

회전구조에 따른 전기자전거용 스위치릴럭턴스 전동기 특성비교

김태형, 문재원*

대구기계부품연구원, 한국기계전기전자시험원*

Comparison of Switched Reluctance Motor Characteristic for E-bike According to Rotor Structure

Tae-Hyoung Kim, Jae-Won Moon*

Daegu Mechatronics&Materials Institute, Korea Testing Certification*

Abstract - In this paper, characteristic of switched reluctance motor for bike is compared according to rotor structure. Comparison results is verified with simulation which give same condition for design and control.

1. 서 론

최근 환경문제와 자원고갈로 인해 전 세계적으로 친환경 운송수단에 대한 수요가 높아지며 정부에서도 자전거 이용 활성화를 주요관심사로 표방하고 있다. 특히 각종 대지진, 쓰나미, 폭설 등 최근 빈번하게 발생되고 있는 환경재앙으로 인해 경각심이 높아진 시점에서 환경오염 방지를 위한 관련 규제들이 더욱 더 강화되거나 조기 시행될 것으로 예상된다. 이러한 가운데 전기자전거는 저탄소 녹색교통수단의 화두로 떠오르고 있으며 관련시장이 국내외적으로 꾸준히 증가하고 있다.

전기자전거는 친환경 운송수단 중에서 보급의 현실성과 이용의 편의성이 높은 근거리 이동에 적합한 이동수단이다. 전동력뿐만 아니라 페달에 의한 인력을 함께 사용하므로 낮은 용량의 배터리를 사용하여도 무방하고, 방전시에도 페달링에 의해 운전이 가능하기 때문에 전기스쿠터 등에 비해 낮은 가격으로 구입이 가능하며, 누구나 탈 수 있다는 점에서 이득을 가진다. 또한 스쿠터, NEV에 비해 이용이 용이하다.

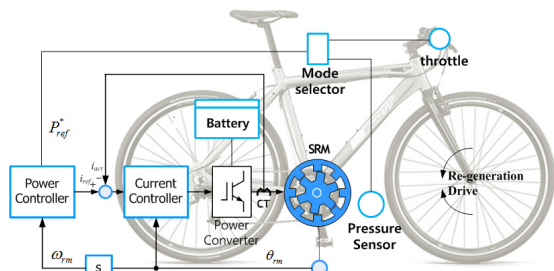
전동시스템의 경우 대부분은 영구자석을 이용하는 브러쉬드 직류전동기(Brushed DC)나 BLDC(Brushless DC)로 구성되는 가운데 최근 중국의 회토티에 대한 자원규제로 인해 자성체에 대한 가격의 안정성이 떨어지고 있고, 가격 또한 급격히 상승하고 있다. 또한 자성체의 사용으로 인해 사용조건에 대한 제약도 크다. 따라서 영구자석을 사용하지 않거나, 비교적 적게 사용되는 전기자전거용 전동기에 대한 개발요구 및 수요가 증가하고 있다.

본 논문에서는 먼저 전기자전거용 전동기의 사양과 고려점을 고찰하고, 이를 바탕으로 회전자의 형태에 따른 SRM의 특성을 비교하여 적합성을 판단하고자 한다. 이를 위하여 부하에 따른 사양을 설정하고 이에 맞는 내전형 SRM과 외전형 SRM을 동일조건에서 설계 시뮬레이션을 통해 비교하였다.

2. 전기자전거용 SR 전동기의 특성비교

2.1 전기자전거용 전동시스템의 개요

전기 자전거의 경우 전동기를 사용하는 다른 운송기구와는 다르게 전체시스템의 구동에 요구되는 동력의 일부를 인력에 의해 공급받고 나머지 부분을 전동력으로 보완하는 하이브리드 시스템이다. 따라서 전동기가 분담하는 동력 또한 다른 운송기구에서 보다 적다. 전기자전거용 전동시스템은 동력전달방식, 전동기시스템의 위치, 전동기의 종류 등에 의해 분류 될 수 있고 이에 따라 특성 또한 매우 다양하다. 따라서 모든 조건에 대한 비교는 쉽지 않다.



