

Analysis of Magnetic Structure for Improved E-Core 6/6 TPSRM

Seok-Gyu Oh*

Dept. of Mechatronics and Electrical Engineering, GNTECH, Jinju 52725, Korea

(Received 20 November 2020, Received in final form 18 December 2020, Accepted 21 December 2020)

In the field of small and medium-sized electric motors, cost is emphasized rather than performance and efficiency. A single-phase or TPSRM (two phase SRM) has been studied because of economic aspect, and in particular, various magnetic structures have been developed for TPSRM, which has a high output density and can be self-starting by changing the magnetic structure. Among them, the E-core TPSRM has the advantage of saving the stator core and having a short magnetic path and no alternating magnetic flux in the stator. In this paper, the improved magnetic structure of E-core TPSRM is presented and analyzed. Compared to the conventional E-core TPSRM, the number of rotor poles is smaller, therefore, the switching frequency per a phase is smaller, and it has the advantage of reducing switching loss and core loss.

Keywords : E-core TPSRM, no alternating flux, core loss

개선된 E-Core 6/6 TPSRM의 자기구조 해석

오석규*

경남과학기술대학교 메카트로닉스·전기공학부, 경남 진주시 동진로 33, 52725

(2020년 11월 20일 받음, 2020년 12월 18일 최종수정본 받음, 2020년 12월 21일 게재확정)

중소형 전동기 분야에서는 성능이나 효율적인 면보다는 비용적인 측면이 많이 강조되고 있다. 경제적인 이유로 단상 혹은 TPSRM(two phase SRM)이 연구되고 있고, 특히 출력밀도가 높고 자기구조의 변경으로 자기동이 가능한 TPSRM에 대해 다양한 자기구조가 개발되고 있다. E-core TPSRM은 고정자 철심을 절감할 수 있고 짧은 자속통로와 고정자에서 자속의 교변이 없는 장점이 있다. 본 논문에서는 개선된 E-core TPSRM의 자기구조를 제시하고 이를 해석하였다. 기존의 E-core TPSRM보다 회전자 극수가 적어 상당 스위칭 주파수가 작아 스위칭 손실과 철손을 줄일 수 있는 장점이 있으며, 회전자극의 변형으로 자기동이 가능함을 알 수 있다.

주제어 : E-core TPSRM, 자속의 교변, 철손, 자기동

I. 서 론

가정용과 산업용으로 사용되는 전동기 대부분은 영구자석과 영구자석의 상호작용으로 발생하는 상호 토크(mutual torque)를 이용하여 구동하는 전동기이며, 효율, 출력, 그리고 비용 면에서 좋은 성능을 보여주고 있다. 최근 SRM은 상호 토크를 이용하는 서보전동기와 견줄 수 있는 전동기로 부상하여 많은 연구가 진행되고 있다[1,2]. SRM은 영구자석과 철심과의 상호작용으로 발생하는 릴럭턴스 토크(reluctance

torque)를 이용하여 구동하는 방식을 택하고 있다[1,2]. 또한, 릴럭턴스 토크를 활용하는 방식은 다양한 고정자와 회전자의 자기구조를 가질 수 있어 다양한 고정자극과 회전자극의 조합뿐만 아니라 고정자의 변형으로 고정자 부분 모양에 따라 구분되는 C-core, E-core 같은 철심을 절감할 수 있는 자기구조와 회전자에 분절(segmental rotor) 형태도 연구되고 있다[3-7]. 그리고 단상, 2상, 다상 등 다양한 상수를 가져 적용에 있어 유연성을 가진다. 특히 단상 혹은 2상은 다상의 SRM보다는 인버터에 사용되는 다이오드를 포함한 전력전자 스위치를 적게 사용함으로 비용 측면에서 경쟁력을 가진다. 다만 단상 SRM의 경우 단상 반파 정류회로의 출력전압과 같이 토크 주기의 반만 사용되기 때문에 출력이 낮을 수밖에 없는 태생적

인 한계가 있다[2]. 또한, 단상 SRM은 기동을 위한 영구자석, 보조권선, 자기동 전략 등을 필요로 한다[2]. 반면에 TPSRM은 회전자 자기구조의 변경으로 자기동을 실현할 수 있고, 단상 전과 정류회로의 출력전압과 같이 토크 주기의 전부를 사용할 수 있어 고성능 운전을 할 수 있다[5-7]. 그리고 E-core를 갖는 TPSRM은 고정자에서 자속의 반전이 없고 자속통로의 길이가 짧아 효율 측면에서 유리하고 또한 고정자의 철심은 절약할 수 있어 C-core SRM과 많은 관심을 보인다[4,6,7].

