

Disk형 단상 스위치드 리럭턴스 전동기의 특성 해석

이충원*, 이은웅*, 이종한*, 오영웅*
충남대학교*

Characteristics Analysis of Disk-type Single Phase SRM

Chung-Won Lee*, Eun-Woong Lee*, Jong-Han Lee*, Young-Woong Oh*
Chungnam Nat'l Univ*

Abstract - Disk type Single Phase SRM(Switched Reluctance Motor) can be used axial and radial direction magnetic flux. Therefore, the energy density per unit of volume is high and the axis can be shorter than that of any other motor.

In this paper, the flux-linkage was measured according as rotor positions of disk type single phase SRM, which is designed and fabricated in previous studies. From the measured data, we got the magnetization curves, inductance profile, co-energy and torque. Also, we compared the value of the measurement with the value of analysis through 3D FEM simulation.

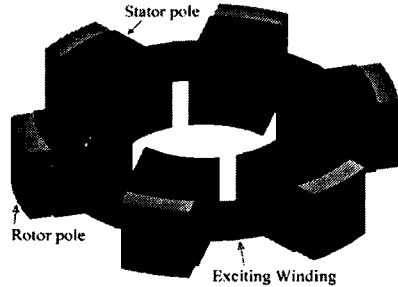


그림1. 시작기 모델

1. 서 론

컴퓨터를 이용한 전자계 해석과 전력전자소자를 이용하는 회로 설계로 구조가 간단하고 견고하며, 단위 체적당 토크가 크고 효율이 우수한 스위치드 리럭턴스 모터(SRM)가 연구 개발되어 공장자동화, 가전기기, 전자자동차 등의 여러 산업분야에서 구동용 또는 제어용 전동기로 실용화되고 있다.[1][2]

특히 축방향 자속과 방사방향 자속을 함께 이용하여 단위체적당 에너지 밀도를 높이고, 축방향 길이를 짧게 할 수 있는 디스크형 단상 SRM은 설치장소가 좁고 유지보수가 어려운 장소, 그리고 저속운전이 필요한 곳에 적합하다.[3][4]

본 연구에서는 앞선 연구에서 제작된 Disk형 단상 SRM에 실제 제작한 실험장치를 붙이고, 이 실험장치로 회전자의 위치에 따라 실측한 자화곡선과 3차원 유한요소해석으로 구한 이론적 자화곡선을 비교 분석하여 예측 가능한 에너지 분포와 토크를 발생시킬 수 있는 설계 파라미터를 선정하는 자료를 얻고자 한다.[4][5]

2. Disk형 단상 SRM의 구조적 특징과 구동원리

2.1 Disk형 단상 SRM의 구조적 특징

그림 1은 시작기의 모델을 나타낸다. 시작기는 고정자 극과 회전자 극이 모두 6개로 구성되어 있으며, 하나의 단상 권선을 'ㄷ'형 고정자 극 사이에 감아 각 극이 동시에 여자될 수 있도록 하였다. 회전자는 '1'자의 외륜형이다.

그림 1처럼 회전자의 돌극으로 인하여 축방향 자속과 방사방향 자속을 동시에 활용할 수 있기 때문에 돌극이 없는 회전자 구조에 비해 자속의 이용률이 높다. 따라서 시작기는 단위 체적당 에너지 밀도가 높고, 출력이 같은 다른 형태의 전동기보다 축방향 길이 또는 여자 기자력을 줄일 수 있다.

2.2 구동원리

고정자와 회전자의 극수가 같은 6개로 회전자가 정렬된 위치에 정지하고 있으면 기동토크를 얻을 수가 없다. 그래서 정지시에 기동할 수 있는 특정 위치에 회전자가 정지하여 있도록 영구자석 기동장치를 설치하였다. 원통형 단상 권선에 전류가 흐르면 6개의 고정자극이 동시에 여자되면서 여자 없는 회전자극 사이에 자기저항이 최소가 되도록 힘이 발생한다. 회전자극과 고정자극이 완전히 정렬 위치에 도달하기 전에 전류를 차단하여 관성에 의해 회전 정렬 위치를 벗어나게 하고 다시 여자하여 계속 회전하도록 한다. 이와 같은 동작을 반복하여 연속적인 회전력을 얻는다.

