

Toroidal SRM과 Conventional SRM의 특성 비교에 관한 연구

(Study on Comparison Between a Toroidal SRM and a Conventional SRM)

김재혁* · 양형열**

(Jae-Hyuck Kim · Hyong-Yeol Yang)

요 약

본 논문에서는 토로이달 타입 SRM(switched reluctance motor)과 일반적인 SRM의 특성에 대해 비교 연구하였다. TSRM(toroidal SRM)은 CSRМ(conventional SRM)과는 다르게 권선이 고정자의 돌극이 아닌 요크에 감겨있는 형태로 되어 있다. 따라서 TSRM은 구조뿐만 아니라 구동회로, 구동방법, 전류, 유기 전압, 쇄교자속 등이 CSRМ과는 다른 특성을 갖는다. 본 논문에서는 TSRM과 CSRМ을 이론적으로 비교하고 시뮬레이션을 통하여 각각의 구동 특성을 분석하여 비교하였다.

Abstract

This paper discusses comparison between a CSRМ(conventional SRM) and a TSRM(toroidal SRM). Unlike the CSRМ, the TSRM has its windings mounted around the stator yoke instead of the stator pole. Therefore, the TSRM has many different properties in terms of the structure as well as the waveform of phase currents, phase voltages, back-EMF, flux linkages, etc. This paper presents the theoretical comparison between the TSRM and the CSRМ followed by simulation results.

Key Words : Switched Reluctance Motor Toroidal SRM(TSRM), Conventional SRM, Inductance, Flux Linkage

1. 서 론

일반적인 SRM(CSRМ : conventional SRM)은 보통 비대칭 컨버터를 사용하여 구동하지만 토로이달

SRM(TSRM : toroidal SRM)의 경우는 풀 브리지 인버터를 사용하여 구동한다. TSRM은 토크가 상호인덕턴스의 변화에 의해 발생한다는 점에서는 B. C. Mecrow가 제안한[1-3] fully-pitched SRM과 매우 유사하다고 할 수 있으며, 구동 방법에 있어서는 두 개의 상을 동시에 여자시키는 2상 여자 방식을 사용한다는 점에서 BLDCM의 구동법과 유사하다고 볼 수 있다.

참고문헌 [4-5]에서는 TSRM의 장점과 기계적인 구조 및 자장분포 등에 대해 설명하고 있으나, 그 이후

* 주저자 : RAMU Inc. 엔지니어
** 교신저자 : 호남대학교 전기공학과 전임강사
Tel : 1-540-449-2706, Fax : 062-940-5072
E-mail : marcjkim@gmail.com
접수일자 : 2010년 3월 2일
1차심사 : 2010년 3월 5일
심사완료 : 2010년 3월 16일

아직까지 TSRM에 대한 활발한 연구가 이루어지지 않는 실정이다. 따라서 본 논문에서는 CSRМ과 TSRM의 비교 분석을 통해 TSRM의 대한 이론적 이해를 돕고자 한다. 먼저 구조, 토크 특성, 그리고 구동 방법에 관한 이론적인 비교분석을 설명한 후 시뮬레이션을 통한 자속 및 전류에 관한 두 모터간의 특징을 분석 비교한다.

2. CSRМ과 TSRM의 비교

2.1 구조적인 특징

CSRМ은 널리 알려져 있는 바와 같이 회전자와 고정자가 모두 돌극 형태로 되어 있으며, 고정자의 돌극에 권선이 감겨있다. SRM은 릴럭턴스 토크에 의해서 구동되기 때문에 고정자의 돌극에 자속을 흘려주어야 하며 이를 위해서는 그림 1과 같이 하나의 상만을 여자시키게 된다. 이때 상 여자를 위한 컨버터는 여러 가지가 연구되고 있지만 안정적인 특성과 제어의 용이성 때문에 비대칭 컨버터가 가장 많이 사용되고 있다.

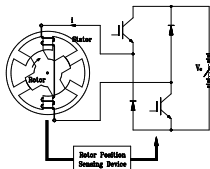


그림 1. CSRМ의 구동회로
Fig. 1. Drive circuit of the CSRМ

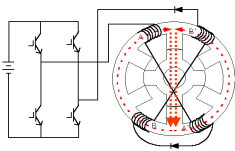


그림 2. TSRM의 구동회로
Fig. 2. Drive circuit of the TSRM

TSRM은 CSRМ과는 다르게 권선이 그림 2와 같이 고정자의 요크에 감겨있는 것이 특징이다. 따라서 하

나의 돌극에 자속을 흘려주기 위해서는 두 개의 상을 동시에 여자시켜 주어야 한다. 이를 위해서는 그림과 같이 범용적으로 사용되고 있는 풀브리지 인버터를 사용할 수 있으며 BLDC 모터를 구동하는 것과 같이 구동할 수 있다.

