

SRM의 회전자 위치추정 개선을 위한 PLL기법의 적용

백원식, 최경호, 황돈하, 김동희, 김민희***

영남대학교, *경북전문대학, **한국전기연구원, ***영남이공대학

Improvement of Rotor Position Estimation of SRM using PLL technique

Won-Sik Baik, Kyeong-Ho Choi, Don-Ha Hwang, Dong-Hee Kim, Min-Huei Kim***

Yeungnam University, Kyungbuk College, KERI, Yeungnam College of Science & Tech.

Abstract - In this paper, improved rotor position estimation for position sensorless control system of the SRM (Switched Reluctance Motor) is presented. For more accurate rotor position estimation, the PLL (Phase Locked Loop) based position interpolation is adapted. In the current-flux-rotor position lookup table based rotor position estimation, the inherent current and flux-linkage ripple can cause the position estimation error. Instead of the conventional low-pass filter, the PLL based position interpolation technique is used for the better dynamic performance. The developed rotor position estimation scheme is realized using TMS320F2812 digital signal processor and prototype 1-hp SRM.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기 (SRM)는 돌극형 구조로서 각상의 고정자 권선을 순차적으로 여자 시킴으로써 토크를 발생시키는 에너지 변환기구이다. 따라서 회전력 발생을 위해서는 전력변환장치와 아울러 엔코더나 레졸버 등의 회전자 위치검출장치를 필요로 한다. 이러한 회전자 위치검출장치는 시스템의 제작비용과 부피를 증가시키는 요인이 되고, 열악한 환경 하에서의 시스템의 신뢰성을 저감시키는 단점이 있다. 따라서 최근에는 위치센서 없이 전동기를 구동하기 위한 제어기법 개발에 관한 연구가 이루어지고 있으며, 대부분이 회전자의 위치에 따라 변화하는 인덕턴스 특성을 기본으로 하고 있다.^{[1][2]}

본 논문에서는 보다 개선된 회전자 위치추정이 가능하도록 하기 위해 PLL 기법을 적용하였다. 상전압으로부터 쇄교자속을 추정하고, 추정된 쇄교자속과 상전류 정보를 회전자 위치를 추정할 경우 쇄교자속과 상전류의 리플성분으로 인해 추정된 회전자 위치가 변동하게 된다. 이러한 변동을 제거하기 위해 일반적으로는 저역통과필터 등이 적용되나, 이로 인해 동특성이 저하되는 문제점이 있다. 따라서 제어 연산장치내에서 PLL 기법을 적용함으로써 보다 개선된 회전자 위치추정이 가능하도록 하였다.

2. SRM의 제어시스템

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][2]}

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

$$v = Ri + \frac{d\Psi}{dt} = Ri + \omega_m \frac{d\Psi}{d\theta}$$

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

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

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.

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

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

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 토크 T_e 는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

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

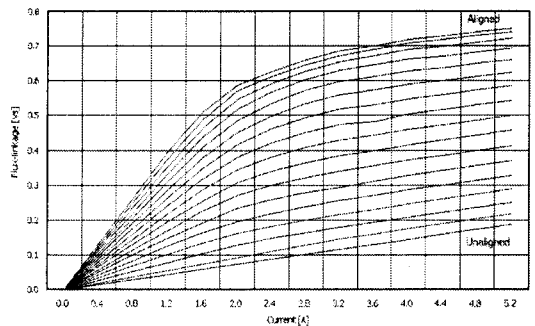


그림 1. 1마력 6/4극 SRM의 자화곡선
Fig. 1. Magnetization curve of 1-hp 6/4 SRM

구동토크는 상 인덕턴스의 변화율에 따라 적정 고정자 권선을 여자시킴으로써 생성되며, 그림 1은 1마력 SRM의 상전류와 회전자 위치에 따른 자화곡선을 나타내고 있다^[3]. 가변속 구동이 가능한 SRM의 속도제어를 위해서는 그림 2와 같이 회전자 위치에 따른 순차적인 상 여자를 위한 전류(轉流)제어기와 아울러 일반적으로 PI 속도제어기 및 히스테리시스 전류(電流)제어기가 적용된다. 블록도를 통해 SRM의 제어를 위해서는 상전류 값과 아울러 회전자 위치정보가 필수적임을 알 수 있다^[4].

