

Flux-Reversal-free TPSRM with Segmental Rotor

Seok-Gyu Oh*

School of Mechatronics Engineering, Gyeongsang National University, Jinju 52725, Korea

(Received 13 November 2025, Received in final form 15 December 2025, Accepted 15 December 2025)

Small and medium-sized motors demand a balance of low cost, high performance and efficiency. To improve both efficiency and performance, reducing losses is essential. One significant type of loss is iron loss, which is greatly affected by the alternating magnetic flux between the stator and rotor. Therefore, controlling this magnetic flux is crucial for minimizing these losses. This paper presents a flux-reversal-free TPSRM (Two-Phase SRM) that has segmented rotors. The proposed motor is designed to minimize core loss by featuring short magnetic flux paths within both the stator and rotor during operation, while eliminating flux alternation. Additionally, the stator features a simple U-core structure, which helps reduce the amount of core material required.

Keywords : TPSRM, iron loss, flux alternation, U-core structure

자속 교번이 없는 분절 회전자를 갖는 TPSRM

오석규*

경상국립대학교 메카트로닉스공학부, 경남 진주시 동진로 33, 52725

(2025년 11월 13일 받음, 2025년 12월 15일 최종수정본 받음, 2025년 12월 15일 게재확정)

중소형 전동기는 낮은 가격, 높은 성능과 효율을 요구하고 있다. 효율과 성능 향상을 위해서 손실을 줄여야 한다. 특히 철손은 고정자와 회전자의 자속 교번에 영향을 많이 받기 때문에 자속 교번이 없도록 자속을 제어하여야 한다. 본 논문은 자속 교번이 없는 분절 회전자를 갖는 새로운 TPSRM (Two-Phase SRM)을 제안하였다. 제안한 전동기는 구동할 때 고정자와 회전자를 통과하는 자속 통로가 짧고 고정자와 회전자 모든 부위에서 자속 교번이 없어 철손을 줄일 수 있고, 자기구조 면에서 고정자는 간단한 형태의 U-core를 가져 철심을 절감할 수 있는 장점이 있다.

주제어 : TPSRM, 철손, 자속 교번, U-core

I. 서 론

SRM(Switched Reluctance Motor)은 1980년에 Leed 대학의 Lawrenson 교수팀에서 설계 개념을 제시한 이후 다양한 자기구조를 갖는 SRM이 개발되고 있다[1,2]. 3상 이상의 상수를 갖는 SRM은 토크 리플이 적고 안정적인 제어가 가능하여 많은 분야에 사용되고 있다[2]. 그러나 단상 혹은 2상 SRM은 기본적으로 자기동이 불가능하고 토크 리플이 비교적 큰 단점이 있는 반면에 전력스위치 숫자를 적게 사용할 수 있어 경제적인 장점이 있다[2-12].

단상 SRM은 자기동을 하려면 자기구조의 변형과 기동 시 특정 회전자 위치로 정렬하는 제어가 필요하고 토크 리플도 큰

단점이 있다[2-4]. 그러나 TPSRM(Two Phase SRM)은 자기구조 변형만으로도 임의의 회전자 위치에서도 자기동이 가능하다. 또한, 고정자에서 자속 교번이 일어나지 않는 자기구조로 설계할 수 있다. 자속 교번은 철손에 지대한 영향을 미치고 있고 자속 주파수와 교번이 적을수록 철손은 작아진다[5-12].

본 논문은 분절 회전자(segmental rotor)를 갖는 새로운 TPSRM을 제안하였다. 제안한 TPSRM은 고정자가 간단한 4개의 U-core로 구성되어 철심을 절감할 수 있는 자기구조를 가진다. 고정자의 U-core는 짧은 자속 통로를 만들고 만들어진 자속은 고정지뿐만 아니라 회전자에서도 자속 교번이 없어 철손이 작다. 자기 해석을 위해 유한요소법 해석 프로그램인 Altair사의 Flux를 사용하였다.

II. 분절 회전자를 갖는 TPSRM

SRM은 릴럭턴스 토크를 이용하는 구동 방식을 채택하고 있어 고정자와 회전자 모두 돌극형 구조로 릴럭턴스 토크를 극대화하는 방향으로 개발되고 있다[1,2]. 일반적인 SRM은 간단한 자기구조, 우수한 속도 특성, 고효율 등의 장점을 가지지만 토크 리플, 진동, 그리고 소음 등이 비교적 큰 단점도 가지고 있다. 분절 회전자를 갖는 SRM은 짧은 자속 통로, 알루미늄으로 둘러싸인 원통형의 회전자를 가져 소음, 진동이 비교적 작으며 풍손, 철손이 적은 장점이 있다[13-16].

