

신경망을 이용한 리럭턴스 동기전동기의 자속보상에 관한 연구

김남훈*, 백원식*, 최경호**, 김민희***, 김동희*
 * 영남대학교, ** 경북전문대학, *** 영남이공대학

A Study on Flux Compensation of Reluctance Synchronous Motor with Neural Network

Nam-Hun Kim*, Won-Sik Baik*, Keyng-Ho Choi**, Min-Huei Kim***, Dong-Hee Kim*
 * Yeungnam University, ** Kyungbook college, *** Yeungnam college of sci. & tech.

Abstract - 본 논문에서는 신경망을 이용한 리럭턴스 동기 전동기(Reluctance Synchronous Motor, RSM)의 자속 보상에 대한 알고리즘을 제시한다. 리럭턴스 동기 전동기의 안정적인 운전을 위해서는 자속 정보가 필수적이다. 그러나 실질적으로 추정된 자속은 스위칭 노이즈 등의 성분을 포함하고 있어서 정밀한 전동기 제어에 많은 문제점을 야기하고 있다. 특히 속도 센서없는 전동기의 운전이나 직접토크제어(Direct torque control, DTC) 등의 제어에 있어서는 자속의 노이즈 성분을 제거하기 위해서 여러 가지 필터들이 사용되고 있지만, 이러한 필터들은 위상지연과 진폭 보상이 필연적으로 이루어져야 한다. 이에 따라 본 연구에서는 1.0[Kw] RSM의 자속보상을 위해 신경망을 사용하고, 제시된 자속 보상방법의 타당성을 위해서 속도센서없는 직접토크 제어를 이용하여 전동기의 동특성을 검증하였다.

1. 서 론

최근 벡터제어이론을 도입한 교류전동기 제어시스템이 고도의 정밀도와 속응성이 요구되는 산업응용분야에 광범위하게 적용되고 있다. 벡터제어기법은 복잡한 연산과 많은 제어기 사용과 함께 전동기의 회전자 속도 또는 자속의 크기와 위치에 대한 정보가 필수적이기 때문에 펄스 엔코더 등의 위치검출기를 이용하여 고속용 프로세서를 이용하여 제어하는 것이 일반적이다. 그러나 위치검출장치는 가격이 비싸고 설치환경에 따라 제약을 받는 등 전동기 응용분야의 확대와 함께 새로운 문제점으로 대두되어 구현에 어려움이 따르고 있다. 이에 따라 위치검출기 없는 전동기의 고성능 정밀제어에 대해 국내외적으로 알고리즘 및 구동에 대한 연구가 급속도로 진행되고 있다.^{[1]-[10]}

지금까지 연구에 적용되고 있는 위치검출기 없는 구동 시스템에서는 자속을 이용하여 속도를 계산하는 방법이 널리 사용되고 있다. 추정된 자속성분은 스위칭 노이즈 그리고 외부에서 유입되는 노이즈 성분들이 포함되어 있어서, 이를 제거하기 위해서 필연적으로 저역통과필터(Low pass filter)나 다른 종류의 필터를 사용하게 된다. 이러한 필터는 자속의 위상지연과 진폭의 감소를 야기함으로써 과도상태에서 추정된 속도 오버슈트등을 발생시킨다. 추정된 속도의 지연은 오버슈트등을 발생하여 제어기의 이득을 아주 작게 설정할 수밖에 없으며, 이로 인하여 속도 응답특성이 매우 나빠진다.^{[6],[7]}

따라서 본 논문에서는 인공신경망(Neural network)을 이용하여 자속의 노이즈 성분을 제거하고, 제어구조가 디지털 형태로 간단하여 전동기 파라미터의 영향이 적은 직접토크제어(DTC, Direct torque control) 이론을 적용한 리럭턴스 동기전동기(RSM, Reluctance synchronous motor)의 속도센서없는 시스템을 구현하였다. 제안된 알고리즘의 타당성을 위해서 인덕턴스비(L_d/L_q)가 2.5인 1.0[Kw] 리럭턴스 동기전동기를 적용하여 시스템의 동특성을 확인하였다.

