

신경회로망을 이용한 위치센서 없는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 제어시스템

金玟會[†], 白元植^{*}, 李相錫^{**}, 朴贊圭^{***}

A Position Sensorless Control System of SRM using Neural Network

Min-Huei Kim, Won-Sik Baik, Sang-Suk Lee, and Chan-Gyu Park

요 약

본 논문에서는 신경회로망을 이용한 위치센서 없는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 제어시스템에 관해 연구하였다. 스위치드 릴럭턴스 전동기는 회전자 위치에 따라 적정 고정자 권선을 여자시킴으로써 회전력을 발생하기 때문에 회전자 위치정보가 필수적이다. 회전자 위치추정을 위한 위치 검출기는 전반적인 시스템 비용을 증가시키고, 시스템이 복잡해지는 요인이 된다. 본 논문에서는 전류와 자속에 대한 회전자 위치정보의 룩업 테이블을 바탕으로 위치센서 없는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 제어에 관해 연구하였다. 신경회로망은 실험을 통해 구해진 데이터를 바탕으로 회전자 위치추정을 위한 근사함수의 유도를 위해 활용되었으며, 학습된 신경회로망을 이용하여 룩업 테이블을 구성하였다. 제안된 센서리스 알고리즘은 1마력 SRM에 적용되었으며, 실험 및 시뮬레이션을 통해 실현 가능성이 확인되었다.

ABSTRACT

This paper presents a position sensorless control system of Switched Reluctance Motor (SRM) using neural network. The control of SRM depends on the commutation of the stator phases in synchronism with the rotor position. The position sensing requirement increases the overall cost and complexity. In this paper, the current-flux-rotor position lookup table based position sensorless operation of SRM is presented. Neural network is used to construct the current-flux-rotor position lookup table, and is trained by sufficient experimental data. Experimental results for a 1-hp SRM is presented for the verification of the proposed sensorless algorithm.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Position Sensorless Control, Neural Network,

1. 서 론

최근 간단한 구조와 높은 효율 등의 많은 장점을 지

[†]교신저자 : 평의원, 영남이공대학 전기자동차학과 교수
E-mail : mhhkim@ync.ac.kr

^{*}정회원, 영남대 대학원 전기공학과 박사과정

^{**}정회원, 영남이공대학 전기자동차학과 교수

^{***}정회원, 영남이공대학 전기자동차학과 부교수

접수일자 : 2003. 10. 17 1차 심사 : 2003. 12. 20

2차 심사 : 2004. 2. 9 심사완료 : 2004. 2. 20

니고 있는 스위치드 릴럭턴스 전동기에 대한 관심이 고조되고 있으며, 전력전자분야 및 디지털 연산 장치의 발전에 따라 적용이 확대되고 있다. SRM은 회전자 위치에 따라 적정 고정자 권선을 여자시킴으로써 회전력을 발생하기 때문에 회전자 위치 정보가 필수적으로 요구된다^{[1][2]}. SRM의 회전자 위치검출을 위해서는 엔코더, 래즐버 등의 위치검출기가 사용되고 있으나, 이러한 회전자 위치검출장치는 시스템의 비용을 증가시키고 열악한 환경에서의 전동기의 신뢰성을 저감시키

며 전동기 부피를 증가시키는 요인이 된다. 최근에는 위치검출장치 없이 SRM을 구동하기 위한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이러한 연구들은 모두 회전자 위치에 따라 변화하는 SRM의 인덕턴스 특성을 기본으로 하고 있다. 회전자 위치정보를 내포하고 있는 인덕턴스 값은 SRM의 구조적인 특성상 전류에 따라 그 크기가 많이 달라지므로 정밀한 회전자 위치추정을 위해서는 전류에 따른 인덕턴스 변화에 대한 보상이 이루어져야 한다^{[3]-[6]}. 본 논문에서는 보다 정밀한 회전자 위치 추정을 위해 신경회로망을 적용하였으며, 전류 및 쇄교자속에 따른 회전자 위치정보에 대한 근사함수가 유도되었다. 제안된 알고리즘은 시뮬레이션 및 실험을 통해 검증되었으며, 추정된 회전자 위치정보를 적용한 속도응답특성을 통해 센서리스 알고리즘의 실현 가능성이 확인되었다.

