

송풍기 구동용 단상 SRM의 극호 설계 조건

이종한*, 이은웅
충남대학교

The Design Conditions of Single Phase SRM Pole-Arcs for Blower Drives

Jong-Han Lee*, Eun-Woong Lee
Chungnam National University

Abstract - The single phase switched reluctance motor(SRM) is more simpler and robust in the structure than poly phase SRM. It has the merits that it reduces the switching elements and the energy density per volume is very high. Recently, it has been researched and developed in various types and starting method due to the technique of power electronics and the computer added design. The single phase SRM is tried to apply to many industrial appliance field to substitute the induction motor by the single phase SRM.

On the previous studies, we decided the design parameters of the single phase SRM for the blower driver to adapt the design method of the conventional machine and the poly phase SRM.

In this studies, it is proposed the conditions to decide the optimal pole arcs because the stator and rotor pole arcs is very important in the characteristics of the single phase SRM. For this reason, it is analysed the characteristics of current on/off angle vs. pole arc, pole arcs vs. average torque.

1. 서 론

단상 스위치드 리럭턴스 모터(SRM)은 다상 SRM에 비해 구조적으로 간단하고, 견고하며, 스위칭 소자의 수를 줄일 수 있을 뿐 아니라 단위 체적당 에너지 밀도가 높다는 장점을 갖고 있다. 최근 기동시의 문제점을 구조적으로 해결함과 동시에 전력전자 기술의 발달과 컴퓨터를 이용한 해석 및 설계 기술의 발달에 힘입어 활발하게 다양한 종류와 형태로 연구 개발되고 있으며 여러 산업 분야에 구동용으로 사용되고 있는 유도전동기의 대체용으로 적용하고자 하는 연구가 시도되고 있다. [1]

SRM의 설계파라미터 중 구동 특성에 가장 많은 영향을 끼치는 것은 고정자와 회전자극의 극호이다. 고정자극호 β_s 와 회전자극호 β_r 에 따라 인덕턴스 프로파일의 결정되고 이로 인해 평균토크 및 토크 리플 등에 영향을 받게 되며 또한 구동을 위한 스위칭 각 결정의 기준이 된다. 그러므로, 설계시 최적의 극호비 설정은 고정자극과 회전자극의 극호값에 따른 평균토크, 토크 리플 등의 상관관계를 고려하여 결정해야 한다. 또한 구조적인 극호값 뿐만 아니라 전기적인 스위칭 on/off 각을 고려하여 설계하여야 한다. [3]

단상 SRM을 송풍기 구동용으로 개발하기 위해 선행 연구에서 일반 회전자와 다상 SRM의 설계 이론을 참고하여 설계 파라미터를 선정하였다. [2][3]

본 연구에서는 단상 SRM의 특성에 가장 중요한 영향을 미치는 최적의 극호값을 선정하기 위해 극호 변화에 따른 평균토크 특성 변화와 전류의 온-오프각을 고려한 극호 선정 조건 등을 제시하고자 한다.

2. 단상 SRM의 구조 및 설계 조건

일반적으로 유체부하를 다루는 팬용 송풍기나 펌프용 전동기는 부하의 토크 특성이 속도의 2제곱에 비례한다. 이렇게 유체 부하들은 운전시 급격한 부하 변동이 적고 큰 기동토크를 필요로 하지 않기 때문에 단상 유도전동기가 주로 사용되고 있지만, 단상 유도전동기는 효율이 낮기 때문에 본 연구팀은 이를 대체하기 위해 단상 SRM을 개발하고 있다.

송풍기 구동용 단상 SRM의 설계시 기존의 전기기기 설계 이론과 다상 SRM의 설계 이론을 참조하여 표1의 설계 파라미터를 산정하고 이에 따른 세부 설계사양을 결정짓는 과정을 수행하였다. [2]

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

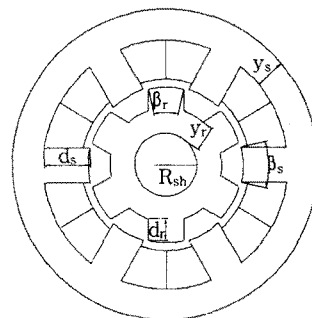


그림1. 6/6극 단상 SRM의 단면도

단상 SRM에서 가장 중요한 설계 파라미터가 그림 1의 회전자와 고정자의 극호값 β_r, β_s 이다. 다른 전동기와는 달리 단상 SRM은 극수 및 극호비에 따라 인덕턴스의 변화가 결정되고 이로 인해 토크 발생구간 및 여자전류의 주기가 바뀌게 되고 또한 출력 및 제어 특성이 결정된다. 그러므로 사용 목적에 적합하도록 정확한 선정 과정을 통해 극호값을 결정하여야 한다. [3]

