

Switched Reluctance Motor의 구동전압을 고려한 유한요소 해석

임달호, 윤시영*, 박승찬
한양대학교 전기공학과

Finite Element Analysis of SRM Considering Exciting Voltage

D.H.Im, S.Y.Yun*, S.C.Park
Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - This paper describes a method of predicting current, magnetic flux, inductance and torque of switched reluctance motor(SRM) using finite element method with time step considering exciting voltage.

회특성에 의한 변화가 심하기 때문에 유한요소법에 의한 해석이 적절하다고 할수있다.

그림 1.은 본 논문에 사용된 유한요소 해석모델이고 반주기경계조건을 적용하여 대상의 1/2만 해석하였다.

1. 서론

2중 돌극형 구조를 가지고 있는 SRM(Switched Reluctance Motor)은 견고하고 고속운전이 가능하나 고정자의 여자권선에 구형과 형태의 전압이 인가되어 발생 토크가 리플을 갖게되고 소음과 진동이 발생하는 단점을 가지고 있다. 이러한 SRM의 토크 리플을 저감시키기 위한 방법으로는 구동전압 파형과 회전자 및 고정자의 형상을 변형시키는 것을 들 수 있다. 그러나 구동전압을 고려하지 않았던 현재까지의 유한요소 해석방법으로는 구동전압의 파형과 회전자의 형상 설계에 따른 SRM의 토크 리플을 정확하게 계산할 수 없었다.

따라서 본 논문에서는 철심의 자기포화현상과 구동전압의 파형을 고려한 유한요소해석을 통하여 전류, 인덕턴스 및 토크를 계산하는 방법을 제시한다.

2. 구동전압을 고려한 유한요소 해석

최로 정수를 산정하기 위한 방법으로는 퍼미언스법, 자기등가회로법, 유한요소법 등이 있다. SRM과 같이 돌극형 구조를 가지고 있는 전동기의 경우에 있어서 퍼미언스법과 자기등가회로법은 회전자와 고정자가 일치하는 경우를 제외하고는 해석상 오차가 크다.

이에 반해 유한요소법은 계산시간이 길다는 단점은 있지만 회전중 임의의 순간만을 계산하는 것이기 때문에 이러한 오차를 최소화 시킬 수 있다. 또한 SRM이 자기포화 영역에서 동작하고, 자성 재료의 포

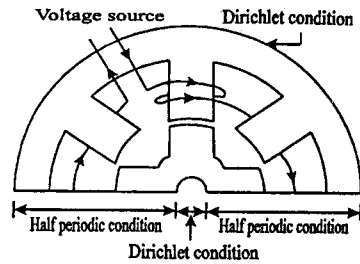


그림 1. 유한요소 해석모델

2차원 유한요소 해석을 하기위해 다음과 같은 가정을 둔다.

1. 벡터포텐셜은 축방향 성분인 A_z 만 존재하며 전류성분도 Z 성분만 존재한다.
2. 전류밀도는 도체내에서 일정하다.
3. 철심은 등방성이다.
4. 히스테리시스 손실과 와전류 손실은 무시한다.

따라서 지배 방정식은 식 (1)과 같이 표현되며 유한요소 해석시 직접수렴법을 이용하여 철심의 자기적 비선형성을 고려하였다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(\frac{1}{\mu} \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z \quad (1)$$

SRM과 같은 전동기에서는 고정자와 회전자의 상대위치에 상응하는 전류값을 정확히 추정하는 것이 어려운 문제가 되기 때문에 본 논문에서는 차분근사

법을 이용하여 전류값을 계산하였다. 즉 시간 t 에서의 벡터포텐셜 A' 를 알고 있다고 한다면, Δt 시간 후의 근사치 $A^{t+\Delta t}$ 는 임의의 전류값을 사용하여 계산하는데, 여기서는 수렴속도를 빨리하기 위해 임의의 전류값 대신 전 단계의 전류값을 사용하였다. 전류는 식(2)로 계산하여 전류의 허용오차 5%를 만족할 때까지 수렴시켰다.

$$i_{t+\Delta t} = \frac{1}{R} \left(V - \frac{d}{dt} (\Psi_{t+\Delta t} - \Psi) \right) \quad (2)$$

여기서, R 은 권선의 저항, V 는 인가된 전압을 나타낸다.

