

직립 기동 영구자석 동기 전동기의 영구자석 슬롯 형상 설계

김광희*, 김성안*, 박대근*, 장진학*, 조윤현
 동아대학교 전기공학과*

Design PM slot of Line-Start Permanent magnet Synchronous Motors

Kwang-Hee Kim*, Sung-An Kim*, Dae-Geun Park*, Jin-Hak Jang*, Yun-Hyun Cho
 Electrical Engineering, Dong-A University*

Abstract - 직립 기동 영구자석 동기 전동기(Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor : LSPM)는 기존 3상 유도기에 비해 높은 효율과 역율을 가진다. 또한 제어기를 사용하지 않고 기동 할 수 있다는 장점 때문에 펌프나 팬 등에 단순한 구동원에 적용 할 수 있는 전동기이다. 구조는 유도기와 달리 영구자석이 매입되기 때문에 이에 따라 영구자석의 위치와 크기에 따라 모터의 특성이 변화 한다. 본 논문에서는 실험 계획법과 FEM 유한 요소법을 이용하여 영구자석의 크기는 고정되어 있는 상태에서 영구자석 슬롯의 모양만을 설계 인자에 따라 해석하였다. 그리고 해석을 통한 결과를 비교 분석하여 직립 기동 영구자석 동기 전동기의 효율과 토크특성을 개선하고자한다.

1. 서 론

직립 기동 영구자석 동기전동기는 회전자 내부에 농형 바를 가지기 때문에 별도의 제어기를 사용하지 않더라도 일반 유도전동기와 같이 상용 전원의 공급만으로 기동은 물론 정속 운전이 가능하도록 설계되어있다. 기동시에는 유도전동기의 특성을 나타내지만 정격상태에서는 동기화되어 동기속도로 회전하고 영구자석을 계자로 사용하게 된다. 기동시에는 영구자석의 의한 브레이킹 토크가 존재하고 동기화 되면서 정속운전이 가능해진다.

본 논문에서는 펌프용 7.5kW 2극 직립 기동 영구자석 동기전동기의 영구자석 슬롯 형상에 따른 특성을 실험계획법을 이용하여 설계 인자를 설정하고 그에 따른 모델을 분류하였다. 그리고 선정된 모델을 유한요소법을 이용하여 해석하고 그에 따른 결과를 비교하여 효율을 개선하고 모터 자체의 소음과 진동을 줄일 수 있는 영구자석 슬롯 형상을 도출하였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

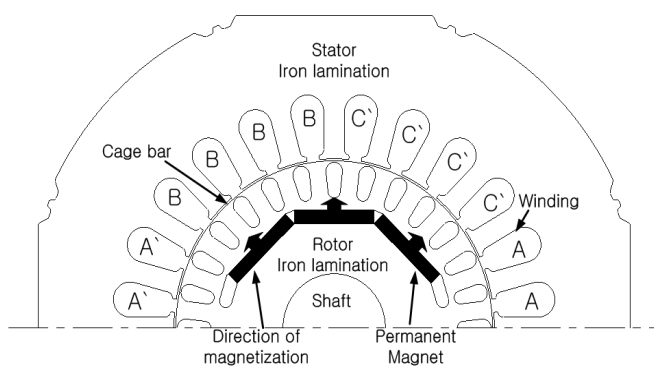
본 논문은 7.5kW 3상 직립 기동 영구자석 동기 전동기를 설계 및 분석 하였다. 고정자 및 회전자의 농형 바는 상용의 7.5kW 2극 3상 유도전동기의 구조를 그대로 사용하였으며 그림 1에 나타내어 있다. 그림1은 자석 슬롯의 형상이 최적화 되기 전의 그림을 나타낸 것으로 자석 슬롯의 형상은 사다리꼴의 형태를 띠고 있다. 그림 2는 설계인자를 나타낸 것으로 유한요소법과 실험 계획법을 통하여 두 모터의 성능을 검증하고자 한다. Table 1은 시작품의 주요 사양을 나타내고 있다. 회전자의 바는 알루미늄이고 바의 개수는 28개, 영구자석의 크기는 고정되어 있으며, Nd-Fe-B계로 잔류 자속 밀도 1.18[T], 보자력 890[kA/m], 최대 에너지 280[kJ/m³]을 갖는 N35EH 재질을 사용하였으며 착자 방향은 그림 1에 도시하였다.

