

스위치드 릴럭턴스 전동기의 스테이터 형상에 따른 토크량 계산에 관한 연구

A Study on the SRM Torque Computation According to Different Stator Pole Shapes

조희*
Hee Jo

이종우**
Jong-Woo Lee

김경화†
Kyeong-Hwa Kim

ABSTRACT

The SRM (Switched Reluctance Motor) is composed of silicon steel plates where the rotor structure is simple and laminated without coil winding or permanent magnet, making it mechanically robust and its maintenance and repair excellent. Applying SRM as traction motor for railway vehicle is given consideration because of its ruggedness capability in severe loading condition and its compact structure. Optimal design of SRM is needed to reduce torque ripple to apply SRM for railway traction drive because SRM has high torque ripple. In this paper, switched reluctance motor with three different stator pole shapes is taken for magnetic analysis using 3d finite element method to apply SRM as traction drive for railway vehicle. It is observed that the model 3 added Tooth Tang Depth and Slot Round to stator shape gives the improved inductance and torque characteristic.

Key words : SRM, torque, inductance, stator shape, finite element method

1. 서론

철도 견인 전동기는 철도차량에 설치되어 운용되기 때문에 중량과 부피가 작아야 하며 부하조건이 가혹하다. 초기의 철도 견인 전동기는 직류 전동기를 사용하였으나, 현재는 전력전자의 발달로 교류 전동기를 사용하고 있다. 교류의 제어는 인버터를 이용한 VVVF 제어를 통해 토크와 속도를 제어하고 있다. 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)는 회전자의 구조가 권선이나 영구자석이 없는 간단한 성층구조의 규소강판으로 되어 있어 기계적으로 견고하고 다른 전동기에 비해 유지보수가 덜 요구되며, 중량대비 높은 토크비를 가지고 있다. 또한 고정자 권선이 간단하고 고정자의 상전류 극성을 바꿀 필요가 없기 때문에 스위칭 소자의 개수를 줄일 수 있어 구동회로를 경제적으로 구현할 수가 있다.

SRM의 최적화 설계를 위해서는 인덕턴스, 토크, 자속과 같은 파라미터들을 규명해야 한다. 본 논문에서는 3차원 유한요소법 및 virtual work method를 이용하여 SRM 모델의 3가지 스테이터 폴 형상에 따른 차계해석을 하였다. 로터 각도에 따른 인덕턴스, 토크, 자속을 계산하였으며 Tooth tang depth와 Slot round를 추가한 모델3의 토크와 인덕턴스 특성이 향상되었음을 확인하였다.

2. 토크 계산

2.1 유한요소법

SRM의 자속, 인덕턴스, 토크를 구하기 위해 먼저 맥스웰 방정식과 Magnetic Vector Potential을 이용

* 책임저자, 서울메트로, 선임, 비회원
E-mail : ossam@seoulmetro.co.kr

** 서울과학기술대학교, 철도전문대학원, 철도전기신호공학과, 교수

† 교신저자, 서울과학기술대학교, 전기공학과, 교수

하여 자계분포를 구한다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (1)$$

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J} \quad (2)$$

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{J} \quad (3)$$

쿨롱 게이지를 이용하면,

$$-\nabla^2 \vec{A} = \mu \vec{J} \quad (4)$$

를 얻으며 유한요소법을 이용하여 방정식을 푼다. 여기에서 \vec{A} 는 Magnetic Vector Potential, \vec{J} 는 전류 밀도 이다.

2.2 Virtual Work Method

SRM의 토크는 Lotentz method, Maxwell stress tensor method, classical virtual work method, Virtual work method를 이용하여 구할 수 있으며, 본 논문에서는 Virtual work method를 이용하여 토크를 계산했다.

