

회전자에 돌출구조를 가지는 디스크형 단상 스위치드 릴럭턴스 전동기의 특성 해석

論文

51B-11-2

Characteristic Analysis of Disk Type Single-phase Switched Reluctance Motor with Pole Shoe in Stator

李 敏 明
(Min-Myung Lee)

Abstract - The main advantages of Disk type Single-Phase Switched Reluctance Motor (DSPSRM) is the simple construction, rugged structure, low manufacturing cost and simple driving circuit. It is especially possible to make the short axial length of DSPSRM. Therefore, it is suitable to setup this motor in a narrow space. This paper presents the shape design to maximize the average torque of DSPSRM that is achieved by 3D Finite Element Method (3D FEM) considering the nonlinear of magnetic material. The characteristics of two different rotor shapes are compared. The design parameters, such as the rotor and stator pole arc, are selected to the parametric study. The effect of pole arc ratios on the torque performance is investigated. From these results, the optimal pole arc to produce the maximum torque is determined.

Key words : DSPSRM, 3D FEM, pole arc and pole arc ratio

1. 서 론

순차적인 스위칭 동작에 의해 고정자극과 회전자극 사이의 자기저항을 최소화시키는 방향으로 연속적인 회전력을 얻는 SRM은 타전동기에 비해 구조적으로 간단하고, 단위체적당 토크가 높다는 장점을 갖고 있다 [1]. 한편, 현재 사용되고 있는 대부분의 회전기기는 방사상의 자속을 이용하는 방사상 자속기기(radial flux machine)의 형태로 출력을 증가시키기 위해서 축방향 길이를 길게 하여야 하므로 축방향 길이가 짧아야 하는 응용분야에는 적합하지 못한 단점을 갖는다. 그래서 FDD의 스피들 모터와 같이 축방향 길이를 줄임으로써 같은 용량의 방사상 자속기기보다 효과적인 축방향 자속기기(axial flux machine)에 대한 관심과 연구가 진행되고 있다[2].

본 논문에서 다루고 있는 DSPSRM은 구조 및 구동장치가 간단하여 내구력 및 경제성이 뛰어나다. 또한, 축방향 자속과 방사방향 자속을 동시에 이용하므로 단위 체적당 에너지 밀도가 높아 동일한 체적의 다른 전동기에 비해 축방향 길이를 줄일 수 있는 장점도 가지고 있다. 따라서, 전동기가 축방향 길이로 제약이 있는 취부 환경에 적합한 구조를 가지므로 특수 목적용 전동기로 실용화가 가능하다[3][4]. 또한, 단상을 사용하므로 스위칭 소자 수를 줄임으로서 저가형 구동 드라이브를 구현 할 수 있어 경제적으로도 이점이 있다.

그러나, SRM은 토크 리플이 크고 진동 소음이 크므로 이를 고려하여 설계가 이루어져야한다. 따라서, 본 논문에서는

SRM의 설계 변수중 회전자와 고정자의 극호각 비를 설계 변수로 선택하여, 극호각의 비에 따른 특성 변화 해석으로부터 토크 리플을 최소화시키고 평균 토크를 향상시킬 수 있는 전동기를 설계하였다. 본 논문의 해석 대상인 DSPSRM은 3차원 자기회로 경로를 가지므로 일반적인 2차원 유한요소해석으로는 그 특성을 정확하게 평가하기가 어렵기 때문에 3차원의 전자기 현상을 고려한 해석 기법이 필요하다. 따라서 본 논문에서는 3차원 유한요소해석을 이용하여 설계 파라메타 및 기자력의 변화에 따라 해석을 수행하였다. 초기 설계되어진 전동기는 돌출 구조를 가지지 않는 회전자의 극형상을 가지나 토크 특성을 향상시키기 위하여 회전자에 돌출 구조(pole shoe)를 가지는 회전자 형상을 제시하고 두 전동기에서 발생하는 토크 특성을 비교 분석하였다. 이의 해석 결과로부터 토크 특성을 향상시킬 수 있는 적합한 회전자 형상과 극호각을 결정하였다.

