

정류자를 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동에 관한 연구

(A Study on Switched Reluctance Motor Driving using Commutator)

원성홍* · 한학근 · 정인성

(Sung-Hong Won · Hak-Guhn Han · In-Sung Jung)

Abstract

This paper presents the novel design and implementation of a switched reluctance motor with commutator. Unlike typical switched reluctance motor, this motor doesn't require semi-conductor devices and inverter circuits for driving. Instead, the brushes and commutator can make rotating field for driving the switched reluctance motor. Moreover, because this motor has no magnet, the total cost for manufacturing the motor is very cheap. In order to verify the usability of the proposed motor, the authors manufactured the prototype motor, and showed the torque-speed curve of the motor.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Brush, Commutator, Manufacturing Cost

1. 서 론

최근 가격상승 및 자원의 전략적 무기화에 따라 산업계에서 큰 이슈가 되고 있는 것 중의 하나는 영구자석을 사용하지 않는 모터를 개발하는 것이다. 이런 경향에 따라 영구자석을 사용하지 않는 유도기(IM: Induction Motor), 권선형 직류기(WDCM: Winding DC Motor), 스위치드 릴럭턴스 모터(SRM: Switched Reluctance Motor), 동기형 릴럭턴스 모터(SynRM: Synchronous Reluctance Motor) 등이 많은 주목을 받고 있는데, 그 중에서도 특히 스위치드 릴럭턴스 모터는 간단하면서도 강인한 구조와 영구자석을 사용하지

않으면서도 회전자에 전류가 흐르지 않기 때문에 2차 동손이 발생하지 않는 등의 장점이 있어, 현재 가장 많이 사용되고 있는 유도전동기를 대체할 수 있는 강력한 후보로서 연구되고 있다.

그러나 스위치드 릴럭턴스 전동기는 전동기 자체의 구조가 간단하여 제조원가가 유도전동기보다 더 싼 장점이 있지만, 스위치드 릴럭턴스 전동기를 구동하기 위해서는 상용 AC전원이나 DC전원으로는 구동할 수 없고 반드시 스위칭회로를 포함해야 되기 때문에 반도체 스위치를 이용하여 회전각도에 맞게 전류를 스위칭 해 주어야 한다는 특징이 있다[1-2].

따라서 전동기 본체의 가격보다 전동기 구동을 위한 스위칭 회로의 가격이 더 비싸게 되고 전동기를 구동할 수 있는 전체 시스템의 가격은 유도전동기는 물론이고 다른 인버터구동전동기 만큼이나 비싼 시스템이 되어버린다. 이런 단점을 극복하기 위하여 반도체 스위치를 이용하지 않고 정류자와 브러시를 이용한 스

* 주저자 : 동양미래대학 전기시스템과 조교수
Tel : 02-2610-5180, Fax : 02-2610-1854
E-mail : sagewide@dongyang.ac.kr
접수일자 : 2012년 2월 21일
1차심사 : 2012년 2월 25일, 2차심사 : 2012년 4월 4일
심사완료 : 2012년 4월 6일

위치드 릴럭턴스 전동기를 고안하였고, 실제로 제작하여 그 가능성을 타진하여 보았다[3].

정류자와 브러시를 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기는 브러시와 회전자의 슬립링을 통해 유입된 전류를 정류자와 브러시를 통해 고정자의 각 상 권선에 전달함으로써 연속적인 회전을 얻어 낼 수 있으며, 전원이 DC와 AC, 어느 쪽이던지 상관없이 구동될 수 있는 유니버설 전동기의 특징을 가지고 있다.

2. 이론고찰

2.1 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동원리

스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동원리는 일반적으로 알려진 스텝모터의 구동과 유사하다. 철심에서의 자기에너지에 비해 공극에서의 자기에너지가 대단히 크므로 자기회로의 에너지는 공극에 집중되게 되는데, 전체 자기회로의 자기저항에 따라 쇄교 자속량이 결정되므로, 회전자는 자기회로의 에너지를 적게 하기 위해서 회로의 자기저항인 릴럭턴스가 작아지는 방향으로 회전하고, 자기저항이 가장 작은 위치에서 멈추게 된다. 이때 기자력을 발생시키는 상을 전환하여 다시 자기회로의 릴럭턴스를 크게 만들어 주면 연속적인 회전력을 얻을 수 있는 것이 릴럭턴스 전동기이며, 회전자의 위치에 따라 기자력을 발생시키는 상을 전환시켜주는 역할을 하는 것이 FET나 IGBT를 이용한 반도체 스위치이다.

