

6/4 SRM에서 Switching angle의 변화에 따른 진동기 특성 및 가진원 분석

이 지 영, 하 경 호, 이 근 호, 홍 정 표, 김 규 택
 창원대학교 전기공학과

Analysis of Characteristic and Magnetic Exciting Forces According to Switching Angle in 6/4 Switched Reluctance Motor

Ji-Young Lee, Kyung-Ho Ha, Guen Ho Lee, Jung-Pyo Hong, Gyu-Tak Kim
 Dept. of Electrical Engineering, Changwon National University

Abstract - This paper studies the influences of the magnetic radial forces on the vibrations of the Switched Reluctance Motor(SRM). The effects of changing the switching angle on the magnetic forces is analyzed by Finite Element Analysis. Theoretical and several experimental results explain clearly the origins of vibrations caused by radial magnetic forces and current.

3상, 비대칭 브리지 회로로 구동되고 있으며, PWM 전압제어로서 속도를 가변 시킨다. 시작 전동기의 고정자에서 발생하는 진동특성을 고찰하기 위해 고정자 각 상의 방사방향 후면에 가속도 센서를 설치하였다.

1. 서 론

최근 들어 국내·외적으로 SRM에 대한 관심이 급속하게 확산되면서 가전 제품 및 산업 기기, 전자자동차 등에 이를 적용하기 위한 가능성 등이 활발히 연구되고 있다. SRM은 전동기의 구조가 간단하여 제조가 용이하며, 회전자에 영구자석이 없으므로 영구자석 부착 전동기에 비하여 온도 상승에 따른 문제가 없고, 고속운전이 가능한 견고한 구조를 가진다. 따라서, 광범위한 속도 변화를 필요로 하는 응용분야의 경우, SRM 구동 시스템은 기존의 영구자석형 전동기에 비하여 많은 장점을 가지고 있으나, 토크 리플과 소음 및 진동이 비교적 심하다는 단점이 있다.

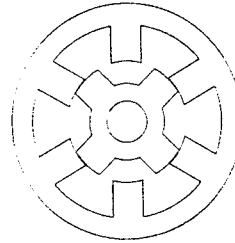
전동기에서 진동 또는 소음의 주요 원인은 크게 기계적인 원인과 공기역학적 원인, 그리고 전자기적 원인으로 분류할 수 있다. 이 중에서 돌극 구조로 이루어진, SRM에 있어서는 스위칭에 따라 전동기의 고정자 또는 회전자에 작용하는 반경방향의 힘이 전동기의 구조물을 진동시키는 주요한 원인이 되므로, 전자기적인 원인에 대한 분석이 필요하다[1-4].

본 논문에서는 전자기적인 스위칭과 진동사이의 관계를 실험을 통하여 규명하고, 가진원의 정량적인 변화를 이론적인 해석으로 산출하였다. 전동기가 3상 또는 1상 여자에 따른 정상상태 운전 일 때 시간 영역과 주파수 영역에서 전류 파형과 구조물 변형의 가속도 응답 특성을 측정하여, 전자기적 스위칭과 구조물의 진동 사이의 관계를 분석·규명하였고, 정지 상태에서 1상 1 펄스 여자로부터 주파수 응답 특성을 측정하여 전동기의 주요 공진 주파수 대역을 실험으로부터 제시하였다. 또한 스위칭 ON, OFF 각 변화가 전동기 제반 특성과 전자기적 가진력의 변화양상에 미치는 영향을 분석하기 위해, SRM에서 회전자의 위치에 따른 비선형 인덕턴스를 고려한 유한요소법을 이용하여 과도해석을 수행하였다. 이에 대한 타당성은 실험을 통해 측정된 전류 파형과 이론적 해석 결과를 비교함으로써 검증하였다.

2. 본 론

2.1 해석 대상

그림 1은 진동을 측정하고 해석하기 위해 적용된 SRM 전동기의 단면도와 그에 대한 주요치수를 나타낸 것이고, 그림 2는 측정 시스템 구성도이다. 전동기는



항 목	치 수
고정자 극호각	30.00 [deg.]
고정자 외경	139.90 [mm]
적층 길이	92.00 [mm]
회전자 극호각	32.00 [deg.]
회전자 외경	71.20 [mm]
공극 길이	0.50 [mm]