2.2 에너지 변환 및 토크

CSRМ과 TSRM의 에너지 변환 및 토크는 각각 다르게 나타난다. CSRМ에서 전압방정식은

$$v = iR_s + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{dt} = iR_s + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + \omega_m i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (1)$$

여기서 R_s 는 권선 저항, i 는 권선 전류, ω_m 회전속도이며, 입력전력은

$$P_i = i^2 R_s + \frac{d}{dt} \left(\frac{1}{2} L(\theta, i) i^2 \right) + \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (2)$$

이 된다. 이때 토크 성분이 되는 출력은

$$P_a = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \omega_m \quad (3)$$

이다. 여기서 $P_a = \omega_m T_e$ 이므로 발생하는 토크는 다음과 같다.

$$T_e = \frac{P_a}{\omega_m} = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \quad (4)$$

또한 코에너지의 개념을 도입하면 발생하는 토크는 식 (5)와 같다.

$$T_e = \frac{\partial W_c(i, \theta)}{\partial \theta} = \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{i^2}{2} \quad (5)$$

한편 토로이달 SRM은 고정자의 요크에 권선이 감겨져 있으며, 2개상이 동시에 여자되어야만 릴럭턴스 토크를 발생시킨다.

그림 2와 같이 2개의 권선이 동시에 여자될 때 각 상

의 전압방정식은 다음과 같다.

$$v_a = L_a \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dL_a}{dt} + M_{ab} \frac{di_b}{dt} + i_b \frac{dM_{ab}}{dt} \quad (6)$$

$$v_b = L_b \frac{di_b}{dt} + i_b \frac{dL_b}{dt} + M_{ab} \frac{di_a}{dt} + i_a \frac{dM_{ab}}{dt} \quad (7)$$

V_a, V_b : a상 및 b상 권선의 전압

L_a, L_b : a상 및 b상 권선의 인덕턴스

i_a, i_b : a상 및 b상 권선의 전류

M_{ab} : a상과 b상 간의 상호 인덕턴스

여기에서 피상전력 vi 는 다음 식으로 나타나게 된다.

$$\begin{aligned} vi &= v_a i_a + v_b i_b \\ &= i_a^2 R_a + i_b^2 R_b + L_a i_a \frac{di_a}{dt} + i_a^2 \frac{dL_a}{dt} + M_{ab} i_a \frac{di_b}{dt} + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{dt} \\ &\quad + L_b i_b \frac{di_b}{dt} + i_b^2 \frac{dL_b}{dt} + M_{ab} i_b \frac{di_a}{dt} + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{dt} \end{aligned} \quad (8)$$

여기서 토크 성분이 되는 출력(P_a)은

$$\begin{aligned} &= \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{dt} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{dt} + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{dt} \\ &= \left(\frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} \right) \omega \end{aligned} \quad (9)$$

이고, 회전체에서 기계적 에너지의 변화는 $P_a = T_e \cdot \omega_m$ 이다.

따라서 토크는

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{P_a}{\omega} = \frac{dt}{d\theta} \left[\frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{dt} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{dt} + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{dt} \right] \\ &= \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다. 그리고 3상을 고려할 경우 전체적인 토크는 식 (11)로 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} T_e &= \frac{1}{2} i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2} i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + \frac{1}{2} i_c^2 \frac{dL_c}{d\theta} \\ &\quad + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} + i_b i_c \frac{dM_{bc}}{d\theta} + i_c i_a \frac{dM_{ca}}{d\theta} \end{aligned} \quad (11)$$

TSRM에서 자기인덕턴스의 변화는 없으므로 결국 토크는 다음 식과 같다.

$$T_e = i_a i_b \frac{dM_{ab}(\theta, i_a, i_b)}{d\theta} + i_b i_c \frac{dM_{bc}(\theta, i_b, i_c)}{d\theta} + i_c i_a \frac{dM_{ca}(\theta, i_c, i_a)}{d\theta} \quad (12)$$

TSRM에서는 두 개의 상이 동시에 여자되므로 저장된 에너지 dW_f 는

$$dW_f = i_a d\lambda_a + i_b d\lambda_b - T_e d\theta \quad (13)$$

또는

$$\begin{aligned} dW_f &= \left. \frac{\partial W_f}{\partial \lambda_a} \right|_{\lambda_b, \theta = \text{const}} d\lambda_a + \left. \frac{\partial W_f}{\partial \lambda_b} \right|_{\lambda_a, \theta = \text{const}} d\lambda_b \\ &\quad + \left. \frac{\partial W_f}{\partial \theta} \right|_{\lambda_a, \lambda_b = \text{const}} d\theta \end{aligned} \quad (14)$$

으로 표현된다[2].

