

10KW급 지게차량용 스위치드 릴럭턴스 전동기의 형상 설계

이진우*, 우경일**, 김홍석*, 권병일*
 한양대 대학원 전자전기제어계측공학과*, 부경대 전기제어계측공학부**

Shape Design of Switched Reluctance Motor for 10kW type Pallet Truck

Jin-Woo Lee*, Kyung-il Woo**, Hong-Seok Kim*, Byung-il Kwon*
 Dept. of Electrical Eng., Graduate School of Hanyang Univ.*, Pukyong National Uni.**

Abstract - In industry, A pallet truck is driven mainly by d.c motor. because it use to battery for input power. However, d.c motor has a brush, this is the disadvantage of the d.c motor for a pallet truck. Though a brushless d.c motor has a permanent magnet, it is for low torque.

Switched reluctance motors(SRM) have the advantage a high torque/weight ratio, as the large reluctance torque is made by salient poles of both start and rotor, and a high reliability.

this paper design the shape of the switched reluctance motor that will replace a d.c motor for A pallet truck. First of all, designed parameter of SRM, outer diameter, diameter of rotor and stock length, from the output equation considering electric loading and magnetic loading. Next, design diameter of stator and rotor, depth of slot pole width, air gap as inner size of motor. The design of SRM certify the torque, the efficiency and the output power by a simulation

1. 서 론

산업현장에서 사용하고있는 지게차량은 축전지를 사용하기 때문에 주로 직류전동기를 사용하고 있다. 그러나 직류 전동기는 브러시를 갖고 있으며, 브러시가 없는 브러시리스(BLDC) 전동기도 저 토크용 이라는 단점이 있다

스위치드 릴럭턴스 전동기는 구조가 간단하고 회전자관성이 작으며 고효율과 고 토크를 발생하는 전동기이다. 본 논문은 지게차량 구동용 직류전동기를 대체할 스위치드 릴럭턴스 전동기의 형상설계 한다. 형상설계는 밀러교수가 제시한 방법으로 설계한다[1]. 전기장하와 자기장하를 고려한 출력방정식으로부터 체적을 나타내는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 외경, 회전자의 직경과 축 방향길이를 설계하고, 전동기의 내부치수인 고정자와 회전자의 직경, 스톱깊이, 치폭, 공극을 설계한다. 설계된 스위치드 릴럭턴스 전동기는 시뮬레이션 의하여 토크, 효율, 출력을 확인한다

2. 본 론

2.1 스위치드 릴럭턴스 전동기의 기본 설계 과정

전통적인 전동기설계는 출력방정식으로부터 시작한다. 스위치드 릴럭턴스 전동기는 출력 방정식이 전통적인 전동기와 다소 다르지만 같은 선상에서 설계한다. 따라서 출력방정식은 새로운 전동기와 전통적인 전동기의 설계 초기에 사용된다. 더욱이 전동기 설계자의 경험은 이런 새로운 전동기의 설계에 효과적이다.

2.1.1 출력방정식에 의한 외부치수의 크기 결정

회전자의 단위 체적 당 작용하는 회전력 $T_{rv}(\text{kNm/m}^3)$ 은 식(1)과 같다

$$T_{rv} = \frac{T}{\frac{\pi}{4} \cdot D_r^2 \cdot L_{str}} \quad \text{---- (1)}$$

스위치드 릴럭턴스 전동기에 대한 출력방정식은 식(1)로부터 식(2)와 같이 얻는다. 출력방정식 (2)에서, 토크 T와 회전자의 외경 D_r 과 코어의 축방향 길이 L_{str} 중에서 제약조건을 고려하여 두 개의 미지수를 선정한다. 이것은 설계될 전동기의 사용목적에 의하여 결정한다.

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

여기서, 출력계수는 $K = T_{rv} \cdot \pi/4$ 이며, T_{rv} 는 재질과 가변속 운전을 고려하여 식(3)의 범위에서 선택한다.[1]

$$15 \leq T_{rv} \leq 50 \quad \text{----- (3)}$$

고정자 외경 D_s 크기의 설정은 설계의 중요한 요소이다. 고정자 외경은 설계 제약 조건으로부터 주어지며, 더 큰 토크를 발생하기 위하여 주어진 고정자 외경내에서 더 큰 회전자 반경을 제공하게 된다.