이 반도체 스위치의 상전환은 회전자와 일정한 부하 각을 유지하면서 정현파를 만들어주는 일반적인 영구자석 동기전동기와는 다르게 전류의 크기나 위상과는 상관없이 회전자의 위치에 의해 결정되며 BLDC전동기의 상전환과 유사하며, 자기에너지를 저장하기 위하여 상코일에 흐르는 전류를 상전환이 일어나는 동안 빠르게 해소시키기 위해 상코일의 양단에 스위치를 직렬로 연결하여 전원쪽으로 에너지를 다시 전달하는 특징이 있다.

그림 1에 가장 일반적으로 볼 수 있는 6대4구조를 가진 3상4극 스위치드 릴럭턴스 전동기의 형태와 회전원리를 볼 수 있다[4].

3상의 스위치드 릴럭턴스 전동기를 구현하기 위하여 필요한 가장 기본적인 극수와 슬롯수 조합은 2대3이지만, 실질적으로 2대3의 조합을 사용하게 되면 자기회로상의 공극길이가 너무 커져 비효율적이 되므로 사실상 3상으로 구현할 수 있는 가장 간단한 구조는 4극 6슬롯의 구조가 된다.

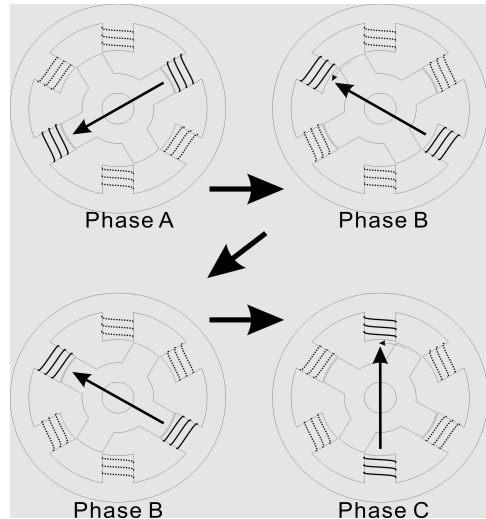


그림 1. 4극6슬롯 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구조와 회전원리

Fig. 1. 4Pole-6Slot SRM structure and Operation Principles

아래의 그림 2에서는 3상 스위치드 릴럭턴스 전동기를 구동하기 위한 IGBT로 구성된 구동회로를 표시하고 있다. 각 상 코일의 양단과 전원사이에서 스위치와 다이오드가 연결되어 있는 것을 볼 수 있는데, 스위치가 끊어져 있는 동안 다이오드를 통하여 코일에 저장된 자기에너지가 전원 측으로 빠르게 회수되어 역방향의 토크가 발생하는 것을 방지해 준다.

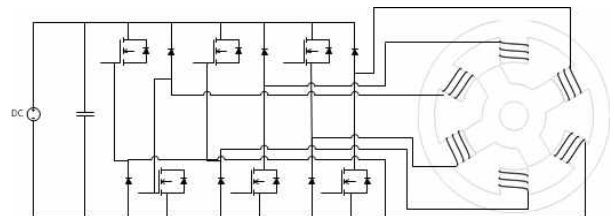


그림 2. 3상 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동회로

Fig. 2. 3Phase SRM Driving Circuit

2.2 정류자를 이용한 스위치드 릴렉턴스 전동기의 상전환

스위치드 릴렉턴스 전동기는 각 상이 여자되는 동안 자기에너지를 최소화 하는 방향으로 회전자가 회전하여 연속적인 회전을 만들어내는 원리이므로, 특정한 위치에서의 상전환을 통한 전류의 단속구동이 필수적이다.

