2003년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2003.7.21-23

극호비에 따른 단상 SRM의 토오크 특성 해석

이종한*, 이은웅, 이충원
충남대학교

Characteristic Analysis of Single Phase SRM on Pole Ratio

Jong-Han Lee, Eun-Woong Lee, Chung-Won Lee
Chung Nam National University

Abstract - The single phase switched reluctance motor has been studied and developed actively in the various applications with several kinds and forms because of the developments of the design technique by using the computer and of the driving technique power electronic technology, which has the merits of a simple and robust structure, and first of all reducing the number of the switching devices in comparison with poly phase switched reluctance motor. And also, the studies are making progess to substitute the switched reluctance motor for single phase induction motor.

In the previous studies, the single phase switched reluctance motor for the drive of blower is designed with the design theory of the conventional rotating electric machine and poly phase switched reluctance motor. In this paper, we intend to select the optimal pole arc and pole pitch ratio by the FEM analysis, because the pole arc and pole pitch are very important factor to determine the characteristics of switched reluctance motor

1. 서 론

최근 산업 구조의 다양화와 함께 새로운 가변속 구동 장치로서 단상 스위치드 릴럭턴스 모터를 사용하고자 하는 연구가 활발하게 진행되고 있다. 스위치드 릴럭턴스 모터는 구조가 간단하고 견고하며 또한 여러 형태의 구조로 응용하기가 편리한 장점이 있다. 반면, 회전자와 고정자가 모두 돌극을 갖는 구조이고, 스위칭 펄스 형태의 여자전원에 의해 토오크를 얻기 때문에 토오크 리플이 크고, 소음과 진동을 동반하게 된다. 따라서, 이와 같은 단점을 보완하기 위해 모터의 설계와 구동 방법에 대한 연구가 필요하다. 최근에는 컴퓨터를 이용한 모터 설계 기술의 발달과 전력전자기술의 발달로 많은 구동방법에 대한 연구가 이루어지고 있다. [1]

스위치드 리럭턴스 모터의 특성을 결정짓는 설계파라미터 중 가장 많은 영향을 끼치는 것은 고정자와 회전자의 극호이다. 고정자극호 β_S와 회전자극호 β_r에 인덕턴스 프로파일이 결정되고 이로인해 평균토오크 및 토오크 리플 등에 영향을 받게 되며 또한 구동을 위한 스위칭 각의 기준이 된다. 그러므로, 설계시 최적의 극호비를 설정하기 위해 고정자극과 회전자극의 값에 따른 평균토오크, 토오크 리플 등의 상관관계를 고려하여 설계값을 결정해야 한다.

다상 스위치드 릴럭턴스 모터에 비해 스위칭 소자의 수가 적어 구동회로가 간단하고, 단일 스위칭 여자에 의해 고정자의 모든 극이 동시에 여자되므로 단위 체적당 에너지 이용율이 높은 장점을 갖는 단상 스위치드 릴럭턴스를 유체 부하 구동원으로 사용하기 위해 기본적인 설계파라미터를 선행연구에서 산정하였다. [2]

본 연구에서는 송풍기 구동용 단상 스위치드 리럭턴스 모터를 제작하기에 앞서 최적의 설계 파라미터를 산정하기 위해 스위치드 릴럭턴스 모터의 특성에 가장 영향이 큰 고정자극과 회전자극의 최적의 극호값을 구하고자 한다. 이를 위해 고정자극과 회전자극에 대해 여러 경우의 극호비를 선정하여 각각의 극호비에 대한 평균 토오크를 구하였고 이중에서 고정자극의 포화상태를 고려하여 최대 평균 토오크를 갖는 극호값을 구하였다.

2. 극호와 토오크와의 관계

고정자와 회전자의 극호를 설정할 때 가장 중요하 요건은 자기동(self-starting)과 회전자극의 위치에 대한 토오크 특성이다. 이러한 요건은 스위치드 릴럭턴스 모터의 가장 큰 단점인 토오크 리플과 연관이 있다. 결국 고정자와 회전자의 최적의 극호값을 구함으로써 토오크 리플을 저감시킬 수 있다.

