

수치해석에 의한 SRM의 적정 오·오프각 설정기법에 관한 연구

추 영배 · 박 성준 · 이 화석 · 김 정택
거 제 대 학

Switching Angle Determination IN SRM Drive by Numerical Analysis

Young Bae Choo · Sung Jun Park · Hwa-Seok Lee · Chung-Tek Kim
Kioe college

Abstract - 신경회로망을 사용하여 몇 가지 경우에 대해 측정된 토크 프로파일로부터 모든 전류값 및 회전자위치각에 대한 토크 및 인덕턴스를 구하였다. 이를 바탕으로 수치해석을 통해 토크중첩을 고려한 총합 발생토크의 맥동성분을 최소화시키는 기준토크 파형을 설정하여 제어하였다. 또한 제안된 방식을 실시간으로 처리하고, 제어기의 신뢰성을 높이기 위해 DSP를 사용하였다.

1. 서 론

본 연구에서는 SRM의 맥동토크를 최소화시키기 위해 토크 프로파일로써 기기를 모델링한다. 이를 위해 몇 가지 경우에 대해 측정된 토크 프로파일로부터 신경회로망을 사용하여 모든 전류값 및 회전자위치각에 대한 토크 및 인덕턴스 데이터를 구하는 방법을 제시한다. 이를 바탕으로 수치해석을 통해 각 상간의 토크중첩을 고려하여 총합 발생토크의 맥동성분을 최소화시키는 기준토크 파형을 설정하고, 이 기준토크와 상전류로부터 구한 토크값으로 직접적인 토크 델타변조기법에 의해 기준 토크를 추종하는 새로운 제어방식을 제안하였다. 또한 제안된 방식을 실시간으로 처리하고, 제어기의 신뢰성을 높이기 위해 DSP를 사용하였다.

2. SRM의 특성

2.1 토크 및 전류특성

SRM의 토크는 상간의 상호인덕턴스가 무시된다면 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

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

단 $L(\theta, i)$: 고정자의 인덕턴스

식(1)에서 알 수 있는 바와 같이 SRM의 발생토크는 여자방법에 따라 결정되는 상전류 파형 및 인덕턴스의 기울기로 표현된다.

SRM에서의 상전류 해를 구하기 위한 전압 방정식은 식(2)와 같다.

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

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

식(2)의 우변 첫째 항은 권선 저항의 전압강하이며 둘째 항은 리액턴스의 전압강하이고 셋째 항은 속도역기전력항이 됨과 동시에 전기적 출력을 나타내는 성분이 된다. 식(2)으로부터 상전류 해를 구하기 위해서는 SRM의 인덕턴스 프로파일에 대한 정확한 정보가 필수적이다. 그러나 인덕턴스의 프로파일은 비선형적이므로 수식적으로 정확한 해를 구하기는 매우 어렵다. 또한 측정할 수 있는 전류의 크기에 대한 인덕턴스의 값은 한계가 있어서 이 측정된 데이터로부터 평활토크를 위한 완전한 전류해를 구하기란 불가능하다. 따라서 한정된 데이터로부터 전류크기의 미소변화에 대한 인덕턴스 값을 얻기 위해서는 특별한 추론기법이 필요하다. 또한 특별한 기법으로 연속적인 인덕턴스 값을 얻을 수 있어도 SRM의 자기적포화로 인하여 선형의 토크 식으로부터 계산된 토크는 약간의 오차가 발생한다. 따라서 정확한 토크 값을 얻기 위해서는 전류와 회전자 위치각에 따른 토크 값을 직접 측정하는 것이 바람직하다.

2.2 토크 및 인덕턴스 프로파일의 추론

토크의 맥동을 분석하기 위해서는 회전자 위치와 전류에 따른 직접적인 토크 정보가 필요하다.

그림 1은 피시험 전동기에서 일정 전류를 흘렸을 때 1° 단위별로 각 위치에서 토크를 측정한 파형이다. 그림 1의 피시험 전동기 토크 파형에서 보는 바와 같이 토크 발생영역은 27도부터 71도 까지로 44도의 범위이다.

