

Analysis for Novel Segmental Rotor Type Single-phase SRM

Seok-Gyu Oh*

Dept. of Mechatronics Engineering, GNTech, Jinju-si, Gyeongnam 52725, Korea

(Received 19 November 2017, Received in final form 27 December 2017, Accepted 3 January 2018)

Single-phase SRM is a low cost motor with a simple magnetic structure and minimum power switches. But in the application of single-phase SRM, it has been limited to self-starting problem. In this paper, new single-phase SRM with a segment rotor is presented and analyzed. The segmental rotor type SRM has advantages such as shortening the magnetic path and reducing windage loss. In order to solve the starting problem for a single-phase SRM, a strategy of starting by changing the shape of the segment rotor with a circular hole has been proposed. This new single-phase SRM was analyzed by FLUX2D, a finite element analysis program.

Keywords : single-phase SRM, starting problem, segmental rotor type SRM circular hole

분절 회전자를 갖는 새로운 단상 SRM의 해석

오석규*

경남과학기술대학교 메카트로닉스공학과, 경남 진주시 동진로 33, 52725

(2017년 11월 19일 받음, 2017년 12월 27일 최종수정본 받음, 2018년 1월 3일 게재확정)

단상 SRM은 저비용 전동기로서 적용분야는 많지만 기동 문제로 제한이 많은 전동기이다. 본 논문에서는 분절 회전자를 갖는 새로운 단상 SRM의 자기 구조를 제시하고 이를 해석하였다. 분절 회전자는 자기 통로를 짧게 하고 풍손 등을 저감하는 등의 장점을 가지고 있다. 그리고 기동문제를 해결하기 위해서 분절 회전자에 원형의 구멍을 만들어 전류에 따른 자기 포화 정도가 달라지는 것을 이용하여 기동하게 하는 방법을 사용하였다. 이 새로운 단상 SRM을 유한요소법 해석 프로그램인 FLUX2D를 사용하여 자기 해석을 하였다.

주제어 : 단상 SRM, 기동 문제, 분절 회전자, 원형의 구멍

I. 서 론

릴럭턴스 토크를 이용하여 구동하는 전동기의 원리는 오래전부터 알려져 있으나 연속적인 토크를 발생시키기 위한 전력제어 장치가 미흡하여 오랫동안 실용화 되지 못했다[1, 2]. 1950년대 이후 전력전자 스위치가 점차 개발되면서 릴럭턴스 토크를 사용하는 전동기가 연구되었고, 1980년도 영국의 Lawrenson 교수팀에서 SRM의 기본적인 개념과 설계에 관한 논문이 발표된 이후 본격적으로 SRM이 연구 개발되고 있다[1]. 최근에는 다양한 자기 구조를 갖는 고정자극수/회전자극수의 많은 조합과 기존의 3상, 4상뿐 만 아니라 단상, 2상 극수를 갖는 SRM이 연구 개발되고 있다[1-5]. 일반적인 SRM의

고정자와 회전자는 이중 돌극 구조를 가지고 있으나 최근에는 원통형의 분절(segment) 회전자를 갖는 SRM이 관심을 받고 있다. 분절 회전자를 갖는 SRM의 회전자는 원통형 구조를 가짐으로써 풍손을 줄일 수 있고 자속통로의 길이도 줄일 수 있는 장점을 갖는다[6, 7].

본 논문에서는 분절 회전자를 갖는 새로운 단상 SRM의 자기 구조를 제안하고 이를 해석하였다. 또한 단상 SRM은 자기동을 못하는 단점을 자기포화 영역을 갖는 구조를 이용하여 극복하였다. 단 자기동을 위한 제어 방식은 참고문헌[8]에서 제시한 제어 방식을 따른다. 전동기의 자기 구조 해석을 위해서 유한요소법 프로그램인 FLUX2D를 사용하였다.

