

스위치드 릴럭턴스 전동기의 센서리스 토크제어에 관한 연구

김 윤 호 이 장 선

중앙대학교 공과대학 전기공학과 전력전자연구실

Study for Sensorless Torque Control Scheme of Switched Reluctance Motor

Yoon-Ho Kim Jang-Sun Lee

Powerelectronics Lab. Chung-Ang Univ.

Abstract

For a Switched Reluctance Motor(SRM) drive, the important things are 1) reducing torque ripple, 2) improving efficiency, 3) sensorless speed control, 4) accurate position. The position information is important for the efficiency and smoothness drives. Since SRMs characteristics are nonlinear. It is difficult to estimate phase current in saturation region.

This paper describes a method for indirect sensing of the rotor position in SRM which uses both voltage and current. The method obtains rotor position by using unconducting phase. The information about the rotor position is achieved by differentiating the unconducting phase current or the voltage gradient.

And then, this paper presents a torque control with indirect rotor position detection methods. This torque control is achieved by developing a detailed nonlinear model of the motor.

1. 서론

최근 전력용 반도체의 실용화에 의해 종래의 이론적인 타당성은 인정되어 왔지만 경제성이나 실현의 어려움 등에 의해 보류되어 왔던 전동기도 최근에 와서 다시 연구의 대상이 되고 있다.

그중 SRM은 스위칭 제어장치가 결합된 가변 릴럭턴스 모터의 특수 형태로 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며, 각기 다른 갯수의 극을 가

진다[1][2]. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있으며 회전자 부분에는 어떠한 형태의 권선이나 영구자석도 존재하지 않으므로 아주 간단한 구조로 되어 있어, 기존의 유도전동기나 동기전동기보다 구조가 간단하고, 단위 체적당 토크 및 효율이 높으며, 속도 제어가 용이하고 광범위한 변속 범위와 초저속 운전시 우수한 특성을 갖고 있는 등 여러가지 장점을 가지고 있어 그 실용적인 가치가 높은 반면, 모터와 컨버터가 일체형으로 구성되어 있어서 컨버터의 효율 향상이 필요하다는 점과 회전자의 정확한 위치를 검출하기 위한 위치센서가 필요하다는 점이다[1]. 또한 운전영역에서의 비선형성으로인해 자기회로의 포화상태에서 부하조건을 만족시키는 기준 전류의 예측이 토크-전류 관계에 덧붙여져 더욱 복잡하고, 초평간의 짧은 시간내에 발생할 수 있는 불규칙적이고 제어불능인 회로조건 때문에 토크에 의해서 운전시의 소음의 원인이 될 수 있다[3][4]. 따라서 원활하고 정밀한 토크 제어를 위해서는 전류와 회전자 위치의 함수인 비선형적인 토크 모델을 회전자의 위치에는 독립적이고 특정한 범위에 대한 전류의 함수처럼 선형화 하는 것이다. 그러나 SRM의 토크 출력은 전류와 회전자 위치의 함수로 매우 비선형적이므로 SRM의 토크 제어는 비선형적인 모터 모델의 정밀성, 실제적인 실험 데이터의 확보와 비선형 제어기법의 개발에 따라 이루어진다.[4][5]

본 논문에서는 원활하고 경제적인 SRM 구동을 위하여 간접 회전자 위치 검출방법을 사용하여 토크 제어를 실현하였다.

2. SRM의 기본 원리

SRM의 토크는 회전자의 위치변화에 따른 인덕

턴스 변화량에 비례하므로 인덕턴스 변화극성에 따라 부극성의 토크를 발생시킬 수도 있다. 즉, SRM의 구동기는 원래 모터와 컨버터 일체형의 가변속 두동 시스템이지만 4상한 동작이 가능한 시스템이다.

4상 8/6 SR일체형의 가변속 구동 시스템이지만 4상동M의 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 변화는 그림 1과 같다. 그림과 같이 회전자의 위치에 따라 인덕턴스가 크게 변하는 것을 알 수 있는데, 이는 인덕턴스의 변화량이 고정자와 회전자의 극수 및 극호의 함수로 결정되어 짐을 알 수 있다.

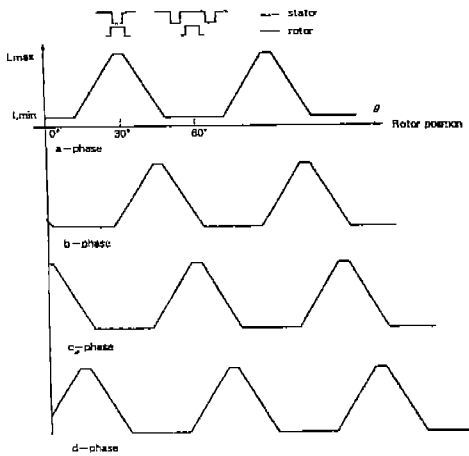


그림 1 SRM의 인덕턴스의 변화

SRM의 자기회로를 여자할 때, 고정자 한 상에 대한 등가회로는 그림 2와 같다.