2. SRM의 수학적 모델링

SRM은 고정자와 회전자가 모두 돌극형 구조로 이루어져 있고, 고정자에만 집중권으로 권선이 감겨 있으며, 회전자 위치에 따라 적정 고정자 권선을 여자시킴으로써 회전력을 발생한다.

기계적 에너지로 변환되는 에너지의 크기는 철심의 자기적 포화와 프런징 현상을 무시함으로써 용이하게 해석될 수 있으며, 이러한 가정 하에서 SRM의 한상의 전압과 입력에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다^{[1][2]}.

$$v = Ri + \frac{d\Psi}{dt} = Ri + \omega_m \frac{d\Psi}{d\theta} = Ri + \omega_m \frac{d(Li)}{d\theta} = Ri + L \frac{di}{dt} + \omega_m i \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

$$v_i = Ri^2 + Li \frac{di}{dt} + \omega_m i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (2)$$

입의 시점에서의 자계저장에너지의 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{dt} + Li \frac{di}{dt} = \frac{1}{2} i^2 \omega_m \frac{dL}{d\theta} + Li \frac{di}{dt} \quad (3)$$

기계적인 에너지로의 전력변환은 입력에너지에서 저항에 의한 손실과 자계저장에너지의 변화량을 제외한 나머지에 해당되므로 식 (2)와 식 (3)으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_{mech} = vi - Ri^2 - \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) = \frac{1}{2} i^2 \omega_m \frac{dL}{d\theta} = \omega_m T_e \quad (4)$$

식 (4)로부터 출력 토크 T_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = p_{mech} / \omega_m = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (5)$$

3. 센서리스 알고리즘

3.1 쇄교자속 추정

SRM은 회전자 위치에 따라 인덕턴스가 변하기 때문에 상전압 및 상전류로부터 회전자의 위치 추정이 가능하다. 그림1은 0.4[A] 단위의 전류와 2도 단위의 회전자 위치각에 따라 실험 및 유한 요소해석을 통해 얻어진 3상 1마력 6/4극 SRM의 전류 및 회전자 위치에 따른 인덕턴스를 나타내고 있다.

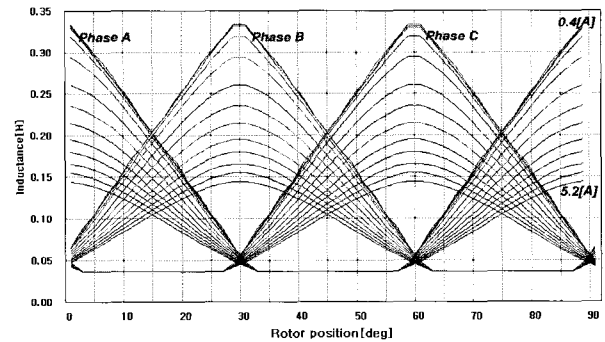


그림 1 회전자 위치와 전류에 대한 인덕턴스의 변화
Fig. 1 Inductance variation according to rotor position and current

회전자 위치정보를 포함하고 있는 인덕턴스는 상전압 및 상전류로부터의 쇄교자속을 통해 추정될 수 있으며, 쇄교자속은 패러데이 법칙으로부터 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\lambda = \int (v - Ri) dt \quad (6)$$

비대칭 브리지형 컨버터에서의 회전자 위치 추정을 위한 쇄교자속은 스위칭 소자 및 다이오드에서의 전압강하를 무시할 경우 스위칭 상태에 따라 다음과 같이 구할 수 있다^[1].

$$\omega \frac{d\lambda}{d\theta} = d_1[v - Ri] + d_2[-Ri] + d_3[-v - Ri] \quad (7)$$

여기서 v, R, i, ω 는 각각 전원전압, 상저항, 상전류 및 회전속도를 나타내고, d_1 은 권선에 전원전압이 인가된 시간을 나타내고, d_2 는 하나의 스위치 및 하나의 다이오드를 통해 전류가 흐르고 있는 시간을 나타내며, d_3 는 두개의 다이오드를 통해 전류가 흐르고 있는 시간을 나타낸다.