본 논문은 개선된 E-core를 갖는 TPSRM에 대해 기존의 E-core와 자기구조 및 토크를 비교 해석하였다. 개선된 E-core의 효율성을 증명하기 위해서 유한요소법 프로그램인 Altair FLUX를 사용하였다.

II. E-core를 갖는 TPSRM

중소형 전동기 분야에서는 성능이나 효율적인 면보다는 비용적인 측면이 많이 강조되고 있다. 이에 대한 대안으로 단상 혹은 TPSRM이 연구되고 있고 특히 출력밀도가 높고, 회전자극의 자기구조 변경으로 자기동이 가능한 TPSRM에 대해 다양한 자기구조가 개발되고 있다[5-7].

Fig. 1은 고정자 극수/회전자 극수의 조합이 4/2, 6/3인 대표적인 TPSRM을 보여주고 있다[2,5].

Fig. 2는 Fig. 1의 TPSRM 고정자 각 부위에서 발생하는 자속 파형을 보여주고 있다. 4/2 TPSRM은 고정자에서 부분적으로 자속의 교변이 일어남을 알 수 있고 6/3 TPSRM은

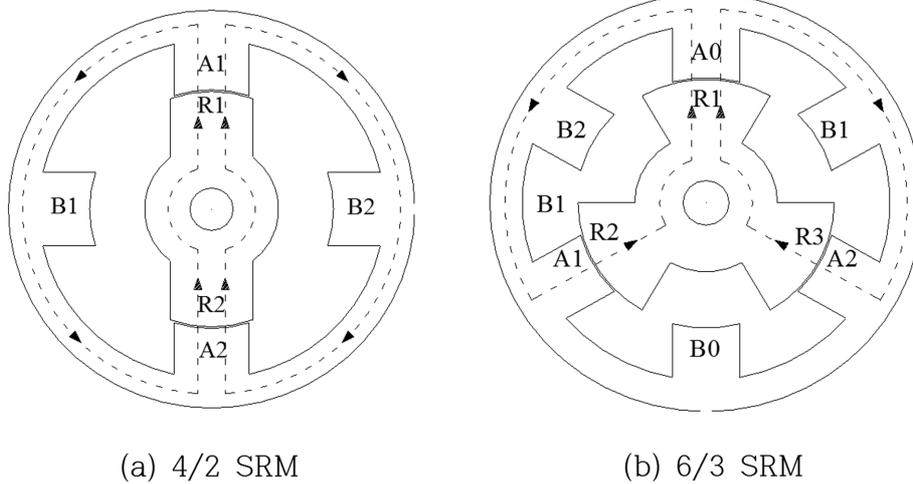


Fig. 1. TPSRM.