또한, 직교좌표계에서 1회 감긴 권선에 쇄교하는 자속은 자기벡터포텐셜로부터 구해진다[1].

$$\begin{aligned} \Phi(\theta, i) &= D \int_{x_1}^{x_2} B_y dx = D \int_{x_1}^{x_2} \frac{\partial A_z}{\partial x} dx \\ &= D [A_2(x_2, y) - A_1(x_1, y)] \end{aligned} \quad (3)$$

한 상에 쇄교하는 총 자속량은

$$\Psi(\theta, i) = D \frac{N}{S} (a_1 - a_2) \quad (4)$$

$$a_{1,2} = \int_s A(x, y) ds_{1,2} \quad \text{이 된다.}$$

Ψ : 한 상당 쇄교하는 총 자속량
 D : 적층 폭 x_1, x_2 : 권선의 위치
 N : 한 상당 turn수 S : 전체 권선 면적
 $s_{1,2}$: 권선의 요소 면적

각 상의 인덕턴스는 식(5)에서 권선과 쇄교하는 총 자속량과 전류의 비로 구하였다.

$$L = \frac{\Psi(\theta, i)}{i} \quad (5)$$

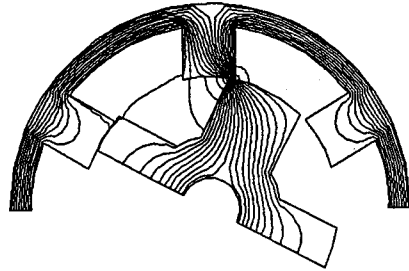
본 논문에서 사용한 회전속도는 1800(RPM), 한 상당 turn수는 536회 이다.

그림 2는 회전자가 15°와 41° 회전하였을 때의 자속분포를 나타낸 것이다. 그림 2(a)에서는 극부포화현상이 발생함을 볼수있다.

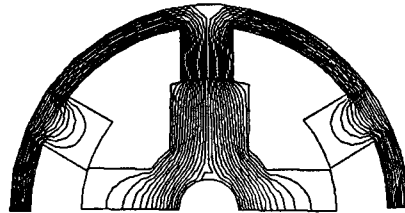
그림 3은 회전자의 위치에 따른 전류 파형이며 그림 4는 한 상당 쇄교자속과 인덕턴스의 파형을 나타내는 그림이다.

그림 5는 회전자 위치에 따라 반시계 방향으로 0°부터 180°까지의 자속밀도 분포를 나타낸 것이다. 회전자가 12° 회전하였을때 자속밀도가 침예한 것은 고정자와 회전자가 겹쳐지기 시작하면서서 극부포화 현상이 일어난 것이고 align될수록 자속 밀도가 넓은 분포

를 가진다. 또한 모든 위치의 110° 부근에서 누설 자속으로 인한 현상이 나타난다.



(a) 15° 회전



(b) 41° 회전

그림 2. 자속 분포도

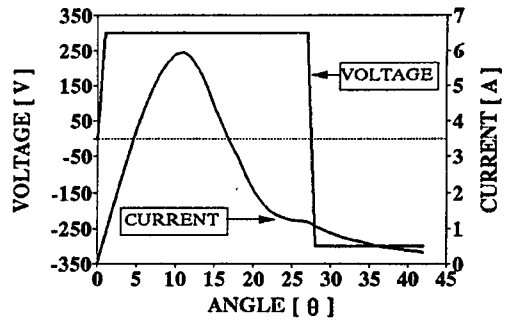


그림 3. 회전 각도에 따른 전류 파형

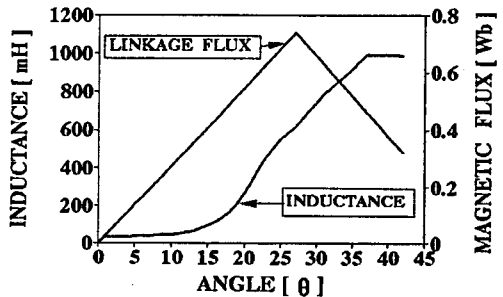


그림 4. 회전 각도에 따른 자속과 인덕턴스 곡선

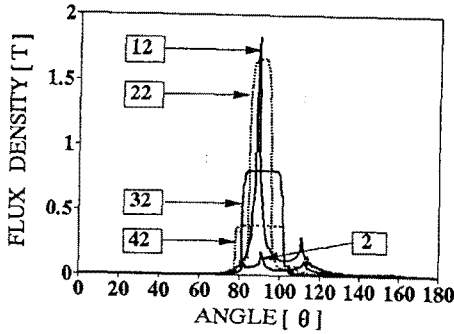


그림 5. 회전 각도에 따른 자속밀도 분포

3. 토오르크 계산

토오르크 계산은 맥스웰 응력법과 에너지법을 이용하였다.