단상 스위치드 릴럭턴스 모터는 고정자극과 회전자극이 정렬된 위치에서는 기동 토오크를 얻을 수 없기 때문에 별도의 기동장치를 사용하여야 한다. 이 때문에 본 연구에서는 극 수와 극호에 의한 자기동은 고려하지 않았고, 단지 극호비에 따른 토오크 특성만을 고려하였다.

그림 1과 표 1은 본 연구에서 적용하고자하는 단상 SRM의 구조와 설계 사양을 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

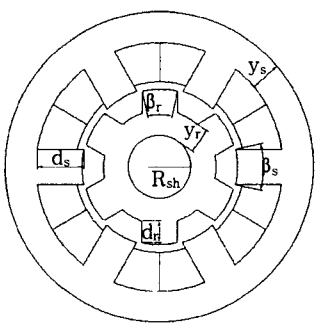


그림1. 6/6극 단상 SRM의 단면도

2.1 극호와 인덕턴스 변화

고정자 극호 βs와 회전자 극호 βr을 선정할 때 필수 조건은 식(1)-식(3)과 같다.

$$\min(\beta_r, \beta_s) > \frac{2\pi}{qN_r} \quad (1)$$

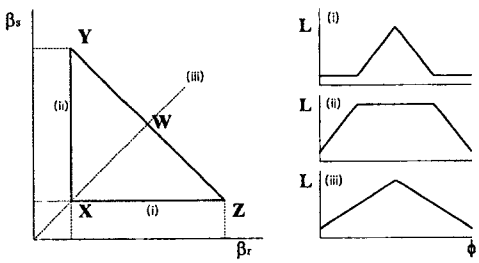
$$\beta_s \leq \tau - \beta_r \quad (2)$$

$$\tau = \frac{2\pi}{N_r} \quad (3)$$

여기서, q는 상수, Nr은 고정자 극수이다.

표1의 설계 사양을 근거로 설정 가능한 극호값은 식(1)의 조건에 의해 도식적으로 표현하면 그림 2와 같다. 그리고, 그림 2(b)는 그림 2(a)에서 삼각형 XYZ 영역으로 정해진 극호 βs,βr의 값에 따른 인덕턴스의 변화를 나타낸 것이다.

고정자극과 회전자극이 X점에서의 극호값을 갖게 되면 그림2(b)의 (i)과 같고, 기기의 철사용량이 최소가 된다. 점Y와 점Z 방향으로 갈수록 휴지 구간(dead zone)이 발생이고, dead zone에서는 입력전류가 인가되어도 토오크를 발생시키지 못하지만 입력전류를 off한 후에 발생하는 부토오크의 발생을 억제하기 위해 약간의 구간을 유지하기도 한다. 점 Y에서는 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

설계시에는 대부분 βs<βr의 범위에서 극호값을 결정하지만 회전자극호를 고정자극호에 비해 너무 크게 설정하게 되면 이상적인 전류의 on/off가 이루어진다할지라도 토오크 발생에 있어 큰 이득이 없으며, 철심의 체적과 중량을 증가시키게 된다. 그러므로 실제 설계에 있어서 회전자극호는 고정자극호에 비해 약간 크거나 거의 같게 설정한다. [3]

2.2 평균 토오크 계산

평균토오크는 그림 3과 같이 회전자 위치 변화에 따른 쇄교자속 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_m이라 할 때 이 값은 식 (4)와 같다.[4]

$$\delta W_m = W_m'_{aligned} - W_m'_{unaligned} = \Delta i\left(\lambda_1 + \lambda_2 + \cdots + \frac{1}{2}\lambda_n\right) - \frac{1}{2}\lambda_u \times I_p \quad (4)$$

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

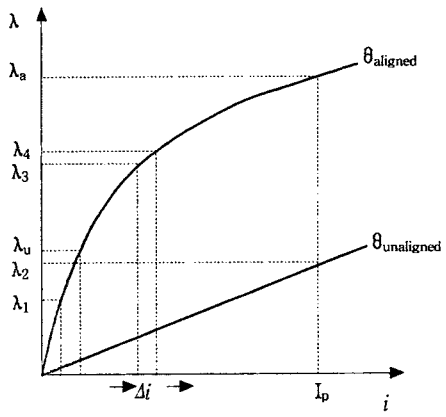


그림 3. 정렬위치와 회전자 위치에 대한 자화곡선

단상 여자 방식에 의해 고정작극 모두가 동시에 여자될 때 1 회전당 발생되는 에너지 변환 주기는 (고정자극수(Ns)×회전자극수(Nr))개가 된다. 그러므로, 1 회전당 발생되는 평균토오크는 식(5)와 같다.