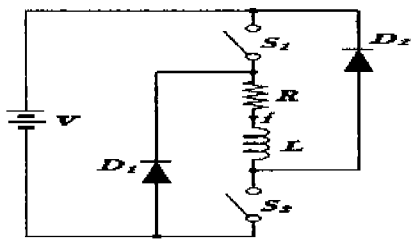


그림 2. SRM의 한상에 대한 등가회로

따라서 고정자 한 상에 대한 등가회로 전압방정식은 인가전압을 V , 상전류를 i , 권선저항을 R , 자속 쇠교수를 λ 라고 할 때 다음 식 (2-1)과 같다.

$$V = Ri + \frac{d\lambda}{dt} \quad (2-1)$$

전동기가 일정속도 ω 로 회전할 때, 역기전력은 $\frac{d\lambda}{dt}$ 는 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda}{dt} = L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (2-2)$$

여기서 $\omega = \frac{d\theta}{dt}$ 이다. 식 (2-2)의 우변 첫 항은 전류변화에 의한 리액티브 전압이며, 두번째 항은 인덕턴스 변화에 의한 속도기전력이다.

또한 전기적 동특성 방정식과 기계적 동특성 방정식은 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{di}{dt} = -\frac{R}{L} i + \frac{1}{L} V - k\omega \quad (2-3)$$

$$\frac{d\omega}{dt} = \frac{1}{J} \left[\sum_{j=1}^n k_j i_j^2 - B\omega - T_j \right] \quad (2-4)$$

여기에서 $k = \frac{d\theta}{dL}$ 는 인덕턴스 변화의 기울기를 나타낸다. 따라서 에너지의 흐름은

$$V_i = Ri + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} Li^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \omega \quad (2-5)$$

SRM이 전동기로 동작할 때, 전원으로부터 공급된 입력에너지는 저항손실을 제외하면 자기 에너지 ($\frac{1}{2} Li^2$)와 기계적 출력 ($\frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \omega$) 으로 구성된다. 그러므로 인덕턴스가 증가하는 구간동안 스위치를 닫으면 전원측으로부터 공급된 입력에너지 일부는 기계적인 출력으로 변환되고, 나머지는 자기회로에 축적된다.

또한 이 구간에서 스위치를 열면 축적된 자기에너지의 일부는 기계적인 에너지로 변환되고, 나머지는 전원측으로 반환된다. 만약 인덕턴스가 최대값으로 일정하게 유지되는 구간에 전류가 흐르면, 기계적인 출력은 없으며 입력에너지는 자기에너지로 축적된다. 인덕턴스가 감소하는 구간에 전류가 흐르면, 부의 토크 발생으로 기계적인 동력원에서부터 전원측으로 에너지가 전달된다. 이것은 SRM의 회생동작이다.

SRM의 전기적 토크는 자기회로의 코-에너지 (co-energy)의 변화량으로 나타낼 수 있다. 따라서 고정자와 회전자 간의 상호 인덕턴스가 없다고 가정하면, 토크는 상전류들의 제곱의 합과 인덕턴스의 변화분의 곱인 식으로 나타난다.

$$\tau = \sum_{n=1}^m \frac{1}{2} \frac{dL_m}{d\theta} i_m^2 \quad (2-6)$$

여기에서 회전자 위치에 대한 인덕턴스의 미분값에 의해 토크의 부호가 결정되고, 상전류들의 제곱의 합에 의해 토크의 크기와 형태가 결정된다.

따라서 한 상당 SRM 자기회로의 코-에너지는

$$W_c = \frac{1}{2} i^2 L(\theta) \quad (2-7)$$

한 상에 대한 발생토크는 회전자 위치에 대한 코-에너지의 편미분값으로 나타낼 수 있으며 다음과 같이 표현된다.

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} i^2 = \frac{1}{2} k_i i^2 \quad (2-8)$$

3. 센서리스 제어의 원리

SRM은 속도제어를 위하여 회전자의 정확한 위치를 검출하기 위한 위치센서가 필요하다. 그러나 위치 검출용 센서는 고가이므로 산업분야에서 저가적으로 SRM을 운전할 수 있는 센서리스 속도제어가 필요하게 되었고 이 분야에서 많은 연구가 이루어지고 있다.

