

신경회로망을 이용한 SRM의 토크 제어

*정 연석, 이 장선, 김 윤호

중앙대학교 전자전기공학부 전력전자연구실

Torque Control Scheme of Switched Reluctance Motor using Neural Network

*Yeon-Suk Jeong, Jang-Sun Lee, Yoon-Ho Kim

Powerelectronics Lab. Electro-Electronic Dep. Chung-Ang Uni.

Abstract

The torque of SRM is developed by phase currents and inductance variation. Phase current is often the controlled variable in electrical motor drives, so it seems natural to use closed loop current controllers. However, the highly nonlinear nature of switched reluctance motors makes optimisation of closed loop current controlled difficult because of saturation effect in magnetic circuit. Therefore, torque generation region is nonlinearly varied according to phase current and rotor position. This paper describes the torque control scheme with neural network that can control varied with load torque. The torque control is simulated by PSIM.

I. 서론

최근 전력전자 기술의 발달과 더불어 전력전자의 전력변환기술을 이용한 가변속 전동기구가 활발히 연구되기도 있으며, 그중 스위치드 릴럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor)는 스위칭 제어장치가 결합된 가변 릴럭턴스 모터(Variable Reluctance Motor)의 특수 형태로 고정자와 회전자 모두가 돌극형 구조를 하고 있으며, 각기 다른 갯수의 극(pole)을 가진다. 특히, 고정자 부분에만 권선이 감겨져 있으며 회전자 부분에는 어떠한 형태의 권선이나 영구자석도 존재하지 않으므로 아주 간단한 구조로 되어 있고, 고효율, 고속운전이 가능하며 직류 직권전동기의 속도, 토크 특성을 가지므로 전압 및 스위칭 각도의 가변에 의해 가변속 제어가 가능하다[1].

그러나 상호인덕턴스를 이용하는 교류전동기와는

달리 회전자의 위치에 따라 펄스 형태의 직류전압을 상권선에 인가함으로써 회전력을 발생시킨다. 이러한 구동원리로 인하여 토크 리플이 발생하며, 높은 자기포화영역에서 운전되므로 회전자의 위치와 전류에 따라서 비선형적으로 변화하는 인덕턴스를 보상할수 있는 제어시스템이 요구되어진다[2].

본 논문에서는 비선형적인 인덕턴스를 보상할수 있는 신경회로망 제어를 사용하여 변화하는 부하토크 영역과 광범위한 속도변속영역에서 일정한 토크를 유지하는 토크 제어를 행하였고, 속도검출기의 사용에 따른 비경제성을 저감하는 센서리스의 제어방식을 사용하였다. 본 논문에서 PSIM을 사용하여 시뮬레이션하였다.

II. SRM의 토크 특성

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

SRM의 자기회로를 여자할 때, 고정자 한 상에 대한 등가회로는 그림 1과 같다[1].

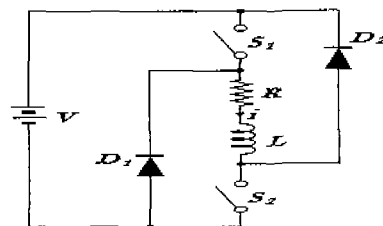


그림 1. SRM의 등가회로

따라서 고정자 한 상에 대한 등가회로 전압방정식은 인가전압을 V , 상전류를 i , 권선저항을 R , 자속 쇄교수를 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, 역기전력 $d\lambda/dt$ 는 다음과 같다.

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

여기서 $\omega = d\theta/dt$ 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.

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

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

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

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

SRM이 전동기로 동작할때, 전원에서부터 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 나타낸다.

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

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.

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta)}{d\theta} i^2 = \frac{1}{2} ki^2 \quad (2-9)$$

III. 신경회로망을 이용한 인덕턴스의 학습

비선형 시스템을 근사화 시키는 성질은 제어에서 신경회로망을 사용하고자 하는 중요한 이유가 되는데 시스템의 동정에 있어서 시스템의 비선형 다이나믹스 뿐만 아니라 역 다이나믹스도 표현하도록 회로망을 학습시키는 문제이다. 선형 수학기론을 바탕으로 한 동정(Identification)에서의 기본 문제는 주어진 특정한 구조의 모델이 있을 때 이 모델은 시스템을 적절하게 표현할 수 있는 구조를 가졌느냐 하는 점이다. 그러나 신경 회로망을 사용할 때는 특정 구조를 가져야 하는 전제 조건이 필요 없다[7].

다음과 같은 비선형 시스템을 고려해 보도록 한다.

$$y(t+1) = f(y(t), \dots, y(t-n+1), n(t), \dots, n(t-m+1)) \quad (3-1)$$

여기서 $f(\cdot)$ 는 비선형시스템, m, n 은 각각 입출력 차수를 의미한다.

이와 같은 비선형 시스템을 모델링하기 위해서는 입, 출력이 모두 비선형이거나, 입력이나 출력중 어느 하나가 비선형인 경우에 대한 동정결과를 보여 준다.

그림 3-1은 식 (2-1)과 같은 구조의 신경회로망을 나타낸다.