그러나 회전자 반경이 늘어난 만큼 고정자의 권선을 위한 가능한 권선 영역면적을 줄어뜨리게 하여, 전동기의 발생가능한 기자력(MMF)을 감소시킨다. 따라서 고정자의 외경은 식(2)에서 구한 회전자 직경의 1.8에서 2배의 비율로 한다

2.2 내부 치수의 크기 결정

스위치드 릴럭턴스 전동기 설계시 회전자 위치에 따른 상 인덕턴스 프로파일의 이해는 설계비율을 선택하는데 상당한 도움이 된다. 설계비율은 전동기 내부치수 변화 사이의 비율로 정의한다.

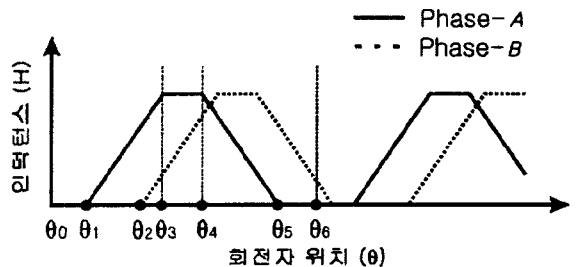


그림1 회전자 위치에 따른 상 인덕턴스

그림1에서 구간 θ_1 에서 θ_2 까지는 스트로크각 θ_{st} 으로 식(4)와 같다. 여기서 Nr 은 회전자 극수이며, m 은 상수이다. 회전자의 극호각 Pr 은 식(5)와 같다.

$$\theta_{st} = 360^\circ / mNr = \theta_2 - \theta_1 \text{ -----(4)}$$

$$Pr = 360^\circ / Nr = \theta_6 - \theta_0 \text{ -----(5)}$$

2.2.1 극호각과 공극의 크기

회전자 극호각 β_r 은 고정자극에서 자속의 프링징효과를 얻을 수 있고, 모든 회전자 위치에 대해서 토오크를 발생 할 수 있도록 고정자 극호각 β_s 보다 크게 한다. 따라서 그림1에서 고정자 극호각 $\beta_s = \theta_3 - \theta_1$ 만큼 인덕턴스의 증가하는 구간이 된다.

그러나 회전자 또는 고정자 극호각 중에서 한개의 극호각이 다른 극호각 보다 넓을때, 즉 $\beta_r - \beta_s = \theta_4 - \theta_3$ 의 넓어진 만큼 정렬위치에서 저장에너지가 변하지 않게 되어서 토오크가 발생하지 않게 된다. 4상 8/6극의 극호각은 고정자/회전자를 $21^\circ/23^\circ$ 또는 $18^\circ/22^\circ$ 로 한다

소형전동기의 경우 공극을 작게 하고, 대형전동기의 경우 공극 g 을 크게 하여 주나, 가공기술정도를 고려하여 설정하며, 회전자 직경과 축방향 길이가 같을 때 회전자 직경의 0.005%로 한다

2.2.2 고정자와 회전자 치폭의 크기

고정자 치폭 t_s 은 고정자 극호각으로 부터 식(6)과 같이 계산한다. 여기서 r_1 은 회전자 반경이다

$$t_s = 2 \cdot (r_1 + g) \cdot \sin(\beta_s/2) \text{ -----(6)}$$

회전자 치폭 t_r 은 회전자 극호각으로 부터 식(7)과 같이 계산한다.

$$t_r = 2 \cdot r_1 \cdot \sin(\beta_r/2) \text{ -----(7)}$$

2.2.3 요크의 크기

스위치드 릴럭턴스 전동기에서 한상에 2극 자속 경로를 갖는 주 자속은 한 극에서 출발하여 요오크로 들어 갈 때 똑같은 두 부분으로 나뉘어진다. 그러므로 요크의 포화를 방지하기 위하여 요오크의 폭은 치폭 50% 보다 더 크게 하여야 한다. 고정자요크 y_s 와 회전자의 요크 y_r 은 고정자와 회전자의 치폭의 2/3배로 한다