자계 안에서 dx거리만큼 이동한 자성체에 작용하는 힘은

$$F_x = \left. \frac{dW_m(i, x)}{dx} \right|_{i = constant} \quad (5)$$

이며, 토크는

$$T = r \cdot F_x = \left. \frac{dW_m(\theta, i)}{d\theta} \right|_{i = constant} \quad (6)$$

와 같이 계산할 수 있다. Co-energy W_m 은 식(1), (4)로부터 얻어진 자속밀도를 이용하여 구하며 자계 내에 저장된 에너지와 코일에서 공급한 에너지의 차인 에너지함수로 표현된다.

$$F(\vec{A}) = \int_{vol} \int_0^B \vec{H} \cdot d\vec{B} dv - \int_{vol} \int_0^A \vec{J} \cdot d\vec{A} dv \quad (7)$$

여기서 i 는 코일에 흐르는 전류, W_m 은 시스템의 magnetic co-energy, r 은 로터의 반지름, \vec{B} 는 자속밀도이다.

3. SRM 설계

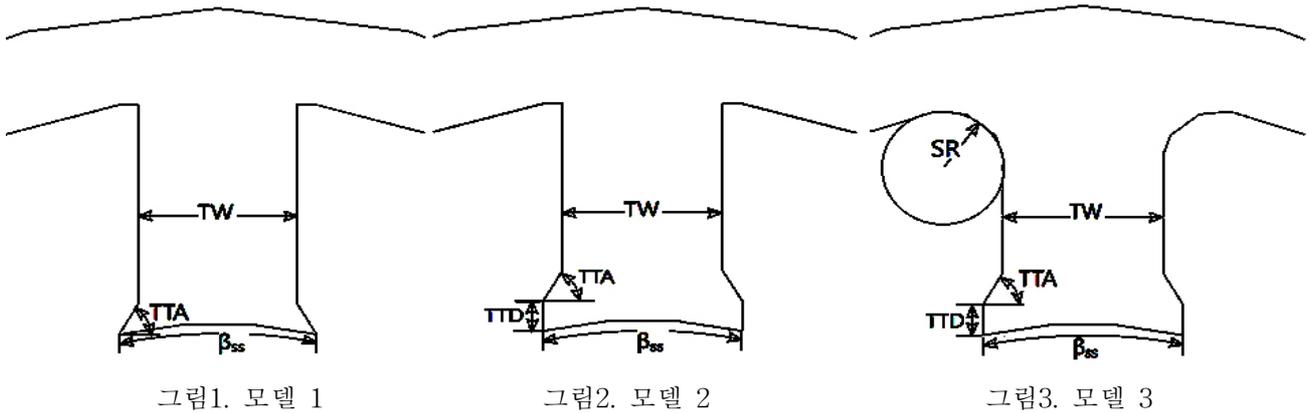
3상 6/4 SRM을 설계하였으며 기본 설계사양 및 세부사항을 도표 1, 도표 2에 나타내었으며 각 모델을 그림1, 그림2, 그림3에 나타내었다. 모델 2는 모델 1에 Tooth tang angle을 추가한 형상이며 모델 3은 모델 2에 Slot round를 추가한 형상이다.

도표1. 기본 설계사양

항목	값
Rated output power[W]	90
Pated speed[rpm]	3000
Outer diameter of stator[mm]	109.8
Inner diameter of stator[mm]	95.4
Outer diameter of rotor[mm]	58.86
Inner diameter of rotor[mm]	41.1
Air-gap length[mm]	0.3
Rotor pole arc[rad]	0.4803
Stack length[mm]	13.5
Stator winding turns/pole	372
Type of steel	S18

도표2. 설계 세부사항

기호	항목	값
TW	Tooth width[mm]	11.7
TTA	Tooth tang angle[rad]	$\pi/3$
SR	Slot round[mm]	4.25
TTD	Tooth tang depth[mm]	2.47
β_s	Stator pole shoe arc[rad]	0.3612



4. Simulation / Result

SRM 해석에서 토크특성은 평균토크나 토크리플을 계산하는데 사용될 수 있다. 시뮬레이션은 코일에 일정한 전류에 대한 각각의 로터위치의 토크를 측정하였다. SRM은 성층구조로 되어 있어 와류(eddy current)가 발생하지 않으며, 코일의 전류 밀도는 일정하다고 가정하였다.

