

소음저감을 위한 EV용 SRM 및 제어기의 개발

송현수, 박성준\*, 안진우  
경성대, \*동명대

Development of Low Noise SRM Drive for EV Application

Hyun-Soo Song, Sung-Jun Park\*, Jin-Woo Ahn  
KyungSung Univ., \*Tongmyung College

**Abstract** - The switched reluctance motor(SRM) drive system provides a good adjustable speed and torque characteristics. SRM has the possibility of maintaining full power over a wide speed range. So, many attempts are being done from home appliances to industrial machinery and tools. Especially, a traction drive of an SRM is one of a good application for it's DC-series characteristic.

However, because of the switching mechanism, it has some disadvantage of noise and vibration. It is difficult to adopt to an appliance demanding silency. A noise simulation of 6/4 and 12/8 SRM was done in order to compare each other, and the design was done carefully.

1. 서 론

최근 전력용 스위칭 소자의 개발 및 마이크로 전자공학의 발전으로 인하여 고성능, 고기능의 제어방식이 실현됨에 따라 전동기 부분에서도 새로운 모터의 개발이 활발히 연구되고 있다. 특히 기존의 DC 모터에서 브러쉬의 사용으로 인한 유지 및 보수에 어려움을 극복하기 위해 브러시리스 방식의 전동기가 대안으로 연구되고 있다.

스위칭드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 전자기적 구조가 간단하고 견고하며, 고효율, 고토오크/관성비, 넓은 범위의 가변속 운전 등의 장점을 가진 전동기로서 근래 여러 산업분야 및 가전 분야에 그 적용범위를 넓혀가고 있는 추세이다. SRM은 전자 에너지 변환기구에서 릴럭턴스 토오크를 극대화시킨 전동기구조 전력용 스위칭 전원에 가장 적합한 형태의 전동기이다.

최근까지의 개발연구는 토오크, 효율, 신뢰도, 경제성 등에 관하여 연구가 집중되어 있었다. 그러나 SRM의 문제점의 하나인 소음에 관한 연구가 상대적으로 적어, 정속을 요하는 전동기 응용에 있어서는 적용에 어려움이 있었다. 특히 견인용 응용에 있어서도, 실내용 수송수단이나 전기자동차 등에의 응용에도 소음문제는 SRM의 단점으로 지적되고 있다.

본 논문에서는 SRM의 소음발생 원인을 분석하고, 극수와 형상이 달라짐에 따라 소음 정도를 시뮬레이션을 통해 계산하여, 소음발생이 적은 극수를 선정한다. 극수가 선정되면 소음을 고려하면서, 기계적인 구조를 조정하여 최소 소음발생의 전동기 설계를 할 수 있도록 한다. 소음해석 전용 프로그램인 PC SRDaS를 사용하여 시뮬레이션하고 그 결과를 보여준다. 또한 실제 제작된 전동기의 소음을 측정하여 결과를 검증한다.

2. SRM의 기본 구동원리

그림 1은 일반적인 SRM 드라이브 시스템을 보여준다.

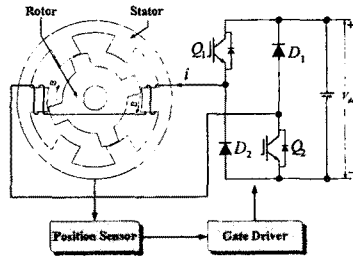


그림 1 SRM 드라이브 시스템  
Fig. 1. SRM drive system

$$T_e = \frac{\partial W'_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (1)$$

토오크는 스위칭 전류의 제곱과 식(1)에서의 회전각의 위치각에 따른 인덕턴스의 편미분값에 비례한다. 또 실제 발생토오크는 인덕턴스의 상승구간에 존재하며 인덕턴스 하강구간에 이르기 까지 전류의 소호가 이루어지지 않으면 부토오크가 발생하게 된다. 또한 토오크 발생 구간에서 맥동이 발생하거나, 한상에서 다른상으로의 전류(commutation)작용이 원활하지 못하게 되면, 전동기의 토오크-속도특성의 안정도가 낮게된다. 그것은 전동소음의 원인이 된다.

