

회전자 형상을 고려한 단상 SRM의 특성 해석

박진홍^{1*}, 이종한²

¹해전대학 전자캐드과, ²예산전자공업고등학교

The Characteristic Analysis of Single Phase SRM Considering of Rotor types

Park, Jin Hong^{1*} and Lee, Jong Han²

¹Dept. of Electronic CAD, Hyejeon College, ²Yesan Electronic Technical High School

요 약 단상 스위치드 릴럭턴스 모터는 구조가 간단하고 견고하며 구동 및 제어장치를 간소화할 수 있어 경제적으로 산업분야 및 가전기기 분야에 사용할 수 있다. 특히 현재 많이 사용되고 있는 단상 유도전동기는 효율이 낮고 제어성이 떨어지기 때문에 이를 대체할 수 있는 전동기로 단상 SRM이 제시되고 있다. 본 논문에서는 일반적인 전동기 설계와 다상 SRM 설계를 기반으로 회전자 형상에 따른 단상 SRM의 설계 및 특성을 제시하고자 한다.

Abstract The single phase switched reluctance motor has simple, robust structure and economical drive system. So, it is useful to apply in the industrial and home applied machines. Especially, the single phase induction motor, used much in field, has a low efficiency and control ability. For the replacement of it, the single phase SRM is presented. In this paper, the design and characteristics of single phase SRM considering the rotor shape will be presented in the base of general electric motor design method and poly phase SRM design method.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Single phase SRM

1. 서론

여자 에너지를 고정자에 인가하여 형성되는 자기회로의 자기저항이 최소가 되는 위치로 회전자를 이동시키는 구동원리를 갖는 스위치드 릴럭턴스 모터(Switched Reluctance Motor; SRM)은 기계적 구조가 간단하고 견고하며, 구동 및 제어장치가 간단한 장점을 갖고 있다[1].

SRM의 제어 성능은 주로 전동기의 자기회로 구성과 구동전원 컨버터의 성능에 의해 결정된다. 특히 SRM의 토크는 상전류의 제곱에 비례하고, 전류의 극성과는 무관하므로 상전류를 공급하는 전력변환기는 단일방향이 되어도 무관하다. 그리고 상전류는 트랜지스터나 사이리스터와 같은 스위칭 소자에 의해 한 방향의 전류만 on/off 하면 되므로 양방향 변환기에 비해 스위칭 소자 수와 제어장치를 줄일 수 있어 구조가 간단하므로 다른 전동기의 제어장치 보다 경제적이다[2,3].

본 연구에서는 유체부하 구동용 송풍기에 적합하고 형

태 및 설계치수의 변형 자유도가 타전동기에 비해 높으며 다상 SRM에 비해서도 체적당 에너지 밀도가 높은 고효율 단상 SRM을 개발하여 공장이나 대형 건물의 환풍기, 발전소내 기기 냉각용으로 많이 사용되는 220[V], 1-5[kW]급 단상 유도전동기를 대체하고자 한다. 이를 위해 일반적인 전기기기 설계이론과 다상 SRM의 설계 이론을 기반으로 단상 SRM의 설계이론을 정리하고 부하특성과 사용용량에 적합한 단상 SRM을 설계 제작하여 특성을 실험하고자 한다.

2. 송풍기용 단상 SRM의 설계

2.1 단상 SRM의 설계 과정

전기에너지 변환기기를 설계할 때에는 출력, 극수, 상수, 회전자 및 고정자의 구조, 부하 특성에 따라 요구되는 사항에 적응할 수 있게 하여야 한다. 또한 설계 과정에서

*교신저자 : 박진홍(jhpark@hj.ac.kr)

접수일 10년 09월 13일

수정일 10년 10월 14일

게재확정일 10년 11월 19일

최적 설계를 위해서는 설계자의 경험도 중요하다.

단상 SRM은 다상 SRM에 비해 상당 스위치 소자의 수를 줄일 수 있어 경제성이 있으며, 자속경로가 짧아 효율을 높일 수 있다. 하지만 회전자가 특정 위치에 있을 때 기동토크가 발생하지 않아 별도의 기동장치도 필요하다. 그러므로 항상 단상 SRM의 설계시 기동장치를 고려한 설계사양을 설정하여야 한다[1,2].

