

마이크로 콘트롤러를 이용한 SRM의 초저속 속도제어

이 상훈, 표 성영*, 박 성준*,*, 안 진우
경성대학교, 대양 전기*, 동명 대학**

Very Low Speed Drive of SRM using Micro-controller

Sang-Hun, Lee, Sung-Young, Pyo*, Park, Sung-Jun, Park**, Jin-Woo, Ahn
Kyungsung Univ, Daeyang Electric Co*, Dong-Myung College**

Abstract - The switched reluctance drive provides a good adjustable speed characteristics like a D.C series motor. However, because of the torque production mechanism, it also has some disadvantage such as higher torque ripple and fluctuation in speed. To reduce torque ripple and to control speed precisely at low condition, current level technique is adopted. The SRM drive with current control of invariable frequency and phase swiching control has good speed regulation characteristics. Digital control system with an 80c196kc micro-controller is used to realize this drive system. Test results show that the control system has the good ability to achive precise speed control at low speed.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, SRM)는 상에 여자 에너지를 인가했을 때 자기 회로의 릴럭턴스를 최소화 하기 위해 발생된 릴럭턴스 토오크로 구동되는 전동기이며 릴럭턴스 토오크를 최대 하기 위해 회전자와 고정자의 돌극형 구조를 가지고 있다. 또한 고정자와 회전자 극의 형상이 단순하고 고정자에만 권선이 집중권으로 되어 있으므로 전자계 구조가 다른 전동기구에 비해 간단하며, 속도-토오크 특성이 직류직권 전동기와 유사하여 넓은 속도범위에서 운전이 가능하다는 장점을 가지고 있다. 하지만 SRM의 원활한 구동을 위해서는 회전자 위치와 동기시켜 여자전원을 단속적이면서 순차적으로 각 상 권선에 인가하여야 한다. 이러한 구동 메카니즘에서 동적 도통각 제어를 행할 경우 경부하시 발생하는 토오크는 불연속이 되어 속도변동이 심하게 나타난다. 특히 저속영역에서 이러한 현상은 더욱 크게 나타나서 SRM의 속도제어가 불가능한 상태가 된다. 이러한 속도변동이 심한 상태에서 회전자의 마소변위각 사이에 속도변동이 없다고 가정하고 설계한 기존의 PLL 스위치 제어방식은 정확한 온, 오프를 행할 수 없다. 따라서 본 연구에서는 회전자의 미속 변위에서의 속도변동 속응하는 정확한 상스위치의 동작을 위해 저가형 포토 인터럽터를 이용한 엔코더와 마이크로 콘트롤러의 인터럽터를 이용한 고정도통각 제어방식을 제안한다. 또한 초 저속영역에서 속도제어를 행하기 위해서 전류레벨 제어를 행하였다. 이러한 전류제어의 스위칭 주파수를 일정하기 위해서 SRM 구동에 적합한 전류레벨 제어기를 제안하였다. 제안된 고정도통각 제어 및 전류레벨 제어방식을 사용한 결과 광범위한 속도영역에서 안정된 운전이 가능할 뿐만 아니라, 엔코더 및 제어기의

저가격화와 함께 구동시스템의 안정화를 구현함으로써 SRM의 실용화 가능성을 실험을 통해 입증하였다.

2. SRM의 저속 속도제어

2.1 저속도 제어를 위한 고정 도통각 제어

SRM은 릴럭턴스 토크를 동력화한 전동기로, 이를 최대한 이용하기 위하여 보통 고정자와 회전자 모두 돌극형(salient-pole type) 구조로 하고 고정자에만 집중권으로 권선이 감겨져 있다. 이때 토크는 자기회로의 릴럭턴스가 최소화되는 방향으로 발생하며, 상당 발생토크의 크기는 SRM의 토크는 자기적 코에너지 개념으로부터 식 (1)에서와 같이 상권선에 흐르는 전류 i 의 제곱과 회전자 위치각 θ 에 대한 인덕턴스 L 의 변화율에 비례한다.

$$T(\theta, i) = \frac{\partial W(\theta, i)}{\partial \theta} = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i^2 \quad (1)$$

여기서 T 는 토크, θ 는 회전자의 위치각, i 는 상전류, $W(\theta, i)$ 는 코에너지를 나타내고, $L(\theta, i)$ 은 고정자와 회전자간의 인덕턴스를 나타낸다.

