

저전압 고전류용 스위치드 릴럭턴스 전동기의 토크 성능 향상

이진우*, 권병일*, 김홍석*, 우경일**

한양대 대학원 전자전기제어계측공학부*, 부경대 전기제어계측공학부**

The Improvement on the Torque Performance for Low Voltage and High Current Type of Switched Reluctance Motor

Jin-Woo Lee*, Byung-il Kwon*, Hong-Seok Kim*, Kyung-il Woo**

Dept. of Electrical Eng., Graduate School of Hanyang Univ.*, Pukyong National Uni.**

Abstract - Recently, switched reluctance motor is noticed because it is simple in structure and mechanically strong. SRM has great competitive power, and the study is developed about improving the characteristics of SRM.

The current density of winding becomes larger in designing SRM that has the characteristics of the low voltage and high current. Hence the current density of SRM of a vehicle is high. And in order that we drive SRM in variable speed and protect the switching device, the current of SRM is limited by chopping. So it is impossible to obtain object value of output characteristics by limited current.

In this paper, the author design the shape of SRM from Miller's output equation, and verify the design of SRM by using FEM. The waveform of chopping current is predicted by simulation and concur with experimental result. And the torque is improved by applying overlap current.

1. 서 론

최근 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)는 구조가 간단하고 기계적으로 견고하여 산업응용에서 많은 관심을 받고 있다. 유도기는 전원을 교류로 사용하기 때문에 이동체에 적용시 전원을 bat데리로 저장할 수 없다. DC전동기는 브러시를 갖고 있어서 고장과 효율저하의 원인이 된다. SRM은 전원을 직류로 쓰기 때문에 이동체에 적용이 가능하고, 브러시를 가지고 있지 않아서 기계적 마찰에 의한 고장과 효율저하의 원인이 없다. 따라서 SRM은 이러한 면에서 상당한 경쟁력을 갖고 있으며, 실용화를 위한 특성개선 연구가 활발히 이루어지고 있다[1]

10kW급 지게차와 같은 이동체에 장착되는 저전압 고전류용 스위치드 릴럭턴스 전동기의 형상 설계에서는 상 권선의 고전류로 인하여 권선의 전류밀도가 커지며, 전류밀도를 낮추기 위해서는 권선의 단면적을 크게 한다. 그러나 슬롯면적이 한정되어 있어서 권선의 단면적을 크게 하면 턴수는 적어진다. 또한 가변속 운전과 스위칭 소자를 보호하고, 스위칭 소자의 가열을 고려하여 상권선 전류를 최대전류보다 적은 초평 전류로 제한하게 된다. 그러나 상 제어방식에서 제한된 초평 전류로는 출력방정식의 설계 목표 값을 얻을 수 없다

형상설계 후 고정자 극에서 포화되지 않는 공극의 자속 밀도를 체크 포인트로 하여 상 권선의 최대전류로 형상설계의 타당성을 검증하였다. 그러나 상권선의 전류를 최대전류보다 적은 초평전류로 제한하게 되면, 출력방정식의 설계 목표 값을 충족하지 못함을 알 수 있었다. 따라서 상 권선의 최대 전류보다 적은 초평전류로 저전압 고전류용 SRM를 구동시 설계 요구 조건 값으로 토크 특성을 만

족시켰기 위하여 2상 전압 제어에 의한 중첩전류를 적용하였다.

2. 출력 방정식에 의한 형상설계

이동체에 적용되는 저전압 고전류용 스위치 릴럭턴스 전동기의 설계목표 및 요구사항은 속도1800(rpm)이며, 회전력 71(Nm), 출력 10kW급이다.

제약조건은 전동기 외경이 286mm이며, 입력전압은 72[V] 또는 80[V]이다. 형상설계는 전기장하와 자기장하를 고려한 출력방정식 식(1)로부터 체적을 나타내는 스위치 릴럭턴스 전동기의 외경, 회전자의 직경과 축 방향길이를 설계하였다[2]

$$T = K \cdot D_r^2 \cdot L_{str} \quad (1)$$

T는 토크, K는 출력계수, Dr는 회전자의 외경, Lstr는 코아의 축방향 길이를 나타낸다

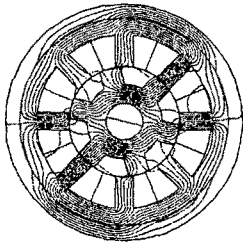
설계목표와 제약조건을 고려한 출력방정식으로 부터 형상 설계한 전동기의 제원은 표1과 같다.

표 1. 전동기의 제원

파라미터	단 위	설계치
정 격		
정 격 출 력	kW	13.5
입 력 전 압	V	80
기 준 속 도	rpm	1800
고정자코아 데이터		
극 수	수	8
프레임 직경	mm	286
고정자 직경	mm	252
요 크 폭	mm	21
극 호 각	degree	18
적 축 길 이	mm	127
규소강판	-	S-40
1극당 턴수	턴수	9
선 경	mm	6.54
회전자코아 데이터		
회전자 극수	수	6
공 극	mm	0.5
회전자 직경	mm	133
요 크 폭	mm	23.5
극 호 각	degree	22

형상 설계 후 고정자 극에서 포화되지 않는 공극의 자속 밀도를 체크 포인트로 하였으며, 그림2은 상 권선의 최대전류에서 정격속도로 회전시 공극의 자속분포를 보여 주고 있다. 공극에서의 자속 밀도는 1.7(T)나타냈으며, SRM 특성상 어느 정도 포화되면서 동작하며, 표1의 형

상 설계가 잘 되었음을 알 수 있었다[3].