일반 전기기기의 설계에서 고정자 내경, 적층길이, 회전속도, 출력에 대한 전기장하 및 자기장하의 곱으로 나타내는 출력방정식을 이용하면 체계적인 설계과정을 얻어 낼 수 있다. 그러나 SRM은 일반 범용 전동기와 토크 발생 원리가 다르기 때문에 이를 고려한 설계 이론을 적용하되 출력방정식을 유도할 때도 SRM의 특성을 고려하여 한다. 일반적인 전동기의 출력방정식은 식(1)과 같다.

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

$$= K_T B A V$$

여기서, K_p : 출력 계수

B : 자기 장하

A : 전기 장하

$$V = \frac{D^2}{4} L$$

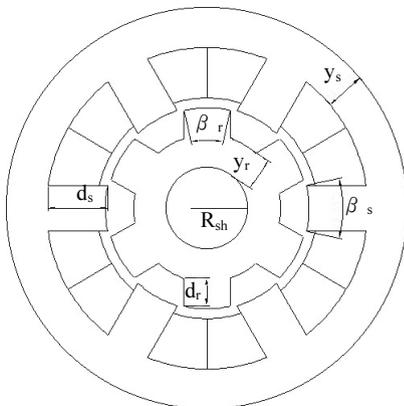
$$K_T = K_p \frac{N}{4}$$

D : 회전자 직경

L : 회전자의 축방향 길이

N : 회전자의 회전 속도

토크 T의 식 (1)은 전기장하 A와 자기장하 B의 곱과 회전자의 체적 V에 비례한다.



[그림 1] 6/6극 단상 SRM의 단면도

그림 1은 고정자와 회전자의 극수가 6개인 단상 SRM의 단순화한 단면도이다. 단상 SRM의 장점은 사용목적이나 부하 특성에 따라 다양한 형태로 설계 제작이 가능하다는 것이다. 고정자와 회전자의 극수를 달리 하고, 순차적으로 각 상을 여자하여 자기 기동이 가능한 단상 SRM과는 달리 고정자와 회전자의 극수가 같고 고정자극 모두의 권선이 동시에 여자되기 때문에 회전자가 고정자와 정렬된 위치나 반정렬된 위치에 정지해 있으면 기동할 수 없다. 그래서 회전자가 기동할 수 있는 위치에 정지하도록 별도의 영구자석이나 전자석을 설치하거나 회전자 극호의 일부를 변경하여 기동할 수 있게 하여야 한다.

운전 속도 범위가 넓은 SRM은 주로 가변속 구동장치로 사용되기 때문에 기존 속도에서 정격 출력과 정격 토크를 얻을 수 있다. 일반 회전기기의 장하분배법 이론에서 고정자의 축방향 길이와 회전자 직경과의 관계 식(2)와 식(1)에서 출력방정식 (3)을 구할 수 있다.[4]

$$L = k \cdot D \quad (2)$$

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

따라서, 회전자 직경 D는 정격속도 N, 전기장하 A, 자기장하 B 등의 값으로 결정할 수 있으며, 식 (2)의 k값은 전동기의 부하 특성, 공간적인 제한 사항 등을 고려하여 선정하게 된다[4].

SRM의 공극 길이 g는 토크를 최대화하고, 소음과 진동을 줄이기 위해 작게 하는데 보통은 회전자 직경의 0.5[%]정도에서 선정하고 제작시 기술상의 문제점 등을 고려하여 적절한 값을 선정한다[4].

SRM의 고정자 권선의 권선수(N_{ph})는 전기장하 A를 나타내는 식(4)로 구해진다[4].

$$A = \frac{2 \cdot N_{ph} \cdot i \cdot m}{\pi D} \quad (4)$$

여기서, m은 상수이다.

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 등을 고려하여야 한다.

