

스위치드 릴럭턴스 전동기의 경방향 힘과 진동 해석

손동혁, 이건, 김병국, 문지우, 조운현*
동아대학교

Analysis of Radial Force and Vibration in Swithched Reluctance Drive

Donghyeok Son, Jian Li, Byongkuk Kim, Jiwoo Moon and Yunhyun Cho*
Dong-A University

Abstract - This paper presents a dynamic force analysis of switched reluctance motor using 2D-transient finite element method. The main exciting of the vibration is the electromagnetic force in the stator that is calculated Maxwell stress method. The advantage for elimination of vibration of 12/8 SRM was explained by comparing the radial force of 12/8 and 6/4 SRM in both time and frequency domain. In order to effective mitigate the vibration during turning off process, effects of different commutation method were investigated.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기는 많은 장점을 가지고 있다. 전동기의 구조가 간단하기 때문에 제조과정이 간단하여 제조비가 절약되는 경제적인 이점이 있고 고효율을 얻을 수 있는 전동기이다.[1] 스위치드 릴럭턴스 전동기 다양한 장점이 있지만, 전동기 구동 시에 기계적인 소음과 진동이 심하다는 단점이 있다. 기계적인 소음과 진동의 주요 원인은 고정자에 작용하는 경방향 힘에 기인한다.[2] 고정자의 경방향 진동은 스위치드 릴럭턴스에서 토크를 생산하는 메커니즘 때문에 발생한다. 이 경방향으로 발생하는 진동은 효율을 떨어트리는 요소이기도 하다. 6/4 SRM을 연구하고 시작품을 제작하여 테스트하였지만 이 전동기의 진동을 억제하기 어려웠다. 경방향 힘이 줄어들기 때문에 12/8 SRM은 6/4 SRM보다 전동이 작다고 알려져 있다.. SRM의 전동 문제가 해석모델로서 많은 연구가 이루어졌고[3] 힘을 계산하였다.[5] 하지만 6/4 SRM과 12/8 SRM의 경방향으로 발생하는 힘에 대해 비교를 한 연구는 없었다. 경방향 힘은 전동기를 설계하는 과정에서 줄일 수 있고 적절한 제어 기법을 통해서도 줄일 수가 있다. 하지만 전동에 효율적인 전동기의 구조를 선택하는 것이 더 효율적이다. 본 논문은 12/8 SRM과 6/4 SRM의 경방향으로 작용하는 힘을 같은 조건에서 비교하였다. 그리고 전동 억제 기술에 대해 연구하였다.

2. 본 론

2.1 전자기적 힘의 해석

2.1.1 정자계 해석

자계 벡터 포텐셜과 전류밀도가 z-axis 요소만 있다고 가정한다. SRM의 지배 방정식은 자계 벡터 포텐셜에서 다음과 같이 표현 할 수 있다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \left(v \cdot \frac{\partial A_z}{\partial} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left(v \cdot \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J \quad (1)$$

v 은 투자율이 반비례이고, A_z 은 자계 벡터 포텐셜이다. 그리고 J 는 입력 전류밀도이다. 전압원의 전기입력 방정식은 다음과 같다.

$$V = R_s I + L_m (dI_m/dt) + E_m \quad (2)$$

V 은 전압원, R_s 은 상저항, L_m 은 end coil의 누설 인덕턴스 그리고 E_m 코일에 유도된 기전력이다. 자력 밀도에 대한 계산은 Maxwell Stress Tensor method를 사용하여 비선형적 특성을 해석한다.

$$T_{ij} = \frac{1}{\mu_0} (B_i B_j - \frac{1}{2} B^2 \delta_{ij}) \quad (3)$$

δ_{ij} 은 Kronecker delta이다. 이 텐서는 힘 분배를 정의 한다.

$$f = \nabla \cdot \tau \quad (4)$$

2-dimensional의 경우에는

$$f = \frac{1}{2\mu_0} (B_n^2 - B_t^2) \vec{n} + \frac{1}{\mu_0} B_n B_t \vec{t} \quad (5)$$

식(5)에서, 첫 번째 조건은 힘 분배의 방사 요소를 나타낸다. 두 번째 조건은 힘 분배의 주변 구성요소이다. 두 요소들은 방사 힘들을 비교하기 위해 해석하였다. 표 1에서 상술하였다. 과도 자계 유한 요소 해석은 상용 프로그램 FLUX2D를 사용하여 수행하였다. 전력변환과 제어 알고리즘은 시뮬링크로 모델화하였다. 2가지 구성요소들을 FLUX2D에서 결합하였다. 같은 commutation을 사용하여 비교하였다.