II. 단상 SRM 드라이브의 자기적 구조

단상 SRM은 다른 다상의 전동기 시스템보다 전력변환장

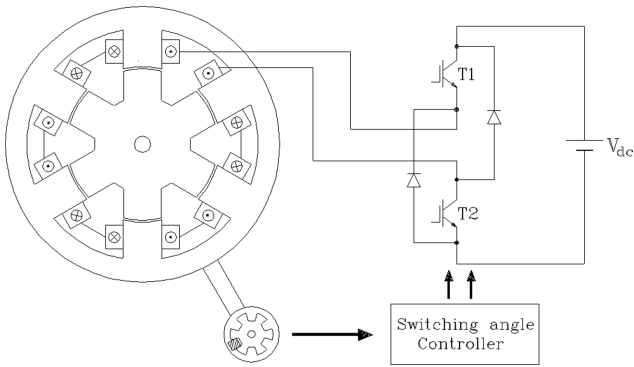


Fig. 1. Single-phase 6/6 SRM drive system.

치에 사용되는 전력전자 스위치 수를 최소로 줄일 수 있어 소형 저가의 전동기기 시스템을 구성하기 위해 적합한 전동기이다[2, 4, 5]. Fig. 1은 일반적인 고정자극과 회전자극이 각각 6개인 단상 6/6 SRM, 인버터는 가장 안정적인 성능을 보여주는 비대칭 인버터(Asymmetric Inverter), 그리고 회전자 위치센서로 구성된 드라이브 시스템을 보여주고 있다[1-3]. 일반적으로 단상 6/6 SRM의 권선은 집중권으로 고정자에만 감겨져 있으며 각 고정자극의 권선은 직렬로 연결되어 있고, 또한 전력변환장치에 Fig. 1에서 보는 바와 같이 직렬로 연결되어 있다[1-5].

Fig. 2는 Fig. 1의 일반적인 단상 6/6 SRM에서 고정자극과 회전자극이 정렬했을 때 자속 분포를 보여주고 있다. 한 순간에 전 자속 통로에 자속이 흐르고 있음을 알 수 있다.

SRM에서 한 스위칭에 의해 회전자가 회전하는 각 θ_{stroke} 은 다음과 같다[2].

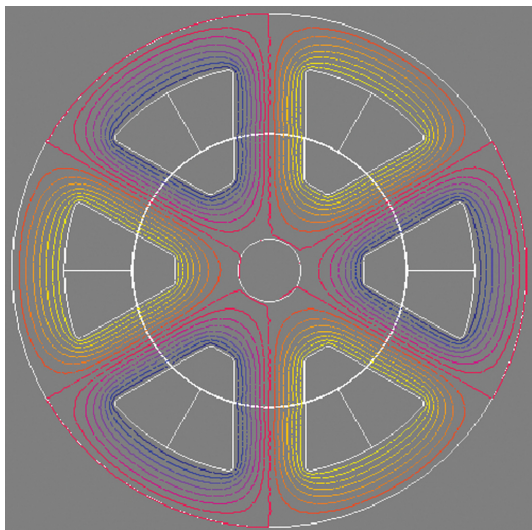


Fig. 2. (Color online) Flux distribution for single-phase 6/6 SRM.

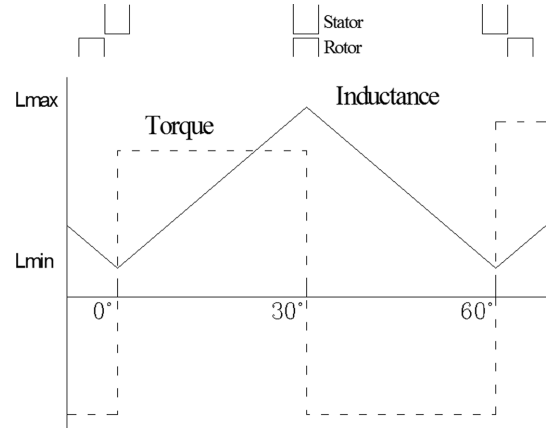


Fig. 3. Inductance and torque profile for single-phase 6/6 SRM.

$$\theta_{stroke} = \frac{360}{qP_r} \quad (1)$$

여기서 q 는 상수이고 P_r 은 회전자 극수이다. Fig. 1과 같은 단상 6/6 SRM은 한 스위칭에 의해 회전자가 회전하는 각은 60°이다.