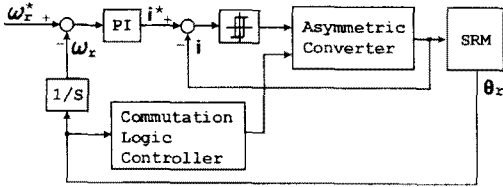


그림 2. SRM의 속도제어시스템의 블록도
Fig. 2. Block diagram of the SRM speed control system

3. SRM의 센서리스 알고리즘

3.1 신경회로망을 이용한 회전자 위치추정

SRM은 고정자와 회전자가 모두 돌극형 구조로 이루어져 있고, 고정자에만 집중권으로 권선이 감겨 있기 때문에 회전자 위치와 전류에 따라 인덕턴스가 달라진다. 이러한 자기회로의 특성으로 인해 전압 및 전류로부터 회전자 위치추정이 가능하며, 쇄교자속 및 전류로부터 회전자 위치를 추정하기 위해서는 그림 1의 쇄교자속 및 전류에 따른 회전자 위치각의 비선형적인 함수가 요구된다. 이러한 비선형적인 함수는 신경회로망을 적용함으로써 효과적으로 모델링 될 수 있으며, 그림 3은 학습된 신경회로망의 출력 데이터 패턴을 나타내고 있다. 회전자 위치 추정을 위한 쇄교자속은 그림 4와 같이 PWM 신호 및 상전류로부터 추정될 수 있다^{[5]-[7]}.

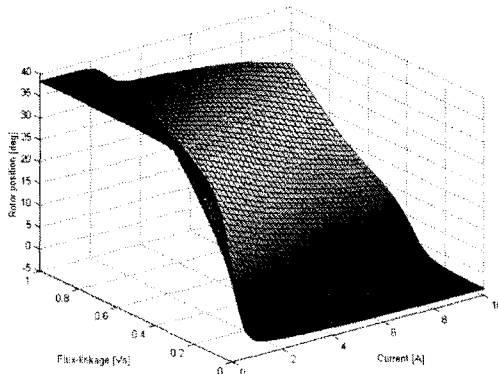


그림 3. 학습된 신경회로망의 출력 데이터 패턴
Fig. 3. Output data pattern of trained Neural Network

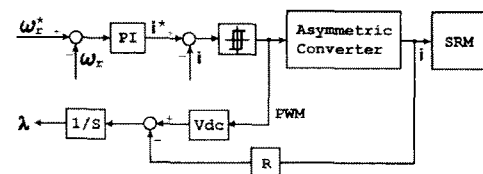


그림 4. 쇄교자속 추정을 위한 블록도
Fig. 4. Block diagram for flux-linkage estimation

3.2 PLL을 이용한 회전자 위치추정 개선

SRM의 구동을 위해 상권선으로 펄스 형태의 직류 전압이 인가되므로 회전자 위치 추정을 위해 적용되는 상전류 및 쇄교자속은 스위칭 주파수에 해당하는 리플성분을 포함한다. 따라서 추정된 순시 회전자 위치에도 리플성분이 존재하며, 이로 인해 회전자 위치로부터 추정되는 속도도 이러한 리플성분을 포함하게 된다. 추정속도의 리플성분은 속도제어기에 영향을 미치며, 일반적으로 이러한 리플성분을 제거하기 위해 저역필터가 적용되고 있다. 저역필터는 소프트웨어적으로 용이하게 구현이 가능하고 연산량이 많지 않은 장점이 있으나, 회전자 위치 추정이 지연되는 단점이 있다.

따라서 본 논문에서는 그림 5와 같이 PLL 기법을 적용하여 보다 개선된 회전자 위치추정이 가능하도록 하였다. 2-D 룩업테이블을 활용하여 추정된 순시 회전자 위치는 회전 속도에 따라 선정된 적정 스텝 펄스를 발생한다. PLL 기법을 활용하여 스텝 펄스와 기준 클럭 (F_{clk})을 비교함으로써 최종적으로 개선된 회전자 위치가 추정된다. 이 기법을 위해서는 추가적인 타이머 회로가 요구되나, TMS320F2812의 여분의 타이머 (Timer 3, 4)를 활용하면 하드웨어의 추가 없이 구현이 가능하다.