이밖에도 고정자 및 회전자의 극호 β_s , β_r 를 선정할 후 회전자 반경이 r_1 일 때 식(5)와 식 (6)에 의해 고정자와 회전자의 극폭 t_s , t_r 를 결정한다.

$$t_s = 2(r_1 + g) \sin \frac{\beta_s}{2} \quad (5)$$

$$t_r = 2r_1 \sin \frac{\beta_r}{2} \quad (6)$$

회전자 극과 극사이의 슬롯의 깊이 d_r 을 회전자극과 고정자극이 비정렬 상태로 되었을 때 최소의 인덕턴스값을 갖도록 최소한 공극 g 의 20-30배가 되게 하고 기준값으로는 고정자극 폭의 1/2배로 한다. 다상에서는 고정자극과 극사이의 슬롯의 깊이 d_s 는 권선이 차지하는 공간 면적을 최대로 확보해야 하며 단상에서는 원통형 여자권선을 축에 수직으로 감을 수 있는 공간을 확보해야 한다. 그러므로 회전자와 고정자 슬롯의 깊이 d_r , d_s 는 식(7)과 식(8)로 한다.

$$d_r = (20 \sim 30)g = \frac{t_s}{2} \quad (7)$$

$$d_s = \frac{1}{2} \{ (D_s - D_r - 2(g + y_s)) \} \quad (8)$$

그리고, 고정자 및 회전자의 요크 두께 y_s , y_r 은 포화되지 않고 최대의 자속을 흘릴 수 있도록 선정하여야 한다.

2.2 회전자 및 고정자의 극호 β_r , β_s 설정조건

고정자와 회전자의 극수와 극호는 SRM의 자기기동, 스위칭 주파수, 최소인덕턴스와 관련한 퍼미언스의 변수이다. 단상 SRM은 별도의 기동장치를 필요로하기 때문에 극수의 조합에 의한 자기기동은 설계시 고려하지 않아도 되고만 회전속도에 대한 스위칭 주파수와 인덕턴스의 변화율을 고려해야 하는데 단상 SRM은 회전자와 고정자의 극호비가 가장 중요한 설계변수로 되어 극호에 따라 토크 발생 구간, 인덕턴스의 변화, 여자 전류의 on/off 주기 등이 결정되며 이에 따라 출력 및 제어 특성이 결정되므로 사용목적에 적합하도록 설계하여야 한다 [2].

극호 설계조건은 식 (9), 식 (10), 식(11)과 같다.

$$\beta_r, \beta_s < \frac{2\pi}{N_r} \quad (9)$$

$$\beta_r + \beta_s \leq \frac{2\pi}{N_r} \quad (10)$$

$$\beta_r = \frac{2\pi}{N_r} \quad (11)$$

여기서, N_r 은 회전자 극수, β_r 은 인덕턴스 변화 주기 각이다.

식(10)은 비정렬위치에서의 인덕턴스를 결정하는 조건으로 극호의 크기가 인덕턴스의 변화주기보다 크면 비정렬위치에서의 인덕턴스가 크게 나타난다. 식(9), (10), (11)은 인덕턴스의 변화율, 최소 인덕턴스 구간, 최대 인덕턴스 구간(휴지구간) 등을 결정하는 조건이 된다.

3. 단상 SRM의 특성 해석

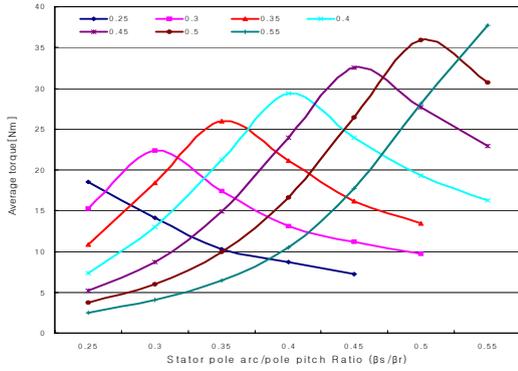
사용되는 부하기체의 종류와 송풍기 회전체의 종류에 따라 결정되는 회전속도에 적합한 송풍기용 단상 SRM의 설계사양을 앞장에서 제시한 단상 SRM의 설계이론을 적용하여 산정해 나타낸 것이 표1이다[6].

