

SRM의 극수비 변화에 따른 특성 해석

황형진, 문재원, 안진우
경성대학교

Characteristics Analysis of SRM according to Pole Ratio

Hyung-jin Hwang, Jae-Won Moon, Jin-Woo Ahn
Kyungsung Univ.

Abstract - This paper shows a characteristics analysis of Switched Reluctance Motor(SRM) for design optimization. The static and dynamic characteristics are analysed by simulation case of 6/4 and 12/8pole machine. The torque, efficiency and acoustic noise are tested to compare drive performances.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor)는 전자기적 구조가 간단하고 견고하며, 고 효율, 고 토크/관성비, 넓은 범위의 가변속 운전 등의 장점을 가진 전동기로서 근래 여러 산업분야 및 가전분야에 그 적용 범위를 넓혀가고 있다. SRM은 전자 에너지 변환 기구에서 릴럭턴스 토크를 극대화 시킨 전동기구로 전력용 스위칭 전원에 가장 적합한 형태의 전동기이다 [1]. 본 논문은 SRM의 적용에 앞서, 극수비가 서로 다른 전동기를 비교, 분석함으로써 그 특성을 파악하여 적절한 적용을 할 수 있는 방향을 제시함에 목적이 있다.

SRM은 다양한 극수비를 가진다. 6/2극, 6/4극, 6/8극, 6/12극, 12/10극, 12/8극 등의 전동기가 있지만, 6/4극과 12/8극을 제외한 전동기는 실제 적용에 있어서 인덕턴스 비가 낮고 스트로크 당 에너지변환의 점진적 감소 때문에 응용빈도가 낮다[2]. 8/6극 SRM의 경우 4상 구동을 필요로 하므로 제어기의 경제적 부담이 상대적으로 큰 단점이 있다[2]. 이에 본 논문에서는 3상한 구동의 6/4극과 12/8극 SRM에 대하여 특성을 해석하고자 한다. 전동기의 특성 해석을 위해 정격 3.5[kW]급의 6/4극 SRM과 12/8극 SRM을 설계하였으며, 시뮬레이션을 통해 두 전동기의 특성을 해석하였다. 6/4극 SRM과 12/8극 SRM의 토크, 출력 특성 및 손실에 대한 해석 및 소음 특성을 비교하였으며 해석을 위하여 유한 요소법(Finite Element Method : FEM)을 이용하였고, 이 결과를 바탕으로 각 전동기의 장·단점과 적용 대상에 대한 효율성을 시뮬레이션을 통해 검증하고자 한다.

2. 본 론

2.1 SRM의 설계사양

특성 해석을 위해 6/4극 SRM과 12/8극 SRM의 설계는 고정된 체적 내에서 효율이나 토크를 염두에 두고 극호각이나 극의 길이, 요크 두께 등을 조정하며, 최적의 결과를 도출하는 방향으로 수행되었다.

표 1은 SRM의 설계사양을 나타내었다. 두 전동기는 3상의 6/4극, 12/8극으로 정격출력 3.5[kW], 정격전압 72[V], 정격속도 6000[rpm]이며, 공극과 회전자

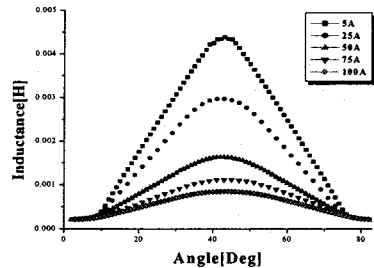
및 고정자의 외경은 동일하게 설계하였다.

