

Analysis and Improvement for Single 6/6 SRM with a Saturable Area

Seok-Gyu Oh*

Dept. of Mechatronics Engineering, GNTech, Jinju 52725, Korea

(Received 23 March 2017, Received in final form 16 April 2017, Accepted 17 April 2017)

Single-phase SRM is cost competitive because it can reduce the number of switches for small, low-cost applications. However, since the single-phase SRM is difficult to start itself, methods for realizing self-starting by using auxiliary magnet or auxiliary pole have been studied. Recently, a method of self-starting by changing the shape of the rotor with a saturable area has been proposed. The purpose of this paper is to analyze the magnetic structure of single phase 6/6 SRM with a saturable rotor and to improve the magnetic structure of rotor with a saturable area. For this magnetic analysis, FLUX2D, a finite element method analysis program, was used.

Keywords : single-phase SRM, self-starting, the shape of the rotor, saturation area

자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 자기 구조 해석 및 개선

오석규*

경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과, 경남 진주시 동진로 33, 52725

(2017년 3월 23일 받음, 2017년 4월 16일 최종수정본 받음, 2017년 4월 17일 게재확정)

단상 SRM은 자기동이 어려운 관계로 다양한 방법으로 자기동을 실현시키려는 연구가 진행되고 있다. 보조자석을 사용하거나 보조극 등을 만들어 자기동을 실현시키는 방법들이 연구되고 있다. 최근에 회전자 형상에 변화를 주어 기동할 수 있는 방법이 제시되었다. 이는 회전자 형상에 변화를 주어 부분적으로 자기포화 정도를 다르게 하여 자기동을 실현하는 방식이다. 본 논문에서는 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 자기구조를 해석하고 기존의 자기구조를 개선하는 것을 목적으로 한다. 이 자기 해석을 위해 유한요소법 해석 프로그램인 FLUX2D를 사용하였다.

주제어 : 단상 SRM, 자기동, 회전자 형상, 자기 포화 영역

I. 서 론

최근에는 가정용이나 산업용에서도 다기능, 자동화, 고효율화 등에 대한 요구가 많아짐에 따라 가변속 전동기기의 중요성이 증대하고 있다. 가변속 전동기기의 많은 부분을 직류전동기가 그 역할을 하였으나 브러쉬에 대한 문제 등으로 사용이 제한됨으로 다양한 가변속 전동기들이 그 역할을 대신하게 되었다. 가변속 전동기 중에는 전자기 구조가 간단하며 고효율 운전이 가능한 SRM(Switched Reluctance Motor)에 대한 관심이 증대되고 있다[1-3].

SRM은 고정자에는 집중권으로 된 권선이 감겨 있으며 회전자에는 영구자석이나 권선이 없는 철심으로만 구성된 간단

한 전자기적 구조를 가지고 있다. 또한 넓은 운전범위, 고속 운전, 고효율, 유연한 고정자 극수/회전자 극수의 조합 등의 장점을 가지고 있어 가변속 전동기로서 주목을 받고 있다[1-3]. 그러나 일반적인 가변속 전동기가 마찬가지로 전원을 공급하기 위해서 인버터를 이용하고 있어 저가의 응용분야에서는 인버터에 들어가는 스위치 수를 줄이는 것이 중요하다. 따라서 중소형, 저가의 응용분야에는 단상 혹은 2상 SRM이 연구 적용되고 있다[4-8]. 그러나 단상 SRM은 자기동이 어려운 관계로 보조자석을 사용하거나 보조극 등을 만들어 자기동을 실현시키는 방법들이 연구되고 있다[2, 4-6]. 최근에 발표된 연구에서 보조 자석이나 보조극의 도움 없이 기존의 회전자 형상에 변화를 주어 기동할 수 있는 방법이 제시되었다[9]. 이는 회전자 형상에 변화를 주어 부분적으로 자기포화 정도를 다르게 하여 자기동을 실현하는 방식이다.

본 논문에서는 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의

자기구조를 해석하고 기존의 자기구조를 개선하는 것을 목적으로 한다. 단 자기동을 위한 제어 전략은 그대로 따른다. 이 자기 해석을 위해 유한요소법 해석 프로그램인 FLUX2D를 사용하였다.

