

쇄교자속 모델링을 통한 SRM의 속도추정 알고리즘

백원식^{*}, 김남훈^{*}, 최경호^{**}, 김동희^{*}, 김민희^{***}

^{*}영남대학교, ^{**}경북전문대학, ^{***}영남이공대학

A Speed Estimation Algorithm of SRM using Flux-linkage Modeling

Won-Sik Baik^{*}, Nam-Hun Kim^{*}, Kyeong-Ho Choi^{**}, Dong-Hee Kim^{*}, Min-Huei Kim^{***}
 *Yeungnam Univ., **Kyungbuk College, ***Yeungnam College of Science & Tech.

Abstract - This paper presents a speed estimation algorithm of Switched Reluctance Motor(SRM) using flux-linkage modeling. The basic algorithm of this scheme is based on the flux linkage characteristic according to the phase current and the rotor position. A sufficient simulation and experimental data was used for neural network training. Through measurement of the phase flux linkage and phase currents, the neural network is able to estimate the rotor position and speed. The simulation result shows some good results, and possibility of this algorithm.

1. 서 론

최근 간단한 구조와 높은 효율 등의 여러 장점들로 인해 활발히 연구되고 있는 SRM은 회전자 위치에 동기된 고정자 권선의 순차적인 여자를 통해 토크를 발생하므로 회전자 위치정보가 필수적이다^{[1][2]}.

이러한 회전자 위치검출을 위해서는 엔코더 등의 위치센서가 사용되지만, 이로 인해 시스템의 가격이 상승하게 되고 열악한 환경에서의 적용이 어렵게 된다. 본 논문에서는 SRM의 쇄교자속 특성으로부터 회전자 위치정보를 추정함으로써 위치센서 없이 구동되는 저가의 SRM 시스템을 구현하기 위한 방안에 관해 연구하였다.

쇄교자속 특성으로부터 회전자 위치정보를 추정할 경우에 요구되는 전압은 스위칭 신호를 통해 추정함으로써 전압센서의 기능을 대신하도록 하였으며, 전류는 전류센서를 통해 검출하는 방식으로 구성하였다.

실험 및 시뮬레이션 데이터를 바탕으로 학습된 신경회로망을 통해 회전자 위치각이 보다 정확하게 추정되도록 하였으며, 추정된 회전자 위치정보로부터 속도를 추정함으로써 속도제어가 수행될 수 있는 센서리스 알고리즘의 시뮬레이션을 수행하였다.

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 생성한다. 생성된 회전력은 전압방정식으로부터 다음과 같이 유도될 수 있다^[1].

SRM에서 기계적 에너지로 변환되는 에너지의 크기는 철심의 자기적인 포화와 프린팅 현상을 무시함으로써 용이하게 해석될 수 있으며, 이러한 가정하에서 SRM의 한상의 전압과 입력에너지는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} v &= Ri + \frac{d\psi}{dt} = Ri + \omega_m \frac{d\psi}{d\theta} \\ &= Ri + \omega_m \frac{d(Li)}{d\theta} = Ri + L \frac{di}{dt} + \omega_m i \frac{dL}{d\theta} \end{aligned} \quad (1)$$

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

여기서 v 와 i 는 상전압 및 전류, ψ 는 쇄교자속, R 은 상저항, ω_m 은 회전자의 회전 각속도를 나타낸다. 또한 임의의 시점에서의 자계저장에너지의 변화량은 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

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

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

식 (4)로부터 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 쇄교자속의 추정

SRM은 회전자 위치에 따라 인덕턴스가 변하기 때문에 상전류 및 쇄교자속으로부터 회전자 위치의 추정이 가능하며, 그림 1은 1마력, 3상, 6/4극 SRM의 회전자 위치와 전류에 따른 쇄교자속을 나타내고 있다^{[1][6][8]}.

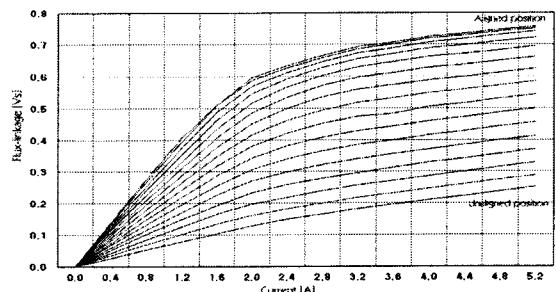


그림 1. 전류 및 회전자 위치에 따른 쇄교자속

회전자 위치의 추정을 위한 쇄교자속은 고정자 권선에 인가되는 전압으로부터 추정될 수 있으며, 고정자 전압 방정식으로부터 다음과 같이 구할 수 있다.