직교 좌표계로부터 B_r, B_θ 를 구하는 식은

$$|B| = \sqrt{B_x^2 + B_y^2}$$

$$B_r = |B| \cdot \cos(\theta_B - \theta_e)$$

$$B_\theta = |B| \cdot \sin(\theta_B - \theta_e) \quad \text{이다.}$$

θ_B : $|B|$ 의 x 축과의 각도

θ_e : 각 요소의 x 축과의 각도

맥스웰 응력법의 토오르크 식은 다음과 같다[3].

$$F = \nu_0 \int_Q ((B \cdot n)B - \frac{1}{2} B^2 n) ds \quad (6)$$

$$= \nu_0 D \int_r B_r B_\theta d\Gamma$$

$$T = R \times F = \nu_0 D \int_r r B_r B_\theta d\Gamma \quad (7)$$

여기서 r 은 적분경로의 반경, ν_0 는 공기중의 자기 저항률이다.

자기수반에너지의 차이로부터 토오르크를 구하는 식은

$$T = \left. \frac{\partial W'}{\partial \theta} \right|_{i=const} \quad (8)$$

이다. 만일 자기회로가 선형이라고 가정하면 에너지는 다음과 같이 계산된다.

$$\begin{aligned} W'(\theta, i) &= \int_0^i \psi(\theta, i) di \Big|_{\theta=const} \\ &= L \int_0^i i di \Big|_{\theta=const} = \frac{1}{2} Li^2 \quad (9) \end{aligned}$$

위의 가정을 사용하여 에너지법으로 구한 토오르크 식은 아래와 같이 된다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \quad (10)$$

그러나 회전자 위치마다의 인덕턴스는 철심의 자기적 포화특성을 고려하여 구하였지만, 자기 수반에너지를 구할 때에는 자기회로가 선형이라고 가정하여 식을 전개하였으므로 에너지법에 의한 토오르크 계산은 포화영역에서 오차가 클 것으로 생각된다. 그림 6에 맥스웰 응력법으로 구한 토오르크 곡선을 나타내었다. 맥스웰 응력법으로 토오르크를 계산한 결과는 맥동이 심한 것으로 나타났으며, 여기에는 요소분할에 기인하는 오차가 다소 수반된 것으로 보이므로 공극부분의 요소를 보다 조밀하게 분할 시킬 필요가 있다.

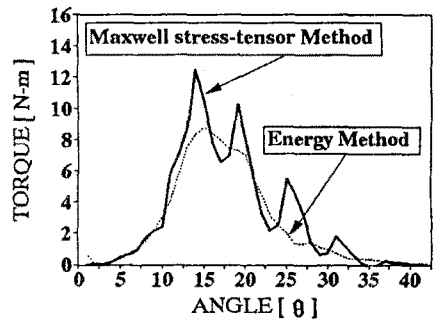


그림 6. 회전자 위치별 토오르크 특성

4. 결론

지금까지는 선형화시킨 인덕턴스의 곡선으로부터 자기포화 현상을 무시한 토오르크 곡선을 구해왔으나, 본 논문에서는 구동전압을 고려한 유한요소 해석으로 보다 정확한 전류, 인덕턴스 및 토오르크 곡선을 얻을 수 있는 방법을 제시하였다.

본 연구에서 행한 해석방법은 앞으로 토오르크 리플 저감을 위한 최적 구동전압 파형을 결정하는데 이용할 수 있으리라 본다.

참고문헌

- [1] Graham E. Dawson, Anthony R. Eastam and Jerzy Mizia, "Switched-Reluctance Motor Torque Characteristics : Finite-Element Analysis and Test Result", *IEEE Trans. IA*, vol.13, no.3, pp.532-537, May/June, 1987.
- [2] Peter N. Materu and Ramu Krishan, "Estimation of Switched Reluctance Motor Losses", *IEEE Trans. IA*, vol.28, no.3, pp.668-678, MAY/JUNE, 1992.
- [3] M. Moallem and C. M. Ong "Predicting The Torque of A switched Reluctance Machine From Finite Element Field Solution", *IEEE Trans. Energy Conversion*, vol5, no4, pp.733-739, December, 1990.