

2상 SRM의 비교에 관한 연구

(A Study on Comparison of Two phase SRMs)

오석규* · 이지우**

(Seok-Gyu Oh · Chee-Woo Lee)

Abstract

In small-power applications, variable-speed motors having high efficiency and controllability become more dominant than brushed DC motors. BLDC motors with permanent magnets in the rotor and SRMs directed by reluctance torque due to no permanent magnets have been strongly studied as a candidate. Compared to the BLDC motors, SRMs are more suitable for low-cost applications since the magnetic structure is simple, mechanically robust, and cheap due to no additional excitation in the rotor such as copper wire, aluminum, and permanent magnets. In addition, relatively small number of phases in single and two-phase SRMs allows more cost savings with regards to material in the motor and switching devices in the converter. In this paper, several 2 phase SRMs are compared to a 3 phase 6/4 SRM in terms of flux distribution in key parts of the motors.

Key Words : BLDC Motor, SRM, Low-Cost Applications, Flux Distribution

1. 서 론

최근에는 직류전동기가 주로 사용되어 왔던 모든 분야에서 브러쉬리스 타입의 가변속전동기기로 대체되고 있다. 고기능성, 고효율, 브러쉬 문제 등으로 직류전동기의 전유물로 생각되어 온 자동차 내부에도 고급화, 고기능성의 전략으로 브러쉬리스 타입의 가변속전동기기로 점차 바뀌고 있다. 그 외에도 중소형 산업용, 가정용, 업소용의 전기제품에도 적용되고 있다. 이

러한 브러쉬리스 타입의 가변속전동기기는 BLDC와 같은 영구자석형 전동기와 Switched Reluctance Motor (SRM)와 같은 릴럭턴스 토크를 이용한 전동기들이 연구되고 있다. 영구자석형 전동기는 높은 효율로 많은 관심을 보이고 있으나 영구자석의 수급과 비용 문제로 제한되고 있다. 이에 대한 대안으로 SRM이 주목받고 있다. SRM은 고정자에만 집중권으로 권선이 감겨져 있고 영구자석이나 권선이 없는 회전자를 가지고 있는 간단한 자기적 구조로 견고하고 다른 전동기보다 생산단가를 낮출 수 있다. 또한 사용되는 인버터도 상호합과 적용분야에 따라 조절이 가능하여 고성능, 고효율, 고속운전, 저비용 등의 장점으로 많은 연구가 진행되고 있다[1-4].

중소형 전동기기 적용에 있어서 고효율과 더불어 가

* 주저자 : 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수

** 교신저자 : 삼성전기 중앙연구소 책임연구원

Tel : 055-751-3385, Fax : 055-751-3389

E-mail : sgoh@jinju.ac.kr

접수일자 : 2010년 8월 18일

1차심사 : 2010년 8월 20일, 2차심사 : 2010년 10월 4일

심사완료 : 2010년 10월 26일

격경쟁력을 갖추어야 한다. SRM은 고정자 극과 회전자 극의 다양한 조합이 가능하여 인버터의 가격을 낮출 수 있어 2상 혹은 단상 SRM으로 중소형 전동기를 만들고 있다. 2상 SRM의 대표적인 극의 조합은 4/2이나 최근에 6/3, 6/9가 연구되고 있다[5-7].

본 논문에서는 3가지 형태의 2상 SRM을 가장 일반적인 SRM인 3상 6/4 SRM과 전동기 각 부분의 자속을 비교 해석하고 있다.

2. SRM의 스위칭 특성 비교

SRM은 톨릭턴스 토크를 최대로 활용하기 위하여 고정자와 회전자 모두 2중 돌극형 구조를 채택하고 있는 가변 톨릭턴스 전동기이다. SRM은 고정자에만 집중권으로 권선이 감겨져 있고 회전자에는 권선이나 영구자석이 없고 철심을 적층만한 간단한 전자기적 구조를 가지고 있다. 전동기의 토크는 톨릭턴스가 최소로 되는 방향, 즉 여자되는 상권선의 인덕턴스가 최대가 되는 방향으로 발생한다[1-2].