따라서 토크는

$$T_e = - \frac{\partial W_f(\lambda_a, \lambda_b, \theta)}{\partial \theta} \quad (15)$$

코에너지 W_c 를 사용하여 표현하면

$$W_c = \lambda_a i_a + \lambda_b i_b - W_f \quad (16)$$

이 된다.

여기서 토크는 회전자의 위치에 따른 코에너지의 변화율에 의해 주어지므로 식 (17)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = - \frac{\partial W_f(\lambda_a, \lambda_b, \theta)}{\partial \theta} \quad (17)$$

TSRM 구동 시 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 (18)과 식 (19)로 표현된다.

$$\lambda_a = L_a(\theta, i_a)i_a + M_{ab}(\theta, i_a, i_b)i_b \quad (18)$$

$$\lambda_b = L_b(\theta, i_b)i_b + M_{ab}(\theta, i_a, i_b)i_a \quad (19)$$

주어진 전류에서 회전자의 위치에 대한 인덕턴스 변화가 선형이라고 하면,

$$\begin{aligned} W_c &= \frac{1}{2}(L_a i_a^2 + L_b i_b^2 + M_{ab} i_a i_b + M_{ab} i_a i_b) \\ &= \frac{1}{2}L_a i_a^2 + \frac{1}{2}L_b i_b^2 + M_{ab} i_a i_b \end{aligned} \quad (20)$$

이므로 발생하는 토크는

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2}i_a^2 \frac{dL_a}{d\theta} + \frac{1}{2}i_b^2 \frac{dL_b}{d\theta} + i_a i_b \frac{dM_{ab}}{d\theta} \quad (21)$$

이 된다. 세 개의 상을 모두 고려하고 자기인덕턴스의 변화가 없다고 가정하면 식 (21)은 식 (12)와 같은 결과값을 갖는다.

2.3 인덕턴스와 구동법

인덕턴스는 SRM에서 토크를 발생시키는 중요한 요소이다. 코어에서의 투자율을 무한대라고 가정하면 인덕턴스는 다음 식과 같이 권선 수와 공극의 면적에 비례하고, 공극의 길이에 반비례하는 관계를 갖는다.

$$L = \frac{N^2 \mu_0 A_g}{l_g} \quad (22)$$

- L : 코일의 인덕턴스
- N : 권선 수
- μ_0 : 공기중의 투자율
- A_g : 공극의 면적
- l_g : 공극의 길이

따라서 누설자속을 무시하면 CSRSM에서 자기인덕턴스는 회전자의 돌극과 고정자의 돌극이 겹쳐지는 면적에 비례하므로 완전히 겹쳐져 있을 때 최대의 인덕턴스를 갖고 겹쳐지는 부분이 없을 때 최소의 인덕

턴스를 갖는다. 그러나 다른 상권선과 쇄교하는 자속이 없으므로 상호인덕턴스는 거의 나타나지 않는다.

한편 TSRM에서 하나의 권선이 여자되었을 때 자속은 고정자의 요크를 따라서 흐르게 되므로 회전자의 위치와는 무관하게 된다. 그러므로 각 권선의 자기인덕턴스는 회전자의 위치와 무관하게 일정한 값을 갖는다. 그러나 이때 여자된 권선에 의해 다른 권선에 쇄교되는 자속의 방향은 회전자의 위치에 따라 크기와 방향이 달라지게 된다. 즉 TSRM의 상호인덕턴스는 회전자의 위치에 따라서 양(+)방향과 음(-)방향으로 변하게 된다.

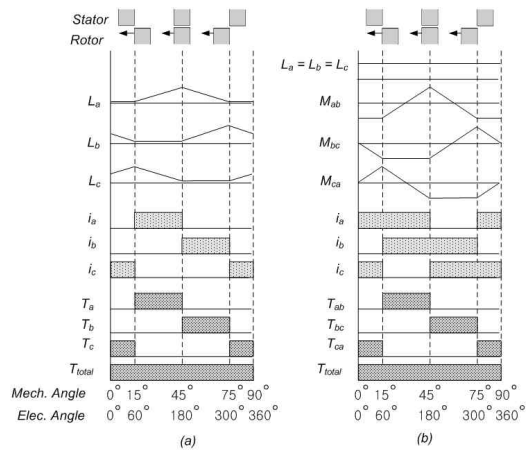


그림 3. CSRSM(a) 및 TSRM(b)의 인덕턴스, 전류, 토크 형태

Fig. 3. Inductance, current and torque shapes of CSRSM(a) and TSRM(b)

CSRSM의 토크는 식 (12)와 같이 자기 인덕턴스의 기울기와 전류의 제곱에 비례하므로 자기인덕턴스가 상승하는 구간에서만 전류를 흘려줘야 정(+)토크를 발생시킬 수 있다. 따라서 그림 3 (a)에서와 같이 각 상의 인덕턴스가 상승하는 구간에서만 일정한 전류를 흘려 일정한 토크를 발생시킨다. 이때 토크가 전류의 제곱에 비례하므로 전류의 방향과 무관하게 정토크를 발생시킨다.