2.1.2 방사 힘의 과도상태 자계해석



<그림1> 고정자에서의 자속밀도 및 힘

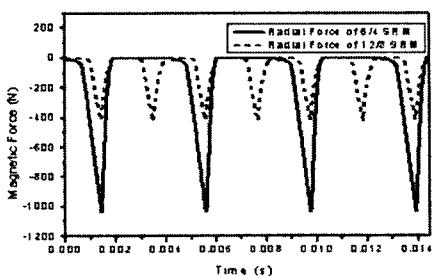
<표1> 6/4와 12/8의 기본 사양

품목	6/4	12/8
Stator outer diameter[mm]	135	135
Rotor outer diameter[mm]	63	68.8
Stack length[mm]	95	95
Shaft diameter[mm]	24	24
Stator pole arc[degree]	30	15
Rotor pole arc[degree]	32	16
Air gap length[mm]	0.3	0.3
Winding(turns per pole)	78	41
Turn on angle[degree]	0	0
Turn off angle[degree]	30	15
DC voltage[V]	310	310
Speed[rpm]	3600	3600
Output torque[N.m]	3.60	3.64

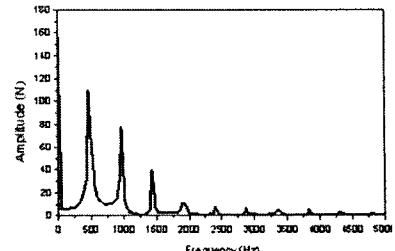
과도상태 자계 시뮬레이션 후, 고정자 표면에 작용하는 힘을 해석하였다. 이 힘은 경방향 힘과 접방향 힘으로 분류할 수 있다. 그림1에서, 회전자가 여자되어 있는 고정자 권선으로 가까워지는 위치가 될수록, 전동기는 포화되기 시작하고, 자기압과 겹쳐지는 지역 역시 증가한다. 경방향 힘 F_r 은 고정자에 작용하고, F_t 은 접방향으로 작용하는 힘으로 토크를 발생시킨다. 경방향 힘은 여자된 고정자 극의 축에 따라 고정자를 압박하는 작용을 한다. commutation은 상 자속 쇄교의 최대값과 연관되어 있기 때문에, 경방향 힘은 commutation 지점에서 최대값에 도달한다. 6/4 SRM은 한 상 여자가 될 때 2극을 사용하지만 12/8 SRM은 4극을 사용하여 힘을 발생시킨다. 하지만 6/4의 자기압의 크기가 12/8 보다 더 크다. 하나의 고정자 극에 작용하는 경방향 힘은 FEA 결과들로부터 그림3(a)에 나타내었다. 12/8 SRM이 1회전 할 때 1개의 여자된 고정자는 8개의 회전자 극이 통과하게 되고 6/4 SRM은 4개의 극이 통과하기 때문에 12/8에서 경방향 힘의 주파수는 6/4보다 2배이다. 기본 주파수는 12/8에서 $f_1 = 60\text{rps} \times 8\text{poles} = 480\text{rev} = 480\text{Hz}$ 6/4 $f_1 = 60\text{rps} \times 4\text{poles} = 240\text{rev} = 240\text{Hz}$ 이다. FET 해석은 그림3(b),(c)에 나타났다. 모든 고조파의 경방향 힘 크기는 주파수와 함께 이 그림에서 나타난다. 저 차계 구성요소들은 표2에 명시하였다. 이 결과는 시뮬레이션 모델에서 입력으로 사용한다.

