

스텝형 회전자를 갖는 단상 SRM의 특성 해석

이종한*, 이은웅, 조연찬
충남대학교

Characteristic Analysis of single phase SRM with stepped rotor

Jong-Han Lee, Eun-Woong Lee, Yeon-Chan Cho

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, 제작 비용이 적게 들고 효율이 좋아 타범용 전동기와 비교하여 충분한 경쟁력을 갖는다. 최근 전력전자 및 컴퓨터를 이용한 구동 및 설계 기술의 발달로 많은 연구가 거듭되고 있다.[1][2]

특히, 단상 SRM은 다상 SRM에 비해 자기회로와 구동 회로의 구조가 간단하고 경제적이며, 단위체적당 에너지 이용률이 크기 때문에 최근 가전기기분야에 적용하는 사례가 늘고 있다. 특히, 효율이 낮고 제어가 어려운 단상 유도전동기의 단점을 보완하고 고효율 기기의 사용으로 에너지를 절약할 수 있도록 대체용 전동기로 단상 SRM을 개발하고자 하는 연구가 활발히 진행되고 있다. 하지만 단상 SRM은 정렬된 위치에서 기동토크가 발생하지 않아 별도의 기동장치를 필요로 하며, 고정자극의 모 든 여자권선이 동시에 스위칭 on/off되기 때문에 불연속 토크가 발생할 수밖에 없다.[3]

선행 연구에서는 회전자극면의 형상을 변경하여 단상 SRM의 토크 리플을 저감할 수 있는 방안을 제시하였다. 또한 푸리에 급수를 이용하여 SRM의 특성식을 작성하였고, 다항식보간법을 이용하여 푸리에 상수를 결정하였다.[4]

단상 SRM은 비선형 특성을 갖고 여자전류원에 대해 포화구간에서 운전되기 때문에 특성을 예측하고 분석하는데 많은 어려움을 갖는다. 단상 SRM의 쇄교자속과 인덕턴스는 회전자 위치와 여자전류에 따라 변화하므로 단상 SRM의 비선형 특성은 전류와 회전자위치의 함수로 정의할 수 있다.

본 논문은 토크 리플의 저감할 수 있는 스텝형 회전자 극면을 갖는 단상 SRM의 자기회로에 대해 유한요소 해석과 3차 곡선 보간법(cubic spline interpolation)을 이용하여 회전자 위치에 따른 쇄교자속 변화와 토크 특성을 분석하였다.

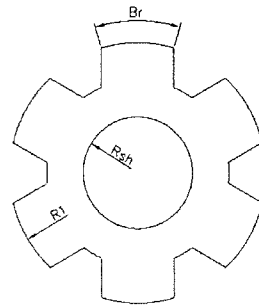
2. 해석 모델

단상 SRM은 캠형 회전자를 갖는 형태, 축방향 자속을 이용하는 디스크형, 와전류 회전자형 등 사용목적에 따

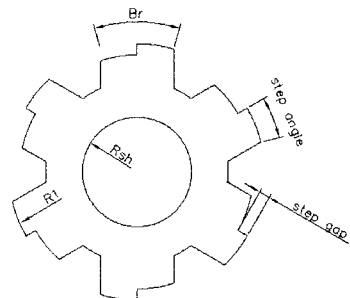
라 자기회로를 여러 형태로 제작할 수 있다. 본 연구에서는 송풍기 구동용으로 단상 SRM을 그림 1과 같이 6/6극의 내전형으로 설계하였다. 선행 연구에서 일반 회전기와 다상 SRM의 설계 이론을 참고하여 표1과 같이 설계 파라미터를 선정하였다.[5]

표 1 단상 SRM의 주요 설계 사항

| 설계 요소 | 단위 | 기호 | 설계값 |
|------------------------|--------------------|----------------------------------|------|
| 출력 | kW | P | 0.4 |
| 회전자 체적당 토크 | kNm/m ³ | TRV | 15 |
| 회전자 지름에 대한 stack 길이의 비 | | L _{stk} /D _r | 1.5 |
| 회전자 극수 | No. | N _r | 6 |
| 고정자 극수 | No. | N _s | 6 |
| DC 공급 전압 | V | V _s | 100 |
| 정격 회전 속도 | rpm | n | 1800 |



(a) 일반 회전자형



(b) 회전자극면에 비대칭 스텝을 낸 경우 (Non.)