그림 1의 한정된 불연속적이고 비선형적인 토크 데이터로부터 연속적인 데이터를 얻기 위해 비선형파라메타 추정에 우수한 성능을 보이고 있는 신경회로망을 이용하여 연속적인 전류에 대한 토크 값을 추론하고 있다.

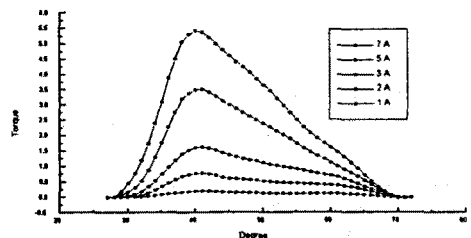


그림 1. 일정전류하의 토크 파형

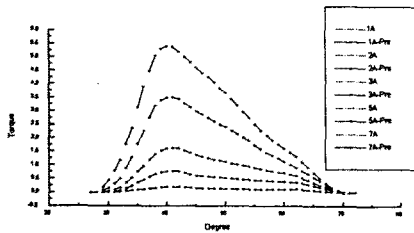
신경망의 학습데이터는 회전자의 위치와 전류에 따른 실측한 토오크 값에서 추출하였다. 이때 은닉층 수는 2개로 하였으며 뉴런수는 각각 7,8로 하였다.

그림 2(a)는 신경망의 토오크 추론 특성을 보기 위해 실제의 토오크 프로파일과 신경망을 사용하여 추론한 토오크 프로파일이다. 그림으로부터 알 수 있듯이 추론결과는 양호함을 알 수 있다.

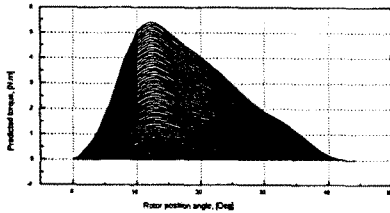
그림 2(b)는 신경망에 의해 0.1A 단위로 토오크 값을 추론한 결과이다.

수치해석을 하기 위해서는 인덕턴스 프로파일에 대한 정보가 필수적이다. 따라서 앞의 토오크 프로파일의 추론기법을 그대로 사용하여 인덕턴스의 프로파일을 추론하였다.

그림 3(a)는 신경망의 인덕턴스 추론을 행하기 위한 실제의 인덕턴스 프로파일이며, 그림 3(b)는 신경망에 의해 0.1A 단위로 토오크 파형을 추론한 결과이다.

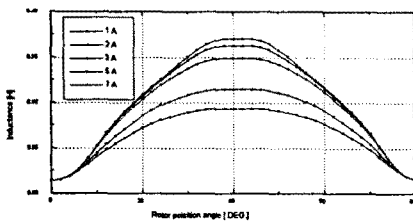


(a) 실측토오크 및 추론토오크파형

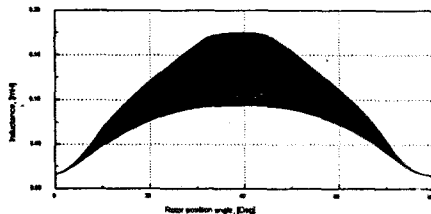


(b) 추론 토오크파형

그림 2. 토오크 추론파형



(a) 인덕턴스 측정파형



(b) 인덕턴스 추론파형

그림 3. 추론 인덕턴스 프로파일

2.3 평활토오크 발생을 위한 지령토오크 선정

그림 4는 최대 평활토오크 발생을 위한 지령토오크의 θ_1 와 θ_2 를 설정하기 위해 도식적으로 해석한 것이다. 그림에서 표시한 T_A , T_B , T_C 는 제한전류인 $7[A]$ 를 각 상에 흘렸을 경우 발생하는 토오크의 크기를 나타내고 있고, T_{sum} 은 인접한 두상의 상중첩을 고려한 발생 토오크의 합을 나타낸 것이다. 평활토오크 발생을 위한 기준 지령토오크 설정시 우선적으로 고려해야 할 조건은 다음과 같다.