2. 해석 대상

2.1 해석 대상의 구조

DSPDRM은 방사상 자속과 축방향 자속을 동시에 이용할 수 있도록 'c'의 모양의 고정자 극과 'j'자 모양 또는 'l'자 모양의 회전자 극이 서로 다른 극수비를 갖는 일반적인 SRM과 달리 각각 동일하게 구성되어 있고, 단상 스위칭 전류에 의해 모든 고정자극이 동시에 여자되는 하나의 환형(ring type) 권선이 고정자극에 구성되어 있다. 또한 DSPSRM은 일반적인 단상 SRM과 마찬가지로 토크가 발생하지 않는 데드존(dead-zone)이 발생하므로 토크 리플이 크고 기동이

終身會員 : 한밭대학교 電氣工學科 教授 · 工博
接受日字 : 2002年 4月 29日
最終完了 : 2002年 8月 26日

발생하지 않는 문제점이 있다. 그러므로, 고정자극과 회전자극이 일치해 있는 위치에서 기동되지 않으므로 이를 방지하기 위하여 부가적인 정지용 자석(parking magnet)이 필요하고 회전자의 위치를 정확하게 검출하기 위한 위치센서와 센서용 영구자석이 필수적으로 사용된다. 따라서, 구조적으로 간단하고 견고하며 무엇보다 축방향 길이를 줄일 수 있다는 장점이 있고, 외륜 회전자(out rotor)의 형태로 되어 있기 때문에 구동전원 배치가 안정되며 특히 저속 팬 구동용으로 사용하기에 적합하다.

그림 1은 초기 설계된 전동기의 형상과 구조를 나타낸 것으로 고정자와 회전자는 동일한 6극을 가지면 회전자는 돌출 구조를 가지지 않는다. 그림 2는 고정자 형상과 동일하나 회전자는 'U'자 모양의 pole shoe를 가지는 돌출 구조이다.

표 1은 개념 설계로 현재 제작된 전동기의 주요 치수를 나타낸 것으로 B-type은 A-type의 치수와 모두 동일하며 회전자의 pole shoe 치수만 다르다.

표 1 해석 모델의 초기 설계된 주요 치수

Table 1 The main dimension of initial design for analyzed model

항목	표기	A-type	B-type
pole shoe	t	0	3.5
stator dia.	Ds	110	110
rotor dia.	Dr	125	125
stator axial length	L	28	28
stator slot length	l	10	10
airgap	g	0.5	0.5
pole arc	β_i	32	32
stator pole arc	β_s	25	25
rotor pole arc	β_r	23	23

2.2 해석 모델

DSPSRM의 구조가 각각의 회전자극과 고정자극에 대해 공간적으로 주기성을 갖기 때문에 주기경계조건을 주어 한 주기에 해당되는 영역만을 해석하여 전체의 특성을 파악할 수 있다. 그림 3와 4는 DSPSRM을 3차원 유한요소 해석하기 위한 각각의 해석 모델로 자기적 대칭성을 이용하여 한국분만을 모델링하였으며 각극이 만나는 경계면에 온주기를 부여하였다. 또한, 3차원 유한요소 해석을 위하여 사용되어진 요소는 4개의 절점으로 구성된 사면체(tetrahedra) 요소이며, 1극분의 해석 영역이 209532개의 사면체로 나누어져 있다. 해석은 정상상태로 가정하고 Magnet 5 프로그램을 이용하여 정자계 해석을 수행하였다.

그림 5는 비선형 해석을 위하여 각 모델의 회전자와 고정자에 사용되어진 M19 재질이다. 이 재질은 한국 규격(KS)에서 SE13C 재질의 B-H곡선과 자기적 특성이 거의 유사하다.

회전자의 위치에 따른 발생 토크는 회전자와 고정자의 극이 서로 1/3, 1/2, 2/3 일치하는 3위치에서 해석을 수행하여 각 위치에서의 발생 토크를 계산하였으며, 이 때 인가된 기자력은 50[AT], 100[AT], 140[AT]이다. 또한, 평균 토크는 그림 6과 같이 세 위치에서 계산된 토크를 합산하여 평균값을 구하였다. 고정자 극에 대하여 회전자 극의 정렬 위치는 다음과 같다.

- 정렬 위치 1 : 1/3 - T_1 ,
- 정렬 위치 2 : 1/2 - T_2 ,
- 정렬 위치 3 : 2/3 - T_3

표 2는 회전자와 고정자의 극호각의 비에 따른 특성의 변화를 예측하기 위하여 설정된 치수를 나타낸 것이다. 또한, 극호각의 변화에 따른 두 전동기의 특성을 비교하기 위하여 구동 드라이버에 의한 스위칭 온각과 오프각은 동일한 것으로 가정하였다.