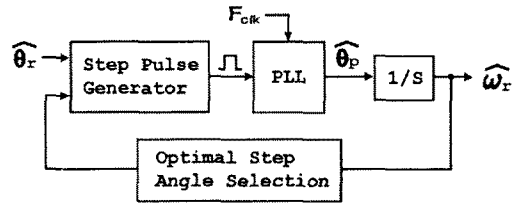


그림 5. PLL기법을 적용한 회전자 위치추정기법의 블록도
Fig. 5. Block diagram of the PLL position interpolation

4. 실험결과

4.1 시스템 구성

제안된 회전자 위치추정기법은 5 [KVA] 정격의 비대칭 브리지 컨버터와 TMS320F2812 DSP 제어보드 및 1마력 SRM을 통해 구현되었다. 사진 1은 DSP 및 인터페이스 보드를 나타내고 있으며, 사진 2는 비대칭 브리지 컨버터 및 게이트 드라이버 모듈을 나타내고 있다.

또한 표 1은 실험에 적용된 1 마력 SRM의 설계상수를 나타내고 있으며, 6000[ppr]의 증분형 엔코더를 사용하여 측정된 실제 회전자 위치와 추정된 회전자 위치를 비교하였다.

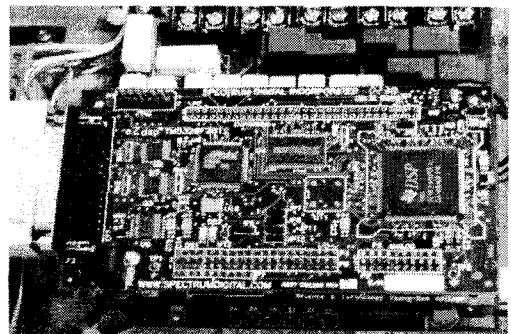


사진 1. TMS320F2812 DSP와 인터페이스 보드
Photo. 1. TMS320F2812 DSP and interface board

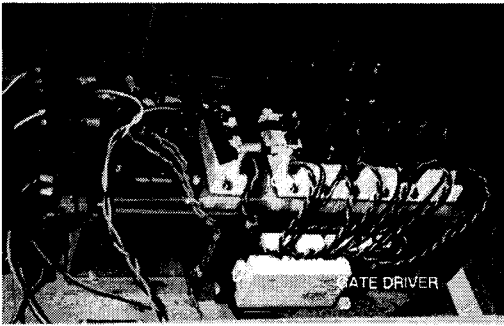


사진 1. 5-KVA 비대칭 브리지 컨버터
Photo. 1. 5-KVA asymmetric bridge converter

표 1. SRM의 설계 상수

Table 1. Design parameters of SRM

정격전압	300 [Vdc]	고정자 극수	6
정격속도	3000 [rpm]	회전자 극수	4
정격출력	1 [hp]	고정자 극호각	30 [deg]
상수	3 상	회전자 극호각	32 [deg]

4.2 실험결과

그림 6~9는 가변속도 운전시의 회전자 위치추정 실험 결과를 나타내고 있다. 그림 6은 하나의 스트로크에 대한 상전압 ($\times 0.002[V]$), 상전류 ($\times 0.1[A]$) 및 상전압으로부터 추정된 쇄교자속($\times 0.5[Vs]$)과 추정된 회전자 위치 ($\times 0.05[deg]$)를 각각 나타내고 있다. 그림 7은 800 [rpm]과 2200 [rpm]의 가변속도 지령에 대한 속도응답을 나타내고 있으며, 그림 8은 추정된 회전자 위치를 나타내고 있다. 또한 그림 9는 과도상태에서의 확장된 회전자 위치각을 나타내고 있다.