$$y_s = 2/3 \cdot t_s \text{ -----(8)}$$

$$y_r = 2/3 \cdot t_r \text{ -----(9)}$$

2.2.4 슬롯깊이와 회전자축 직경의 크기

회전자 슬롯깊이 dr 은 비정렬시 최소 인덕턴스값과 관련되며, 회전자 요오크가 포화되지 않는 범위에서 충분히 크게 한다. 회전자 슬롯깊이 dr 은 식(10)과 같이 고정자 치폭 t_s 의 50%로 한다

$$dr = t_s/2 \text{ -----(10)}$$

고정자 슬롯깊이 ds 은 고정자 외경에서 요크, 공극, 회전자 외경치수를 제한 값으로 식(11)과 같이 계산한다

$$ds = 1/2 \cdot (Ds - Dr - 2 \cdot (g + y_s)) \text{ -----(11)}$$

회전자축 직경 Dsh 은 식(8)과 같이 회전자 외경에서 슬롯 깊이치수와 요크치수를 제한 값으로 계산한다.

$$Dsh = Dr - 2 \cdot (dr + y_r) \text{ -----(12)}$$

2.3 설계된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 주요 치수

스위치드 릴럭턴스 전동기의 기본 설계 과정으로 스위치드 릴럭턴스 전동기를 1차 설계하였다. 1차 설계후 고정자와 회전자의 극과 요크의 자속밀도를 체크 포인트로 하여 설계비율을 조정하였다. 설계된 8/6극 스위치드 릴럭턴스 전동기의 주요치수는 그림1과 표1에 나타내었다

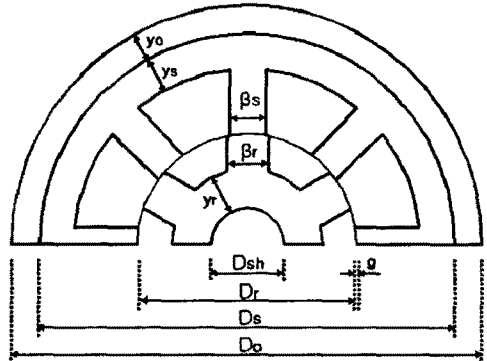


그림2 설계된 스위치드 릴럭턴스 전동기의 단면도

표1 주요치수

파라미터	단 위	설계치
정 격		
정 격 출 력	kW	13.5
입 력 전 압	V	72
기 준 속 도	rpm	1800
동 작 온 도	°C	75
고정자코아 데이터		
극수 N_s	수	8
프레임 직경 D_o	mm	286
고정자 직경 D_s	mm	252
요크 폭 y_s	mm	24
극호각 β_s	degree	18
적층길이 L_{st}	mm	127
적층계수	-	0.95
규소강판종류	-	S-23
회전자코아 데이터		
회전자 극수 N_r	수	6
공극장 g	mm	0.5
회전자 직경 D_r	mm	133
회전자 내경 D_{sh}	mm	44
요크 폭 y_r	mm	30
극호각 β_r	degree	22
적층길이 L_{st}	mm	127
적층계수	-	0.95
규소강판종류	-	S-23
고정자코일 데이터		
슬롯절연지 두께	mm	1
병렬회로수	-	1
1극당 턴수	턴수	9
1코일당 턴수	-	1
선경	mm	6.54

2.4 토오크 방정식

스위치드 릴럭턴스 전동기의 전압방정식(13)과 같이 표현한다

$$V = Ri + \frac{d\lambda(\theta, i)}{dt} \quad \text{----- (13)}$$

식(13)에서 V는 인가전압이며, R과 i는 저항과 상전류를 나타내며, $d\lambda(\theta, i)$ 는 회전자와 전류의 함수로 표현된 쇄교자속을 나타낸다. 식(13)의 우변, 두 번째항을 시간에 대하여 미분하면 식(14)와 같이 된다.

$$V = Ri + L(\theta, i) \frac{di}{dt} + i \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} \frac{d\theta}{dt} \quad \text{----- (14)}$$

토오크는 식(14)와 같이 상전류 i의 제곱과 회전자 위치에 대한 인덕턴스의 변화율에 비례한다.

$$T(\theta, i) = \frac{1}{2} \frac{dL(\theta, i)}{d\theta} i^2 \quad \text{----- (15)}$$

2.5 스위치드 릴럭턴스 전동기 특성

그림3은 표1의 설계치수로 설계된 전동기의 회전자 비정렬위치에서 정렬위치까지의 상전류값에 따른 쇄교자속의 특성을 나타낸다. 그림4은 회전자위치에 따른 인덕턴스값을 나타내며, 최대인덕턴스대 최소인덕턴스비율은 12 이다.