SRM에서 발생 토크의 한 인자인 상전류 해를 구하기 위한 전압 방정식은 식(2)와 같다.

$$V = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad (2)$$

$$= Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt}$$

식(2)로부터 상전류 해를 구하기 위해서는 SRM의 인덕턴스 프로파일에 대한 정확한 정보가 필수적이다. 그림 1은 본 연구에 사용된 8/6 전동기의 인덕턴스 프로파일을 나타내고 있다. 그림에서 알수 있듯이 기계각 7.5도에서 22.5도 사이에 인덕턴스 변화는 선형적으로 변한다고 가정할 수 있다. 따라서 이 영역에서 전류의 크기가 일정하다면 평활한 토크를 발생할 수 있다. 또한 8/6 SRM인 경우 한 상당 토크발생 구간이 15도의 평활 토크만 발생한다면 총합토크는 평활한 상태가 된다. 또한 이 값은 인덕턴스의 최대인 점에 대하여 대칭성을 갖고 있으므로 하나의 포토 인터럽터를 이용해 정, 역회전을 가능하게 할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 상스위치 도통구간을 그림 1의 7.5도와 22.5도 사이의 15도로 설정한다.

이러한 상의 도통구간인 15도를 유지하기 위한 인코더는 그림 2와 같이 구성하였다.

그림 2와 같은 인코더에서 상승 및 하강 에지신호를 이용하여 15도의 인터럽터 신호를 발생 시킨다. 이 신호를 마이크로 프로세서를 이용해 상을 OFF 시키고 다

음상을 ON 시키게 된다.

그림 3(b)는 엔코더에서 15도 마다 발생하는 인터럽터 신호를 나타내며 마이크로 컨트롤러의 인터럽터 기능을 이용해 디코딩함으로써 고정 도통각 제어를 위한 상 스 위치 신호를 그림 3(d)와 같이 발생시킨다.

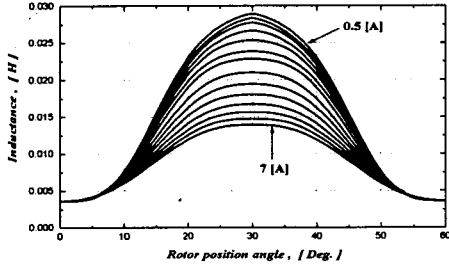


그림 1. 인덕턴스 프로파일

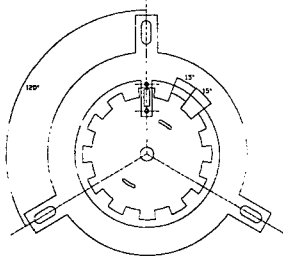


그림 2. 엔코더

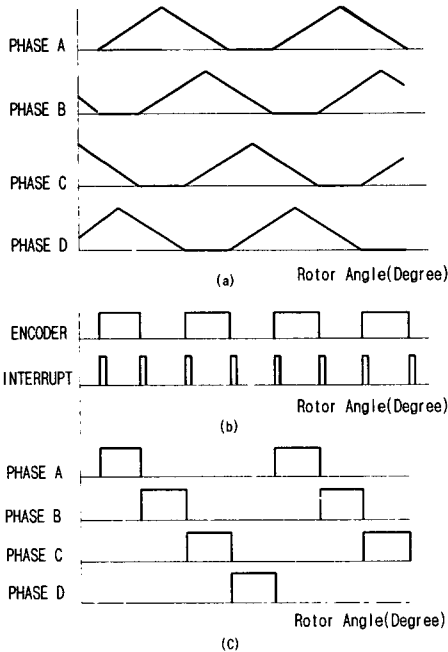


그림 3. (a)인덕턴스 프로파일 (b)엔코더신호 및 인터럽트 신호 (c) 상 스위칭 신호

2.2 M/T기법을 이용한 초정밀 속도검출

SRM을 초정밀 속도제어 하기 위해서는 정확한 속도정보가 필수적이다. 따라서 본 연구에서는 정확한 속도정보를 얻기 위해서 그림 4와 같은 M/T기법을 사용하였다.

