

포화를 고려한 디스크형 단상 SRM의 3차원 유한 요소해석

이종한*, 이은웅*, 이동주*,
충남대학교*

3D finite element analysis of disk type single phase SRM considering the saturation

J. H. Lee*, E.W. Lee*, D. J. Lee*
Dept. Electrical Eng. Chungnam Nat'l. Univ.*.

Abstract - Disk type single-phase switched reluctance motor which has an advantage of simple robust construction, simple control circuitry, and low manufacturing cost has a specific property of axial flux machine and radial flux machine simultaneously. So, this DSPSRM has a complicated magnetic circuit and it is difficult to analyze characteristics of DSPSRM for design.

In this paper, we used to analyze the effects of radial flux and axial flux simultaneously by 3D-finite element method. From the results of 3-D FEM, we obtained the approximated torque characteristics of DSPSRM. It's analysis results can be used in optimal design of DSPSRM considering the saturation.

1. 서 론

1980년대를 기점으로 본격적으로 개발하기 시작한 스위치드 리럭턴스 모터(switched reluctance motor:SRM)는 스위칭 기술의 보완, 소음, 토오크 리플 제거 등에 대해 연구되어 오다가 최근에는 컴퓨터를 사용한 전자계 해석기술의 발달과 전력전자기술의 발달에 힘입어 실용화를 위한 연구가 진행되고 있다.

또한 현재 사용하고 있는 대부분의 전기기기는 방사상의 자속을 이용한 방사상 자속기기(radial flux machine : RFM)의 형태를 취하고 있다. 이러한 기기는 출력을 증가시키기 위해서는 축방향의 길이를 증가시켜야 하므로 축방향의 길이가 짧아야 하는 응용분야에는 적합하지 않다는 단점을 갖는다.

그래서 FDD의 스피들모터와 같이 축방향의 길이를 줄여야 하는 것이 바람직한 기기에 이용하기 위해 축방향 자속을 효율적으로 이용하려는 축방향 자속기기(axial flux machines : AFM)에 대한 관심이 높아지고 있고 현재 연구가 진행중이다.

이와 같이 구조적인 장점과 제작상의 장점을 갖는 SRM도 RFM형태뿐만 아니라 AFM형태의 연구가 진행되고 있다.[1]

특히 저속으로 정속도 운전을 요하는 부하를 위한 디스크형 단상 SRM(disk type single-phase switched reluctance motor : DSPSRM)에 관한 연구가 C.C. Chan등에 의해서 이루어지고 있다.[2]

본 연구에서는 선행 연구[3]에서 이미 산출한 설계과

라미터들을 근거로 대략 설계된 DSPSRM에 관한 특성을 해석하고자 한다. 그런데 본 연구의 대상인 DSPSRM은 AFM의 특성과 RFM의 특성을 동시에 가지고 있어 일반적인 2차원 유한요소해석으로는 그 특성을 정확하게 해석하기가 어렵기 때문에 3차원 유한요소법에 의한 해석이 필수적이며 본 연구에서는 3차원 유한요소해석을 사용하여 고정자와 회전자에 정렬된 위치(aligned position)와 완전히 어긋난 위치(unaligned position)에서의 에너지 분포를 해석하여 근사화된 토오크 특성을 산출하였다.

2. DSPSRM의 해석 모델

참고문헌 [2]에서 회전자가 돌극구조를 가진 형태가 돌극이 없는 구조에 비해서 단위체적당 출력을 증가시킬 수 있으며 필요로 하는 공극자속을 얻기 위해서 작은 기자력이 필요함을 확인할 수 있었다. 그래서 선행 연구 [3]에서 산출한 돌극구조를 갖는 DSPSRM에 대한 설계파라미터를 참고로 하여 기본 구조와 설계사양을 각각 그림 1과 표 1과 같이 나타내었다.

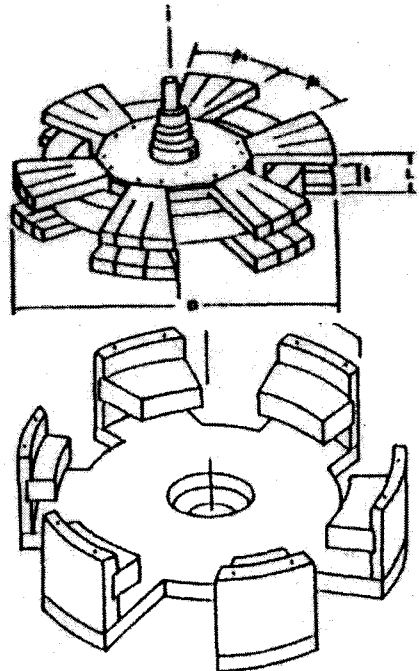


Fig. 1. Structure of DSPSRM

Table 1. Specification of DSPSRM

Item	Notation/Unit	Value
Output	P [W]	40
Torque	T [Nm]	1.53
Speed	n [rpm]	250
Efficiency	η	0.28
Rated Current	I [V]	1
Winding	N [turns]	100
Stator Pole	Nr	6
Rotor Pole	Ns	6
Ratio of Pole arcs	$\beta_s/\beta_s, \beta_s/\beta_r$	1.3, 1.4
Pole Shoe	t	34
stator diameter	D [mm]	225
stator axial length	L [mm]	57
stator slot length	l [mm]	32
stator pole arc	β_s [mm]	52
stator interpole arc	β_i [mm]	67
rotor pole arc	β_r [mm]	48
airgap	g [mm]	1

