

계자 권선을 이용한 터보 블로워용 고속 스위치드 릴럭턴스 전동기 설계

홍진, 이치우
부산대학교

An Approach to Reduce Peak Phase Current of a Switched Reluctance Motor Using DC Assisted Winding for a Turbo Blower

Jin Hong, Cheewoo Lee
Pusan National University

Abstract - 본 논문은 터보 블로워용 고속 스위치드 릴럭턴스 전동기의 최대 상 전류 저감 설계에 대하여 기술한다. 스위치드 릴럭턴스 전동기는 성능 철심으로만 구성되어 구조가 매우 간단하며, 고속 회전기 시스템의 동력원으로 적합하다. 하지만 토크 생성에 전적으로 고정자 권선만을 이용하므로 고회력, 고속 회전기 시스템에서 최대 상 전류의 크기가 상당히 크고, 구동 시스템의 비용 증가를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 계자 권선을 이용한 터보 블로워용 고속 스위치드 릴럭턴스 전동기 설계를 진행하였으며, 계자 권선 인가 전류의 크기와 전체 권선 영역 대비 계자 권선 영역의 비율에 따른 전동기 최대 상 전류의 크기와 전동기 효율에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

이 중요하다. 최종적으로 고속 회전기 시스템인 터보 블로워용으로 3상 6/4 스위치드 릴럭턴스 전동기를 선택하여 기준 모델 설계를 진행하였다.

$$P_{coreloss} = K_h B_{max}^2 f_s + K_e (B_{max} f_s)^2 \quad (2)$$

여기서 $P_{coreloss}$ 는 철손, K_h 는 히스테리시스손 계수, K_e 는 와전류손 계수, B_{max} 는 최대 자속밀도이다.

1. 서 론

최근, 다양한 산업 분야에서 압축기, 펌프, 터보 블로워와 같은 고속 회전기 시스템에 대한 수요가 증가하고 있으며, 스위치드 릴럭턴스 전동기는 구조가 간단하고 영구자석형 전동기 또는 권선형 전동기와 달리 회전자에 영구자석이나 권선이 없어 고온, 고속의 악조건 속에서 높은 신뢰성을 보이므로 고속 회전기 시스템의 동력원으로 이점을 가진다[1]. 하지만 스위치드 릴럭턴스 전동기는 토크 생성에 전적으로 고정자 권선에 인가되는 전류만을 사용하므로 고회력 시스템에서는 최대 상 전류의 크기가 커지는 단점이 있으며 이는 구동 시스템의 비용 증가를 초래한다. 따라서 본 논문에서는 고회력, 고속 회전기 시스템인 터보 블로워용 스위치드 릴럭턴스 전동기의 최대 상 전류의 크기 저감을 위한 설계를 진행하였으며, 고정자와 회전자 극수 조합, 전동기 제작 선정 과정을 통해 기준 모델 설계를 진행하고 기준 모델의 상 권선 영역을 전체 권선 영역으로 선정하였다. 권선에 사용되는 전체 동량은 동일하게 유지하였으며, 전체 권선 영역 대비 계자 권선 영역이 각각 20%와 40%인 경우와 계자 권선에 10A와 20A의 전류를 인가하였을 때 계자 권선의 추가가 전동기 최대 상 전류의 크기와 전동기 효율에 미치는 영향을 비교 분석하였다.

<표 1> 고정자 및 회전자 극수 조합에 따른 스위칭 주파수 비교

# of phases	3	3	4	3
Stator pole	6	12	8	12
Rotor pole	4	8	6	10
f_s [kHz]	6 (100%)	12 (200%)	12 (200%)	15 (250%)

2.1.2 3상 6/4 스위치드 릴럭턴스 전동기 기준 모델 설계

고정자와 회전자 극수 조합이 선정되면, 요구 토크와 출력방정식에 의해 회전자 외경, 고정자 외경 순으로 결정이 된다. 전동기의 치수를 결정하는 방법으로는 크게 출력식을 이용한 식(3)과, 식(4)의 토크식으로 구하는 2가지 방법이 있다[4,5].

