

유한요소법을 이용한 스위치드 릴럭턴스 모터의 과도특성 해석

이준호, 이기식
 단국대학교 전기공학과

Dynamic Performance Analysis of Switched Reluctance Motors using Finite Element Method

Joon-Ho Lee and Ki-Sik Lee
 Department of Electrical Engineering, Dankook University

Abstract - In this paper, a transient analysis method of Switched Reluctance Motors(SRM) is presented. The Finite Element Method(FEM) is used to model the nonlinear magnetic field and is coupled to the power circuits and mechanical system. The time derivative term in the differential equation is formulated by the time difference method. The proposed method is applied to a 4 phase 16/12 SRM to study starting characteristics and an fault due to the failure of a transistor in the converter.

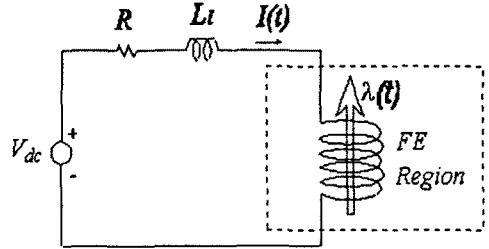


그림 1 한 상에 대한 SRM의 등가회로

1. 서론

스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)는 토크대 중량의 비가 높고 넓은 범위의 속도-토크 특성을 가지며 또한 구조가 단순하고 견고하여 점차 그 응용범위가 넓어지고 있다. 이러한 모터는 회전자에 여자장치가 없으므로 브러시나 슬립링이 필요 없게 되어 보수 또는 유지가 거의 필요 없다. 이러한 장점을 가지는 전력전자 소자의 발전에 힘입어 높은 신뢰도를 요구하는 분야에 널리 그 적용이 증가하고 있다. 그러나 SRM은 토크의 리플이 크고 소음이 크다는 단점이 있으므로 이것을 해결하고 또한 모터의 효율 및 제어의 정밀성을 높이기 위해서는 보다 정확한 해석기법이 요구된다[1-3].

SRM은 자속밀도가 포화되는 영역에서 운전되고 구동 장치에 의해 전압원으로 구동되므로 본 연구에서는 전자기 특성방정식과 고정자 회로방정식 그리고 회전속도의 변동을 반영하기 위한 모터의 운동방정식을 결합하여 해석하는 기법을 제시하였다. 고정자 회로방정식 내에 있는 시간 미분항을 처리하기 위하여 후퇴차분법을 이용하였으며 차분된 매 시간에서 고정자 각 상의 전류와 모터에서 발생하는 토크 그리고 모터의 회전속도를 계산하였다. 본 연구에서 제시한 방법으로 SRM에 전원을 인가한 시점부터 정상상태에 도달하기까지의 기동 특성과 운전 중에 한 상이 단락 되었을 때를 해석하였다.

2. 해석 이론

2.1 전자장과 구동회로의 결합

스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)는 고정자와 회전자와 모두 돌극을 갖는 구조이며 구동회로의 스위칭 알고리즘에 따라 그 특성이 현저히 다르게 나타나므로 정밀한 해석을 하기 위해서는 전자장과 구동회로를 동시에 고려하여 해석을 해야 한다[4]. 그림 1은 한 상에 대한 SRM의 등가회로를 나타내고 있는데 다른 상도 같은 구조이다.

SRM을 2차원 모델로 보아 해석영역을 유한개의 삼각형 요소로 분할하고 요소 내에서 미지의 포텐셜이 선형적으로 변화한다고 가정하면 맥스웰 방정식으로부터 식 (1)과 같은 이산화된 계 방정식을 얻을 수 있다.

$$\sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 \sum_{j=1}^3 \int_{\Omega_n} \nu \left[\frac{\partial N_i}{\partial x} \frac{\partial N_j}{\partial x} + \frac{\partial N_i}{\partial y} \frac{\partial N_j}{\partial y} \right] dx dy A_j - \sum_{m=1}^m \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 \int_{\Omega_n} \pm \frac{N}{S_m} N_i dx dy I_m = 0 \quad (1)$$