Fig. 3은 단상 6/6 SRM의 회전자 위치각에 따른 인덕턴스와 토크를 보여주고 있다. 단상 6/6 SRM은 식 1에서 계산된 60° 중에 30°에서만 정방향 토크를 발생시킴을 알 수 있다. 또한 Fig. 3에서 보는 바와 같이 어떤 회전자 위치(0°와 30°)에서는 토크가 전혀 발생하지 않는 구간이 생겨 단상 SRM은 자체적으로 기동을 할 수 없는 전동기이다. 따라서 기동을 위해서 자기 구조를 복잡하게 하거나 보조 자석을 사용하거나 하는 방식이 사용된다[2, 4, 5].

III. 분절 회전자를 갖는 새로운 단상 SRM의 자기적 구조 해석

일반적인 SRM의 회전자는 돌극형 구조로 되어 있는 반면에 분절 회전자는 원통형 구조를 가짐으로 풍손을 줄일 수 있고 자속통로의 길이도 줄일 수 있는 장점 등을 가지고 있어 최근에 많이 연구되고 있다[6, 7].

본 논문에서 제안한 분절 회전자를 갖는 새로운 단상 SRM은 Fig. 4에서 보는 바와 같이 고정자극 6개와 회전자에 3개의 분절로 구성되어 있다.

Fig. 5는 Fig. 4에서 보여준 단상 SRM의 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 변화와 이때 발생하는 토크를 보여주고 있다. 자속은 인접한 고정자의 두 자극과 분절 회전자를 경로하는 자로로 흐르게 된다. 따라서 인덕턴스는 Fig. 5에서 보는 바와 같이 고정자와 분절 회전자의 상대위치에 따라 변하게 된다.

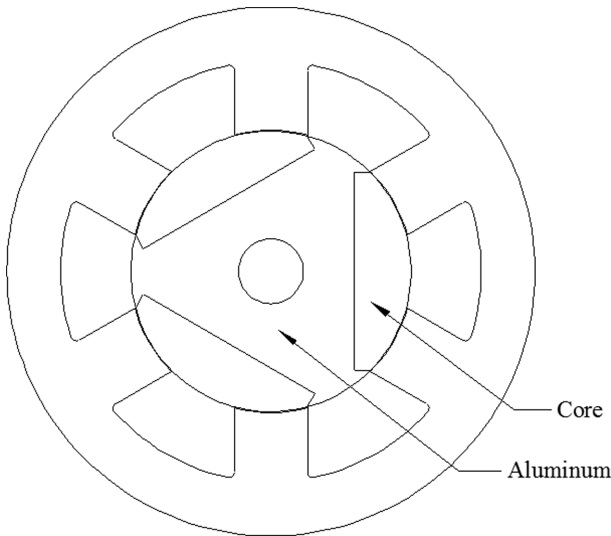


Fig. 4. Segmental rotor type single-phase SRM.

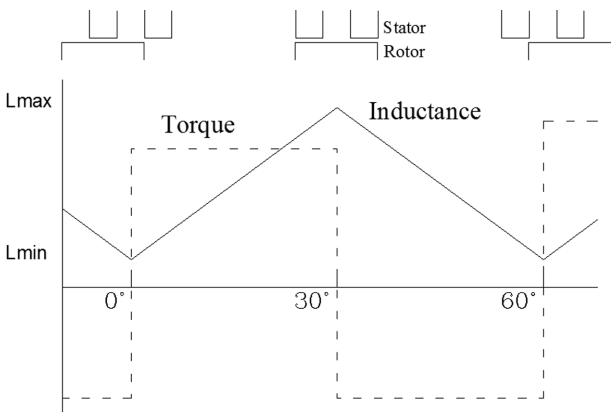


Fig. 5. Inductance and torque profile for segmental rotor type single-phase SRM.