$$P_d = k_e k_d \frac{\pi^2}{120} k_1 B A_{sp} D_r^2 L_{stk} N_r \quad (3)$$

$$T = k D_r^2 L_{stk} \quad (4)$$

여기서 k 는 출력 계수, k_d 는 듀티 사이클, k_e 는 효율, k_1 은 고정자 상 전류와 철판 재질 그리고 전동기의 치수와 관련된 변수이며, B 는 자속 밀도, A_{sp} 는 전기 장하, D_r 은 회전자 지름, L_{stk} 는 적층 길이이다.

식(3)과 식(4) 모두 기준 모델 설계에 사용이 가능하나 본 논문에서는 더 적은 변수를 가지는 식(4)을 채택하여 설계를 진행하였다. 그림 1은 설계된 기준 모델의 단면이며, 표 2는 식(4)를 통해 선정된 주요 사양 및 동특성 해석 결과이다.

2. 본 론

2.1 계자 권선을 이용한 스위치드 릴럭턴스 전동기 설계

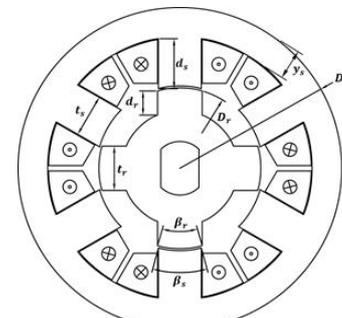
2.1.1 고정자 및 회전자 극수 조합 선택

스위치드 릴럭턴스 전동기 구조적 치수 선정에 앞서 터보 블로워와 같은 고속 회전기 시스템에서는 스위칭 주파수가 우선적으로 고려될 필요가 있다[2,3]. 표 1은 자주 사용되는 스위치드 릴럭턴스 전동기의 고정자와 회전자의 극수 조합과 그에 따른 스위칭 주파수를 보여준다. 스위칭 주파수는 식(1)과 같이 회전자 회전속도, 상 수, 회전자 극수에 비례하며 결과적으로 표 1에서 고정자와 회전자 극수가 6/4, 12/8, 8/6, 12/10인 스위치드 릴럭턴스 전동기는 각각 6, 12, 12, 15 kHz의 스위칭 주파수를 가진다.

$$f_s = \left(\frac{rpm}{60}\right) q N_r, Hz \quad (1)$$

여기서, f_s , rpm, q 그리고 N_r 는 스위칭 주파수, 회전자 회전 속도, 상 수, 회전자 극수이다.

또한, 식 (2)는 스위칭 주파수와 철손의 관계를 나타내며, 히스테리시스손은 기본 스위칭 주파수, 와전류손은 기본 스위칭 주파수의 제곱에 비례한다. 따라서 회전자의 회전 속도가 높아질수록 철손을 저감하기 위해 상수와 회전자 극수를 적게 선택하는 것



<그림 1> 기본 설계 모델의 단면

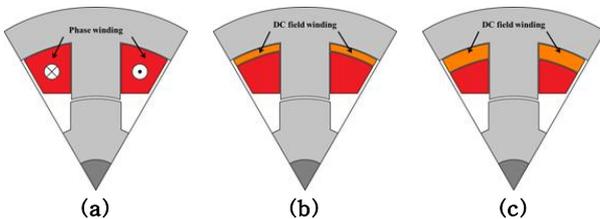
고정자 지름(D_s), 회전자 지름(D_r), 적층 폭(L_{stk})은 60mm, 30mm, 70mm이며, 고정자 극호(β_s)와 회전자 극호(β_r)는 각각 30°, 32°이다. 또한, 정격 출력 20kW, 정격 속도 30,000rpm에서 최대 상 전류의 크기가 94.96A로 상당히 큰 것을 알 수 있다. 이는 전동기 구동 시스템에서 큰 용량의 컨버터를 요구하므로 상 전류 최대값 저감 설계가 요구된다. 본 논문에서는 최대 상

전류 저감을 위해 계자 권선이 추가된 모델을 제안하며, 전동기 전체 권선 영역, 상 권선 턴수, 상 권선과 계자 권선에 사용된 전체 동량을 동일하게 유지하였다. 그림 2는 기존 모델과 계자 권선이 추가된 모델이며 그림 2(b)와 (c)에 계자 권선 영역이 각각 전체 권선 영역의 20%와 40%로 선정된 모습이다.

