

고정자에서 자속의 교변이 없는 2상 SRM의 특성에 관한 연구

오석규
진주산업대학교

The Study of Two Phase SRM with No-Flux Reversal in the Stator

Seok-Gyu Oh
Jinju National University

Abstract - Cost reduction requires lowering number of power devices used in the converter driving SRM. This is quite feasible in SRM drive systems than in other drive systems. This paper deals with design, analysis, and simulation of such a novel two phase SRM. A novel two phase SRM has high performance, self-starting capability, high efficiency, and low manufacturing cost. Additionally, the stator back iron does not experience any flux reversal as the flux is in the same direction whether phase A or B is excited leading to a greater reduction in core losses. The magnetic analysis and design considerations of the novel two phase SRM have been obtained by the finite element analysis (FEM). Experimental verification of the machine design is provided to correlate with analysis and simulation studies.

1. 서 론

Switched Reluctance Motor(SRM)는 브러쉬리스 타입의 가변속 전동기구로서 어떠한 형태의 권선이나 영구자석이 없는 돌극형의 회전자를 가지고 힐력던스 토크로 구동되는 가장 간결한 전자기 구조를 가지고 있다. SRM은 이러한 간결하고 강인한 자기적 구조를 가지고 고효율, 고토크, 넓은 운전능력, 그리고 간단한 자기회로 구성 등의 장점으로 활발히 다양한 분야에 적용되고 있다.^[1,2]

가격경쟁력을 갖추기 위해서 SRM에 구동에 사용되는 전력 스위치 소자의 수를 줄이는 것이 필요하다. SRM은 이런 면에서는 다른 구동시스템보다 유연하다. SRM은 고정자극과 회전자극의 다양한 조합이 가능하여 단상 혹은 2상 SRM의 구성으로 소형전동기 분야에 적용이 검토되고 있다. 소형 전동기 분야에서는 지금까지 직류전동기가 주종을 이루고 있었으나 직류전동기의 약점인 브러쉬 문제로 인하여 점차적으로 시장에서 사라지고 있는 실정이다. 이를 대체하기 위해 다양한 소형전동기가 개발되고 있고 그 중에는 가변속 유도전동기, BLDC 전동기가 이용되고 있다. 그러나 이들은 3상 인버터를 사용하기 때문에 스위치 소자가 6개가 사용되고 있다. 그러나 SRM을 소형전동기용으로 사용하면 단상 혹은 2상으로 동작시킬 수 있다. 단상은 스위치가 하나 혹은 두 개 이상은 3개 혹은 4개를 사용할 수 있다. 따라서 전동기 제작비가 비슷하다면 인버터의 제작비용은 SRM이 상당히 낮출 수 있다.

일반적인 SRM은 고정자에 권선을 감고 각 상이 독립되어 있어 각 고정자 권선을 제어할 수 있다. 4상의 8/6 SRM(고정자극 8, 회전자극 6), 3상의 6/4 SRM(고정자극 6, 회전자극 4)와 12/8 SRM(고정자극 12, 회전자극 8), 2상의 4/2 SRM(고정자극 6, 회전자극 4), 단상의 6/6 SRM(고정자극 6, 회전자극 6)과 같은 고정자와 회전자극의 조합으로 사용되고 있다. 일반적으로 m 개의 고정자와 n 개의 회전자극을 가진 SRM에서 m/n 비가 정수

이면 토크가 발생하지 않는 특이 위치를 가진다. 위의 고정자극과 회전자극의 조합중 2상 4/2 SRM과 단상 6/6 SRM이 이에 해당한다. 단상 6/6 SRM은 기동을 위해 장치를 필요로 하고 또한 토크 리플이 큰 단점이 있다. 그리고 2상 4/2 SRM은 기본적으로 자기동을 할 수 있으나 자기회로를 변형하는 방법으로 자기동을 할 수 있다. 그러나 이 방법은 전동기의 성능을 저하시키는 단점을 가지고 있어 실제 적용하는데 어려움이 있다.^[2]