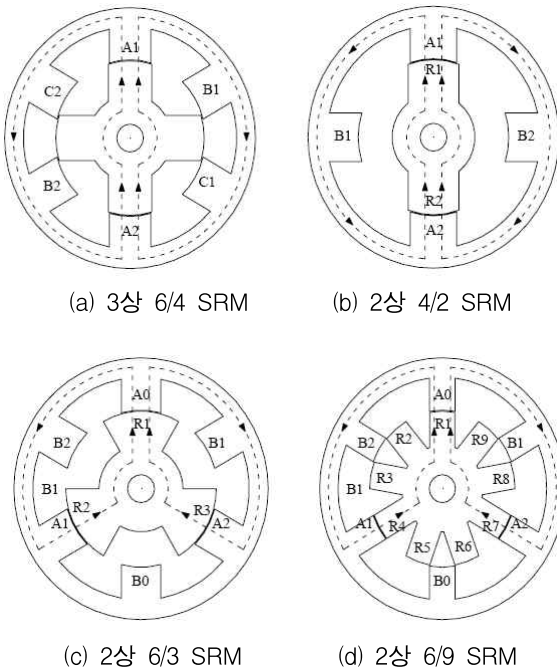


그림 1. 다양한 SRM의 자기구조
Fig. 1. Magnetic constructions of various SRMs

SRM은 전력을 공급하는 스위칭 인버터, 회전자 위치를 검출하는 엔코더, 그리고 스위칭 신호를 만드는 제어부 등으로 구성된 구동기구이다.

그림 1은 대표적인 SRM인 3상 SRM과 2상으로 개발되는 3가지 형태의 2상 SRM을 보여주고 있다. 그림 1에서 고정자 극과 회전자 극의 조합은 각각 3상 SRM은 6/4, 2상 SRM은 4/2, 6/3, 6/9이다.

일반적으로 SRM에서 한 상의 스위칭 주파수는 식 1과 같다[7].

$$f_{ph} = P_r \frac{\omega}{60} \quad (1)$$

여기서 P_r 은 회전자 극수이고 ω 는 회전자속도[rpm]이다. 그리고 전체 스위칭 주파수 f_s 는 다음과 같다.

$$f_s = q P_r \frac{\omega}{60} \quad (2)$$

여기서 q 는 상수이다. 또한 한 스위칭에 의해 회전자가 회전하는 각 θ_{stroke} 은

$$\theta_{stroke} = \frac{360}{q P_r} \quad (3)$$

이다. 따라서 3상 6/4 SRM 경우 1회전에 필요한 스위칭 수는 한 상당 4회, 총 스위칭 수는 12회이며 한 스위칭당 회전자의 회전각은 30° 이다. 표 1은 각 SRM의 스위칭에 대한 비교를 보여주고 있다.

표 1. 스위칭 펄스에 대한 SRM의 비교
Table 1. Comparison of SRMs for switching pulses

	상수	고정자 극수, P_s	회전자 극수, P_r	펄스/상당회전	펄스/회전	θ_{stroke}
6/4	3	6	4	4	12	30
4/2	2	4	2	2	4	90
6/3	2	6	3	3	6	60
6/9	2	6	9	9	18	20

표 1에서 보듯이 고정자 극수와 회전자 극수의 조합에 따라 1회전하는데 필요한 각 상당 펄스 수가 달라짐을 알 수 있다. 이러한 펄스 수에 따라 고정자와 회전자의 자속통로에서의 자속분포도 달라짐을 알 수 있다.

일반적인 SRM은 한 번 여자할 때 대칭위치에 있는 고정자의 2개의 극이 여자하는데 반해 2상 6/3, 6/9 SRM은 한번 여자할 때 3개 고정자 극에서 여자되며 구동에 사용되는 컨버터는 그림 2에서 보여주고 있다 [5-7]. 각 상권선은 고정자 주극의 권선 W_m 과 고정자 보조극에 있는 병렬로 연결된 두 개의 보조권선 W_s 와 직렬로 연결되어 있다.