이런 전류의 단속 작용을 빠른 속도로 해주기 위해서 필요한 반도체 스위칭소자는 스위치드 릴렉턴스 전동기의 간단한 구조와 영구자석을 사용하지 않는 장점에도 불구하고 전체적인 구동시스템의 가격을 상승시키는 주요한 원인이 된다. 그러나 스위치드 릴렉턴스 전동기에서는 여자되는 상의 스위칭과정이 반드시 필요하며 일반적인 권선형 직류전동기와는 다르게 회전자에 권선이 되어있지 않기 때문에 정류자와 브러시를 이용한 상전환도 불가능하다.

따라서 기존 스위치드 릴렉턴스 전동기의 반도체 스위칭소자로 인한 가격상승을 피하기 위해 정류자를 이용한 스위치드 릴렉턴스 전동기의 상전환을 위해서는 일반적인 정류자와 브러시 구조가 아닌 새로운 방법이 필요하다.

회전자에 권선이 되어있지 않은 스위치드 릴렉턴스 전동기의 브러시와 정류자를 이용한 상전환이 어려운 이유는 일반적인 직류전동기의 경우는 회전자에 권선이 되어있기 때문에 정류자 자체가 회전하게 되어 연속적인 브러시의 접촉전환이 일어나게 되어 권선에 흐르는 전류를 자연스럽게 전환시켜줄 수 있지만, 회전자가 단순하게 철심만으로 구성되어있는 스위치드 릴렉턴스 전동기는 회전자의 회전만으로는 권선의 전류를 전환시키기 어렵기 때문이다.

이런 어려움을 극복하기 위하여 새로운 형태의 브러시와 정류자 구조를 제안하였는데, 회전자가 회전하는 동안 고정자에 감겨있는 권선의 전류를 전환시켜주기 위해 고정자로부터 흘러들어온 전류를 슬립링과 브러시를 통해 회전자로 유입시킨 후 다시 브러시와 정류자를 통해 고정자 권선으로 보내는 방식을 사용하였다. 이런 과정을 통해 정류자에 결선된 고정자 권선에

는 회전자의 회전에 따라 순차적으로 전류가 흐르게 되어 연속적인 회전이 가능해진다.

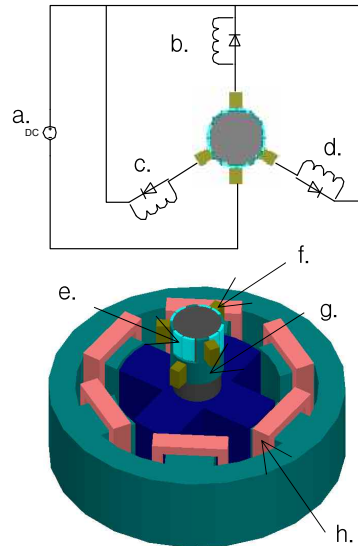


그림 3. 3상 스위치드 릴렉턴스 전동기와 브러시구조 (a. 전원(DC or AC), b. A상코일, c. B상코일, d. C상코일, e. 더미정류자편, f. 브러시, g. 슬립링, h. 코일)

Fig. 3. 3Phase SRM and Brush Structure (a. Power(DC or AC), b. Phase A coil, c. Phase B coil, d. Phase C coil, e. Dummy commutator, f. Brush, g. Slip-ring, h. Coil)

그림 3에서 볼 수 있듯이 슬립링과 정류자가 동시에 한축에 설치되어있고, 슬립링을 통해 들어온 전류가 정류자를 통해 각 상의 권선에 흘러 나갈 수 있게 되어 있으므로, 반도체소자를 이용한 상전환 과정과 유사하게 연속적인 회전력을 만들어 낼 수 있다.

이때 상 전환과정을 위한 정류자를 간략히 나타내면 다음의 그림 4와 같다.

회전자가 회전함에 따라 각 상의 브러시는 순차적으로 접촉하게 되는데, 이때 한상의 브러시가 유효정류자편으로부터 벗어나기 전에 다음 상의 브러시가 유효정류자편에 같이 접촉되기 때문에, 부토크를 최소화 하기 위해서는 정류자 편이 어느 정도 진행된 이후에 각 상의 코일이 여자될 수 있도록 하는 선행각이 필요하다. 시제품으로 제작된 스위치드 릴렉턴스 전동기에서는 정류자편의 간격이 30[°]로 설계하였으므로, 선

행각으로는 15[°]를 설정하는 것이 최적의 결과를 얻을 수 있다. 다음의 그림 5에 정류자와 브러시를 이용한 상전환 과정을 나타내었다.

