

송풍기 구동용 단상 SRM의 인덕턴스 해석

이종한*, 이은웅*, 김용현*, 구태만**
 충남대학교*, 울산대학교**

The Analysis of the Inductance Profile in the Single Phase SRM for Blower

Jong-Han Lee*, Eun-Woong Lee*, Yong-Heon Kim*, Tae-Man Ku**
 Chungnam National University*, Ulsan University**

Abstract - Recently, the Single phase SRM has been researched and developed in many appliances with various types.

This paper presents a theoretical representation of the phase inductance of a single phase SRM, as function of position and current, taking into account the non-linearity of the magnetic circuit.

The method is based on the Fourier series expansion. the theoretical expressions for the calculation of instantaneous phase inductance, flux linkage, coenergy and electromagnetic torque as a function of rotor position and winding currents are derived. And it is compared with the results of the finite element analysis.

1. 서 론

산업의 발달과 더불어 특정 부하 특성에 알맞은 다양한 구동원을 필요로 한다. 특히 유체부하를 다루는 팬용 송풍기나 펌프용 전동기는 부하의 토오크 특성이 속도의 2제곱에 비례하여 증가하므로 운전시 급격한 부하 변동이 적고, 큰 기동 토오크를 필요로 하지 않기 때문에 소용량의 경우에는 대부분 효율이 낮은 단상 유도전동기가 사용되고 있지만, 고효율 기기의 사용으로 에너지를 절약하고자 하는 시대적 요구에 발맞춰 저효율 단상 유도전동기를 대체하고자 하는 연구가 진행되고 있다. 이에 따라 단상 SRM을 단상유도전동기 대체용 전동기로 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다.

단상 SRM은 구조 및 제어 회로가 간단하고 견고할 뿐 아니라 다상 SRM에 비해 단위체적당 에너지 밀도를 높일 수 있기 때문에 저효율의 단상 유도전동기를 대체할 수 있는 전동기로 주목받고 있다. [1][2][4]

부하 특성에 적합한 단상 SRM의 설계 및 운전에 있어 중요하게 고려해야 할 사항으로는 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 해석을 들 수 있다. 단상 SRM은 철심으로 사용되는 자성재료의 비선형 특성에 많은 영향을 받기 때문에 회전자극이 여자된 고정자극과 정렬위치에서 비정렬 위치까지 이동할 때 높은 포화영역이 주기적으로 발생하게 된다. 이 때문에 설계시 권선의 인덕턴스를 예측하는데 어려움이 있고, 또한 해석 및 제어를 위한 인덕턴스의 수학적 모델링에 어려움을 갖게 된다. 또한 쇠교자속과 여자전류 사이의 비선형 특성으로 전체 운전 구간에서 전류와 회전자 위치의 함수로서 인덕턴스와 쇠교자속을 수학적으로 표현하는데 어려움을 갖는다. 그러므로, 인덕턴스를 정확하게 해석함으로써 단상 SRM의 토오크 특성 및 제어 요소를 정확하게 해석할 수 있다.[3]

본 논문에서는 단상 SRM의 자기회로의 비선형성을 고려하여 회전자 위치와 여자전류에 대한 함수로서 인덕턴스를 푸리에 급수를 이용하여 나타내었다. 또한 쇠교자속, 자기수반에너지, 토오크 등을 회전자 위치와 여자전류의 함수로 유도하였고, 유한요소해석을 통해 결과를

비교하였다.

2. 푸리에 급수 전개를 이용한 특성식

2.1 인덕턴스 프로파일의 푸리에 급수 전개

전행 연구를 통해 그림 1과 같이 설계한 6/6극 단상 SRM의 인덕턴스 프로파일을 FEM을 적용하여 그림 2와 같이 구하였다. 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 여자전류에 대한 회전자 위치의 함수이면서 주기함수임을 알 수 있다. 그러므로 인덕턴스 변화를 푸리에 급수로 전개할 수 있게 된다.[1][3]