3. 소음발생 원인과 저감방안

진동, 소음 발생 원인으로 크게 기계적인 원인과 전자기적인 원인이 있다. 기계적인 원인으로서는 공심의 동심도, 직전도, 접촉 마찰, 중량 불균형 제작 등과 같은 제작상의 문제와 베어링과 같은 적용부품에서의 기계적인 진동과 공기와의 마찰 등에 의해 소음이 발생한다. 전자기적인 원인은 상 스위치의 온, 오프 순간에 발생하는 갑작스런 기자력의 변화에 의한 수축 팽창작용 등이 있다.

이 중 여러 연구보고에 의하면 SRM의 진동, 소음은 주로 고정자의 방사방향의 힘의 변동에 의해 발생되는 것으로 보고 되고 있다[2,3].

고정자 방사방향의 힘의 변동을 살펴보면, SRM의 회전력 발생과정에서, 고정자극과 회전자극사이에 방사방향의 전자적인 인력이 작용한다. 이러한 인력은 여자전류  $i$  와 고정자극과 회전자극사이의 공극길이  $g$  및 인덕턴스  $L$ 에 의해서 식(2)와 같이 나타낼 수 있다[2].

$$F_r(\theta, g, i) = -\frac{1}{2} i^2 \frac{L(\theta, g)}{g} \quad (2)$$

이 인력은 고정자 프레임에 진동시키고 이것은 청각적 소음을 발생시킨다.

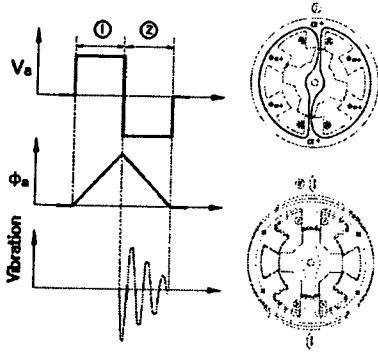


그림 2 스위칭 온-오프 시점에서의 방사방향의 진동  
Fig.2 Radiational vibration at switching on-off

그림2는 스위칭 온-오프 시점에서의 전동기 고정자의 방사방향으로의 진동을 나타낸다. 스위칭 온 구간보다 스위칭 오프구간에 의해서 진동이 발생한다. 신속하게 상전류를 소호하는 것은 진동-소음을 더욱 가중시킨다. 따라서 전류소호시간을 조절함으로써 상당부분 소음을 줄일 수 있다.

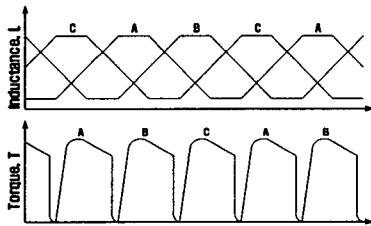


그림 3 각 상의 인덕턴스 프로파일과 토크  
Fig.3 Inductance profile and torque of each phase

그림 3은 3상의 SRM에서 각 상의 순차적인 전류(Commutation)로 인해 토크발생구간이 불연속적이 되는 것을 보여준다. 이러한 토크리플은 진동-소음으로 나타난다.

소음과 진동을 감소시키는 방안으로는 발생된 진동을 상쇄하도록 스위칭소자를 다단계로 스위칭 온, 오프시키는 기법[1,5], 전동기의 자기회로를 적정하게 설계하여 운전영역의 공진모드를 제거하는 방법[6], 그리고 SRM의 권선방식과 여자방식을 기존의 방식과 다르게 함으로써 진동, 소음을 감소시키는 방법 등이 제시되어 왔다[7,8].

#### 4. 극수에 따른 소음 시뮬레이션 및 검증

SRM의 설계는 전체체적 내에서 효율이나 토크만을 염두에 두고 극호각이나 극의 길이, 요크 두께 등을 조정하며, 최적의 결과를 내는 방향으로 수행되었다.

일반적으로 극수에 따른 소음의 정도는 크게 연구되어 있지 않다. 6/4 SRM은 12/8 SRM과 같은 3상 전동기로서 12/8 SRM 2배의 스트로크 횟수를 가지나, 서로의 소음정도는 잘 알려져 있지 않다. 본 논문에서는 다른 요소들에 앞서 소음을 고려하여, 최적의 극수를 선정할 수 있도록 시뮬레이션을 수행하였다.