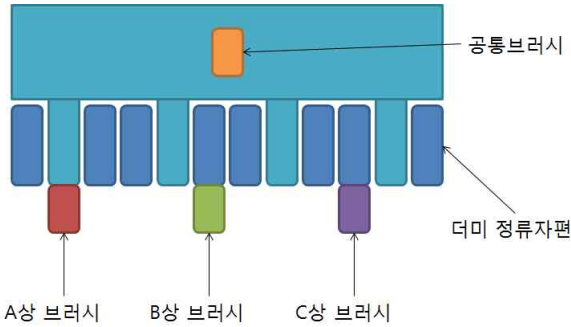


그림 4. 간략히 나타낸 정류자와 브러시구조
Fig. 4. Commutator and Brush Structures

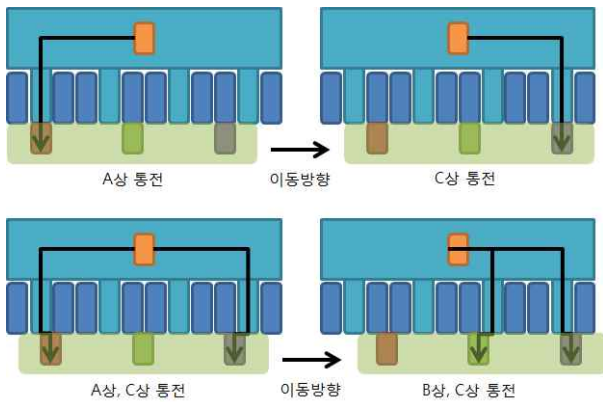


그림 5. 정류자와 브러시를 이용한 상변환
Fig. 5. Phase Transition with Commutator and Brush

이런 브러시와 슬립링, 정류자를 이용한 상전환 메커니즘을 이용하면 FET나 IGBT와 같은 반도체스위치를 이용한 상전환을 위해 전력회로를 구성해야 할 필요가 없기 때문에 제작단가를 상당히 절감할 수 있으며, 또한 브러시와 정류자의 위치에 따라 자동으로 상전환이 일어나고 있기 때문에 반도체 스위치를 이용할 경우에 필요한 엔코더나 리졸버 등의 위치센서가 필요 없게 된다는 장점이 있어, 원가경쟁력의 측면에서 상당한 강점을 지님과 동시에 구조적으로 외부의 전기적, 기계적 충격에 약한 센서를 사용하지 않아도 되기 때문에 강인한 전동기를 만들 수 있다는 또한

장점으로 작용하게 된다.

또한 이 새로운 방식의 브러시를 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기는 영구자석을 이용한 전동기와 같기 자속의 극성에 영향을 받지 않기 때문에 전력회수를 위해 권선에 병렬로 설치한 다이오드를 제거하면, AC 또는 DC전원의 어느 쪽을 이용하더라도 구동이 가능한 유니버설 전동기의 특성을 가지게 된다. 이러한 특성은 가정용의 단상전원을 이용한 모터의 구동을 가능하게 하기 때문에 가전용 모터로서의 응용에 유리하며 동시에 배터리를 이용한 구동도 가능하기 때문에 브러시 방식 스위치드 릴럭턴스 전동기의 응용범위를 더욱 넓게 할 수 있는 이점으로 작용한다.

3. 제안된 모터의 제작 및 실험

3.1 브러시방식 스위치드 릴럭턴스 전동기의 제작

제안된 방식의 전동기가 이전에 제작되거나 실제로 구현된 적이 없기 때문에 이론적으로는 가능하다 할 지라도 실제로 구현되는 과정에 발생할 수 있는 실현 불가능한 기술적인 문제점이 있을 수 있기 때문에 구동가능한 시험기를 제작하여 제안된 방식의 전동기의 실용화 가능성을 시험해 보았다.



