

토로이달 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 분석

(Analysis on the Characteristics of a Toroidal Switched Reluctance Motor)

양형열*

(Hyong-Yeol Yang)

요 약

본 논문에서는 토로이달 타입 SRM(TSRM)의 특성에 대해 연구하였다. TSRM은 CSRМ(Conventional SRM)과는 다르게 권선이 스테이터의 돌극이 아닌 요크에 감겨있는 형태로 되어있다. 따라서 TSRM만의 여러 가지 장점을 가지게 되며 사용되는 구동장치, 결선 방법, 인턴턴스, 구동 방법 등이 CSRМ과는 다른 형태를 가지게 된다. 뿐만 아니라 토크를 발생시키는 요소도 달라지고 전류 파형도 달라지게 된다. 본 논문에서는 TSRM을 이론적으로 검토하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 구동 특성을 분석하였다.

Abstract

In this paper study on a toroidal switched reluctance motor(TSRM) is described. The structure of the TSRM is different from that of a conventional SRM. The main windings of the TSRM are wound around yoke of the stator while those of the conventional SRM are wound around its stator poles. Therefore the TSRM has many advantages and drive system, winding connection, inductance, drive method, torque, current waveform of the TSRM are different from those of the conventional SRM. In this paper, the TSRM is analysed by simulation and experiment.

Key Words : Toroidal SRM, Conventional SRM, Inductance, Flux Linkage

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM: Switched Reluctance Motor)는 가변속 전동기로 개발된 가변 릴럭턴스 전동기(VRM)와 구동 전원장치인 인버터를

결합한 것으로 고정자와 회전자가 모두 돌극형으로 되어 있고, 고정자에만 권선이 감겨있어 고정자에 전류를 흘리면 고정자와 회전자간의 자기 회로의 자기저항이 최소가 되는 방향, 즉 여자시키는 상의 인턴턴스가 최대가 되는 위치로 회전자가 이동하려는 힘이 발생하는 원리를 이용한 것이다[1].

한편, 이러한 일반적인 CSRМ(Conventional SRM)과 구동원리는 같으면서 구조는 약간 다른 TSRM(Toroidal SRM)이 연구되었다[2]. 이 연구에서는 TSRM의 장점들이 설명되어있으며, 이것의 기

* 주저자 : 지오토(주) 연구소장,
전남대학교 전기공학과 겸임교수
Tel : 062-974-3007, Fax : 062-974-3010
E-mail : sfish2000@gmail.com
접수일자 : 2009년 3월 30일
1차심사 : 2009년 4월 16일
심사완료 : 2009년 4월 24일

토로이달 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 분석

계적인 구조와 자장분포 등에 대해 설명하고 있다. 그러나 TSRM의 토크 분석, 자속분포, 인덕턴스 분석 등에 대한 설명이 되어있지 않으므로 TSRM을 이해하는데 다소 부족한 면이 있다. 본 논문에서는 TSRM의 해석을 보완하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 구동 특성을 보다 정밀하게 분석하였다.

2. TSRM의 이론

2.1 TSRM의 구조

Toroidal SRM의 구조는 CSRМ의 구조와는 약간 다른 구조로 되어있다. CSRМ의 경우 코일을 모터의 돌극에 감는 반면 TSRM은 그림 1과 같이 모터의 요크부분에 감는 구조적인 특징을 가진다. 따라서 하나의 돌극을 여자하기 위해서는 두 권선을 여자하는 2상여자 방식을 취해야 한다. 그러므로 CSRМ 한 상이 여자되는 구간의 두 배의 전도각을 가지게 된다. 이는 BLDCM(Brushless DC motor)과 매우 유사한 특징을 지닌다[2].