즉, 스위칭 해야할 상권선에 검출용 펄스를 인가하여 인덕턴스를 인가하여 인덕턴스의 변화를 검출하는 펄스화된 임피던스 센싱 방법, 회전자의 위치정보를 미리 모델링하여 모델 기준 추종(estimator) 방법 및 주파수 변조 엔코더에 의하여 최대 톨럭턴스와 최소 톨럭턴스의 위치를 예측하여 센싱하는 방식등이 연구되고 있다. 다음의 표 1은 SRM의 센서리스 제어 기술에 대한 기존의 방법들을 분류하여 나타낸다.

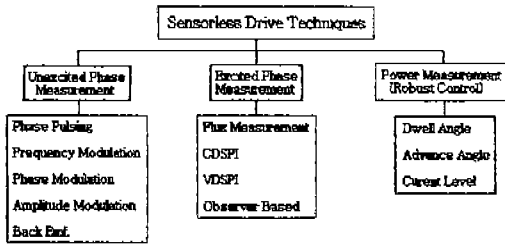


표 1. SRM의 센서리스 제어에 대한 분류

본 논문에서는 주파수 변조 엔코더에 의하여 최대 톨럭턴스와 최소 톨럭턴스의 위치를 예측하여 센싱하는 방식(FM Modulation Method)을 채택하여 연구하였다. 이 방식은 단위 게인 차동증폭기(Unity Gain Differential Amplifier)를 사용하여, 주파수 신호에 비례하여 SRM의 상 인덕턴스의 값을 변환한다. SRM의 전압방정식으로부터 상 인덕턴스의 식을 구하면

$$L = \frac{(-B + AL_0)e^{-At} + B}{A} \quad (3-1)$$

여기에서 $A = (di/dt)/i$, $B = (V/i) - R$ 이고 L_0 는 전상태의 L 값을 나타낸다.

식 (3-1)로부터, 만약 상전압이 아주 짧은 시간(Δt)동안 공급된다면 상 인덕턴스에 잔류해 있는 전류는 아주 작으므로 식 (3-2)와 같이 근사화할 수 있다.

$$V = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (3-2)$$

그러므로

$$L = V \frac{\Delta t}{\Delta i} \quad \text{and} \quad \theta = F^{-1}(L) \quad (3-3)$$

4. 가변 부하 토크 영역에서의 SRM의 운전

자기회로의 포화상태에서 어떤 부하조건을 만족시키는 기준전류의 예측이 토크-전류 관계에 덧붙여져 더욱 복잡해진다. 또한, 초핑 간의 짧은 시간내에 발생할 수 있는 불규칙적이고 제어불능인 회로조건 때문에 토크에 의해서 운전시의 소음의 원인이 될 수 있다. 따라서 SRM의 원활한 운전을 위하여 특정 부하 토크 영역 운전이 필요하다.

본 논문에 사용된 SRM 토크 제어의 블록도는 그림 3과 같다. 토크 제어 목적은 전체 토크 T_i 가 토크 명령 T_c 에 추종하게 하기 위함이다. 제어는 전류(轉流) 형태를 가진 생성된 역함수 $f_i^{-1}(\theta, T_c)$ 로부터 회전자의 위치와 전류 대 토크의 함수 $f_i(\theta, i_m)$ 에 기초한다. 역함수는 페루프에서 제어되어 생성된 전류 명령 i_c 를 사용한다. 이것은 원활한 SRM 토크 대 회전자 위치와 전류 관계를 얻기 위해서이다. SRM 토크 함수는 오프라인시 다음과 같이 계산되어진다. 첫째, 전류(轉流) 알고리즘을 사용한 일정 전류의 명령. 두번째, 한 주기 동안의 SRM 구동. 세 번째, 구동된 모터를 측정. 토크 센서에 의해 측정된 SRM 토크는 전체 토크 T_i 이다.

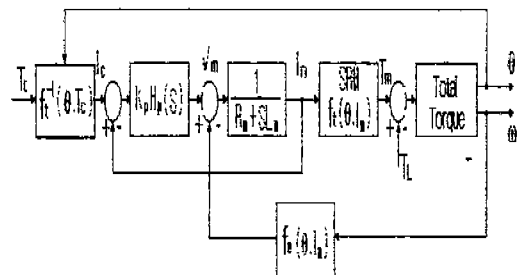


그림 3. SRM의 토크제어 블록도

5. 시뮬레이션 결과

그림 4는 SRM의 일정속운전에서의 스위칭 온 각의 변화를 보여준다. 이 온 각 데이터는 시뮬레이션에 사용되었다.

그림 5의 (a) 와 (b)는 PI 제어기를 사용하였을 때의 속도응답과 한 상당 전류의 크기를 보여주고 있다.