식 (7)을 통해 쇄교자속은 전원전압에서 권선저항에 의한 전압강하를 제외한 나머지를 적분함으로써 근사적으로 유도될 수 있으며, 제어 프로그램 내에서의 보다 정밀한 쇄교자속의 추정을 위해서는 Tustine의 근사법을 적용하여 다음과 같이 구할 수 있다.

$$\lambda(k) = \lambda(k-1) + 0.5T(v(k) - Ri(k) + v(k-1) - Ri(k-1)) \quad (8)$$

여기서 T 와 k 는 각각 샘플링 주기와 샘플링 시점을 나타낸다.

3.2 신경회로망을 이용한 회전자 위치 검출

쇄교자속과 전류에 따른 회전자 위치각의 비선형적인 함수는 신경회로망을 적용함으로써 효과적으로 모델링 될 수 있다^{[7]-[9]}. 신경회로망은 복잡한 문제에 대한 근사해를 신속히 찾아낼 수 있으며, 패턴인식에 대한 능력이 뛰어나고, 단편적인 정보로부터 연관된 전체적인 정보의 유추가 가능하다는 많은 장점이 있다. 따라서 신경회로망은 현재 신호 해석 및 처리, 공정 제어, 노이즈 필터링, 의료분야의 진단 등을 포함한 많은 분야에서 적용되고 있다^{[10][11]}.

패턴인식을 비롯한 여러 분야에서 가장 보편적으로 적용되는 역전파 네트워크(back-propagation network)에서의 각 뉴런의 출력은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$S = \sum_{k=1}^N X_k W_k + b$$

$$Y = \frac{1}{1 + \exp(-S)} \quad (9)$$

여기서 X_k 는 입력 데이터, W_k 는 연결강도, b 는 바이어스, S 는 입력 가중합, 그리고 Y 는 출력을 나타낸다. 본 논문에서는 전류 및 쇄교자속에 따른 회전자 위치에 대한 비선형적인 함수의 근사화를 위해 2개

의 입력층과 10개의 은닉층, 그리고 1개의 출력층 뉴런의 역전파 네트워크를 구성하였다. 활성화 함수는 시그모이드(sigmoid) 함수를 적용하였으며, 학습을 위한 데이터는 실험을 통해 구한 전류와 쇄교자속에 대한 회전자 위치각이 적용되었다.

신경회로망의 학습을 위해서는 Neural Works사의 Professional II/plus Ver. 5.4 프로그램을 사용하였으며, 그림 2는 신경회로망의 학습을 위한 프로그램을 나타내고 있다. 그림 3은 학습된 신경회로망을 통해 구해진 쇄교자속 및 전류에 따른 회전자 위치각을 나타내고 있다.

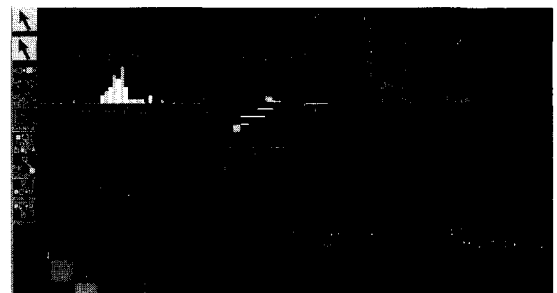


그림 2 신경회로망의 학습을 위한 프로그램
Fig. 2 Program for the neural network training

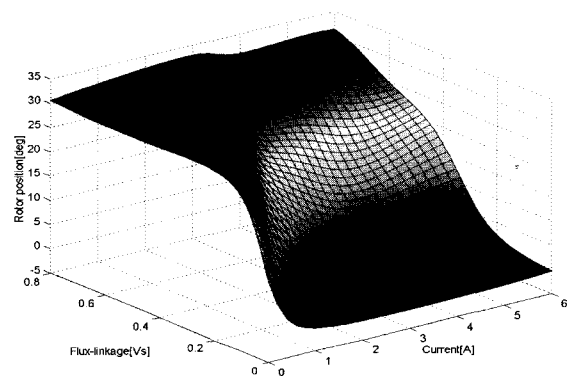


그림 3 학습된 신경회로망을 통해 구한 쇄교자속 및 전류에 따른 회전자 위치각
Fig. 3 Rotor position according to the flux-linkage and current obtained by trained neural network