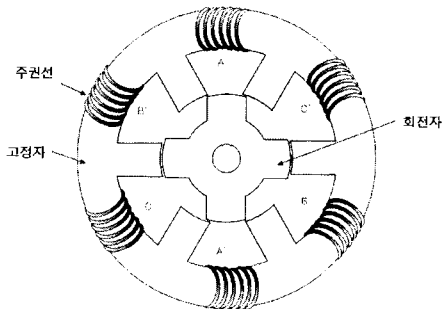


그림 1. TSRM의 구조
Fig. 1. Structure of the TSRM

2.2 TSRM의 구동

TSRM은 두 개의 상이 동시에 여자되므로 그림 2와 같은 기본 구동 회로를 가지게 된다. 그림 2는 풀브리지 인버터를 도시하였으나 비대칭 인버터를 사용할 수도 있다. TSRM의 스위칭 패턴은 그림 3에서 알 수 있는 것처럼 도통각이 CSRМ보다 두 배 더 커지게 되며, 이것은 BLDCM 구동 방법과 매우 유사

하기 때문에 상용화되어있는 BLDCM의 드라이버를 약간의 수정만으로 사용가능하게 된다.

그림 4는 두 상(A상과 C상)이 동시에 여자되었을 때 TSRM의 자속분포로서 전자기해석 시뮬레이터인 Maxwell 2D를 사용하여 시뮬레이션한 결과이다.

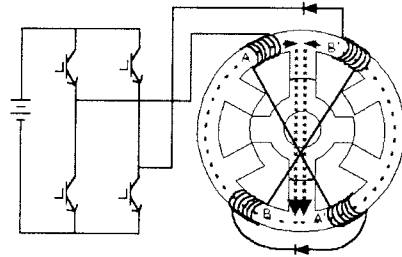


그림 2. 풀브리지 인버터와 TSRM의 결선도
Fig. 2. Full-bridge inverter and cross-sections of the TSRM

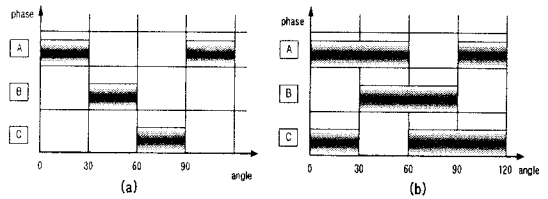


그림 3. CSRМ과 TSRM의 스위칭 패턴: (a) CSRМ, (b) TSRM
Fig. 3. Comparison of switching pattern: (a) for a CSRМ (b) for a TSRM

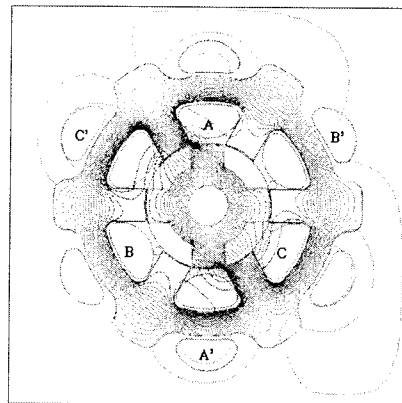


그림 4. TSRM 구동 시의 자기력선 분포
Fig. 4. Magnetic-flux plot resulting from excitation of the TSRM

2.3 에너지 변환 및 토크

토로이달 SRM에서 자속은 세 상중 두 개의 상이 여자되어 두 배로 발생한다. 페러데이법칙을 도입하면 저장된 에너지 dW_f 는

$$dW_f = i_a d\lambda_a + i_b d\lambda_b - T_e d\theta \quad (1)$$

또는

$$dW_f = \left. \frac{\partial W_f}{\partial \lambda_a} \right|_{\lambda_b, \theta = \text{const}} d\lambda_a + \left. \frac{\partial W_f}{\partial \lambda_b} \right|_{\lambda_a, \theta = \text{const}} d\lambda_b + \left. \frac{\partial W_f}{\partial \theta} \right|_{\lambda_a, \lambda_b = \text{const}} d\theta \quad (2)$$

으로 표현된다[2].

따라서 토크는

$$T_e = - \frac{\partial W_f(\lambda_a, \lambda_b, \theta)}{\partial \theta} \quad (3)$$

이 된다.

