50 ~ -50rpm)의 운전에서 속도제어의 실험결과를 보여준 것이다. 이때 부하는 0.3[Nm]를 인가하였고, 파우더 브레이크 동력제어 장치를 사용하였다. (a)는 속도제어 응답특성, (b)는 확장된 속도제어 응답특성, (c)는 토크제어 응답특성 그리고 (d)는 정지좌표계에서의 고정자 전류파형을 보여준 것이다.

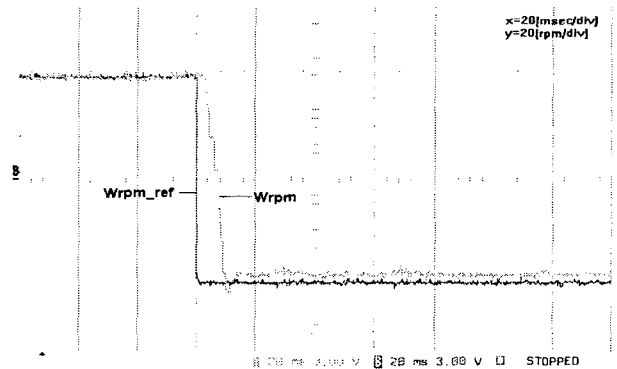
그림 6은 고속영역인 $\pm 1000\text{rpm}$ (+1000 ~ -1000 rpm)의 정역운전에서 위치제어 실험결과를 보여준 것이다. (a)는 속도제어 응답특성, 그리고 (b)는 과도상태에서 정역운전시 정지좌표계에서의 확장된 고정자 전류의 파형을 보여준 것이다.

표 1. 적용된 전동기와 시스템 파라미터
Table 1. Applied motor and system parameters

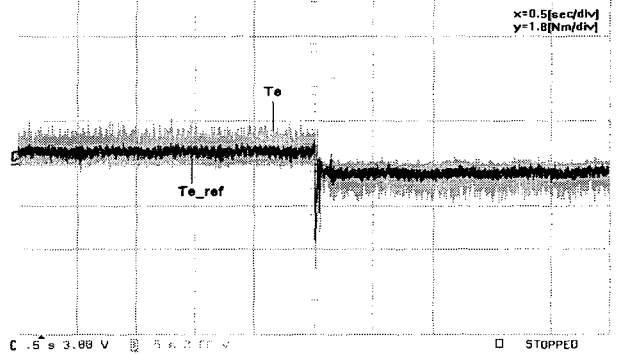
구분	Parameters
정격출력	1 kW
정격회전수	2400 rpm
정격부하	4.2 N.m
정격전류	5.0 A
Ld	72.0 mH
Lq	28.0 mH
고정자 극수	4
회전자 극수	4
자속 Hys. 밴드폭	
토크 Hys. 밴드폭	