Fig. 6은 분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 권선방식을 보여주고 있다. Fig. 6(a)는 Fig. 1의 단상 6/6 SRM과 같은

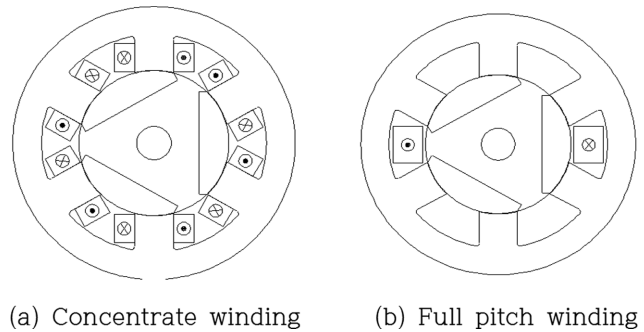


Fig. 6. Winding methods for segmental rotor type single-phase SRM.

집중권으로 권선이 감겨져 있으며 Fig. 6(b)는 전절권으로 권선이 감겨 있는 모양을 보여주고 있다.

Fig. 7은 Fig. 6의 각각의 권선방식에 대한 자속 분포를 보여주고 있다. Fig. 7(a)는 3개의 자속 통로를 보여주고 있고, Fig. 2와 비교하여 자속 통로가 짧아진 특징이 있다. Fig. 7(b)는 Fig. 6(b)의 전절권 권선에 의해 발생하는 자속이 한 자속 통로를 통해 흐르는 것을 알 수 있다.

Fig. 8은 Fig. 1, 6(a), 6(b)의 전동기 경우 같은 기자력 조건에서 전류에 따른 각각의 토크를 보여주고 있다. Fig. 8에서 Fig. 1과 6(a)는 유사한 토크 특성을 보여주고 있다. 이것은 기자력에 의해 발생한 자속이 3개의 자속 통로로 흐르고 있는 상태가 유사하기 때문이다. Fig. 6(b)는 기자력에 의해 발생한 전 자속이 Fig. 7(b)에서 보듯이 하나의 자속 통로를 통해 흐르기 때문에 약 3배의 토크가 발생하고 있다. 그러나 하나의 자속 통로로 자속이 흐른다는 것은 자기포화가 심할 수 있다는 것을 의미한다. 따라서 권선에 흐르는 전류가 10[A]인 Fig. 8(c)에서 보는 바와 같이 Fig. 6(b)의 전동기 경우 전류가 증가할수록 자기통로가 회전자 분절 하나를 통하여 흐르기 때문에 자기포화가 심하여 다른 전동기의 경우보다 토크가 크지 않음을 알 수 있다. 그러므로

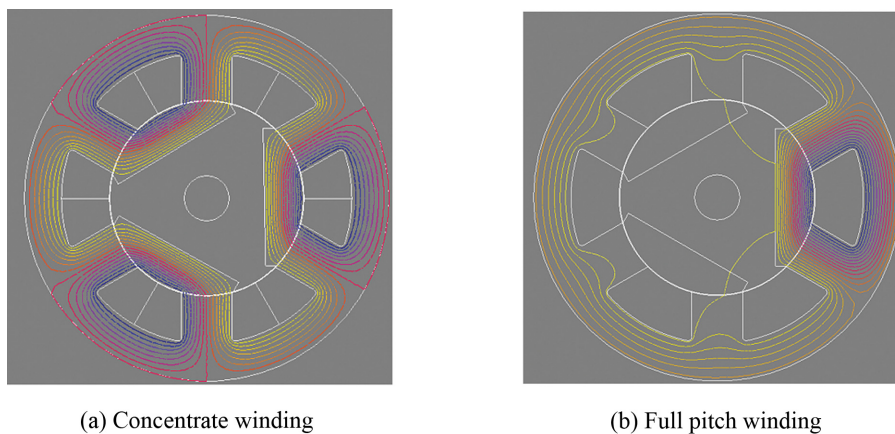


Fig. 7. (Color online) Flux distributions.