3. 자화곡선 측정에 의한 토크 산출

3.1 쇄교자속 측정

회전자의 위치를 조정하고 위치를 변화시키면서 실험을 할 수 있도록 시작기의 외함에는 기어를 설치하였다. 각 극이 동시에 여자되는 시작기의 구조적 특징으로 인해 고정자에 쇄교하는 자속을 측정하기가 곤란하여 본 실험에서는 고정자의 극에 서치코일을 별도로 감아 쇄교자속을 측정하였다. 자화곡선을 측정하는 직접적인 방법은 전압방정식 (1)에 의존한다.

$$v = Ri + \frac{d\psi}{dt}$$

$$= Ri + L \frac{di}{dt} + i \frac{dL}{d\theta} \omega \tag{1}$$

여기서, v 는 권선의 단자전압, R 은 저항, i 는 전류, ψ 는 쇄교자속, L 은 인덕턴스, ω 는 각속도이다.

본 실험에서는 여자 없는 철심 회전자의 위치가 고정된 상태에서 실험을 했기 때문에 위 식 (1)의 세 번째 항($i \frac{dL}{d\theta} \omega$)은 고려하지 않았다. 식 (1)의 쇄교자속 ψ 은 식 (2)로 구한다.

$$\psi = \int (v - Ri)dt \tag{2}$$

식(2)에서 저항 R 은 작으며 권선에서 발생하는 열로 인한 저항의 변화는 무시하였다.

3.2 측정 장치 구성

각 고정자와 회전자 위치의 다른 쇠교자속을 구하기 위해서는 식 (1)에 의해서 전류에 따른 기전력과 회전자에 따른 기전력을 동시에 측정할 수 없으므로 그림 2와 같이 회전자의 위치를 고정시킬 수 있고, 위치를 변화시킬 수 있는 Dividing 장치를 하였다. 그림 3은 시작기에 서치코일을 설치한 것을 보여준다.

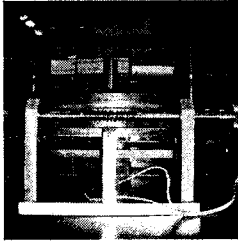


그림 2. Dividing 장치

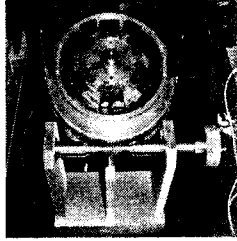


그림 3. 서치코일

3.3 측정 방법과 측정치

고정자와 회전자가 정렬위치에 있을 때를 0° 라고 하고, 그림 3의 Dividing 장치를 이용하여 고정자에 대한 회전자의 위치를 정렬위치에서부터 5° 씩 변화시키며 5[V], 15[A] DC power supply를 이용하여 권선을 여자시키고 상전류 i 와 서치코일에 유기되는 기전력 v 를 측정하였다. 상전류 i 는 정렬 위치와 비정렬 위치에서 최대 7.8125[A], 기전력 v 는 정렬위치에서 최대 106.25[mV], 비정렬위치에서 최대 62.5[mV]였다.

그림 5는 정렬위치와 비정렬 위치에서 권선에 흐르는 전류와 서치코일에 나타나는 기전력이다. 그림 5에서 전압이 음의 값으로 떨어지는 것은 전류가 감소하여 나타나는 역기전력이다.

3.4 측정 결과

고정자에 대한 회전자의 위치의 변화에 따라 각 위치에서 권선에 흐르는 전류와 서치코일에 나타나는 기전력을 측정하고, 그 data를 통해 식 (2)에 적용하여 각 위치와 전류에 따른 자화곡선을 구하면 그림 4와 같다. 그림 4에서 쇠교자속이 선형적으로 변하면서 측정된 것으로부터 자료가 포화되지 않는 것을 확인하였다.

인덕턴스 L 을 Ψ/i 의 비로 정의한다면 위치에 따른 인덕턴스 profile은 그림 7과 같다. SRM의 자기수반에너지 W_c' 는 식 (3), 토오크 T 는 식 (4)로 구해진다.

$$W_c' = \frac{1}{2} i^2 L \quad (3)$$

$$T = \frac{\partial W_c'}{\partial \theta} = \frac{1}{2} i^2 \cdot \frac{dL}{d\theta} \quad (4)$$

여기서 i 는 상권선의 전류, L 은 인덕턴스이다. 식 (4)에서 토오크는 전류의 제곱에 비례함으로써 상전류의 방향과 무관하게 토오크를 발생시킬 수 있으며, 인덕턴스의 기울기에 따라서 토오크의 부호가 달라지므로 회전방향에 대하여 역방향의 토오크인 부토오크(Negative Torque)가 발생하는 회전자의 위치각도 존재한다. 그렇기 때문에 SRM은 부토오크의 역제를 위하여 반드시 인덕턴스 L 이 증가하는 구간에서 회전자 위치를 때 스워칭 여자를 해야 한다. 회전자의 위치의 변화에 대해 $\frac{dL}{d\theta}$ 가 거의 일정하기 때문에 전류가 일정할 경우 토오크가 일정하게 발생할 수 있다.