비선형적인 함수의 근사화가 용이한 신경회로망은 제어시스템 적용 시에 연산시간이 많이 소요된다는 단점이 있다. 보다 효율적인 연산을 위해서 활성화 함수를 룩업 테이블로 구성하고 학습된 신경회로망의 수식을 적용하여 회전자 위치를 추정하는 기법이 적용되고 있다^[7]. 본 논문에서는 학습된 신경회로망의 출력을 전

류 및 쇄교자속에 대한 2-D 룩업 테이블로 구성하여 직접적으로 적용함으로써, 신경회로망의 수식을 적용할 경우 요구되는 연산시간이 저감될 수 있도록 하였으며 그림 4는 회전자 위치추정에 적용되는 2-D 룩업 테이블을 얻기위한 전체적인 흐름도를 나타내고 있다.

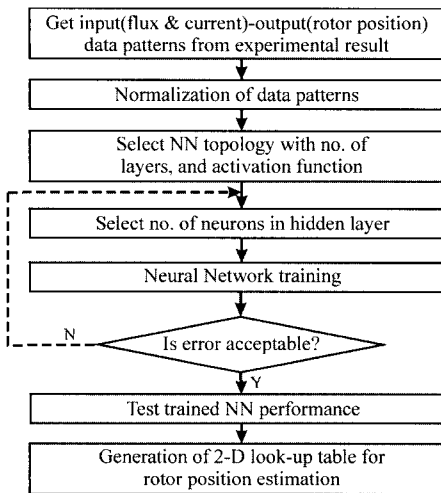


그림 4 회전자 위치 추정기를 위한 흐름도
Fig. 4 Flowchart for the rotor position estimator

4. 시뮬레이션 결과

SRM은 고정자 및 회전자 극이 돌극형으로 이루어져 있고 고정자 권선이 집중권으로 구성되어 있기 때문에 자기적인 포화현상으로 인한 비선형적인 특성을 나타낸다. 본 논문에서는 보다 정확한 시뮬레이션을 위해 전류에 따른 인덕턴스의 비선형적인 특성이 고려되도록 하였다^[5]. 그림 5는 본 논문에서 적용된 3상 6/4극 1마력 SRM의 전류에 따른 인덕턴스의 변화율을 나타내고 있으며, 인가전압으로부터 전류 및 토크

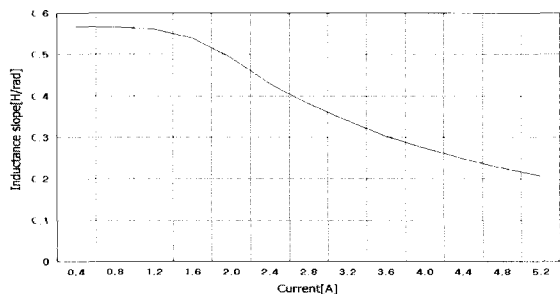
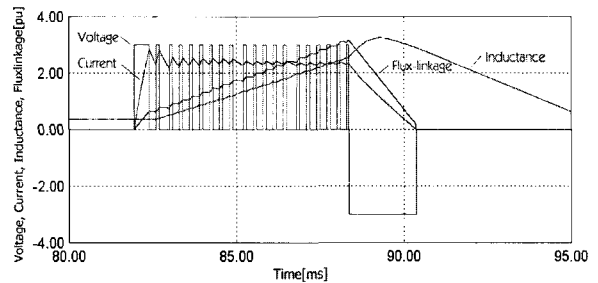


그림 5 고정자 전류에 따른 인덕턴스 기울기의 변화
Fig. 5 Inductance slope according to stator current

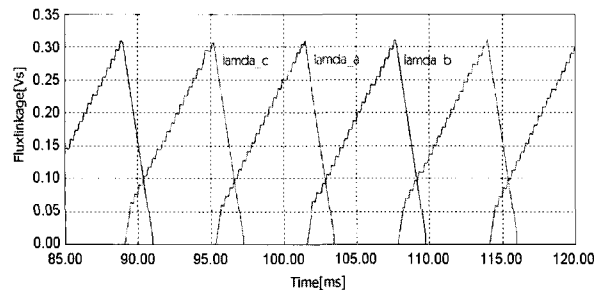
연산을 위해 적용되었다. 또한 표 1은 시뮬레이션 및 실험에 적용된 전동기의 설계상수를 나타내고 있다.