2. 리럭턴스 동기전동기

2.1 등가회로

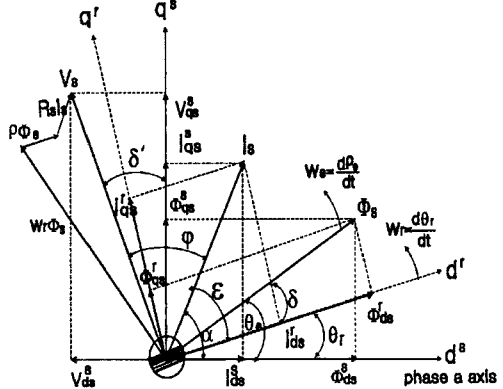


그림 1. RSM의 벡터도
 Fig. 1. Vector diagram of a RSM

리럭턴스 동기전동기의 벡터도는 그림 1에서 보여주고 있다. 자기포화를 무시하면, 회전자 동기좌표계에서 리럭턴스 동기전동기의 전압 방정식과 운동방정식은 다음 식(1)로 표시되며 토르크는 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_s는 상당 고정자 저항이다.^[6]

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

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

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

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

2.2 RSM의 직접토크제어

직접 토크 및 자속 제어는 인버터에 가해지는 최저 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 변동

에 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],[7],[8]}

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

2.3 자속 관측기

그림 2는 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 (5)-(9)에서 나타내었다^[7].

$$I_{qds}^r = \text{Exp}(-j\theta_r) I_{qds}^s \quad (5)$$

$$\Phi_{qds}^r = L_{qd} I_{qds}^r \quad (6)$$

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

$$\Phi_{qds}^s = \int [(V_{qds}^s - R_{s1} I_{qds}^s) + \varepsilon_\theta (K_P + \frac{K_I}{P})] dt \quad (8)$$

$$\varepsilon_\theta = (\Phi_{qds}^s - \Phi_{qds}^{s*}) \quad (9)$$

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

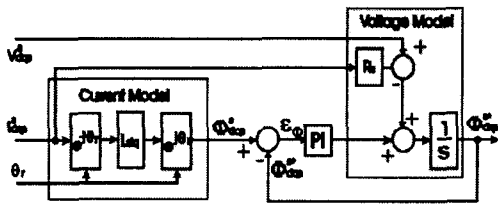


그림 2. RSM의 고정자 자속관측기
Fig. 2. Stator flux observer for RSM

2.4 신경망을 이용한 필터 설계

자속의 노이즈를 제거하여 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 정지좌표계에서의 고정자 전류이며 출력은 노이즈 성분이 제거된 고정자 자속이고 그리고 Hidden layer는 2로 설정하였다.^{[6],[9]}

3. 시스템 구성

직접 토크제어에 의한 리럭탄스 동기전동기의 제어 시스템을 구현하기 위하여 그림 3과 같은 제어시스템을 구성하였다. 속도제어는 PI 제어기를 사용하였으며, 토크 및 고정자 자속 추정에는 전동기 단자에서 측정된 전류와 변위각을 입력으로 하여 인공신경망을 이용하여 추정하였으며, 자속은 2레벨로, 토크는 3레벨의 히스테리시스 밴드 제어기를 사용하였다. 표1은 시뮬레이션에 사용된 전동기의 파라미터를 보여주고 있다.

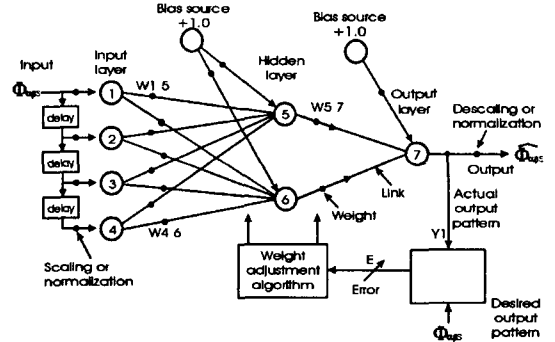


그림 3. 고정자 자속을 위한 역전파 학습기의 구조
Fig. 3. Structure of back propagation training for stator flux linkage