[표 1] 송풍기 구동용 단상 SRM의 주요 설계 사양

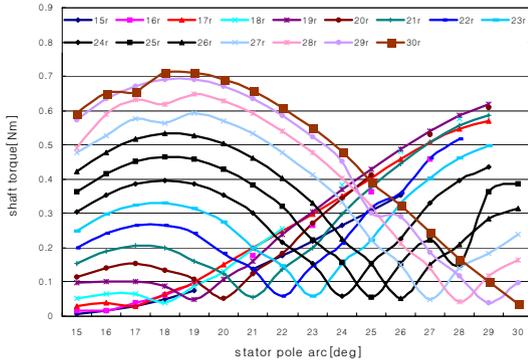
설계 요소	단위	기호	설계값
출력	kW	P	0.75
회전자 체적당 토크	kNm/m ³	TRV	15
회전자 지름에 대한 stack 길이의 비		L _{stk} /D _r	1
회전자 극수	No.	N _r	6
고정자 극수	No.	N _s	6
DC 공급 전압	V	V _s	100
상수	No.	m	1
정격 회전 속도	rpm	n	1800
철심 재질		N _p	S18

특성 해석에 사용된 소프트웨어 PC-SRD에 요구사양과 해석조건 등을 입력하여 전류패턴, 인덕턴스특성, 토크 등의 특성값을 얻었다.

해석결과 단상 SRM의 평균토크는 고정자와 회전자의 극호비에 대한 고정자 극호대 극피치의 비와 입력 전류에 의해 결정됨을 확인하였다. 또한 그림 2는 입력전류가 5[A]일 때 고정자와 회전자의 극호대극피치의 비에 따른 평균토크의 변화를 나타낸 것이다. 해석결과 단상 SRM은 대부분 그림4와 같이 고정자와 회전자의 극호비를 같게 하였을 때 평균토크 값이 가장 크게 나타났고, 고정자 극호가 회전자극호보다 큰 경우에는 평균토크가 감소됨을 확인하였다. 고정자와 회전자의 극호대극피치의 비 (β_s/β_r , β_r/β_r)가 각각 0.4에서 0.5의 범위에서 가장 좋은 특성을 보임을 확인하였다.



[그림 2] 극호비에 대한 평균 토크

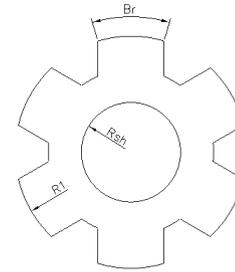


[그림 3] 동적 해석에 의한 극호 대 토크 변화

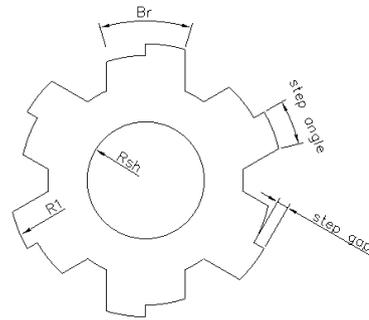
그림 3은 고정자와 회전자의 극호 값에 따른 토크 변화를 동적 해석으로 구한 것이다. 고정자 극과 회전자 극이 서로 만나기 시작하여 인덕턴스가 상승하는 시점에서 턴온 시키고 서로 떨어지기 시작하여 인덕턴스가 감소하는 시점에서 턴오프 시켰다. 고정자 극과 회전자 극을 15°에서 30°까지 변화시키면서 토크 변화를 구하였다. 해석 결과 정특성 해석과는 달리 턴온, 턴오프 각에 의해 토크 값이 결정되며 극호 값이 동일할 때 감소됨을 알 수 있다. 그리고 고정자와 회전자의 극호 값이 클수록 토크가 증가되지만 제작시 구조적인 한계와 무엇보다 정렬 위치와 비정렬 위치에서 인덕턴스 변화율을 고려하여야 한다.

단상 SRM은 일반적으로 고정자와 회전자의 극수를 같게 구성하고 단상 스위칭 여자 전원에 의해 모든 고정자 극이 동시에 여자되기 때문에 불연속적인 토크가 발생하게 되어 토크 리플이 발생할 수밖에 없다. 그리고 단상 SRM의 토크 리플은 회전 속도에 따라 다르므로 운전 조건을 고려해야 한다. 토크 변화가 회전 속도에 큰 영향

을 주는 저속 운전시 토크 리플이 가장 크고 고속 운전시에는 회전자의 관성이 속도 변화와 진동에 영향을 미쳐 토크 변화가 감소하게 된다[5]. 본 논문에서는 그림 4와 같이 회전자의 극면에 스텝을 내어 운전시 회전자 극의 위치 변화에 따른 자속 변화를 크게 하여 토크 특성을 개선하고 회전자 극면의 스텝 변화에 따른 토크 리플 변화를 유한 요소 해석을 통해 구하였다. 그림 4(a)는 일반회전자 극면을 갖는 형상이고 그림 4(b)는 회전자 극면에 회전자 극호의 중앙을 중심으로 비대칭적으로 스텝을 만든 경우이다.