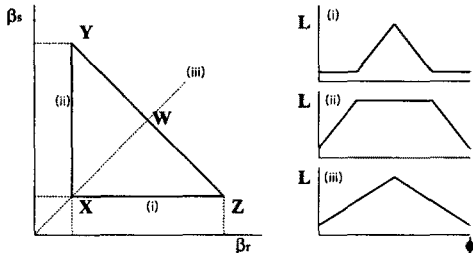
SRM의 설계시 고정자와 회전자 극호를 설정할 때 가장 중요한 요건으로는 자기 기동 능력(self-starting)과 회전자극의 위치에 대한 토크 특성이다. 특히, 단상 SRM은 정렬된 위치에 회전자가 정지하고 있다면 기동 토크를 발생시킬 수 없기 때문에 고정자와 회전자의 극수를 다르게 조합하여 기동능력을 만드는 다상 SRM과는 달리 영구자석이나 전자석과 같은 별도의 기동장치를 사용하거나 회전자의 형태를 변형하여 기동할 수 있도록 한다. 그러므로 기동장치를 부착한다면 단상 SRM의 설계과정에서는 기동능력을 고려한 극호 설계과정은 생략할 수 있다. 또한 SRM은 회전자 위치에 대한 에너지 변화율로 토크를 얻기 때문에 회전자와 고정자의 극호값에 따라 발생하는 토크의 값이 다르게 된다. 그러므로 평균토크가 가장 큰 경우의 고정자극과 회전자극호비를 찾아야 한다.

3. 극호와 평균 토크

3.1 극호와 평균토크

표1의 설계 사양을 근거로 설정 가능한 극호값을 도식적으로 표현하면 그림 2와 같다. 그리고, 그림 2(b)는 그림 2(a)에서 삼각형 XYZ 영역으로 정해진 극호 β_s, β_r 의 값에 따른 인덕턴스의 변화를 나타낸 것이다.

고정자극과 회전자극이 X점에서의 극호값을 갖게 되면 그림 2(b)의 (i)과 같고, 기기의 철사용량이 최소가 된다. 점Y와 점Z 방향으로 갈수록 휴지 구간(dead zone)이 발생되고, 이 구간에서는 입력전류가 인가되어도 토크를 발생되지 않지만 입력전류를 off한 후에 발생하는 부토크의 발생을 억제하기 위해 약간의 구간을 유지하기도 한다. 점 Y는 기기의 권선공간이 전혀 없는 경우이고, 점Z는 권선공간이 최대가 된다.



(a) 고정자극호와 회전자 극호와의 관계
(b) 극호에 따른 인덕턴스 변화
그림 2. 고정자 및 회전자 극호의 상관 관계

단상 SRM의 평균토크는 그림 3과 같이 회전자 위치 변화에 따른 쇠교자속 대 전류의 자화곡선을 이용하여 계산할 수 있다. 일정한 입력 전류가 회전자의 비정렬 위치에서 정렬 위치까지 인가되고 있을 때, 각 에너지 변환 주기에서 기계적으로 변환된 에너지를 δW_m 이라 할 때 이 값은 식 (1)와 같다.[3]

$$\delta W_m = W_m'_{aligned} - W_m'_{unaligned} = \Delta i \left(\lambda_1 + \lambda_2 + \dots + \frac{1}{2} \lambda_n \right) - \frac{1}{2} \lambda_n \times I_p \quad (1)$$

여기서, $\Delta i = \frac{i_p}{n}$, I_p 는 정렬위치와 비정렬위치에서 권선에 인가된 일정 전류값이다.

