

송풍기 구동용 단상 SRM의 이론적 설계파라미터 산정

이종한, 이충원, 이은웅, 오영웅

충남대학교

Computation of theoretical design parameter of single phase SRM for a blower drives

Jong-han Lee, Chung-Won Lee, Eun-Woong Lee, Young-Woong Oh
Chungnam National University

Abstract - SRM has a characteristic of a robust, simple structure and wide operating ranges. So, recently it has studied and developed in many kinds and forms with the technology of power electronics and analysis and design by use of computer. Also, It is used in a very wide range of industrial applications.

In particular, single phase switched reluctance motor has a merit in practical use because it has simple operating drives and control systems, very high energy density per unit volume comparing with three phase SRM. But it must have a starting device.

In this paper design procedures of single phase SRM development for blower drives are presented. It is selected the design parameters by compared with design theory of general electric machine and poly phase SRM. Also it is simulated the designed prototype model by FEM for the prediction of characteristics

1. 서 론

최근 산업의 발달과 더불어 가변속 구동용 전동기로 SRM이 활발히 이용되어지고 있다. SRM은 자기저항이 최소가 되려는 자기적 변화를 이용한 것으로 구조가 간단하고 견고하며, 구동을 위한 스위칭 소자의 수를 줄일 수 있기 때문에 매우 경제적인 장점이 있다. 특히, 단상 SRM은 고정자 극수와 회전자 극수의 조합을 이용하는 다상 여자하는 다상 SRM에 비해 단상 여자하기 때문에 스위칭 소자를 줄일 수 있고, 단위체적당 에너지 이용율이 높다. 하지만 기동 토크가 발생되지 않아 별도의 기동장치가 사용되어야 한다. [1][2]

일반적으로 유체부하를 다루는 편용 송풍기나 펌프용 전동기는 부하의 토크 특성이 속도의 2제곱에 비례하여 증가한다. 이렇게 유체 부하들은 운전시 급격한 부하변동이 적고 큰 기동토크를 필요로 하지 않기 때문에 소용량의 경우 효율이 낮은 단상 유도전동기가 주로 사용되고 있다.

본 연구에서는 송풍기 구동용으로 단상 SRM을 개발하기 위해 기존의 전기기기 설계 이론과 다상 SRM의 설계 이론을 참조하여 설계 파라미터를 산정하는 과정을 정립하고, 설정된 설계값의 시작기 모델에 유한요소해석을 적용하여 단상 SRM의 특성을 예측하였다.

2. 단상 SRM의 설계

2.1 설계 사양 설정

전기기기를 설계할 때에는 출력, 극수, 상수, 회전자

및 고정자의 구조적인 요인과 부하특성에 따른 적용할 수 있는 요구사항을 고려하여야 한다. 또한 설계자가 갖는 설계 과정에서의 경험등을 적용하여 최적의 설계가 이루어 지도록 해야 한다.[3]

단상 SRM은 다상 SRM에 비해 상당 스위칭 소자의 수를 최소화할 수 있어 경제성이 있으며, 자속경로가 짧아 효율을 높일 수 있다. 하지만 특정 위치에서 기동토오크가 발생하지 않기 때문에 별도의 기동 장치를 필요로 한다.[2]

본 연구에서 설계하고자 하는 단상 SRM은 송풍기의 구동용으로서 속도의 제곱에 비례하는 유체 부하의 특성을 설계시 고려하였고 이에 따른 설계 사양은 표 1과 같다. 그림 1은 단상 SRM의 설계 모델을 나타낸 것이다.

표 1 단상 SRM의 주요 설계 사양

설계 요소	단위	기호	설계값
출력	kW	P	0.75
회전자 체적당 토크	kNm/m ³	TRV	15
회전자 지름에 대한 stack 길이의 비		L _{stk} /D _r	1
회전자 극수	No.	N _r	6
고정자 극수	No.	N _s	6
DC 공급 전압	V	V _s	220
상수	No.	m	1
정격 회전 속도	rpm	n	1750