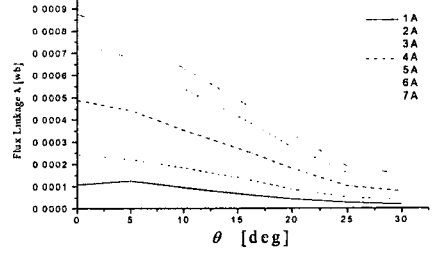


그림 4. 위치와 전류에 따른 자화곡선

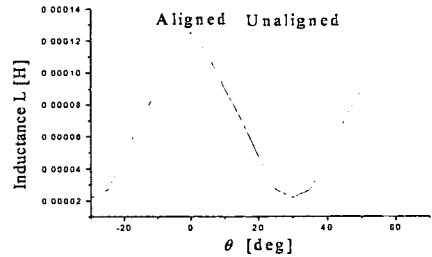


그림 5. 위치에 따른 인덕턴스 profile

식(3)을 이용하여 위치와 전류에 따른 자기수반에너지를 구하여 그 파형을 그림 6에 나타냈다. 식(4)에 의한 위치와 전류에 따른 토오크 파형을 그림 7에 나타냈다.

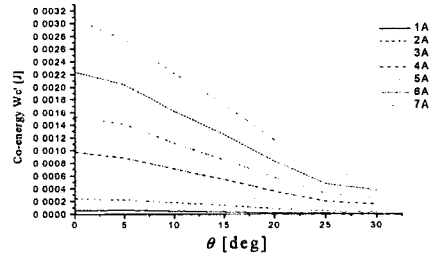


그림 6. 위치와 전류에 따른 자기수반에너지

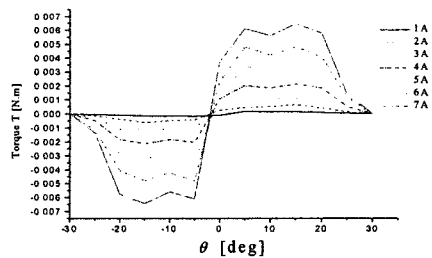


그림 7. 위치와 전류에 따른 토오크

4. 3차원 유한 요소 해석

4.1 3차원 유한요소해석의 지배방정식

전류원이 존재하는 해석모델에서 자계 H와 전류 밀도 J의 관계는 Ampere의 주회법칙의 미분형인 식(5)와 같고, 정자계에서 자속밀도의 발산은 식(6)으로 정의된다.

$$\nabla \times H = J \quad (5)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (6)$$

전류 연속성으로부터 전류 벡터포텐셜 K 를 정의하면 식(7)과 같다.

$$J = \nabla \times K \quad (7)$$

식(7)을 식(5)에 대입하여 정리한 벡터량을 새로운 자기 스칼라포텐셜 Ω^* 로 정의하면 식(8)이 얻어진다.

$$H - K = -\nabla \times \Omega^* \quad (8)$$

식(8)을 H 로 나타내어 식(6)에 대입하면 지배방정식 식(9)를 얻는다.

$$\nabla \cdot \mu(K - \nabla \Omega^*) = 0 \quad (9)$$

이 지배방정식을 정식화하기 위해 Galerkin법을 이용하여 각 요소에 대한 잔차 R_{ei} 를 구하면 식(10)과 같다.

$$\begin{aligned} R_{ei} &= \int_v [N_i \nabla \cdot \mu(K - \nabla \Omega^*)] dV \\ &= \int_v [\nabla \cdot N_i \mu(K - \nabla \Omega^*)] dV \quad (10) \\ &= \int_v [\mu(K - \nabla \Omega^*) \cdot \nabla N_i] N_i \end{aligned}$$

여기서, N_i 는 형상함수이다.

식(10)의 우변 첫 항에 대해 Gauss 정리를 적용하면 식(11)과 같고, 경계조건을 적용하면 식(11)은 "0"이 되므로 잔차 R_{ei} 는 식(12)가 된다.

$$\begin{aligned} \int_v [\nabla \cdot N_i \mu(K - \nabla \Omega^*)] dV \\ = \int_s N_i \mu(K - \nabla \Omega^*) \cdot ndS \quad (11) \end{aligned}$$

$$R_{ei} = \mu \int_v [\nabla \Omega^* \cdot \nabla N_i] dV - \mu \int_v [K \cdot \nabla N_i] dV \quad (12)$$

일차식으로 근사화시킨 자기스칼라포텐셜 Ω^* 을 식(12)에 대입하고 모든 요소에 대해 적용하면 식(13)과 같은 행렬식이 얻어진다.

$$[R] = \mu [S][\Omega^*] - [F] = 0 \quad (13)$$

여기서, $[S]$ 는 계수행렬이고, $[F]$ 는 구동벡터이다.

