

SRM 최소리플 운전을 위한 1-2상 하이브리드 여자방식의 on/off 여자각 설계

이정중, 이근호, 조재옥, 이재건, 홍정표
 창원대학교 전기공학과

On/off exciting angle design for minimizing torque ripple in SRM with 1/2-phase hybride exciting method.

Jung-Jong Lee, Geun-Ho Lee, Jea-Ok Jo, Jea-Gun Lee, Jung-Pyo Hong
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon Nat'l Univ.

Abstract - This paper presents the switching angle and the 1/2-phase hybrid exciting method to minimize torque ripple in the 6/4 Switched Reluctance Motor (SRM). The inductance in SRM is dependent on rotor position and current. Therefore, the inductance profile is expressed as an approximate function based on FEM data. And then, the dynamic characteristics are simulated by Matlab simulink using the derived inductance function. The torque ripple resulting from single phase exciting and 1/2-phase hybrid exciting is compared.

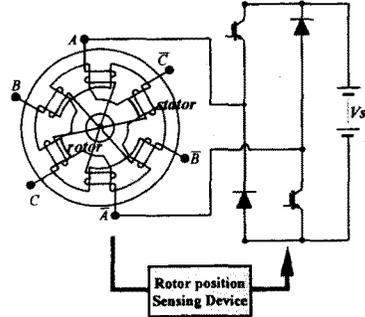


그림 1 SRM의 드라이버 시스템

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched reluctance motor, 이하 SRM)는 회전자의 구조가 단순하여 관성이 작고 순시 토크 특성이 우수하고 제어용 전동기로서 적합하며, 고효율 및 저온상승 특성을 가지고 있다[1]. 또한 전자구조 및 스위칭 드라이브가 단순하여 제작면에서도 유리하다. 그러나 이러한 장점에도 불구하고 기존의 전동기에 비해 SRM 드라이브의 토크 발생 원리상 맥동토크 및 진동 소음은 실용화에 제약을 주고 있어 상품화에 걸림돌이 되고 있다[2]. SRM에서 토크는 전류와 위치에 따른 인덕턴스의 기울기에 일정할 경우 일정한 토크를 발생하게 되지만 인덕턴스의 비선형성과 구형파 전류의 한계로 인해 토크리플이 존재하게 된다. 본 논문에서는 SRM 1상 여자시 나타나는 토크 덩(dip) 현상을 줄이기 위하여 1-2상 하이브리드 여자 방식을 제안하였다. 1-2상 하이브리드 여자방식에 따른 동적 특성은 Matlab simulink를 이용하였다. 전류 및 인덕턴스의 정확하고 빠른 해석을 위하여 2차원 FEM으로부터 산정된 인덕턴스와 3차원 형상에 의한 End effect에 의한 인덕턴스를 고려한 데이터로부터 근사함수를 도출하여 시뮬레이션에 이용하였다.

2. 본 론

2.1 SRM 발생토크

SRM은 이중돌극형 구조로 릴럭턴스 토크의 이용을 극대화하는 전동기로서 토크는 여자되는 권선의 인덕턴스가 최대가 되는 방향으로 발생하게 된다. 따라서 토크를 생성하기 위해서는 고정자 상권선의 인덕턴스가 회전자 위치에 따라서 변화도록 자기적 구조로 설계해야 한다. SRM은 릴럭턴스 토크에 의해서 회전력을 얻는 전동기로서 그림 1은 6/4 SRM과 드라이버 구성도이다. SRM의 발생 토크는 자기수반 에너지 \$W'\$을 이용한 가상변위 원리로부터 산출할 수 있다. 한 상에 대한 순시 토크는 식 (1)과 같이 표현 할 수 있다.

$$T(i, \theta) = \frac{\partial W'(i, \theta)}{\partial \theta} = \int \frac{\partial(L(i, \theta) \cdot i)}{\partial \theta} di \quad (1)$$

여기서 \$i\$는 상권선의 전류, 인덕턴스 \$L\$은 회전자의 위치와 전류의 함수로 주어진다.