〈그림 1〉 전기자전거용 SRM 구동시스템의 구성

이에 본 논문에서는 향후 그림 1과 같이 구성 할 SRM을 이용한 전기자전거용 전동시스템의 효율성 검증을 위한 비교를 위해 현재 개발 중인 인휠 BLDC 형태의 전동기와 동일한 조건에서 특성을 살펴보았다. 단 SRM의 경우 저속에서의 효율이 보다는 고속에서 우수한 성능을 나타내며, BLDC와 같이 코깅토크를 가지지 않으므로 10:1기어를 사용하는 형태를 취하였다.

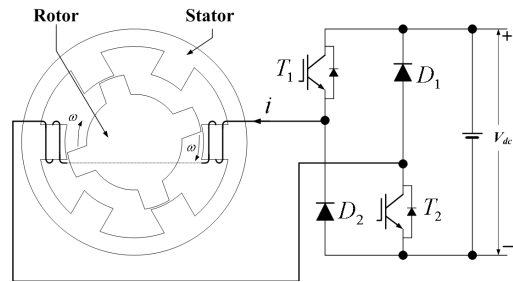
〈표 1〉 전기자전거용 전동시스템 요구사항

항목	단위	수치	항목	단위	수치
최대전류	A	30	중량	kg	4.5
전압	V	36	최대회전속도	rpm	300
모터스팬	mm	50	전동기외경	mm	239

2.2. SRM의 개요 및 회전자 구조에 따른 특성비교

스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)는 고정자에서 발생된 자속의 흐름이 원활하게 이루어지는 방향으로 회전자의 위치가 변화되도록 자계저항이 작아지는 방향으로 발생하는 릴럭턴스 토크에 의한 전동기구이다. 따라서 이러한 특성을 극대화하기 위해 일반적으로 고정자와 회전자가 돌극형 구조를 가지는 2중 돌극형 구조의 전동기구이며, 고정자에만 권선이 삽입되어 있는 구조를 가지고 있다. 따라서 다른 전동기에 비해 구조가 단순하고 기계적으로 강인한 특성을 가지고 있다. 회전자에 철심 이외의 다른 재질을 사용하지 않기 때문에 고속 회전시에도 역기전력이 다른 전동기에 비해 적고 속도의 가변범위가 넓으며, 제작이 용이하며 제작단가가 저렴한 장점을 가진다.

또한 SRM은 직류전동기와 같은 토크특성을 가지고 있어 견인력이 매우 우수하며, 돌극형 구조에 의해 각 위치에 따른 스위칭을 통하여 구동되므로 시스템의 제어성이 매우 우수하다는 장점을 가진다.



〈그림 2〉 SRM 구동시스템 등가회로

이러한 장점과 함께 SRM은 그림2와 같이 각 상이 스위칭에 의해 독립적으로 토크를 발생시키는 구조를 가지고 있어, 상과 상간에 토크리플이 다른 전동기에 비해 비교적 크다는 단점을 가지고 있으며, 구동을 위해서는 구동용 드라이브가 필요하다는 단점을 가지고 있다. 또한 스위칭 방식에 의한 비연속적인 토크발생기구로 인해 소음 및 진동이 타 전동기에 비해 다소 크다는 단점을 가지고 있다.

$$T = \frac{1}{2} i^2 \frac{dL}{d\theta} \tag{1}$$

SRM에서는 식(1)과 같이 위치각의 변화에 따른 인덕턴스의 변화와 전류의 제곱에 비례하는 만큼의 토크가 발생한다. SRM은 속도 역기전력이 매우 낮기 때문에 인가되는 부하에 따라 요구되는 전류의 값은 제어를 통해 조절할 수 있는 항목이나 인덕턴스 변화량의 경우 형상이나 설계에 의해 고정되는 변수가 된다. 인덕턴스 변화량의 주요요소 중 하