Fig. 1은 일반적인 회전자와 분절 회전자를 갖는 3상 SRM을 각각 보여주고 있다. Fig. 1(a)는 영구자석이나 권선이 없는 적층한 철심으로만 구성된 회전자를 보여주고 있다. Fig. 1(b)는 자속이 흐르는 분절만 적층된 철심으로 되어 있고 그 외 부분은 공기와 투자율이 비슷한 상자성체인 알루미늄으로 구성되어 자속이 인근 분절로 잘 흐르지 못하도록 공극과 같은 역할을 하고 있다[13-16].

Fig. 2는 A상을 여자하였을 때 일반적인 회전자와 분절 회전자의 자속 분포를 보여주고 있다. 일반적인 회전자를 갖는 SRM의 경우 반대쪽에 마주 보는 극과 한 쌍이 되어 A상을

여자하면 Fig. 2(a)와 같은 자속 분포를 갖는다. 이에 반해 분절 회전자를 갖는 SRM의 경우 인접한 고정자극으로 자속 통로가 형성되어 자속 경로가 짧다[13-16].

3상 이상의 SRM은 자기동이 가능하고 토크 리플이 단상 혹은 2상의 SRM에 비해 적은 장점이 있다. 단상 혹은 2상의 SRM은 자체적으로 자기동이 불가능하여 별도의 기동을 위한 전자기적 설계가 필요한 단점이 있다[2-11]. 특히 단상 SRM의 경우 기동하기 위해 특정 위치로 회전자를 배치하기 위해 자기적인 구조 변경과 제어기의 기동을 위한 과정이 필요하고 토크 리플이 매우 큰 단점이 있다[2-4]. TPSRM은 기동을 위한 자기구조의 변경만으로도 자기동이 가능하고 3상 이상의 SRM에 비해 전력전자 스위치를 줄일 수 있어 경제성을 가질 수 있는 장점이 있다[5-12].

Fig. 3은 일반적인 회전자와 분절 회전자를 갖는 TPSRM을 각각 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 고정자에서 자속의 교변이 일어나지 않는 기본적인 TPSRM을 보여주고 있다[8-12]. Fig. 3(b)는 본 논문에서 제안한 새로운 분절 회전자를 갖는 TPSRM을 보여주고 있다. 고정자는 분리된 4개의 U-core로 구성되고 회전자는 6개의 분절을 갖는다. 고정자는 E-core, C-core에 비해서도 철심을 적게 사용할 수 있는 구조로 되어

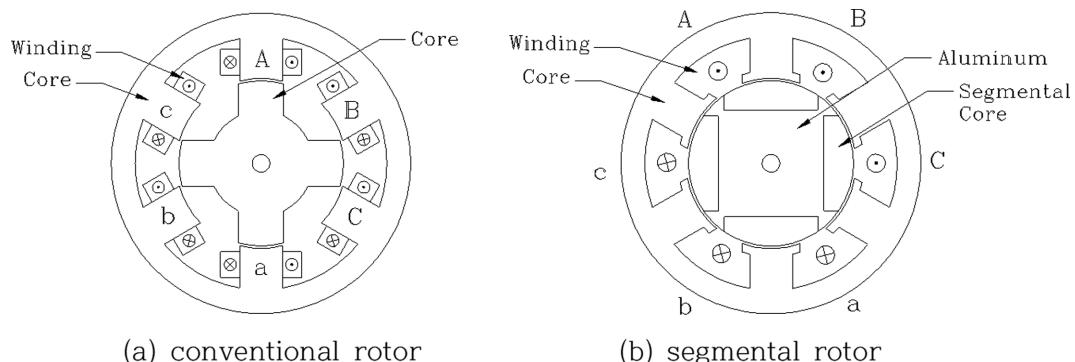


Fig. 1. Magnetic structure of SRM. (a) conventional rotor (b) segmental rotor.

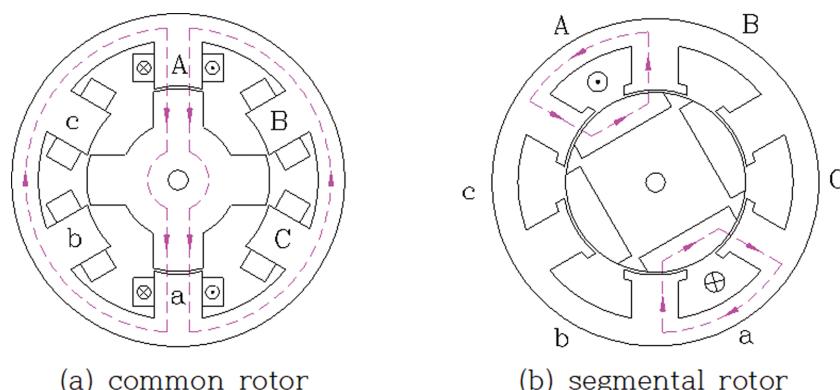


Fig. 2. (Color online) Flux distributions of SRMs as A phase is excited. (a) common rotor (b) segmental rotor.