2.2 SRM 1-2상 하이브리드 여자방식

SRM은 이상적인 구형파 전류로 동작되는 것이 가장 이상적인 토크를 발생하지만, 실제의 경우에는 인덕턴스에 의해 전류의 확립과 소호 회로의 시정수로 인해 시간적인 지연이 발생하게 된다. 따라서 한 상이 off되고 다음상이 on되는 전류(commutation)구간에서는 그림 2(a)와 같은 토크 덩(dip)이 발생하게 된다[2]. 이상적인 경우에 비해서 실제의 경우 토크리플이 나타나는 경우는 회전자 위치에 따른 on/off 스위칭과 전압방정식과 제어특성에 의해 나타난다. 이러한 덩(dip)을 억제하여 토크리플을 저감하기 위해서는 상간의 적절히 중첩하는 1-2상 하이브리드 여자방식으로 토크 리플을 저감할 수 있다. 그림 2(a)는 1상 여자 방식에 의한 토크리플의 발생을 설명한 것이며, 그림 2(b)는 여자되는 상을 다음상과 중첩시켜 토크리플을 줄이는 그림을 나타낸 것이다. 본 논문에서는 1-2상 하이브리드 여자방식이 토크리플에 미치는 영향을 분석하였다.

2.3 비선형 인덕턴스의 산정

SRM은 자기적 돌극구조와 비선형적 포화특성을 가지므로 인덕턴스의 영향을 선형적으로 가정하여 제어할 경우 정확한 전동기의 구동특성을 만족할 수 없다. 또한, 회전자 위치와 전류에 따른 인덕턴스의 데이터를 이용하여 제어를 할 경우 회전자 위치에서의 정확한 인덕턴스를 예측하기 위하여 많은 연산시간과 제어 로직이 필요하다. 따라서, 본 논문에서는 전류와 위치에 따라 변하는 비선형적 인덕턴스를 고려하기 위하여 2차원 유한요

소법을 이용하여 인덕턴스를 산정하고, 이로부터 근사함수를 도입하여 인덕턴스를 위치와 전류의 함수로 표현하였다.

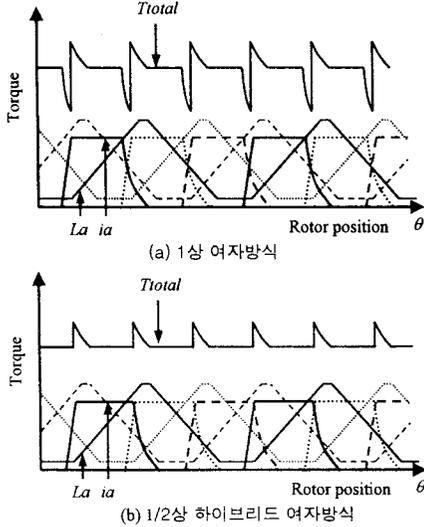


그림 2 여자방식에 따른 토크 리플

2차원 유한요소법을 이용하여 정확한 인덕턴스 산정을 위한 SRM 지배방정식은 식 (2)와 같다.

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) = \vec{j} \quad (2)$$

여기서, \vec{A} 는 자기 벡터 포텐셜, \vec{j} 는 전류밀도이다. 또한 코일에 쇠코어되는 자속에 3차원적 자기회로에 의한 End-effect (End-ring의 self inductance, axial fringing)의 자속을 반영하여 인덕턴스를 계산하였다. [1]. SRM에서 회전자의 위치와 전류에 따른 인덕턴스의 양상을 식 (3)과 같은 근사함수로서 표현하였다[3].

$$\lambda_j = \lambda_s (1 - e^{-i_j / f_{x\theta}}) \quad (3)$$

$$f_j(\theta) = a + b \cos \theta + c \cos 2\theta + d \cos 3\theta$$

여기서, λ_s 는 정렬 위치에서 쇠코어자속, λ_j 는 쇠코어자속 유한요소 해석의 결과로 나온 인덕턴스 데이터를 이용하여 식 (3)의 계수 a, b, c, d 를 구하였다.

3. 해석 결과 및 검토

3.1 해석 모델

그림 3은 해석 모델의 3상 6/4 SRM의 구조와 주요 치수를 나타낸 그림이다. 공극은 0.3[mm]이다.

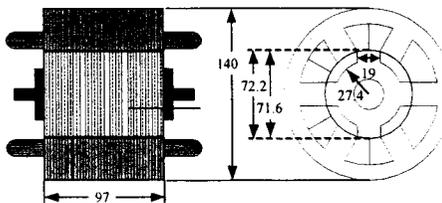


그림 3 시뮬레이션에 사용된 모델

3.2 인덕턴스의 근사 함수 도출

그림 4는 2차원 유한요소법을 이용하여 산정된 인덕턴스와 근사함수로 산정한 인덕턴스를 비교한 것이다. 해석시스템은 근사함수를 이용하여 Matlab simulink를 이용하여 구성하였으며 속도를 일정하게 하여 정상상태 해석을 하였다. 시스템은 크게 모터 부분과 위치에 따른 스위칭 부분, 전원부분으로 크게 3부분으로 구성되었다. 모터 부분은 위치와 전류에 따른 인덕턴스의 근사함수를 포함하여 실제 모터와 근사한 인덕턴스를 산정하게 된다.

