

스텝형 회전자 형상을 갖는 단상 SRM의 특성 해석

이종한\*, 이은웅\*\*  
 예산전자공업고등학교\*, 충남대학교\*\*

Characteristic Analysis of Single Phase SRM with stepped rotor pole

JongHan Lee, EunWoong Lee  
 Yesan Electronic Technical High Schol, Chungnam National University

**Abstract** - 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.

This paper presents a single phase SRM model with a stepped rotor pole, so as to reduce the torque ripple. Also it is simulated the designed prototype model by FEM for the prediction of characteristics.

1. 서 론

스위치드 릴럭턴스 모터(switched reluctance motor:SRM)은 구조가 간단하고 견고하며 넓은 범위의 가변속 운전 등의 장점과 최근 전력전자용 반도체 소자의 기술개발에 힘입어 산업용 기기 뿐 아니라 가전기기용으로도 많은 이용이 이루어지고 있다.

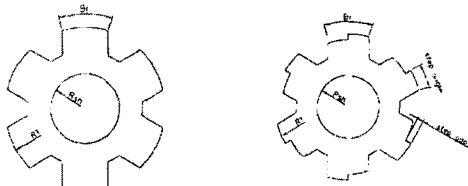
특히 단상 SRM은 다상 SRM에 비해 구조적으로 훨씬 간단하고 구동장치에 필요한 반도체 소자수가 적고, 고장도 잘 발생하지 않으며 제작비가 적은 등의 장점이 있다. 또한 자기회로를 구성하는 방법에 따라 여러 가지 형태를 자유롭게 할 수 있기 때문에 특정 목적에 적합한 전동기로 개발하는데 유리하다. 특히, 효율이 낮고 제어가 어려운 단상 유도 전동기의 단점을 보완하고 고효율 기기의 사용으로 에너지를 절약하기 새로운 전동기로 단상 SRM이 많은 주목을 받고 있다.

또한 단상 SRM은 비선형 특성을 갖고 여자전류원에 대해 포화구간에서 운전되기 때문에 특성을 예측하고 분석하는데 많은 어려움을 갖는다. 단상 SRM의 쇠교자속과 인덕턴스는 회전자 위치와 여자전류에 따라 변화하므로 단상 SRM의 비선형 특성은 전류와 회전자 위치의 함수로 정의할 수 있다. 그러므로 정확한 인덕턴스 프로파일을 구함으로서 토오크 특성 및 토오크 리플을 고려한 최적 설계가 가능하게 된다.

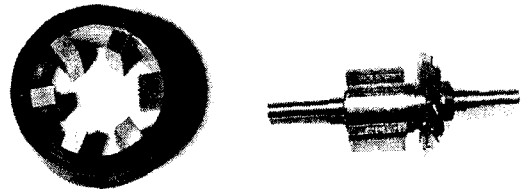
본 연구에서는 단상 SRM의 단점이 토오크 리플을 저감하기 위해 설계과정에서 회전자의 형상을 변형하여 제시하고 이에 따른 특성을 유한요소법과 해석프로그램을 사용하여 해석하였다.

2. 해석 모델

단상 SRM은 다상 SRM에 비해 상당 스위칭 소자의 수를 줄일 수 있으므로 경제적이고 자속경로가 짧고 모든 극이 동시에 여자되기 때문에 체적당 에너지 밀도가 높아 효율을 높일 수 있다. 하지만 특정 위치에서 기동도 오름이 발생하지 않기 때문에 별도의 기동장치가 필요하며 특별히 설계시 기동장치를 고려하여야 한다. 단상 SRM은 자기회로 구성방법이 캠형 회전자를 갖는 형태, 축방향 자속을 이용하는 디스크형, 와전류형 회전자형 등 사용목적에 따라 여러 가지 형태로 구성할 수 있다. 본 연구에서는 송풍기 구동용으로 사용하기 위해 회전자를 일반적인 형상으로 설계하였으며, 특히 토오크 리플을 저감하기 위해 회전자 극면에 스텝을 내어 설계하였다. 그림 1은 돌극을 갖는 SRM의 일반적인 회전자 형상과 회전자 극면에 돌극을 낸 회전자를 나타낸 것이다. 그림 2는 실제 설계 제작된 단상 SRM의 회전자를 나타낸 것이다.