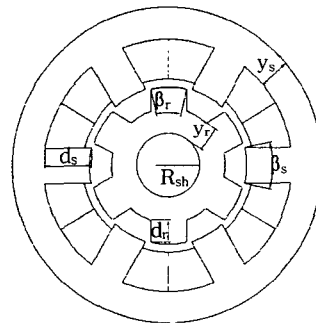


그림 1. 6/6극 단상 SRM의 단면도

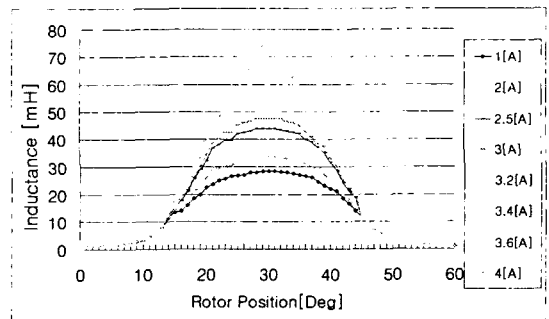


그림 2. 전류변화에 따른 회전자 위치 대 인덕턴스

인덕턴스 변화를 푸리에 급수로 전개하기 위해 그림 3처럼 회전자위치를 j개의 직선성분으로 세분화하고, 회전자극위치의 반만큼 이동시키면 인덕턴스의 파형이 대칭이

되어 푸리에 급수로 전개하면 cos성분만 남게 된다.

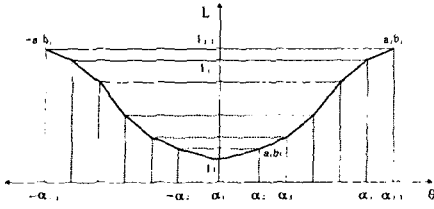


그림 3. 인덕턴스 프로파일의 세분화

그림 3의 인덕턴스를 회전자 위치각에 대한 함수로 표현하면 식 (1)과 같다.

$$\begin{aligned} L(\theta) &= -a_j\theta + b_j \quad (\theta < 0) \\ L(\theta) &= a_j\theta + b_j \quad (\theta > 0) \end{aligned} \quad (1)$$

여기서,

$$\begin{aligned} a_j &= \frac{l_{(j+1)} - l_j}{\alpha_{(j+1)} - \alpha_j} \\ b_j &= l_j - \alpha_j a_j \\ l_j &: j \text{ 번째 직선성분의 인덕턴스} \end{aligned}$$

그러므로, 단상 SRM의 인덕턴스는 식(2)와 같이 푸리에 급수 전개식으로 표현할 수 있다.

$$L(\theta) = L_0 + \sum_{n=1}^{\infty} L_n \cos(nN_r\theta) \quad (2)$$

여기서, N_r : 회전자극수

상수항 L_0 는 식(3)와 같다.

$$\begin{aligned} L_0 &= \frac{1}{T} \int_{-T/2}^{T/2} L(\theta) d\theta \\ &= \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m \left(\int_{-\alpha_{(j+1)}}^{\alpha_j} (-a_j\theta + b_j) d\theta + \int_{\alpha_j}^{\alpha_{(j+1)}} (a_j\theta + b_j) d\theta \right) \end{aligned} \quad (3)$$

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

식 (3)의 초기항에서 직선성분의 개수를 m 개라고 가정하면 식(4)와 같이 간소화하여 정리할 수 있다.

$$L_0 = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)} + l_j)(\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) \quad (4)$$

고조파 차수에 대한 L_n 값을 구하면 식 (5)와 같다.

$$\begin{aligned} L_n &= \frac{2}{T} \int_{-T/2}^{T/2} f(\theta) \cos(nN_r\theta) d\theta \\ &= \frac{2}{T} \sum_{j=1}^m \left(\int_{-\alpha_{(j+1)}}^{\alpha_j} (-a_j\theta + b_j) \cos(nN_r\theta) d\theta + \int_{\alpha_j}^{\alpha_{(j+1)}} (a_j\theta + b_j) \cos(nN_r\theta) d\theta \right) \end{aligned} \quad (5)$$

L_0 값과 같이 인덕턴스 프로파일이 m 개의 직선성분을 갖는다고 가정하면 식 (5)는 식 (6)과 같이 간소화하여 정리할 수 있다.

$$L_n = \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}A_{(j,n)} - l_jB_{(j,n)}) \quad (6)$$