〈표 2〉 설계된 기준 모델의 주요 치수 및 동특성 해석 결과

section		6/4 SRM
Stator radius (D_s)	mm	60
Rotor radius (D_r)	mm	30
Stack length (L_{stk})	mm	70
Stator pole arc (β_s)	degree	30
Rotor pole arc (β_r)	degree	32
Stator pole width (t_s)	mm	15.92
Rotor pole width (t_r)	mm	16.54
Stator slot depth (d_s)	mm	8.99
Rotor slot depth (d_r)	mm	18.65
Phase resistance	ohm	0.055
Phase rms current	A, rms	47.78
Phase peak current	A, peak	94.96
Turns per pole	N_p	21
Rotor speed	rpm	30,000
Torque	Nm	6.59
Copper loss	W	378.7
Core loss	W	2379.6
Output power	W	20694.9
Efficiency	%	88.24

2.1.3 DC 계자 권선 추가로 인한 특성 비교

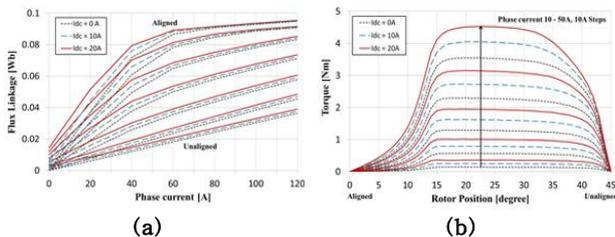


〈그림 2〉 상 권선 영역과 계자 권선 영역 비율에 따른 모델, (a) 기준 모델, (b) 계자 권선 영역 20%, (c) 계자 권선 영역 40%

최근 계자 권선이 추가된 스위치드 릴럭턴스 전동기에 대한 연구들이 많이 이루어지고 있으며[6], 전체 권선 영역을 상 권선 영역과 계자 권선 영역으로 나눈 경우 감소된 상 권선 영역이 계자 권선 영역으로 사용된다. 식 (5)는 계자 권선 추가형 스위치드 릴럭턴스 전동기의 토크식이며, 계자 권선의 쇠교자속에 의해 생성되는 토크(T_{dc})가 전체 토크(T_e)의 증가를 이끌어 낸다.

$$T_e = T_r + T_{dc} = i_a^2 \frac{\partial L_{aa}}{\partial \theta} + 2i_{dc} \frac{\partial \psi_{dc}}{\partial \theta} \quad (5)$$

여기서 T_e , T_r , T_{dc} 는 제안된 스위치드 릴럭턴스 전동기 전체 토크 생성량, 상 권선 토크 생성량, 계자 권선 토크 생성량이고, i_a 와 i_{dc} 는 각각 상 전류, 계자 전류이다.



〈그림 3〉 제안된 전동기의 전류 크기에 따른 정적 특성, (a) 쇠교자속, (b) 토크

그림 3은 제안한 모델의 전류원 해석에 따른 쇠교자속과 토크 생성량의 변화를 나타낸다. 그림 3(a)는 계자 전류가 0A에서 20A로 증가에 따른 쇠교자속의 변화를 나타낸다. 마찬가지로 그림 3(b)는 계자 전류가 0A에서 20A로 증가함에 따라 토크 생성

량의 증가하므로 전체 토크 생성량(T_{ra})이 일정한 경우 계자 권선의 추가로 필요한 상 전류의 크기(i_a)를 낮추어 줄 수 있음을 알 수 있다.