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

프로그램 상에서의 보다 정밀한 쇄교자속의 추정은 Tustine의 근사법을 적용함으로써 유도될 수 있으며, 다음과 같이 나타낼 수 있다.^{[4][7][8]}

$$\lambda(k) = \lambda(k-1) + 0.5T(v(k) - Ri(k) + v(k-1) - Ri(k-1)) \quad (7)$$

여기서 λ 는 쇄교자속, v 와 i 는 상전압 및 전류, R 은 상자항, T 는 샘플링 주기를 나타내며, k 는 샘플링 시점에 나타낸다.

3.2 신경회로망을 이용한 회전자 위치각의 검출

전류 및 쇄교자속으로부터 보다 정확한 회전자 위치각의 검출을 위해 신경회로망이 적용될 수 있다. 신경회로망은 복잡한 문제에 대한 근사해를 신속히 찾아낼 수 있으며, 패턴인식에 대한 능력이 뛰어나고, 단편적인 정보로부터 연관된 전체적인 정보의 유추가 가능하기 때문에 비선형적인 제어를 위해 많이 적용되고 있다. 본 논문에서는 전류 및 쇄교자속으로 구성된 2개의 입력층과 5개의 은닉층, 그리고 1개의 출력층 뉴런의 신경회로망을 구성하였다. 활성화 함수는 시그모이드 함수를 적용하였으며, 각 뉴런의 입력 가중합은 활성화 함수를 통해 다음과 같이 출력된다.^[6]

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

$$Y = \frac{1}{1 + \exp(-S)} \quad (8)$$

여기서 X_k 는 입력 데이터, W_k 는 연결강도, b 는 바이어스, S 는 입력 가중합, 그리고 Y 는 출력을 나타낸다. 학습을 위한 데이터는 실험 및 시뮬레이션을 통해 구한 전류와 쇄교자속 및 회전자 위치각이 이용되었으며, 그림 2는 구현된 전체 신경회로망을 나타내고 있다.

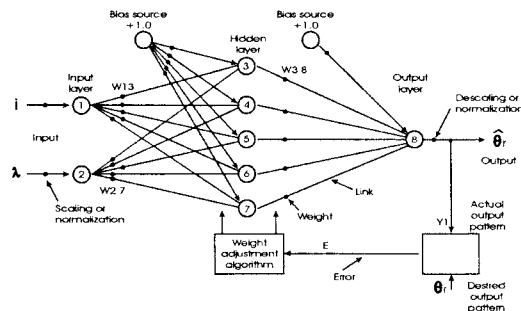


그림 2. 회전자 위치각의 검출을 위한 신경회로망의 구조

3.3 전류시점 검출 및 속도추정

SRM의 센서리스 운전을 위해서는 속도제어를 위한 실제속도의 피드백 값과 전류(轉流)시점의 검출이 요구된다. 본 논문에서는 쇄교자속 모델을 이용하여 전류시점의 검출을 위해 상전류와 전류(轉流)시점 지령 값으로부터 자속지령 값이 출력되는 신경회로망을 구현하였으며, 추정된 회전자 위치각의 변화가 30도가 되는 시점에서 전류(轉流)가 이루어지도록 자속지령모델을 구성하였

다. 또한, 속도제어를 위한 속도 피드백 값은 쇄교자속과 전류로부터 추정된 회전자 위치각을 통해 계산되었으며, 100[us] 단위로 회전자 위치각의 변화량을 샘플링 한 후, 속도제어 주기로 평균된 회전자 위치각의 변화량을 통해 속도를 추정함으로써 보다 정확한 속도의 추정이 가능하도록 하였다.

4. 시스템 구성 및 시뮬레이션

4.1 시스템 구성

SRM의 에너지 변환 원리로부터 시뮬레이션을 위한 프로그램을 설계하였다. 프로그램은 DLL 파일을 통해 C-program과의 호환이 가능하고 사용이 편리한 PSIM을 사용하였으며, 그림 3은 설계된 프로그램의 구성도를 나타내고 있다.

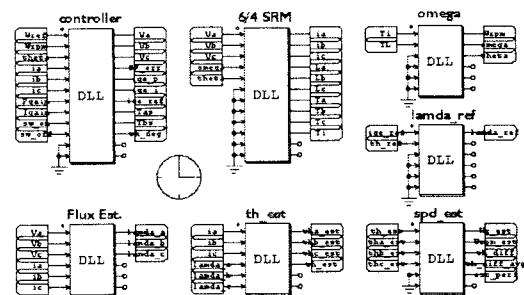


그림 3. SRM 시뮬레이션을 위한 프로그램 구성도

SRM은 이중 돌극형의 극 구조와 고정자 권선이 집중권으로 구성되어 있기 때문에 다른 전동기에 비해 자기포화현상으로 인한 비선형적인 특성이 현저하게 나타난다. 본 논문에서는 보다 정확한 시뮬레이션을 위해 전류에 따른 인덕턴스의 비선형적인 특성이 고려되도록 하였으며, 그림 4는 본 논문에서 적용된 3상, 6/4극, 1마력 SRM의 전류에 따른 인덕턴스 변화율을 나타내고 있다. 또한, 표 1은 시뮬레이션에 적용된 전동기 설계상수를 나타내고 있다.^{[5][6]}