3. DSPSRM의 특성 해석

일반적으로 유한요소법을 사용하여 전기기기를 해석하고자 할 때 대부분이 RFM의 특성을 갖기 때문에 2차원에 의해서도 충분히 해석이 가능하였다. 본 연구에서는 DSPSRM의 자기회로의 구조가 RFM과 AFM의 특성을 동시에 갖고 있기 때문에 2차원 해석에 의해서는 에너지 분포를 나타내기가 곤란하여 3차원 유한요소법을 사용하여 해석을 하였다.

3차원 유한요소법으로 해석하게 되면 2차원해석에 비해 처리해야할 미지수의 수가 훨씬 많아지게 되고 또한 해석영역을 요소로 분할하는 과정과 해석변수로부터 무리적 양을 계산하거나 그래프로 표현하는 후처리과정이 복잡하다. 그러나 최근 컴퓨터의 발달과 해석프로그램의 발달에 힘입어 정확한 3차원 유한요소 해석이 가능하다.

3.1 유한요소 해석 결과

본 연구에서는 위에서 얻은 설계파라미터를 근거로 하여 DSPSRM의 고정자극과 회전자극의 정렬 및 반정렬된 위치에서 한 극만을 3차원 모델링을 한 후 3차원 유한요소법에 의해 해석을 하였다.

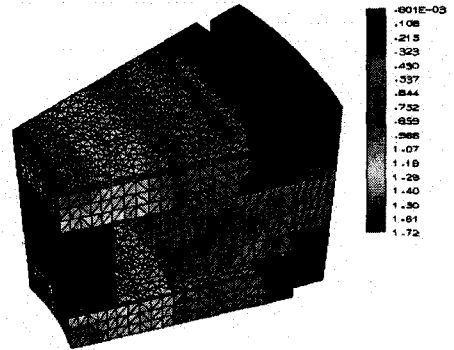
표2는 회전자의 정렬된 위치와 어긋난 위치에서의 각 모델에 대한 요소 및 절점수, 해석에 사용된 입력조건을 나타낸 것이다.

Table 2. Descretization data

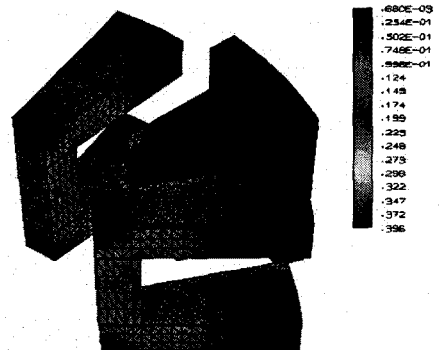
	Aligned position ($\theta=0$)	Unaligned position ($\theta=\tau/2$)
No. of bricks	81963	88473
No. of tetrahedra	48973	52534
No. of nodes	48973	52534
m.m.f	254 AT	

그림 2는 극피치가 $\tau=60^\circ$ 인 고정자와 회전자의 정렬된 위치($\theta=0$)와 어긋난 위치($\theta=\tau/2$)에서의 자속 분포를 나타낸 것이다. [8]

그림 2에서 알 수 있듯이 정렬된 위치에서는 고정자 철심의 안쪽부분이 심하게 포화되어 방사상의 자속이 회전자를 쇄교하지 못하고 축방향의 자속이 크게 작용하고 있음을 알 수 있다.



(a) Aligned Position ($\theta=0$)



(b) Unaligned Position ($\theta=\tau/2$)

Fig. 4. Magnetic flux density

이상의 해석결과에서 알 수 있듯이 축방향의 자속과 방사상의 자속을 동시에 갖고 있는 DSPSRM의 특성을 감안할 때 처음 설계파라미터 산출시 고정자 철심의 안쪽부분에 대한 포화를 고려하지 않았기 때문이고 또한 축방향 자속의 주경로인 회전자극의 돌극에 대해 충분한 고려가 없었다는 것을 알 수 있었다. 그러므로 앞으로의 재설계시에는 고정자 철심의 안쪽부분을 보다 넓게 설계하고, 또한 방사상 자속과 축방향 자속의 양을 충분히 조화시켜야함을 알 수 있다.