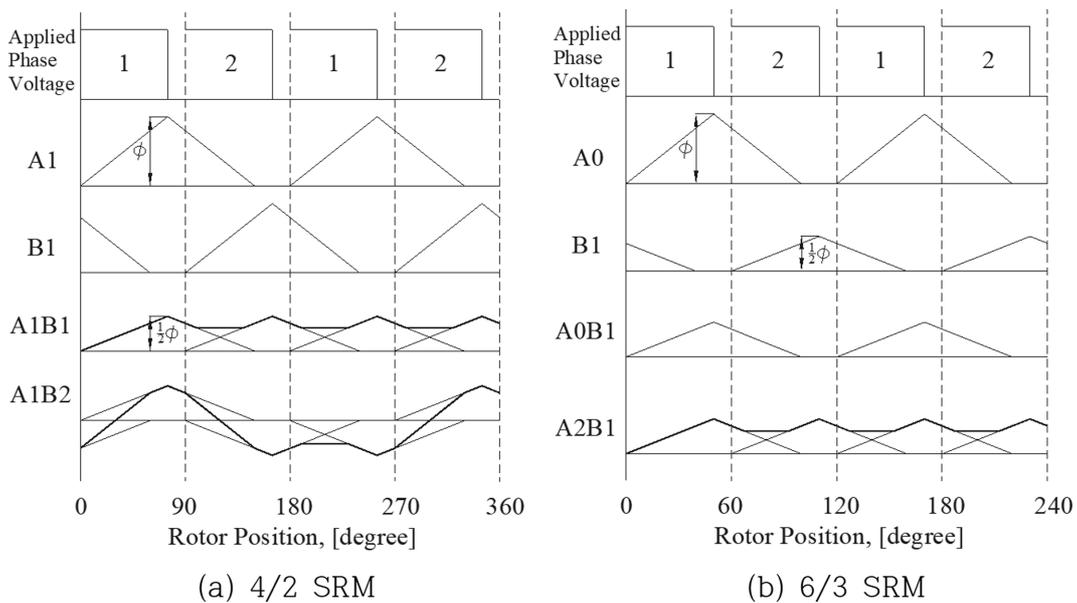


Fig. 2. Flux patterns of TPSRM.

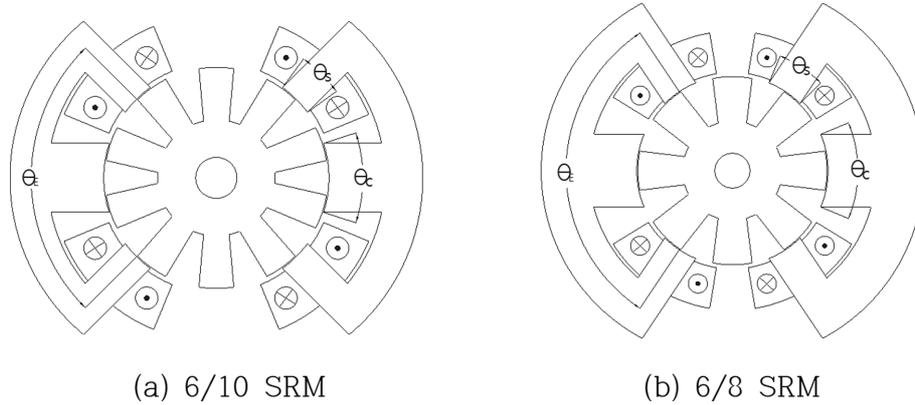


Fig. 3. E-core TPSRMs.

고정자 전 부위에서 자속의 교번이 일어나지 않는다. 따라서 고정자에서 자속의 교번이 일어나지 않는 6/3 TPSRM이 철손 발생 면에서 유리함을 알 수 있다[5].

최근에는 고정자의 자속 교번이 없을 뿐만 아니라 고정자의 일부를 생략하여 철심을 절약할 수 있는 E-core 혹은 C-core 같은 형태의 고정자를 갖는 SRM 연구가 많이 진행되고 있다[4,6,7]. 특히 E-core TPSRM은 E-core의 가운데 자극인 공동자극(common pole)을 중심으로 위쪽 극과 아래쪽 극이 교대로 동작함으로써 TPSRM에 적합한 구조를 가진다[6,7]. Fig. 3은 대표적인 E-core TPSRM을 보여주고 있으며, Fig. 3(a)는 회전자 극이 10이며[6], Fig. 3(b)는 회전자 극이 8개이다[7].

고정자를 구성하는 E-core는 3개의 자극으로 이루어져 있으며, E-core의 권선이나 영구자석이 없는 가운데 자극인 공동자극을 중심으로 양쪽 끝의 작은 자극에 각 상권선이 감겨 있다. 회전자 극수, P_r 는 E-core 개수에 비례하고 식(1)과 같이 나타낼 수 있다[7].

$$M \times n + \alpha \times n = (M + \alpha) \times n \quad (1)$$

여기서, M 은 E-core와 걸치는 회전자 극수이며, n 은 E-core 개수이며 2 이상의 정수이다, 그리고 α 는 E-core와 걸치지 않는 여분의 회전자극 개수를 각각 나타내고 있다.