(a) 일반형 회전자 (b) 스텝형 회전자  
 <그림 1> 극면 형상에 따른 회전자 형상

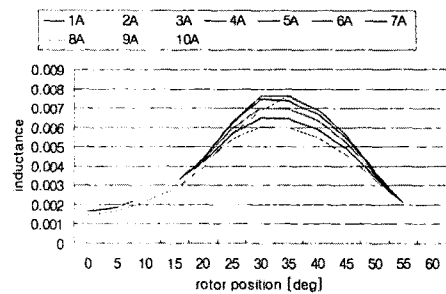


(a) 고정자 (b) 회전자  
 <그림 2> 설계 제작된 단상 SRM의 고정자와 회전자

3. 특성 해석

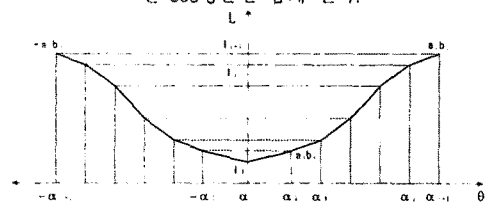
그림 3은 실제 모델에 대해 FEM을 이용하여 단상 SRM에 대해 각각의 회전자 위치에 따른 전류의 함수로 인덕턴스를 구한 것이다. 인덕턴스의 특성이 전류의 함수로 나타남을 확인할 수 있다. 전류가 증가함에 따라 인덕턴스는 자기회로의 포화 때문에 감소하게 되며, 회전자가 비정렬 위치로 이동함에 따라 포화에 의한 영향은 같은 전류조건에 비해 작아짐을 알 수 있다. 즉 인덕턴스의 변화는 전류의 영향이 적어지면서 점점 감소하게 된다.

특히, 자기회로의 포화현상으로 인해 정렬된 위치인 30°에서 최대의 인덕턴스값을 갖고, 각 여자전류에 대한 최대값의 변화가 가장 많음을 알 수 있다. 또한 회전자의 위치 변화에 대한 인덕턴스 변화 중 한 주기만을 나타낸 것인데, 인덕턴스의 변화가 인가된 여자 전류에 대한 회전자 위치의 함수이면서 주기함수임을 알 수 있다. 그러므로 인덕턴스 변화를 푸리에 급수로 전개할 수 있게 된다.[1][3]



<그림 3> 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화

인덕턴스 변화를 푸리에 급수로 전개하기 위해 그림 4처럼 회전자 위치를 j개의 직선성분으로 세분화하고, 회전자 극면치의 반만큼 이동시키면 인덕턴스의 파형이 대칭이 되어 푸리에 급수로 전개하면 cos성분만 남게 된다.



<그림 4> 인덕턴스 프로파일의 세분화

단상 SRM의 인덕턴스는 식(1)와 같이 푸리에 급수 전개식으로 표현할 수 있다.

$$L(\theta) = L_0 + \sum_{n=1}^{\infty} L_n \cos(nN\theta) \quad (1)$$

여기서,  $N_r$  : 회전자극수  
상수항  $L_0$ 는 식(2)와 같다.

$$L_0 = \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} L(\theta) d\theta$$

$$= \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m \left[ \int_{-a_{(j+1)}}^{a_j} (-a_j \theta + b_j) d\theta + \int_{a_{(j+1)}}^{a_j} (a_j \theta + b_j) d\theta \right] \quad (2)$$

여기서,  $T$ : 회전자극피치 ( $T = \frac{2\pi}{N_r}$ )

고조파 차수에 대한  $L_n$  값을 구하면 식 (3)와 같다.

$$L_n = \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\theta) \cos(nN_r \theta) d\theta$$

$$= \frac{2}{T} \sum_{j=1}^m \left[ \int_{-a_{(j+1)}}^{a_j} (-a_j \theta + b_j) \cos(nN_r \theta) d\theta + \int_{a_{(j+1)}}^{a_j} (a_j \theta + b_j) \cos(nN_r \theta) d\theta \right] \quad (3)$$

$L_0$  값과 같이 인덕턴스 프로파일 이  $m$ 개의 직선성분을 갖는다고 가정하면 식 (3)는 식 (4)와 같이 간소화하여 정리할 수 있다.