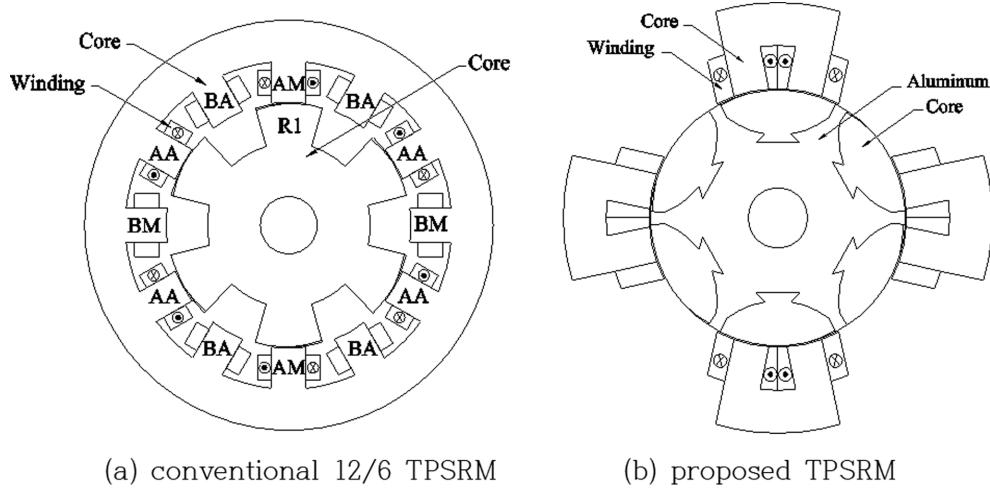


Fig. 3. Magnetic structure of TPSRMs. (a) conventional 12/6 TPSRM (b) proposed TPSRM.

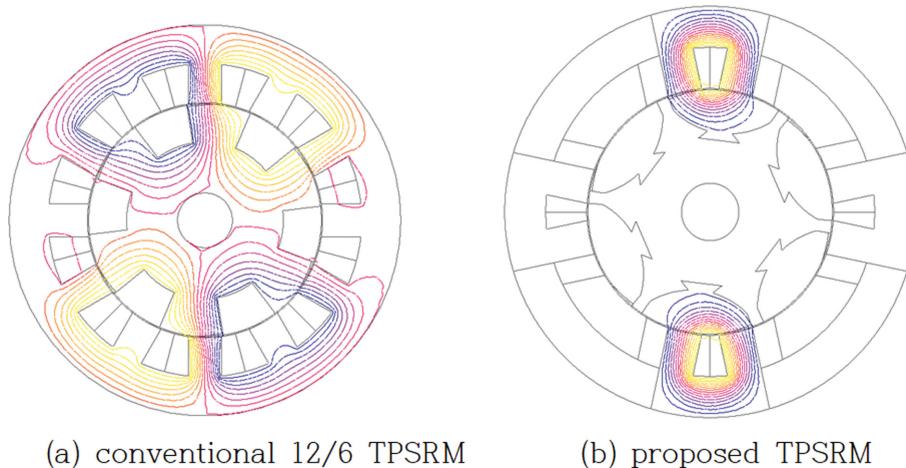


Fig. 4. (Color online) Flux distributions of TPSRMs. (a) conventional 12/6 TPSRM (b) proposed TPSRM.

있다. Fig. 3의 두 TPSRM은 자기동이 안되는 2상 SRM의 단점을 극복하기 위해서 공극의 크기를 가변하여 사선 모양으로 회전자 분절 일부분에 가공하였다[8-12].

Fig. 4는 Fig. 3의 TPSRM이 각각 A상을 여자하였을 때의 자속 분포를 보여주고 있다. Fig. 4(a)는 병렬로 자속 통로를 형성하고 있다[8-12]. Fig. 4(b)는 고정자극과 회전자 분절이 1:1로 대응하여 자속 통로를 형성하고 있어 다른 전동기에 비해 상대적으로 짧은 자속 통로를 가지고 있다.