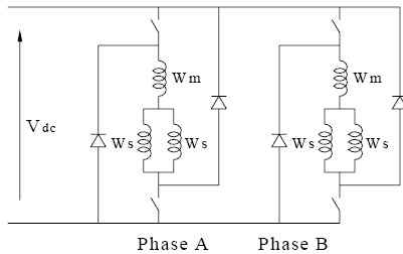


그림 2. 2상 6/3, 6/9 SRM의 비대칭 브리지 컨버터
Fig. 2. Asymmetric bridge converter for 2 phase 6/3, 6/9 SRM

3. SRM의 자속분포 특성 비교

SRM의 권선에 스위칭에 의해 전력이 인가되어 만들어진 자속은 자속통로를 통해 흐르는데 고정자 극수와 회전자 극수의 조합, 스위칭 순서, 등에 따라 자기회로의 자속분포가 달라진다[1-2,5-6]. 이러한 자속분포의 해석을 위해서 고정자와 회전자의 극과 요크에서의 각 부분을 3상 6/4 SRM과 2상 4/2, 6/3, 6/9 SRM과 비교 분석한다.

3.1 SRM 극에서의 자속분포 비교

SRM의 고정자와 회전자 극에서의 자속분포는 그림 3과 4에서 각각 보여주고 있다. 그림 3은 다양한 고정자 극수/회전자 극수의 고정자 극에서 자속이 한 방향으로만 흐르는 것을 알 수 있다. 그리고 표 1에서와 같

이 6/4 SRM은 3상이기 때문에 전 주기의 1/3동안, 나머지는 2상이어서 1/2 동안 자속이 흐르는 것을 알 수 있다.

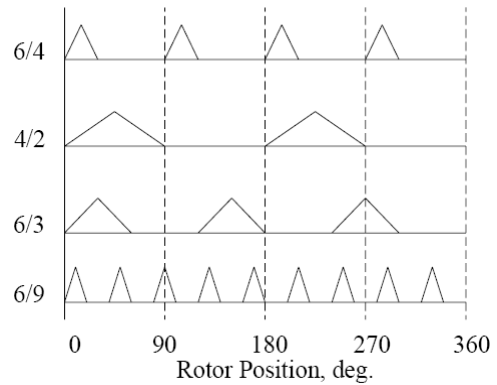


그림 3. 고정자 극에서의 자속분포
Fig. 3. Flux distribution on stator pole

그림 4는 회전자 극에서의 자속분포이며 회전자가 회전하면서 주기적으로 자속이 교번됨을 알 수 있다. 다만 6/3, 6/9 SRM은 그림 1과 2에서 보듯이 자속통로에 있는 고정자와 회전자의 한 극은 주자극으로 이용되고 나머지 두 극은 보조자극을 통하여 병렬로 자속이 흘러 자속의 크기가 절반이 된다. 따라서 한 번은 전 자속이, 두 번은 절반의 자속이 흐름을 알 수 있다.

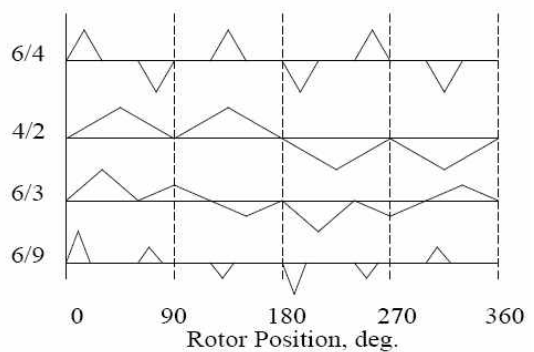


그림 4. 회전자 극에서의 자속분포
Fig. 4. Flux distribution on rotor pole

3.2 고정자 요크에서의 자속분포 비교

고정자의 각 요크부분에서의 자속분포는 그림 5, 6

2상 SRM의 비교에 관한 연구

에서 보여주고 있다. 그림 5는 그림 1의 고정자 요크 부분 6/4 SRM의 A1C2, 4/2 SRM의 A1B2, 6/3 SRM의 A0B1, 6/9 SRM의 A0B1에서의 자속분포를 각각 보여주고 있다. 이 부분은 전부 자속의 방향이 변하지 않는 부분이며 6/4 SRM과 4/2 SRM은 연속적으로 자속이 발생하지만 6/3 SRM과 6/9 SRM은 번갈아 반주기만 자속이 흐르는 모습을 보여주고 있다.

그림 6은 그림 1의 고정자 요크부분 6/4 SRM의 A1B1, 4/2 SRM의 A1B1, 6/3 SRM의 A1B2, 6/9 SRM의 A1B2에서의 자속분포를 각각 보여주고 있다.