TSRM에서의 토크는 식 (21)과 같이 나타나므로 상호인덕턴스의 기울기가 양(+)인 구간에서만 전류를 흘려주게 된다. 그리고 이때 두 상전류의 곱의 형태로 토크의 방향이 결정되므로 두 전류의 방향은 서로 같

아야 한다. 따라서 그림 3 (b)와 같이 각 상의 전류를 모두 양(+)의 방향으로 일정하게 흐르도록 하면 일정한 토크를 발생시킬 수 있다. 그러나 자속의 포화로 인하여 상호 인덕턴스의 기울기는 전류가 커짐에 따라서 점차 비선형적이 되며, 전류 또한 일정하게 유지시키는 것이 쉽지 않으므로 일정 토크를 발생시키는 것은 사실상 어렵다. 따라서 토크리플을 제거하기 위한 많은 연구가 진행되고 있다[6-7].

2.4 구동회로 및 스위칭 패턴

CSRSM을 구동하기 위한 구동회로는 여러 가지가 있으나 주로 비대칭 컨버터를 사용한다. 6/4 CSRSM의 경우 다음과 같은 스위칭 패턴을 가지며 한 상씩 순차적으로 여자된다. 그림 4에서 컨버터의 구조와 스위칭 순서를 나타내고 있다. 그림에서 A상 권선을 여자시키기 위해서 두 개의 스위치 Q_{AU} , Q_{AD} 를 온 시키면 A상 권선에 전류가 흐르게 되고 모터가 회전하게 된다. 스위치를 오프시키면 전류는 프리휠링 다이오드 D_{AD} , D_{AU} 를 통해 전원측으로 회생된다. 다음 상도 이와 마찬가지로의 과정을 거치며 전체적으로 그림 4 (b)에서와 같은 스위칭 패턴을 갖게 된다.

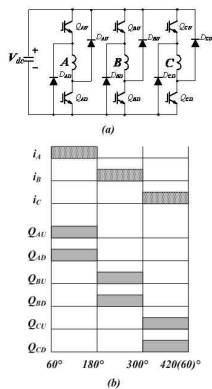


그림 4. (a) CSRSM 구동용 비대칭 컨버터 및 (b) 스위칭 순서
 Fig. 4. (a) Asymmetric converter and (b) switching sequence for CSRSM

TSRSM은 비대칭 컨버터를 사용할 수도 있으나 범용적으로 사용되고 있는 6스텝 풀브리지 인버터를 사

용하는 것이 효율적이다. 권선은 델타결선으로 되어 있고 그림 5 (a)와 같이 다이오드를 장착하여 전류를 한쪽 방향으로만 흐르도록 한다. TSRM에서는 두 개의 상이 동시에 여자되어야 하므로 그림 5 (b)에서와 같은 순서로 스위치를 온, 오프한다. Q_{AU} , Q_{CD} 를 온시키면 A상과 B상 권선에 전류가 흐르고 모터는 회전하게 된다. 스위치를 오프시키면 A상 권선과 B상 권선에 흐르던 전류는 D_{AD} , D_{CU} 를 통해서 전원측으로 회생된다. 이와 같은 동작으로 그림 5 (b)에서와 같이 계속해서 B상과 C상이 여자되고 다음에 C상과 A상이 순차적으로 여자되어 모터를 회전시키게 된다.

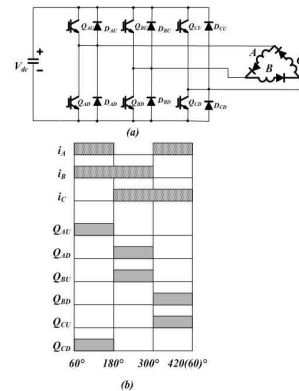


그림 5. (a) TSRM 구동용 인버터 및 (b) 스위칭 순서
 Fig. 5. (a) Inverter and (b) switching sequence for TSRM

3. CSRSM과 TSRM의 시뮬레이션

3.1 모터의 사양 및 시뮬레이션 조건

CSRSM과 TSRM의 특성을 비교하기 위하여 동일한 조건하에서 시뮬레이션을 실시하였다.