$$T_{ave} = \frac{\partial W'}{\partial \theta} = (W'_{aligned} - W'_{unaligned}) \times \frac{N_s \times N_r}{2\pi} \quad (5)$$

여기서, $W'_{aligned}$:정렬시 자기수반에너지
$W'_{unaligned}$: 비정렬시 자기수반에너지
Ns, Nr : 각가 고정자와 회전자의 극수

3. 극호에 따른 특성 해석

3.1 해석 방법

본 연구에서는 고정자극호와 회전자극호의 극호비 변화에 따른 토오크 특성을 검토하기 위해 2차원 유한요소법을 적용하였다. 회전자극의 정렬위치와 비정렬 위치에 대해 자기수반에너지를 구하고, 이 두 위치의 변화에 대한 자기수반에너지의 변화를 이용하여 평균토오크를 계산하였다. 여러 경우의 고정자극화 회전자극호의 조합에 대해 입력전류를 변화시켜 최대의 평균토오크를 만드는 극호조합을 조사하였고 또한 각각의 경우에 대해 입력전류에 대한 철심의 포화상태를 고려하였다. 물론, 평균토오크에 영향을 미치는 요소로서 설계시 입력전류의 on/off 각을 고려하여야 하지만 이는 제어회로를 통해 구현할 수 있기 때문에 본 연구에서는 고려하지 않았다. 표2는 해석에 사용된 SRM의 기본 설계파라미터이다.

표 2. 해석 모델의 주요 사항

항 목	단위	기호	설계값
고정자 외경	mm	D_s	140.68
회전자 외경	mm	D_r	70.34
축방향 길이	mm	L_{stk}	70.34
공극	mm	g	0.3
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		Np	150
철심 재질		N_p	S18

최적의 극호/극피치의 비를 찾기 위해 고정자와 회전자

의 극호대극피치의 값을 0.25에서 0.55의 범위에서 각각을 조합하여 변화시키고, 입력전류의 값을 1[A]에서 12[A]의 범위에서 가변시키면서 각각의 경우에 대한 평균토오크를 계산하였다.

3.2 해석 결과

해석결과 단상 스위치드 리럭턴스의 평균토오크는 고정자와 회전자의 극호대극피치의 비와 입력 전류에 의해 결정됨을 확인하였다. 또한 그림 3은 입력전류가 5[A]일 때 고정자와 회전자의 극호대극피치의 비에 따른 평균토오크의 변화를 나타낸 것이다. 해석결과 단상 스위치드 리럭턴스 모터는 대부분 그림3과 같이 고정자와 회전자의 극호비를 같게 하였을 때 평균토오크 값이 가장 크게 나타났고, 고정자극호가 회전자극호보다 큰 경우에는 평균토오크가 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.

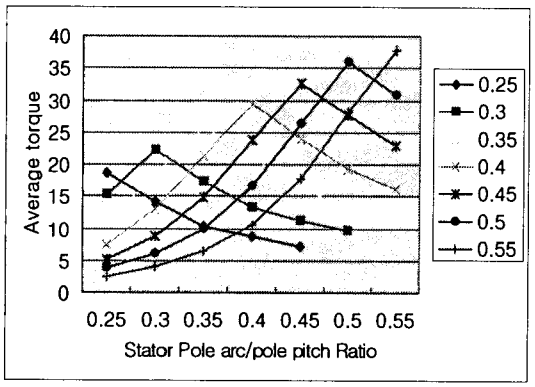


그림 3. 고정자극호와 회전자 극호에 따른 평균토오크 변화 (입력전류 5[A]일 때)