Fig. 3의 E-core TPSRM은 [7]의 논문에서 제시한 바와 같이 E-core와 걸치는 회전자 극수는 3이며, 따라서 회전자의 회전자 극수는 3의 배수와 여분의 극수로 이루어져 있다. 따라서 Fig. 3에서 M 은 3, n 은 2이며, Fig. 3(a)의 경우 $\alpha = 2$ 이며 Fig. 3(b)의 경우는 $\alpha = 1$ 이다. 따라서 n 이 3인 경우, 각각 고정자 극수/회전자 극수를 각각 9/15, 9/12로 구성할 수 있다.

그리고 Fig. 3의 E-core pitch, θ_E 는 식(2)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\frac{360^\circ}{P_r} \times M - \frac{360^\circ}{2P_r} = \frac{360^\circ}{P_r} \left(M - \frac{1}{2} \right) \quad (2)$$

Fig. 3의 TPSRM의 E-core pitch, θ_E 는 각각 90° , 112.5° 이다. 따라서 철심을 절약할 수 있는 부분은 다음 식과 같이 나타낼 수 있다.

$$360^\circ - [(\theta_E + \theta_s) \times n] \quad (3)$$

여기서, θ_s 는 E-core의 양쪽에 있는 작은 자극의 극호이다. 일반적으로 SRM에서 한 상당 스위칭 주파수, f_{ph} 는 식(4)와 같이 나타낼 수 있다[1,2].

$$f_{ph} = P_r \frac{\omega}{60} \quad (4)$$

여기서, ω 는 회전자 속도[rpm]를 나타내고 있다.

그리고 히스테리시스 손실(hysteresis loss), P_h 과 와전류 손실(eddy current loss), P_e 로 구성된 철손(core loss), P_{core} 는 아래 식으로 나타낼 수 있다[2].

$$P_{core} = P_h + P_e \quad (5)$$

$$P_h = k_h f (B_m)^2$$

$$P_e = k_e (f B_m)^2$$

여기서, k_h 는 히스테리시스 손실 계수, k_e 는 와전류 손실 계수, 그리고 B_m 은 최대 자속밀도를 각각 나타내고 있다.

식(4), (5)에서 보듯이 회전자 극수는 스위칭 주파수에 직접 영향을 미치고 이 스위칭 주파수는 인버터의 전력반도체 스위치 소자의 스위칭 손실뿐만 아니라 철손에도 많은 영향을 미친다. 따라서 Fig. 3(b)의 E-core TPSRM이 회전자 극수가 Fig. 3(a)의 E-core TPSRM의 회전자 극수보다 적으므로 스위칭 주파수가 작아 스위칭 손실과 철손에도 상대적으로 유리함을 알 수 있다. 다만 식(3)에 따르면 철심 절약은 Fig. 3(a)가 E-core pitch, θ_E 가 작아 유리하다.

III. 개선된 E-core 6/6 TPSRM의 특성해석

E-core TPSRM은 고정자의 철심을 절약하는 장점뿐만 아니라 효율적인 면에서도 장점이 있다. 다음은 E-core TPSRM의 장점을 보여주고 있다.

1. E-core의 가운데 자극인 공동자극을 중심으로 양 끝 자극을 교대로 자속이 통과함으로써 고정자에서 가장 짧은 자속 통로를 가지고, 회전자에서도 E-core 인근에 있는 2개의 회전 자극을 통하는 자속 경로로 이루어져 전체적인 짧은 자속 통로를 가진다.
2. 2상이 차례로 고정자에 자속을 만들지만, 고정자 전 부위에서 자속의 교변이 없다.
3. 여자되는 고정자극이 대칭을 이루어 회전자 축에 가해지는 방사형 힘이 0이다.
4. 고정자에 자속이 안 흐르는 부위는 생략하여 철심을 절약할 수 있어 비용면에서 유리하다.