표 1 SRM의 설계상수
Table 1 Design parameters of SRM

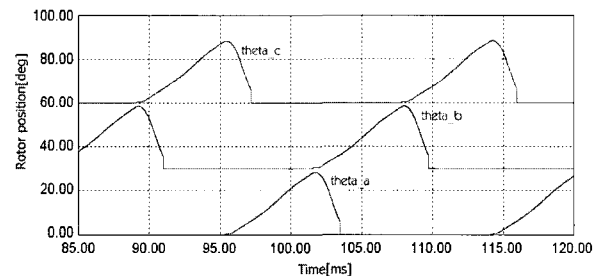
상 수	3상	정격출력	1[hp]
극 수	6/4	정격속도	3000[rpm]
정격전압	300[Vdc]	고정자극호	30[Mdeg]
권선저항	3.828[Ohm]	회전자극호	32[Mdeg]
관성모멘트	0.00026[kg · m ²]	마찰계수	0.0006[Nm · s]



(a) 전압, 전류, 인덕턴스 및 추정된 쇄교자속



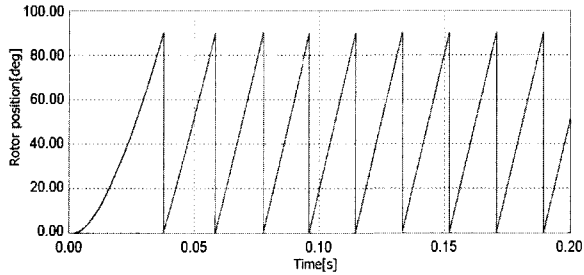
(b) 3상 쇄교자속



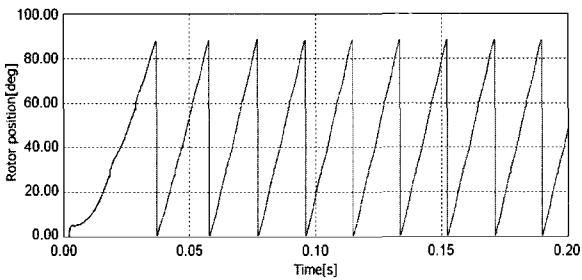
(c) 추정된 회전자 위치각

그림 6 쇄교자속 및 전류를 통한 회전자 위치각의 추정
Fig. 6 Rotor position estimation from flux-linkage and current

시뮬레이션을 위한 프로그래밍 툴로는 PSIM과 Borland C++ 프로그램이 사용되었고, 실험에 앞서 제안된 알고리즘의 실현 가능성을 확인하였다. 그림 6은 전압($\times 10^2[V]$), 전류[A], 인덕턴스($\times 10^{-1}[H]$) 및 추정된 쇄교자속($\times 10^{-1}[Vs]$)과 추정된 회전자 위치각을 나타내고 있다.



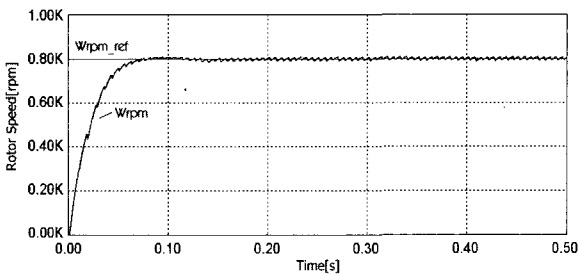
(a) 실제 회전자 위치각



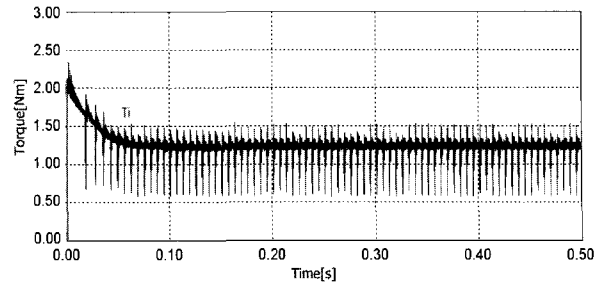
(b) 추정된 회전자 위치

그림 7 800[rpm], 1.2[Nm]에서의 추정된 회전자 위치각
Fig. 7 Estimated rotor position at 800[rpm] and 1.2[Nm]