여기서,

$$\begin{aligned} A_{(j,n)} &= \frac{2}{n\pi} \left[\sin(nN_r\alpha_{(j+1)}) + \frac{\cos(nN_r\alpha_{(j+1)}) - \cos(nN_r\alpha_j)}{nN_r(\alpha_{(j+1)} - \alpha_j)} \right] \\ B_{(j,n)} &= \frac{2}{n\pi} \left[\sin(nN_r\alpha_j) + \frac{\cos(nN_r\alpha_{(j+1)}) - \cos(nN_r\alpha_j)}{nN_r(\alpha_{(j+1)} - \alpha_j)} \right] \end{aligned}$$

이상에서 정의한 각 상수를 이용하여 단상 SRM의 인덕턴스 프로파일을 푸리에 급수로 전개하면 식 (7)과 같다.

$$L(\theta) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)} + l_j)(\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{j=1}^m (L_{(j+1)}A_{(j,n)} - l_jB_{(j,n)}) \right] \cos(nN_r\theta) \quad (7)$$

식(7)은 회전자 위치를 종속변수로 갖는 인덕턴스의 함수이며, 인덕턴스의 회전자 위치에 대한 구간별 직선성분의 기울기가 종속변수에 포함되며, 이 직선성분의 기울기는 입력전류에 의해 결정된다. 즉, 단상 SRM의 인덕턴스는 각각의 회전자 위치와 전류에 의해 결정되고, 주어진 회전자 위치에 대해 인덕턴스는 전류의 함수로 변화한다. 그림 4는 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 전류 조건에 비해 작아짐을 알 수 있다. 즉 인덕턴스의 변화는 전류의 영향이 적어지면서 점점 감소하게 된다.

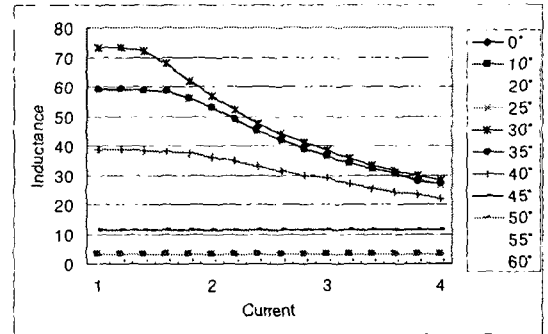


그림 4 회전자 위치에 따른 전류 대 인덕턴스

2.2 특성식의 푸리에 급수 전개

특정 위치에서 인덕턴스 대 전류의 곡선은 식 (7)의 l_j 항이 되며, 전류의 함수에 대해 다시 해석적으로 표현하고, 다시 식 (7)에 대입하면 전류와 회전자 위치에 대한 인덕턴스 변화식을 구할 수 있다.

$l_j(i, \alpha_j)$ 의 함수를 얻기 위해서 전류대 인덕턴스 곡선을 식 (8)과 같이 3차원 다항식 형태의 다항식 보간법 (polynomial fitting)을 사용하여 최적 데이터를 산출한다.

$$l_j(i, \alpha_j) = C_{3j} i^3 + C_{2j} i^2 + C_{1j} i + C_{0j} \quad (8)$$

결국, 식 (7)의 인덕턴스식을 회전자 위치와 전류에 대한 함수로 다시 표현하면 식(9)와 같다.

$$L(i, \theta) = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i, \alpha_j) + l_j(i, \alpha_j)) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m (l_{(j+1)}(i) A_{(j,n)} - l_j(i) B_{(j,n)}) \right) \cos(nN_r \theta) \quad (9)$$

식 (9)로부터 회전자 위치와 전류에 대한 쇄교자속, 수반에너지(coenergy), 토오르크를 구하면 식 (10), 식 (11), 식 (12)과 같다.

$$\lambda(i, \theta) = L(i, \theta) i = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m \left(\frac{C_{3(j+1)} C_{3j}}{(C_{0(j+1)} + C_{0j}) i^2} + \dots \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=0}^m (C_{3(j+1)} i^4 + \dots + C_{0(j+1)} i) A_{(j,n)} - (C_{3j} i^4 + \dots + C_{0j} i) B_{(j,n)} \right) \times \cos(nN_r \theta) \quad (10)$$