표1은 시뮬레이션 수행을 위한 설계치이다. 6/4,

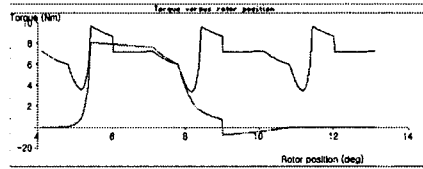
12/8 SRM의 2가지이며, 둘다 같은 체적과 같은 출력을 가지도록 설계되었다.

표 1. 시작 전동기의 제원

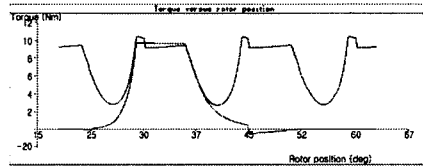
Table 1. The specifications of prototype SRM

전동기	6/4		12/8	
	고정자	회전자	고정자	회전자
외경(mm)	69	37.75	69	37.75
요오크두께(mm)	16	11	14	11
극호각(deg.)	34	36	14	16
극길이(mm)	15	21.75	17	21.75
적층길이(mm)	100			
공극(mm)	0.25			
축직경(mm)	16			

앞서 기술한 대로 전류시 일어나는 토크리플은 소음-진동과 직결된다. 전동기 설계시 토크리플을 최소화하도록 설계하였다. PC-SRD를 이용하여 6/4 SRM과 12/8 SRM을 시뮬레이션 하였다. 그림 4에 그 결과치를 나타내었다.



(a) 6/4 SRM

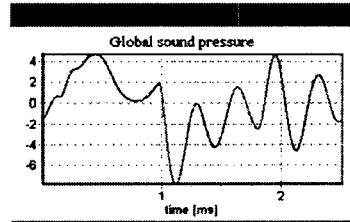


(b) 12/8 SRM

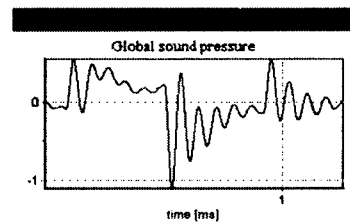
그림 4 시작 전동기의 토크 프로파일

Fig. 4 Torque profile of prototype SRM

토크리플이 최소로 되도록 설계하였으나, 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 6/4 SRM이 12/8 SRM에 비해서 토크리플이 더 큰 것을 알 수 있다.



(a)



(b)

그림 5 시작전동기의 음압 (a) 6/4, (b) 12/8 SRM

Fig.5 Global sound pressure (a) 6/4, (b) 12/8 SRM

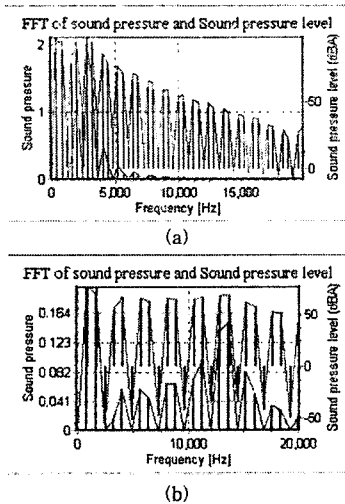


그림 6 시작전동기의 음압 FFT (a) 6/4, (b) 12/8 SRM  
Fig.6 Sound pressure and FFT (a) 6/4, (b) 12/8 SRM

그림 5와 그림 6은 PC SRDaS로 6/4, 12/8 SRM의 시뮬레이션을 수행한 결과이다. 시뮬레이션 결과에서는 두 전동기 중에서 6/4 SRM이 12/8 SRM에 비해 많은 소음을 발생시키는 것을 알 수 있다.