표 1. 전동기의 제원

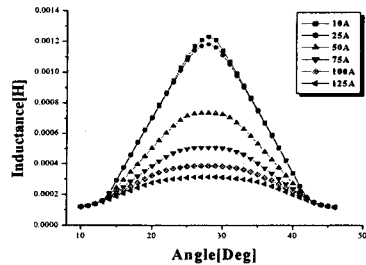
Table 1. The specifications of SRM

전동기	6/4극		12/8극	
	고정자	회전자	고정자	회전자
외경 [mm]	138	76	138	76
슬롯깊이 [mm]	14.75	11	16.75	11
요크두께 [mm]	16	11	14	11
극호각 [deg.]	34	36	14	16
극당턴수[turn]	20		11	
속도 [rpm]	6000			
축지름 [mm]	32			
공극 [mm]	0.25			
축방향길이[mm]	100			
철심재질	s18			

2.2 SRM의 토크 및 출력 특성



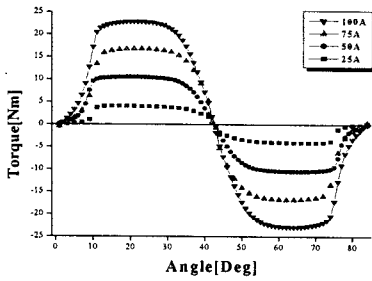
(a) 6/4극 SRM



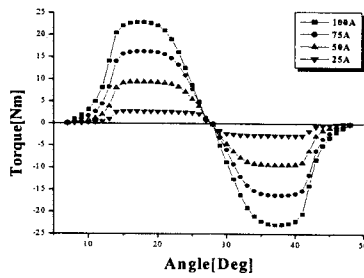
(b) 12/8극 SRM

그림 1. 인덕턴스 프로파일
Fig. 1 Inductance profiles

그림 1은 두 해석 전동기의 인덕턴스 프로파일의 시뮬레이션 결과를 나타낸 것이다. 인덕턴스의 측정을 위해 한 상에 각각 일정한 전류를 인가하여 회전자의 위치에 따른 인덕턴스의 크기를 나타내었다. 그 결과 6/4극의 경우 비 정렬 시와 정렬 시의 인덕턴스 크기의 비인 인덕턴스 비가 1:10이고, 12/8극의 경우 1:11이었다. 상대적으로 12/8극 SRM이 인덕턴스에 대한 변화율이 크다는 것을 의미하며, 즉 토크의 크기 등에 있어서 6/4극 보다는 12/8극 SRM이 유리하다는 것을 알 수 있게 해준다.



(a) 6/4극 SRM



(b) 12/8극 SRM

그림 2. 정적 토크 프로파일
Fig. 2 Static torque profiles

그림 2는 그림 1과 유사하게 한 상만을 여자시키고 각각 일정한 전류를 인가한 뒤 회전자의 위치에 따른 전동기의 정적 토크를 도출하여 나타내었다. 이 데이터를 통해 각 전동기의 토크 특성을 나타낼 수 있는 근간을 마련했다고 할 수 있으며, 그림 2를 통해 동일한 전류를 흘렸을 때 6/4극 SRM이 12/8극 SRM보다 정적 토크가 큰 것을 알 수 있다.

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

전동기의 토크 특성은 사용 분야와 목적에 따른 적용에 있어 아주 중요한 요소 중의 하나이다. 식 (1)은 SRM의 토크 방정식을 나타낸다. 이 식으로부터 SRM에서의 토크는 상 전류의 제곱과 회전자의 위치각에 따른 인덕턴스의 편미분 값에 비례함을 알 수 있다. 그리고 실제 발생하는 토크는 인덕턴스의 상승구간에 존재하며 인덕턴스의 하강구간에 이르기까지 전류의 소호가 이루어지지 않으면 부 토크가 발생하게 된다. 또한 토크 발생구간 내에서 토크리플이 크거나, 한 상에서 다른 상으로의 전류(commutation)작용이 원활하지 못하게 되면, 전동기의 속도-토크 특성의 안정도가 낮아지게 되며 진동발생에 의한 소음 특성도 저하된다.