II. SRM 드라이브의 전자기적 구조

릴럭턴스 토오크는 자석이 쇠(강자성체)를 잡아당기는 힘을 이용하는 토오크이다. SRM은 집중권으로 감겨있는 고정자 권선에 여자하면 영구자석이나 어떠한 형태의 권선이 없는 순수한 적층된 철심으로 구성된 회전자를 잡아당기는 힘으로 구동된다[1-3]. Fig. 1은 가장 기본이 되는 고정자극이 6개, 회전자극이 4개인 3상 6/4 SRM과 인버터를 보여주고 있다. 이 인버터는 가장 일반적으로 사용되는 비대칭 인버터(Asymmetric inverter)이다[2, 3].

Fig. 1에서 보듯이 고정자에 집중권으로 감겨진 권선은 마주보는 고정자 극의 권선과 직렬로 연결되어 있다. 그리고 각 상권선은 독립적으로 인버터에 스위치와 직렬로 연결되어 있어 스위치가 단락으로 소손될 위험은 없다. 각 스위치의 제

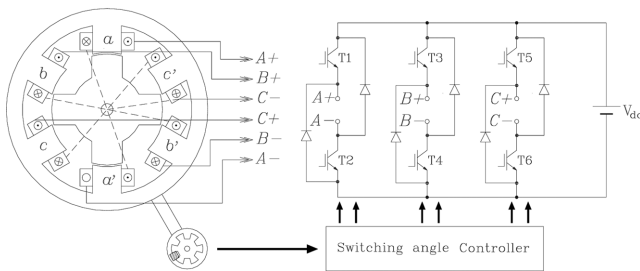


Fig. 1. The structure and asymmetric inverter of 3 phase 6/4 SRM drive.

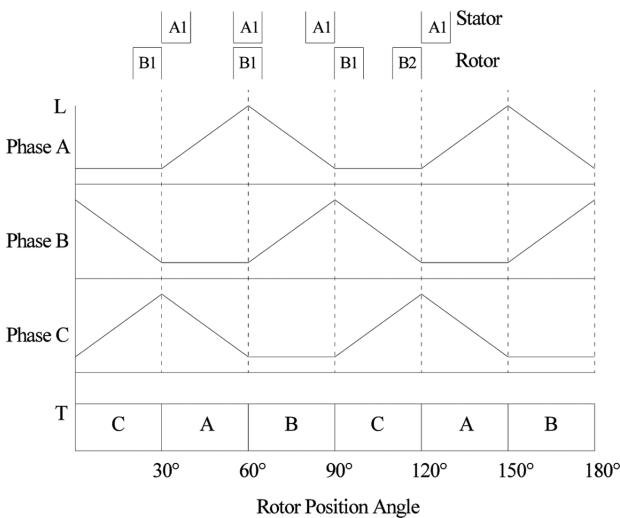


Fig. 2. Inductance and torque of three-phase 6/4 SRM.

어는 회전자의 위치에 따라 적절한 스위치 온 오프를 함으로 회전자 위치센서가 필요하다[1-3]. Fig. 2는 3상 6/4 SRM의 인덕턴스와 토오크를 보여주고 있다.

각 상의 인덕턴스, L 은 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[2, 3].

$$L = \frac{N^2}{\mathcal{R}} = \frac{N^2 \mu A}{l} \tag{1}$$

여기서, N 은 권선수, \mathcal{R} 은 자기저항(Reluctance), μ 는 투자율, A 는 자속통로의 단면적, l 은 자속통로의 길이를 각각 나타내고 있다. 따라서 회전자가 회전함으로써 각 상의 고정자 극과 회전자 극의 상대위치에 따라 Fig. 2와 같이 인덕턴스를 나타낼 수 있다. 또한 이때 각 상에 적절한 전류를 흘리게 되면 식(2)와 같이 토오크, T 가 발생한다[1-3].

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

여기서, i 는 상전류, θ 는 회전자 위치각을 각각 나타내고 있다. 따라서 연속적인 회전을 얻기 위해서는 Fig. 2와 같이 각 상을 순차적으로 스위치 온 오프 함으로써 연속적인 토오크를 얻을 수 있다.