로터가 1회전하는 동안 스위칭 횟수는

$$S = mN_r \quad (8)$$

로 나타내며[4], 여기에서 S: the number of strokes per revolution, m: phase number, N_r : 로터의 극수이다. 6/4 SRM의 경우 $S=12$, 1주기는 30° 이다. 시뮬레이션은 unaligned 위치인 0° 부터 aligned 위치인 45° 까지 수행하였다.

그림4는 전류 430A에서 각 모델의 로터각도에 따른 토크곡선이다. 모델 1에 비해 모델 2와 모델 3의 토크량이 높음을 확인할 수 있으며 약 19° 근처에서의 토크량이 크게 증가한 것을 볼 수 있다.

그림5는 전류 430A에서의 로터각도에 따른 인덕턴스를 비교한 그래프이다. 모델 1의 경우와 비교 했을 때 모델 2, 모델 3의 경우가 인덕턴스가 높아졌음을 확인했다.

그림6은 전류 430A에서의 로터각도에 따른 Flux 양을 비교한 그래프이다. 모델 3, 모델 2, 모델 1의 순서대로 높은 flux를 나타내며 특히 로터와 스테이터가 만나기 시작하는 약 19° 근처에서 모델 2, 모델 3의 flux가 크게 증가함을 볼 수 있다.

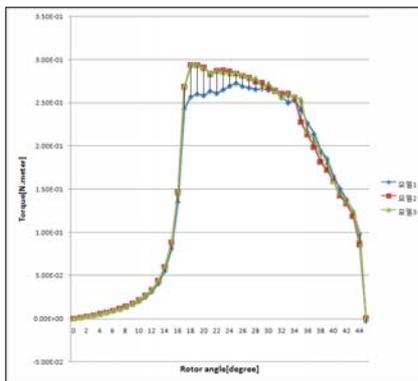


그림4. 토크 곡선

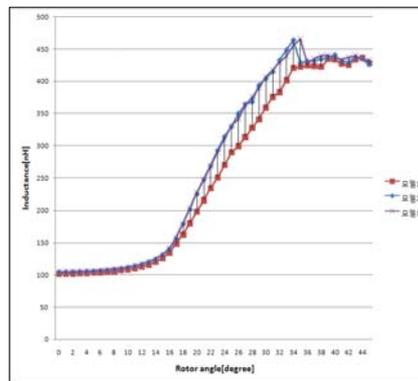


그림5. 인덕턴스 곡선

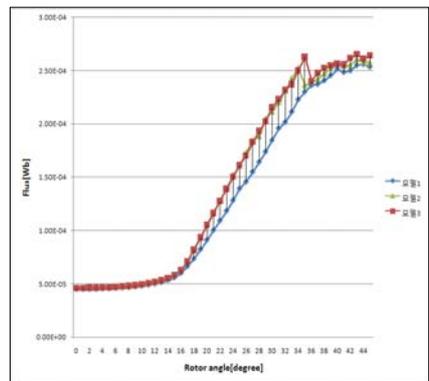


그림6. Flux 곡선

그림7, 그림8은 모델 1과 Tooth tang depth를 가진 모델 2의 로터각도 19° 에서 스테이터 끝단의 자속 밀도를 비교한 그림이다. 모델 2에서의 스테이터 끝단의 자속밀도가 높아졌음을 확인할 수 있다. 모델 2와 모델 3의 자속밀도 분포를 그림9와 그림10에 나타내었다. 스테이터 극의 자속밀도 가장 높은 것을 볼 수 있으며 모델 3의 경우 모델 2에 비해서 스테이터 극의 자속밀도가 줄어든 것을 확인할 수 있다.

본 논문의 모델은, 모델 1의 경우, 스테이터 극의 자속밀도와 스테이터 요크의 자속밀도를 각각 0.758698T, 0.613332T로 설계하였으나, 전류를 높여 좀 더 높은 자속밀도로 동작점을 설정할 경우 스테이터 극의 자속밀도는 더욱 높아지게 되며 이는 본 논문에서 제안한 Slot round를 늘려 스테이터 극의 자속밀도를 낮출 수 있을 것으로 생각된다.