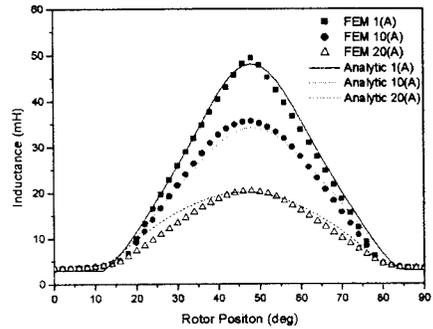


그림 4 인덕턴스 프로파일

3.3 상전류 및 토크 비교

1상 여자방식과 1-2상 하이브리드 여자방식의 동특성 해석을 수행하기 위하여, DC 단자전압은 30[V]이며 회전속도는 1000[rpm]이다. 6/4 SRM에서는 1상 여자 운전시, 스위칭 구간이 기계각으로 30° 간격으로 동작한다. 그림 5는 1상 여자시 인덕턴스와 전류 및 발생 토크를 나타낸 것으로 dwell 각은 30°이다. 전류의 모양이 인덕턴스에 의해 구형파를 이루지 못하므로 토크리플이 크게 나타남을 알 수 있다. 만일 전류가 완전한 구형파가 된다 하더라도 이상적인 인덕턴스의 형상이 되지 않아 토크리플은 발생하게 된다. Advanced 각을 조절하여 스위치 on 구간의 위상을 빠르게 하면 충분한 전류 여자가 이루어져 높은 토크를 얻을 것이다. 그림 6은 1-2상 하이브리드 여자시의 각상 전류 및 A상의 인덕턴스, 토크를 나타내었다. 여기서, dwell 각은 34° advanced 각은 8° 중첩각도는 4°이다. 1상 여자 방식에 비하여 각 상의 전류가 겹치는 구간이 커지게 되고, 토크리플이 감소하였음을 알 수 있다.

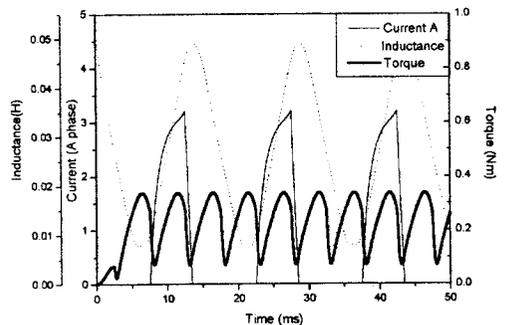


그림 5 1상 여자방식에서 전류, 인덕턴스, 토크 파형 (Advanced angle = 0°, Dwell angle = 30°, 속도 = 1000 [rpm])

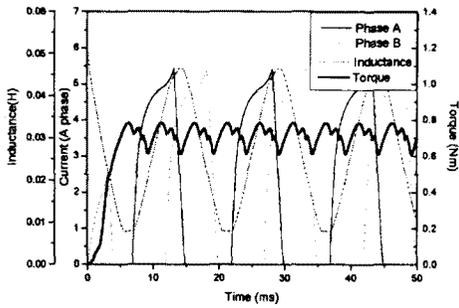


그림 6 1-2상 하이브리드 여자식 전류, 인덕턴스, 토크 파형
(Advanced angle = 8°, Dwell angle = 34°, 속도 = 1000 [rpm])

3.4 속도에 따른 토크리플

SRM에서는 속도와 전압에 의해 전류의 크기가 영향을 받으므로 각각 다른 토크리플을 나타낸다. 그림 7은 1상 여자방식과 1-2상 하이브리드 여자방식의 인가전압 30(V)와 40(V)에서의 토크리플을 비교하였다. 1-2상 여자 방식이 1상 여자방식과 비교하여 전압이 낮을수록 토크리플이 현저히 감소함을 보이며, 고속에서는 전류의 지연에 따라 토크리플이 비슷한 양상을 가진다. 그림 8은 인가전압 30(V)일 때 속도와 중첩각에 따른 토크리플을 나타내었다. 속도에 따라 일정한 중첩각도까지는 감소하지만 특정 중첩각을 지나면 역토크로 인하여 토크리플이 증가한다. 따라서, 특정 속도에서 토크리플을 저감하기 위한 중첩각도를 제시하였다.