III. 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 자기구조 해석

SRM은 다양한 고정자 극수/회전자 극수의 조합이 가능하고 다양한 상수를 가질 수 있다. 특히 단상의 경우 스위치 수를 획기적으로 줄일 수 있어 다양한 방법으로 연구되고 있으나 자기동이 불가능하다는 단점이 있다. 자기동을 하기 위해 보조 자석이나 보조 극 등을 추가하는 등의 방법이 제시되었으나 성능의 저하나 단가의 상승을 가지게 되었다[4-6].

일반적인 단상 6/6 SRM과 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 자기 구조는 Fig. 3과 같다[2, 9]. 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM는 일반적인 단상 6/6 SRM와 달리 회전자에 몇 가지 특징이 있다. 공극과 접하는 회전자극

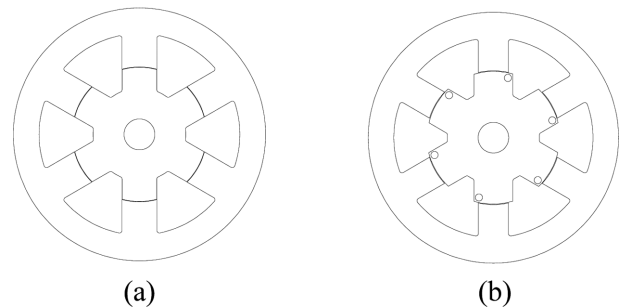


Fig. 3. Motor designs without and with a saturable area.

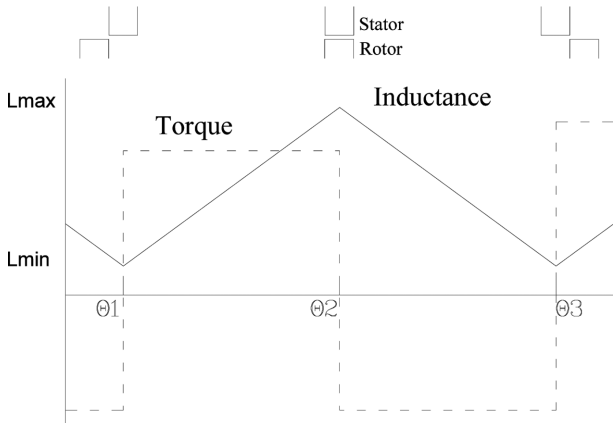


Fig. 4. Inductance and torque of single-phase 6/6 SRM.

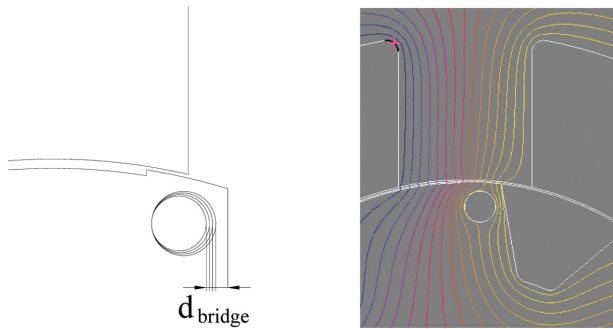
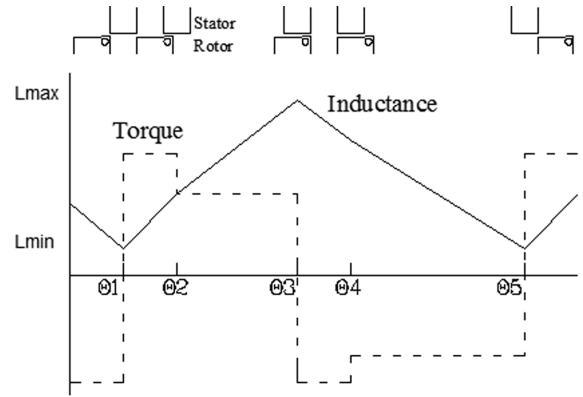


Fig. 5. (Color online) Design variation of the saturable area and flux distribution.

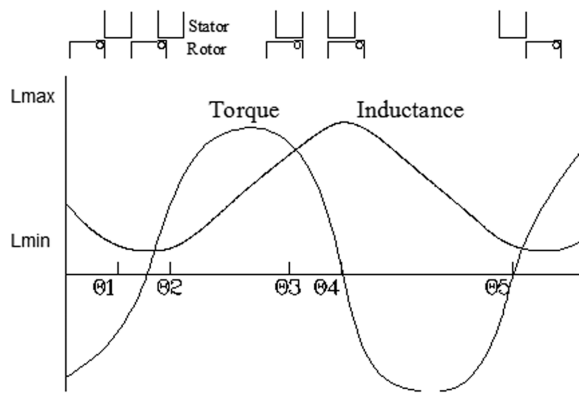
표면이 이중으로 되어 있고 회전자에 원형으로 구멍이 있다.