(a) 자속분포

그림 2 공극에서의 자속분포

3. 초평전류에 의한 토크 특성

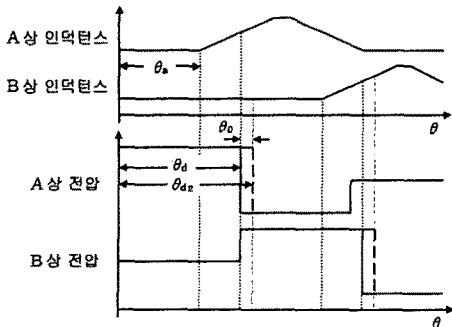
SRM의 토크는 식(2)와 같이 회전자 위치에 대한 인덕턴스 변화율과 상전류 i 의 제곱에 비례한다.

$$T(\theta_r, i) = \frac{1}{2} \frac{\partial L(\theta_r, i)}{\partial \theta_r} i^2 \quad (2)$$

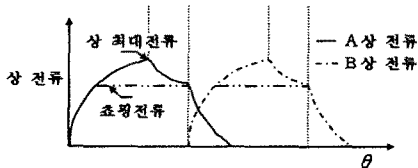
그림3은 SRM의 상 권선의 전압파형과 전류파형을 보여주고 있다. 상 전류는 가 변속과 토크 리플이 적은 일정한 토크를 만들기 위하여 히스테리시스제어 또는 PWM제어에 의하여 식(3)과 그림3의 (b)와 같이 최대 전류보다 적은 초평전류 이하에서 유지된다.

$$i < i_c \quad (3)$$

여기서 i 는 상 전류이고, i_c 는 초평전류를 나타낸다.



(a) 인덕턴스와 상 전압

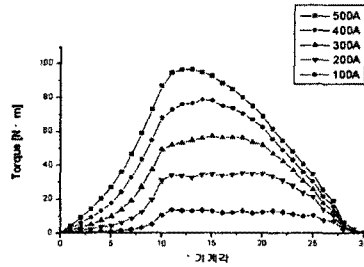


(b) 상 전류와 초평전류

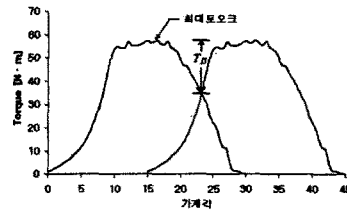
그림 3 SRM의 상 전압파형과 상 전류파형

여기서 θ_a 는 어드번스각 θ_d 는 한 상전압의 듀얼각, θ_o 는 중첩각, θ_{d2} 는 중첩전압의 듀얼각, θ 는 회전자 위치를 나타낸다.

그림4는 전자장해석으로 완전 비 정렬에서 완전 정렬시 회전자가 이동할 때 상 전류가 100[A]에서 500[A]까지 변화할 때의 최대 토크를 나타내었다. 전류 제한 값인 초평전류 300[A]에서 최대 토크는 57(Nm)를 나타내었고, 그림4의 (b)와 같이 토크 덩(T_D)을 고려하면 평균 토크는 48(Nm)로 예상된다.



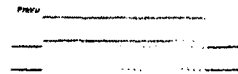
(a) 한 상의 최대 토크



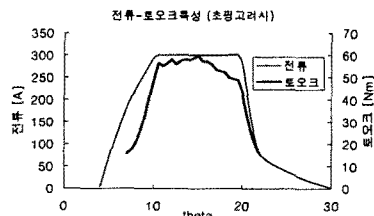
(b) 토크 덩 파형

그림 4 상 전류에 따른 최대 토크

그림5의(a)은 표1의 SRM전동기에 초평전류 300[A]를 적용하여 실험에 의한 전류 파형이며, 평균 토크는 41(Nm)를 출력하였다. 그림5의(b)은 표1의 SRM전동기에 초평전류 300[A]를 적용하여 유한요소법으로 시뮬레이션한 전류 파형과 토크 곡선으로 평균 토크는 44.7Nm이다. 실험과 시뮬레이션에 의한 전류 파형과 평균 토크는 거의 일치하였다.