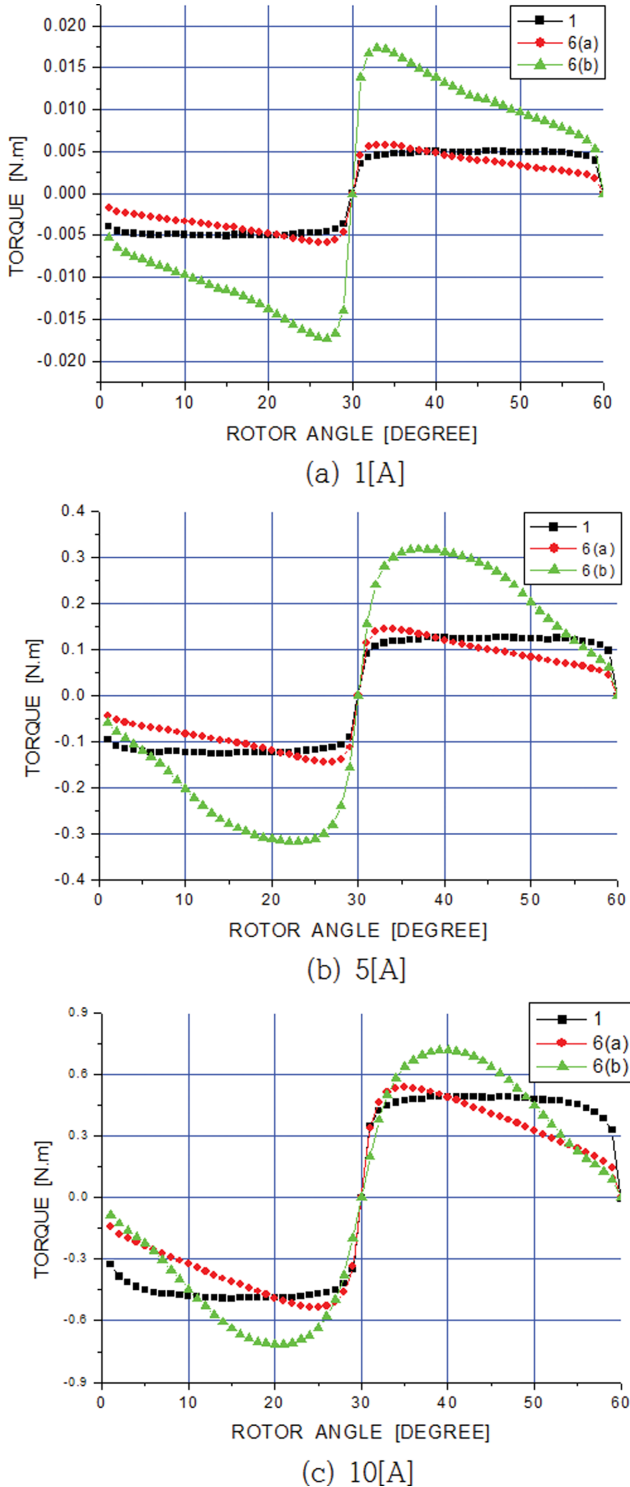


Fig. 8. (Color online) Torques according to currents.

중부하가 연속적으로 가해지는 적용분야의 경우에는 자기포화 현상이 심하게 발생되어 전반적인 효율저하를 우려됨으로 전절권 방식은 적당치 않다. 따라서 전절권 방식은 중부하 이하에서 운전하는 적용분야에 적합하다.

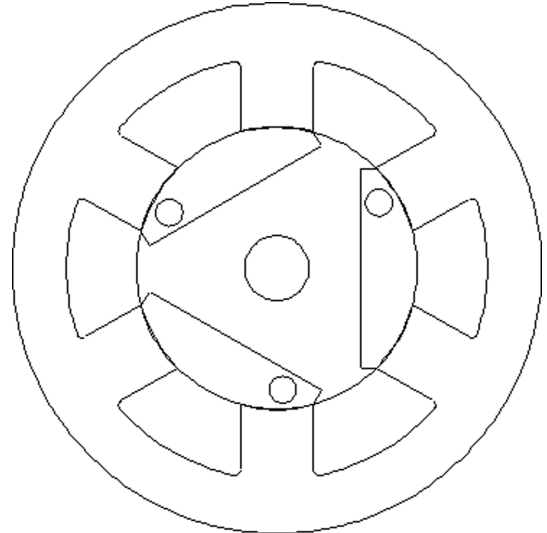


Fig. 9. Motor design with saturation area.