Fig. 4는 일반적인 단상 6/6 SRM의 회전자 위치각에 따라 인덕턴스와 토크를 보여주고 있다. 단상이기 때문에 임의의 회전자 위치에서 연속적인 토크를 발생시킬 수 없어 원하는 방향으로 회전시킬 수 있도록 보조 기동 장치가 필요하다.

Fig. 5는 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 회전자 단면과 여자하였을 때 지속분포를 보여주고 있다. 공극쪽의 회전자 극 단면이 이중으로 되어 있는 것은 낮은 전류가 흐를 때 공극이 작은 쪽으로 회전자 극이 고정자 극과 정렬하기 위함이다. 또한 회전자에 원형의 구멍은 높은 전류가 흘렀을 때 이 부분이 포화가 되어 공극이 큰 쪽보다 자기저항이 커져 공극이 큰 쪽의 회전자극을 고정자와 정렬시키기 위함이다. 또한 크기가 다른 4개의 원형의 구멍은 비선형적인 포화를 단계적으로 진행되도록 하는 좀 더 선형적으로 변화시키는 장점이 있다. 그러나 크기가 다른 원형의 구멍을 갖도록 하기 위해서는 순서대로 적층을 할 필요가 있다. 이는 제조상에 공수가 증가하여 제조원가를 상승시키는 원인이 된다[9]. 본 논문에서는 단일 형상의 회전자를 가지고 특정 전류에서 필요한 토크를 갖기 위해 회전자 구멍의 형상을 설계하고자 한다.



(a) Inductance and torque at low current



(b) Inductance and torque at high current

Fig. 6. Inductance and torque for single-phase SRM with a saturable area.

Fig. 6는 전류에 따른 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 인덕턴스를 보여주고 있다. Fig. 6(a)에서 보는 바와 같이 낮은 전류에서는 자기 포화가 없어 인덕턴스가 선형적으로 변화하기 때문에 공극이 작은 회전자 위치 theta3에서 인덕턴스가 최대값이 되어 고정자 극과 회전자 극이 정렬된다. 그리고 Fig. 6(b)의 높은 전류에서는 전체적으로 자기 포화가 많이 되고, 원형의 구멍이 있는 부분은 특히 자기 포화가 심해 자기저항이 상당히 커져 회전자 위치 theta4에서 고정자극과 회전자극이 정렬된다. 따라서 전류에 따라 정렬하는 회전자 위치가 다름을 알 수 있다. 이를 이용하여 기동을 하게 된다.

Fig. 7은 자기동을 위한 방법에 따른 회전자 위치를 보여주고 있다[9]. Fig. 7(a)는 낮은 전류가 흘렀을 때의 회전자 위치를 보여주고 있고 Fig. 6(a)에서 회전자 위치 theta3에 해당된다. 낮은 전류가 흐를 때에는 포화 현상이 나타나지 않으므로 공극이 작은 쪽으로 회전자 극이 정렬하게 된다. Fig. 7(b)는 Fig. 7(a)의 회전자 위치에서 높은 전류를 흘렸을 때, 회전자의 원형구멍이 있는 부분에서 자기 포화가 심해져 시

