

신경회로망을 이용한 SRM의 전류추종 제어

안성호*, 오석규**, 안진우*, 황영문***
 *경성대학교 전기공학과, **진주산업대 산업자동화공학과, ***부산대학교 전기공학과

Current Control of SRM using Neural Network

Sung-Ho Ahn*, Seok-Gyu Oh**, Jin-Woo Ahn*, Young-Moon Hwang***
 *Kyungsoong Univ., **Chinju Nat'l Univ., ***Pusan Nat'l Univ.

Abstract - The Switched Reluctance Motor (SRM) has good properties to the adjustable speed control. But, high torque ripple and noise decrease this merit and make unstable state. Also, because of the saturation in the magnetic circuit, it is difficult to predict the inductance profile. If the inductance profile is known, it's possible to make flat-top torque by applying some control strategy. This paper suggests method to develop flat-top torque using a Artificial Neural Network(ANN) method that can calculate a nonlinear inductance profile.

2. 평활토크 발생을 위한 전류형상

SRM은 돌극형의 고정자극과 회전자극이 중첩되기 시작할 때 고정자극에 스위칭 전류를 인가함으로써 토크가 발생한다. 토크 발생구간에서 릴럭턴스는 증가하고 전동기의 작용 인덕턴스 $L(\theta, i)$ 가 증가하기 때문에, 기자력발생을 위한 전류의 변화율은 작아지고, 인덕턴스 변화율은 그림 1에서와 같이 전류의 크기가 커질수록 작아진다.

1. 서 론

SRM은 고효율, 고속운전, 견고성, 넓은 범위의 속도 제어가 가능하여 가변속전동기구로서 활발히 연구되고 있다. 그러나 SRM의 단점인 토크 맥동과 소음이 다른 전동기구보다 크기 때문에 가전기구나 정밀제어용에 적용하는 데 문제가 되고 있으며 이를 줄이기 위한 연구가 진행되고 있다. [1][2][3][4] 소음과 진동의 원인이 전류가 감소하는 구간에서 평균 역기전력임을 밝혀낸 것과 [1], 소음과 진동의 원인을 설정해두고, 그에 맞는 실험을 통해 발생하는 결과를 가지고 분석해내는 방법을 제시되었다. [2] SRM 운전중에 발생하는 토크 리플을 줄이기 위해 각 상을 중첩하거나 비선형적인 인덕턴스를 추정하는 방법 등이 제시되었다. 상을 중첩하기 위해서 인덕턴스 프로파일을 측정하고 이 데이터를 이용해서 중첩각을 결정한다. 토크를 일정하게 유지하기 위해서 운전에 필요한 기준 토크가 계산되면 각 상의 토크를 결정하는 함수를 정의하여, 이 값과 기준 토크와의 값을 더해서 전체 토크를 결정하거나 [3], 인접한 두 상이 만들어내는 토크의 합이 현재의 일정한 토크값과 같아질 수 있도록 도통각을 설정하는 torque sharing function을 적용하여 상간의 중첩을 적절히 이용하는 방법도 제시되고 있다. [4] 위의 두가지 방법과는 달리 실험전에 측정된 전동기의 전류에 대한 자속을 보간법을 이용하여 예측해내고 그 값을 이용하여 토크를 만들어내는 방법도 제시되었다. [5]

본 논문에서는 비선형적인 인덕턴스의 변화를 예측하기 위해서 신경회로망을 사용하였으며, 어 방법에 의해서 구한 인덕턴스를 이용하여 기준 발생 토크(T_{ref})를 설정하였다. 설정된 T_{ref} 를 유지하기 위해서는 인덕턴스 변화율을 보상해야 하는데, 이를 위해 필요한 전류값을 구하고 이 값을 추종하게 된다. 또한 부하가 변동하게 되면 지령속도를 유지할 수 있도록 다음 상에서 드웰각을 PI 제어기에 의해서 가변할 수 있도록 구성하였다.

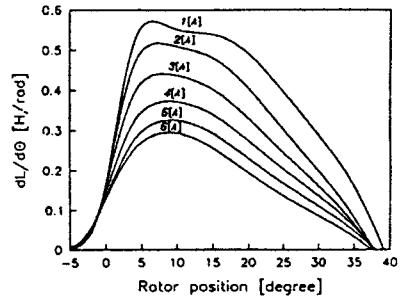


그림 1. 인덕턴스 변화율
 Fig 1. $dL(\theta, i)/d\theta$ variation

토크 발생구간에서의 토크는 식 (1)과 같다.