본 DSPSRM의 3차원 정자계 해석을 수행하기 위한 자기 스칼라 포텐셜 Ω 를 계변수로 하는 지배방정식은 식 (1)과 같다[5].

$$\nabla \cdot (\mu \nabla \Omega) = 0 \tag{1}$$

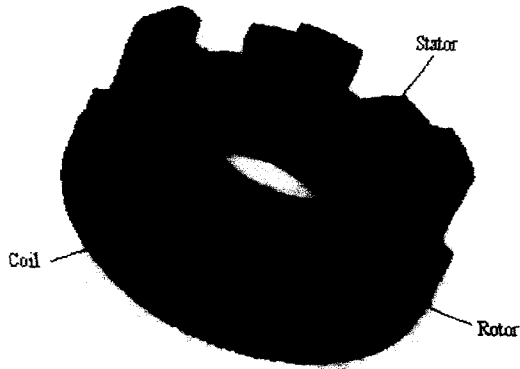


그림 1 회전자에 돌출구조를 가지지 않는 DSPSRM의 형상 (A-type)
Fig. 1 Configuration of DSPSRM without pole shoe(A-type)

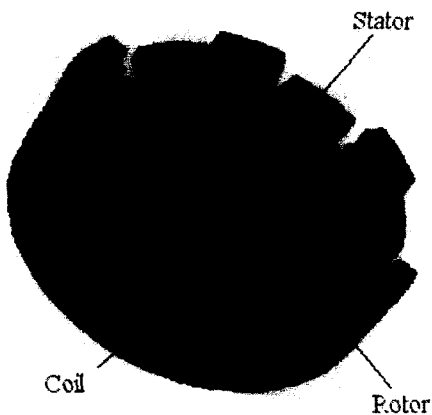


그림 2 회전자에 pole shoe형상의 돌출구조를 가지는 DSPSRM (B-type)
Fig. 2 Configuration of DSPSRM with pole shoe(B-type)

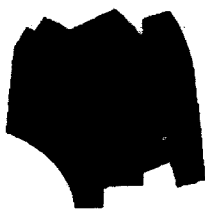


그림 3 A-type의 해석 모델
Fig. 3 Analysis of A-type

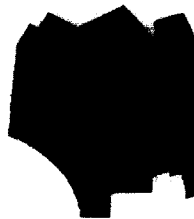


그림 4 B-type의 해석 모델
Fig. 4 Analysis of B-type

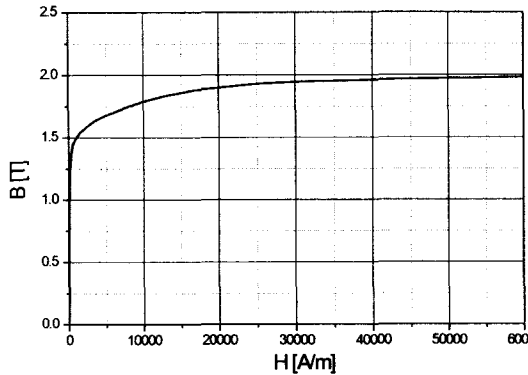


그림 5 M19 규소강판 재질의 B-H 곡선
Fig. 5 Typical B-H curve of M19 silicon steel core

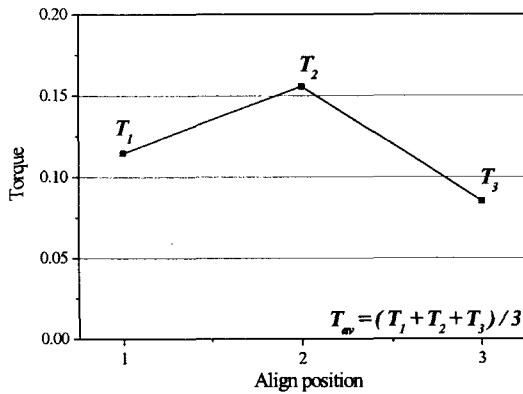


그림 6 평균 토크의 계산 방법
Fig. 6 Calculation of average torque

표 2 Stator와 Rotor Pole 폭의 비(β_s / β_r)

Table 2 The ratio of stator pole arc and rotor pole arc

Stator의 Pole 폭 (β_s)	Rotor의 Pole 폭 (β_r)				
	21[mm]	22[mm]	23[mm]	24[mm]	25[mm]
23[mm]	1.09	1.04	1.00	0.95	0.92
24[mm]	1.14	1.09	1.04	1.00	0.96
25[mm]	1.19	1.13	1.08	1.04	1.00
26[mm]	1.23	1.18	1.13	1.08	1.04
27[mm]	1.28	1.23	1.17	1.13	1.08

3. 해석 결과 및 고찰

3.1 해석 결과

해석 모델은 6개의 고정자극과 회전전극 중에서 여자된 1개의 고정자극과 회전자극에 대해서 주기경계조건을 주었으며, 또한 위에서 언급한 3가지의 위치에 대해 각각 3차원 해석 결과의 자속밀도 분포는 그림 7과 같다. 그림 7은 기자력이 100 [AT]일 때 회전자의 위치에 따른 A-type과 B-type의 자속밀도 분포를 나타낸 그림이다.