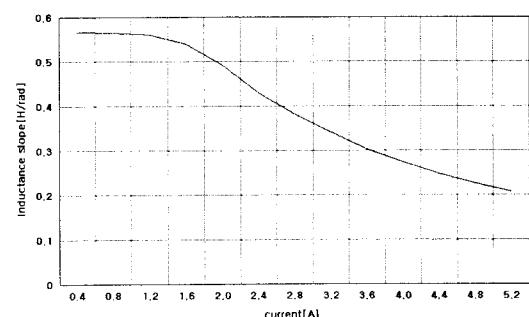


그림 4. 전류에 따른 인덕턴스 기울기의 변화

표 1. SRM의 설계상수

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]

4.2 시뮬레이션 결과

그림 5는 Tustine의 근사법을 적용하여 추정된 쇄교자속을 나타내고 있으며, 여기서 전압은 $v \times 0.01[V]$, 인덕턴스는 $L \times 10[H]$, 쇄교자속은 $\lambda \times 5[Vs]$ 의 크기로 나타내었다. 그림 6은 학습된 신경회로망을 통해 추정된 각상의 회전자 위치 및 90도 단위의 실제 회전자 위치각과 추정된 회전자 위치각을 나타내고 있다. 전류(轉流)되는 시점에서 약간의 오차가 발생하지만 비교적 정확하게 회전자 위치를 추정하고 있음을 알 수 있다.

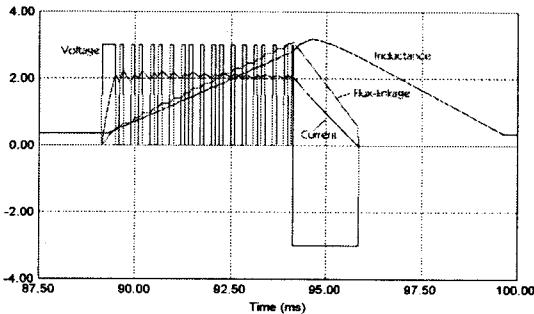
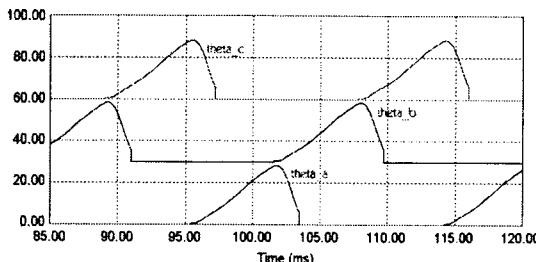
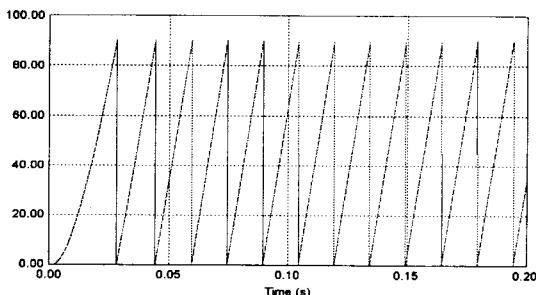


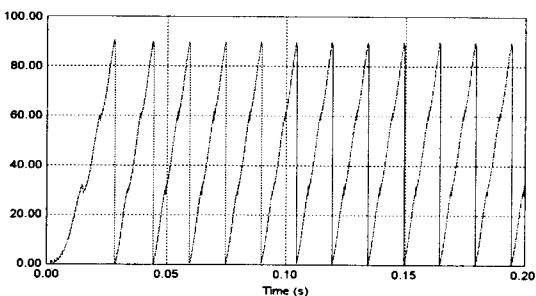
그림 5. 전압, 전류, 인덕턴스 및 추정된 쇄교자속



(a) 쇄교자속 및 전류에 따라 추정된 각상의 회전자 위치각



(b) 1000[rpm], 1[Nm]에서의 실제 회전자 위치각



(c) 1000[rpm], 1[Nm]에서의 추정된 회전자 위치각

그림 6. 신경회로망을 통해 추정된 회전자 위치

그림 7은 전류(轉流)시점의 결정을 위한 자속지령 값과 실제 자속을 나타내고 있다. 그림 8은 1000[rpm], 1[Nm]에서의 실제 속도와 추정 속도를 나타내고 있으며, 파도상태에서는 샘플링 및 평균 연산에 의한 지연이 다소 나타나지만, 정상상태에서는 정확히 속도를 추정하고 있음을 알 수 있다. 또한 그림 9는 1000[rpm], 1[Nm]에서의 3상 전류파형을 나타내고 있다.