그림 6. 제작된 6대4구조 스위치드 릴럭턴스 전동기
Fig. 6. Manufactured SRM(6/4 pole)

그림 6은 제안된 전동기를 시험하기 위하여 제작된 기존방식과 동일한 6대4구조의 스위치드 릴럭턴스 전

동기이다. 이 전동기의 6개의 권선 중 마주보는 권선을 직렬 또는 병렬결선하고 기존의 스위치드 릴럭턴스 전동기 구동회로를 이용하면 기존의 전동기와 마찬가지로 구동이 가능하다.

제작된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 사양은 표 1과 같다.

표 1. 스위치드 릴럭턴스 전동기 사양
Table 1. Specifications of SRM

Parameters	Value	Unit
고정자외경	80	[mm]
공극반경	22.5	[mm]
적층길이	40	[mm]
고정자치수	6	
회전자치수	4	
권선직경	0.3	[mm]
권선턴수	400	[turn]

제작된 전동기에 반도체 스위치 없이 연속적인 회전을 위한 상전환을 시켜주는 정류자와 브러시 및 슬립링 구조는 아래의 그림 7과 같이 구현되었다.

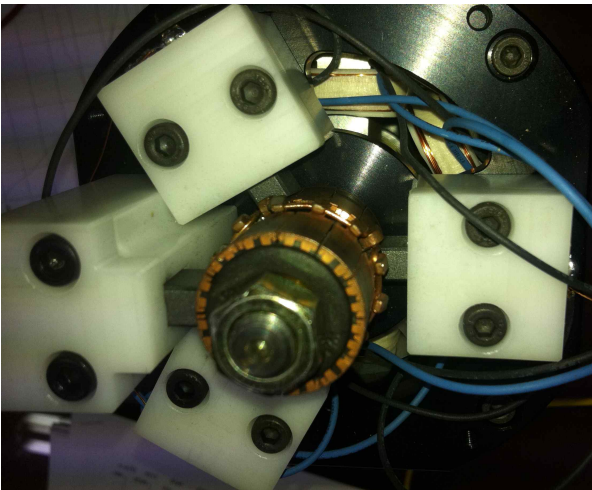


그림 7. 정류자와 브러시 및 슬립링 구조
Fig. 7. Commutator, Brush and Slip-ring

제안된 구조의 정류자를 별도로 만들기 위해서는 대단히 비용이 많이 들게 되므로 비용절감을 위해 직류

전동기를 위해 사용되는 양산품의 12편 정류자를 2개 사용하여 상측의 1개는 12개 정류자편을 모두 연결하여 슬립링 대응으로 사용하고, 하측의 12개중 3개는 상측의 슬립링과 연결하고 나머지 8개는 더미정류자로 사용하여 제안된 정류자 구조를 구현하였다.

전장에서 설명한 대로 정류자편의 폭과 브러시의 폭에 의해 각 상의 권선에 전류가 흐를 수 있는 구간이 결정되므로 최적화를 위해서는 브러시와 정류자편의 폭을 세심하게 설계할 필요가 있으나 현 단계에서는 제안된 전동기의 실용화 가능성에 주목하였기 때문에 정류자 편과 브러시 폭 모두 30[°]가 되는 양산품을 사용하였다.

3.2 실험결과

제작된 브러시로 상전환이 일어나는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성을 측정하기 위하여 동력계를 사용하여 구동특성을 측정하여 보았다. AC특성과 DC특성이 약간 다를 수 있지만 기본적인 특성에는 큰 차이가 없을 것으로 예상하고 DC전원을 이용하여 인가전압을 변화시켜가며 속도변화를 측정하였다.

실험장치의 구성은 다음의 그림 8과 같고 전류전환을 위한 정류자의 선행각은 15[°]로 설정하였다.