$$L_n = \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)} A_{(j,n)} - l_j B_{(j,n)}) \quad (4)$$

여기서,  $A_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left[ \sin(nN_r a_{(j+1)}) + \frac{\cos(nN_r a_{(j+1)}) - \cos(nN_r a_j)}{nN_r (a_{(j+1)} - a_j)} \right]$

$$B_{(j,n)} = \frac{2}{n\pi} \left[ \sin(nN_r a_j) + \frac{\cos(nN_r a_{(j+1)}) - \cos(nN_r a_j)}{nN_r (a_{(j+1)} - a_j)} \right]$$

이상에서 정의한 각 상수를 이용하여 단상 SRM의 인덕턴스 프로파일을 푸리에 급수로 전개하면 식 (5)과 같다.

$$L(\theta) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)} + l_j) (a_{(j+1)} - a_j) + \sum_{j=1}^m \left[ \sum_{n=1}^{\infty} (L_{(j+1)} A_{(j,n)} - l_j B_{(j,n)}) \right] \cos(nN_r \theta) \quad (5)$$

특정 위치에서 인덕턴스 대 전류의 곡선은 식 (5)의  $l_j$  항이 되며, 전류의 함수에 대해 다시 해석적으로 표현하고, 다시 식 (5)에 대입하면 전류와 회전자 위치에 대한 인덕턴스 변화식을 구할 수 있다.

$l_j(i, \theta)$ 의 함수를 얻기 위해서 전류 대 인덕턴스 곡선을 식 (6)과 같이 3차원 다항식 형태의 다항식 보간법(polynomial fitting)을 사용하여 최적 데이터를 산출한다.

$$l_j(i, a_j) = C_{3j} i^3 + C_{2j} i^2 + C_{1j} i + C_{0j} \quad (6)$$

여기서,  $C_{3j}, C_{2j}, C_{1j}, C_{0j}$ 는 스플라인 계수(spline coefficients)이다. 결국, 식 (5)의 인덕턴스식을 회전자 위치와 전류에 대한 함수로 다시 표현하면 식(7)과 같다.

$$L(i, \theta) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i, a_j) + l_j(i, a_j)) (a_{(j+1)} - a_j) + \sum_{j=1}^m \left( \sum_{n=1}^{\infty} (l_{(j+1)}(i) A_{(j,n)} - l_j(i) B_{(j,n)}) \right) \cos(nN_r \theta) \quad (7)$$

식 (7)로부터 회전자 위치와 전류에 대한 쇄교자속, 수반에너지(coergy), 토크를 구하면 식 (8), 식 (9), 식 (10)과 같다.

$$\lambda(i, \theta) = L(i, \theta) i$$

$$= \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m \left( C_{3(j+1)} C_{3j} i^4 + \dots + (C_{0(j+1)} + C_{0j}) i \right) (a_{(j+1)} - a_j) + \sum_{j=1}^m \left( \sum_{n=1}^{\infty} (C_{3(j+1)} i^4 + \dots + C_{0(j+1)} i) A_{(j,n)} - (C_{3j} i^4 + \dots + C_{0j} i) B_{(j,n)} \right) \times \cos(nN_r \theta) \quad (8)$$

$$W(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di$$

$$= \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m \left( \frac{C_{3(j+1)} + C_{3j}}{5} i^5 + \dots + \left( \frac{C_{0(j+1)} + C_{0j}}{2} \right) i^2 \right) (a_{(j+1)} - a_j) + \sum_{j=1}^m \left( \sum_{n=1}^{\infty} \left( \frac{C_{3(j+1)}}{5} i^5 + \dots + \frac{C_{0(j+1)}}{2} i^2 \right) A_{(j,n)} - \left( \frac{C_{3j}}{5} i^5 + \dots + \frac{C_{0j}}{2} i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \times \cos(nN_r \theta) \quad (9)$$