나인 최대 인덕턴스는 일반적인 자계식에 의해 식(2)와 같이 표현된다.

$$L(x) = \frac{N^2 \mu_0 A_{gap}}{2g} \quad (2)$$

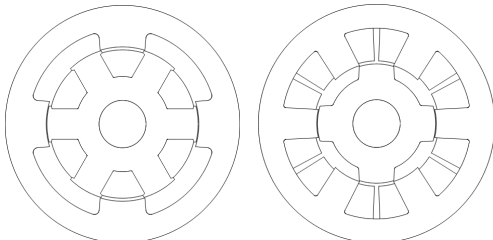
여기서 g 는 페루프를 형성하는 자속경로상의 공극의 합을 나타내며 N 은 권선수 A_c 는 자속경로의 면적, μ_0 는 공기의 투자율을 나타낸다.

스위치드 릴럭턴스 전동기의 경우 토크는 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화 크기로 나타난다. 따라서 전동기의 설계시 인덕턴스의 크기가 위치에 따라 변하게 할 수 있는 인자는 상기 식에서 회전자와 고정자의 자속경로의 면적과 공극의 크기임을 알 수 있다.

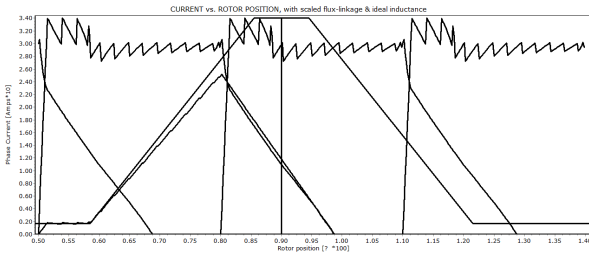
따라서 전동기 자체의 체적, 기차력, 제어변수등 모든 조건이 동일할 경우 회전자가 외전형의 경우 공극의 면적 즉 코어의 면적이 내전형에 비해 상대적으로 크고, 자속경로의 길이는 동일하므로 최대 인덕턴스의 값이 크게 발생할 수 있음을 알 수 있다.

2.3. 시뮬레이션 및 결과

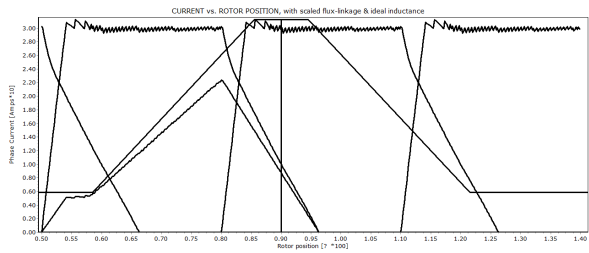
회전자 형상에 따른 특성을 비교하기 위해서 그림 3과 같은 동일조건 의 외전형과 내전형 SRM을 설계하여 시뮬레이션을 수행하였다. 표2와 같이 2가지 모델은 전동기의 외경이 동일하고 회전자, 고정자를 구성하는 요크두께, 극호각이 같고, 제어에 이용되는 모든 변수 및 기차력조건 또한 동일하게 시뮬레이션을 수행하였다.



(a) 외전형 전동기 (b) 외전형 전동기
 <그림 3> 설계된 전동기형상



(a) 외전형 전동기의 인덕턴스 및 전류프로파일(@3000[rpm])

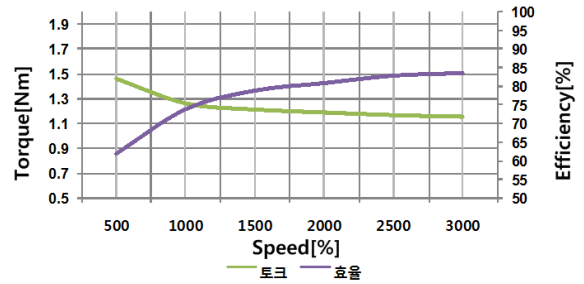


(b) 내전형 전동기의 인덕턴스 및 전류프로파일(@3000[rpm])