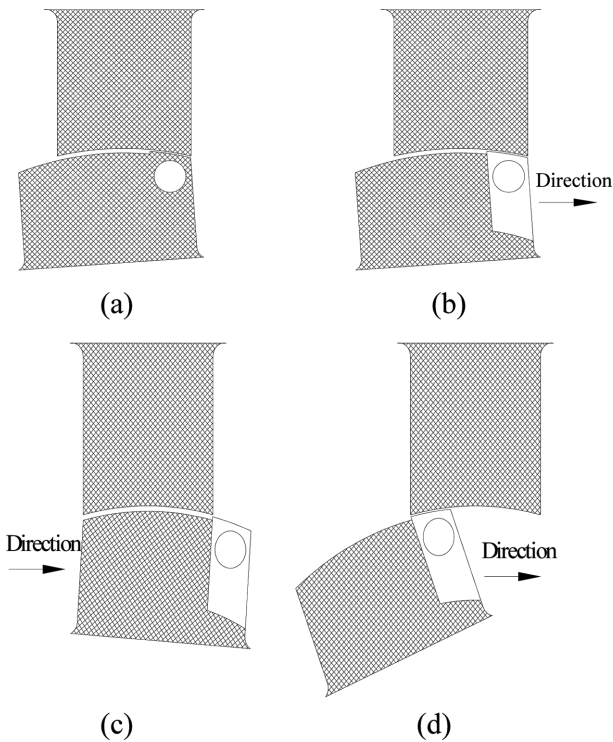


Fig. 7. Rotor positions during the basic starting strategy.

계방향으로 회전하여 최종적으로 Fig. 7(c)의 위치에서 회전자 극이 고정자 극에 정렬하고 있고 이때의 회전자 위치는 Fig. 6(b)에서 회전자 위치 θ_4 에 해당된다. 높은 전류는 포화 현상을 심화시켜 원형의 구멍으로 있는 쪽은 자기 포화가 극심하게 되고 따라서 자기저항도 크게 되어 자기 포화가 덜한 쪽으로 회전자가 정렬하게 된다. 이 과정에서 회전력이 발생하고 Fig. 7(c)의 회전자 위치에서 스위치 오프를 하면 역토크가 발생하는 회전자 위치를 지나갈 수 있다. 그런 다음 Fig. 7(d)의 회전자 위치에서 스위치 온 하면 회전자는 계속 회전할 수 있다.

이상에서 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 자기적 구조의 특징을 다음과 같이 정리할 수 있다.

1. 낮은 전류에서 자기저항을 작게 하여 구멍이 있는 쪽의 회전자 극을 고정자에 정렬하기 위해 회전자 극 표면을 이중으로 하고 원형의 구멍이 있는 쪽의 회전자 극에서의 공극이 적다.

2. 높은 전류에서 회전자의 구멍이 없는 쪽으로 회전자 극을 고정자에 정렬하기 위해 회전자의 구멍이 있는 쪽에 자기 포화가 심화되도록 회전자의 구멍을 적절히 설계하여야 한다.

3. 단계적으로 포화가 진행되도록 원형의 구멍의 크기를 가변하였다.

4. d_{bridge} 는 낮은 전류에서 자속 통로의 역할을 한다. 적절한 단면적은 높은 전류에서 자기포화를 심화시키는 역할을 한다.

IV. 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 자기구조 개선

자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 회전자 내의 구멍의 형상을 개선하기 위해서 다음과 같은 조건을 만족하여야 한다.

1. 낮은 전류에서 회전자에 자기 포화가 발생하지 않도록 자속 통로를 적절히 확보하여야 한다.
2. 높은 전류에서 충분히 자기 포화가 진행되도록 회전자 내의 구멍을 설계하여야 한다.
3. 낮은 전류에 정렬되는 회전자 위치와 높은 전류에서 정렬되는 회전자 위치의 차가 커야 한다.

회전자의 원형의 구멍을 중심으로 한 자기 포화에 관련된 자속 통로는 Fig. 5에서 보듯이 원형의 구멍의 좌측, d_{bridge} 와 구멍의 위쪽이 될 수 있다. 그러나 이와 같은 모양은 공극이 작은 부분의 절반, 즉 원형의 구멍의 좌측 부분만이 자기 포화가 진행되고 우측부분은 자기 포화가 이루어지지 않아 기동시 낮은 전류 때의 회전자 위치각과 높은 전류 때의 회전자 위치각의 차이가 크지 않을 것이다. 회전자 위치각의 차이가 클수록 기동이 수월해진다. 따라서 이 회전자 위치각의 차이를 크게 하기 위해서 자기 포화가 이루어지는 부분이 더 넓게 설계할 필요가 있다. Fig. 8은 회전자 형상을 개선하기 위한 고려한 회전자 형상을 보여주고 있다.