모터의 사양은 CSRSM과 TSRM 모두 표 1과 같으나 CSRSM의 상당 저항값은 3.2[Ω]이며 TSRM의 상당 저항값은 2.8[Ω]으로 약간 다른 값을 갖는다. 이는 권선이 감긴 부분이 CSRSM은 돌극이며 TSRM은 돌극보다 두께가 얇은 요크이므로 권선의 길이가 달라지기 때문이다. 그림 6과 7에서 CSRSM과 TSRM의 형상을 각각 보여주고 있다. 그리고 시뮬레이션은 입력전압 310[V] 직류, 어드밴스각 10도, 도통각 30도, 부하

토크 0.5[Nm]로 실시하여 토크, 속도, 전류, 전압, 자속 분포 등을 분석하였다.

표 1. CSRМ 및 TSRМ의 구조
Table 1. Structure of the CSRМ and TSRМ

구 분	치 수	구 분	치 수
고정자 외경	120[mm]	회전자 외경	72[mm]
고정자 요크 두께	8[mm]	회전자 요크 두께	6[mm]
고정자 내경	36[mm]	회전축 직경	28[mm]
공극	0.25[mm]	권선 수/pole	235[turns]
상수	3	고정자/회전자 극수	6/4

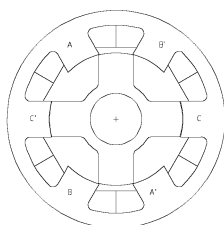


그림 6. CSRМ의 구조
Fig. 6. Structure of the CSRМ

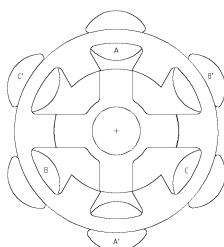


그림 7. TSRМ의 구조
Fig. 7. Structure of the TSRМ

3.2 상전류

그림 8은 CSRМ의 전류 파형을, 그림 9는 TSRМ의 전류 파형을 나타내고 있다. CSRМ에서 전류는 하나의 상씩 순차적으로 여자되고 있음을 알 수 있다. TSRМ에서는 항상 두 상이 여자되어 있으며, 두 상중에서 한 상이 오프되면 나머지 다른 상이 여자된다. 그러나 이렇게 상전환이 일어나는 시점에서는 세 권선 모두에 전류가 흐르게 되어 토크 저하의 원인이 된다. TSRМ에서 토크의 방향을 결정하는 상호인덕

턴스의 기울기는 그림 3에서와 같이 각 상마다 서로 다른 방향으로 되어 있다. 그러므로 전류의 방향이 모두 양(+)의 방향이라고 할지라도 토크의 방향은 각 상마다 정 혹은 부 토크를 갖게 된다. 그러므로 순환 전류가 흐르지 않도록 구동하여야 토크 저하를 줄일 수 있다.

권선에 흐르는 전류는 그림에서 보는 바와 같이 CSRМ에서 약 0.78[Arms], TSRМ에서 약 1.11[Arms]가 된다. 전류값이 1.36배 정도 TSRМ에서 높게 나타나고 있으나 이는 TSRМ의 권선이 델타결선으로 되어있기 때문에 모터 내부에 흐르는 순환전류 때문이며, 실제로 입력 전원 측에서 공급되는 전류는 약 1.18배의 차이를 갖는다.

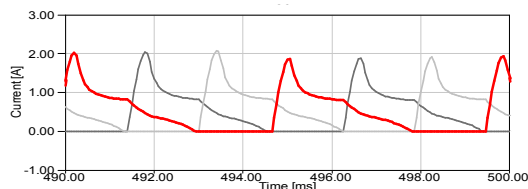


그림 8. CSRМ의 상전류
Fig. 8. Phase Current of the CSRМ

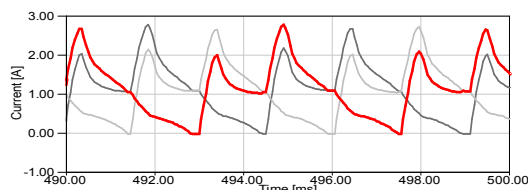


그림 9. TSRМ의 상전류
Fig. 9. Phase Current of the TSRМ

3.3 공급전류

전원측에서 공급되는 전류는 그림 10, 11과 같으며 CSRМ은 0.85[Arms], TSRМ은 1.0[Arms]로서 같은 전압을 공급하였을 때 TSRМ에 약 18[%]의 전류를 더 흘려줄 수 있다는 것을 알 수 있다.