<표2> 경방향 자기력 고조파 구성요소

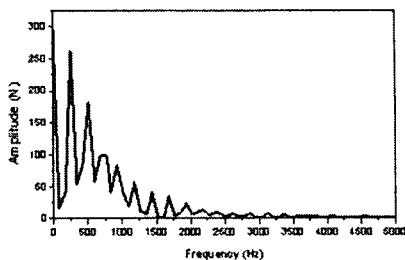
고조파	기본계	2계	3계	4계
12/8	주파수	476	969	1434
	크기	108.2	76.7	36.9
6/4	주파수	243	506	759
	크기	260.5	180.5	99.4



(a) 고정자극에서 12/8과 6/4에 작용하는 경방향 힘



(b) 12/8에서 경방향 힘의 FFT 해석



(c) 6/4 경방향 힘의 FFT 해석

<그림2> 12/8 및 6/4 SRM의 FFT 해석

2.2 Commutatin 기법에 의한 진동 저감

2.2.1 경방향 힘에 대한 진동

진동 관점에서 SRM은 MDOF 시스템이다. 하지만 제한적으로 SODF의 선형적인 중첩으로 나타낼 수 있다. 경방향 힘에 대한 과정들은 고정자 극의 질량, 견고성, 제동 면위에 대해 동적 FEA 시뮬레이션 한 것이다. 과도상태 운동방정식은 뉴턴법칙을 적용하면 다음과 같다.

$$m \ddot{d}(t) + c \cdot \dot{d}(t) + k \cdot d(t) = F_r(t) \quad (6)$$

m 은 질량이고, c 는 제동계수, k 는 스프링 정수, $d(t)$ 는 면위 그리고 $F_r(t)$ 은 경방향에 대한 힘이다. 이를 파라메타들은 전달함수를 통하여 FEA 시뮬레이션 결과나 실험을 통해서 구할 수 있다. 이런 구조를 가진 모델에서 힘과 가속도 사이의 전달함수는 다음과 같다.

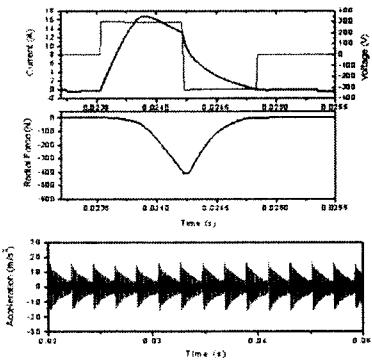
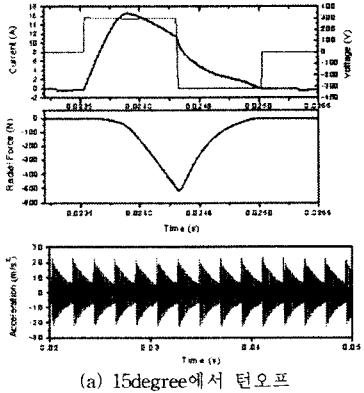
$$H(s) = \frac{a(s)}{F(s)} \approx \sum_i A_i \frac{s^2}{s^2 + 2\zeta_i w_{ni}s + w_{ni}^2} \quad (7)$$

w_n 은 공진 자연 주파수, ζ_i 는 제동계수이다. 고정자에 가하는 힘과 진동의 전달함수는 2계 함수이다. 시뮬레이션을 마친 후 힘의 유한요소 데이터에 대한 색인 표를 작성하면, 여자되어 있는 고정자극에서 경방향 힘의 가변성을 알 수가 있다. 그림5는 2계 기계모델에서 경방향 힘에 대해 고정자의 경방향 가속도를 보여준다.