III. 자속 교번이 없는 새로운 TPSRM의 자기구조 해석

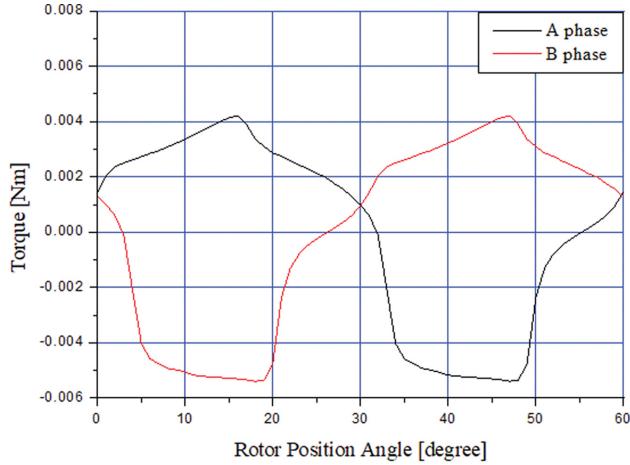
일반적으로 단상 혹은 TPSRM은 자기동을 못하는 자기구조로 되어 있다[1,2]. 따라서 이를 구동시키려면 별도의 자기구조 변형과 제어기법이 필요하다. Fig. 3의 TPSRM은 회전

Table I. Design specifications of TPSRMs.

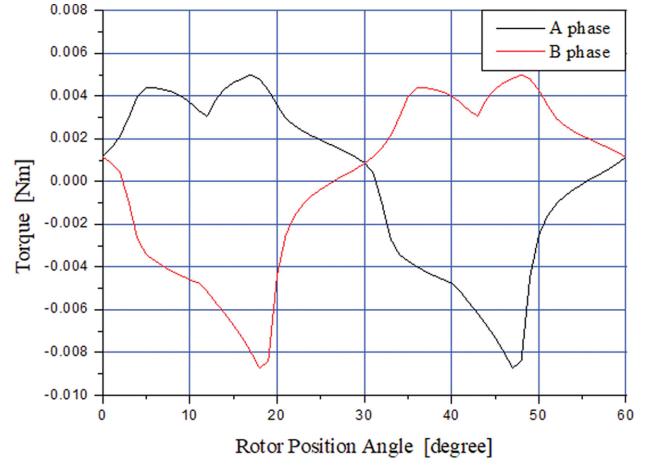
Parameters	12/6 TPSRM	Proposed TPSRM
Stator outer diameter [mm]	100	100
Stator inner diameter [mm]	80	80
Rotor outer diameter [mm]	59.4	59.4
Airgap [mm]	0.3	0.3
Stator pole arc [degree]	16	16
Rotor pole arc [degree]	32	56
Stack length [mm]	50	50
Turns/phase	100	100

자 자극의 자기구조를 변형하여 공극의 크기를 점진적으로 변화하게 함으로써 기동 토크를 확보하는 방법으로 기동하였다[8-12]. Table I은 Fig. 3의 TPSRM의 주요 설계 정수를 보여주고 있다.

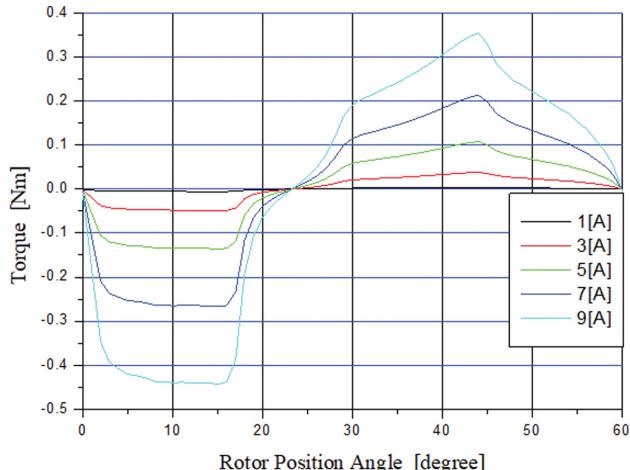
Fig. 5는 Fig. 3의 TPSRM의 각 상권선에 1[A]의 일정한



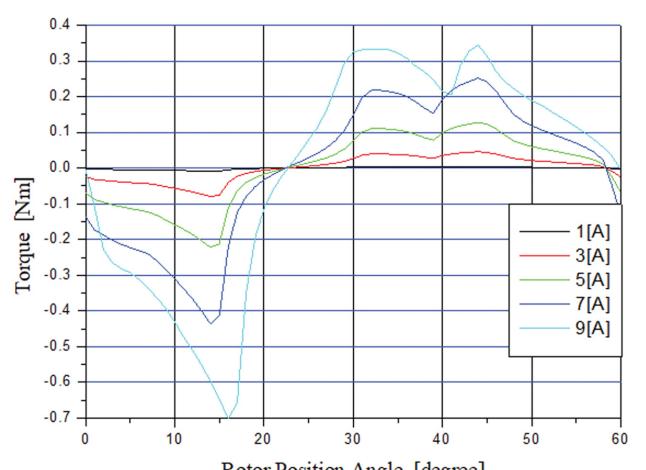
(a) conventional 12/6 TPSRM



(b) proposed TPSRM

Fig. 5. (Color online) Torque of TPSRMs with constant phase current (1 [A]). (a) conventional 12/6 TPSRM (b) proposed TPSRM.