코에너지 W_c 를 사용하여 표현하면

$$W_c = \lambda_a i_a + \lambda_b i_b - W_f \quad (4)$$

이 되며, 토크는 회전자 위치에서 다른 코에너지의 변화율에 의해 주어지므로 식 (5)와 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{\partial W_c(i_a, i_b, \theta)}{\partial \theta} \quad (5)$$

TSRM 구동시 하나의 상전류는 이미 최대치에 올라가 있는 상태이며 다음에 여자시키는 상의 전류는 0에서 그 최대전류로 상승하게 된다. 두 전류가 모두 정상상태에 이르렀을 때 두 전류에 의해 발생하는 쇠교자속은 식 (6)과 식 (7)로 표현된다.

$$\lambda_a = L_a(\theta, i_a) i_a + M_{ab}(\theta, i_a, i_b) i_b \quad (6)$$

$$\lambda_b = L_b(\theta, i_b) i_b + M_{ab}(\theta, i_a, i_b) i_a \quad (7)$$

주어진 전류에서 회전자 위치에 대한 인덕턴스 변화가 선형이라고 하면,

$$\begin{aligned} W_c &= \frac{1}{2}(L_a i_a^2 + L_b i_b^2 + M_{ab} i_a i_b + M_{ab} i_a i_b) \\ &= \frac{1}{2} L_a i_a^2 + \frac{1}{2} L_b i_b^2 + M_{ab} i_a i_b \end{aligned} \quad (8)$$

이므로, 발생하는 토크는

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} \quad (9)$$

이 되며, 3상 모두를 고려할 경우는 식 (10)과 같이 토크가 발생됨을 알 수 있다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} \\ &+ i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_c i_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \end{aligned} \quad (10)$$

2.4 TSRM의 인덕턴스 분석

TSRM은 권선이 고정자의 요크에 감겨있으므로 자기인덕턴스 및 상호인덕턴스가 CSRМ과는 다르게 나타난다. CSRМ에서 자기인덕턴스는 누설자속을 무시하면 돌극끼리 겹쳐지는 면적에 비례하므로 완전히 겹쳐져 있을 때 최대의 인덕턴스를 갖고 겹쳐지는 부분이 없을 때 최소의 인덕턴스를 갖는다. 그러나 다른 상권선과 쇠교하는 자속이 없으므로 상호인덕턴스는 거의 나타나지 않는다.

TSRM에서는 CSRМ과는 반대로 상호인덕턴스의 변화가 크다. 회전자 위치가 변하더라도 모든 자리를 형성하는 면적은 변화되지 않기 때문에 자기인덕턴스는 회전자 위치와 관계없이 일정하게 나타난다. 하지만 상호인덕턴스는 회전자 위치에 따라서 양(+)과 음(-)으로 변화된다.

그림 5에서 회전자 위치에서 다른 상호 인덕턴스의 변화를 알 수 있으며 각 회전자 위치에서의 A상과 B상의 상호인덕턴스는 다음과 같이 생성된다. 단,

토로이달 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 분석

M_{ab} 는 A상에 의한 B상의 인덕턴스를 나타내며 그림 5에서 화살표는 A와 A' 권선에 의한 자속의 방향을 나타낸다.

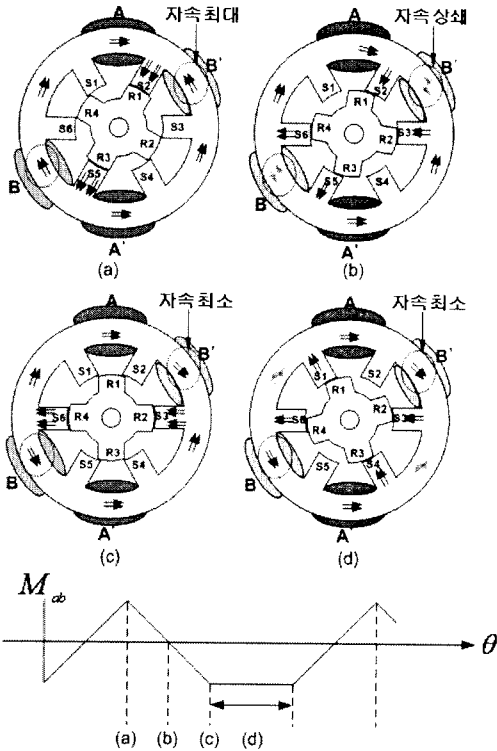


그림 5. 회전자 위치에 따른 TSRM의 상호인덕턴스
Fig. 5. Mutual inductance variation with respect to the rotor position for a TSRM