그림 6은 속도센서를 사용하였을 때와 사용하지 않은 센서리스 기법을 사용하였을 때의 가변 부하에 따른 SRM의 토크 응답을 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다.

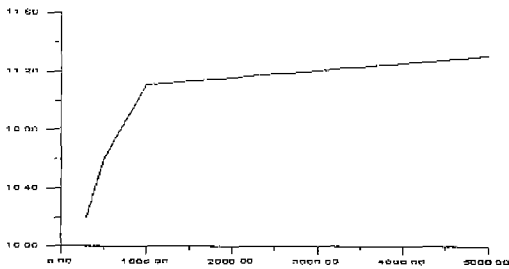
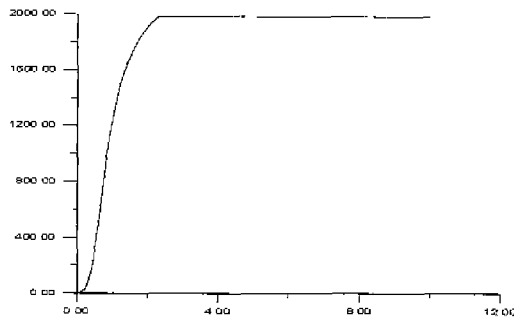
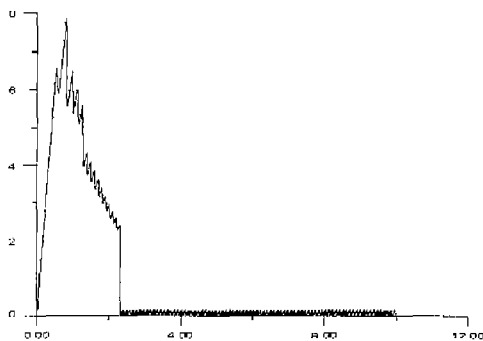


그림 4: 일정속에서의 스위칭 온 각의 변화



(a) 속도응답



(b) 전류

그림 5. 속도응답파형

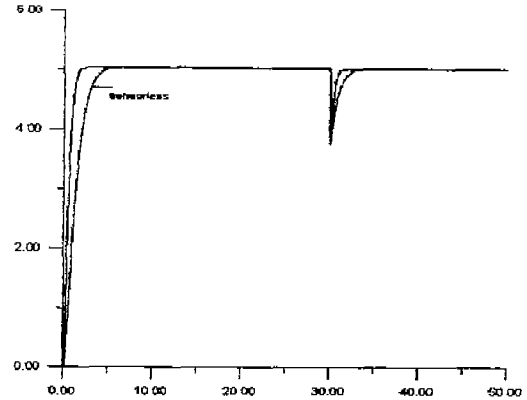


그림 6. 가변 부하에 따른 토크 응답

6. 결론

본 논문에서, 센서리스 기법을 사용하여 SRM의 속도제어 및 부하 토크 가변시의 토크 제어를 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션결과에서 알수 있듯이 센서리스 의 경우, 센서를 부착한 경우와 유사한 응답곡선을 나타낼수 알 수 있었다.

향후 실험을 통하여 본 시스템의 타당성을 검증하고자 한다.

References

- [1] T. J. E. Miller, P. G. Bower, R. C. Becerra, and M. Ehsani, "Four-quadrant brushless reluctance motors without a shaft position sensor," in *IEE Conf. Power Electron.*, July 1988, vol. CP-291, pp. 273-276.
- [2] B. K. Bose, T. J. E. Miller, P. M. Szczesny, and W. H. Bicknell, "Microcomputer control of switched reluctance motor," *IEEE Trans. Ind. Applicat.*, vol. IA-22, no. 4, pp. 708-715, July/Aug. 1986.
- [3] R. C. Becerra, M. Ehsani, and T. J. E. Miller, "Commutation of SR motors," *IEEE Trans. Power Electron.*, vol. 8, no. 3, pp. 257-263, July 1993.
- [4] S. R. MacMinn, P. M. Szczesny, W. J. Rzesos, and T. M. Jahns, "Application of sensor integration techniques to switched reluctance motor drives," in *IEEE-IAS Conf. Rec.*, Oct. 1988, pp. 584-588.90.
- [5] M. Illic-spong, R. Marino, S. M. Peresada, and

D. G. Taylor, Feedback Linearizing Control of Switched Reluctance Motors, IEEE Trans. Automatic Control, vol. AC-32, no. 5, pp. 371-379, May 1987

- [6] D. G. Taylor, M. J. Woolley, and M. Ilic, Design and Implementation of a Linearizing and decoupling Feedback Transformation for Switched Reluctance Motors, in Proc. 17th Symp. Incremental Motion Control System and Devices, June 1988