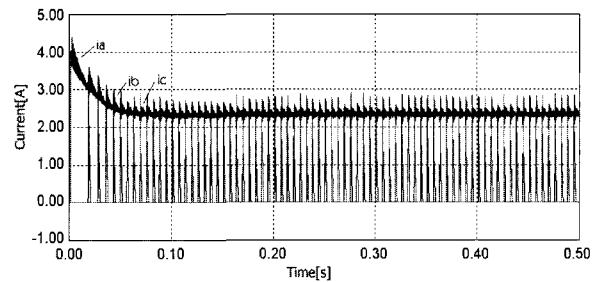
그림 7은 800[rpm], 1.2[Nm]에서의 실제 회전자 위치와 추정된 회전자 위치각을 나타내고 있으며, 비교적 정확히 회전자 위치각을 추정하고 있음을 알 수 있다. 그림 8은 추정된 회전자 위치각을 적용한 경우의 속도, 토크 및 3상 전류파형을 나타내고 있다.



(a) 속도 응답 파형



(b) 출력 토크 파형



(c) 3상 전류 파형

그림 8 센서리스 알고리즘에 의한 응답특성
Fig. 8 Response characteristics of sensorless algorithm

5. 시스템 구성 및 실험결과

5.1 시스템 구성

본 논문에서 제안된 SRM의 위치센서 없는 제어시스템의 블럭도를 그림 9에 나타내었다. 제어시스템에서 구동용 컨버터는 제어가 용이한 비대칭 브리지 컨버터가 적용되었고, 정격이 1200[V], 75[A]인 Semi-kron사의 IGBT SMK75GAL과 SMK75GAR을 사용하였다. 게이트 드라이브는 Semikron사의 SKHI71을 사용하였으며, 부하토크는 Leroy Somer사의 3000[rpm], 5[Nm], 정격의 FP. 15/30 파우더 브레이크를 사용하여 제어하였다. 모든 제어기는 DSP(Digital Signal Processor)내에서 디지털방식으로 구성하여 제어기의 구성이나 설계를 용이하게 하였다. 제안된 알고리즘은 기본적인 PI 속도제어기와 전류제어기로 구성되어 있으며, 회전자 위치추정을 위한 쇄교자속은 권선 저항에 의한 전압강하를 고려하기위해 전류센서로부터의 전류값과 PWM 게이팅 신호를 통해 연산되었다. 추정된 쇄교자속은 저역통과필터를 거쳐 위치추정에 활용되었으며, 위치추정기는 신경회로망을 통해 얻어진 회전자 위치각의 근사함수를 이용하여 2-D 룩업테이블

로 구성되었고, 쇄교자속과 전류지령으로부터 회전자 위치각이 추정될 수 있도록 구성하였다. 그림 9는 구성된 전체 시스템을 나타내고 있다.

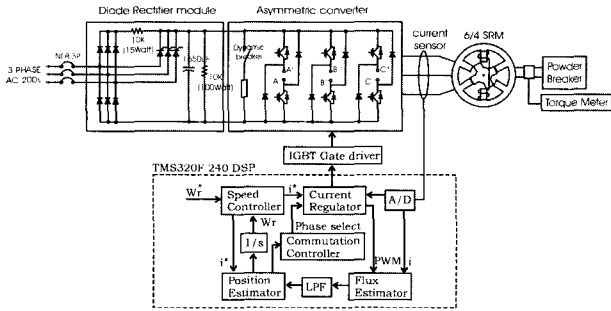


그림 9 위치센서 없는 제어시스템의 블록도
Fig. 9 Block diagram of the position sensorless control system