그림 1. 극면 형상에 따른 회전자 형상

단상 SRM은 스위칭 여자 전원에 의해 고정자극이 동시에 on/off되기 때문에 발생 토오크가 불연속적이고, 이로 인한 토오크 리플이 필연적으로 발생한다. 토오크 리플을 줄이기 위해 토오크 리플에 영향을 주는 설계변수를 고려하여 설계하거나, 운전시 구동회로의 특성값 또는 제어알고리즘의 개발을 통해 저감시킬 수 있다.

선행 연구에서는 그림 1과 같이 회전자극면의 스텝을 내어 운전시 회전자극의 위치 변화에 따른 자속변화를 크게 하여 토오크 특성을 개선하고, 회전자극면의 스텝 변화에 따른 토오크 리플 변화를 SRM 설계 및 해석 프로그램을 이용하여 조사하였다. 그림 1(a)는 일반적인 회전자극면을 갖는 단상 SRM이고, 그림 1(b)는 토오크 리플을 저감시키기 위해 회전자극면에 스텝을 낸 단상 SRM이다. 스텝각 변화에 따른 토오크 리플의 변화를 나타낸 그림 2와 같이 일반형 회전자에 비해 스텝형 회전자를 갖는 단상 SRM이 토오크 리플이 적음을 알 수 있었다.[5]

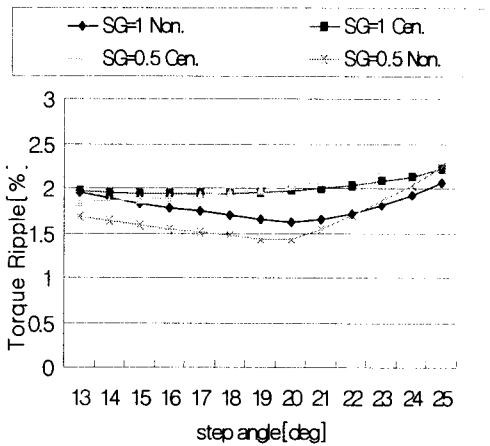


그림 2. 스텝각 변화에 따른 토오크 리플 변화

3. 특성 해석

설계된 단상 SRM에 대한 정확한 특성 해석을 위해서는 직접 제작하고 실험하여야 하지만 이와 같은 방법은 많은 시간과 비용을 동반하게 된다. 그래서 직접 제작하기에 앞서 전기기기 해석 프로그램을 통해 시뮬레이션을 하고 이를 통한 특성 예측 및 수정 작업을 통해 최적의 설계 파라미터를 얻어내는 방법이 사용되고 있다. 본 연구에서는 선행 연구를 통해 해석된 단상 SRM중에서 토오크 리플 저감 특성이 가장 좋은 스텝형 회전자를 갖는 단상 SRM에 대해 유한 요소 해석을 적용하여 자기회로의 포화 현상과 회전자 위치에 따른 자속밀도의 변화를 해석하고, 토오크 특성을 예측하였다.[5]

특히, 인덕턴스 프로파일은 단상 SRM의 특성을 분석하고, 정확한 제어방법을 찾기 위해 매우 중요한 자료이다. 본 연구에서는 정확한 인덕턴스 프로파일을 얻기 위해 유한요소해석과 3차 곡선 보간법을 이용하여 인덕턴스의 특성값을 구하였다.