3.2 근사화된 특성해석

3.1절에서 얻은 유한요소법에 의한 해석결과를 이용하여 식(1)에 의해 자기 수반 에너지(magnetic co-energy) E를 얻을 수 있다.

$$E = 2 \int (\frac{1}{2} \nu B^2) da - \frac{1}{2} \nu_0 \int (HdB) da \quad (1)$$

여기서, ν : 자기저항율,
 ν_0 : 진공중 자기저항율,
 B : 자속밀도,
 H : 자계세기

또한, 가상변위의 원리에 의해서 각변위 θ 에 대한 토오크는 식(2)를 이용하여 구할 수 있다.

$$T(\theta) = + \frac{dE}{d\theta} \quad (2)$$

따라서 유한요소해석결과로부터 식(1)을 이용하여 자기 수반에너지를 구하면 표3와 같다.

Table 3. Result of Calculation

	Magnetic co-energy [J]
Aligned Position ($\theta=0$)	$E_{\max} = 1.30028 \cdot 10^{-1}$
Unaligned Position ($\theta = \tau/2$)	$E_{\min} = 7.00625 \cdot 10^{-2}$

일반적인 SRM에서와 같이 정렬된 위치에서 어긋난 위치사이의 에너지 분포가 정현적이라고 가정하면 표 3에서 구한 결과로부터 각변위 θ 에 따른 자기 수반에너지 분포와 토오크 분포를 식(3)과 식(4)와 같이 근사화시킬 수 있다.

$$E = E_{\text{avg}} + E_p \cos(p\theta) \quad (3)$$

여기서,

$$E_{\text{avg}} = E_{\min} + E_p$$

$$E_p = \frac{(E_{\max} - E_{\min})}{2}$$

$$T(\theta) = -pE_p \sin(p\theta) \quad (4)$$

그러므로 표3의 값으로부터 자기 수반에너지의 평균치는 $E_{\text{avg}} = 0.06852$ [J] 이고 맥동분은 $E_p = 0.06151$ [J]이다. 따라서 식(3)과 식(4)에 의해서 근사화된 자기 수반에너지 분포와 토오크 분포를 나타내면 그림 3과 같다.

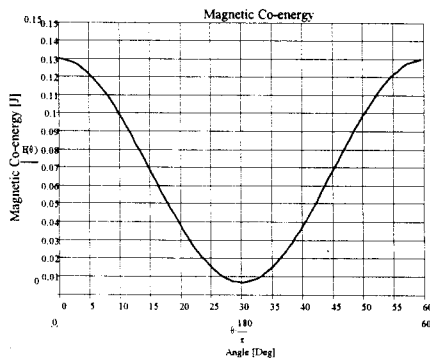
4. 결론

본 연구에서는 선행연구에서 얻은 설계데이터들을 사용하여 DSPSRM에 대해 3차원 유한요소법을 적용하여 특성을 해석을 하였다. 해석과정에서 고정자극과 회전자극이 정렬된 위치와 반정렬된 위치에 대해 자속밀도 분포와 이에 대한 근사화된 토오크 특성을 구하였다.

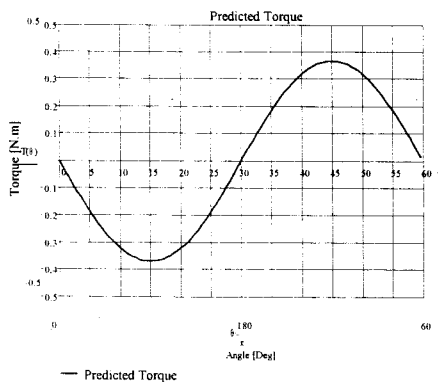
해석결과 정렬된 위치에서 고정자철심의 안쪽부분이 과포화되어 방사상의 자속이 충분히 이용되지 못하고 있음을 알 수 있었다. 따라서 DSPSRM의 제작을 위한 재설계시 이에 관한 충분한 고려가 필요하다. 또한 앞으로 각변위에 따른 상세한 토오크 특성해석이 이루어져야 할 것이다.

[참 고 문 헌]

1. J.F. Eastham and P.D. Evans, "An Axial Flux Reluctance Motor", IEE Conference on Small Electrical Machines, pp.55-58, March 1976
2. C.C. Chan, "Single-phase Switched Reluctance Motors", IEEE Proc., Vol.134, Pt.B, No.1, pp.53-56, January 1987
3. 이종한, 이은용, 이동주 "3차원 유한 요소법에 의한 디스크형 단상 SRM의 근사화된 토오크 특성", 대한전기학회 전기기기연구회 춘계학술대회 논문집, pp.88-90, 1998.5
4. "MagNet 5.1 User Guide", published by Infolytica, 1995



(a) Magnetic co-energy



(b) Torque

Fig. 3. Approximated energy and torque characteristics