그림 8은 50 [AT], 100 [AT], 150 [AT]의 기자력을 인가하여 두 가지의 회전자 형태에 따른 토크 특성을 살펴보았다. 이때의 전동기 치수는 초기 모델과 같게 고정자의 극 폭(β_s)은 25[mm]이고, 회전자의 극 폭(β_r)은 23[mm]로 하였다. B-type 모델은 회전자 극에 돌극을 가지고 있으므로 돌극이 없는 구조에 비해서 단면적의 증가로 쇠교 자속량이 증가하기 때문에 평균 토크가 증가하였다. 그림 9는 두 모델에 대한 회전자의 위치에 따른 발생 토크를 비교한 것이다. 회전자와 고정자의 중첩각이 증가할수록 발생 토크가 증가한다. 또한, A-type 모델의 경우 중첩각이 증가할수록 토크의 증가 비율이 B-type에 비하여 감소하는데 이는 B-type에 비하여 단면적이 작아 포화되기 때문이다.

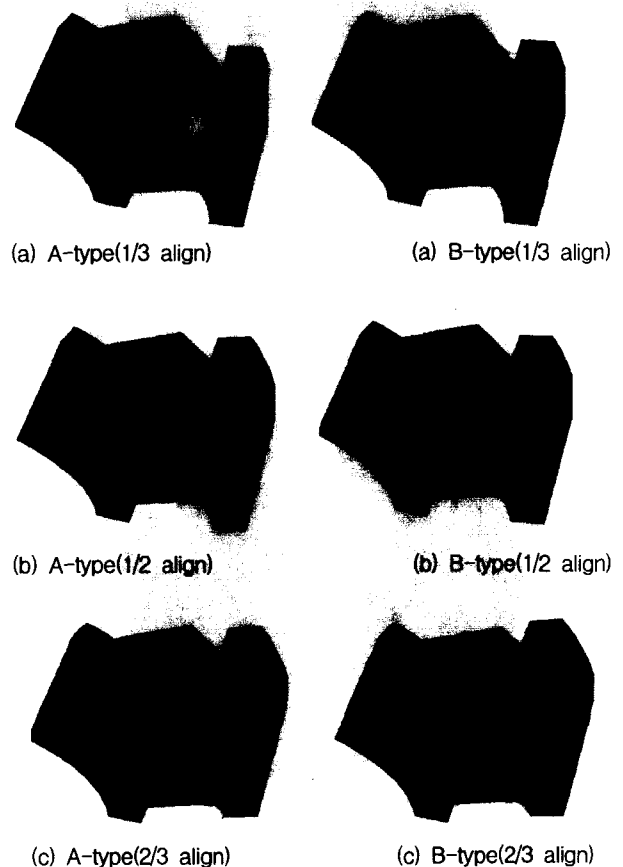


그림 7 3차원 자속 밀도의 분포
Fig. 7 Flux density and arrow plot of flux in 3-dimensional

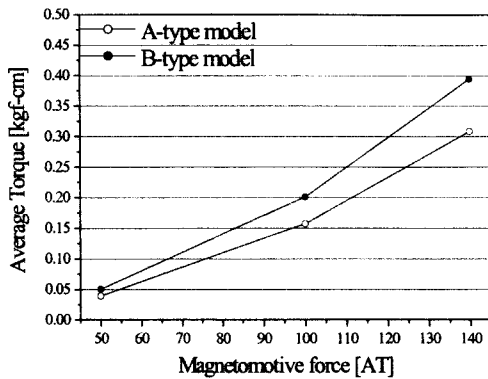


그림 8 A-type과 B-type 모델에 대한 기자력에 따른 평균토크 비교
 Fig. 8 Average torque comparison between A-type and B-type

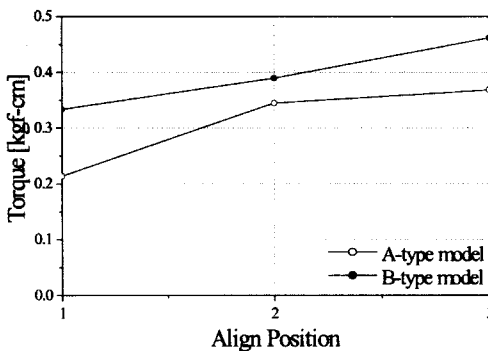


그림 9 140[AT] 기자력에서 회전자 위치에 따른 발생 토크
 Fig. 9 Torque as a function of rotor position when MMF of 140[AT] is excited