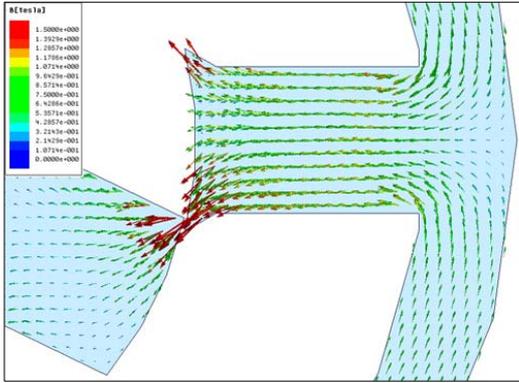


그림7. 모델 1의 자속밀도

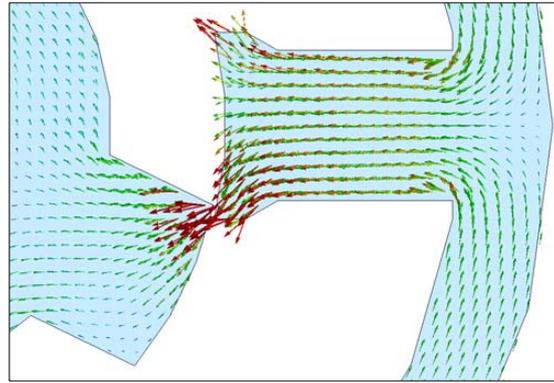


그림8. 모델 2의 자속밀도

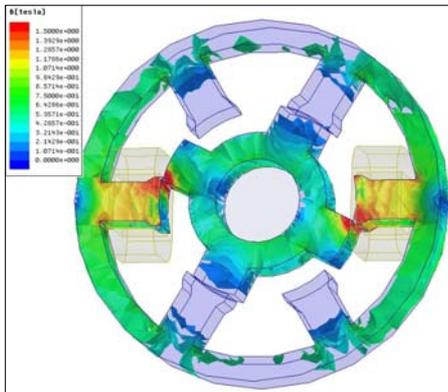


그림9. 모델 2의 자속밀도 분포

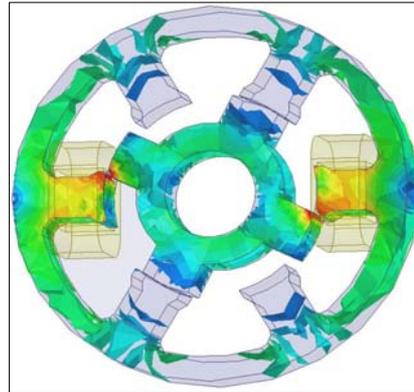


그림10. 모델 3의 자속밀도 분포

5. 결론

본 논문에서는 스테이터 극의 형상에 따른 스위치드 릴럭턴스 전동기의 자계특성을 시뮬레이션을 통해 확인하였다. 그 결과로 모델 1, 2, 3에 대한 인덕턴스 자속, 토크값을 얻었으며, 모델 3의 특성이 모델 1, 모델 2에 비해 더 높은 토크, 인덕턴스, 자속특성을 나타냄을 확인하였다. 본 연구를 통해 앞으로 스테이터 극과 로터 극의 모양과 치수의 최적화 설계를 수행할 수 있을 것으로 사료된다.

참고문헌

1. R. Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Applications," CRC Press, 2001.
2. Yong Kwon Choi, Hee Sung Yoon, and Chang Seop Koh, "Pole-Shape Optimization of a Switched-Reluctance Motor for Torque Ripple Reduction," IEEE TRANSACTIONS ON MAGNETICS, VOL. 43, NO. 4, APRIL 2007.
3. A. Benhama, A. C. Williamson, and A.B.J. Reece, "SRM TORQUE COMPUTATION FROM 3D FINITE ELEMENT FIELD SOLUTIONS," EMD97 Conference Publication No. 444, IEE 1997.
4. T. J. E Miller, "Optimal Design of switched reluctance motors," IEEE transactions on industrial electronics, Vol 49, NO.1, 2002.