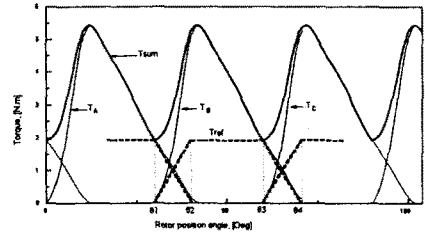


그림 4. 최대 평활토오크 발생을 위한 지령토오크 파형선정

상상의 기준토오크의 시작 각도(θ_1)는 인접한 앞상의 지령토오크의 하강 시작 각도(θ_2)와 일치하여야만 한다. 이 조건으로부터 본 실험에 사용된 피 시험전동기의 기준토오크 시작 각도(θ_1)는 각 상의 토오크 합으로 나타나는 T_{sum} 의 최소점인 0° 에 위치하여야 한다.

기준 토오크의 상승 및 하강구간의 기울기는 각 상 토오크의 상승 및 하강 기울기 중 작은쪽의 기울기보다 크지 않아야 한다. 그렇지 않으면 인접한 두상의 중첩부에서 평활한 토오크영역보다 크기가 작거나 커서 맥동토오크가 발생한다. 기준토오크 지령치에서 중요한 요소는 θ_1 의 결정과 θ_2 영역에서 지령토오크의 형태이다. 그림 4의 점선으로나타난 사다리꼴형태의 지령토오크를 준다면 지령토오크의 감소하는 영역에서 자기포화로 인하여 실제토오크가 추종하기 위해서는 큰 전류의 변화가 요구되나, 이 영역에서의 인덕턴스 값이 매우 크다. 큰 인덕턴스하에서 큰 전류변화를 갖기 위해서는 매우 높은 감자전압이 필요하는 큰 약점을 갖고 있다. 이 영역에서는 전류추종특성이 양호하지 못하게된다. 그러나 지령토오크의 증가하는 영역에서 자기포화가 없어 실제토오크가 추종하기 위해서는 작은 전류의 변화가 요구되고, 이 영역에서의 인덕턴스 값이 매우 작다. 이로 인하여 감자전압과 동일한 여자전압으로도 양호한 전류추종특성을 갖을 수 있다.

본 연구에서는 토오크 추종특성을 개선하기 지령토오크의 감소하는 영역에서 PWM인 아닌 일정 감자전압을 인가하여 전류를 소호시키며, 다음상 지령토오크의 증가하는 영역에서 앞상의 토오크 감소와 다음상의 토오크의 증가가 같도록 지령토오크를 발생하였다.

토오크 증가영역의 각도인 θ_2 의 결정은 일정 감자전압하에서 부토오크가 발생하지 않는 각도로 설정하여야 한다. 이에 대한 해는 인덕턴스의 자기적 포화로 인해 수치적으로 구하기는 매우 어렵다. 따라서 본 연구에서는 수치해석에 의한 컴퓨터 시뮬레이션에 의해 설정한다.

본 연구에서는 먼저 시뮬레이션을 행한 결과 통하여 θ_s 는 8° 가 적절한 것으로 나타났다.

그림 5는 2000[rpm], 1.0[N.m]에서 θ_s 의 설정에 따른 총 토크를 고찰하기 위한 파형이다.

그림 (a)는 θ_s 를 10° 로 설정한 경우로써 전류소호 실패로인하여 부토크의 발생이 상당히 크게 나타나므로 총토크 파형에 매우 큰 맥동을 보이고 있다. 그림 (b)는 θ_s 를 8° 로 설정한 경우로써 전류소호 실패로인하여 부토크는 상당히 줄어들었으며 이는 델타변조의 밴드폭보다 적게 나타나고 있다. 그림 (c)는 θ_s 를 6° 로 설정한 경우로써 부토크는 그림 (b)와 차이가 없으나, 상간 중첩영역에 의한 맥동토크 성분이 증가함을 알 수 있으며, θ_s 를 감소시키면서 시뮬레이션결과 상간 중첩에 의한 맥동토크는 크게 증가하였다. 따라서 본 연구에서는 θ_s 를 8° 로 설정하는 것이 적당한 것으로 판단 된다.