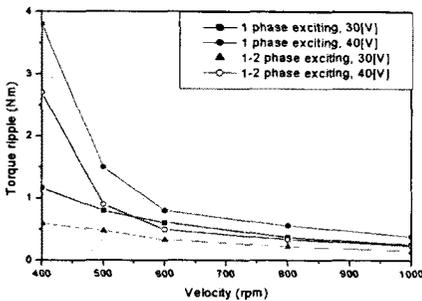


그림 7 속도와 전압에 따른 토크리플
(Advanced angle = 3°, Dwell angle = 35°)

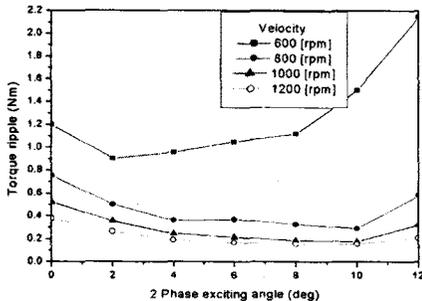


그림 8 속도와 중첩각에 따른 토크리플
(Advanced angle = 5°)

3.5 Advanced 각에 의한 토크리플 비교

그림 9는 2상 중첩각도에 따라 Advanced 각을 변화시킨 토크리플을 나타낸 것이다. 2상을 동시에 여자하는 구간이 0° 보다 증가 할 수록 토크리플이 감소하나 일정한 감소구간을 넘어서면 토크리플은 다시 증가함을 알 수 있다. 이는 1-2상 하이브리드 여자 방식의 경우 2상 여자구간의 스위치 중첩각을 계속 증가시킬 경우 역토크가 발생하게 되므로 토크리플은 커지게 되기 때문이다. 그리고 두 상이 여자 되는 구간이 동일하더라도 Advanced 각에 의해 토크리플이 달라짐을 알 수 있다. 속도 1000(rpm)에서는 Advanced 각이 4°, 중첩각 8° 부근에서 가장 작은 토크리플을 발생하였다. SRM에서 토크리플을 줄이기 위해서는 Advanced 각에 따라 적절한 중첩각의 선택이 중요하다.

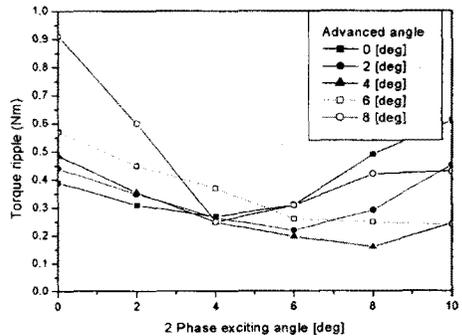


그림 9 Dwell 각과 Advanced 각에 따른 토크리플 (속도 = 1000(rpm))

4. 결 론

본 논문에서는 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)의 토크리플 감소를 위하여 1-2상 하이브리드 여자방식에 따른 토크리플의 감소를 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 정확한 시뮬레이션을 위해서 실제 제어 시스템에서 사용할 수 있는 근사함수를 유한요소 해석으로부터 도출하여 시뮬레이션에 적용하였다. 기존의 인덕턴스 프로파일을 메모리에 기억하여 위치와 전류에 의해 기억된 메모리를 이용하는 방법에 비하여 근사함수를 이용하면 빠른 연산을 수행 할 수 있었다. 시뮬레이션으로 6/4 SRM에서는 1-2상 하이브리드 여자방식일 경우 전압과 속도에 의한 영향, Dwell 각과 Advanced 각에 의한 토크리플 영향이 많은 것을 알 수 있었다. 또한 1상 여자방식에 비하여 1-2상 하이브리드 여자방식의 경우 토크리플이 많이 감소하였다. 토크리플은 전압과 속도, 여자각에 의해 영향을 많이 받으므로 실제 구동시에는 속도에 따른 적절한 Advanced 각과 이에 따른 중첩각의 선택이 중요하다.

(참 고 문 헌)

- [1] TJE Miller, "Switched reluctance motor and their control" Magna physics publishing, 1993.
- [2] 황영문, 정태욱, 오석규, 추영배, "SRM 여자방식에 따른 소음 특성 해석", 전기학회논문지, Vol.49B, No.9, pp.565-571, 1998
- [3] Iqbal Husain, "Torque ripple Minimization with P position and Speed Sensing for Switched Reluctance Motors", IEEE Transactions on Industrial Electronics, Vol.47, No.5 pp.1127-1132, 2000.