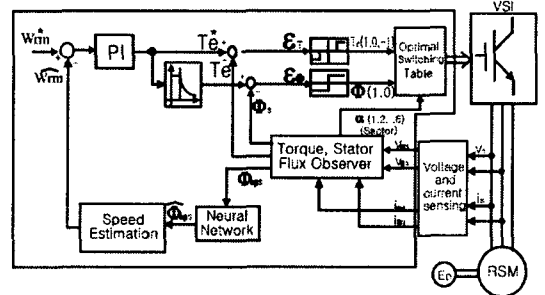


그림 4. 시스템 구성도
Fig. 4. System configuration

표 1. 적용된 RSM의 특성
Table 1. Applied RSM specifications

관성모멘트	0.003 Kg.m ²	정격출력	1010 W
고정자 극수	4	정격회전수	2400 rpm
회전자 극수	4	정격부하	4.2 N.m
L _q	14.0 mH	정격전류	5.0 A
R _s	1.0 Ω	L _d	36.0 mH

4. 시뮬레이션

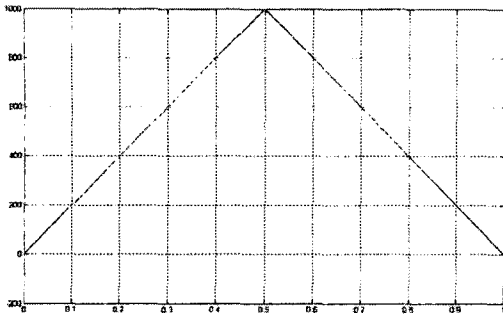
제안된 시스템의 타당성을 알아보기 위하여 Mathwork사의 Matlab simulink를 사용하였다. 그림 5는 본 연구에서 제안하는 인공신경망을 이용한 속도센서를 사용하지 않은 RSM 속도 제어시스템의 모의 실험 결과를 보여준 것으로, 0.0초에서 0.5초 지점까지 0에서 1000rpm의 속도지령을 삼각함수형태로 주었으며 다시 0.5초에서 1초 영역까지 1000에서 0rpm의 속도지령을 삼각함수 형태로 주었을 때 의, (a)는 속도제어 응답특성, 그리고 (b)는 고정자 자속파형 파형을 보여준 것이다.

5. 결론

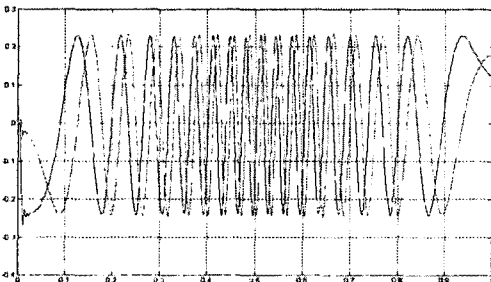
본 논문에서는 속도센서를 사용하지 않는 직접토크제어에서 인공신경망을 사용하여 필터를 구성함으로써 저역통과필터(Low pass filter)를 사용할 때 발생하는 위상 지연과 진폭의 감소를 줄이는 문제점에 대하여 고찰하였다. 자속에 포함된 노이즈 성분을 인공신경망을 이용하여 제거하여 외란에 강인한 속도센서없는 시스템을 설계하였으며, 시뮬레이션을 통하여 제안된 시스템의 정당성을 확인하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 김민회, 김남훈, 최경호, "직접 토크제어에 의한 리럭턴스 전동기의 고성능 위치제어 시스템," 대한전기학회 논문지, 제 51B권 제3호 pp 150-157, Mar. 2002.
- [2] 김민회, 김남훈, 백원식, "직접 토크제어에 의한 위치감출기 없는 리럭턴스 전동기의 고성능 제어시스템," 전력전자학회 논문지, 제7권 제1호, pp. 81-89, 2002. 2월
- [3] 김민회, 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, pp.778-785, 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] Ion Boldea, "Reluctance Synchronous Machines and Drives," Oxford Science, 1996.
- [9] Min Huei Kim, M. Godoy Simoes, Bimal K. Bose, "Neural Network Based Estimation of Power Electronic Waveforms", IEEE Transaction on power Electronics, Vol. 11, No. 2, pp. 383-389, March 1996.
- [10] Bimal K. Bose, "Modern Power Electronics and AC Drives", Prentice Hall PTR, 2002



(a)속도 응답 특성



(b)정지 좌표계에서의 자속 파형

그림 5. 모의실험 결과

Fig. 5. Simulation results