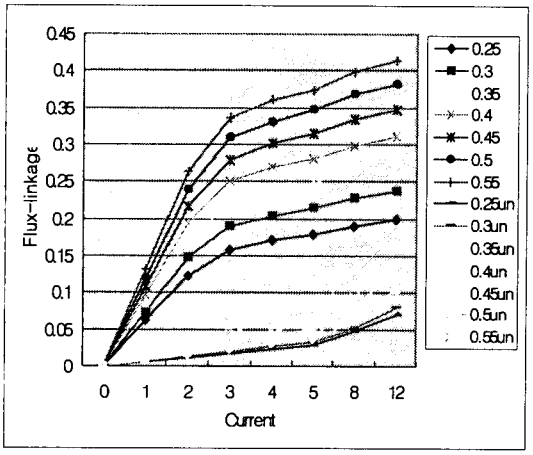


그림 4. 극호비에 따른 전류 대 쇄교자속 곡선

그림 4는 고정자극호와 회전자극호가 같은 경우($\beta_s=\beta_r$)에 각각의 극호비(β_s/β_r)에 대한 전류대 쇄교자속 곡선을 나타낸 것이다. 정렬시와 비정렬시 자화곡선으로 둘러쌓인 면적에 해당하는 양만큼 토오크로 변환이 되므로 이 면적이 가장 큰 극호비를 선택하고, 정렬위치에서 매우 큰 에너지를 갖게 하는 것도 중요하지만 비정렬위치에서 회전자를 쇄교하는 자속이 0에 가깝도록 설계하는 것도 고려하여야 한다. 그림 4에서 5[A]이상의 입력 전류의 경우, 고정자와 회전자의 극호대극피치의 비가 0.45이상인 경우는 비정렬위치에서 인접하는 두 고정자극과 회전자 극이 서로 중첩이 되어 쇄교자속의 양이 증가되어 최소 인덕턴스도 같이 증가되므로 평균토오크를 감소시킴을 알 수 있다.

그림 5는 고정자와 회전자의 극호대극피치의 비가 같을 때 입력전류에 대한 평균토오크의 변화를 나타낸 것이다.

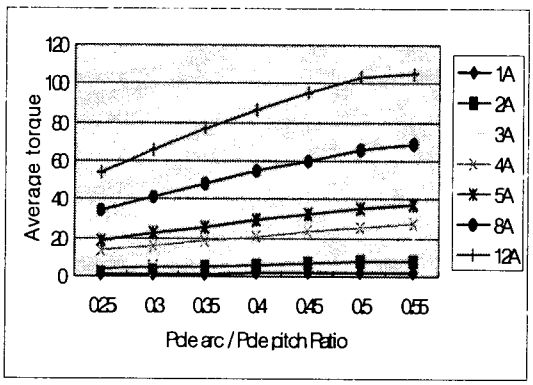


그림 5. 전류에 따른 극호대극피치의 비와 평균토오크와의 관계

4. 결 론

철심에 사용된 재질의 특성과 입력 전류를 고려하여 단상 스위치드 리럭턴스 모터의 설계에 있어 중요한 요소인 고정자 극호값과 회전자 극호값의 최적치를 구하였다.

평균토오크는 입력전류와 고정자 및 회전자의 극호대극피치의 비와 상관관계를 이루며 단상 스위치드 리럭턴스 모터는 다상 스위치드 리럭턴스 모터와 비교할 때 거의 고정자와 회전자의 극호가 같은 경우에 최대 토오크를 발생함을 알 수 있었다. 본 연구에 사용된 설계사양에서는 5[A]에서 0.45의 극호대극피치의 비에서 가장 좋은 특성을 나타냈다.

앞으로는 선정된 설계파라미터를 이용하여 정확한 특성을 예측하고 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] 이종한 외 3명, "송풍기 구동용 단상 SRM의 이론적 설계 파라미터 산정", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, pp.88-90, 2003

[3]김준호, 이은웅, 오영웅, 이민명, 여상겸, "회전자 돌극형 단상 SRM에서 극호와 동극 길이가 토오크에 미치는 영향", 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp. 107-109, 2001

[4] R.Krishnan, "Switched reluctance motor drives, modeling, simulation, analysis, design, and applicaions", CRC Rress, 2001