그림 1. SRM 형상과 주요 치수

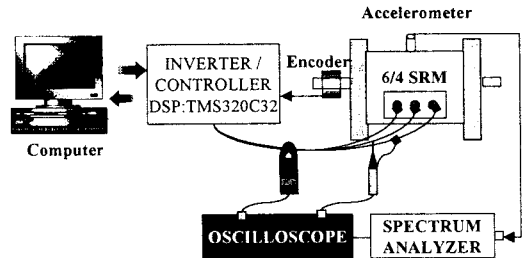


그림 2. 전동기의 구동 및 진동 측정 구성도

2.2 해석 이론

SRM에서 ON, OFF 시간에 따른 고정자와 회전자의 상대 위치에서 상용하는 전류의 변화 양상을 정확히 추정하기 위하여 본 논문에서는 과도 해석을 수행하여 제반 물리량을 계산하였다. 한 상에 대한 전압 방정식 V_s 는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_s = R_m i_m + L_m \frac{di_m}{dt} + E_m \quad (1)$$

여기서, R_m 은 유한요소 해석 영역의 내부 저항과 외부 저항의 합성 저항이고, L_m 은 코일 끝단 부의 누설 인덕턴스, E_m 은 권선에 유기 되는 역기전력이다.

벡터 포텐셜을 계변수로 하는 SRM의 기본적인 지배 방정식은 식 (2)과 같다.

$$\nabla \times \nabla \times \vec{A} = \mu \vec{J}_0 \quad (2)$$

지배방정식과 전압방정식을 결합하여 시스템 행렬을 구성하고 시간 미분항을 처리하기 위해 해석하고자 하는 현상의 미분 방정식을 시간에 대해 이산화 시켜 계산하는 시간 차분법을 이용하였다.

매 시간 간격으로 자체 해석 수행 후 맥스웰 응력을 이용하여 고정자에 작용하는 가진력을 계산하였다. 자성체 절점에 대한 고정자의 반경방향으로 작용하는 전자기적 가진력의 힘밀도 p_r 은 식 (3)과 같이 나타낼 수 있다.

$$p_r = \frac{1}{\mu_0} [(\vec{n} \cdot \vec{B})\vec{B} - \frac{1}{2}(\vec{B} \cdot \vec{B}) \cdot \vec{n}] \quad (3)$$

여기서, \vec{n} 은 고정자 극의 표면에 대한 법선 방향 단위 벡터, \vec{B} 는 공극에서 자속밀도를 나타낸다.

2.3 진동 원인의 실험적 고찰

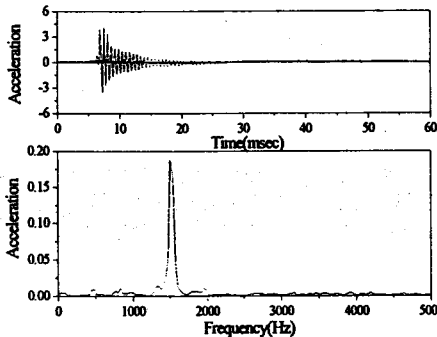
실험에서 사용된 가속도 센서의 측정 주파수 범위는 최대 5,000[Hz]이고, 중력 가속도 $g(9.8 \text{ m/s}^2)$ 에 대한 출력 전압은 26.1[mV/g]이다.

그림 3은 전동기가 정지된 상태에서 3상 권선 중 1상에 1펄스 전압을 인가하여 전자기적 흡인력(radial magnetic force)에 의한 방사 방향의 진동을 측정된 파형이다. 그림의 상단이 시간 영역에서 방사 방향의 진동이고, 하단은 이를 주파수 영역으로 나타낸 것이다. 1500[Hz]부근 영역에서 가속도가 가장 크게 나타나는데, 이 주파수 대역 부분이 고정자가 타원으로 변형을 일으키는 고유 공진 주파수 대역임을 알 수 있다.

그림 4는 한 상만을 여자한 상태에서 1060[rpm]의 일정 속도로 회전할 때, 진동 가속도를 측정된 파형이다. 그림의 상단은 스위칭 ON, OFF에 따른 전류 파형을 나타내고 있고, 하단은 이 때의 방사방향 진동을 측정된 것이다. 전류(commutation) 구간에서 심한 진동이 발생하는 현상을 볼 수 있는데, 이는 스위칭 ON 구간에서는 기자력이 인가됨으로 인한 방사 방향 전자력의 작용으로 수축이 일어나고, 스위칭 OFF와 동시에 인가되었던 기자력이 소호 됨으로써 방사방향 전자력의 급격한 변화로 인하여 진동이 더 크게 발생하기 때문이다.

그림 5는 이의 결과를 주파수 영역으로 변환한 그림이다. 6/4 SRM에서 한 회전동안 한 상에 4번의 스위칭이 이루어지므로 1060[rpm] 회전 시, 상전류 파형의 주기는 70.6 [Hz]이다. 따라서, 약 70[Hz]의 주기를 가지는 고조파 성분이 주기적으로 발생함을 보이고 있으며 1440[Hz] 대역을 부근으로 가속도 레벨이 증가하는 것은 그림 3에서 제시한 고정자의 고유진동수 대역이기 때문이다.