본 논문에서 제시하는 2상 6/3 SRM은 고정자 철심에서 자속의 교변이 없고 자속의 통로길이가 다른 SRM에 비해 2/3정도로 짧아 고정자 철손이 작고 SRM의 가장 큰 단점 중에 하나인 소음진동 문제도 상당 부분 줄일 수 있다. 또한 실제 적용함에 있어서 큰 장애가 되는 기동능력이 없는 문제는 비대칭 회전자 구조를 갖도록 함으로써 해결할 수 있었다. 제시한 2상 6/3 SRM에 대해 자기적 구조를 해석하고 이를 증명하기 위해 유한요소법에 의한 시뮬레이션으로 특성을 분석하였다.

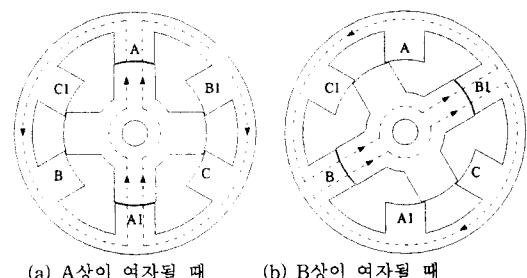
2. 고정자에서의 자속분포 해석

본 논문에서 제시한 2상 6/3 SRM는 고정자극이 6개, 회전자극이 3이며 한 상이 여자될 때 3개의 고정자극이 각각 여자된다. 이때 고정자에서의 자속분포는 다른 일반적인 SRM과는 달리 자속이 극성이 바뀌는 자속교변이 일어나지 않는다.^[3]

본장에서는 3상 6/4 SRM, 2상 4/2 SRM 그리고 2상 6/3 SRM의 고정자에서 자속분포를 비교 분석하였다.

2.1 3상 6/4 SRM의 자속분포

일반적으로 가장 많이 사용되고 있는 3상 6/4 SRM에서 한상씩 여자되었을 때 자속의 통로를 그림 1에서 보여주고 있다.



(a) A상이 여자될 때 (b) B상이 여자될 때

그림 1. 3상 6/4 SRM의 자속의 통로

Fig. 1. Flux path for 3 phase 6/4 SRM

그림 1에서 볼 수 있듯이 3상 6/4 SRM은 한상당 회전자가 30°씩 이동하고 그에 따라 자속 통로도 바뀌게

된다. 그림 2는 이때의 자속 분포를 보여주고 있다. 그림 2에서 각상이 중첩이 되지 않는다고 가정하였고 AC1은 그림 1에서 고정자극 A와 C1 사이의 고정자 철심(back iron)에서의 자속 분포를 의미한다. 자속은 병렬회로로 자속 통로는 2개이어서 고정자 요크에서의 자속은 고정자극에서의 자속의 절반이다. AC1(A1C)에서의 자속은 교번이 없으나 AB1(B1C, A1B, BC1)은 자속의 교번이 이루어지고 있음을 알 수 있다.

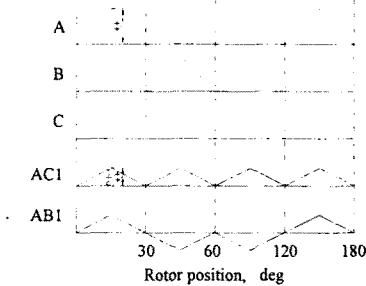


그림 2. 3상 6/4 SRM의 자속 분포

Fig. 2. Flux distribution for 3 phase 6/4 SRM

2.2 2상 4/2 SRM의 자속분포

일반적으로 2상 SRM은 고정자극이 4개이고 회전자극이 2개인 4/2 SRM이 많이 사용된다. 그림 3은 2상 4/2 SRM에서 A상과 B상이 각각 여자되었을 때 자속 통로를 보여주고 있다. 2상 4/2 SRM의 한상이 여자되었을 때 회전자극은 90°씩 회전하고 있다.