$$W(i, \theta) = \int_0^i \lambda(i, \theta) di = \frac{1}{T} \sum_{j=1}^m \left(\frac{C_{3(j+1)} + C_{3j}}{5} i^5 + \dots \right) (\alpha_{(j+1)} - \alpha_j) + \sum_{n=1}^{\infty} \left(\sum_{j=1}^m \left(\frac{C_{3(j+1)}}{5} i^5 + \dots + \frac{C_{0(j+1)}}{2} i^2 \right) A_{(j,n)} - \left(\frac{C_{3j}}{5} i^5 + \dots + \frac{C_{0j}}{2} i^2 \right) B_{(j,n)} \right) \times \cos(nN_r \theta) \quad (11)$$

$$T_c = \frac{\partial W(i, \theta)}{\partial (\theta)} = -nPr \sum_{n=1}^{\infty} \left[\sum_{j=1}^m \left(\frac{C_{3(j-1)}}{5} i^5 + \dots + \frac{C_{0(j+1)}}{2} i^2 \right) A_{(j,n)} - \left(\frac{C_{3j}}{5} i^5 + \dots + \frac{C_{0j}}{2} i^2 \right) B_{(j,n)} \right] \times \sin(nN_r \theta) \quad (12)$$

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

3. 해석 결과

그림 5는 직선성분을 22개로 가정하고 계산한 인덕턴스 프로파일과 FEM을 통해 얻은 인덕턴스 프로파일을 나타낸 것이다. 이 그림 5에서처럼 두 해석방법이 서로 잘 일치됨을 알 수 있다. 그림 6는 전류값을 변화시켰을 때, 토오르크를 푸리에 급수전개식으로 구한 값과 FEM으로 구한 결과를 비교한 것이다.

3. 결 론

본 연구에서는 송풍기 구동용으로 개발하고자 하는 단상 SRM의 정확한 특성 해석을 위해 인덕턴스 프로파일을 푸리에 급수를 이용하여 전개하였다. 푸리에 급수를 이용한 특성해석결과 기존의 FEM에 의한 해석방법과

잘 일치함을 알 수 있었다. 또한 푸리에 급수에 의한 단상 SRM의 특성해석 방법은 해석의 정확성을 기할 수 있으며, 계산시간도 절약할 수 있다. 또한 특성값에 대한 고조파 성분을 분석함으로써 토오르크 리플을 저감하는데 많은 도움을 얻을 수 있다.

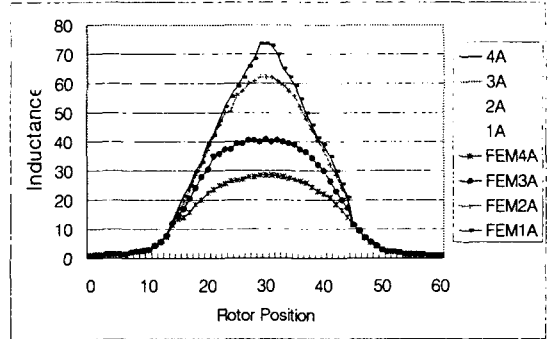


그림 5 전류변화에 대한 회전자위치와 인덕턴스변화

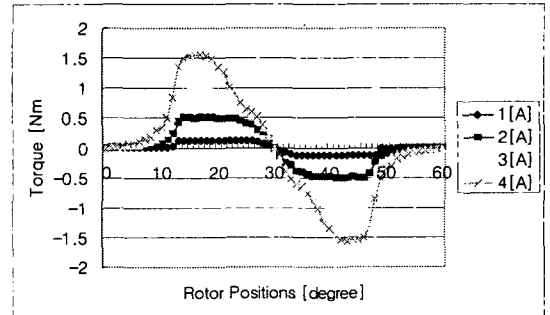


그림 6 전류변화에 따른 회전자 위치 대 토오르크곡선

[참 고 문 헌]

- [1] 이종한 외 3명, "송풍기 구동용 단상 SRM의 이론적 설계 파라미터 선정", 대한전기학회 EMECS 춘계학술대회 논문집, pp.88-90, 2003
- [2] 이종한 외 2명, "극호비에 따른 단상 SRM의 토오르크 특성 해석", 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.690-692, 2003
- [3] 이종한, 이은웅, 김용현, "푸리에 급수를 이용한 단상 SRM 특성 해석", 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp.80-82, 2004
- [4] Miller T.J., "Switched Reluctance Motors and their control", Magma Physics Publishing and claredon press Oxford, 1993.
- [5] R.Krishnan, "Switched Reluctance Motor Drives", CRC Press, 2000