그림 6은 3상을 여자하여 1060(rpm)으로 운전할 때 전류 파형과 가속도를 측정된 결과이다. 가속도 센서가



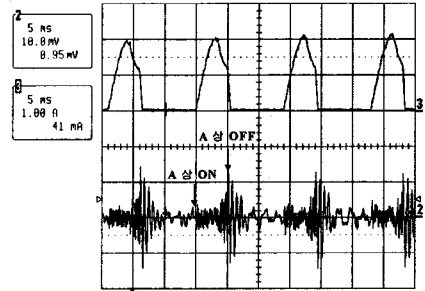
(상) 시간영역, (하)주파수 영역
그림 3. 1 pulse 여자에 의한 주파수 응답 특성

A상의 고정자 후면에 부착되어 있으므로 A상이 OFF 될 때 가장 큰 진동 레벨을 보이고, 순차적으로 B상과 C상의 OFF 시점에서 진동 레벨이 상승하고 있다. 각 상의 스위칭에 의한 진동은 주기적으로 나타나고 있다.

2.4 전자기적 가진력 해석

전자기적인 가진력(radial force)의 크기를 예측하기 위해 유한요소법으로 비선형 해석을 수행하였다.

그림 7은 1820[rpm]으로 무부하 운전 시 측정된 전류 파형과 동일한 조건으로 해석한 결과를 비교한 것이다. 해석시 입력 전압은 단일 펄스 입력인데 반해, 실제 실험에서는 PWM 전압 파형이 인가되므로, 측정된 전류의 양상은 리플을 포함하고 있다.



(상) 전류, (하) 진동 가속도
그림 4. 1상 여자 운전시 시간 응답 특성

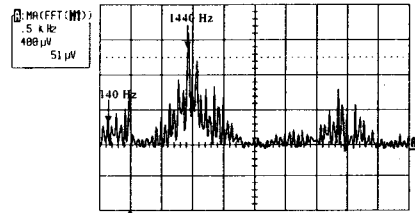


그림 5. 1상 여자 운전시 주파수 응답 특성

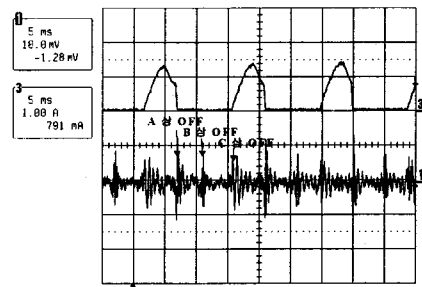
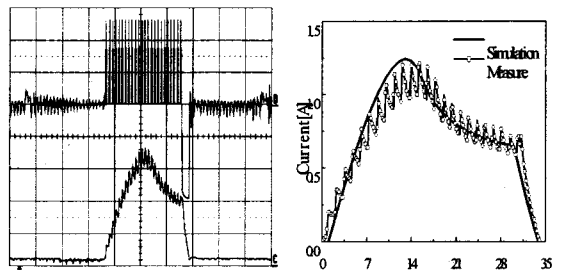


그림 6. 3상 여자 운전시 전류(상) 및 진동 가속도(하)



(a) (상)전압, (하)전류 (b)전류의 측정치와 이론치
그림 7. 전류 파형의 비교(ON: 0, OFF: 30(deg.))

그림 8은 그림 7과 같이 입력 전압이 20.75[V], 회전 속도가 1820[rpm]일 때, 도통각은 일정하게 유지하고, 스위칭 ON 각을 변화시키면서, 전류, 토크, 및 전자기적 가진력을 산출한 결과이다. 그림에서 실선으로 표시한 파형이 그림 7과 동일한 스위칭 구간을 가질 때의 특성을 나타낸 것이다. 스위칭 ON 각을 진상시킬수록 인덕턴스가 작아 전류가 급격히 상승하게 되고 토크 리플이 증가하며, 전자기적 가진력이 급격하게 변하므로 진동의 레벨 또한 증가할 것으로 예상된다.

그림 9는 동일한 전압, 속도 조건에서 일정한 스위칭 ON 각에 대해 스위칭 OFF 각을 변화시키면서 특성 변화를 해석한 결과이다. 스위칭의 OFF각이 지연될수록 가진력의 크기가 증가함을 보이고 있다.

3. 결 론

SRM은 여러 가지 장점에도 불구하고 높은 소음/진동의 영향으로 인해 실용화 단계에 이르지 못하고 있다. 따라서, 진동/소음을 저감하기 위해서는 전동기의 성능을 만족하면서 진동을 저감할 수 있는 제어기술 뿐만 아니라 자기회로 설계 기술이 필요하다.