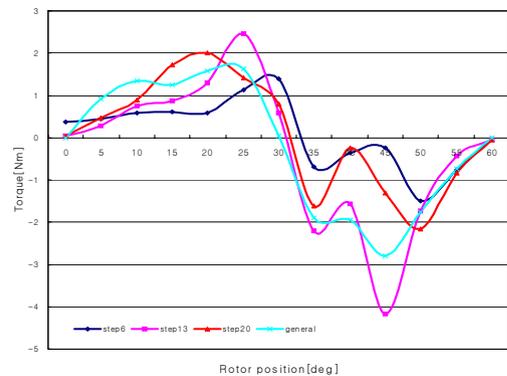


(a) 일반 회전자형



(b) 회전자 극면에 비대칭 스텝을 낸 경우

[그림 4] 극면 형상에 따른 회전자 형상

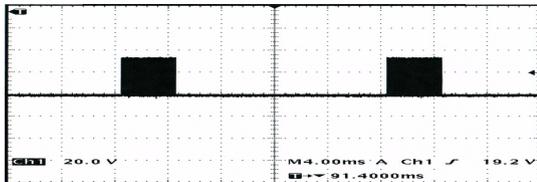


[그림 5] 스텝각에 따른 회전자 위치 대 토크 변화 곡선

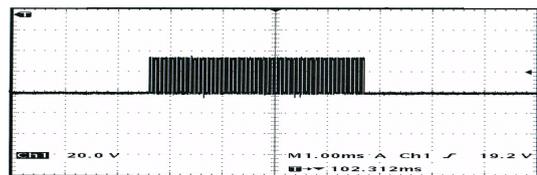
그림 5는 비대칭 스텝형 회전자의 스텝각과 위치에 따른 토크 변화를 나타낸 것이다. 일반형 회전자를 갖는 단상 SRM은 토크 변화가 거의 정현적인 것에 비해 스텝형 회전자를 갖는 경우는 정렬 위치 부근에서 토크 변화가 크게 일어나고 스텝각이 회전자 극호의 1/2 정도에서 일반형 회전자에 비해 크게 나타남을 알 수 있다. 또한 스텝각의 변화가 클수록 토크 변화가 역방향 토크 영역에서의 토크 변화가 감소됨을 알 수 있다. 이를 통해 구동 회로의 턴온, 턴오프 각을 선정할 때 중요한 자료가 될 수 있다.

4. 실험 및 고찰

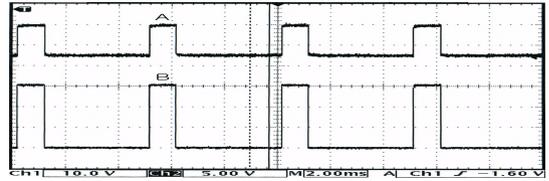
회전자 형상에 따른 특성을 확인하기 위해 일반형 회전자와 비대칭 스텝면을 갖는 회전자에 대해 속도 특성을 실험하였다. 일반형 회전자는 고정자 극호와 회전자 극호가 각각 25°, 26°이고 비대칭 스텝형 회전자는 고정자 극호와 회전자 극호는 일반형 회전자와 동일하며 회전자 극면에 13°의 스텝각과 0.5[mm]의 스텝갭을 갖는다. 그림 6은 엔코더로 회전자 위치를 읽어 비대칭 브리지 컨버터의 스위칭 소자를 턴온, 턴오프 시키기 위한 게이트 신호이다. 그림 6(a), 6(b)는 초기 기동시에는 전류를 제한하기 위해 PWM 신호로 변조한 게이트 신호이고 일정 속도 이후에는 각도 제어법을 적용하기 위해 그림 6(c)의 단일 펄스 형태인 게이트 신호를 입력하였다.