이는 CSRМ에서는 항상 역기전력이 발생하는 구간에서 전류가 흐르지만 TSRМ에서는 역기전력이 발생하지 않는 구간에서도 전류가 공급되어 더욱 많은 전류가 흐르기 때문이다. 따라서 같은 고정자 권선 수에

같은 전압을 공급할 때 TSRM에서 더 큰 토크를 얻을 수 있다는 것을 알 수 있다.

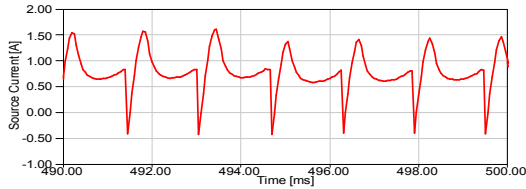


그림 10. CSRМ의 입력전류
Fig. 10. Input Current of the CSRМ

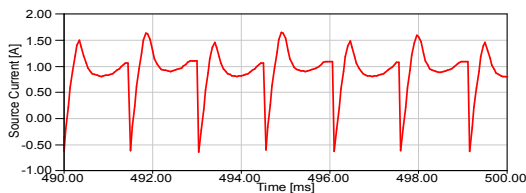


그림 11. TSRМ의 입력전류
Fig. 11. Input Current of the TSRМ

3.4 쇄교자속

그림 12, 13은 각각 CSRМ과 TSRМ의 각 권선에 쇄교하는 자속을 보여주고 있다. CSRМ에서는 회전자와 고정자가 만나기 시작하는 시점에서 쇄교자속이 증가하기 시작하여 스위치를 오프시킬 때까지 증가하고 전류가 완전히 소멸될 때까지 감소하여 완전히 0으로 떨어지게 된다. 그러나 TSRМ에서의 자속은 다른 형태를 지닌다. 권선이 고정자의 돌극에 감겨 있으므로 항상 자속이 세 권선 모두에 쇄교하게 되며, 각 권선에 쇄교하는 자속의 방향이 회전자의 위치에 따라 바뀌게 된다. 두 개의 권선이 동시에 여자되므로 해당되는 두 개의 권선에는 정(+)의 방향으로 자속이 쇄교하게 되며 나머지 한 상에서는 부(-)의 방향으로 생성됨을 그림을 통해 알 수 있다.

또한 쇄교자속은 식 (23)에 의해서 나타나게 되는 파형이므로 권선 전압의 형태에 따라 달라진다. 권선의 저항을 무시하면 쇄교자속은 전압의 적분값이 되며 권선의 전압은 그림 14, 15와 같은 형태이므로 쇄교자속은 각각 그림 12, 13과 같은 형태의 파형을 얻게 된다.

$$\lambda = \int (V - Ri) dt \quad (23)$$

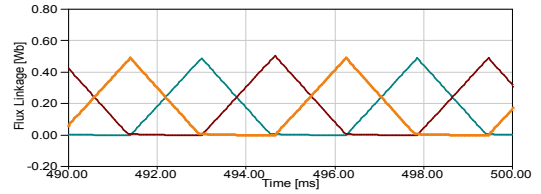


그림 12. CSRМ의 쇄교자속
Fig. 12. Flux Linkage of the CSRМ

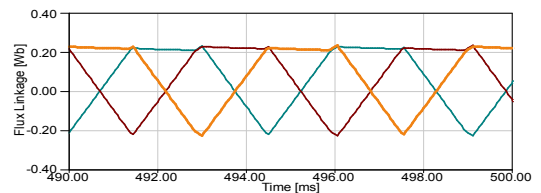


그림 13. TSRМ의 쇄교자속
Fig. 13. Flux Linkage of the TSRМ

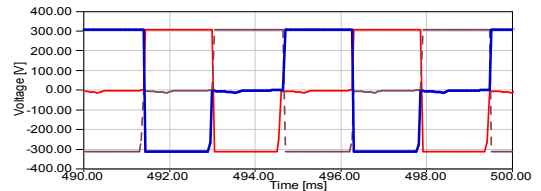


그림 14. CSRМ의 상권선전압
Fig. 14. Winding Voltage of the CSRМ

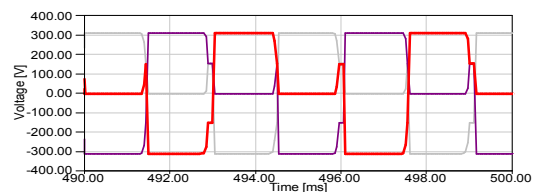


그림 15. TSRМ의 상권선전압
Fig. 15. Winding Voltage of the TSRМ

3.5 토크 및 속도

그림 16~19는 CSRМ과 TSRМ의 토크곡선을 나타낸다. 각 모터에서의 평균토크는 CSRМ은 0.65[Nm], TSRМ은 0.7[Nm]로서 전체적으로 TSRМ의 토크가 약간 크게 나타나고 있다. 이는 같은 전압이 인가되었을 때 TSRМ에 흐르는 전류가 약간 더 크기 때문으로