본 논문에서는 6/4 SRM을 대상으로 스위칭에 따른 전자기적 가진력이 고정자의 변형을 일으키고, 이러한 가진력의 급격한 변화가 진동을 상승시키는 주요 원인이 됨을 일련의 실험을 통하여 제시하였다. 또한, 진동을 저감시키기 위한 한 방안으로 유한요소 해석을 통하여 스위칭 각의 변화에 따른 제반 구동 특성과 전자기적 가진력을 예측, 분석하였다. 이상의 결과를 근거로 운전시 전동기의 성능을 저하시키지 않으면서 진동을 저감할 수 있는 적절한 스위칭 각을 선정하여 진동 측정으로부터 해석 결과를 검증할 계획이다.

감사의 글

본 연구는 한국과학재단 지정 창원대학교 공작기계기술센터의 지원에 의한 것입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] R. Krishnan and P. Vijayraghavan, "State of the Art: Acoustic Noise in Switched Reluctance Motor Drives", Proceedings of the 1998 IEEE IECON, vol.2, pp929 - 934, Aug.-Sep, 1998.
- [2] 하경호, 홍정표, 김규탁, "스위칭에 따른 전자기 가진력에 의한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자 변위해석", 전기학회 논문지, vol.49B, pp20- 26, No.1, JAN, 2000
- [3] 문재원, 오석규, 안진우, "SRM의 여자방식에 따른 소음 특성 해석", 전기학회 논문지, vol.49B, No.9, p565-571, SEP, 2000
- [4] 리럭턴스모터 조사전문 위원회, "스위치드 릴럭턴스 모터의 기술동향", 제 8호, Jul, 1994

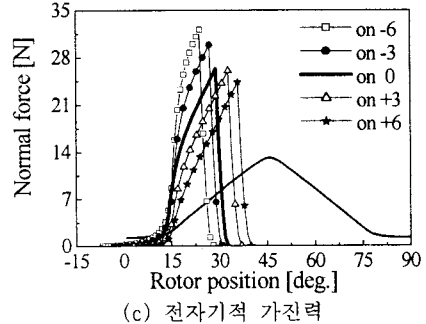
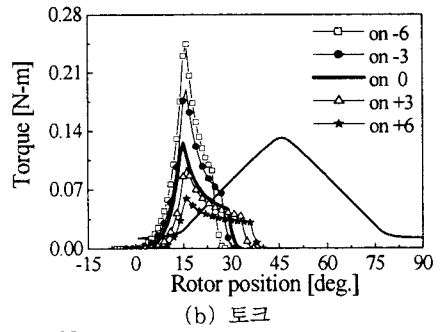
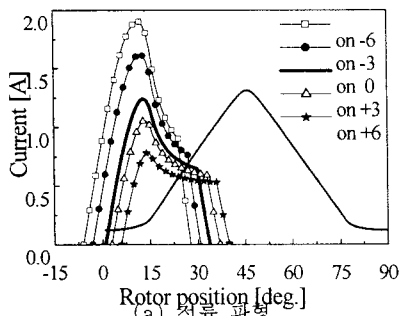


그림 8. Switching on angle 변화에 따른 특성 변화

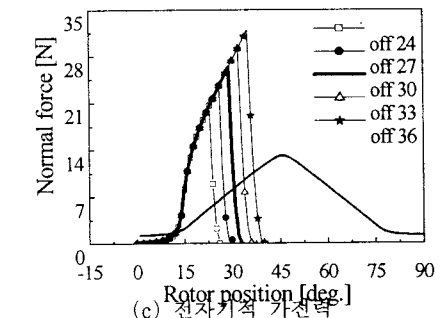
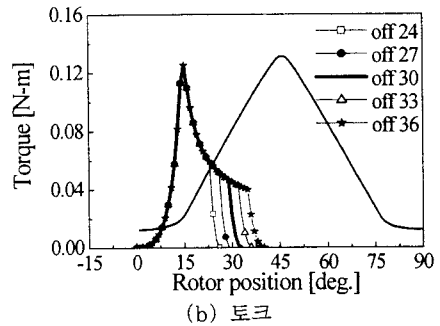
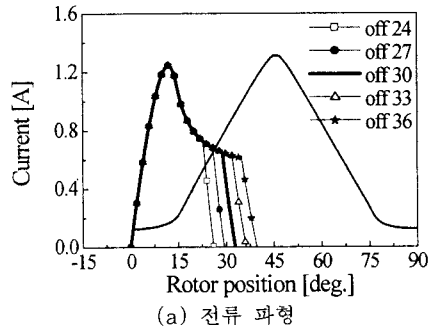


그림 9. Switching off angle 변화에 따른 특성 변화