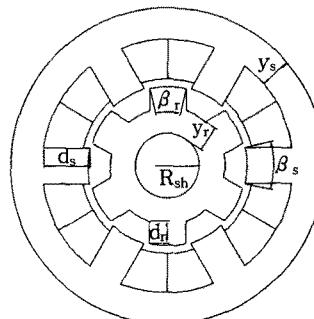


그림 1. 6/6극 단상 SRM의 단면도

2.1.1 출력방정식 산출

일반 전기기기의 설계시 고정자 내경, 적층 길이, 회전 속도, 출력에 대한 전기장하 및 자기장하 등이 포함이 되는 출력방정식을 이용하면 체계적인 설계 과정을 얻어 낼 수 있다. 그러나 SRM은 일반 범용 전동기와 토크

발생 원리가 다르기 때문에 이를 고려한 설계 이론을 적용하여야 하지만, 출력방정식을 유도하는 과정에 SRM의 특성을 고려하여 비교 설계할 수 있다.[3]

SRM의 토오크는 그림 2에서처럼 회전자의 정렬위치에서 비정렬위치까지의 한 스트로크 동안 자화곡선에 의해 둘러싸인 면적에 해당되는 자기수반에너지의 변화로 얻어진다.

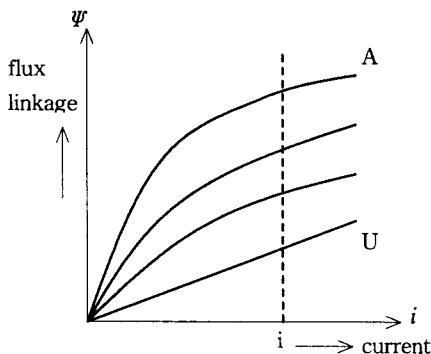


그림 2. SRM의 자화 특성

범용 전동기의 출력 방정식으로 SRM의 출력 방정식을 유도하여 정리하면 식(1)과 같다.

$$P = K_p \cdot B \cdot A \cdot D^2 \cdot L \cdot N \quad (1)$$

여기서, K_p : 출력 계수

B : 자기 장하

A : 전기 장하

D : 회전자 직경

L : 회전자의 축방향 길이

N : 회전자의 회전 속도

토오크는 식(1)에서 토오크와 출력은 전기장하와 자기장하의 곱과 회전자 직경의 제곱에 비례하는 식(2)와 같이 구할 수 있다.

$$T = k_T \cdot (B \cdot A)D^2 \cdot L$$

2.2 설계 파라미터 설정

운전 범위가 넓은 SRM은 주로 가변속 구동장치로 사용되기 때문에 기준 속도에서 정격 출력과 정격 토오크를 얻을 수 있다. 고정자의 축방향 길이와 회전자 직경과의 관계를 식(3)과 같이 표현하면, 출력방정식을 이용하여 식(4)와 같이 구할 수 있다.[4]

$$L = k \cdot D \quad (3)$$

$$P \propto K_2 \cdot D^3 \quad (4)$$

회전자 직경 D는 정격속도 N, 전기장하 A, 자기 장하 B 등의 값을 통해 결정할 수 있으며, 회전자 직경 D와 축방향 길이 L의 비 k값은 전동기의 부하 특성, 공간적인 제한 사항 등을 고려하여 선정한다.

SRM의 공극 길이 g는 토오크를 최대화하고, 소음과 진동을 줄이기 위해 각각 설정한다.[4] 보통은 회전자 직경의 0.5[%]정도에서 선정하고 제작시 기술상의 문제점을 고려하여 적절한 값을 선정한다.

SRM의 고정자 권선의 권선수(N_{ph})는 전기장하 A를 나타내는 식(5)를 이용하여 선정할 수 있다. 전류 밀도에 대한 최종 결과값은 전동기에 적용되는 냉각 방식을 고려한 최대 허용 전류값에 대해 계산하고 점검해야 한다. 이외에도 권선수 N_{ph} 를 선정할 때에는 권선이 차지하는 공간, 전동기 전체의 열적 조건, SRM을 제어하는 컨버터에 인가되는 입력 조건 등에 따라 결정되어야 한다.

$$A = \frac{2 \cdot N_{ph} \cdot i \cdot m}{\pi D} \quad (5)$$

여기서, m : 상수

이밖에도 고정자 및 회전자의 극호 β_s , β_r 을 선정한 후 회전자 반경이 r_1 일 때 고정자와 회전자의 극폭 t_s 와 t_r 을 식(6)과 식(7)에 의해 결정한다.