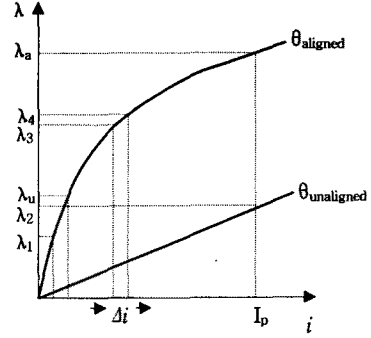


그림 3. 정렬위치와 회전자 위치에 대한 자화곡선

단상 여자 방식에 의해 고정자극 모두가 동시에 여자될 때 1 회전당 발생하는 에너지 변환 주기는 (고정자극수 N_s) \times (회전자극수 N_r)개가 된다. 그러므로, 1 회전당 발생하는 평균토크는 식(2)와 같다.

$$T_{ave} = \frac{\partial W'}{\partial \theta} = (W'_{aligned} - W'_{unaligned}) \times \frac{N_s \times N_r}{2\pi} \quad (2)$$

여기서, $W'_{aligned}$: 정렬시 자기수반에너지
 $W'_{unaligned}$: 비정렬시 자기수반에너지
 N_s, N_r : 각각 고정자와 회전자의 극수

그림 4는 입력전류 I_p 가 5[A]일 때 고정자와 회전자극호값에 대한 평균토크 T_{av} 의 변화를 나타낸 것이다. 단상 SRM의 평균토크는 고정자와 회전자의 극호값과 입력 전류에 의해 결정됨을 알 수 있으며, 해석결과 단상 SRM은 대부분 그림 4와 같이 고정자와 회전자극호의 극호비를 같게 하였을 때 평균토크 값이 가장 크게 나타났고, $\beta_s < \beta_r$ 인 경우 $\beta_s > \beta_r$ 보다 평균토크 값이 더 큼을 확인할 수 있다.

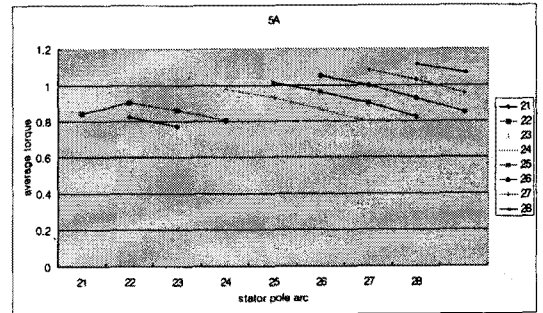


그림 4. 고정자 및 회전자의 극호값변화에 따른 평균토크

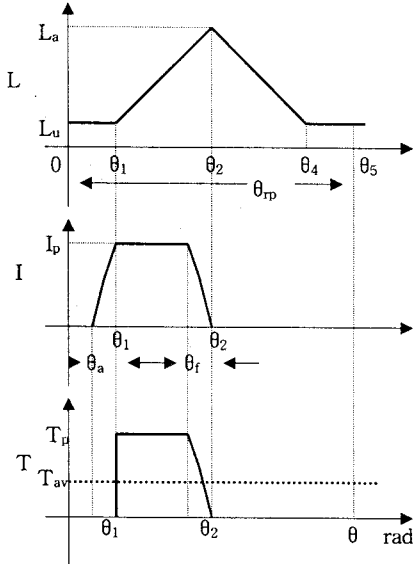
4. 스위칭 각과 극호와의 관계

일반적으로 회전자와 고정자의 극호 β_r, β_s 사이에는 식(3)과 같은 관계가 성립된다.

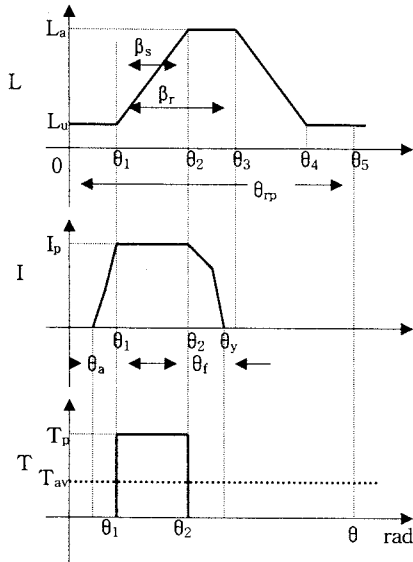
$$\beta_r \geq \beta_s \quad (3)$$

하지만 회전자의 극호 β_r 이 고정자의 극호 β_s 에 비해 훨씬 큰 경우 이상적으로 전류를 턴 오프하더라도 토크 발생에 있어 큰 이득이 없고 오히려 철심의 체적과 무게를 증가시키게 된다. 또한 앞장의 해석결과에서처럼 턴 온/오프를 고려하지 않고 구조적인 극호값만을 고려하여 평균토크를 구한다면 고정자극과 회전자극의 극호를 같게 하였을 때 최대 평균토크를 얻는다. 하지만 그림 5(a)에서처럼 이상적으로 전류의 턴오프 동작이 이