IV. 자기 포화 영역을 갖는 분절 회전자형 단상 SRM의 자기동

단상 SRM은 전력변환 장치에 사용되는 전력전자 스위치의 수를 줄일 수 있어 경제적이거나 자기동이 어려운 문제가 있다. 단상 SRM의 자기동을 하기 위해서 영구자석을 삽입하는 방법, 보조극을 추가하는 방법, 그리고 회전자 형상을 비대칭 되게 설계하여 자기 포화 영역을 갖는 기동방법 등이 있다[4, 5, 8, 9]. 본 논문은 분절 회전자를 갖는 단상 SRM의 기동을 위해서 분절 회전자에 원형의 구멍을 뚫어 분절 회전자 형상을 비대칭으로 변형하여 자기 포화 영역을 갖는 기동방법을 이용하고자 한다[8, 9].

Fig. 9는 자기동을 위한 분절 회전자 형상을 보여주고 있다. Fig. 9에서 분절 회전자에 한쪽에 원형의 구멍을 뚫어 그 부분에서 권선에 인가하는 전류에 따라 자기포화가 달라지도록 하였다.

Fig. 9와 같이 분절 회전자 형상을 변형하면 약전류일 때의 분절 회전자가 정렬하는 분절 회전자 위치와 강전류를 흘렸을 때 분절 회전자가 정렬하는 회전자 위치가 각각 다르게 된다. 이는 강전류가 권선에 흐렸을 때는 원형의 구멍을 중심으로 자기포화 현상이 심하게 나타나기 때문이다[8, 9]. 이렇게 전류에 따라 분절 회전자가 정렬하는 위치가 다름을 이용하여 기동시에 약전류와 강전류를 교대로 인가함으로써 원하는 회전방향으로 기동시킬 수 있다[8, 9].

Fig. 10은 자기동을 위한 권선에 인가하는 전류에 따라 분절 회전자 위치를 보여주고 있다. Fig. 10(a)는 권선에 인가하는 전류가 작을 때 분절 회전자가 정렬하는 위치를 보여주고 있다. 이때는 원형의 구멍 주위에도 자기포화가 안 나타

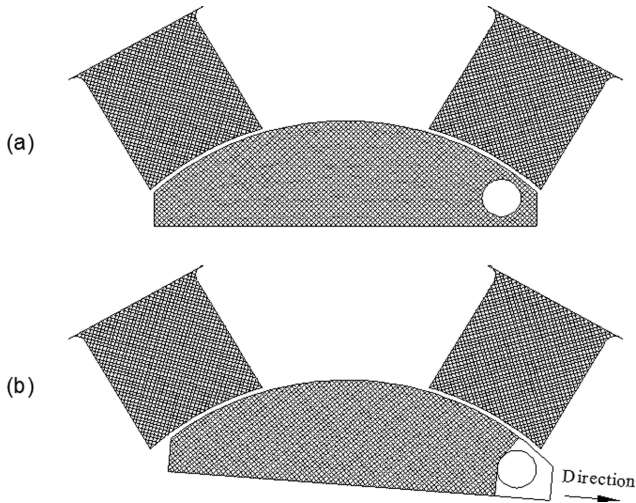


Fig. 10. Rotor position during the basic starting strategy. (a) 1[A] (b) 10[A].