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

식 (1)에서 토크는 전류와 인덕턴스 변화율에 의해 결정되는데, 두가지 성분은 전류에 의존함을 알 수 있다. 식 (1)에서 인덕턴스가 선형적으로 변화한다고 가정하고 평탄한 전류를 인가하게 되면, 토크는 맥동이 없는 이상적인 형태를 유지하게 된다. 그러나 실제 인덕턴

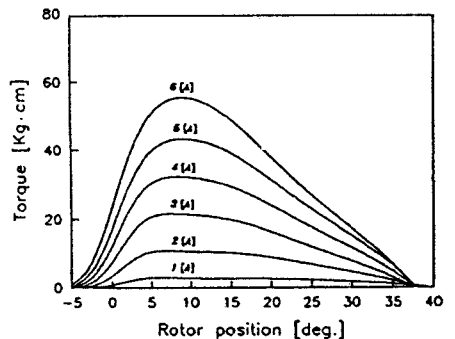


그림 2. 일정전류 인가시 발생토크
 Fig 2. Developed torque under constant current

스는 자기포화로 인해 그 변화율이 그림 1과 같이 비선형적이기 때문에, 일정한 전류를 가한다면 토오크는 일정하게 되지 못한다.

그림 2는 일정전류를 인가하였을 때 발생하는 토오크를 나타내고 있는데, 전류가 증가할수록 뒷부분에서의 토오크의 감소가 크다는 것을 알 수 있다. 토오크를 일정하게 유지하기 위해서는 감소하는 부분에서 인덕턴스 변화율을 보상해주어야 하는데, 이러한 제어를 위해서 신경회로망 기법을 이용하였다.

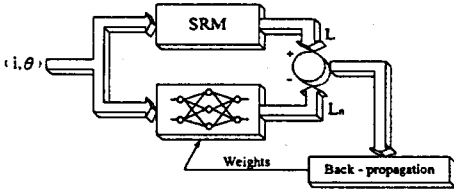


그림 3. 역전파학습 알고리즘의 블록도
Fig 3. Block diagram of back-propagation training algorithm

그림 3에서는 인덕턴스 학습 과정을 보여주고 있다. 상전류 i_a 와 6에 따른 SRM의 실측값 L 과 신경회로망의 출력 L_n 을 비교하여 그 오차가 최소화되도록 가중치(weight)를 조정하여 허용오차범위안에 들 때까지 학습시킨다. 역전파 알고리즘은 학습 시간이 다른 알고리즘에 비해서 많기 때문에 온라인 상태에서 학습하기 위해서 은닉층과 뉴런의 수를 최적화 하였다.

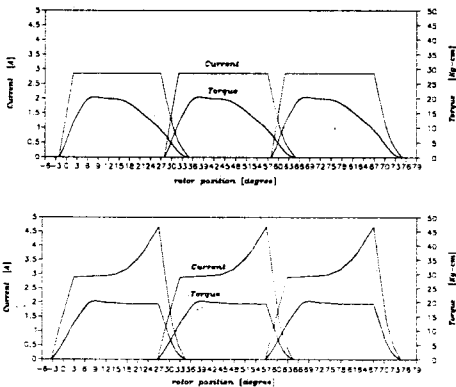


그림 4. (a) 평활전류 인가시 토오크 파형
(b) 신경회로망 기법에 의한 제어시 전류 및 토오크 파형
Fig 4. Torque waveform
(a) under constant current
(b) current controlled by Neural Network

그림 4.(a)는 일정한 전류를 인가했을 때의 토오크 변화를 나타내고 있다. 이 그림에서 뒷부분으로 갈수록 토오크가 줄어들고 있는데, 이것은 인덕턴스 변화율이 감소함으로써 생기는 현상이다. 이와 같이 인덕턴스 변화율의 증감은 토오크에 직접적인 영향을 주게 된다. 그림 4.(b)는 토오크 리플을 줄이기 위해서 인덕턴스 변화율이 줄어드는 구간에서 전류를 증가시키면 토오크를 일정하게 유지할 수 있다는 것을 보여주고 있다. [6]

인덕턴스 변화율을 보상함으로써 토오크를 일정하게 유지하는 제어법을 구현하기 위해서 순시적으로 변화하는 인덕턴스를 구하고, 이 값에 의해서 T_{ref} 를 설정한

다. T_{ref} 는 인덕턴스 변화율이 최대값을 가질 때 구한 토오크로 설정하고 이 값을 유지할 수 있도록 인덕턴스 변화율을 전류를 가변시켜 보상한다.