(a) 실험 파형



(b) 시뮬레이션 파형

그림5 초평전류 파형

그림4의 (a)에서 정자장 해석에 의한 최대전류 400[A]와 500[A]사이의 최대 토오크는 79[Nm]에서 97[Nm]를 나타내었고, 최대토오크의 토오크 덩을 15%로 고려하더라도 출력방정식의 설계출력 값인 71[Nm]를 충족하였다. 그러나 상 권선 전류를 효평전류 300[A]로 한 상에 적용시 그림3의(b), 그림4의(b), 그림5의(b)와 같이 식(2)와 식(3)에 의하여 출력방정식의 설계 출력 값인 71[Nm]를 충족하지 못 함을 알 수 있었다. 따라서 본 논문에서는 그림3의(a)와 같이 한 상 제어 방식의 두델각(θ_d)를 중첩각(θ_o)만큼 키워서 2상의 상 전압이 동시에 상권선의 전류를 여자 시키는 2상 제어방식의 중첩전류를 적용하여 토오크 성능을 극대화하였다(4)[5].

4. 중첩각을 적용한 토오크 특성

그림6은 최대전류를 효평전류300A로 제한하여 정자장 해석을 하였을 경우의 토오크 특성 곡선이다. 축방향 길이 127mm와 9턴 일 때 최대 토오크 57[Nm]를 나타내었고, 토오크 덩을 고려하면 평균토오크는 48[Nm]로 예상된다. 축방향 길이 157mm와 10턴 일 때 최대 토오크 79[Nm]를 나타내었고, 토오크 덩을 고려하면 평균토오크는 67[Nm]로 예상된다.

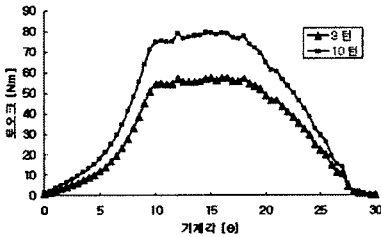


그림 6 토오크 특성 곡선

전동기의 전류 파형은 효평전류300A, 전류 선형각 10, 상 전류 중첩각6.5도를 그림7과 같이 2상 전압 방식에 의한 중첩전류를 적용하였다. 그림8은 그림7의 전동기의 중첩전류 파형을 적용하였을 때 정격속도1800[rpm]에서 토오크 파형을 보여주고 있으며, 9턴 일 때 평균 토오크 62[Nm]를 나타내어서, 그림6에서 예상한 평균토오크 48[Nm]보다 토오크 특성이 향상됨을 알 수 있었다.

또한 그림8에서 축방향 길이 157mm와 10턴일 때 그림7과 같은 중첩 전류를 적용하여 그림6에서 예상한 평균 토오크 67[Nm]보다 토오크 성능이 22%향상된 평균 토오크 82[Nm]를 시뮬레이션하였고, 실차 실험한 평균 토오크 80[Nm]의 실험값과 거의 일치함을 알 수 있었다.

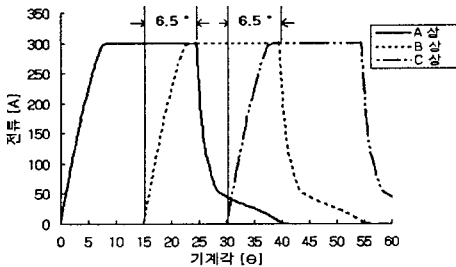


그림 7 중첩전류 파형

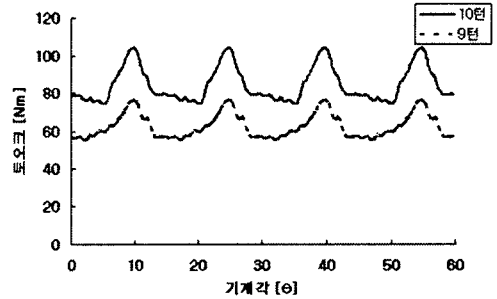


그림 8 중첩전류 적용시 토오크 파형

5. 결 론

고정자 극에서 포화되지 않는 공극의 자속밀도를 체크 포인트로 하여 상 권선의 최대 전류에서 형상설계의 타당성을 검증하였다. 그러나 상 권선 전류를 최대 전류 보다 적은 효평 전류로 제한하게 되면, 한 상 전압 제어에서 회전자들의 채적으로 부터 유도되는 출력방정식의 설계규격인 설계 목표 값을 충족하지 못 함을 알 수 있었다. 권선 전류를 최대 전류보다 적은 효평전류로 적용하여 출력 토오크가 낮아짐에 따라서 턴수와 축 방향길이의 파라미터를 조정 하였다. 또한 저전압 고전류용 SRM의 상 전류를 최대전압 보다 적은 효평 전류로 설계한 후 2상 전압 제어방식에 의한 중첩전류를 적용하여 토오크 특성을 22% 향상 시켰다.

(참 고 문 헌)

- [1] R.Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC Press, 2001
- [2] 이진우, 권병일, 우경일, 김홍석 "10kW급 지체차량용 스위치드 릴럭턴스 전동기의 형상설계" 대한전기학회 춘계학술대회 논문집 pp55-57.2002
- [3] TJE Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna physics publishing and clarendon press, 1993
- [4] 김창섭, 오석규, 안진우, "하이브리드 여자방식을 이용한 SRM의 진동,소음 저감 특성", 대한전기학회지 논문지, Vol 50B, No9, Sep. 2001
- [5] 김종겸, 김일중, 손홍관, 이은용 "여자방식에 따른 SRM의 특성해석" 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp955-957. 2001