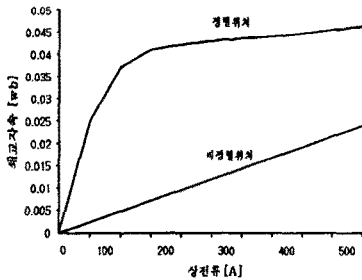


그림3 정렬시 전류와 쇄교자속 특성

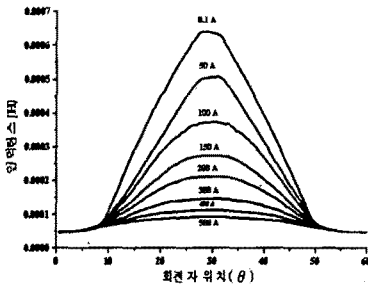


그림4 회전자 위치에 따른 인덕턴스 특성

표1의 형상설계한 설계치를 시뮬레이션하여 최대상전류 421[A]에서 정격속도 1875[RPM], 출력 13.4[kW], 효율 89(%), 토오크 68.7[Nm]의 출력을 나타냄을 알 수 있었다. 그림(5), 그림(6), 그림(7)같이 1800[RPM]에서 출력 14. [kW], 효율 89(%), 토오크 74[Nm]를 출력하였다 1800[RPM]전 후에서 안정적인 출력을 내고 있어서 출력방정식에 의하여 형상 설계한 출력이 시뮬레이션값과 일치함을 알 수 있었다.

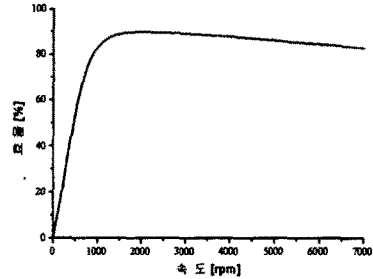


그림5 효율특성

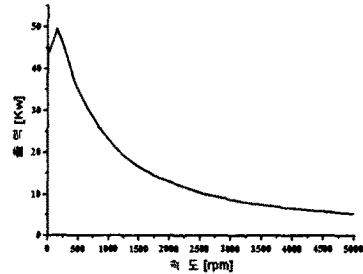


그림6 출력특성

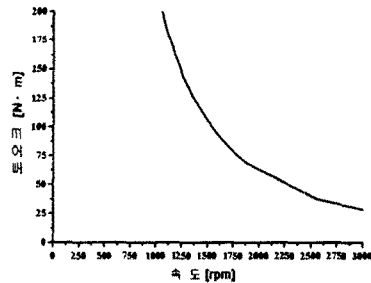


그림7 토오크 특성

3. 결 론

스위치드 릴럭턴스 전동기의 설계는 크게 제어부분설계, 구동부설계, 전동기의 형상설계의 세 부분으로 나뉘어진다. 본 연구에서는 스위치 릴럭턴스 전동기의 형상설계에 초점을 두었으며, 형상설계의 사양으로 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과는 전동기의 성능을 예측하여 제어부의 알고리즘 설계와, 구동부의 고전류소자 설계에 기준을 제공하리라 기대 한다.

[참고 문헌]

- [1] TJE Miller, "Switched Reluctance Motors and Their Control", Magna physics publishing and clarendon press ,1993
- [2] Ki-Bong Kim, Byung-Il kwon, "Toroidal switched reluctance motor", SMIC 99, pp.57-60, 1999.10.
- [3] R. Krishnan, R. Arumugam and James F. Lindsay "Design Procedure for Switched-Reluctance Motors", IEEE Trans. on IA. Vol. 24. No. 3, pp. 456-461, May/June.1988
- [4] M. N. Anwar, Iqbal Husain and Arthur V. Radun "A Comprehensive Design Methodology for Switched Reluctance Machines", IEEE Trans. on IA. Vol. 37. No. 6, pp. 1684-1692, November/December.2001