(a) PWM형태의 게이트 신호



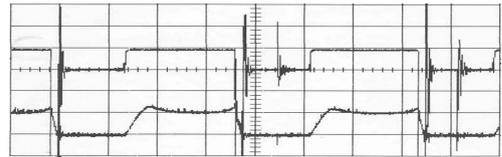
(b) 세부적인 PWM 신호



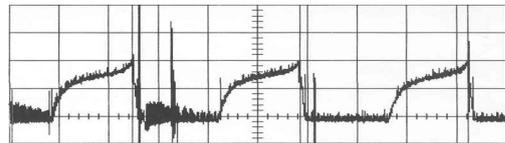
(c) 단일 펄스의 게이트 신호

[그림 6] 비대칭 브리지 컨버터의 게이트 신호

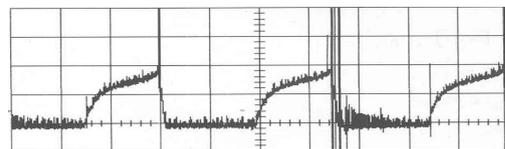
그림 7은 단상 SRM 권선의 양단 전압과 전류파형을 나타낸 것이다. 그림 8은 구동 회로의 턴온, 턴오프 제한 구간을 -3°~25°을 했을 때 회전자 형상에 따른 전류 파형이다. 화면의 X축 눈금은 2[ms/div], Y축 눈금은 1[A/div]을 나타낸다. 비대칭 브리지 컨버터 회로에서 도통각이 -4° ~ 26°일때 회로가 턴오프(26°)된 후 역기전력에 의한 여자 전류가 48°까지 흐르는 것을 확인하였다. 이로 인해 인덕턴스가 감소하는 구간에서 전류가 공급되어 역방향 토크를 발생시켜 속도를 저감하게 된다. 또한 도통각을 변화시키면서 전류 파형을 관측한 결과 턴오프시 전류 하강각이 길게 나타나서 전체적인 속도 저하가 나타남을 확인하였다. 이런 문제점을 해결하기 위해 스위칭 오프시 전류를 빠르게 환류할 수 있는 적절한 프리휠링 다이오드를 설치할 필요가 있다.



[그림 7] 전류 및 전압 파형



(a) 스텝형 회전자

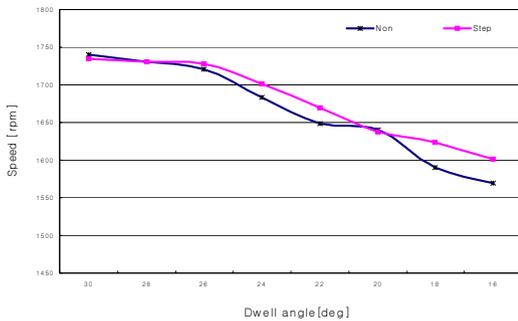


(b) 일반형 회전자

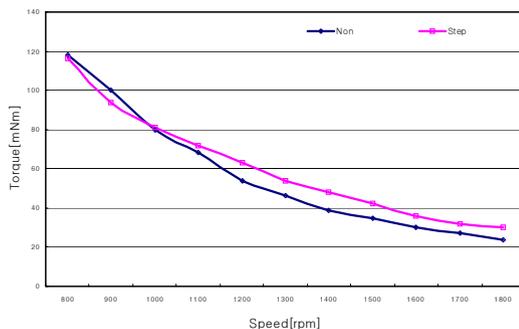
[그림 8] 도통각 -3°~25° 일때 전류 파형

그림 9는 도통각 변화에 따른 무부하 속도 변화를 나타낸 것이다. 여자전류 입력이 가장 많은 도통각 $-4[^\circ] \sim 26[^\circ]$ 에서의 속도가 가장 빠르고 여자전류 입력이 가장 적은 도통각 $3[^\circ] \sim 19[^\circ]$ 에서 가장 느렸다. 일반형 회전자자의 경우 도통각이 가장 많을 때 $1740[\text{rpm}]$ 이고 스텝면을 갖는 회전자자의 경우 $1735[\text{rpm}]$ 으로 일반형 회전자자의 속도가 약간 빠른 것으로 나타났다. 스텝면을 갖는 회전자자의 경우는 도통각 변화에 따른 속도 변화가 일반형 회전자에 비해 낮게 나타났다. 또한 전체적으로 속도가 정격 속도에 이르지 못한 것은 여자 전류를 턴오프 하였을 때 여자전류의 하강속도가 느리고 이는 빠르게 환류를 시키지 못한 것으로 해석된다. 또한 여자전류의 파형이 이상적인 플랫폼(plat top)형태를 갖지 못하고 거의 삼각형에 가까운 파형을 나타냈다. 이는 충분한 여자전류가 권선에 흐르기 전에 스위치가 오프되는 것으로 해석된다.