그림 3은 두 전동기의 속도-토크 특성을 나타내었다. 6/4극 SRM의 경우 스위칭 온각을 41°, 스위칭 오프각

을 78.로 하였으며, 12/8극 SRM의 경우 스위칭 온각을 18°, 스위칭 오프각을 37.로 고정하여 속도 변화에 대한 시뮬레이션 파형이다. 두 전동기 모두 동일한 사용 목적과 정격 출력, 정격 속도로 설계하였으므로 정격에서의 속도-토크 특성의 시뮬레이션 결과는 비슷하다. 부하의 변동 시 즉, 속도의 변화에서 12/8극 SRM의 가변 속도에 대한 토크 특성이 6/4극 SRM보다 높은 것을 알 수 있었다. 속도-토크 특성에서 도출할 수 있듯이 12/8극 SRM의 속도변화에 대한 출력 특성이 우수한 것을 알 수 있다.

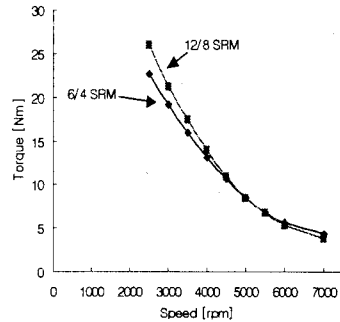
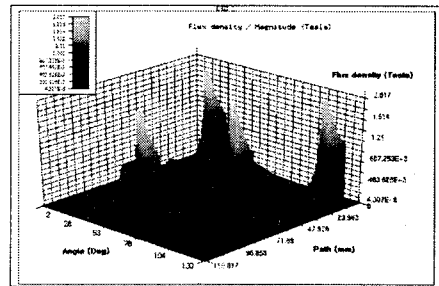


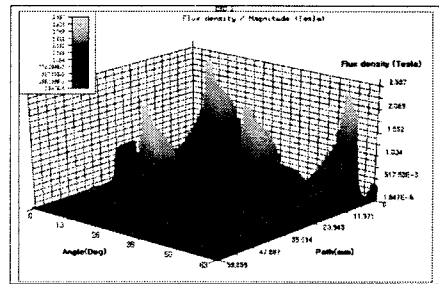
그림 3. 속도-토크 특성
Fig. 3 Speed-torque characteristics

2.3 손실 및 효율 특성

철손은 최대 자속밀도와 주파수의 함수가 되므로 철손을 분석하기 위하여 자속밀도는 중요한 요소가 된다. 전동기의 운전 시 철손을 알아보기 위해 두 전동기의 공극 자속 밀도를 그림 4에 나타내었다. X축은 회전자의 위치이고 Y축은 회전자의 이동거리를 나타내며, Z축은 공극 자속 밀도의 크기를 의미한다.



(a) 6/4극 SRM



(b) 12/8극 SRM

그림 4. 공극 자속 밀도 분포도
Fig. 4 Airgap-flux density

철손 식은 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다. 식 (2)에서 운전 시 전동기 손실은 최대 자속밀도의 크기와 주파수에 비례함을 알 수 있다[2].

$$P_{Fe} = C_h f B_m^{a+b} + C_e f^2 B_m^2 \quad (2)$$

여기서 C_h 는 히스테리시스손, C_e 는 와전류손이고 a 와 b 는 계수이다. 고속 운전에서는 철손의 급격한 증가로 인하여 손실의 큰 부분을 차지할 수 있다. 즉 6/4극 SRM의 최대 자속밀도는 전반적으로 12/8극 SRM에 비해 크기가 작음을 볼 수 있으므로 운전 시 발생하는 철손은 6/4 SRM이 작다는 것을 확인 할 수 있다. 본 비교 대상 전동기의 동손은 시뮬레이션 결과, 6/4극 SRM이 출력에 대하여 163[W], 12/8극 SRM이 227.7[W]로 12/8극이 다소 크게 나타났다. 그리고 손실에 대한 특성으로 두 전동기의 효율 또한 유추해 낼 수 있다.

그림 5는 두 전동기의 효율을 비교하여 나타내고 있으며 시뮬레이션 결과로부터 6/4극 SRM의 효율이 상대적으로 우수하다는 것을 알 수 있다.