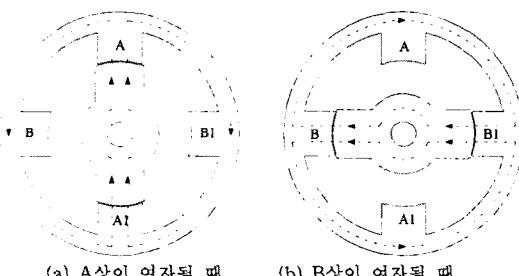


그림 3. 2상 4/2 SRM의 자속의 통로

Fig. 3. Flux path for 2 phase 4/2 SRM

그림 4는 그림 3에서 보듯이 2상 4/2 SRM의 각상이 여자되었을 때 고정자 요크 부분의 자속 분포를 보여주고 있다. AB1(A1B) 부분은 자속이 교번되지 않는 부분이며 AB(A1B1)은 자속이 교번함을 알 수 있다.

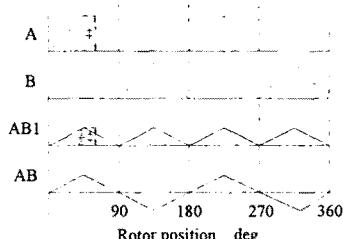


그림 4. 2상 4/2 SRM의 자속 분포

Fig. 4. Flux distribution for 2 phase 4/2 SRM

2.3 2상 6/3 SRM의 자속분포

4/2 SRM과 달리 고정자극에서 자속 교번이 없는 새로운 형태의 2상 SRM은 그림 5에서 보는 바와 같이 고정자극이 6개, 회전자극이 3개인 6/3 SRM이다.

2상 6/3 SRM에서 A상이 여자할 때 자속은 고정자 주자극 A0와 2개의 보조자극 A1과 A2를 통과한다. 지금까지의 일반적인 SRM은 한상이 여자될 때 마주보는 두 개의 고정자극을 통해 자속 통로가 형성되고 있다. 그러나 2상 6/3 SRM은 3개의 고정자극을 통과하며 자속 통로길이도 다른 SRM의 2/3으로 짧음을 알 수 있다. 이것은 또한 자속통로의 릴럭턴스가 작아 여자하는데 있어 장점이 되고 철손이 줄일 수 있다.

2상 6/3 SRM은 한상이 여자할 때 회전자는 60°씩 이동한다. 그림 5에서 보듯이 보조극은 주자극의 자속의 절반인 흐름을 알 수 있다. 따라서 이론적으로는 보조극의 국호를 주자극의 절반으로 줄일 수 있다. 이것으로 인하여 권선을 감을 수 있는 공간을 더 많이 얻을 수 있고 다른 6/4, 8/6 SRM에 비해 고정자철심을 절약할 수 있다.

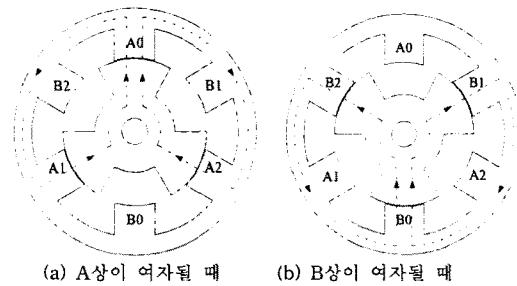


그림 5. 2상 6/3 SRM의 자속의 통로

Fig. 5. Flux path for 2 phase 6/3 SRM

그림 6은 2상 6/3 SRM의 자속분포를 보여주고 있다. 한상이 여자할 때 전체 자속 통로의 2/3만을 사용하기 때문에 그림에서와 같이 A0B2(A0B1, B0A1, B0A2)는 두상 중 한상만 자속이 통과하고 다른 상일 때는 자속이 없음을 보여주고 있다. 그리고 그 외 부분인 A1B2(B1A2)는 그림에서와 같이 교번이 없는 자속 패턴을 보여주고 있다. 위와 같이 두가지 특징은 고정자에서 항상 자속이 흐르고 또한 교번이 있는 부분을 가지는 다른 일반적인 SRM에 비해 철손을 많이 줄일 수 있음을 보여주고 있다. 철손은 자속밀도, 주파수 등에 비례하는 것이다.