루어지는 것은 불가능하고 실제 턴오프시 상당히 큰 스위칭 전류가 발생하게 된다. 그러므로 보통은 인덕턴스가 증가하는 구간에서 토오크를 발생시키기 위해 회전자극이 완전히 정렬위치에 도달하기 전에 전류를 오프시킨다. 인덕턴스가 증가하는 구간이후에도 계속해서 전류가 흐른다면 고정자와 회전자의 극호가 같은 경우에는 기울기가 0이 되는 영역(dead zone)이 없기 때문에 부토오크가 발생하게 되며 이로 인해 평균토오크가 감소하게 된다. 그러므로 고정자극호보다 회전자 극호를 약간 크게 하는 것이 부토오크의 발생을 제거하고 토오크 리플과 소음을 줄이는데 도움이 된다.



(a) $\beta_r = \beta_s$



(b) $\beta_r > \beta_s$

그림 5. 턴오프각과 극호에 따른 토오크 변화

정격운전조건에서 전류의 하강각을 θ_{fr} 이라고 하면 회전자 극호 β_r 에 대한 최대값은 식 (4)와 같다.

$$\beta_r = \beta_s + \theta_{fr} \quad (4)$$

식 (4)의 조건하에서 최대 토오크 발생이 가능하고 단위 전류값에 대한 효율 및 최대 토오크를 최적화할 수 있다. 전류의 하강각 θ_{fr} 은 식 (5)와 같이 구할 수 있다.

$$\begin{aligned} \theta_{fr} &= \omega_{mr} T_f = [\omega_{mr} \tau_a] \ln \left\{ 1 + \frac{R_s I_p}{V_{dc}} \right\} \\ &= [\tan \gamma] \ln \left\{ 1 + \frac{R_s I_p}{V_{dc}} \right\} \end{aligned} \quad (5)$$

여기서, ω_{mr} : 정격속도

τ_a : 정렬시 시상수

R_s : 상권선의 저항

I_p : 상전류의 peak 값

V_{dc} : DC 링크 전압

γ : 정렬시 임피던스각

그러므로 회전자극의 극호값 범위는 식 (6)이 된다.

$$\beta_s \leq \beta_r \leq (\beta_s + \theta_{fr}) \quad (6)$$

그림 6은 고정자 극호 β_s 를 25로 하고 회전자의 극호 β_r 를 변화시킬 때 턴 오프각에 따른 토오크변화를 나타낸 것이다.

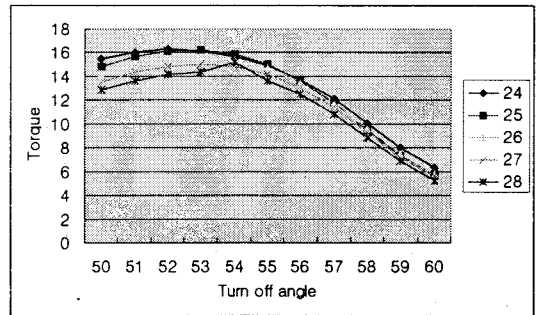


그림 6. 극호 및 턴오프각 변화에 따른 토오크 변화

3. 결 론

본 연구에서는 전력전자기술과 컴퓨터를 이용한 설계 기술을 적용하여 구조 및 경제적으로 많은 장점을 갖는 단상 SRM을 기존의 단상 유도전동기의 대체용으로 개발하기 위해, 기본 설계 사양을 설정하고 회전자와 고정자극의 극호값을 선정하였다. 그리고 단상 SRM의 설계에 있어 극호값의 구조적인 요소만을 고려하여서는 안되고 반드시 전류의 턴 온/오프각을 함께 고려하여야 함을 확인하였다.

앞으로는 정확한 극호값의 선정조건을 바탕으로 설계파라미터를 선정하고 이에 대한 정확한 특성을 예측하여 실제 제작에 앞서 최적의 설계파라미터를 선정하여야 할 것이다

[참 고 문 헌]

- [1] Miller T.J., "Switched Reluctance Motors and their control", Magma Physics Publishing and claredon press Oxford, 1993.
- [2] 이종환 외 3명, "송풍기 구동용 단상 SRM의 이론적 설계 파라미터 선정", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.88-90, 2003
- [3] 이종환 외 2명, "극호비에 따른 단상 SRM의 토오크 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.690-692, 2003
- [4] 김준호, 이은용, 오영용, 이민명, 여상경, "회전자 돌극형 단상 SRM에서 극호와 동극 길이가 토오크에 미치는 영향", 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp. 107-109, 2001