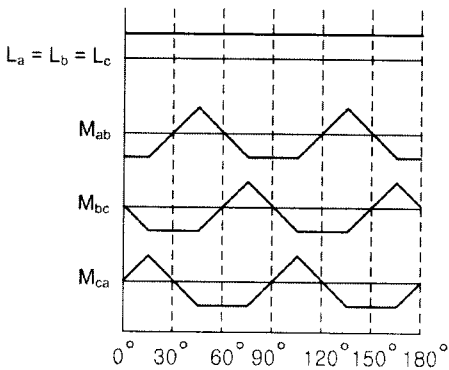


그림 6. TSRM의 자기/상호인덕턴스 변화
Fig. 6. Self/Mutual inductance variation with respect to the rotor position for a TSRM

- (1) R1-S2, R3-S5가 완전히 정렬되었을 때 A상과 B상의 상호 인덕턴스는 양(+)의 방향이 되며 최대의 상호 인덕턴스 값을 갖는다.
- (2) R1-S2, R3-S5가 절반 겹쳤을 경우는 R2-S3, R4-S6도 절반씩 겹치게 되므로 자속이 서로 상쇄되어 상호 인덕턴스는 0이 된다. (R1-S2, R3-S5: (+), R2-S3: R4-S6(-))
- (3) 계속해서 CCW방향으로 움직일 경우 R1-S2, R3-S5의 면적보다 R2-S3, R4-S6에서 겹치는 면적이 커지므로 상호 인덕턴스는 음(-)의 방향이 된다.
- (4) R1-S2, R3-S5가 겹치지 않는 30[°]구간은 R2-S3, R3-S4, R3-S5, R4-S6, R4-S1의 겹치는 면적이 항상 같으면서 음(-)의 방향이므로 상호 인덕턴스는 음(-)의 값을 갖게 된다.
- (5) B상과 C상, C상과 A상의 상호 인덕턴스도 마찬가지로 양(+)과 음(-)으로 변화되면서 나타나게 되며 전체 자기 인덕턴스와 상호 인덕턴스는 그림 6과 같이 생성된다.

상호 인덕턴스와 자기 인덕턴스의 변화율을 고려하면 토크를 표현하는 식 (9)에서 자기 인덕턴스의 변화분이 포함된 항은 모두 삭제되면서 결국 토크는 식 (11)과 같이 두 상 전류의 곱과 상호 인덕턴스의 변화에 의해서만 나타나게 된다는 것을 알 수 있다.

$$T_e = i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} \quad (\because L_a = L_b = const) \quad (11)$$

이러한 특징으로 볼 때 TSRM은 B. C. Mecrow가 제안한[3-4] Fully pitched SRM과 매우 유사하다고 할 수 있으며, 다음과 같은 특징을 가지게 된다[2].

- (1) 토크생성에 있어서 자기 인덕턴스의 변화는 무시되고 상호인덕턴스의 변화에 의해서만 발생한다[4].
- (2) 토크를 발생하기 위한 자속을 두 개의 상에서 생성하기 때문에 전기 및 자기회로의 이용률이 높다[5].
- (3) 코일의 절반이 요크의 바깥에 위치하므로 코일을 감기 위한 슬롯의 면적이 1/2로 줄어들고

코어의 지름이 감소된다.

- (4) 코어의 지름감소로 자속의 경로가 단축되며, 철손 감소로 효율이 향상된다.
- (5) 전체적인 부피가 적어지므로 무게도 감소하고, 적은 용량의 모터는 플라스틱 패키징도 가능하다.