(a) conventional 12/6 TPSRM



(b) proposed TPSRM

Fig. 6. (Color online) Torques of TPSRMs according to phase currents. (a) conventional 12/6 TPSRM (b) proposed TPSRM.

전류를 흘렸을 때의 토크를 보여주고 있다. 이 그림에서 알 수 있듯이 임의의 회전자 위치에서도 정토크를 발생시킬 수 있어 자기동이 가능함을 알 수 있다. 인버터는 가장 안정적인 성능을 보여주는 비대칭 인버터(Asymmetric Inverter)로 구성하였다[1,2].

Fig. 6은 Fig. 3의 TPSRM을 한 상에 각각 1, 3, 5, 7, 9[A]의 일정한 전류를 흘렸을 때 발생하는 토크를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 다양한 전류 조건에서도 항상 양의 토크를 발생시킬 수 있다.

SRM은 릴럭턴스 토크로 구동하는 방식이기 때문에 상권선에 흐르는 전류 방향과 토크 방향은 무관하다. 다만 전류 방향은 자속의 방향을 결정하기 때문에 자속의 교번을 최대한 억제하는 방향으로 전류 방향을 결정한다[1,2].

Fig. 7은 Fig. 3의 TPSRM의 고정자와 회전자 각 부분에서의 자속 모양을 보여주고 있다. Fig. 3(a)는 고정자에서 자속 교번이 일어나지 않는 대표적인 TPSRM이다[8-12]. 그러나 회전자에서는 Fig. 7(a)와 같이 자속 교번이 생긴다[8-12]. 그러나 제안한 TPSRM은 Fig. 7(b)에서 보는 바와 같이 고정자뿐만 아니라 회전자에도 자속 교번이 생기지 않아 철손이 감소하는 효과가 있다.

철손은 자속의 교번뿐만 아니라 자속밀도, 스위칭 주파수 등에 영향을 받는다[17]. SRM에서 한 상의 스위칭 주파수, f_{ph} 는 식(1)과 같다[1,2].

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

여기서 P_r 은 회전자극수이고 ω 는 회전자 속도[rpm]이다.

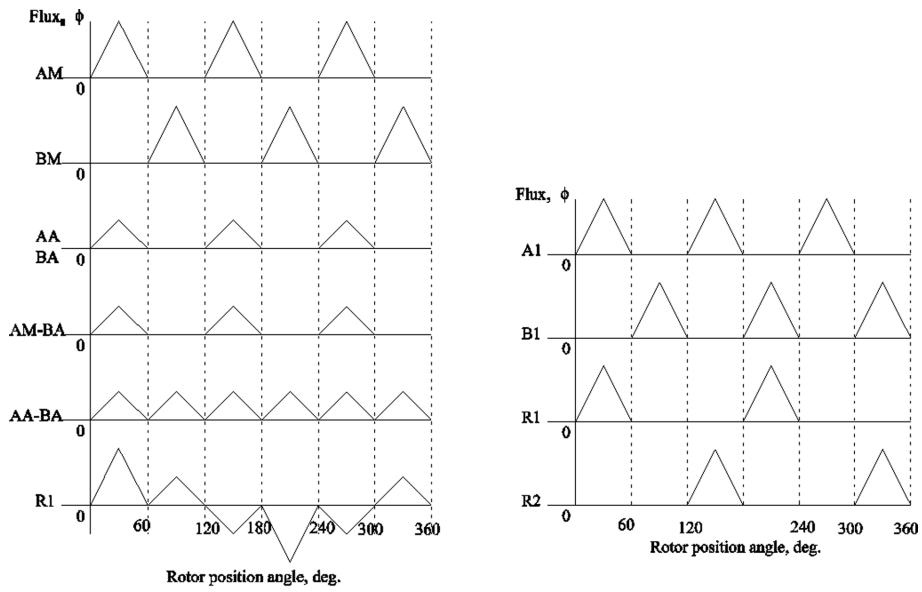


Fig. 7. Flux waveforms of TPSRMs. (a) conventional 12/6 TPSRM (b) proposed TPSRM.