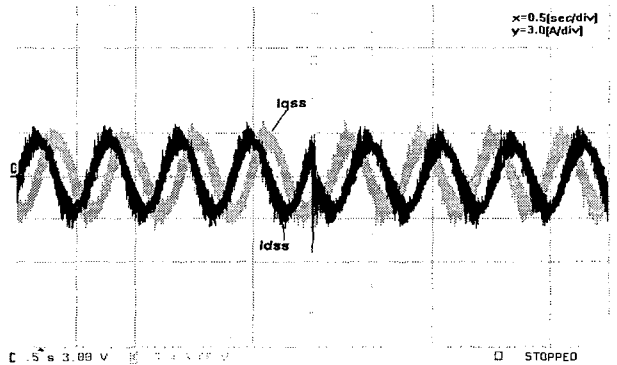
(a) 속도제어 응답특성



(b) 확장된 속도제어 응답특성



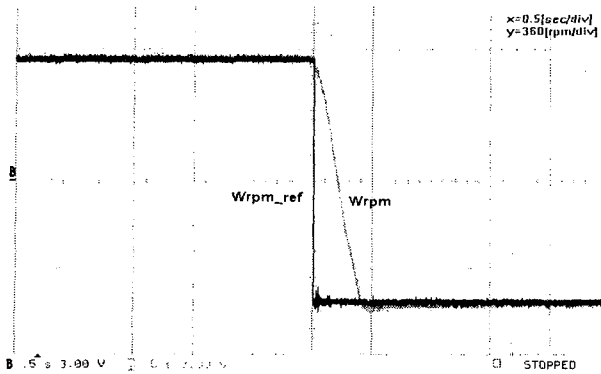
(c) 토크제어 응답특성



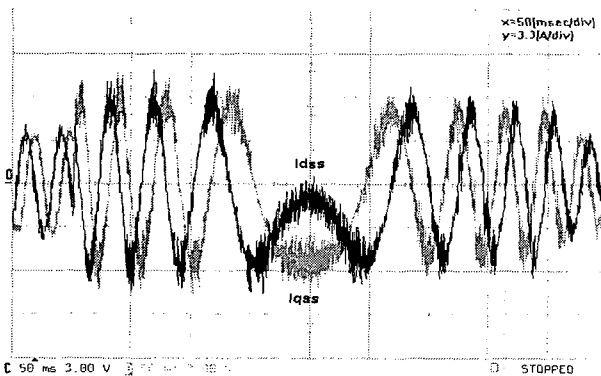
(d) 전류 파형

그림 5. $\pm 50\text{rpm}$ 에서의 실험결과
Fig. 5. Experimental results at $\pm 50\text{rpm}$

참 고 문 헌



(a) 속도제어 응답특성



(b) 전류 파형

그림 6. $\pm 1000\text{rpm}$ 에서의 실험결과

Fig. 6. Experimental results at $\pm 1000\text{rpm}$

5. 결 론

본 연구에서는 인덕턴스를 부하 변화에 따른 L_d 및 L_q 를 보상하였으며, 실제로 측정된 고정자 자속과 전류곡선을 사용하여 부하변화와 전류각에 따라 신경회로망을 사용하여 고정자 자속을 추정하는 직접토크제어에 의한 리럭턴스 동기전동기의 고성능 제어 시스템을 제시하였다. 제시된 알고리즘의 타당성을 검증하기 위하여 연구용으로 설계 제작된 회전자의 구조가 멀티전위 장벽형으로, 리럭턴스비(L_d/L_q)가 2.57을 가진 1.0 kW 리럭턴스 동기전동기를 적용하여, TMS320C31 DSP 제어기와 IGBT 전압형 인버터에 의해 구동하는 제어시스템을 구성하여 실험을 실시하였다. 실험결과 제시된 알고리즘과 구동시스템은 $\pm 50\text{rpm}$ 의 저속영역과 $\pm 1000\text{rpm}$ 의 고속영역에서도 우수한 응답특성이 얻어짐을 확인하였다.

- [1] 김민희, 김남훈, 최경호, "직접 토크제어에 의한 리럭턴스 전동기의 고성능 위치제어 시스템," 대한전기학회 논문지, 제 51B권 제3호 pp 150-157, Mar. 2002.
- [2] 김민희, 김남훈, 백원식, "직접 토크제어에 의한 위치 검출기 없는 리럭턴스 전동기의 고성능 제어시스템," 전력전자학회 논문지, 제7권 제1호, pp. 81-89, 2002. 2월
- [3] 김민희, 김남훈, 김민호, "직접 토크 및 자속 제어에 의한 유도전동기의 위치제어 시스템," 대한전기학회 논문지, 제 49P권 제2호 pp.22-28, Oct 2000.
- [4] 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.
- [5] 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.
- [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] Iron Boldea, "Reluctance Synchronous Machines and Drives," Oxford Science, 1996.
- [10] Min-Huei Kim, M. Godoy Simoes, Bimal K. Bose, "Neural Network-Based Estimation of Power Electronic Waveforms", IEEE Transection on power Electronics, Vol. 11, No. 2, pp. 383-389, March 1996.
- [11] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall PTR, 2002
- [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.