1. 개선된 E-core 6/6 TPSRM의 자기구조 해석

Fig. 4는 본 논문에서 제시하는 새로운 E-core 6/6 TPSRM을 보여주고 있다. Fig. 4의 TPSRM은 E-core의 구조를 갖기 때문에 Fig. 3의 TPSRM과 기본적인 구조는 같다. Fig. 4에서 보듯이 TPSRM의 고정자 극수는 Fig. 3의 전동기와 같이 3의 배수를 보여주고 있으나, E-core에 맞는 회전자 극수는 2개이며 회전자 극수는 Fig. 3에서 보여주는 E-core TPSRM과 달리 3배수가 아닌 2배수이기 때문에 M 은 2이다. 그리고 회전자 극수가 적을수록 스위칭 손실과 철손이 적기 때문에 α 는 1이 유리하다. 따라서 회전자 극수는 식(1)을 식(6)과 같이 나타낼 수 있다.

$$2 \times n + 1 \times n = 3 \times n \quad (6)$$

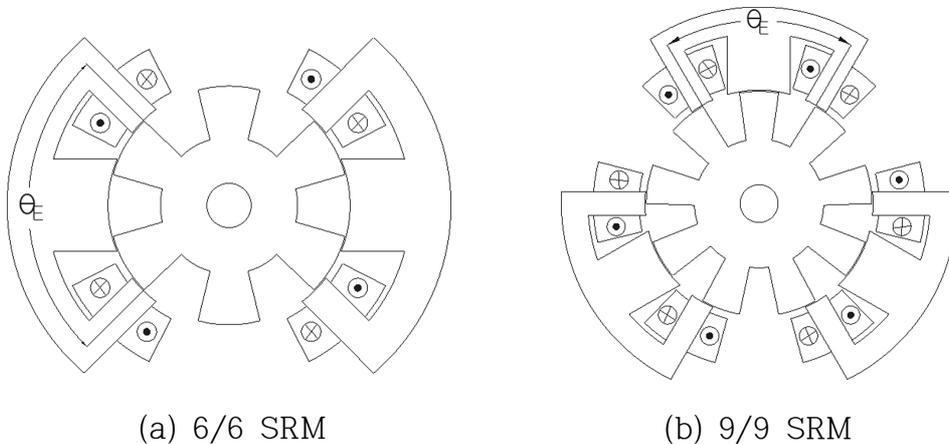


Fig. 4. Proposed E-core TPSRMs.

Table I. Comparison of E-core TPSRMs.

Poles	E-core No.	P_r	f_{ph}	θ_E
6/10	2	10	$\omega/6$	90°
6/8	2	8	$\omega/7.5$	112.5°
6/6	2	6	$\omega/10$	90°

여기서 n 이 2일 때 회전자 극수는 6, n 이 3일 때 회전자 극수는 9임을 알 수 있다. 그리고 Fig. 4의 E-core pitch, θ_E 는 식(7)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{360^\circ}{P_r} \times 2 - \frac{360^\circ}{2P_r} = \frac{360^\circ}{P_r} \times \frac{3}{2} \quad (7)$$

따라서 Fig. 4의 TPSRM은 E-core pitch, θ_E 가 각각 90° , 60° 이다.

Table I은 Fig. 3과 4(a)의 E-core TPSRM을 비교하였다. 회전자 극수가 커질수록 스위칭 주파수도 커져 전력반도체 스위치 소자의 스위칭 손실도 증가하고 식(5)에서 보듯이 철손도 증가함을 알 수 있다. 그리고 한 상을 여자할 때 사용되는 회전자 극은 4극이며, 회전자 극수가 적을수록 자기회로 상에서 사용되는 부분이 많아짐을 알 수 있다. 또한, E-core pitch, θ_E 는 고정자 철심 절감에 직접 영향을 미친다. 제안한 E-core 6/6 TPSRM은 E-core 6/10 TPSRM과 같이 철심 절감 면에서도 유리하다.

Table I에서 보듯이 제안한 E-core 6/6 TPSRM이 스위칭 손실과 철손 측면에서도 다른 E-core TPSRM에 비해 유리함을 알 수 있다. 또한, 한 상을 여자하였을 때 이용되는 회전자 부분이 가장 많아 에너지 밀도가 높다.