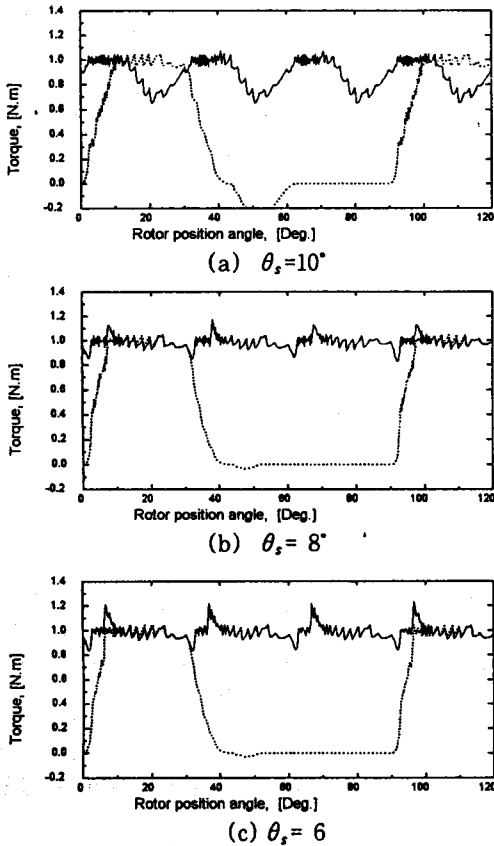


그림 5. 인덕턴스, 상전류, 상토크, 총토크파형

3. DSP를 이용한 제어시스템 구성

상간중첩을 고려하여 SRM의 평활토크 운전을 위한 전체시스템의 구성은 그림 5와 같이 구성하였다. DSP의 속도제어기는 ω_r^* 과 ω_r 의 차에 의해 토크 지령치인 T^* 를 만든다. 토크제어기는 토크 지령치인 T^* 와 전류센서를 통해 얻어진 상전류에 의한 실제 토크를 비교하여 실패토크가 지령토크를 추종하게 한다.

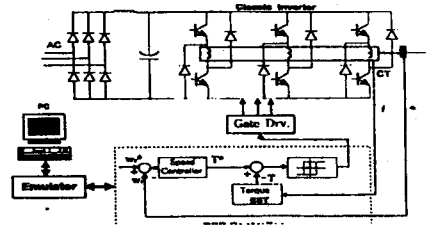


그림 6. 전체시스템의 구성도

4 실험 결과 및 고찰

본 연구에서는 순시적인 전류의 크기를 제어하기 위해 순시 가변전압원을 인가하여 델타변조기법을 통하여 원하는 토크형상을 제어하였다. 이때 델타변조기법에서 토크 밴드폭은 토크지령치의 5[%]로 설정하였다. 인가전압은 300[V]로 하였으며, θ_s 를 8° 로 설정하였다.

그림 7은 1000[rpm], 1.5[N.m]의 부하조건하에서 전류 및 토크파형을 나타내고 있다.

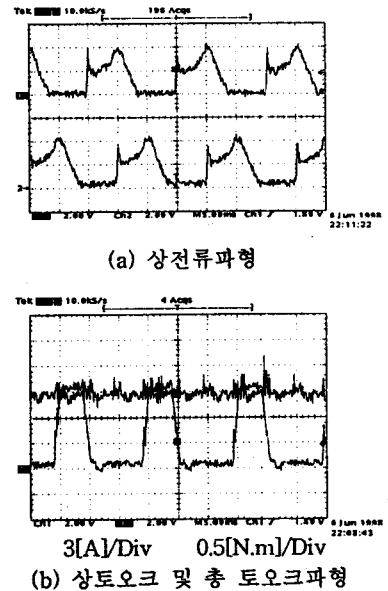


그림 7 전류 및 토크파형

5. 결론

본 연구에서는 신경회로망을 사용하여 토크 및 인덕턴스를 구하였다. 이를 바탕으로 수치해석을 통해 총합 발생토크의 맥동성분을 최소화시키는 기준토크 파형을 설정하였으며, 토크 델타변조기법에 의해 기준 토크를 추종하는 새로운 제어방식을 제안하였다. 또한 시뮬레이션 및 실험을 통하여 그 타당성을 입증하였다.

[참고 문헌]

- [1] I. Husain, M. Ehsani ; "Torque Ripple Minimization in Switched Reluctance Drives by PWM Current Control," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 11, no. 1, pp. 91-98, 1996.