여기서, ne, nv, nve 는 해석 영역에 존재하는 총 요소 수, 고정자 슬롯수, 고정자슬롯 하나를 이루는 요소수를 의미한다. 그리고 ν 는 자기저항률, N_i 는 i 번째 절점의 형상함수, A_j 는 j 번째 절점의 자기벡터포텐셜, N 은 권수, S_m 은 m 번째 상의 코일의 면적, 그리고 I_m 은 m 번째 상에 흐르는 전류이다. 위 식을 계산하면 SRM 내부의 자장을 알 수 있다. 하지만 식 (1)을 풀기 위해서는 각 상의 전류를 주어야 한다. 각 상의 전류는 구동회로 방정식으로부터 구할 수 있으며 식 (2)와 같이 표현된다.

$$V(t) = RI(t) + L_l \frac{dI(t)}{dt} + \frac{d\lambda(t)}{dt} \quad (2)$$

여기서, R 은 권선의 저항이고, L_l 은 권선의 누설 인덕턴스이다. 식 (2)에서 우변의 세 번째 항은 유한요소 영역내의 역기전력 항이다. 이것은 전자장 방정식과 회로 방정식을 연결하는 양으로써 자기벡터포텐셜을 이용하여 표현하면 다음과 같다.

$$\frac{d\lambda(t)}{dt} = \sum_{m=1}^m \pm N \frac{l}{S_m} \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 \int_{\Omega_n} N_i dx dy \frac{dA_i}{dt} \quad (3)$$

여기서, l 은 모터의 축방향 길이이다. 식 (3)에 있는 시간을 처리하기 위해 후퇴차분법을 사용하고 이를 식 (2)에 대입하면 다음과 같이 이산화된 회로방정식을 얻을 수 있다.

$$\begin{aligned}
 & - (R\Delta t + L_l) \frac{1}{l} I^{t+\Delta t} \\
 & - \sum_{m=1}^m \pm \frac{N}{S_m} \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 \int_{\Omega_n} N_i dx dy A_i^{t+\Delta t} \quad (4) \\
 & = -\Delta t \frac{1}{l} V^{t+\Delta t} - \frac{L_l}{l} I^t \\
 & - \sum_{m=1}^m \pm \frac{N}{S_m} \sum_{n=1}^m \sum_{i=1}^3 \int_{\Omega_n} N_i dx dy A_i^t
 \end{aligned}$$

여기서, Δt 는 차분된 시간이다. 식 (1)과 식 (4)를 결합하면 식 (5)와 같은 전자장과 구동회로가 동시에 고려된 행렬식을 얻을 수 있다.

$$\begin{bmatrix} K & S \\ S^T & Z_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ I \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} = \begin{Bmatrix} 0 \\ V \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ S^T & Z_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ I \end{Bmatrix}^t \quad (5)$$

SRM은 자속밀도가 포화되는 영역에서 운전되므로 정밀한 해석을 하기 위해서는 자기 코아의 비선형성을 반드시 고려해야한다. 본 연구에서는 자기 코아의 비선형성을 고려하기 위하여 뉴턴랩슨법을 이용하였으며 식 (5)에 적용하면 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} K+R & S \\ S^T & Z_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \Delta A \\ \Delta I \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} = \begin{Bmatrix} 0 \\ V \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} + \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ S^T & Z_r \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ I \end{Bmatrix}^t - \begin{bmatrix} K & S \\ S^T & Z_l \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} A \\ I \end{Bmatrix}^{t+\Delta t} \quad (6)$$

식 (6)을 계산하면 차분된 시간마다 각 미지의 절점에서 자기벡터포텐셜과 전류를 얻을 수 있다.

2.2 발생 토크 및 운동방정식

식 (6)에서 얻은 자기벡터포텐셜을 이용하여 해당 시간에서 발생 토크를 계산 할 수 있다. 발생되는 토크는 맥스웰 스트레스 텐서를 이용하면 식 (7)과 같다.

$$T_e = \nu_0 l \oint_r r B_n B_t d\Gamma \quad (7)$$

여기서, r 은 축으로부터 회전자 반경까지의 거리이다. 모터의 과도 특성을 고려하기 위하여 식 (7)과 같은 운동 방정식을 이용하여 다음 상태의 모터 속도와 회전자의 위치를 계산하였다

$$J \frac{d\omega_m}{dt} + D\omega_m = T_e - T_l \quad (8)$$

여기서, ω_m 은 모터의 기계적인 속도이며, J 는 관성 모멘트, D 는 댐핑계수, 그리고 T_l 은 발생 토크이다.