분석된다. 따라서 그림 20, 21에서와 같이 500[ms]에

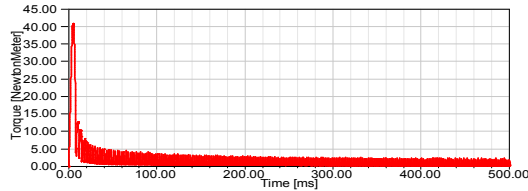


그림 16. CSRМ의 토크
Fig. 16. Torque of the CSRМ

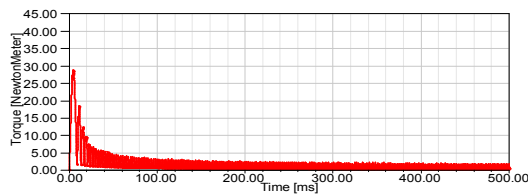


그림 17. TSRМ의 토크
Fig. 17. Torque of the TSRМ

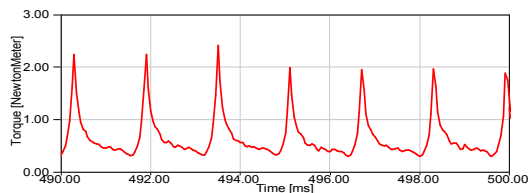


그림 18. CSRМ의 토크(확대)
Fig. 18. Torque of the CSRМ(Zoom In)

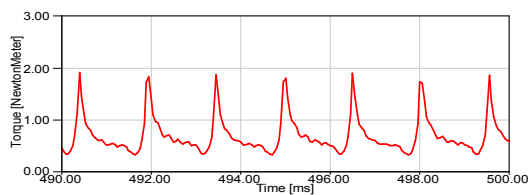


그림 19. TSRМ의 토크(확대)
Fig. 19. Torque of the TSRМ(Zoom In)

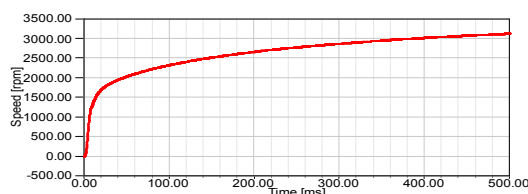


그림 20. CSRМ의 속도
Fig. 20. Speed of the CSRМ

서의 속도가 CSRМ은 3115[rpm], TSRМ은 3281 [rpm]으로 TSRМ이 약간 더 높은 값을 보여주고 있다.

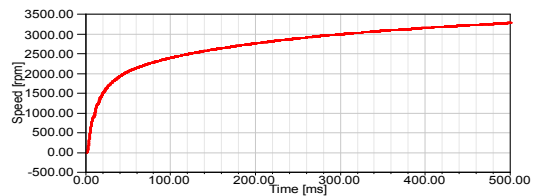


그림 21. TSRМ의 속도
Fig. 21. Speed of the TSRМ

3.6 자속 분포 및 자속 밀도

CSRМ에서는 A상을 TSRМ에서는 A상과 C상을 여자시킨 경우의 자속분포를 그림 22, 그림 23에서 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 CSRМ과 TSRМ 구동 시에는 거의 유사한 자속분포를 가지고 있음을 알 수 있다.

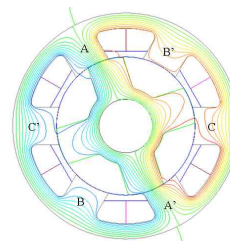


그림 22. CSRМ의 자속분포
Fig. 22. Distribution of flux in the CSRМ

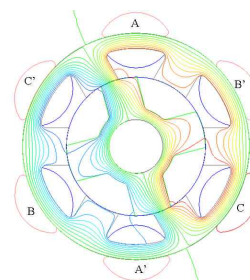


그림 23. TSRМ의 자속분포
Fig. 23. Distribution of flux in the TSRМ

그림 24, 25에서는 CSRМ과 TSRМ의 자속밀도를 보여주고 있다. 화살표의 방향이 자속의 방향이며 크

기가 자속밀도의 크기를 나타낸다. CSRSM과 TSRSM에서 각 부분의 자속밀도 또한 서로 유사함을 보여주고 있다.