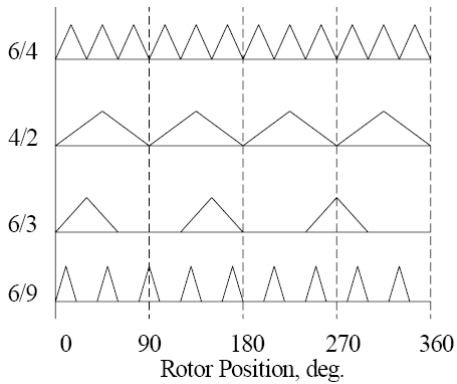


그림 5. 고정자 요크에서의 자속분포
Fig. 5. Flux distribution on stator yoke(6/4 A1C2, 4/2 A1B2, 6/3 A0B1, 6/9 A0B1)

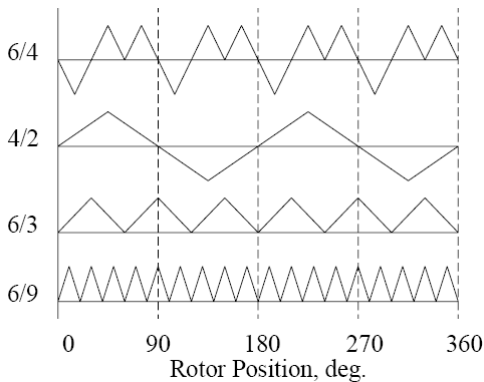


그림 6. 고정자 요크에서의 자속분포
Fig. 6. Flux distribution on stator yoke(6/4 A1B1, 4/2 A1B1, 6/3 A1B2, 6/9 A1B2)

이 부분은 6/4 SRM과 4/2 SRM은 자속의 교번을 보여주고 있다. 특히 6/4 SRM은 그림 5와 같이 자속

이 교번하지 않는 부분은 고정자 전체 요크부분의 1/3 부분이고 나머지 2/3부분은 그림 6과 같이 자속의 교번이 일어난다. 그림 5, 6에서 보듯이 2상 6/3, 6/9 SRM은 고정자 요크 전체에서 자속의 교번이 일어나지 않아 철손을 줄여 효율을 높이는데 유리하다.

Table 2. Comparison of SRMs for flux
표 2. 자속에 대한 SRM의 비교

	상수	스위칭시 사용된 극수	자속교번 여부	스위칭 주파수 [P.U]	자로길이 [P.U]
6/4	3	2	Yes	1	1
4/2	2	2	Yes	1/3	1
6/3	2	3	No	1/2	2/3
6/9	2	3	No	3/2	2/3

표 2는 자료에 대한 SRM을 비교하고 이때 3상 6/4 SRM을 기준으로 하여 P.U(Per Unit)로 비교한 결과이다. 표에서 보듯이 2상 6/3, 6/9 SRM은 한 스위칭에 3개의 고정자가 작용하여 그림 3과 같이 자속이 병렬 회로로 동작하여 자로 길이가 3상 6/4 SRM보다 짧고 고정자에서 자속 교번도 없어 효율 측면에서 우수한 성능을 보인다. 특히 2상 6/3 SRM은 3상 6/4 SRM보다 스위칭에 필요한 주파수도 작아 전체 시스템의 효율적인 측면에서 우수한 특성을 가지고 있다.