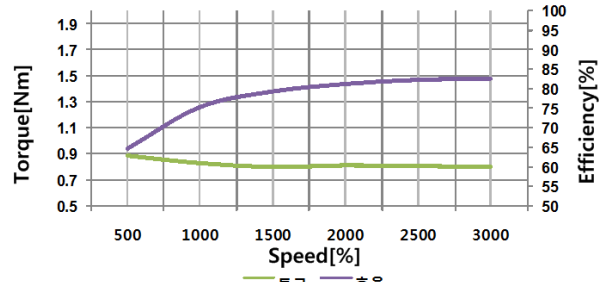
<그림 4> 회전자 형상에 따른 동작특성

그림 4는 최대속도에서 각 회전자구조에 따른 전류 및 인덕턴스 프로파일을 나타내고 있고 그림5는 각 형태별 S-T곡선을 나타내고 있으며, 시뮬레이션 결과에서 효율은 비대칭 컨버터를 이용하는 상태에서 하드 스위칭을 기준으로 스위치에 의한 손실을 포함하는 결과이다. 그림 6은 각 형태에 따른 속도별 정속운전시 상승온도를 비교한 결과이다.

시뮬레이션 결과 앞서 설명한 바와 같이 정렬시 외전형의 최대인덕턴스의 크기가 내전형에 비해 크게 나타났으며, 동일한 전류에 더 많은 토크를 발생시키고 있음을 확인할 수 있었다. 그러나 통상적으로 외전형 전동기에서 발생하는 발열문제에 대해서는 일반적으로 알려진 바와 같이 내전형이 외전형보다 방열조건이 우수하여 낮은 온도상승을 보였다. 그러나 온도의 최대 값이 권선 및 절연물의 허용온도보다 낮아 외전형을 적용하는 데는 문제가 없음을 확인하였다.

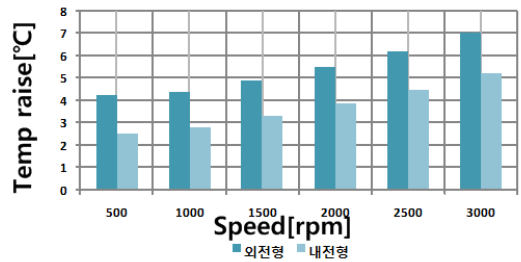


(a) 외전형 전동기



(b) 내전형 전동기

<그림 5> 회전자 형상에 따른 속도-토크, 속도-효율 특성



<그림 6> 회전자 형상에 따른 속도-온도상승률

3. 결 론

본 논문에서는 SRM을 전기자전기에 적용하기 위한 가능성과 회전자 형상에 따른 적합성을 살펴보았다. 이를 위하여 전기자전용 인휠 전동기의 최대 설계 허용범위내에서 내전형과 외전형 SRM을 동일한 수치로 설계하여 비교하였다. 비교결과 방열조건만 적합하다면 내전형에 비해 외전형 SRM이 전기자전기에 적합함을 확인할 수 있었다. 향후 토크 리플, 소음 및 진동에 대한 비교를 수행 후 회전자의 형태를 최종 선정하고, 최적화 기법을 통하여 형상의 최적화를 수행할 예정이며, 이와 함께 회생제동을 위한 구조 및 알고리즘을 제안할 예정이다.

[참 고 문 헌]

[1] A.E. Fitzgerald, Charles Kingsley, Stephen D. Umans "Electric Machinery-6th edition", McGrawHill, pp.112~172, 2003
 [2] TJE. Miller, "Elctronic Control of Switched Reluctance Machines", Newnes, 2004