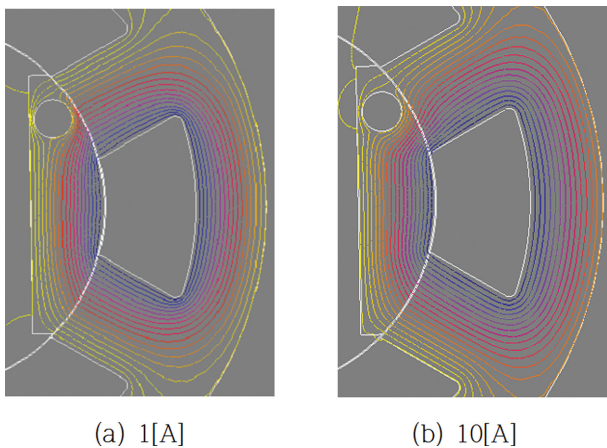
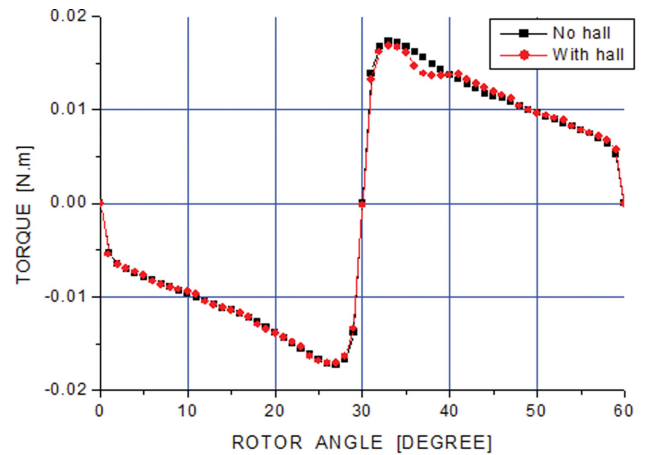


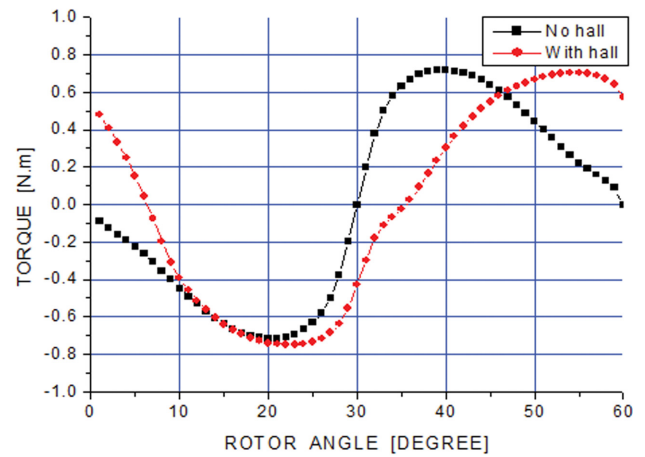
Fig. 11. (Color online) Flux patterns around hall.

나기 때문에 원형의 구멍의 유무에 관계없이 같은 자속밀도 분포를 갖는다. 그리고 Fig. 10(b)는 권선에 인가하는 전류가 클 때 회전자 위치가 정렬하는 위치를 보여주고 있으며 원형의 구멍을 중심으로 자기 포화 현상이 심하게 나타나 원형의 구멍 왼쪽 부분은 자속이 거의 못 흐르고 있다. 따라서 그림에서와 같이 원형의 구멍 왼쪽 부분에 자속이 주로 통함을 알 수 있다. 이와 같이 전류에 따라 정렬하는 분절 회전자 위치가 이 다름을 이용하여 약전류를 인가한 다음 강전류를 인가하면 Fig. 10(b)에서 보는 바와 같이 회전방향으로 움직이게 된다[8, 9]. 단, 자기동을 위한 자세한 제어 방식은 참고문헌[8]에서 제시한 제어 방식을 따른다.

Fig. 11는 고정자극과 회전자극이 정렬하였을 때 자속분포를 보여주고 있다. Fig. 11(a)에서 보는 바와 같이 1[A]의 전류가 흘렀을 때의 원형의 구멍이 있는 쪽의 고정자극의 자속이나 다른 쪽의 자속이 유사함을 알 수 있다. Fig. 11(b)에서



(a) 1[A]



(b) 10[A]

Fig. 12. (Color online) Torques according to rotor angle with hall and no hall.