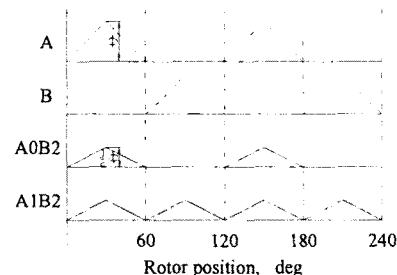


그림 6. 2상 6/3 SRM의 자속 분포

Fig. 6. Flux distribution for 2 phase 6/3 SRM

일반적인 SRM은 방사방향의 힘은 정 반대 방향으로 작용하여 고정자의 형상의 왜곡을 가져오고 이는 소음과 진동의 직접적인 원인이 되고 있다. 그러나 2상 6/3 SRM은 그림 5와 같이 한상이 여자될 때 고정자극이 3개가 여자됨으로 방사방향의 힘이 3방향으로 작용하여

고정자 형상의 왜곡을 완화시켜 소음 진동을 저감 시키는 효과를 가진다.^[4]

3. 2상 6/3 SRM의 특성 해석

소형 가변속 전동기구는 성능뿐만 아니라 가격경쟁력이 중요한 요인 중에 하나로 인식되고 있다. SRM을 소형 전동기로서 적용할 때 가격경쟁력 측면에서 보면 단상이나 2상이 적합하다. 그러한 이유로 전력용량이 비교적 작은 가정용 전동기구에는 거의 단상 혹은 2상 SRM이 연구되고 있다. 그러나 단상 SRM은 근본적으로 발생 토오크가 불연속적이여서 운전특성이 떨어지고 자기동발력이 없어 기동을 위한 보조적인 장치가 항상 필요로 한다. 또한 2상 SRM은 연속적인 토오크를 만들 수 있으나 기동에 관해서는 아직도 많은 문제점을 앓고 있다. 본장은 자기동발력을 갖는 상 6/3 SRM의 특성해석을 하였으면 특성 해석을 위해 FEM 해석프로그램인 FLUX2D를 사용하였다.

3.1 2상 6/3 SRM의 자기동발력

2상 6/3 SRM은 비대칭 회전자 구조를 가짐으로서 운전성능의 손실 없이 자기동이 가능하다. 2상 6/3 SRM의 기본적인 구동원리를 설명하기 위한 이상적인 인덕턴스를 그림 7에서 보여주고 있다. 그림 7의 2상 6/3 SRM은 고정자 주자극 극호는 30° , 고정자의 보조극 극호는 15° 이고 회전자극 극호는 60° 를 각각 가지고 있다. 그리고 회전자극은 공극의 길이가 일정한 부분과 공극이 절차로 나누어져 있는 부분으로 나눌 수 있다. 회전자극의 비대칭 구조는 자기동을 가능케 한다. A상의 경우 30° 에서 고정자 주자극과 회전자극이 만난 이후에 인덕턴스는 상승함을 알 수 있다. 그리고 상승구간의 적절한 중첩을 통하여 연속적인 토오크를 생산할 수 있다. 또한 반대방향으로 회전은 가능하지 않는 단방향의 회전만 하는 단점이 있음을 알 수 있다.

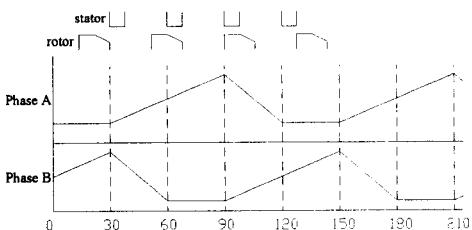


그림 7. 2상 6/3 SRM의 이상적인 인덕턴스
Fig. 7. Ideal inductance of 2 phase 6/3 SRM

3.2 2상 6/3 SRM의 인덕턴스와 토오크 특성

SRM에서의 토오크 특성은 전류의 함수로서 자속쇄교수와 회전자의 위치에 따라 달라진다. 토오크는 전류의 제곱과 인덕턴스의 기울기에 의해 발생된다. 따라서 토오크의 방향은 전류의 방향과는 관계가 없으며 인덕턴스의 기울기에 따라 달라진다.