위에서 언급한 SRM의 과도특성 해석 과정을 살펴보면 다음과 같다. 식 (6)으로부터 자장의 분포와 각 상의 전류가 구해지고, 식 (7)을 이용하여 모터에서 발생하는 토크를 계산하고 이를 식 (8)에 대입하여 다음 상태에서의 모터의 속도와 회전자의 위치를 구한다. 회전자를 회전시키고 공극에서 요소를 재분할하여 다시 위의 과정을 반복한다. 그림 2는 위에서 언급한 SRM의 해석 흐름도를 나타내었다.

3. 사례 연구

본 연구의 해석 모델은 그림 2와 같은 4상 16/12 SRM이다. 마주보는 고정자 권선은 직렬로 연결되어 한 개의 상을 형성한다. 그리고 네 개의 상을 A, B, C, D로 표기한다.

SRM의 기동 특성을 알아보기 위하여 각 상의 초기 전류를 0 [A]로 하고 모터의 초기 속도를 0 [RPM]으로 하여 기동시부터 정상상태에 이르기까지를 해석하였다. 기동시의 자력선 분포를 그림 4에 나타내었다. 그림 5는 D상의 전류 파형을 나타내고, 그림 6은 시간에 따른 모터에서 발생하는 토크와 회전속도를 나타내고 있다. 시간이 약 200 [ms] 지나면 정상상태에 도달함을 알 수 있다.

SRM 내부에서 한 상이 개방되는 사고가 발생했을 때의 모터의 특성을 알아보기 위하여 정상상태에서 운전 중 A상이 개방된 경우를 해석하였다. 그림 7은 A상이 개방되는 사고시 각 상의 전류를 나타내고 있다. 그림 8은 사고시 발생하는 토크와 회전 속도를 보여준다. A상에 전류가 흐르지 않으므로 토크의 평균치가 작고 토크의 리플은 크게된다. 또한 사고시에는 토크의 리플이 커서 모터의 속도는 정상시보다 크게 변동되는 것을 알 수 있다. 표 1은 정상시와 사고시의 토크와 토크의 최대 리플과 평균 속도 및 속도의 변동율을 비교하여 나타내었다.

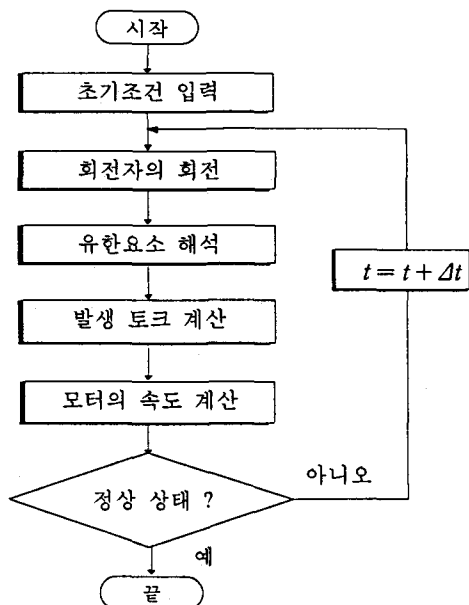


그림 2 SRM의 과도 특성해석 흐름도

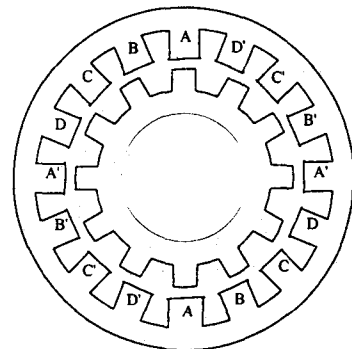


그림 3 4상 16/12 SRM의 단면도

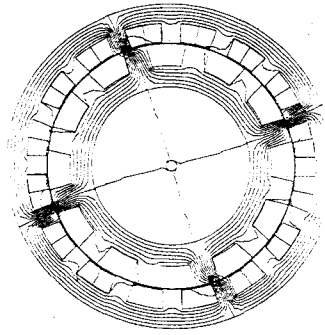


그림 4 기동시 자력선 분포도 ($t = 50 \text{ ms}$)