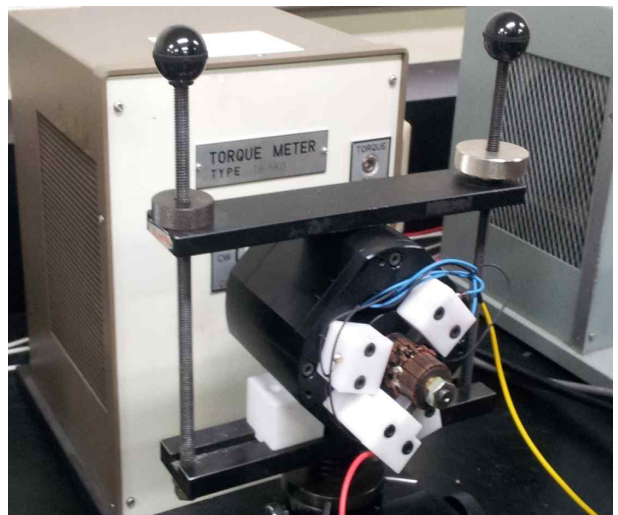


그림 8. 실험을 위한 장치구성
Fig. 8. Experimental Configuration for the device

측정된 각 점에서의 토크값을 그래프로 나타내면 다음의 그림 9와 같은데, 약간의 측정오차를 제외하면 전반적으로 DC모터와 유사한 특성을 나타내는 것을 알 수 있다.

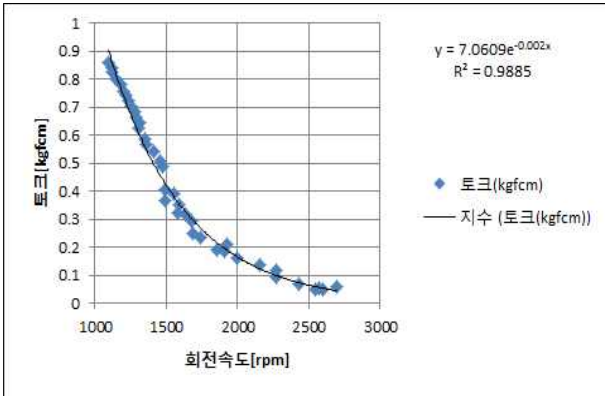


그림 9. 측정된 속도-토크곡선
Fig. 9. Measured Speed-Torque Curve

각 측정점을 연결하여 전동기의 토크-속도특성곡선을 구하기 위하여 지수함수를 이용한 회귀식으로 나타내어 보면 아래의 식 (1)과 같아지는 데, 이때의 R2 값은 0.9885로서 측정된 값을 잘 표현하고 있음을 알 수 있고, R2를 구하는 식은 (2)와 같다[5].

$$y = 7.0609e^{-0.002x} \quad (1)$$

$$r^2 = \frac{S_t - S_r}{S_t} \quad (2)$$

$$S_r = \sum_{i=1}^n e_i^2 = \sum_{i=1}^n (y_{i,measured} - y_{i,model})^2 \quad (3)$$

여기서 St는 측정치들의 분산값이다.

속도-토크곡선이 지수함수로 표현되었지만 편의상 속도-토크 곡선을 선형으로 근사하면 DC모터의 경우와 같은 식으로 나타낼 수 있고, 여기서 T, V, R, I, ω는 각각 토크, 인가전압, 전기저항, 전류, 회전속도로 주어진다.