3차 곡선 보간법은 보간하고자 하는 폐구간을 여러 개의 세부구간으로 나누고 각 세부구간의 두 점을 지나는 식 (1)과 같은 3차 다항식으로 보간하는 방법이다. 이 방법은 일반적으로 4개의 상수를 가지고 1차 미분에서의 연속성과 2차 미분에서의 연속성도 보장되므로 함수를 매우 높은 유연성을 갖추며 임의의 세부구간에서의 진동도 줄일 수 있다.

$$Y(x) = a_i + b_i x + c_i x^2 + d_i x^3 \quad (1)$$

여기서, a_i, b_i, c_i, d_i 는 스플라인 계수(spline coefficients)이다.

4. 특성 해석 결과

본 연구에서는 2차원 유한요소법을 이용하여 특성을 해석하였다. 고정자극과 회전자극이 비정렬위치(unaligned position)에 있을 때를 기준으로 회전자의 위치를 5°씩 변화시키고, 입력전류값을 1[A]씩 증가시키면서 각각의 특성을 해석하였다. 그림 3은 비정렬시 고정자와 회전자 사이의 자속분포를 나타낸 것이다.

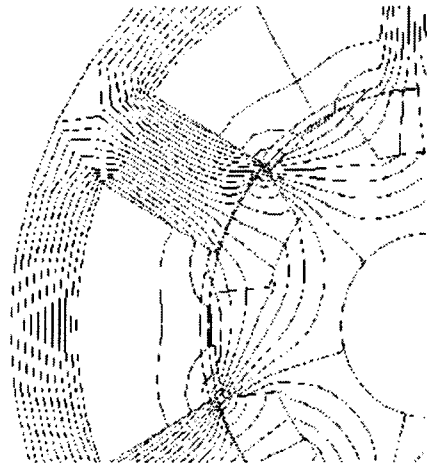


그림 3. 비정렬 위치에서의 자속 분포

그림 4는 여자전류와 회전자 위치의 변화에 따른 쇠교자속의 변화를 나타낸 것으로 입력된 전기에너지가 기계적 에너지로 변화되는 비율과 추세를 알 수 있다. 3[A]이하에서는 선형적 변화를 보였고, 10[A]부터 자기회로가 포화됨을 알 수 있다.

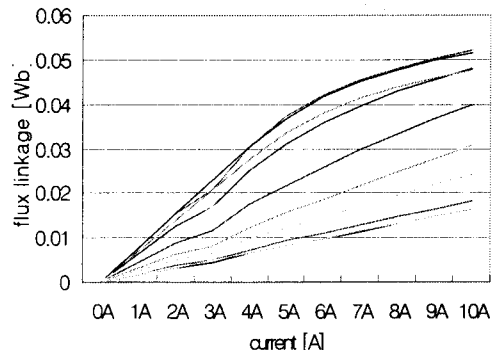


그림 4. 회전자 위치에 따른 쇠교자속 대 전류 곡선

인덕턴스를 쇠교자속과 전류의 비로 정의한다면 회전자 위치에 따른 인덕턴스의 변화는 그림 5와 같다. 인덕턴스 프로파일은 단상 SRM의 설계에 있어 매우 중요한 요소이다.

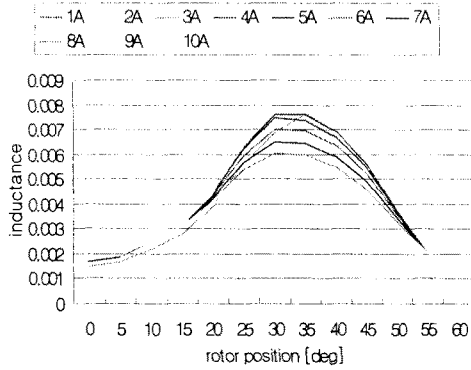


그림 5. 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화

그림 6은 회전자 위치 변화에 따른 자기수반에너지의 변화를 나타낸 것이다.