4.2 유한요소법을 이용한 자기수반에너지 산정

4.2.1 자속밀도 분포

상용 소프트웨어인 Maxwell(3D Ver 5.0)을 사용하여 Disk형 단상 SRM의 자속밀도 분포를 해석하였다. 이 해석 결과는 최적 설계파라미터의 산출과 Disk형 단상 SRM의 구동 및 제어회로를 위한 매우 기본적인 자료로써 복잡한 자기회로에서 발생하는 포화현상과 회전자의 위치에 따른 자속밀도의 변화를 해석함으로써 토오크의 예측과 구동시 특성을 향상시킬 수 있는 자료를 얻게 된다. 그림 8은 기차력이 700[AT]일 때의 비정렬위치와 정렬위치에서의 자속밀도 분포를 나타낸 것이다.

4.2.2 자기수반에너지

3차원 유한 요소법을 이용하여 얻은 자속밀도 분포와 식(13)을 이용하여 회전자와 고정자가 정렬 위치에 있을 때와 비정렬 위치에 있을 때의 자기수반에너지를 구하였다.

$$W = 2 \int \left(\frac{1}{2} \nu B^2 \right) dV - \nu_0 \int \int (HdB) dV \quad (14)$$

여기서, ν 는 자기저항률, ν_0 는 진공에서의 자기저항률, B 는 자속밀도, H 는 자계세기이다.

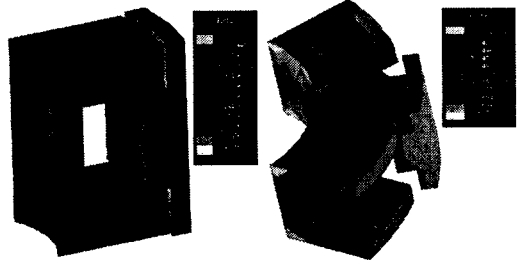


그림 8. 정렬 위치와 비정렬 위치에서의 자속밀도분포

표 1. 회전자의 위치에 따른 자기수반에너지

위치 [AT]	정렬 위치	비정렬 위치
100[AT]	W=0.018005	W=0.005339
200[AT]	W=0.073058	W=0.043135
300[AT]	W=0.164031	W=0.048106
400[AT]	W=0.292469	W=0.085568
500[AT]	W=0.457211	W=0.133763
600[AT]	W=0.657503	W=0.192712
700[AT]	W=0.892586	W=0.26235

5. 결 론

선행 연구에서 설계 및 제작된 Disk형 단상 SRM에 설계·제작한 측정 장치를 부착하여 쇄교자속을 측정하였고, 이를 이용하여 인덕턴스 profile, 자기수반에너지와 토오크를 구하였다.

측정으로 구한 자화곡선에서 포화되지 않고 선형적으로 변함을 확인하였고, 회전자의 위치변화에 대해 인덕턴스의 변화도 일정함을 확인하였다. 또한 회전자의 위치변화에 대한 토오크의 변화도 정현적으로 변함을 확인하였다.

그리고 3차원 유한 요소 해석으로 시작기의 자속밀도 분포와 자기수반에너지를 구하였다. 실측값과 3차원 유한요소해석 값이 차이가 있음을 확인하였고 이에 대한 정확한 해석이 앞으로 이루어져야 할 것이다.

앞으로 본 연구에서 구한 인덕턴스 프로파일로 정확한 제어 회로의 설계 조건을 구하고, 최적의 설계파라미터를 산출하는 연구가 이루어져야 한다.

[참 고 문 헌]

- [1] C.C. Chan "Single-phase switched reluctance motor". IEE, Proc., Vol.134, Pt.B, No.1, pp53-56, January 1987
- [2] 이종한, 이은용, 조현길 "디스크형 단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 기본 설계", 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp9-11, 1996
- [3] 이종한, 오영용, 임수생, 이은용 "3차원 FEM해석에 의한 디스크형 단상 SRM의 시작기 제작과 특성해석", 대한전기학회 논문지, 48권 B, No.6, pp316-321, 1999
- [4] 이종한, 오영용, 이은용 "디스크형 단상 SRM의 구동 드라이브 제작과 성능 측정", 대한전기학회 논문지, 49권 B, No.1, pp15-19, 2000
- [5] 이종원, 이종한, 이은용, 오영용 "Disk형 단상 SRM의 기본 특성 해석을 위한 자화곡선 측정", 대한전기학회 춘계학술대회 논문집, 91-93, 2003