$$t_s = 2(r_1 + g) \sin \frac{\beta_s}{2} \quad (6)$$

$$t_r = 2r_1 \sin \frac{\beta_r}{2} \quad (7)$$

회전자 극과 극사이의 슬롯의 깊이 d_r 를 회전자극의 축과 고정자극의 축이 비정렬 상태가 되었을 때 최소의 인덕턴스값을 갖도록 공극 g의 최소한 20~30배가 되도록 하고 기준값으로는 고정자극폭의 1/2배로 하고, 다상에서는 고정자극과 극사이의 슬롯의 깊이 d_s 는 권선이 차지하는 공간 면적을 최대로 확보할 수 있도록 선정하여야 하나 단상에서는 원통형 여자권선을 축에 수직으로 감을 수 있는 공간을 고려할 필요가 있다. 회전자와 고정자 슬롯의 깊이를 산정하는 방법은 식(8)과 식(9)와 같다.

$$d_r = (20 \sim 30)g = \frac{t_s}{2} \quad (8)$$

$$d_s = \frac{1}{2} \{(D_s - D_r - 2(g + y_s))\} \quad (9)$$

고정자 및 회전자의 요크 두께 y_s , y_r 는 포화되지 않고 최대의 자속을 훌릴 수 있도록 선정하여야 한다.

이상의 설계 과정을 통해 선정한 송풍기 구동용 단상 SRM의 설계 파라미터는 표2와 같다.

표 2. 송풍기 구동용 단상 SRM의 설계 파라미터

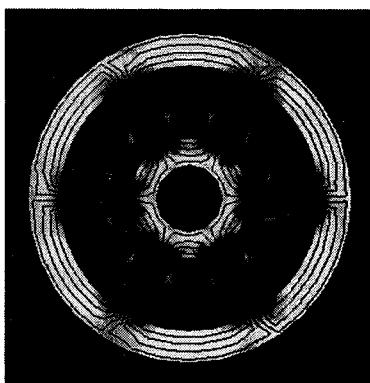
설계 요소	비고	기호	설계 값
고정자 지름	mm	D_s	140.68
회전자 지름	mm	D_r	70.34
축방향 길이	mm	L_{stk}	70.34
공극	mm	g	0.3
고정자 극호	[°]	β_r	25.650
회전자 극호	[°]	β_s	26.933
고정자 슬롯깊이		d_s	20.592
회전자 슬롯깊이		d_r	9.395
고정자 요크 두께	mm	y_s	14.068
회전자 요크 두께	mm	y_r	11.466
축지름	mm	D_{sh}	28.618
극당 턴수		N_p	140

3. 특성 예측

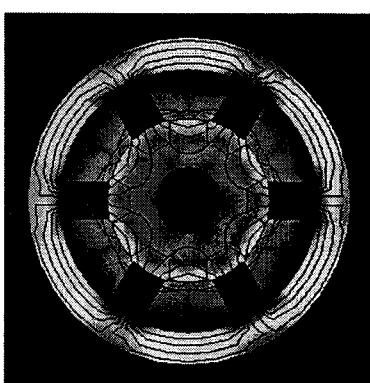
설계 과정을 통해 얻어진 설계 파라미터에 대한 검증을 위해서는 직접 제작하고 실험하여 정확한 특성 해석을 하여야 하지만 이와 같은 방법은 많은 시간과 비용을 동반하게 된다. 그래서 직접 제작하기에 앞서 전기기기 해석 프로그램을 통해 시뮬레이션을 하고 이를 통한 특성 예측 및 수정 작업을 통해 최적의 설계 파라미터를 얻어내는 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 설계 과정에서 얻어진 설계 파라미터로 행한 시작기 모델에 유한 요소 해석을 적용하여 특성을 산출하였다. 유한 요소

해석으로 구한 단상 SRM의 자속 밀도 분포는 실제 제작을 위한 최적 설계 파라미터와 구동 및 토오크로를 위한 기본적인 설계 자료를 구하는데 사용하여, 자기회로의 포화 현상과 회전자 위치에 따른 자속밀도의 변화를 해석하고, 토오크 특성을 예측하였다.[2]

그림 3은 2차원 유한 요소 해석을 통해 얻은 회전자의 정렬 및 비정렬 위치에서의 자속 밀도를 나타낸 것이다. 그림 4는 암페어-턴수와 회전자 위치별 자기 수반 에너지의 변화를 나타낸 것이다. 해석 결과 700(AT)에서 철심의 포화없이 자속의 변화율이 높음을 확인하였다.