Fig. 8(a)는 낮은 전류에서 자기 포화가 안 되기 때문에 구멍이 없을 때나 있을 때나 거의 유사할 것으로 생각된다. 따라서 구멍이 없는 회전자는 낮은 전류에서 기준이 될 것이다. Fig. 8(b)는 하나의 원형으로 되어 있고 원 논문의 구조[9]와 유사하다. 그리고 Fig. 8(c), (d)는 본 논문에서 제안한 회전자 형상이다. 단 Fig. 8(b), (d)는 구멍의 왼쪽 통로와 위쪽 통로의 가장 좁은 부분의 단면적 크기가 같다. 그리고 Fig. 8(c)는 위쪽의 단면적이 Fig. 8(b), (d)의 구멍의 왼쪽 통로와

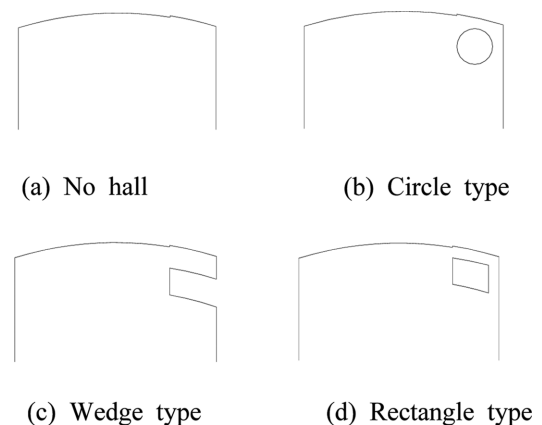
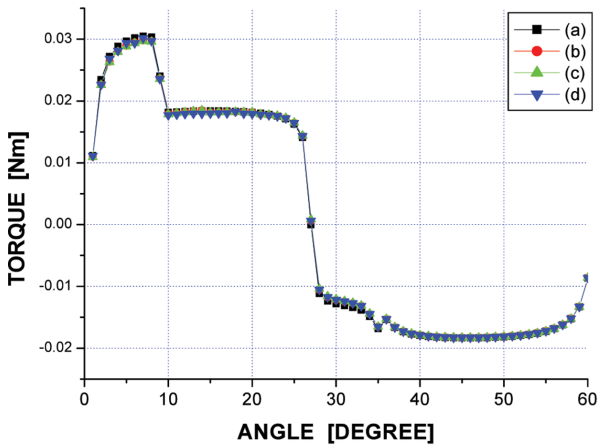


Fig. 8. Various rotor shapes.

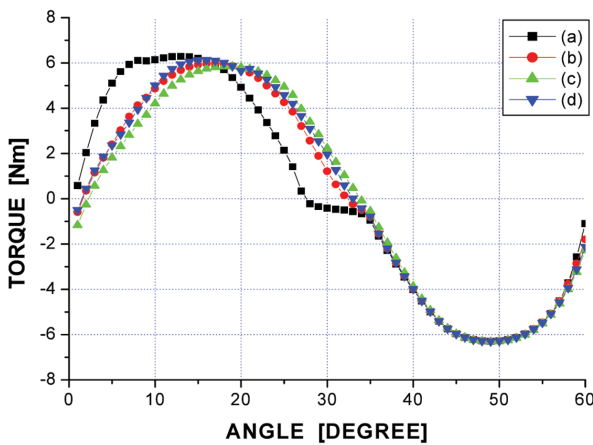
위쪽 통로의 단면적을 합한 크기를 갖고 있다. 여기서 예상할 수 있는 결과는 낮은 전류에서는 Fig. 8의 모든 회전자 자기 포화가 없기 때문에 같은 결과를 얻을 것으로 예상되며, 높은 전류에서는 Fig. 8(b), (c), (d)의 회전자에서 자속 통로의 단면적이 같기 때문에 자기 포화 정도는 거의 같을 것으로 예상되나 자기 포화되는 부분은 서로 다를 것으로 예상된다. 그리고 Table I은 시뮬레이션에 사용된 전동기의 제정수

Table I. Specifications of simulated motor.

Variable	Value
Outer diameter	98 [mm]
Rotor diameter	52 [mm]
Air gap (saturable area)	0.3 [mm]
Air gap rotor	0.4 [mm]
Stator tooth width	26°
Rotor tooth width	26°
Width of saturable area	8°
d_{bridge}	0.8 [mm]
Stack length	20 [mm]



(a) 1[A]



(b) 30[A]

Fig. 9. (Color online) Angle vs. Torque for rotors of Fig. 8.

를 보여주고 있다.