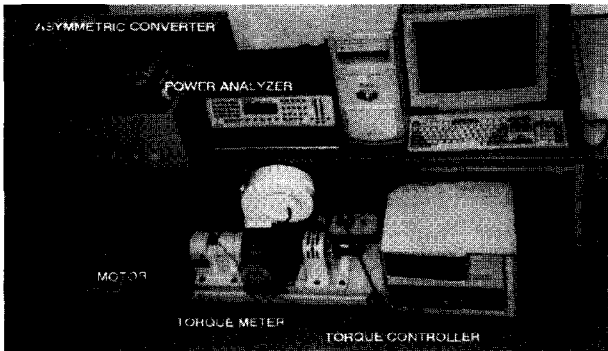


그림 10. 전체 시스템 구성 사진
Fig. 10. Photograph of test setup

5.2 실험결과

그림 10은 PWM 스위칭 신호와 상전류로부터 추정된 상전압과 쇄교자속을 나타내고 있다. 파형은 DSP 내에서 연산된 데이터를 PC와의 통신을 통해 얻은 후, Matlab 프로그램을 이용하여 나타내었다.

그림 11은 1000[rpm], 1[Nm]에서의 실제 회전자 위치각과 추정된 회전자 위치각을 나타내고 있다. 시뮬레이션에 비해 다소 추정 오차가 나타남을 알 수 있으나, 향후 컨버터 내에서의 전압강하를 고려한 쇄교자속의 추정 및 신경회로망의 온라인 학습을 통한 회전자 위치 추정기의 보정을 통해 보다 정확한 회전자 위치각의 추정이 가능하도록 할 예정이다. 그림 12는 제안된 알고리즘에 의한 시스템의 동특성을 나타내고 있으며, 실험결과를 통해 제안된 알고리즘의 가능성이 확인되었다.

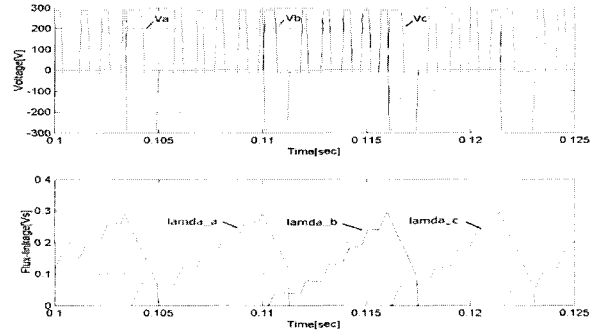


그림 11 상전압 및 추정된 쇄교자속
Fig. 11 Phase voltage and estimated flux-linkage

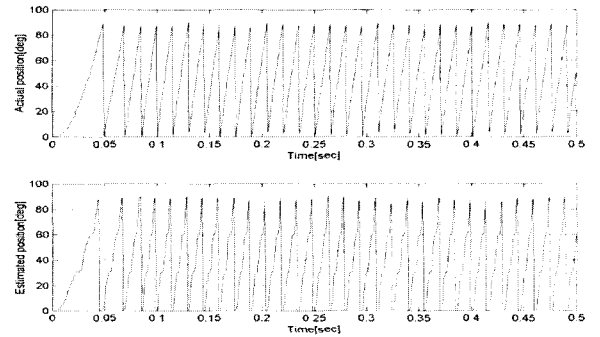


그림 12 추정된 회전자 위치각
Fig. 12 Estimated rotor position

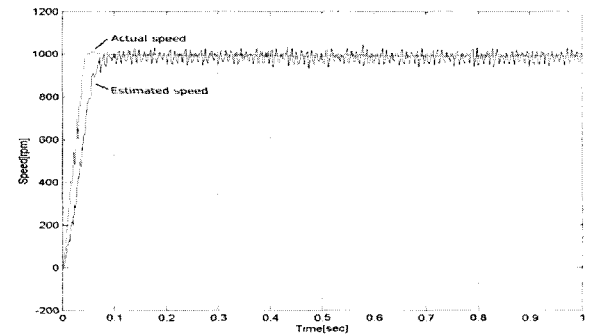


그림 13 제안된 센서리스 알고리즘에 의한 속도 응답특성
Fig. 13 Speed response characteristics of proposed sensorless algorithm

6. 결 론

본 논문에서는 신경회로망을 이용하여 전류 및 쇄교자속에 대한 회전자 위치각의 비선형적인 함수의 근사화를 통해 위치센서 없이 SRM을 구동하는 방안에 관해 연구하였다. 쇄교자속의 추정은 DSP 내에서의

PWM 신호와 전류센서를 통한 상전류값만을 활용함으로써 시스템의 비용이 보다 저감될 수 있도록 하였으며, 시뮬레이션과 실험을 통해 제안된 알고리즘의 활용 가능성을 확인하였다.