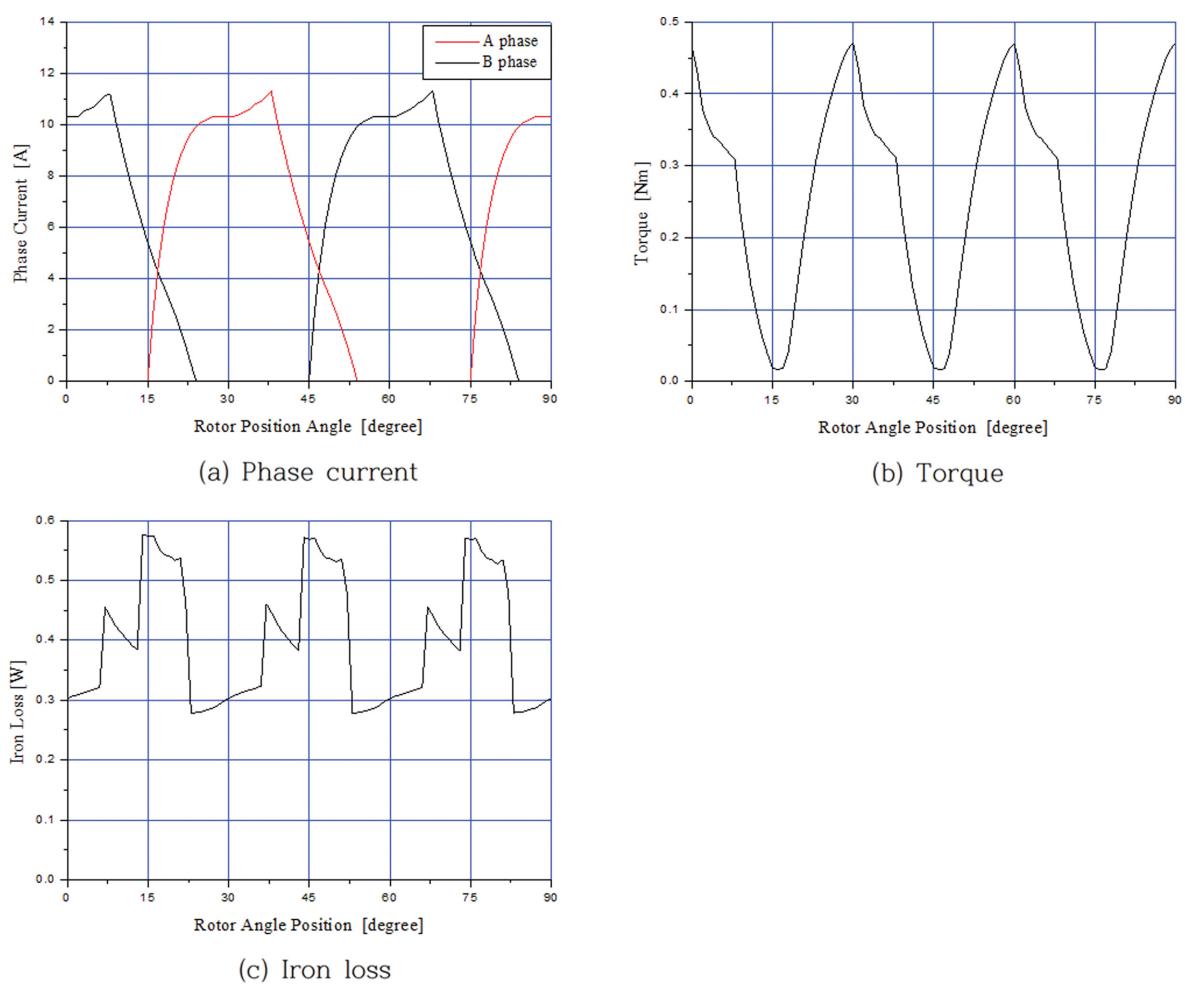


Fig. 8. (Color online) Conventional 12/6 TPSRM. (a) Phase current (b) Torque (c) Iron loss.