그림 8은 회전자 위치와 전류에 따른 인덕턴스와 토오크를 보여주고 있다. 이때 고정자 주자극 극호는 30° 이며 회전자의 극호는 60° 이다. 그리고 회전자의 극호는 일정한 공극부분과 일정치 않은 공극부분이 각각 30° 로 구성되어 있다. 여기서 볼 수 있듯이 인덕턴스 증가구간은 약 60° 이고 하강구간은 약 30° 이다. 따라서 인덕턴스 상승구간에서 전류를 흘리게 되면 정방향의 토오크를 얻을 수 있다.

두상에 의한 토오크발생은 그림 8(b)에서 보여주고 있다. 이때 여자된 권선전류는 2[A]이다. 정방향토오크

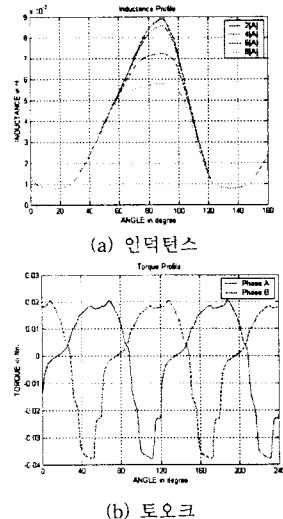


그림 8. 2상 6/3 SRM의 인덕턴스와 토오크
Fig. 8. Inductance and torque for 2 phase 6/3 SRM

는 역방향 토오크의 절반이다. 이는 인덕턴스가 상승하는 구간이 인덕턴스가 하강하는 구간의 2배이기 때문이다. 그림 8(b)에서 볼 수 있듯이 어느 회전자 위치에서 자기 기동을 할 수 있으면 또한 기동토오크를 크게 하기 위해 회전자극호를 조정하여 각상이 중첩이 되게 하여 기동 토오크를 크게 할 수 있다.

4. 결 론

소형 전동기 분야에서 가격경쟁력을 갖추기 위해서 SRM에 구동에 사용되는 전력 스위치 소자의 수를 줄이는 것이 필요하다. SRM은 이런 면에서는 다른 구동시스템보다 유연하다. SRM은 고정자극과 회전자극의 다양한 조합이 가능하여 단상 혹은 2상 SRM의 구성으로 소형 전동기 분야에 적용이 검토되고 있다.

본 논문에서 고정자에 자속의 교번이 없는 2상 6/3 SRM의 특성을 해석하였다. 다른 SRM과 달리 제한된 2상 6/3 SRM은 고정자에서 자속의 교번이 없고 자속의 통로로 다른 SRM의 2/3정도로 짧아 철손이 현저히 작아진다. 또한 2상 SRM의 가장 큰 단점인 자기동 문제를 비대칭 회전자 구조를 채택함으로써 고성능 특성과 간단한 인버터 구성으로 저가의 제작비를 필요로 하는 소형전동기에 적합함을 확인할 수 있었다

[참 고 문 헌]

- [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] 안진우, 스위처드 릴럭턴스 전동기, 오성미디어, 2000.
- [3] Seok-Gyu Oh and Krishnan, R. : "Two Phase SRM With Flux Reversal Free Stator: Concept, Analysis, Design and Experimental Verification" Proc. of IAS2006, Vol.3, pp.1155-1162, Oct 2006.
- [4] Keunsoo Ha, Cheewoo Lee, Jaehyuck Kim, Krishnan, R. and SeokGyu Oh ; "Design and Development of Low-Cost and High-Efficiency Variable-Speed Drive System With Switched Reluctance Motor" IEEE Trans. on IA, Vol.43, pp.703-713, May-june 2007