그림 4는 엔코더에서의 위치 및 속도 검출 원리를 설명한 것으로 (a)는 인코더의 상태변환 시점을 임펄스로 표현하고 있으며, (b)는 기준 클럭 주파수 f_c 를 가지는 프로그램 카운터의 출력 파형으로 위치 및 속도 검출시 필요한 기준클럭 주기를 제공한다.

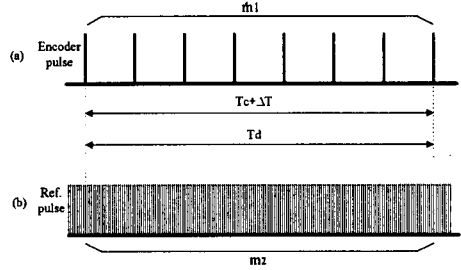


그림 4. 위치 및 속도검출 원리

1회전당 P 개의 펄스를 발생시키는 엔코더가 T_d 시간 동안에 m_1 개의 펄스를 발생시킨다고 하면 T_d 시간 동안에 이동한 회전자 위치각의 변위(θ_d)는 식 (3)으로 주어진다.

$$\theta_d = \frac{2\pi m_1}{P} \quad (3)$$

그리고 시간 T_d 는 일정주파수 발전기의 주기 T_c 와 속도에 따라 변화하는 ΔT 의 합으로 주어지고 발전기의 기준주파수 f_c 로 나누어져 디지털화된 값이 m_2 라고 하면 T_d 는 식 (4)과 같이 된다.

$$T_d = \frac{m_2}{f_c} \quad (4)$$

한편, 속도식에서 식 (3)과 식 (4)을 식 (5)에 대입하면 식 (6)과 같이 속도를 구할 수 있다.

$$\omega = \frac{\theta_d}{T_d} \quad (5)$$

$$\omega = \frac{2\pi f_c m_1}{P m_2} \quad (6)$$

실험에 사용된 8/6 SRM의 경우, $\frac{1}{4}$ 회전 3 펄스가 발생하며 이때마다 인터럽터가 걸리고 이때 80C196의 자유증가 타이머1과 조합하여 정확한 속도정보를 얻는다.

2.2 델타변조에 의한 일정주파수 전류제어

SRM에서 우수한 전류제어기로는 델타변조기법이 일반적으로 사용된다. 그러나 이 제어기는 전류제어 성능은 우수하나 스위칭 주파수가 부하에 따라 가변함으로 주변 회로에 EMI에 영향을 주며, 따라서 필터설계시 컷오프 주파수 설정에 매우 큰 어려움이 있다. 따라서 본 연구

에서는 스위칭 주파수를 일정하게 유지하면서 델타변조 기법과 동일한 성능을 갖는 전류 레벨 제어기법을 사용하였으며, 그 회로는 그림 5와 같다.

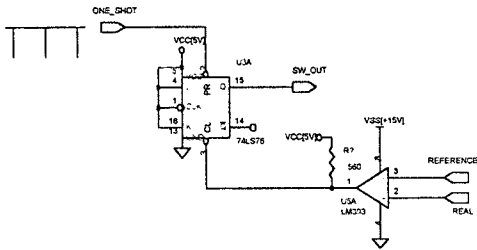


그림 5. 전류 레벨 제어를 위한 전류제어기

그림 5에서 ONE_SHOT 단자에 인가되는 펄스가 곧 스위칭 주파수가 되며, 이 시점에서 그 상에 해당되는 상 스위치를 온하고, 지령전류와 실제전류를 비교하여 실제전류가 지령전류보다 큰 시점을 비교기가 검출하여 스위치를 오프하게 된다.

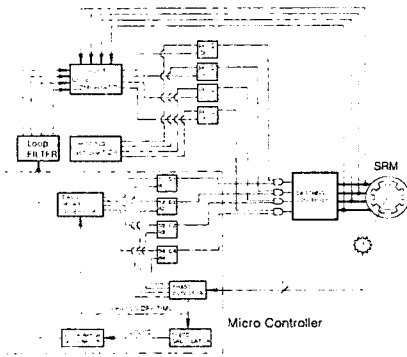


그림 6. 마이크로 컨트롤러를 이용한 구동시스템

3. 실험 및 결과

제한된 전류레벨 제어방식의 SRM 구동에서 저속도 특성을 검토하기 위해 그림 6과 같이 실험장치를 구성하였다. 1.5HP의 8/6 SRM을 클래식 인버터를 사용해 구동하였고, 전류 레벨은 실제 상전류와 M/T기법을 이용한 정밀 속도 검출을 통한 프로세서에서 발생하는 지령전류를 비교하여 조절할 수 있도록 전류 레벨 조정기를 구성하였다.