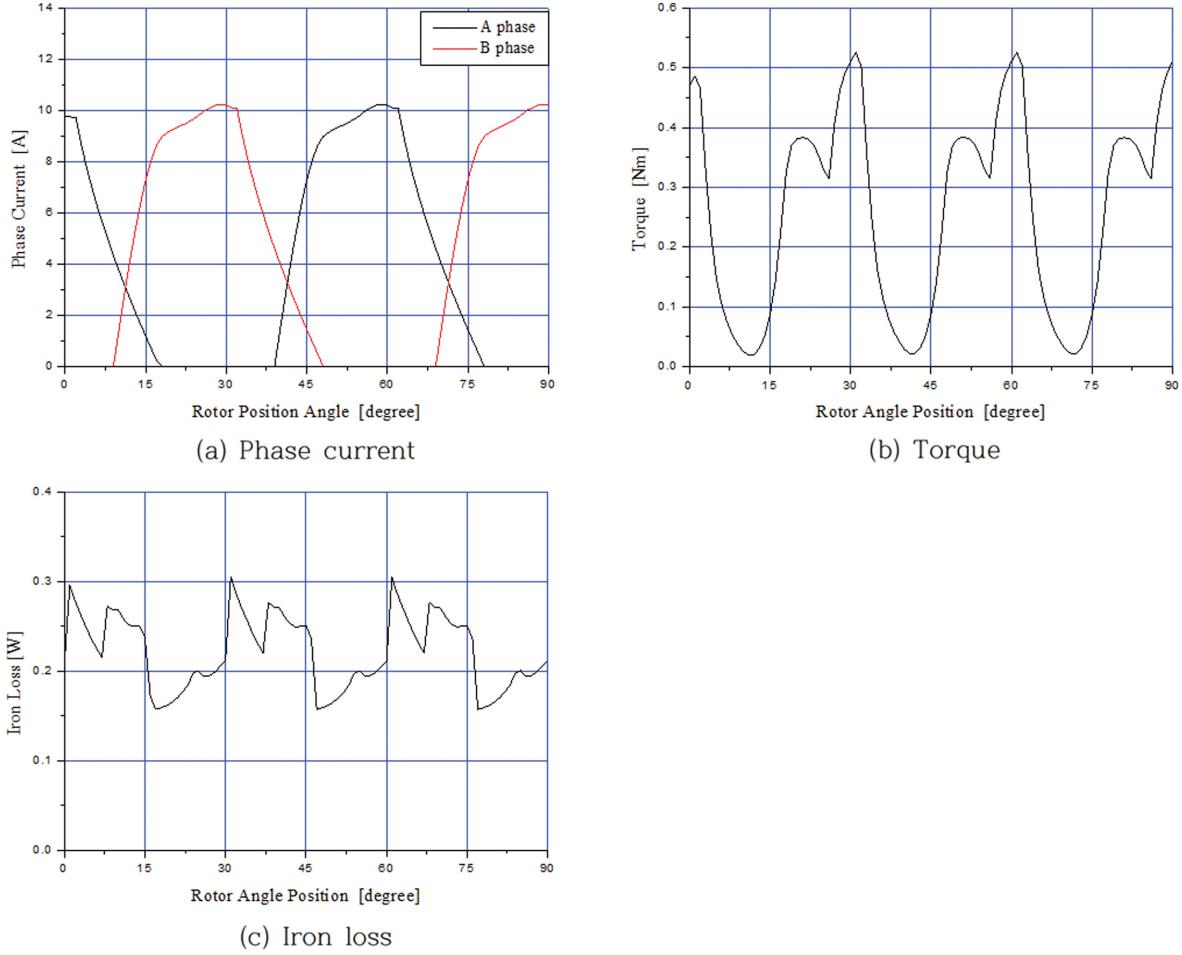


Fig. 9. (Color online) Proposed TPSRM. (a) Phase current (b) Torque (c) Iron loss.

그리고 전체 스위칭 주파수 f_s 는 다음과 같다[1,2].

$$f_s = qP_r\omega/60 \quad (2)$$

여기서 q 는 상수이다.

Fig. 7(a)에서 고정자에는 자속 교변은 일어나지 않지만, 고정자 대부분에서는 f_{ph} 주파수의 자속 변화가 일어나지만, 고정자 요크 일부분, 고정자극 AA와 BA사이에서 f_{ph} 의 2배의 주파수인 f_s 의 자속 변화가 일어난다. 회전자에서는 자속의 교변뿐만 아니라 f_s 주파수만큼 자속의 변화가 일어난다.

Fig. 7(b)의 제안한 TPSRM의 경우 간단한 4개의 U-core의 고정자 자극을 가지고 있고 각 자극에서 자속의 방향은 토크 발생 방향에 영향을 끼치지 않는다. 따라서 각 자극에서 독립적으로 여자할 수 있다. 이것은 고정자극에서 자속의 교변이 일어나지 않게 구동할 수 있다는 것을 의미한다. 이러한 부분은 분절 회전자에도 영향을 끼쳐 고정자와 분절 회전자의 모든 부위에서 자속의 교변이 일어나지 않는다. 자속의 변화 또한 f_{ph} 주파수의 변화만이 있음을 알 수 있다. 이것은 철손에 있어서 매우 큰 장점이다[17].

Table II. Core loss of TPSRMs.