제안된 알고리즘은 저가의 시스템으로 적용이 가능할 것으로 사료되며, 향후 고속 연산이 가능한 보다 우수한 DSP를 적용한 시스템을 구성함으로써 정밀한 회전자 위치각의 추정과 가변속 구동시스템 및 고효율 운전을 위한 스위칭 각 제어 등과 같은 고성능의 위치센서 없는 제어시스템에 관해 연구할 예정이다.

본 논문은 산업자원부와 한국전력공사 전력연구원 지원하에 2003년 전력산업기초인력양성사업으로 영남이공대학 전력응용기술연구센터의 지원에 의하여 수행되었음.

참 고 문 헌

[1] T.J.E Miler, *Electronic Control of Switched Reluctance Machines*, Newnes Pub., 2001.
 [2] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives*, CRC Press, 2001.
 [3] Gabriel Gallegos-Lopez, Philip C. Kjaer, T.J.E Miler, "High-Grade Position Estimation for SRM Drives Using Flux Linkage/Current Correction Model", *IEEE Trans. on I.A.*, Vol. 35, No. 4, pp 859~869, July/Aug., 1999.
 [4] H.J. Guo, M. Takahashi, T. Watanabe, O. Ichinokura, "A New Sensorless Drive Method of Switched Reluctance Motors Based on Motor's Magnetic Characteristics", *IEEE Trans. on Mag.*, Vol. 37, No. 4, pp 2831~2833, July, 2001.
 [5] 최경호, 김동희, 노채균, 김민회, "스위치드 리럭턴스 전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구", *전력전자학회 논문지*, Vol. 6, No. 4, pp. 333~340, Aug., 2001.
 [6] 김민회, 백원식, 김남훈, 최경호, 김동희, "디지털 히스테리시스 제어를 이용한 SRM의 위치제어 시스템", *전력전자학회 논문지*, Vol. 7, No. 3, pp. 253-261, June, 2002.
 [7] Erkan Mese, David A Torrey, "An Approach for Sensorless Position Estimation for Switched Reluctance Motors Using Artificial Neural Networks", *IEEE Trans. on PE*, Vol. 17, No. 1, pp 66~75, Jan., 2002.
 [8] 백원식, 김민회, 김남훈, 최경호, 김동희, "신경회로망을 이용한 SRM의 토크 추정과 스위칭 각 제어", *전력전자*

학회 논문지, Vol. 7, No. 6, pp. 509~516, Dec., 2002.

[9] 백원식, 임태훈, 배성우, 김남훈, 김동희, 최경호, 김민회, "신경회로망을 이용한 위치센서 없는 스위치드 리럭턴스 전동기의 제어시스템", *전력전자학회 추계학술대회 논문집*, pp 178~181, Nov., 2003.
 [10] Peter Vas, *Artificial-Intelligent-Based Electrical Machines and Drives*, Oxford Science Pub., 1999.
 [11] *NeuralWorks Professional II/plus Reference Guide*, Neuralworks, 2001.

저 자 소 개



김민회(金玟會)

1951년 8월 25일생. 1974년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1989년 중앙대 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1979년 3월~현재 영남이공대학 전기자동차과 교수. 1993년 7월~1995년 8월 미국 테네시 주립대학 전기공학과. 전력전자응용연구센터(PEAC) 연구교수. 1996년 8월 IECON'96 최우수논문상 수상. 현재 당 학회 전동력응용연구회 위원장.



백원식(白元植)

1970년 10월 20일 생. 1996년 계명대 자연과학대학 수학과 졸업. 2002년 영남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



이상석(李相錫)

1948년 7월 20일생. 1972년 영남대 공과대학 전기공학과 졸업. 1976년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1985년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 현재 영남이공대학 전기자동차과 교수.



박찬규(朴贊圭)

1959년 10월 14일생. 1987년 경일대 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 영남 대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 3월~현재 영남이공대학 전기자동차과 부교수.