단상 SRM의 자기수반에너지 W_c '는 식(2)와 같다.

$$W_c = \frac{1}{2} L(\theta) i^2 \quad (2)$$

여기서, i 는 고정자권선의 여자전류, L 은 인덕턴스이다. 단상 SRM의 토오르크 T_e 는 회전자 위치각에 대한 자기수반에너지의 변화로 식(3)과 같이 표현할 수 있다. 그림 7은 일정한 전류를 인가할 때 회전자의 위치 변화에 대한 발생 토오르크를 나타낸 것으로 단상 SRM의 구동시 적정토오르크를 발생시키기 위한 스위칭 on/off각을 정하고, 단상 SRM의 필수 구성요소인 정지장치의 위치를 선정하는 기준으로 사용된다. 전류를 1[A]에서 10[A]까지 변화시켰을 때의 발생토오르크를 나타낸다.

$$T_e = \frac{\partial W_c}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (3)$$

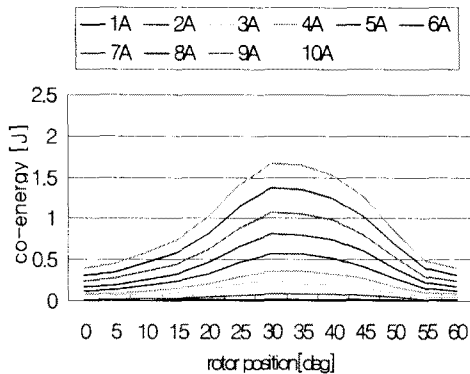


그림 6. 회전자에 위치 변화에 따른 자기수반에너지

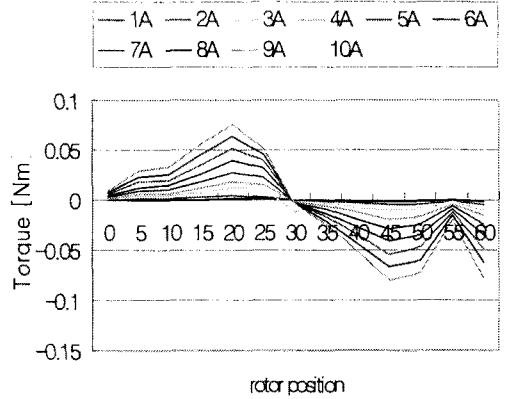


그림 7. 회전자 위치에 따른 토오르크 특성

3. 결 론

본 연구에서는 단상 SRM의 가장 큰 단점인 불연속 토오르크를 저감시킬 수 있는 방법으로 제시된 스텝형 회전자를 갖는 단상 SRM에 대해 유한요소법을 이용하여 특성을 해석하였다. 회전자 위치와 입력전류값을 변화시키면서 쇠교자속 대 전류 특성곡선을 각각이 회전자 위치에 대해 구하였고 이를 바탕으로 인덕턴스 프로파일, 자기수반에너지, 토오르크 특성 등을 계산하였다. 해석과정에서 수치해법인 3차 곡선 보간법을 이용함으로써 유한요소법으로 해석되지 않은 회전자 위치에 대한 특성값을 유추할 수 있었다.

앞으로는 특성 해석 결과를 바탕으로 정확한 특성을 예측하여 토오르크 리플을 저감하고 특성을 개선할 수 있는 최적의 설계파라미터를 선정하여야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

- [1] P.J. Lawrenson, J.M. Stephenson, "Variable-Speed Switched Reluctance Motors", Proceedings IEE, Vol. 127, Pt.B, No.4, pp.253-265, July 1980
- [2] Miller, T.J.E., Switched Reluctance Motors and their Control, Magna Physics Publishing and Oxford University Press, London, 1993
- [3] 이종한, 이충원, 이은용, 오영용, "송풍기 구동용 단상 SRM의 이론적 설계파라미터 선정", 2003년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp. 88-90, 2003.4
- [4] 이종한, 이은용, 김준호, 구태만, "송풍기 구동용 단상 SRM의 인덕턴스 해석", 2004년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집, pp.1025-1027, 2003.7
- [5] 이종한, 이은용, 김준호, "토오르크 리플을 고려한 단상 SRM의 회전자 설계", 2005년도 대한전기학회 전기기기 및 에너지변환시스템학회 춘계학술대회 논문집, pp.49-51, 2005.4