2.5 인버터

Toroidal SRM은 일반적인 C-dump 인버터와 비대칭형 인버터뿐만 아니라 일반적으로 SRM에 적용 불가능하리라 판단되는 풀브리지 인버터까지도 적용될 수 있다.

Mecrow, B.C., Clothier, A.C., Barrass, P.G., Weiner, C.는 Fully pitched winding SRM의 컨버터로서 비대칭 컨버터의 단점을 보완하는 연구를 하였다[6]. 이 연구의 결과로 비대칭 브리지 컨버터 보다는 그림 7과 같이 풀브리지 인버터와 다이오드를 사용하는 것이 효과적이라는 것을 알 수 있다.

이러한 구조는 비대칭 컨버터에서와는 달리 한 상을 도통하는데 하나의 파워소자만을 필요로 하게 되며, 범용 풀브리지 인버터 모듈을 사용할 수 있으므로 저가화가 가능하다. 뿐만 아니라 다이오드를 모터의 단자대에 부착함으로써 단지 세 개의 연결선만 필요하게 되는 장점을 가진다. 따라서 본 실험에서는 TSRM 구동용 인버터로서 풀브리지형 인버터를 적용하였다.

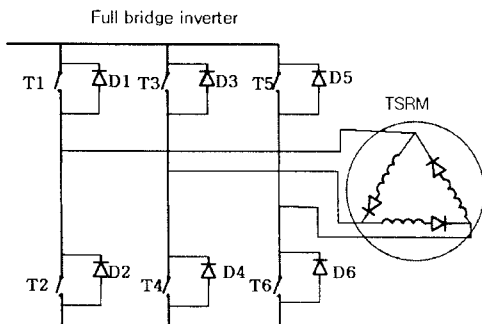


그림 7. TSRM과 풀브리지 인버터
Fig. 7. TSRM and Full bridge Inverter

3. 시뮬레이션 및 실험

3.1 시뮬레이션

전자기 해석 소프트웨어 Maxwell 2D를 이용한 시뮬레이션을 통하여 TSRM의 구동특성을 분석하였다. 그림 8은 상호인덕턴스와 자기인덕턴스의 시뮬레이션 결과를 보여주고 있다. 이는 그림 6과 유사한 파형임을 알 수 있다.

TSRM에 대한 시뮬레이션결과를 그림 9-11에서 보여주고 있다. 그림 9는 TSRM의 쇄교자속 파형을 보여주고 있다. CSRSM의 쇄교자속은 양(+)의 방향으로만 생성되는 것과 다르게 TSRM에서는 쇄교자속의 방향이 바뀌고 있는 것을 알 수 있다. 총 90도 주기에서 60도 구간은 (+)방향, 30도 구간은 (-)방향으로 자속이 생성되고 있다. 그림 10은 TSRM의 전류파형이다. 두 개의 상에 동시에 전류가 흐르고 있음을 알 수 있다. 그리고 TSRM의 토크파형을 그림 11에서 보여주고 있다. 그림에서 보는 것과 같이 토크 파형은 CSRSM의 토크와 거의 유사한 형태라고 볼 수 있다.