<Table 1> Analysis model specifications

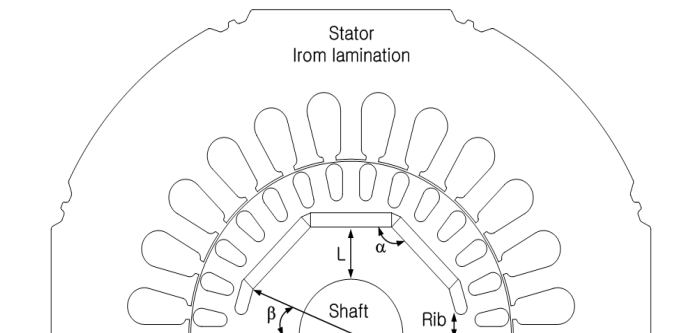
	Item	Dimensions
Spec.	Output Power [kW]	7.5
	Voltage {V}	380
	Frequency [Hz]	60
	Rated Speed [rpm]	3600
	Rated Torque [Nm]	19.90
Stator	Number of Slot	24
	Outer Diameter [mm]	195.1
	Inner Diameter [mm]	100.1
	Number of Pole	2
Rotor	Air gap [mm]	0.6
	Outer Diameter [mm]	98.9
	Number of Bar	28
	PM width [mm]	25
	PM thickness [mm]	4
	PM material	NdFeb

2.2 실험계획법의 설계 인자 설정

자석 슬롯의 최적화를 위해 본 논문에서는 실험계획법을 통하여 해석하였다. 실험계획법은 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로 제품 특정특성에 영향을 미치는 요인들이 어떤 것들인지를 알아보기 위하여 실험의 배치와 실시를 어떻게 하고, 또 얻어진 데이터를 어떠한 통계적 방법으로 분석을 하는지에 관한 이론이다. 이와 같은 실험계획법을 이용하면 이상 변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 효율적으로 선정, 그 효과를 수량적으로 측정할 수 있게 된다.[1] Table 2는 실험계획법의 설계 인자 범위를 나타낸 것이다. Table 3은 L, α, β 설계 인자 범위에 따라 6개 Type의 설계 모델을 만들었고 각 모델의 설계 인자 수치를 도표화 하였다. 그림 2에서는 설계 인자의 변화를 도시화 하였다. L은 Shaft와 자석 간의 거리를 나타내며 α는 중앙에 위치한 자석과 측면에 위치한 자석간의 이루는 각을 나타내었다. β는 측면 자석의 밑단과 전동기의 회전자 중심과 이루는 각으로써 자석의 위치를 나타내기 위해 표현하였다. 이렇게 3개의 설계 인자를 선정하고 최적의 효율을 가지는 영구자석 슬롯 모델을 선정하였다. 그 다음 소음과 진동을 줄이기 위해 영구자석 슬롯간의 Rib을 변화시켜가며 해석하여 토크리플에 대한 결과를 비교 및 분석 하였다.



<그림 1> LSPM 동기전동기의 1/2 횡단면



<그림 2> 영구자석슬롯의 설계 인자

<Table 2> Design variable

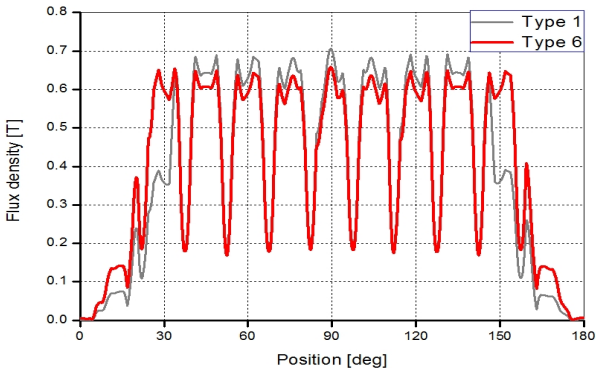
Design variable	Item of design variable	Experiment range	Unit
L	Length from slot to shaft	[15 ~ 6]	[mm]
α	Slop angle of side PM segment	[135 ~ 45]	[deg]
β	Position of side PM	[13 ~ 24]	[deg]
Rib	Air duct gap	[2 ~ 6]	[mm]

<Table 3> Design Models

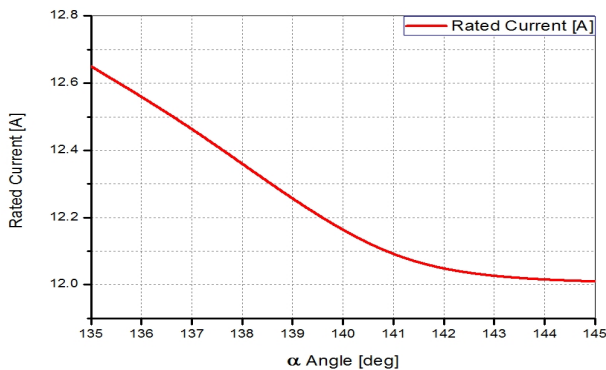
Items	α [deg]	β [deg]	L[mm]
Type 1	135	24	14.82
Type 2	137	22	13.77
Type 3	139	20	12
Type 4	141	18	10.13
Type 5	143	16	8.21
Type 6	145	13	6.23