$$T = \frac{V - RI}{\omega} \quad (4)$$

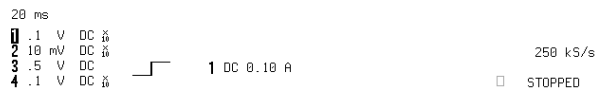
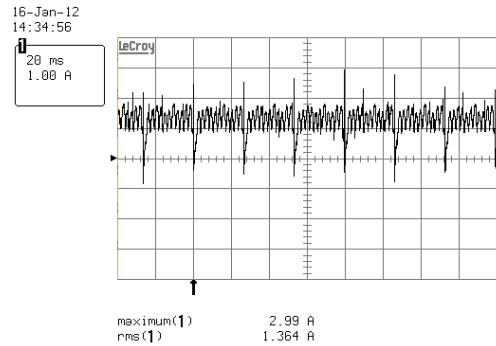
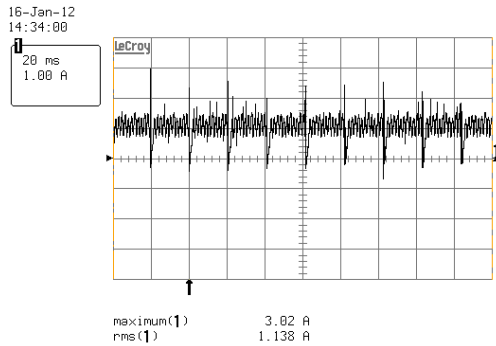
측정된 데이터에 의해 모터의 특성을 파악해 보면 직류전동기와 유사하게 부하의 변동에 따라 속도가 가변되는 특성을 가지고 있어 고정된 전원을 이용한 모터의 제어가 용이함을 알 수 있고, 이는 상용전원 또는 배터리를 이용한 모터의 구동 시에 부하의 변동에도 안정적인 동작을 할 수 있음을 나타낸다. 따라서 가전용 모터를 비롯한 유니버설모터와 유도모터, DC모터가 사용되고 있는 여러 영역에서 기존의 모터를 대체하는 용도로 사용될 수 있을 것으로 예상되며, 영구자석이 사용되지 않았고, 반도체소자를 이용한 주변회로가 필요없기 때문에 가격적인 면에서 상당한 경쟁력을 가질 것으로 예상된다.

단 브러시의 접촉순서에 의해 회전방향이 결정되기 때문에 역방향 구동을 위해서는 전원의 극성을 바꾸는 것이 아니라 3상중 2상의 권선에 연결된 브러시를 스위치를 이용하여 서로 바꾸어주어야 한다.

그러나 제안된 전동기는 정류자와 브러시를 사용하기 때문에 브러시를 사용하는 DC전동기와 유사하게 브러시가 접촉하고 있는 정류자편과 다음 접촉되는 정류자편 사이를 이동하는 순간 발생하는 역기전력에 의한 스파크가 문제가 될 수 있다. 따라서 각 속도 및 부하별로 전류파형을 측정하여 얼마나 큰 서지전류가 발생하는가를 측정하여 보았다.

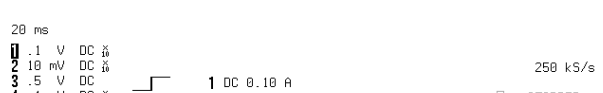
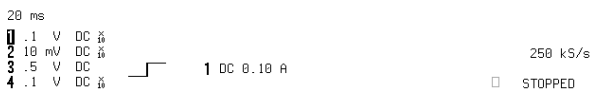
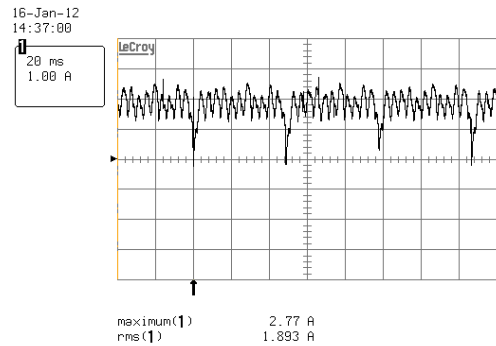
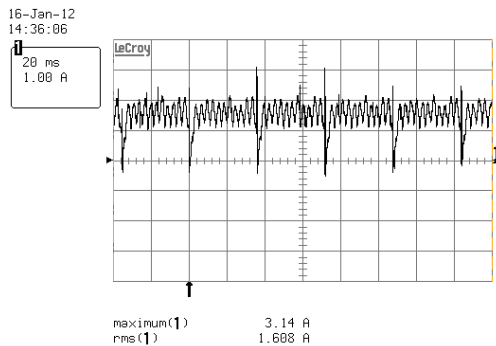
다음의 그림 10의 (a)부터 (d)까지는 24[V]직류 구동조건에서 각각 부하를 달리하여 측정한 전류값들이다. 부하가 큰 저속에서는 서지전류가 발생하지 않지만 고속으로 갈수록 서지전류가 커지는 것을 관찰할 수 있으며, 저전압 DC전원용으로 설계된 실험모터는 문제가 없지만 상용전원을 인가전원으로 사용하기 위해 고압용으로 설계했을 때는 스파크가 발생하는 문제가 생길 수 있을 것으로 예상할 수 있다.