2. 개선된 E-core 6/6 TPSRM의 자기동

TPSRM은 별도의 장치나 자기회로의 변형이 없이는 자기

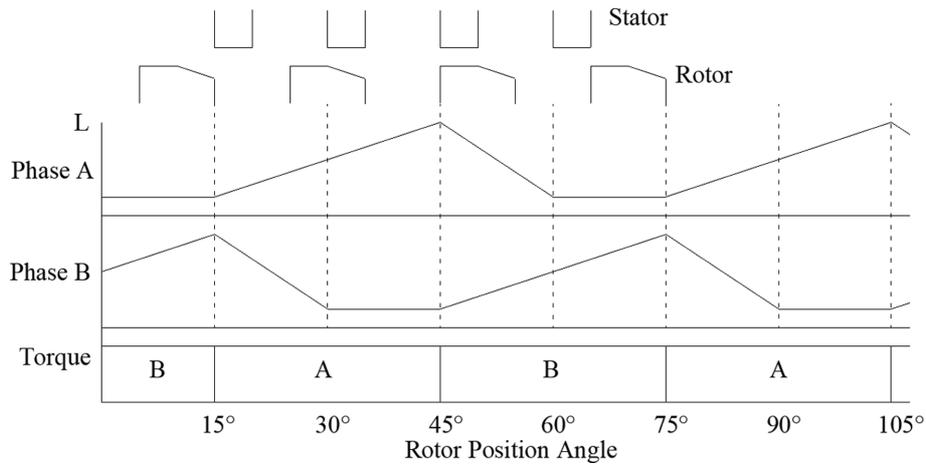


Fig. 5. Inductance and torque of proposed E-core 6/6 TPSRM.

동이 가능하지 않은 전동기이다. 그러나 회전자 자극을 이분화하여 공극을 일정하게 하는 구간과 공극을 선형적 혹은 단계적으로 변형하여 자기동을 하게 한다[2,5-7]. 본 논문에서도 [5-7]의 논문과 같은 방식으로 기동을 하도록 하였으며 이 기동 방식은 단방향 운전만 가능한 단점이 있다. Fig. 5는 자기동을 할 수 있는 회전자 자극으로 변형하였을 때 고정자극과 회전자극의 상대적인 위치에 따른 인덕턴스와 토크의 변화를 보여주고 있다. Fig. 5에서와 같이 회전자극을 공극이 일정한 구간과 선형적으로 공극이 변화하도록 하여 인덕턴스의 변화를 주어 어느 위치에서도 기동이 될 수 있도록 하였다.

Fig. 6은 개선된 E-core 6/6 TPSRM에서 A상을 여자하였을 때의 자속을 보여주고 있다. 대칭되어있는 두 개의 E-core에서 가운데 자극인 공동자극을 중심으로 위 혹은 아래의 상 권선이 여자된 자극을 통해 인접한 회전자 두 극을 거쳐 자

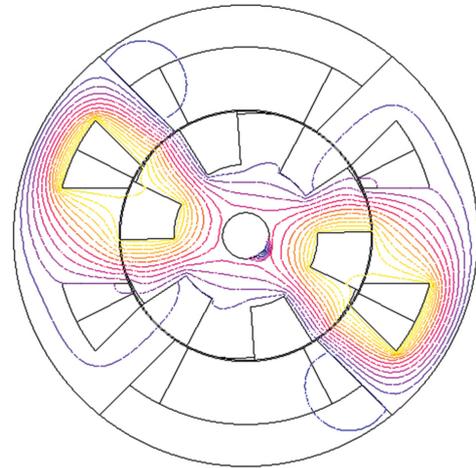
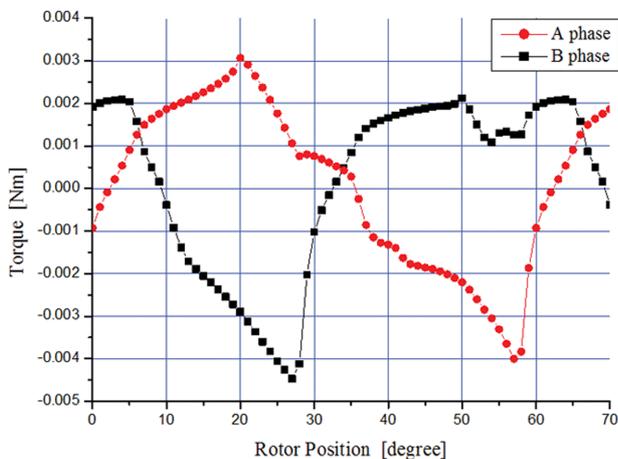
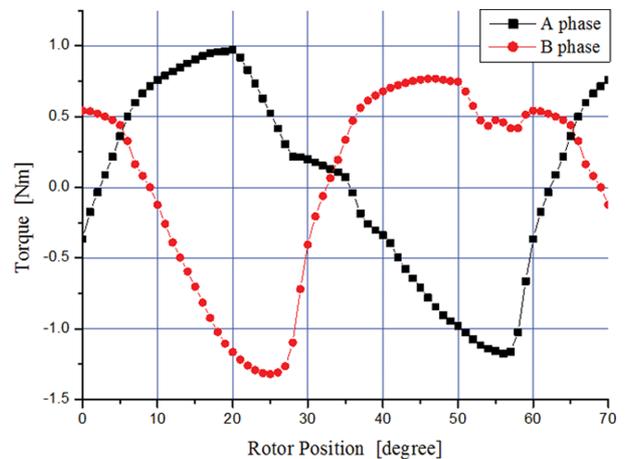