2.3 정상 상태의 특성

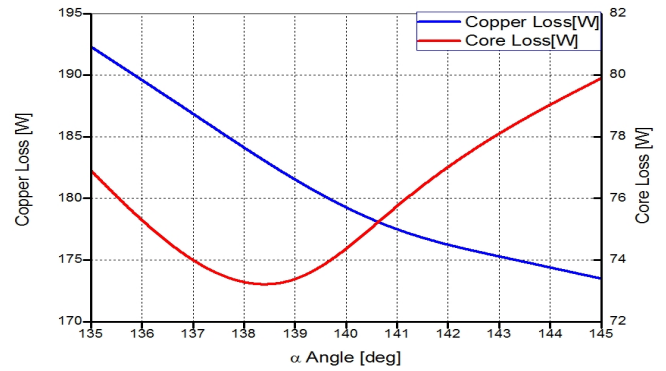
자석 슬롯을 제외한 모든 사양을 기존 유도전동기의 사양과 동일하게 설정한 다음 유한요소법을 이용하여 결과 값을 비교하여 보았다. 그림 3은 설계인자 범위의 최대값과 최소값, 즉 Type1과 Type6모델의 공극 자속 밀도를 비교한 결과이다. 두 모델이 비교해 보았을 때 β 각이 점점 작아짐에 따라 측면의 영구자석의 위치가 변화하게 되고 영구자석의 극 피치가 넓어짐에 따라 공극자속 밀도 역시 넓게 분포되고 크기가 작아짐을 볼 수 있다. 그림 4는 α 각에 따른 정격상태의 전류의 크기를 나타내고 있으며 α 각이 커지고 영구자석과 Shaft간의 거리가 짧아짐에 따라 전류의 크기가 작아지는 것을 볼 수 있다. 그림 5는 α 각에 따라 변화하는 손실의 크기를 나타 내었다. 전류가 작아지고 고정자 권선의 저항의 크기는 고정 되어있으므로, 동손은 고정자 권선의 전류의 크기에 비례하여 작아지는 것을 볼 수 있다. 그리고 철손은 Type 3 부근에서 최소값을 보였으며, 와전류손실은 모든 해석 모델에서 평이 하였다. 그러므로 Type 3이 최소값의 손실을 가지며 최고의 효율을 가진다.



<그림 3> α 각에 따른 공극 자속 밀도



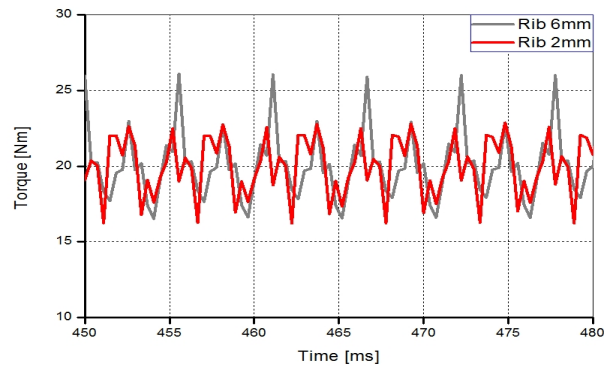
<그림 4> α 각에 따른 정격 전류



<그림 5> α 각에 따른 손실 곡선

토크리플이 속도리플의 원인이 되고 동기속도 이상이나 이하의 속도로 회전하게 되면 농형 바에 유도기전력이 형성되고 전류가 흐르게 되어 또 하나의 손실로 작용하게 된다. 뿐만 아니라 전동기 자체의 소음과 진동의 원인이 되기도 한다. 따라서 토크리플을 줄이기 위해 자석 슬롯간의 Rib크기의 변화를 주어 해석해 보았다.

그림 6은 자석 슬롯간의 거리에 따른 토크 리플을 나타 내었다. 자석 슬롯간의 거리(Rib)가 짧아짐에 따라 토크리플 또한 줄어드는 것을 볼 수 있다. 풍손과 마찰손등의 기계손을 입력의 2.5%로 가정하고 최적화된 영구자석슬롯이 매입된 직립 기동 영구자석 동기전동기의 효율은 최적화 되기 전 슬롯 형상보다 높은 것을 알 수 있었다.



<그림 6> Rib에 따른 Torque ripple

3. 결 론

본 논문에서는 7.5kW 2극 직립 기동 영구자석 동기전동기의 효율 및 성능향상을 위해 유한요소법과 실험계획법을 이용하여 최적 설계를 연구하였다. 설계 모델의 사양은 기존의 유도기형태를 그대로 사용하였으며 본 연구에서는 자석슬롯의 형상만을 고려하여 효율향상에 중점을 두고 연구하였다.

향후 연구에서는 직접적인 실험을 통한 데이터 비교 분석이 필요하며, 효율적인 측면뿐만 아니라 더 나아가 영구자석슬롯의 형상에 따른 진동 및 소음에 대한 연구와 영구자석의 두께, 넓이 및 공기 덕트에 위치에 따른 기동시, 정상 상태 및 과도 상태의 특성들에 대하여 비교 분석에 대하여 연구 할 것이다.

감사의 글

본 연구는 2011년도 지식경제부의 재원으로 한국에너지 기술평가원 (KETEP)의 지원을 받아 수행한 연구 과제입니다.

(No. 2010T100200243)

[참 고 문 헌]

[1] 오세영, 김승주, 정대성, 이철규, 이형우, 이주, “실험계획법을 이용한 단상 유도형 동기전동기의 최적 설계”, 대학전기학회논문지, v.56, no.8, pp.699-7041, 2007년 4월.