〈표 3〉 계자 권선 영역 비율 및 계자 전류 크기에 따른 동특성 비교

Type	Base	Field Current	DC field 20%	DC field 40%
Output power [kW]	20.7	10 A	20.72	20.71
		20 A	20.66	20.66
Efficiency [%]	88.24	10 A	88.28	87.96
		20 A	88.09	87.91
Phase resistance [Ω]	0.055	-	0.068	0.089
Phase winding	378.7	10 A	419.0	553.8
Copper Loss [W]		20 A	377.3	498.3
DC field winding	-	10 A	14.2	6.6
Copper Loss [W]		20 A	56.9	26.4
Core Loss [W]	2379.6	10 A	2317.2	2279.4
		20 A	2358.3	2316.3
Phase Current [A_{peak}]	94.96	10 A	88.39	87.00
		20 A	83.21	81.87

표 3은 기준 모델과 제안된 모델의 동특성을 비교한 것이며, 40% 계자 권선에 20A의 전류가 인가되었을 때는 최대 상 전류 크기가 기준 모델과 비교해 13.8% 감소된 결과를 보이지만 기준 모델에 비해 효율이 0.33% 떨어지는 것을 알 수 있다. 이는 동손과 철손이 더해진 전동기 전체 손실이 증가했기 때문이다. 그러나 계자 권선 영역이 전체 권선 영역의 20%이고 계자 권선에 10A의 전류가 인가되었을 때는 거의 동등한 효율에서 최대 상 전류의 크기가 7% 감소된 것을 알 수 있는데 이는 계자 권선의 추가로 동손이 다소 증가하였으나 철손이 감소했기 때문이다. 따라서 본 논문에서 제안한 계자 권선 추가를 통한 최대 상 전류 크기 저감을 위해서는 전체 권선 영역 대비 계자 권선 영역의 비율과 최적의 계자 전류 크기를 선정하는 것이 중요한 것을 알 수 있다.

3. 결 론

본 논문은 터보 블로워용 고속 스위치드 릴럭턴스 전동기의 최대 상 전류 저감 설계를 진행하였다. 기준 모델의 상 권선 영역을 전체 권선 영역으로 선정하였으며 권선에 사용되는 전체 동량은 동일하게 유지하여 전체 권선 영역 대비 계자 권선 영역이 각각 20%와 40%일 때, 10A와 20A의 계자 전류를 인가하고 계자 권선의 추가가 전동기 최대 상 전류의 크기와 효율에 미치는 영향을 비교 분석하였다. 본 논문에서 제안한 계자 권선이 추가된 스위치드 릴럭턴스 전동기는 계자 권선 영역이 전체 권선 영역의 20%이고, 10A의 계자 전류가 흘렀을 때, 효율을 동등하게 유지한 채 최대 상 전류의 크기가 7% 감소되었다. 이상에서 얻은 결과로 보아 최대 상 전류의 크기를 줄여주는 전체 권선 영역 대비 계자 권선 영역의 비율과 최적의 계자 전류 크기를 찾는 것을 최대 상 전류 저감에 효과적으로 이용될 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

- [1] Ahn, Jin-Woo, Huynh Khac Minh Khoi, and Dong-Hee Lee. "Design and analysis of high speed 4/2 SRMs for an air-blower." Industrial Electronics (ISIE), 2010 IEEE International Symposium on. IEEE, 2010.
- [2] Krishnan, Ramu. Switched reluctance motor drives: modeling, simulation, analysis, design, and applications. CRC press, 2001.
- [3] Miller, T. J. E. "Optimal design of switched reluctance motors." Industrial Electronics, IEEE Transactions on 49.1 (2002): 15-27.
- [4] Miller, Timothy John Eastham. Switched reluctance motors and their control. Lebanon, OH: Magna Physics, 1993.
- [5] Shoujun, Song, et al. "Detailed design of a high speed switched reluctance starter/generator for more/all electric aircraft." Chinese Journal of Aeronautics 23.2 (2010): 216-226.
- [6] Pulte, D. W. J. "Performance of split-coil switched reluctance drive." Electric Power Applications, IEE Proceedings B 135.6 (1988): 318-323.