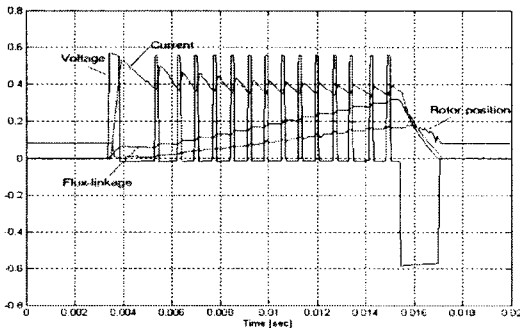


그림 6. 단위 스트로크에서 추정된 회전자 위치
Fig. 6. Estimated rotor position for one stroke

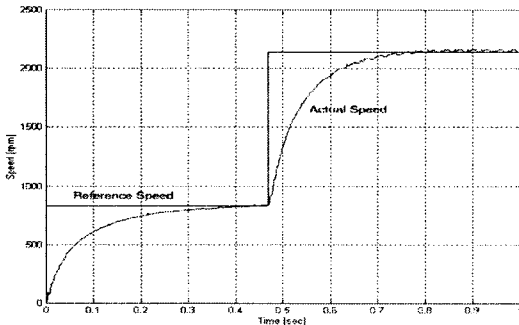


그림 7. 속도 응답 특성
Fig. 7. Speed response characteristic

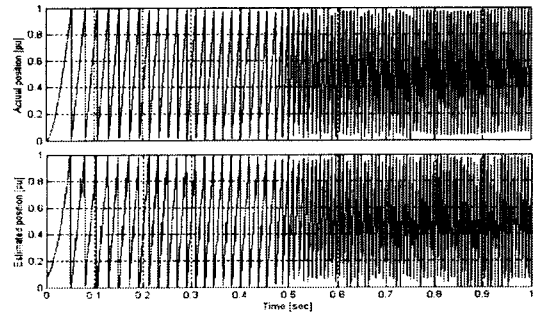


그림 8. 실제 및 추정된 회전자 위치
Fig. 8. Actual and estimated rotor position

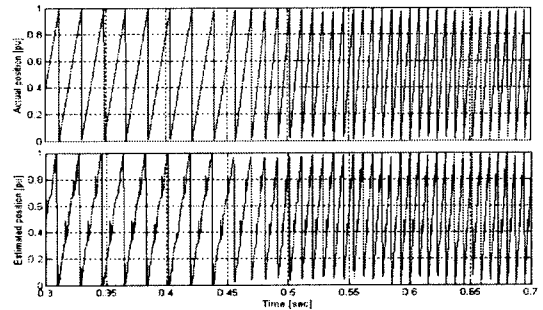


그림 9. 확장된 실제 및 추정된 회전자 위치
Fig. 9. Expanded actual and estimated rotor position

5. 결 론

본 논문에서는 위치센서 없는 SRM의 구동시스템에서의 회전자 위치 추정을 개선하기 위한 방법에 관해 연구하였다. 회전자 위치 추정을 위한 SRM의 비선형적인 함수의 근사화를 위해 신경회로망이 적용되었고, 실험을 통해 얻어진 데이터를 통해 신경회로망이 학습되었다.

순시적인 회전자 위치는 학습된 신경회로망을 통해 구성된 2-D 룩업테이블을 통해 추정되었고, 추정된 회전자 위치와 PLL 기법을 통해 보다 개선된 회전자 위치추정이 가능하도록 하였다. TMS320F2812 DSP와 1-hp SRM을 활용하여 실험을 통해 제안된 회전자 위치추정 기법을 검증하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] T.J.E Miler, *Switched Reluctance Motor and Their Control*, Oxford University Press, 1993.
- [2] R. Krishnan, *Switched Reluctance Motor Drives*, CRC Press, 2001.
- [3] 최경호, 김동희, 노재균, 김민희, "스위치드 릴럭턴스 전동기의 인덕턴스 산정에 관한 연구", 전력전자학회 논문지, 제 6권, 제 4호, pp 333-340, Aug., 2001.
- [4] 김민희, 백원식, 김남훈, 최경호, 김동희, "디지털 히스테리시스 제어를 이용한 SRM의 위치제어시스템", 전력전자학회 논문지, Vol. 7, No. 3, pp. 253-261, June, 2002.
- [5] 김민희, 백원식, 이상석, 박찬규, "신경회로망을 이용한 위치센서 없는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 제어시스템", 전력전자학회 논문지, Vol. 9, No. 3, pp. 246-252, June, 2004.
- [6] W.S. Baik, M.H. Kim, N.H. Kim, D.H. Kim, "Position Sensorless Control System of SRM using Neural Network", Proceedings of PESC, pp 3471-3475, June, 2002.
- [7] Gabriel Gallegos-Lopez, Philip C. Kjaer, T.J.E. Miller, "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.