(a) 정렬된 위치에서의 자속밀도 분포



(b) 반정렬 위치에서의 자속밀도분포

그림 3. 유한요소해석에 의한 자속밀도 분포

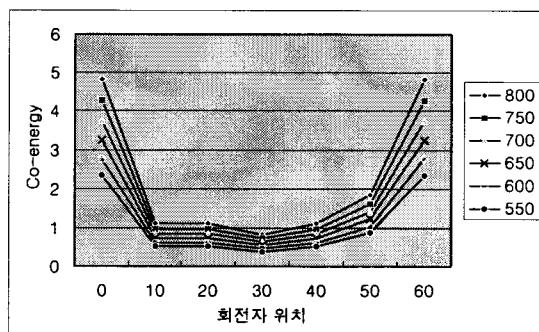


그림 4. 회전자 위치에 대한 자기수반에너지 변화

회전자극이 정렬된 위치에서 비정렬 위치까지 이동할

때 발생되는 에너지의 분포가 정현적이라고 가정한다면 에너지 분포와 이에 따른 토오크의 분포는 식(10)과 식(11)을 이용하여 근사화시킴으로서 특성을 예측할 수 있다. 그럼 5는 이상의 과정을 거쳐 각각의 여자전류에 대한 근사화된 토오크의 분포곡선을 나타낸 것이다.[2]

$$W = W_{avg} + W_p \cos(p\theta) \quad (10)$$

여기서, $W = W_{min}$

$$W_p = \frac{W_{max} - W_{min}}{2}$$

$$T(\theta) = -p W_p \sin(p\theta) \quad (11)$$

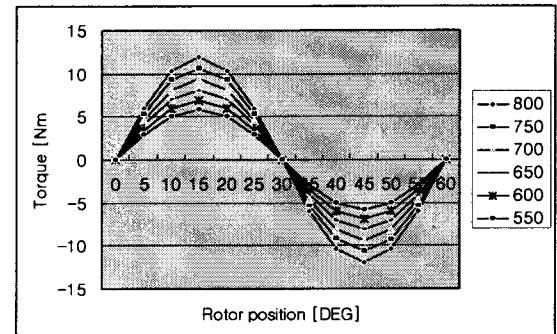


그림 5. 전류 변화에 대한 토오크 변화 예측

4. 결론

본 연구에서는 송풍기용 구동원으로 사용하기 위한 단상 SRM을 제작하기에 앞서 기존의 일반 전기기기 설계 이론과 다상 SRM의 설계이론을 참조하여 단상 SRM에 적합한 설계 방법을 정립하고, 제작에 앞서 선정된 설계 파라미터로 구성한 시작기 모델에 유한 요소 해석을 적용하여 토오크 특성을 예측하였다.

앞으로 단상 SRM의 특성에 큰 영향을 미치는 국호비, 전류의 턴-온각, 턴-오프각 등과 같은 세부적인 설계 사양에 대한 정확한 검증을 통해 최적의 설계 파라미터를 선정하고 직접 제작을 통해 설계 과정에 대한 타당성을 입증하여야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.J. Lawrenson, J.M. Stephenson, "Variable-Speed Switched Reluctance Motors", Proceedings IEE, Vol. 127, Pt.B, No.4, pp.253-265, July 1980
- [2] 이종한, 오영웅, 이은웅, "디스크형 단상 SRM의 구동드라이브 제작과 성능측정", 대한전기학회논문지, 49권 B, No. 1, pp.15-19, 2000.1
- [3] R. Krishnan, R. Arumugam, James.F.Lindsay, "Design Procedure for Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. Ind. Appl., VOL.24, No.3, pp.456-461, May.1988
- [4] Miller,T.J.E., Switched Reluctance Motors and their Control, Magna Physics Publishing and Oxford University Press, London, 1993