그러나 인덕턴스는 자기회로의 비선형성으로 인해 그 값을 예측하기가 쉽지 않다. 그래서 인덕턴스를 예측하기 위한 방법으로 본 논문에서는 신경회로망기법을 도입하였다. 인덕턴스를 구하기 위해 각도와 전류를 입력 받고, 이 값들을 신경회로망 함수내에서 학습시키면 인덕턴스값을 구할 수 있다. 이렇게 구한 순시적인 값으로 인덕턴스 변화율을 구하고, 이 값을 이용하여 토오크를 계산하였다.

3. 토오크 맥동 저감을 위한 전류제어

본 논문에서 토오크 리플을 줄이기 위한 방법은 신경회로망을 이용하여 인덕턴스 프로필을 구하고, 이 값에 의해 인덕턴스 변화율을 보상하는 방법에 초점을 맞추고 있다. 따라서 상간의 중첩은 토오크 리플이 최소로 되도록 하는 스위칭각으로 고정하고, 상 스위칭은 PWM 제어를 하도록 하였다.

토오크를 일정하게 유지하기 위해서 증가시켜야 할 전류값을 알기 위해서는 식 (1)에서 보는 것처럼 인덕턴스 변화율을 알고 이 값의 변화를 알아야 한다. 이러한 제어를 위해서 신경회로망 기법을 이용하여 온라인상으로 각도, 전류를 입력받아 인덕턴스를 계산해내고, 그 값에 의해서 인덕턴스 변화율, 기준 토오크, 추종 전류값을 계산한다.

전류값을 계산하기 위해서 식 (1)을 전류, i 에 대한 식으로 T_m 면,

$$i = \sqrt{2 \frac{d\theta}{dL} T_{ref}} \quad (2)$$

와 같이 된다.

속도와 부하에 따라 드웰각이 결정되면 기준 발생 토오크 (T_{ref})는 인덕턴스 변화율이 최대인 점에서 구한 값으로 지정하였다. 여기서 구한 토오크값을 일정하게 두면 식 (2)에서 인덕턴스 변화율의 증감에 따라 전류값도 변화하게 되어있다.

인덕턴스 변화율이 감소하게 되면 식 (2)에서 알 수 있듯이 전류는 증가하게 된다. 이 값은 다음 각도에서 T_{ref} 를 유지시켜줄 전류가 되고, 이 값을 따라가기 위해서 인버터에 입력되는 PWM 신호의 온 구간을 증가시키게 된다. 위와 같은 상황에서는 부하변동이 있더라도 리플을 저감하기 위한 제어를 계속 수행할 수 있지만 속도 변화에는 대처할 수 없다. 따라서 속도변동이 생기면 PI제어기에서 발생하는 출력오차를 보정하기 위해서 드웰각도를 조절하게 된다. 속도보상을 위해서는 어드밴스 구간에서 초기화립 전류를 증가할 수 있으며, 증가된 전류값은 인덕턴스 변화율이 최대인 점에서 T_{ref} 값을 변화시켜 부하 가변에 대응할 수 있도록 하였다.

4. System 구성 및 실험

위와 같은 방식의 제어를 수행하기 위한 전류제어기는 그림 5와 같이 구성하였다. 점선 내부에 있는 부분은 소프트웨어적인 부분을 나타내고 있다.

신경회로망함수(ANN)에서는 SRM에 장착된 엔코더에서 받는 회전자 각도와 전류센서에서 받은 전류값으로 입력하여 인덕턴스를 계산하고, 이 값에 의해서 인덕턴스 변화율, T_{ref} 및 이 값을 추종하기 위한 전류를 결정한다. 식 (2)에 의해서 구해진 전류는 평활한 토오크를 만들기 위한 값으로, 스위칭 콘트롤러에서 PWM 신호

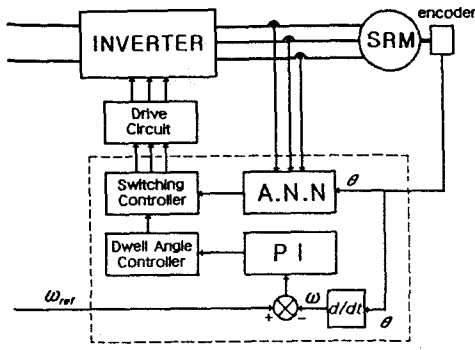


그림 5. System 구성도
Fig 5. Schematic diagram of current controller using ANN

를 결정하기 위한 기준값이 된다.