그림 10은 회전자 속도 대 토크 특성 곡선이다. 속도가 증가함에 따라 토크가 감소하여 직류 직권 전동기와 비슷한 특성을 보였다. 일반형 회전자에 비해 스텝각을 갖는 회전자자의 토크가 운전 속도 범위에서 크게 나타났고 속도 변화에 따른 토크 변화도 적게 나타났다.



[그림 9] 도통각에 따른 무부하 속도 곡선



[그림 10] 속도 대 토크 특성 곡선

5. 결론

지효율 및 제어의 어려움 등의 문제점이 있는 송풍기용 단상유도전동기의 대체용으로 단상 SRM을 개발하기 위해 설계 이론과 주요 설계 변수를 산정하는 설계 조건을 제시하였다. 기존의 전기기기 설계 이론과 다상 SRM의 설계이론을 참조하여 송풍기용 전동기의 부하특성에 적합한 단상 SRM의 설계이론을 정립하여 단상 SRM의 설계사양을 산정하였으며, 설계과정을 제시하였다. 또한 단상 SRM의 고정자와 회전자자의 극호비가 토크 변화와 리플에 미치는 영향을 규명하였다. 단상 SRM의 평균토크는 입력전류와 고정자 및 회전자자의 극호 대 극피치의 비와 상관관계가 있으며 거의 고정자와 회전자자의 극호가 같을 때 최대 토크가 발생함을 확인했다. 또한 고정자와 회전자자의 극호가 커질수록 토크 리플이 커짐을 확인하였다. 또한 시작기와 제어 회로를 결합하여 단상 SRM의 특성을 실험하여 도통각에 따른 속도 특성을 구하였다. 설계 과정에서 제시한 회전자 형상에 따른 특성을 확인하기 위해 일반형 회전자와 회전자 극면에 비대칭 스텝각을 갖는 회전자에 대해 속도 대 토크 특성을 구하였다.

본 연구결과를 바탕으로 최적의 설계 변수를 갖는 송풍기 구동용 단상 SRM을 개발하면 효율이 낮고 제어가 어려운 단상유도전동기의 대체할 수 있을 것으로 기대된다.

참고문헌

- [1] R.Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives, Modeling, Simulation, Analysis, Design and Applications", CRC Press, 2001.
- [2] T.J.E.Miller, "Switched reluctance motor and Their Control", Magna Physics Publishing, Oxford, 1993.
- [3] R.Krishnan, et al., "Design Procedure for Switched Reluctance Motors", IEEE Trans. on IA., Vol.24, No.3, pp.456-457, May, 1988.
- [4] Jong-Han Lee, Eun-Woong Lee, Jun-Ho Kim, Dong-Ju Lee, "Design of the Single Phase SRM considering the torque ripple", IEEE PEDS 2005(Kuala Lumpur Malaysia), pp.1171-1176, 2005.11.
- [5] Young Woong Oh, Eun Woong Lee, Jong Han Lee, Jun Ho Kim, "Construction and Characteristics of Single Phase Switched Reluctance Motor", KIEE International Trans, on EMECS, Vol.4B, No.1, pp.6-11, 2004.1.
- [6] Jong Han Lee, Eun Woong Lee, Yong Heon Kim,

“Design of Single Phase SRM for Blower Considering the Pole Arc” ICEE2004(Sapporo Japan), Vol. I pp.236-240, July 4~8 2004.

박 진 흥(Jin-Hong Park)

[정회원]



- 1993년 2월 : 광운대학교 전자공학 학과 (전자공학석사)
- 1997년 2월 : 광운대학교 전자공학 학과 (전자공학박사)
- 1999년 3월 ~ 현재 : 혜전대학 전자캐드과 부교수

<관심분야>

전력전자, PCB설계 및 분석

이 종 한(Han-Jong Lee)

[정회원]



- 1998년 2월 : 충남대학교 전기공학 교육과 (교육학석사)
- 2009년 2월 : 충남대학교 전기공학 교육과 (교육학박사)
- 1993년 3월 ~ 현재 : 예산전자공업고등학교 교사

<관심분야>

전력전자, 전기공학