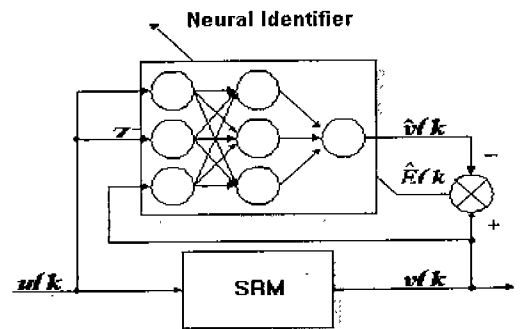


그림 2. 신경회로망의 블록선도

신경회로망의 학습데이터는 회전자의 위치각과 전류를 입력으로, 출력을 인덕턴스 값으로 측정한 각각의 회전자 위치각과 전류를 포함하도록 하였고, 학습 방법은 일반적인 역전파 알고리즘을 이용하였고 활성화 함수는 시그모이드 함수를 사용하였다.

IV. 센서리스 제어의 원리

SRM은 속도제어를 위하여 회전자의 정확한 위치를 검출하기 위한 위치센서가 필요하다. 그러나 위치검출용 센서는 고가이므로 산업분야에서 저가격으로 SRM을 운전할 수 있는 센서리스제어가 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 릴럭턴스와 최소 릴럭턴스의 위치를 예측하여 센싱하는 방식등이 연구되고 있다[1].

본 논문에서는 주파수 변조 엔코더에 의하여 최대 릴럭턴스와 최소 릴럭턴스의 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

$$L = \frac{(-B + AL_0)e^{-At} + B}{A} \quad (4-1)$$

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

식 (4-1)로부터, 만약 상전압이 아주 짧은 시간(Δt) 동안 공급된다면 상 인덕턴스에 잔류해 있는 전류는 아주 작으므로 다음 식과 같이 근사화할 수 있다.

$$V = L \frac{\Delta i}{\Delta t} \quad (4-2)$$

그러므로

$$L = V \frac{\Delta t}{\Delta i} \text{ and } \theta = F^{-1}(L) \quad (4-3)$$

V. 시뮬레이션 결과

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. 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 토크이다.

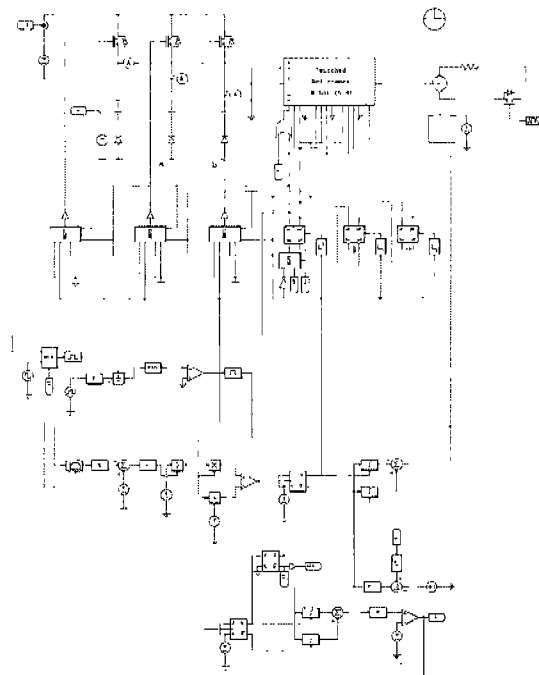


그림 3. SRM의 토크제어 블록도

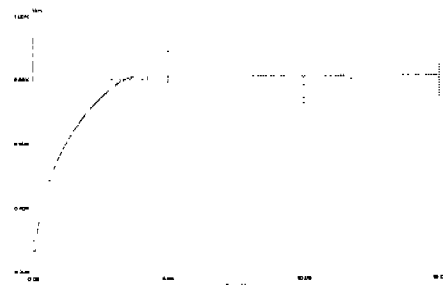


그림 4 PI 제어를 사용했을 때 속도응답

참고문헌

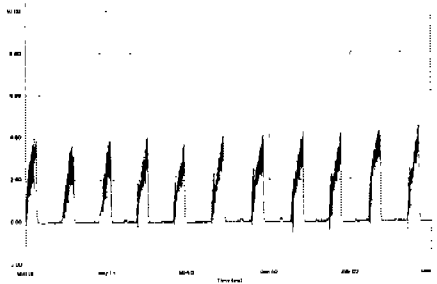


그림 5 PI 제어를 사용한 경우의 전류파형

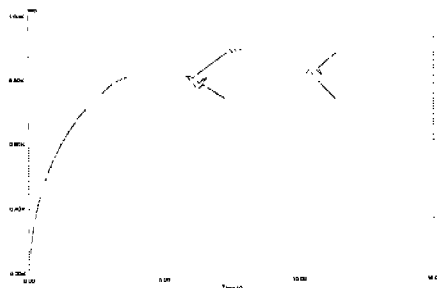


그림 6 PIC, NNC의 응답속도 비교파형

그림 4의 (a), (b)는 PI 제어를 사용하였을 때의 속도응답과 한 상당 전류를 보여주고 있다.

그림 5는 센서리스 기법을 적용하였을 때, PI 제어기 및 신경회로망 제어기 사용할 때 각각 가변 부하에 따른 SRM의 토크 응답을 시뮬레이션한 결과를 보여주고 있다.

VI. 결론

본 논문에서, 센서리스 기법을 적용하여, SRM의 속도제어 및 부하 토크 가변시의 토크 제어를 각각 PI제어 및 신경회로망 제어기법을 사용하여 시뮬레이션 하였다.

시뮬레이션결과에서 알수 있듯이 비선형적인 인덕턴스를 보상할수 있는 신경회로망 제어기를 사용한 경우와 PI 제어를 사용한 경우보다 더욱 좋은 토크 응답특성을 나타냄을 알 수 있었다.

향후 실험을 통하여 본 시스템의 타당성을 검증하고자 한다.

- [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.
- [5] M. Ilic-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.