지령속도와 전류가변폭을 입력하여 전동기를 구동하게 되면, 지령속도를 추종할 수 있도록 드웰각 콘트롤러에서 지령속도에 대한 최소 부하를 동작시키기 위한 드웰각이 정해진다. 전동기는 지령 속도에 이를 때까지 속도 변화율에 비례하도록 드웰각을 조절하게 되고, ANN에서는 인덕턴스 변화율이 최대인 지점 이후 구간에서 전류를 추종하기 위한 PWM 신호를 결정하게 된다. 지령 속도에 도달하게 되면, 드웰각의 변화없이 ANN에서의 전류추종제어를 위한 과정이 계속 반복된다.

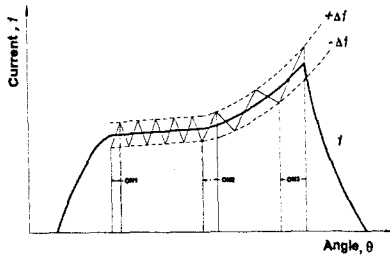


그림 6. 평활한 토크를 발생시키기 위한 전류파형
Fig 6. Current waveform to generate flat-topped torque

그림 6에서 토크 리플을 줄이기 위한 추종 전류 파형을 나타내고 있다. 뒷부분으로 갈수록 인덕턴스 변화율이 감소하기 하는데, 이를 보상하기 위해서 전류가 증

가하는 파형을 나타내고 있다. ON_1 , ON_2 , ON_3 는 인버터에 들어가는 PWM 신호를 나타내고 있으며, 뒷부분으로 갈수록 신호의 폭이 증가함을 알 수 있다. 기준 전류 추종을 위해 전류 히스테리시스폭을 $\pm \Delta i$ 로 설정하여 제어한다. 이와 같이 토크 발생구간 뒷부분에서 전류를 증가시킨 경우에 전체적으로 평탄한 토크를 발생할 수 있다.

5. 결 론

본 논문에서는 인덕턴스 변화율의 감소구간에서 토크가 줄어드는 것을 보상하기 위한 방법으로 그 구간에서 전류를 증가시키는 방법을 사용했다. 비선형적으로 변화하는 인덕턴스를 구하기 위해 비선형계 시뮬레이션에 적합한 신경회로망기법을 도입하여 순시적인 인덕턴스 값을 구했다. 이 값을 적용하여 구한 기준 발생 토크를 유지하기 위해 전류를 매 순간 예측해서 이 값을 추종할 수 있도록 하였다. 일정토크를 발생시키기 위한 상전류는 인덕턴스 변화율의 감소를 보상하기 위해서 후단으로 갈수록 증가하게 된다. 전류의 증가는 인버터에서 PWM 신호를 가변하여 순시적인 전류제어가 가능하도록 하였다. 이와 같은 방법으로 토크는 일정한 상태를 유지하게 되고 리플을 저감할 수 있다.

(참 고 문 헌)

- [1] Charles Pollack and Chi-Yau Wu, "Acoustic Noise Cancellatin Techniques for Switched Reluctance Drive". IEEE.Trans.Appl.vol.33.pp.477-484.March/April.1997
- [2] Derrick E. Cameron, Jeffrey H.Lang and Stephen D. Umans. "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reductance Motors". IEEE.Trans.Inst.Appl.vol.23.pp.10-15. November/December. 1992
- [3] Iqbal Husain and M.Ehsani, "torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motor Drives by PWM Current Control". IEEE Trans. PE. vol.11. pp.91-98. no.1, January 1996.
- [4] Philip C. Kjaer, Jeremy J. Gribble and Timothy J. E.Miller, "High-Grade Control of Switched Reluctance Machines".IEEE. Trans. on IA. vol.33. pp.1585-1593. November/December.1997
- [5] Julio C.Moreira, "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Motors via Bi-Cubic Spline Interpolation".IEEE-PESC.Conf.Rec.'92.pp.851-865
- [6] 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.