보는 바와 같이 10[A]의 전류가 흘렀을 때는 자속은 원형의 구멍의 아래로 대부분 흐르고 있음을 알 수 있다. 이는 원형의 구멍의 자속통로가 자기 포화되어 자기저항(Reluctance)이 커져 자속이 흐르기 어렵기 때문이다. 따라서 원형의 구멍으로 인하여 전류의 크기에 따라 자속의 흐름이 다름을 알 수 있고 이를 이용하여 기동하고자 한다.

Fig. 12는 권선에 인가되는 전류 1[A]와 10[A]일 때 분절 회전자에 원형의 구멍이 있을 때 발생하는 토크를 원형의 구멍이 없을 때 Fig. 8의 토크와 비교하였다. 1[A]를 인가한 Fig. 12(a)에서는 두 경우가 거의 유사함을 알 수 있다. 이는 원형의 구멍 분극에서 아직 자기포화가 이루어지지 않았기 때문이다. 10[A]를 인가한 Fig. 12(b)일 때 토크가 0인 회전자 위치각이 각각 약 7° 정도 이동함을 알 수 있다. 이러한 회전자 위치각 차이를 이용하여 양방향으로 기동을 할 수 있다. 또한 Fig. 12에서 보듯이 회전자에 원형의 구멍이 있을 때나 없을 때나 토크 크기는 유사하지만 회전자 위치

각은 다르다. 이것을 이용하면 단상 SRM도 별다른 성능의 저하도 없이 기동도 가능함을 알 수 있다.

V. 결 론

SRM은 고정자에만 집중권으로 권선이 감겨져 있고 회전자에는 어떠한 영구자석이나 권선이 없는 간단한 견고한 자기 구조로 인해 많은 관심을 받고 있다[1, 2]. 또한 SRM은 다양한 조합과 상수가 가능하여 많은 분야에 적용되고 있다. 특히 단상 SRM은 전력전자 스위치 수를 줄일 수 있어 저비용의 적용 분야에 적합하다. 그러나 단상 SRM은 자기동을 못하는 심각한 문제가 있다[1-5].

본 논문은 분절 회전자를 갖는 새로운 단상 SRM에 대해 자기 구조를 제시하였다. 분절 회전자는 지속 통로가 짧고 풍손이 작은 특징을 가지고 있다. 분절 회전자를 갖는 새로운 단상 SRM는 전절권으로 권선이 감겨 있고 운전시 3개의 회전자 분절 중에 하나만을 사용하기 때문에 중부하에서는 지속 통로의 포화로 인해 효율이 저하될 우려가 있어 연속적인 중부하 운전을 해야하는 적용분야에는 적절치 않다. 그러나 경부하에서는 같은 기자력으로 약 3배의 토크를 발생시킬 수 있으므로 매우 효율적임을 알 수 있다. 또한 단상 SRM이 자기동이 안되는 단점은 분절 회전자에 비대칭적으로 원형의 구멍을 만들어 자기포화 정도를 다르게 하여 기동하는 방법을 채택하였다. 결과적으로 별다른 성능저하없이 기동을

할 수 있음을 시뮬레이션을 통하여 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2016년도 경남과학기술대학교 대학회계 연구비 지원에 의하여 연구되었음.

References

- [1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N. Fulton, Proc. IEE **127**, Pt-B, 253 (1980).
- [2] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press (2001).
- [3] A. E. Fitzgerald, Charles Kingsley, and Stephen D. Umans, Electric Machinery, 7th edition, Chapter 8, McGraw-Hill Education (2013).
- [4] R. Krishnan, A. M. Staley, and K. Sitapati, Proc. of IECON'01 **2**, 1488 (2001).
- [5] R. Krishnan, S.-Y. Park, and K. Ha, IEEE Trans. on IA **41**, 1047 (2005).
- [6] J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, and K. Tanaka, J. Electrical Eng. Technol. **1**, 58 (2006).
- [7] Z. Xu, D.-H. Lee, and J.-W. Ahn, Trans. KIPE **21**, 1 (2016).
- [8] Martin D. Hennen, Rik W. De Doncker, Nisai H. Fuengwarodsakul, and Jens O. Fiedler, IEEE Trans. on PE **26**, 1337 (2011).
- [9] S.-G. Oh, J. Korean Magn. Soc. **27**, 70 (2017).