Fig. 6. (Color online) Flux of proposed E-core 6/6 TPSRM as A phase energized.



(a) 1[A]



(b) 20[A]

Fig. 7. (Color online) Torque of proposed E-core 6/6 TPSRM.

속이 흐름을 알 수 있다.

Fig. 7은 각 상권선에 1, 20[A]를 흘렸을 때 발생한 토크를 보여주고 있다.

전동기가 자기동을 하기 위해서는 토크가 모든 회전자 위치에서도 양의 값을 가져야만 한다. Fig. 7에서 보듯이 두 상의 토크는 전 구간에서 항상 양의 토크를 발생하고 있어 이를 통해 어느 위치에서도 자기동이 가능함을 알 수 있다.

IV. 결 론

가변속이 가능한 브러쉬가 없는 전동기기는 자동화를 요구하는 가정용, 산업용에 많이 사용되고 있고 앞으로도 더 많은 분야로 활용될 것이다. 최근까지도 브러쉬가 없는 전동기기는 상호 토크를 이용하는 전동기가 주를 이루었지만, 릴럭턴스를 이용하는 SRM도 다양한 자기구조를 가지는 장점을 살려 다양한 분야에 연구되고 있다. 그중에서 고정자의 철심을 절약할 수 있고 TPSRM에 적합한 구조인 E-core도 연구되고 있다.

본 논문은 기존에 연구되고 있는 E-core TPSRM은 E-core가 3개의 회전자극에 걸쳐있는 구조이며, 본 논문에서 제안한 E-core는 2개의 회전자극에 걸쳐있는 구조이다. 이로 인해 기존의 E-core를 갖는 TPSRM의 경우, 회전자 극수가 8 혹은 10개인데, 제안한 전동기는 6개의 회전자 극을 가진다. 회전자 극수가 줄어들어 생기는 효과는 한 상당 스위칭 주파수가 줄어들어 스위칭 손실과 철손을 줄일 수 있다. 또한,

E-core의 장점인 고정자 철심의 절감에서도 역시 같은 효과를 가짐을 알 수 있다. 그리고 TPSRM의 단점인 자기동 문제는 회전자극의 공극을 이중으로 하여 자기동을 할 수 있음을 입증하였다.

감사의 글

이 논문은 2020년도 경남과학기술대학교 교원 연구활성화 지원 사업의 예산지원으로 수행되었음.

References

- [1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N. Fulton, Proc. IEE **127B**, 4 (1980).
- [2] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press, (2001).
- [3] J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, and K. Tanaka, J. Electrical Eng. Technol. **1**, 1 (2006).
- [4] Z. Xu, D.-h. Lee, and J.-W. Ahn, IEEE Transactions on IA **52**, 3 (2016).
- [5] S.-G. Oh and R. Krishnan, IEEE Transactions on IA **43**, 5 (2007).
- [6] C. Lee, R. Krishnan, and N. S. Lobo, IEEE Transactions on IA **45**, 2 (2009).
- [7] H. Eskandari and M. Mirsalim, IEEE Transactions on EC **28**, 4 (2013).