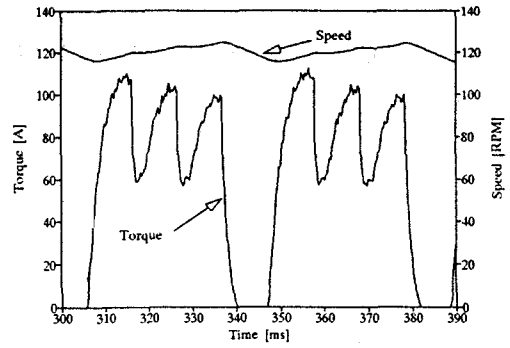


그림 8 A상 사고시 발생 토크 및 모터의 속도

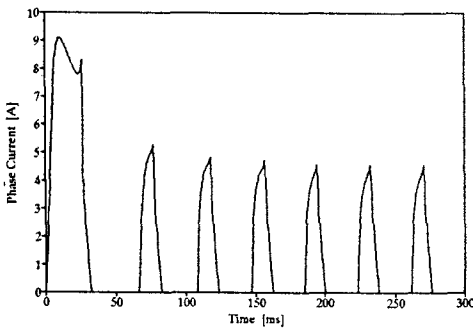


그림 5 기동시 D상의 전류 파형

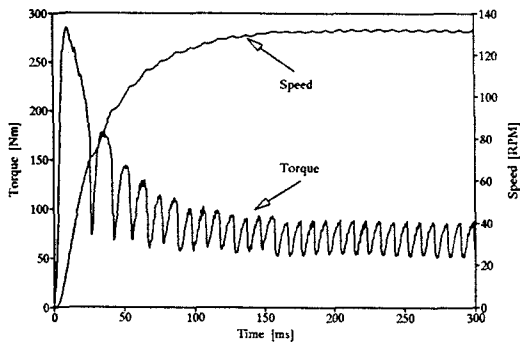


그림 6 기동시 발생 토크 및 모터의 속도

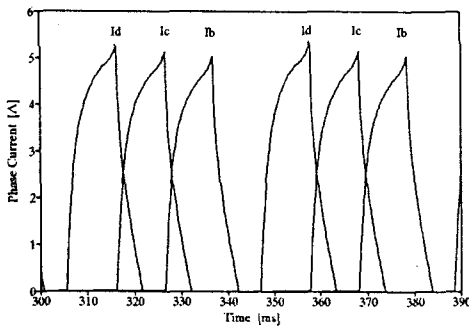


그림 7 A상 사고시 각 상의 전류 파형

표 1 정상시와 사고시의 모터의 특성비교

	정상시	사고시
평균 토크	70 [Nm]	62 [Nm]
토크의 최대 리플	38 [Nm]	110 [Nm]
평균 속도	132 [RPM]	122 [RPM]
속도 변동율	0.9 [%]	12.9 [%]

4. 결 론

본 연구에서는 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM)의 과도 특성을 해석하기 위하여 전자장과 구동회로 그리고 운동 방정식을 결합하는 유한요소해석기법을 제시하였다. 자기 코어의 비선형성을 고려하기 위하여 뉴튼랩슨법을 이용하였으며 미분방정식내의 시간 미분항은 후퇴차분법을 이용하여 정식화를 하였다. 제안한 방법을 4상 16/12 SRM에 적용하여 기동시부터 정상 상태에 도달 할 때까지의 자장의 분포, 상 전류, 발생 토크, 모터의 속도 그리고 회전자의 위치를 매 시간 스텝에서 계산하였다. 또한 SRM이 정상상태에서 운전 중 사고로 한 상이 개방 되었을 때를 해석하였다. 본 연구에서 제안한 알고리즘은 SRM의 동 특성해석에 효과적으로 사용될 수 있으리라 사료된다.

(참 고 문 헌)

- [1] J. F. Lindsay, C. Eng. R. Arumugam, M. Sc., and R. Krishnan, "Finite-element Analysis Characterization of a Switched Reluctance Motor with Multitooth per Stator Pole," IEE Proceedings, Vol. 133, Pt. B, No. 6, pp. 347-353, November 1986
- [2] N. Radun, "Design Considerations for the Switched Reluctance Motor," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 31, No. 5, pp. 1079-1087, September 1995
- [3] Yasuharu Odhachi, Yoshihiro Kawase and Yutaka Miura and Yoji Hayashi, "Optium Design of Switched Reluactance Motors using Dynamic Finite Element Analysis," IEEE Trans. Magnetics, vol. 33, No. 2, pp. 2033-2036, March 1997
- [4] 이준호, 이항범, 이기식, "유한요소법을 이용한 SRM의 특성해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp. 139-141, 1996