또한 모든 측정전류 그래프에 있어서 전류가 0으로 떨어지는 순간이 관찰되는 것을 볼 수 있는데, 이것은 정류자편을 연결하여 만든 슬립링과 브러시의 접촉이 원활하지 못하여 발생하는 것으로, 제안된 정류자구조와 같은 형태로 슬립링을 최적화하여 제작하면 해결될 수 있는 문제이다.



(a) No Load 3100[rpm]

(b) 20[mNm] - 2400[rpm]



(c) 40[mNm] - 1700[rpm]

(d) 60[mNm] - 1270[rpm]

그림 10. 부하 및 속도변동에 따른 측정전류
Fig. 10. Measured Currents for speed variation

4. 결 론

영구자석의 가격상승 및 자원전략화에 대응하기 위하여 영구자석을 사용하지 않는 전동기에 대한 개발 수요가 증가하고 있고, 이에 대한 해결방안의 하나로써 브러시와 정류자를 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 구동방식을 고안하였고, 상용화 가능성을 알아보기 위하여 실제 제작하여 만들어진 전동기의 특성을 측정하였고, 그 토크-속도특성과 전류파형을 측정

하여 기준에 상용화 되어 사용되고 있는 여러 모터를 대체할 수 있는지에 대한 가능성을 알아보았다.

제안된 모터가 주로 사용될 수 있는 분야는 제조원가의 관점에서 가장 저렴하게 만들 수 있는 모터라는 점에서 주로 완구나 소형 기기구동을 위한 소형DC모터를 대체할 수 있을 것으로 보이는데, 제조원가의 측면에서 소형DC모터의 영구자석을 사용하지 않음으로써 재료비의 약 40[%] 이상을 절감할 수 있고, DC모터에 비해 브러시가 2개 더 사용된다는 점을 고려해도

소형 DC모터의 브러시는 전체 재료비의 10[%]를 넘지 않는다는 점에서 충분한 가격경쟁력을 확보할 수 있을 것으로 예측된다.

이 논문은 동양미래대학의 학술연구비 지원에 의하여 연구되었습니다.

References

- [1] L. Xu and E. Ruckstadter, "Direct modeling of switched reluctance machine by coupled field-circuit method," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 10, no. 3, pp. 446 - 454, Sep. 1995.
- [2] L. Xu and E. Ruckstadter, "Direct modeling of switched reluctance machine by coupled field-circuit method," IEEE Trans. Energy Convers., vol. 10, no. 3, pp. 446 - 454, Sep. 1995.
- [3] Jun-Young Lim, Yun-Chul Jung, Sang-Young Kim, Yong-Won Choi, Jung-Chul Min, "High efficiency and low-cost switched reluctance motor for air-conditioner blower", IEEE Proceedings of Power Conversion Conference, 2002, pp. 1460-1467.
- [4] 오석규, 이치우, "2상 SRM의 비교에 관한 연구", 한국조명전기설비학회, 조명전기설비학회논문지, 제25권 제1호 2011.1, page(s):59-63.
- [5] Steven C. Chapra, Raymond P. Canale, "Numerical Methods for Engineers 5th edition", McGrawHill, 2006, page(s):442-447.

◆ 저자소개 ◆



원성홍(元聖弘)

1971년 1월 14일생. 1993년 한양대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995~2004년 (주)삼성전기 중앙연구소 CAE그룹 책임연구원. 2007년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2007~2008년 한양대학교 BK21연구교수. 2009년~현재 동양미래대학 전기시스템과 조교수.



한학근(韓學根)

1958년 8월 26일생. 1982년 서울대학교 전기공학과 졸업. 1982~1988년 한국생산기술연구원 연구원. 1990년 서울대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학부 졸업(박사). 2000~2001년 캐나다 브리티시콜롬비아대학(UBC) 방문교수. 1993년~현재 동양미래대학 전기시스템과 교수.



정인성(鄭因城)

1971년 3월 10일생. 1993년 한양대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 졸업(박사). 2000년~현재 전자부품연구원 책임연구원, 2008년~현재 동 연구원 지능메카트로닉스연구센터 센터장.