그림 10~12는 극호각의 폭 변화에 따른 각 모델의 평균 토크 양상을 나타낸 그림이다. 회전자와 고정자의 극호각 변화가 발생 토크에 미치는 영향이 두 모델에 동일한 양상의 결과를 보이고 있다. 즉, 발생 토크는 회전자의 극호각 크기에 상관없이 고정자의 극호각이 24[mm]일 때 최대 발생하고, 26[mm]에서 최소 발생 토크를 가진다. 또한, 최대 토크가 발생하는 극호각 24[mm]에서 회전자의 극호각이 증가할수록 토크는 감소함을 알 수 있다. 따라서, A-type model은 회전자의 극호길이 21[mm], 극호 비 1.14에서 평균 최대 토크가 발생하며 기자력에 따른 평균 토크는 기자력 50 [AT]일 때 0.0431 [kgf-cm], 기자력 100 [AT]일 때 0.1724 [kgf-cm], 기자력 140 [AT]일 때 0.3381[kgf-cm]이다. B-type model은 회전자의 극호길이 21[mm], 극호 비 1.14에서 평균 최대 토크가 발생하며 기자력에 따른 평균 토크는 기자력 50 [AT]일 때 0.0565 [kgf-cm], 기자력 100 [AT]일 때 0.2262 [kgf-cm], 기자력 140 [AT]일 때 0.4432[kgf-cm]이다. A-type model과 비교하여 돌극 구조의 회전자를 가지고 있는 B-type의 모델이 성능이 우수함을 알 수 있다.

4. 결 론

구조가 간단하고 견고하고 축방향 길이를 짧게 할 수 있고 유지보수가 어려운 곳에 적합한 DSPSRM의 토크 특성을 최대한으로 하는 고정자와 회전자 극에 폭을 결정하였다. 방사상

자속과 축방향 자속이 동시에 존재하는 복잡한 자기회로를 가지므로 3차원 유한요소해석법을 이용하여 회전자의 위치변화에 따른 토크 특성을 해석하였다. 또한, 본 논문에서 검토된 회전자의 모델은 6극으로 회전자에 돌극 구조를 가지지 않는 모델(A-type)과 회전자에 돌출된 돌극 구조(B-type)를 가지는 두가지 모델을 검토하여 비교하였다. 두 전동기 모두 회전자의 극호 길이 21[mm]에서 회전자와 고정자의 극호비가 1.14에서 최대 토크를 발생하였다. 또한, 회전자에 돌극 구조를 가진 모델은 기자력이 140[AT], 회전자의 극호길이가 21[mm], 극호비가 1.14에서 토크는 0.3381[kgf-cm]인 반면 회전자에 돌출된 돌극 구조의 평균 발생 토크는 0.4432[kgf-cm]로 약 25[%]의 향상을 보였다.

감사의 글

본 연구는 한밭대학교 교내학술연구비 지원에 의한 것입니다.

참 고 문 헌

- [1] P. J. Lawrenson, "Variable-speed switched reluctance motors," IEE Proc., Vol. 127, No. 4, pp. 253-265, 1980.
- [2] Wai S. Leung, James C. C. Chanm, "A New Design Approach for Axial Field Electrical Machines," IEEE Trans. on PAS, Vol. PAS-99, No. 4, 1996.
- [3] James C. C. Chanm, "Single-Phase switched reluctance motor," IEE Proc., Vol. 134. Pt. B., No. 1, 1987.
- [4] 이종한, 이은용, 조현길, "디스크형 단상 스위치드 릴럭턴스 모터의 기본 설계," 대한전기학회 추계학술대회 논문집, pp. 9-11, 1996
- [5] P. Silvester, "Three-Dimensional Magnetostatic Field Analysis of Electrical Machinery by the Finite-Element Method," IEEE Trans. on Power Apparatus and system, Vol. PAS-100, No. 8, pp.4007, 1981.

저 자 소 개



이 민 영 (李 敏 明)

1943년 4월 14일 생. 1971년 한양대 전기공학과 졸업. 1992년 동대학원졸업(공학박). 1994년-95년 뉴질랜드 오클랜드대학 명예연구교수 1998년-현재 당학회 평의원. 1996년-98년 한밭대학교 산업대학원장. 현재 한밭대학교 전기공학수.
 Tel ; 042-821-1097

E-mail : lmm@hanbat.ac.kr