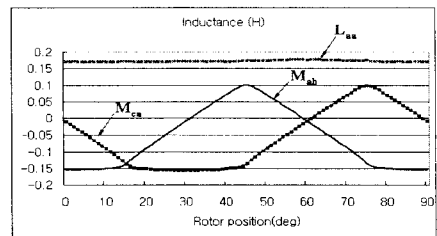


그림 8. TSRM의 자기/상호 인덕턴스
Fig. 8. Self/Mutual Inductance of a TSRM

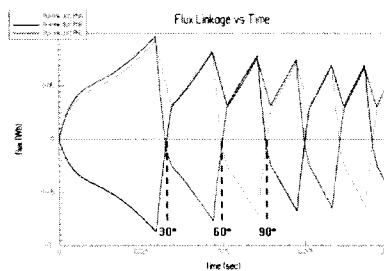


그림 9. TSRM의 쇄교자속
Fig. 9. Flux linkage of a TSRM

토로이달 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 분석

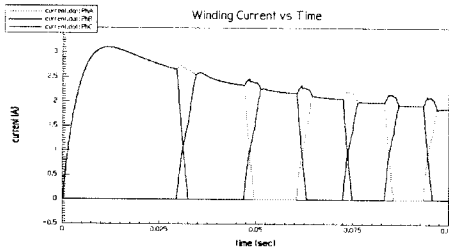


그림 10. TSRM의 전류파형
Fig. 10. Current waveform of a TSRM

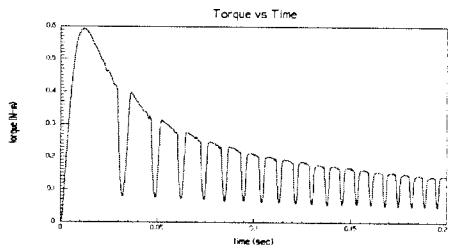


그림 11. TSRM의 토크파형
Fig. 11. Torque of a TSRM

3.2 실험

그림 12에서 실험에 사용된 6/4 TSRM을 보여주고 있으며, 제원은 표 1과 같다. 실험에서는 그림 7과 같은 범용적인 풀브리지 인버터를 사용하였으며, 구동을 위한 제어기는 DSP(TMS320F340)를 사용하였다.

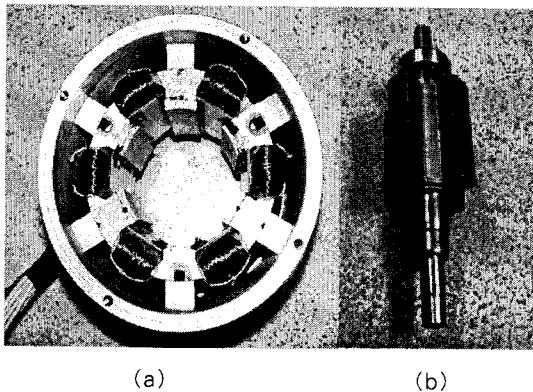


그림 12. 제작된 TSRM: (a)고정자, (b)회전자
Fig. 12. TSRM: (a) Stator, (b) Rotor

표 3. 실험 모터의 제원
Table 3. Specification of the motor

Rated output power	1[kW]	Rated voltage	220[V]
Rated speed	3,600[rpm]	Stator pole number & arc	6 pole, 31[°]
Outer diameter (stator)	118[mm]	Rotor pole number & arc	4 pole, 30.5[°]
Outer diameter (rotor)	72[mm]	Air gap	0.25[mm]
Stack length	75[mm]	Resistance per phase	2.3[Ω]
Turns per pole	235		

그림 13~15는 각각 어드밴스각 10도, 15도, 20도 인 경우의 무부하시 전류파형이다. 그림 14는 그림 10의 시뮬레이션 파형과 유사한 결과이며 항상 두 개의 상이 온 되어 있음을 알 수 있다. 그림 16은 TSRM 기동시의 속도특성을 보여주고 있다.

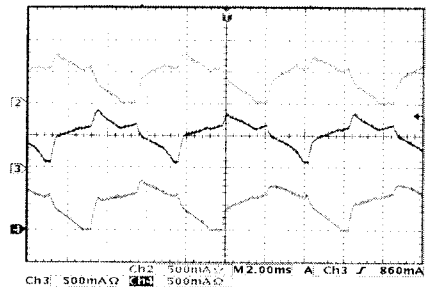


그림 13. 실험에 의한 TSRM의 전류 파형(어드밴스각: 10도)
Fig. 13. Current waveform of a TSRM by experiment(adv. angle: 10deg)

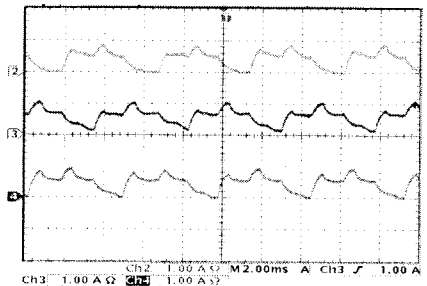


그림 14. 실험에 의한 TSRM의 전류 파형(어드밴스각: 15도)
Fig. 14. Current waveform of a TSRM by experiment(adv. angle: 15deg)