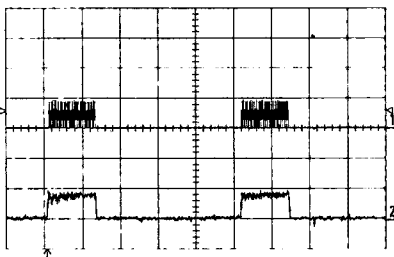


그림 7. 무부하 운전시 신호(20rpm), CH1) 도통각 및 PWM 신호(0.1 S/div 5.V/div) CH2) 상전류(0.1S/div 0.3A/div)

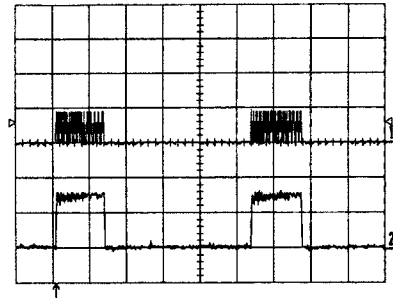


그림 8. 부하 운전시 신호(0.4kg·cm) CH1) 도통각 및 PWM 신호(0.1 S/div 5.V/div) CH2) 상전류(0.1S/div 0.5A/div)

그림 7은 무부하시 20(rpm)의 저속에서 전류레벨 제어에 의한 상전류 파형과 도통각 신호를 보여주고 있다. 그림에서 도통각은 전류 레벨 조정기에 의해 일정 스위칭 주파수로 초핑되고 있는 것을 볼 수 있다. 그림 8은 부하 인가시(0.4kg·cm) 스위칭 주파수가 일정한 도통각 신호와 상전류 파형을 나타내고 있다.

4. 결론

토오크 리플과 속도변동의 영향을 많이 받는 저속에서 전동기가 강인한 정속도 운전을 할 수 있도록 하기 위해서는 평활한 토오크를 얻을 수 있어야 한다. 본 논문에서는 SRM의 저속도제어를 위해 80C196과 전류 레벨 조정기를 사용해 순서적으로 구현하였다. 구성된 시스템은 부하변동에 따라 전류 레벨을 제어하기 위한 지령전류가 동적으로 변하므로써, 저속에서 뛰어난 동적 속도 제어 특성을 갖는다. 또한 저속에서의 속도변동에 크게 영향을 주는 토오크 리플을 줄이기 위해 평활한 토오크를 가질 수 있는 도통각으로 고정시켜 구동 시스템을 안정화 시켰다.

[참고 문헌]

- [1] J. T. Bass, M. Ehsani, and T. J. E. Miller, "Robust torque control of switched reluctance motors without a shaft position sensor," IEEE trans. IE, vol. IE-33, no.3, pp.212-216, Aug. 1986
- [2] J. W. Ahn, S. G. Oh, and Y. M. Hwang, "A Novel Control Scheme for Low Cost SRM Drive, Proc. of IEEE/ISIE '95, Athens, vol.1, pp. 279-283, July 10-14, 1995.
- [3] Seok-Gyu. Oh, Jin-Woo Ahn and Young-Moon Hwang "Flexible Control Scheme of Switched Reluctance Motor Drives by PLL controller", IEEE/APEC98. '98 pp.784-788
- [4] 안진우 외 3 "PLL속도제어방식 SRM의 고효율 구동" 대한 전기학회 부산경남합동학술대회 논문집, pp 112-115, 1999. 11
- [5] A. W. Moore ; "Phase-Locked Loops for Motor-Speed Control" IEEE Spectrum, Vol.10, pp.61-67, 1973
- [6] M. O. Bilgic, V. Ozbulur, A. Sabanovic "Torque ripple minimization of a switched reluctance motor" APEC'95, Dallas 1995
- [7] P. C. Kjaer, J. J. Gribble and T. J. E. Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machine" Proc. of IAS Annual Meeting '96 vol.1 pp. 92-100, Oct. 6-10 1996