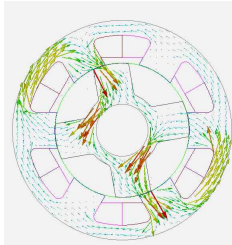


그림 24. CSRSM의 자속밀도
Fig. 24. Flux Density in the CSRSM

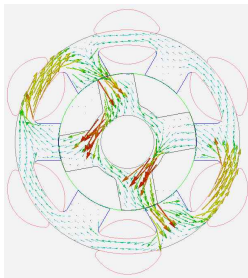


그림 25. TSRSM의 자속밀도
Fig. 25. Flux Density in the TSRSM

4. 시뮬레이션 결과 고찰

시뮬레이션 결과를 정리하면 다음과 같다.

표 2. 시뮬레이션 결과
Table 2. Results of the simulation

비교 항목	CSRSM	TSRSM
인가전압[V]	310	310
입력전류[A _{rms}]	0.85	1.0
상전류[A _{rms}]	0.98	1.34
속도@500[ms][rpm]	3120	3281
평균토크[Nm]	0.65	0.7
효율[%]	80.0[%]	77.4[%]

CSRSM과 TSRSM에 같은 전압을 인가하여 구동할 때 TSRSM에 약 18[%] 더 많은 전류가 흐르므로 평균 토크 및 회전속도가 더 커지는 장점을 가지는 반면

효율에서는 CSRSM이 더 우수함을 알 수 있다. 그러나 그밖에 자속분포나 자속밀도 등은 두 가지 SRM이 거의 유사함을 시뮬레이션을 통해 알 수 있었다.

따라서 기존의 범용 인버터를 사용하여 모터를 구동하고자 할 때, 그리고 같은 크기의 모터를 이용하여 더 큰 출력을 내고자 할 때는 TSRSM이 다소 유리하며, 효율을 높이하고자 할 때는 CSRSM을 적용함이 바람직하다고 할 수 있다.

5. 결 론

TSRSM은 릴럭턴스 토크를 사용한다는 점에서는 CSRSM과 같으나 권선의 구조, 스위칭 패턴, 구동회로, 전류형태, 쇄교자속 등은 서로 차이를 가지고 있다. 본 논문에서는 CSRSM과 TSRSM의 에너지 변환 및 토크에 관련된 수식을 정리하였고, 각각의 특성을 시뮬레이션을 통하여 분석하고 비교하였다. 두 SRM의 특징을 비교한 결과를 정리하면 다음과 같다.

- 1) 권선의 구조: CSRSM은 권선이 돌극에 장착되고 TSRSM은 요크에 장착된다.
- 2) 인버터: CSRSM은 비대칭 컨버터를 주로 사용하나 TSRSM은 범용 인버터를 사용할 수 있다.
- 3) 토크발생: CSRSM은 자기인덕턴스의 변화와 하나의 권선전류에 의해 토크가 발생하나 TSRSM은 상호인덕턴스의 변화와 두 개의 권선전류에 의해 발생한다.
- 4) 전류의 크기: 같은 전압이 공급되었을 때 CSRSM보다 TSRSM에 더 큰 전류가 흐른다.
- 5) 효율: CSRSM의 효율이 TSRSM의 효율보다 더 높게 나타난다.
- 6) 적용대상: CSRSM은 효율이 중요시될 때, TSRSM은 출력의 크기가 중요시 될 때 적용할 수 있다.

References

[1] 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.
[2] 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.
- [3] 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.
 - [4] K. B. Kim, "Toroidal switched reluctance motor part 1. fundamentals", Korea-Germany symposium, pp. 135-141, Nov. 1998.
 - [5] 양형열, "토로이달 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 분석", 한국조명전기설비학회논문지, Vol.23, No.6, pp. 59-65, 2009.
 - [6] 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.
 - [7] Y. Zhou, C. Xia, Z. He and X. Xie, "Torque Ripple Minimization in a Sensorless Switched Reluctance Motor Based on Flexible Neural Networks", 2007 IEEE International Conference on Control and Automation, Guangzhou, CHINA, pp. 2340-2344, May 30 to June 1, 2007.

◇ 저자소개 ◇



김재혁(金宰熾)

1973년 4월 25일생. 1999년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1998~2000년 UL Korea, Ltd(a subsidiary of Underwriters Laboratories Inc, Northbrook, USA) 엔지니어. 2004년 미국 위스콘신 주립대 (University of Wisconsin-Madison) 졸업(석사). 2010 미국 버지니아텍(Virginia Tech) 졸업(박사). 2010년 1월~현재 미국 RAMU Inc, senior engineer.



양형열(梁煥烈)

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~2009년 9월 지오토(주) 연구소장. 2009년 10월~현재 호남대학교 전임강사.