	Core loss [W]	Hysteresis loss [W]	Eddy current loss [W]
Proposed TPSRM (1)	0.219	0.084	0.135
12/6 TPSRM (2)	0.385	0.185	0.200
(1)/(2) × 100, %	56.8	45.4	67.5

Fig. 8, 9는 Fig. 3의 각 TPSRM에 1,000[rpm]의 속도에서 같은 통전각(dwell angle)과 전압을 인가하였을 때 상전류, 토크, 그리고 철손을 보여주고 있다. 상전류와 토크는 12/6 TPSRM이 조금 크다. 이는 최저 인덕턴스 구간에서 제안한 U-core TPSRM이 공극이 상대적으로 작아 상전류가 더 빠르게 확립되기 때문이다.

Table II는 Fig. 8, 9일 때의 철손을 보여주고 있다. 제안한 TPSRM이 12/6 TPSRM에 비해 히스테리시스 손실은 약 45.4%, 와전류 손실은 67.5%로 적게 나와 전체 철손은 약 56.8% 정도로 적음을 알 수 있다. 이는 12/6 TPSRM이 상대적으로 긴 자속 통로를 가지고 있고 고정자에서는 자속의

교변이 없지만, 회전자에서는 자속 교변이 나타나고 Fig. 7(a)에서 보는 바와 같이 일부 구간에서는 자속 변화가 2배의 주파수로 나타나기 때문이다.

IV. 결 론

TPSRM은 전력스위치 소자의 숫자가 적어 3상 이상의 SRM에 비해 경쟁력을 갖지만, 성능이나 효율 면에서는 좀 떨어진다. 따라서 성능이나 효율을 최대한 올릴 수 있는 자기구조의 설계가 필요하다. 고정자 자기구조를 U-core, E-core 등으로 고정자 철심을 절약하는 구조 등도 많이 개발되고 고정자에 자속 교변이 없는 자기구조 등도 개발이 되고 있다[5-11].

본 논문에서는 자속 교변이 없는 분절 회전자를 갖는 새로운 TPSRM을 제안하였다. 제안한 TPSRM의 장점으로는 고정자에는 U-core 형태로 철심을 최소화하는 자기구조를 가지며, 한 상을 여자하였을 때 자속은 고정자의 U-core와 분절 회전자를 통과하는 짧은 경로를 가진다. 이러한 자속 경로로 인하여 고정자의 각 극에서 발생하는 자속 방향은 독립적으로 제어할 수 있어 고정자뿐만 아니라 회전자에서도 자속의 교변이 일어나지 않아 철손을 줄일 수 있다. 단점으로는 자기동을 위한 자기구조의 변경은 단방향 운전만 가능하며 짧은 자속 경로는 고정자의 U-core 내의 권선을 넣는 슬롯(slot) 공간이 부족할 수 있으나 C-core 형태를 슬롯 공간을 확장하여 해결할 수 있다.

References

- [1] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson, P. T. Blenkinsop, J. Corda, and N. N. Fulton, Proc. IEE **127B**, 253 (1980).
- [2] R. Krishnan, Switched Reluctance Motor Drives, CRC Press (2001) pp. 3~7, 173~181.
- [3] R. Krishnan, S. Y. Park, and K. S. Ha, IEEE Trans. on IA. **41**, 1047 (2005).
- [4] M. D. Hennen, R. W. De Doncker, N. H. Fuengwarodsakul, and J. O. Fiedler, IEEE Trans. on PE. **26**, 1337 (2011).
- [5] C. Lee and R. Krishnan, IEEE Trans. on IA. **45**, 1084 (2009).
- [6] C. Lee, R. Krishnan, and N. S. Lobo, IEEE Trans. on IA. **45**, 703 (2009).
- [7] M. Tanujaya, D.-H. Lee, and J.-W. Ahn, IEEE 2011 ICEMS (2011).
- [8] S.-G. Oh and R. Krishnan, IEEE Trans. on IA. **43**, 1247 (2007).
- [9] S.-G. Oh, JIEIE **25**, 115 (2011).
- [10] K.Y. Bae and S.-G. Oh, JIEIE **25**, 115 (2014).
- [11] C. Lee, H. Hwang, and S.-G. Oh, KIEE **55**, 315 (2017).
- [12] S.-G. Oh, J. Korean Magn. Soc. **32**, 271 (2022).
- [13] J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, and K. Tanaka, J. ElectricalEng. Technol. **1**, 58 (2006).
- [14] B. C. Mecrow, E. A. El-Kharashi, J. W. Finch, and A. G. Jack, IEEE Trans. on EC. **19**, 679 (2004).
- [15] J. D. Widmer, R. Martin, and B. C. Mecrow, IEEE Trans. on IA. **51**, 2990 (2015).
- [16] Z. Xu, D.-H. Lee, and J.-W. Ahn, KIPE **21**, 1 (2016).
- [17] T. L. Mthombeni and P. Pillay, IEEE Trans. on EC. **20**, 836 (2005).