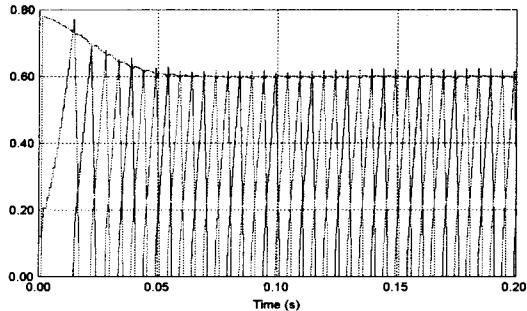


그림 7. 전류시점 검출을 위한 쇄교자속 지령값 및 추정된 실제 쇄교자속

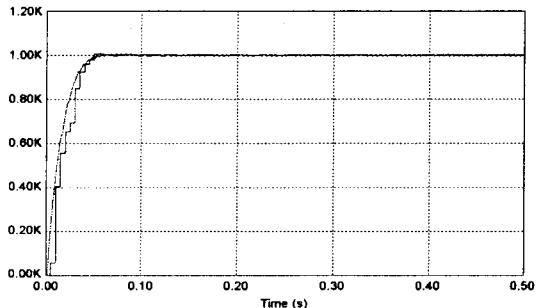


그림 8. 1000[rpm], 1[Nm]에서의 추정속도 및 실제속도

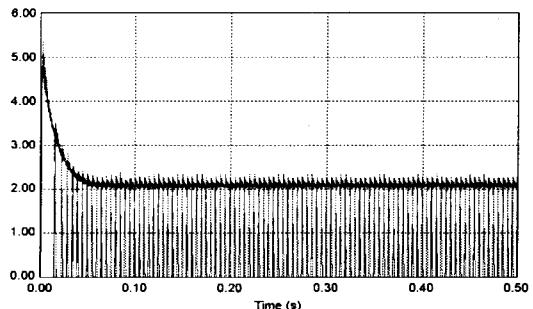


그림 9. 1000[rpm], 1[Nm]에서의 3상 전류파형

5. 결 론

본 논문에서는 신경회로망을 이용하여 상전류 및 쇄교자속으로부터 회전자 위치각을 추정함으로써 위치센서 없이 SRM을 구동하기 위한 방안에 관해 연구하였다. 속도제어를 위해 요구되는 속도검출은 추정된 회전자 위치각을 통해 구해졌고, 각 상의 전류시점은 자속지령을 통해 제어하는 기법에 관해 연구하였다. 회전자 위치각은 실험 및 시뮬레이션을 통해 구한 상전류, 쇄교자속 및 회전자 위치각의 데이터를 이용하여 신경회로망을 학습시킨 후, 학습된 신경회로망을 통해 추정되도록 하였다. 실험에 앞서 이러한 센서리스 알고리즘의 시뮬레이션이 수행되었으며, 시뮬레이션 결과로부터 회전자 위치각 및

속도 추정기법의 실용가능성을 확인하였으며, 향후 이러한 센서리스 알고리즘을 실제 시스템에 적용할 예정이다.

(참 고 문 현)

- [1] T.J.E Miller, *Switched Reluctance Motor and Their Control*, Oxford University Press, 1993.
- [2] Bimal K. Bose, *Modern Power Electronics and AC Drives*, Prentice Hall PTR, 2002.
- [3] Peter Vas, *Artificial-Intelligent-Based Electrical Machines and Drives*, Oxford Science Pub., 1999.
- [4] Tom T. Hartley, et. al., *Digital Simulation of Dynamic Systems*, Prentice Hall PTR, 1994.
- [5] 최경호, 김동희, 노재균, 김민희, “스위치드 리اكت런스 전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구”, 전력전자학회 논문지, 제 6권, 제 4호, pp 333-340, Aug., 2001.
- [6] 백원식, 김남훈, 김동희, 최경호, 김민희, “SRM의 쇄교자속 모델링을 통한 회전자 위치 추정기법의 시뮬레이션”, 전력전자 추계학술대회 논문집, pp 36-39, Nov., 2002.
- [7] TI Literature Number SPRA600, “A Variable-Speed Sensorless Drive System for Switched Reluctance Motors”, Application Report, Oct., 1999.
- [8] Erkan Mese, and 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.
- [9] Longya Xu, and Chuanyang Wang, “Accurate Rotor Position Detection and Sensorless Control of SRM for Super-High Speed Operation”, IEEE Trans. on PE, Vol. 17, No. 5, pp 757-763, Sep., 2002.