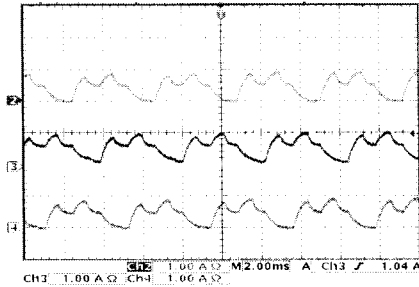


그림 15. 실험에 의한 TSRM의 전류 파형(어드밴스각: 20도)
 Fig. 15. Current waveform of a TSRM by experiment(adv. angle: 20deg)

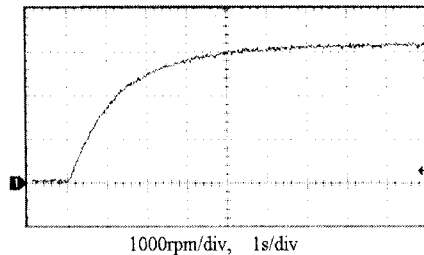


그림 16. 기동시 TSRM의 속도 파형
 Fig. 16. Speed of the TSRM at startup

8. 결 론

본 논문에서는 Toroidal SRM(TSRM)의 이론적 특성을 분석하고 시뮬레이션과 실험을 통하여 구동 특성을 파악하였다.

TSRM은 권선의 배치가 CSRМ(Conventional SRM)과는 다르므로 전류, 인덕턴스, 쇄교자속 분포 및 구동방법 등에서 차이를 보이고 있다. TSRM의 토크발생 원리, 구조적인 특징, 인덕턴스의 형태, 구동 방법, 전류 및 자속의 형태 등이 본 논문에서 주로 다루어져 있으며, 시뮬레이션과 실험을 통해서

구동 특성을 보여주었다.

TSRM에 관한 특성 분석 결과는 향후 TSRM에 관한 연구를 하고자 할 때 많은 참고가 될 것으로 기대된다.

References

- (1) T. J. E. Miller. "Switched reluctance motors and their control", Clarendon Press. 1993.
- (2) K. B. Kim, "Toroidal switched reluctance motor part 1. fundamentals", Korea-Germany symposium, pp. 135-141, Nov. 1998.
- (3) B. C. Mecrow, "New winding configurations for doubly salient reluctance machines", IEEE Trans. on Ind. Appl., Vol. 32, No. 6, pp. 1348-1356, November/December 1996.
- (4) B. C. Mecrow "Fully pitched-winding switched-reluctance and stepping-motor arrangements", IEE Proc. B [see also IEE Proc.-Electric Power Appl.] Electric Power Appl., Vol. 140 Issue: 1, pp. 61-70, Jan. 1993.
- (5) M. Garip, Y. Ozoglu and E. Mese, "An approach to torque ripple reduction in fully pitched switched reluctance motors by pole tip shaping", 11th Mediterranean Electrotechnical Conf., pp. 157-161, May 2002.
- (6) B. C. Mecrow, A. C. Clothier, P. G. Barrass and C. Weiner, "Drive configurations for fully-pitched winding switched reluctance machines", The Thirty-Third IAS Ann. Mtg., IEEE Ind. Appl. Conf., Vol. 1, pp. 563-570, Oct. 1998.

◆ 저자소개 ◆

양형열 (梁煒烈)

1969년 5월 27일생. 1993년 전남대학교 전기공학과 졸업. 1998년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2004년 동대학 대학원 전기공학과 졸업(박사). 1993~1994년 현대자동차(주) 사원. 2005년 10월~2006년 10월 미국 Virginia Tech. Post-Doc. 연구원. 2007년 3월~2009년 2월 호남대학교 전임강사. 2009년 3월~현재 지오토(주) 연구소장. 2009년 3월~현재 전남대학교 전기공학과 겸임교수.