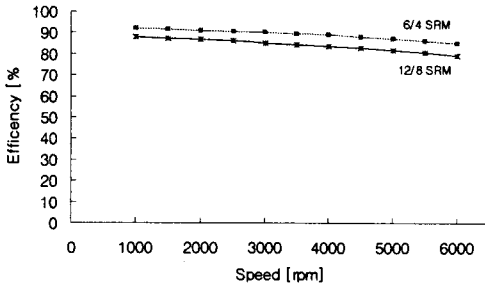


그림 5. 효율 특성 비교
Fig. 5 Comparison of efficiency

2.4 소음 특성의 비교 및 실험 결과

현재까지 SRM의 극수비에 따른 소음의 정도 및 해석은 그 연구 결과가 활발히 진행되지 않고 있는 실정이다. 6/4극 SRM은 12/8극 SRM과 동일한 3상 전동기로서, 12/8극 SRM이 6/4극 SRM보다 2배의 스위칭 횟수를 가지지만 이에 따른 서로의 소음정도와 상관관계는 잘 알려져 있지 않다.

그림 6은 6/4극, 12/8극 SRM의 소음 측정을 수행한 결과이다. 앞서 기술한 바와 같이 SRM에서 각상의 전류(commutation)시 일어나는 토크 리플은 소음-진동과 직접적인 연관이 있다고 알려져 있다.

두 비교 전동기의 토크 리플은 12/8극 전동기가 6/4극 전동기에 비해 낮으며, 이에 따른 시뮬레이션 결과도 두 전동기 중에서 6/4 SRM이 12/8 SRM에 비해 더 큰 소음이 발생하는 것을 알 수 있다. 이것은 12/8극 SRM은 소음을 고려한 적용에 유리한 이점을 가진다고 할 수 있겠다.

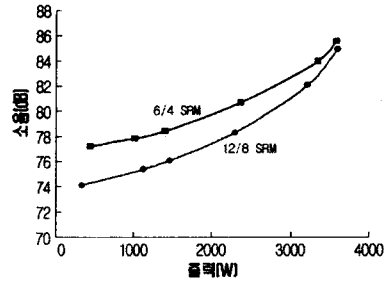


그림 6. 소음 측정 특성
Fig.6 Noise Characteristics

3. 결 론

본 논문은 SRM의 적용에 있어서 극수비가 서로 다른 전동기를 비교하여 분석하였으며, 그 특성을 알아보기 위해 6/4극 SRM과 12/8극 SRM의 토크와 손실, 그리고 소음 특성에 대한 비교를 시뮬레이션 및 실험을 통해 확인하였다. 6/4극 SRM은 상대적으로 고 토크 특성을 가지는 반면에 토크 리플이 크고, 이에 반해 12/8극 SRM은 낮은 진동-소음이 고려되는 적용에는 6/4극에 비해 유리하다고 하겠다. 본 논문에서는 SRM의 극수와 형상이 달라짐으로 소음 발생 정도 또한 시뮬레이션을 통해 해석하였으며, 소음 발생이 적은 전동기를 선정하도록 하였다. 본 논문은 두 SRM의 특성을 비교함으로써 앞으로 활발히 적용될 SRM의 건인용 응용, 실내용 수송수단, 전기자동차등의 여러 응용분야에서의 전동기 선정에 참고가 될 것이다.

본 연구는 과학재단 목적기초연구(No. R01-2001-0000300-0) 지원에 의해 수행되었음.

[참 고 문 헌]

- [1] 안진우 외 1, "스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동과 응용 제2판", 신지서원, pp186-205, 1998
- [2] P. Hammond, Miller T.J.E, S. Yamamura, "Switched Reluctance Motors and their control", Magna physics publishing and clarendon press, 1993
- [3] 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.
- [4] C.Pollock, C.Y.Wu, "Acoustic Noise Cancellation Techniques for Switched Reluctance Drives", IEEE IAS. Annual Meeting, Vol.1, pp.448-455, 1995
- [5] 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.
- [6] 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
- [7] 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
- [8] B.C.Mecrow, "New Winding Configurations for Doubly Salient Reluctance Machines", IEEE trans. on IA, Vol.32, No.6, pp.1348-1356, 1996