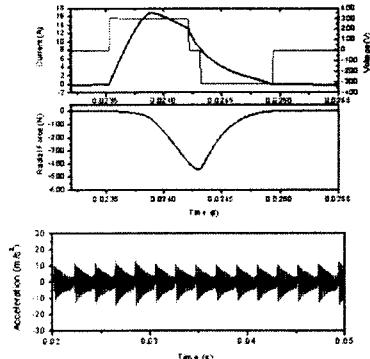
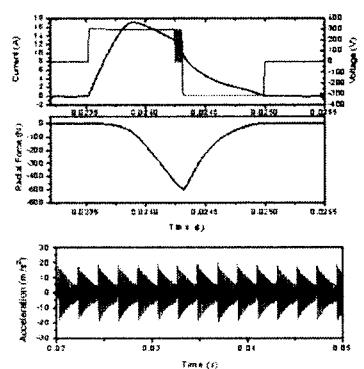
2.2.2 진동 저감

고정자 진동 때문에 생기는 기계적 소음과 상에 인가되는 부전압이 인가되어 상전류 commutation 초기화에의 연관성이 보고되었다.[3] 상권선의 전압이 반대로 변하게 될 때, 전압에 대한 단계적인 변화는 경방향 힘의 기울기가 단계적으로 변화한다. 전류의 큰 변화는 기기 권선에 갑자기 반대 극성의 전압으로 된다. 이것은 SRM의 첫 번째 모드 주파수에서 큰 진동을 유발한다. 4개의 commutation 기법들을 비교 진동에 미치는 영향을 연구하였다. 비동기 하프 브릿지 컨버터로 commutation을 하였다. 스위치드 퀘릭터스 드라이브들은 2개의 스위치와 2개의 다이오드로 이루어져 있다. 그리고 스위치의

상태에 따라 양전압, 0전압, 부전압을 제공한다. 이를 기법들은 턴 온 각을 2도로 고정하였다. 그림3(a),(b)는 기존의 commutation은 각각 15도와 13도에서 2개의 스위치 턴오프를 한 것이다. 그럼 4(a)는 voltage-smoothing method를 한 것이다. Commutation의 초기 상태는 한 개의 스위치는 개방되어 있고 나머지 스위치는 스위칭한다. 그러므로 PWM을 사용할 수 있고, 고정자의 공진 주파수보다 높은 주파수는 PWM의 뉴터 값이 초기값에서 0으로 점진적으로 감소한다. 이 소프트 초평은 전동 저감에 축면에서 하드 초평보다 뛰어나다. 상에 전압이 인가 되었을 때 자속 쇄교가 더 부드럽게 변한다. 그럼 4(b)에서, extended freewheeling method 기법은 commutation 지점 근처에서 영전압을 유지한다.



<그림3>commutation에 따른 전류, 전압, 경방향 힘, 가속도



<그림4>commutation에 따른 전류, 전압, 경방향 힘, 가속도

3. 결 론

본 논문은 기계적 소음과 스위치드 릴렉턴스 전동기의 진동에 대한 연구를 나타내었다. 전자기압은 magnetic tensor 기법과 전자계 유한 요소 해석을 사용함으로써 얻을 수 있다. 12/8과 6/4 구조의 경방향 힘은 12/8 전동기의 경방향 힘이 전동을 줄이는데 더 많은 장점이 있음을 분석하였다.

감사의 글

본 논문은 한국전력공사 전력기반조성사업센터에서 지원한 전력변환시스템 신기술 연구센터의 사업으로 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] Miller, T.J.E., Swithced Reluctance Motors and Their Control, Oxford Univ. Press, 1993.
- [2] R.S.Colby, F.M.Mottier, and T.J.E. Miller, "Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol.32, NO.6.Nov./Dec. 1996.
- [3] Wei Cai, Zhangjun Tang and Avoki M.Omekanda,"Low-vibration design of switched reluctance motors for automotive applications using modal analysis", IEEE Trans. on Indusy Applications, Vol.39, NO.4, Jul/Aug.2003.
- [4] M.N.Anwar and Iqbal Husain, "Radial force calculation and acoustic noise prediction in switced reluctance machine",IEEE Trans. on Indusy Applications, Vol.36, NO.6.Nov./Dec. 2000.
- [5] Zhangjun Tang, Pragassen Pillay and Avoki M. Omekanda, "Prediction of electromagnetic forces and vibrations in SRMs operating at steady-state and transient speeds", IEEE TRANS. on Industry Applications, Vol.41, NO.4.Jul./Aug.2005.