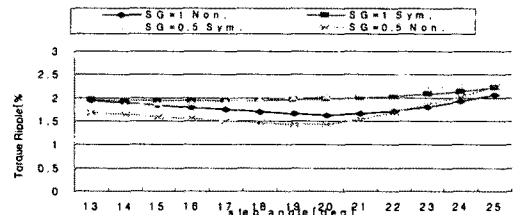
$$T_e = \frac{\partial W(i, \theta)}{\partial \theta}$$

$$= -n P_r \sum_{n=1}^{\infty} \left[ \sum_{j=1}^m \left( \left( \frac{C_{3(j+1)}}{5} i^5 + \dots + \frac{C_{0(j+1)}}{2} i^2 \right) A_{(j,n)} - \left( \frac{C_{3j}}{5} i^5 + \dots + \frac{C_{0j}}{2} i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \right] \times \sin(nN_r \theta) \quad (10)$$

이상의 결과식으로, 임의의 회전자 위치에서 동작 범위내의 임의의 전류값이 주어지면 인덕턴스, 수반에너지(coenergy), 토크 등의 순시값이 구해짐을 알 수 있다. 그러므로 단상 SRM의 동작 특성을 파악하는데 있어 푸리에 급수를 사용하면 매우 편리함을 알 수 있다.[3]

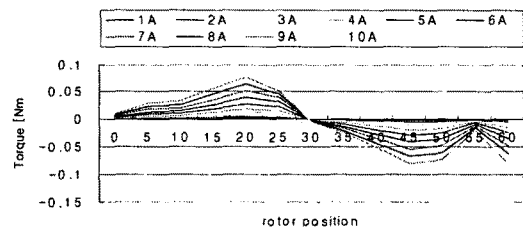
#### 4. 해석 결과

단상 SRM은 스위칭 여자 전원에 의해 고정자극이 동시에 on/off되기 때문에 불연속적인 토크가 발생하여 토크리플이 필연적으로 발생한다. 토크 리플을 줄이기 위해 토크 리플에 영향을 주는 설계변수를 고려하여 설계를 하거나 운전시 구동회로의 특성값 또는 스위칭을 위한 제어알고리즘의 개발을 통해 저감시킬 수 있다. 본 연구에서는 회전자의 극면에 스텝을 주어 회전자의 형상을 변경시켰을 때 토크리플이 개선됨을 확인 하였다. 그림 3은 스텝을 갖는 회전자형에 대해 스텝각과 스텝의 길이를 변화시켰을 때 토크 리플의 변화를 나타낸 것이다.



〈그림 3〉 스텝각 변화에 따른 토크 리플 변화

그림 4는 일정한 전류를 인가할 때 회전자의 위치 변화에 대한 발생 토크를 나타낸 것으로 단상 SRM의 구동시 적정토크를 발생시키기 위한 스위칭 on/off각을 정하고, 단상 SRM의 필수 구성요소인 정지장치의 위치를 선정하는 기준으로 사용된다. 전류를 1[A]에서 10[A]까지 변화시켰을 때의 발생토크를 나타낸다.



〈그림 4〉 회전자 위치에 따른 토크 특성

#### 3. 결 론

본 연구에서는 단상 SRM의 단점 중 하나인 불연속 토크를 줄일 수 있는 방법으로 회전자 극면에 스텝을 준 회전자 모델을 제시하였고, 이에 대한 특성을 유한요소법과 푸리에 급수를 이용하여 해석하였다. 회전자 위치와 입력 전류값을 변화시키면서 쇄교자속 대 전류 특성 곡선을 각각의 회전자 위치에 대해 구하였고 이를 바탕으로 인덕턴스 프로파일, 자기수반에너지, 토크 특성 등을 계산하였다. 해석과정에서 수치해법인 푸리에급수와 3차 곡선 보간법을 이용함으로써 유한요소법으로 해석하지 못한 회전자 위치에 대한 특성값을 유추할 수 있었다.

앞으로는 설계 제작된 단상 SRM에 대한 정확한 특성실험을 통해 해석결과값과 비교하여 해석방법의 타당성을 검증하고, 특성예측을 통해 토크 리플을 저감할 수 있는 최적의 설계파라미터를 선정하여야 할 것이다.

#### 참고 문헌

- [1] 이종환 외 3명, "송풍기 구동용 단상 SRM의 이론적 설계파라미터 선정", 대한전기학회 EMECS 춘계학술대회 논문집, pp.88-90, 2003
- [2] 이종환 외 2명, "극호비에 따른 단상 SRM의 토크 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.690-692, 2003