3.3 회전자 요크에서의 자속분포 비교

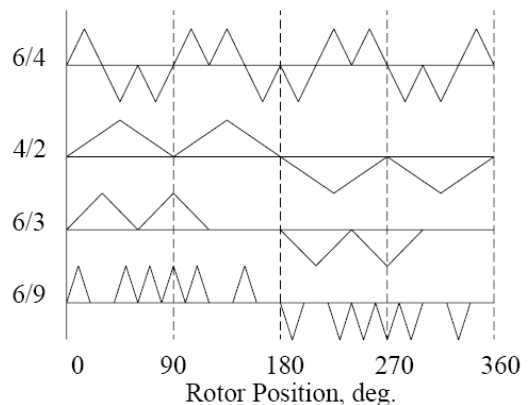


그림 7. 회전자 요크에서의 자속분포
Fig. 7. Flux distribution on rotor yoke

SRM의 회전자 요크에서의 자속분포는 그림 7에서 보여주고 있다. 그림에서 보듯이 회전자 요크에서는 모든 SRM이 자속의 교번이 일어난다. 그러나 자속이 교번이 되는 주기는 상수에 따라 달라짐을 알 수 있다. 6/4 SRM은 3상이므로 1회전에 3번의 자속 교번이 일어나고 나머지 2상 SRM은 1회전에 2번의 자속 교번이 일어난다. 또한 2상 6/3, 6/9 SRM은 한 번의 스위칭에 3개의 고정자 극이 작용하고 또한 자로도 병렬회로로 구성되어 있고 자로 길이도 표 2와 같이 2/3 정도여서 자속이 안 흐르는 구간이 있다.

4. 결 론

SRM은 견고한 전자기 구조와 간단한 인버터를 구성할 수 있어 중소형 전동기 부분에서 많은 연구가 이루어지고 있다. 특히 2상 SRM 경우 인버터를 보다 간단히 구성할 수 있어 가격 경쟁력이 높다.

본 논문에서 SRM의 대표적인 3상 6/4 SRM과 3가지 형태의 2상 SRM을 스위칭 특성과 고정자와 회전자 각 부분의 자속 분포 특성을 비교하였다. 스위칭 특성에 있어서는 4/2 SRM이 스위칭 주파수가 가장 적으며 6/9 SRM은 4/2 SRM보다 4배 이상 스위칭 주파수가 높아 스위칭 손실이 많이 발생할 것으로 생각된다. 그러나 고정자 극이 6개인 두 가지 형태의 2상 6/3, 6/9 SRM은 고정자 전 부분에서 자속의 교번이 없고 자속의 통로도 다른 SRM의 2/3정도로 짧아 철손이 현저히 작아 SRM 드라이브 시스템 전체 효율을 높일 수 있어 중소형 전동기 부분에서 높은 경쟁력을 갖는다.

감사의 글

본 논문은 2010년 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] P.J.Lawrenson, J.M.Stephenson, P.T.Blenkinsop, J.Corda and N.N.Fulton ; "Variable-speed switched reluctance motors," Proc. IEE, Vol.127, Pt-B, No.4, pp.253-265, 1980.
- [2] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, 2001.
- [3] Hassan Moghbelli, Gayle E.Adams and Richard G.Hoft ; "Performance of 10-Hp Switched Reluctance Motor and Comparison with Induction Motors," IEEE Trans. on IA, Vol.27, No.3, pp.531-538, 1991.
- [4] Y. Hayashi and T.J.E. Miller, A New Approach to Calculating Core Losses in the SRM, "IEEE Trans. on IA, Vol.31, No.5, pp.1039-1046, 1995.
- [5] Keunsoo Ha, Cheewoo Lee, Jaehyuck Kim, Krishnan, R., Seok-Gyu Oh, "Design and Development of Low-Cost and High-Efficiency Variable-Speed Drive System With Switched Reluctance Motor", IEEE Trans. on IA, Vol.43, No.3, pp703 - 713, May/june 2007.
- [6] Seok-Gyu Oh, Krishnan, R., "Two-Phase SRM with Flux-Reversal-Free Stator : Concept, Analysis, Design, and Experimental Verification", IEEE Trans. on IA, Vol.43, No.5, pp1247 - 1257, Sep./Oct. 2007.
- [7] 이치우, 오석규 "자기동이 가능한 2상 SRM의 자기적 특성에 관한 연구", 한국조명.전기설비학회 논문지, Vol.22, No.9, pp.47-54, 2008.9.

◇ 저자소개 ◇



오석규(吳錫奎)

1967년 6월 2일생. 1991년 부산대 전기공학과 졸업. 1993년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1994년 현대중공업 사원. 2004년 8월~2006년 2월 미국 Virginia Tech. 전기공학과 방문교수. 1998년~현재 경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과 교수.



이치우(李致雨)

1972년 10월 14일생. 1996년 부산대 전기공학과 졸업. 1998년 부산대 전기공학과 대학원 졸업(석사). 2010년 Virginia Tech 전기공학과 대학원 졸업(박사). 1998~2003년 LG Electronics 선임연구원. 2010년 1월~2010년 5월 Ramu Inc (USA) senior engineer. 2010년 7월~현재 삼성전기 중앙연구소 책임연구원.