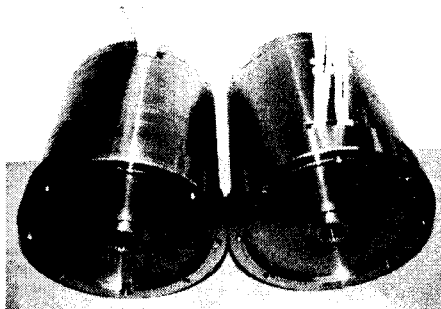


그림 7 시작전동기(좌: 6/4, 우: 12/8)  
Fig.7 Prototype SRM(Left: 6/4, Right: 12/8)

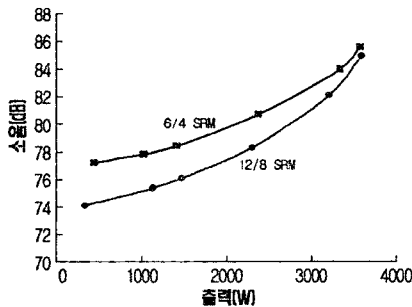


그림 8 6/4 SRM과 12/8 SRM의 소음 실측 파형  
Fig.8 Measured noise data of 6/4 and 12/8 SRM

그림 7은 시뮬레이션 결과를 검증하기 위해 실제 제작된 전동기이다. 소음시험에 있어서는 전문적인 소음측정실이 아니므로 소음의 절대적 양보다는 두 전동기의 상대적인 소음만을 측정할 수 있었다. 6/4와 12/8 SRM 두 전동기를 시험하였고, 두 전동기 모두 같은 체적에 같은 출력을 갖도록 설계하였다.

그림 8은 두 전동기의 소음측정 결과이다. 그래프에서

보듯이 12/8 SRM이 6/4 SRM에 비하여 소음레벨이 낮으며 이는 시뮬레이션 결과와 일치한다.

## 5. 결론

본 논문에서는 SRM의 소음의 원인을 분석하고, 그 방안을 소개하였다. 효율, 토크 등에 앞서 소음을 고려한 SRM의 극수를 선정하기 위해서, PC-SRD와 PC SRDaS를 통해서 시뮬레이션을 수행하였다. 시뮬레이션은 음압과 그 FFT결과를 통해서 소음을 그래프로 보여 주었다. 수행된 결과는 6/4 SRM이 12/8 SRM보다 큰 소음을 발생시키는 것을 알 수 있었다. 이를 통해 6/4와 12/8 SRM의 상대적 소음을 예측할 수 있게 되었다. 또한 시뮬레이션 결과를 검증하기 위하여 실제 전동기의 소음을 측정하여 그 결과를 검증하였다. 향후 시작전동기를 전기자동차에 장착하여 구동성능을 평가할 것이다.

이 연구는 과학재단 목적기초연구(R01-2001-000030-0)의 지원에 의해서 수행되었음

## [참 고 문 헌]

- (1) 안진우 외 1, "스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동과 응용 제2판", 신지서원, pp186-205, 1998
- (2) Derrick E. Cameron, Jeffrey H.Lang and Stephen D.Umans ; "The Origin and Reduction of Acoustic Noise in Doubly Salient Variable-Reluctance Motors," IEEE Trans. on IA, Vol.28, No.6, pp.1250-1255, 1992.
- (3) C.Pollock, C.Y.Wu, "Acoustic Noise Cancellation Techniques for Switched Reluctance Drives", IEEE IAS, Annual Meeting, Vol.1, pp.448-455, 1995
- (4) C.Pollock, C.Y.Wu, "Analysis Noise Reduction of Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive", IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.1, pp.91-98, 1995.
- (5) Chi-Yao Wu, Charles Pollock ; "Analysis and Reduction of Vibration and Acoustic Noise in the Switched Reluctance Drive," IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.1, pp.91-98, 1995
- (6) R.S.colby, F.M.Mottier, T.J.E.Miller, "Vibration Modes and Acoustic Noise in a Four-Phase Switched Reluctance Motor", IEEE trans. on IA, Vol.32, No.6, pp.1357-1364, 1996
- (7) B.C.Mecrow, "New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines", IEEE trans. on IA, Vol.32, No.6, pp.1348-1356, 1996
- (8) C.Hao, L.Diji, "Symmetry of Switched Reluctance motor Drive", Proc. of International Power Electronics and Motion Control Conf., Vol.2, pp.606-610, 1996