Fig. 9는 상권선에 인가한 전류가 각각 1, 30[A]일 때의 Fig. 8의 회전자에 가해지는 토오크를 보여주고 있다. Fig. 9(a)는 1[A]의 일정한 전류가 흐를 때 토오크를 보여주고 있다. 그림에서와 같이 자기 포화가 없어 거의 같은 토오크를 가지고 있다. Fig. 9(b)는 Fig. 8(a)의 토오크 외에는 자기 포화가 상당히 진행되어 거의 비슷한 형상을 보여주고 있다. 여기서 고정자 극과 회전자 극의 정렬위치 즉 토오크가 0이 되는 위치의 변화는 Fig. 8(c), (d)의 토오크가 Fig. 8(b)의 토오크보다 조금 앞서 있다.

Fig. 10은 각각의 전류에 따른 고정자 극과 회전자 극의 정렬되는 회전자 위치각의 변화를 보여주고 있다. 낮은 전류에서는 모든 회전자가 Fig. 7(a)와 같은 회전자 위치에서 정렬하고 있다. 인가하는 전류가 커질수록 Fig. 7(b)의 회전자 위치로 이동함을 알 수 있다. Fig. 9(a)의 원형의 구멍보다 Fig. 9(c), (d)의 회전자 형상이 회전자이 크을 알 수 있다. Fig. 9(c)와 (d)의 특성은 비슷하나 Fig. 9(c)는 회전자 구조 상 풍손을 증가시킬 수 있고 선형적으로 자기 포화를 시키기

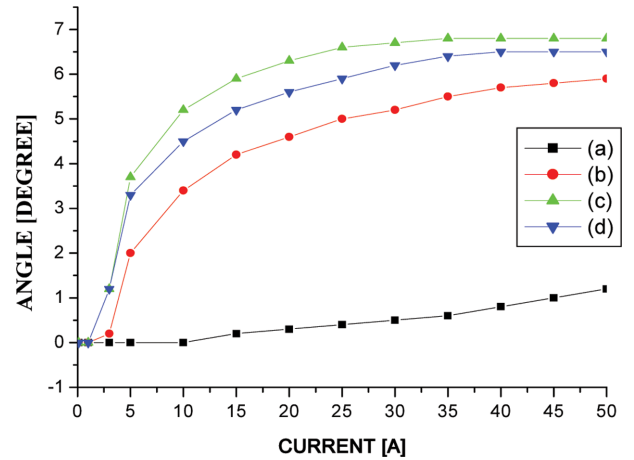


Fig. 10. (Color online) Variation of rotor position angle with alignment of stator poles and rotor poles.

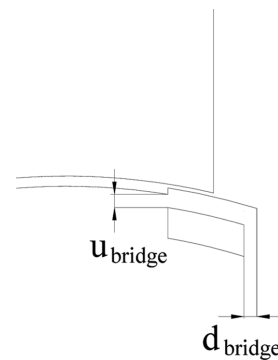


Fig. 11. Suggested rotor pole shape.

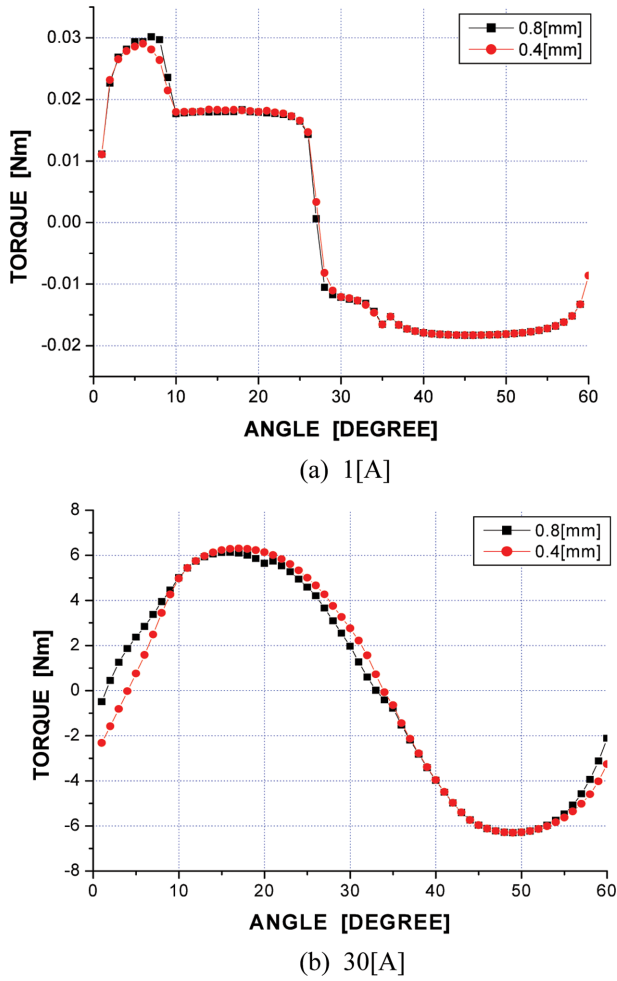


Fig. 12. (Color online) Torque characteristics according to d_{bridge} .

가 어렵다. 따라서 Fig. 9(d)의 회전자 형상이 적절하다.

Fig. 11은 제시한 회전자 극 형상을 보여주고 있다. 자속통로는 d_{bridge} 와 U_{bridge} 이기 때문에 이를 적절히 설계하면 Fig. 7(c)로 이동하는 전류치를 설계할 수 있다.

Fig. 12는 d_{bridge} 를 달리하였을 때 토크를 보여주고 있다. 단 d_{bridge} 와 U_{bridge} 는 같다. Fig. 12에서 보는 바와 같이 d_{bridge} 가 줄어들 때 낮은 전류에서는 변화가 거의 없고 높은 전류에서는 회전자 극이 고정자 극에 정렬되는 회전자 위치각이 조금 커짐을 알 수 있다. 이와 같은 결과에서 d_{bridge} 와 U_{bridge} 의 적절한 설계는 높은 전류에서 자기 포화가 되는 회전자 위치와 전류값을 조절할 수 있다.

V. 결 론

단상 SRM은 간단한 전자기 구조와 인버터로 인해 저가의 응용분야에서 가격경쟁력을 가질 수 있지만 자체로는 기동이 안 되는 단점이 있다.

본 논문에서는 회전자에 자기 포화 영역을 갖는 단상 6/6 SRM의 자기 구조를 해석하고 자기동 방법을 인덕턴스와 토오크 측면에서 해석하였다. 또한 자기 포화 영역에서 자기 포화를 일으키는 구멍을 여러 가지로 해석하여 원형의 구멍보다 사각형의 구멍이 낮은 전류와 높은 전류일 때 고정자와 정렬되는 회전자 위치각의 차이를 크게 해 보다 쉽게 기동할 수 있도록 하였다. 또한 기존의 원형 구멍과 제시한 사각형 구멍간의 효율 부분에서는 전체 자기회로에 극히 일부분의 형상 개선으로 높은 전류에서 미약한 차이를 보이나 기동시 아닌 실제 운전범위에서는 효율의 차이는 없다. 그러나 본 SRM은 회전자 극 단면이 이중으로 되어 실제 운전에 사용되는 공극이 커 적정 자속밀도를 만드는데 더 많은 전류를 필요로 하고 기동을 위해 자기 포화 영역이 부수적으로 추가되어야 하는 단점은 여전히 존재한다.

감사의 글

본 연구는 2015년 경남과학기술대학교 기성회 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N. Fulton, Proc. IEE **127**, 4 (1980).
- [2] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press (2001).
- [3] A. E. Fitzgerald, C. Kingsley, and S. D. Umans, Electric Machinery, 7th edition, McGraw-Hill Education (2013).
- [4] K. Ramu, A. M. Staley, and K. Sitapati, Proc. of IECON'01 **2** (2001).
- [5] K. Ramu, S.-Y. Park, and K. Ha, IEEE Trans. Ind. Appl. **41**, 4 (2005).
- [6] H.-Y. Yang, Y.-C. Lim, and H.-C. Kim, IEEE Trans. Ind. Electron. **60**, 10 (2013).
- [7] S.-G. Oh and K. Ramu, IEEE Trans. Ind. Appl. **43**, 5 (2007).
- [8] S.-G. Oh and C. W. Lee, KIEE **25**, 1 (2011).
- [9] M. D. Hennen, R. W. De Doncker, N. H. Fuengwarodsakul, and J. O. Fiedler, IEEE Trans. Power Electron. **26**, 5 (2011).