

단상 유도형 동기 전동기의 설계 및 파라미터 고찰

이진현, 정대성, 오세영, 고성철, 배재남, 이 주
*한양대학교 전기공학과 *

A Study on the Design and the Characteristics in Single-phase Line-start Permanent Magnet Motor

Jin-hun Lee, Dae-sung Jung, Se-young Oh, Sung-chul Go, Jae-nam Bae, Ju Lee
*Dept. of Electrical Eng. at Hanyang Univ

Abstract - The purpose of This paper is the optimal design of a single-phase LSPM(Line-Start Permanent magnet Motor). A single-phase LSPM has a permanent magnet in the rotor that is same as induction motor. For that reason, the transient characteristics are very different from an induction motor. Therefore, we need the PM design to consider a transient and steady-state characteristics. In this paper, we designed a single-phase LSPM that has a high power and a good starting characteristics, and analyzed the performance of designed LSPM by varying each parameters. Finally, we examined and compared the simulation results and the prototype motor's characteristics.

을 보여주고 있다. 농형바의 형상은 단상유도기의 형상을 그대로 사용하였으며, 농형바의 개수는 기동과 출력을 고려하여 16개로 선정하였다.

Flux barrier의 설계는 참고문헌 [5]를 바탕으로 자속의 누설이 최소가 되도록 설계하였다. Rib의 크기는 자속의 누설을 억제하기 위해 가능한 작게 설계해야 하지만 기계적인 면을 고려한다면 Rib의 크기를 너무 작게 할 수 없어, 제작 가능한 최소 치수인 0.23mm로 설계하였다. 또한 영구자석에 의한 공극자속의 분포가 보다 정현적이 될 수 있도록 Flux barrier쪽의 농형바를 flux barrier에 최대한 가깝게 하여 자속이 포화되도록 설계하였다.

1. 서 론

단상 LSPM은 회전자에 영구자석이 삽입되므로 자기 저항 차에 의한 릴럭턴스 토오크가 발생하고 과도 상태 시의 인덕턴스의 변화에 의한 릴럭턴스 토오크 변화가 기동특성에 큰 영향을 줌으로 파라미터의 변화를 정량적으로 정밀하게 산정하여 기동 특성을 만족하는 구조를 형성해야 한다. 또한, 기동에서 정상상태 도달 할 때까지 과도상태에서는 유도기의 특성으로 기동특성을 만족해야하나 과도 상태 시 영구자석에 의한 breaking토크와 cogging토크가 존재하므로 기동 부하가 큰 기동 전동기의 경우 기동이 이루어 지지 않는 경우가 생긴다 [1],[2].

즉, 출력을 높이기 위해 영구자석을 크게 하면 기동이 이루어 지지 않고 기동을 높이기 위해 영구자석을 작게 하면 출력이 떨어지는 trade off의 관계를 갖고 있다. 따라서 기동과 출력을 동시에 고려한 영구자석 설계가 필요하다[3],[4].

이에 본 논문에서는 출력과 기동을 동시에 고려한 최적 설계를 위해 DOE와 유한 요소법을 사용하였고 최적 설계한 모델을 제작하여 실험함으로써 본 연구의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

본 논문에서는 기존의 단상 유도기의 고정자 부분은 그대로 사용하고, 회전자 부분만을 설계하는 것에 목적을 두고 있다. 회전자 설계의 중요 변수는 전동기의 중요특성을 결정하는 영구자석의 설계와 자속을 효과적으로 사용하기 위한 flux barrier의 설계이다. 표 1에 기존의 단상 유도기와 설계된 LSPM의 제원을 나타내고 있다.

2.1 Flux barrier의 설계

그림 1은 본 논문에서 설계된 단상 LSPM 해석모델

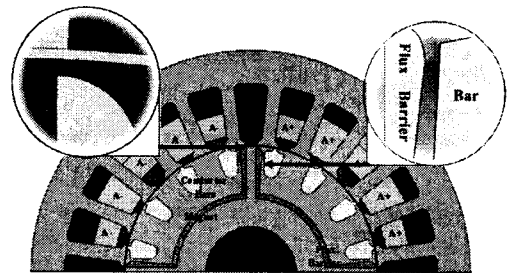


그림 1. 해석 모델

표 1 단상 유도기와 설계된 LSPM의 제원

Specification	단상 유도기	
	단상 유도기	LSPM
Input voltage[V]	220	220
Fullout torque[Nm]	0.33	0.66
Rated speed[rpm]	1600	1800
Stack length [mm]	45	45
Frequency[Hz]	60	60
Number of pole	4	4
Residual flux density [T]	None	1.12 (20℃)
Length [mm]	0.15	0.15

2.2 자기 등가회로를 이용한 영구자석 Size 설계

영구자석의 설계는 자기 등가회로법을 이용하였다. 본 논문에서 설계하는 단상 유도형 동기기는 기존 단상 유도기 토크의 2배가 되는 것을 목표로 하여, 그림 2와 3의 자기 등가회로를 사용하였다. 그림 2의 각 극의 농형바에 의해 나뉘지는 5개의 자속 path에서 R_{r1} 과 R_{r5} 의 비 투자율은 1000으로 가정하였고, R_{r2} , R_{r3} , R_{r4} 의 비 투자율은 포화되지 않는다는 가정으로 8800으로 선정하였으며, 공극을 제외한 나머지 부분의 투자율은 무한대로 가정하였다. 참고로 core의 재질은 s60이다.

이 결과를 바탕으로 구해진 영구자석의 단면적은 약

400mm²였다. 이 단면적을 표현하는 자석외경 및 자극 각도를 조절하며, 몇 번의 시뮬레이션을 실행한 결과 자극면적이 같음에도 불구하고 자기기동이 되지 않거나 발생하는 토크가 현저히 떨어지는 현상이 발생하였다. 이 결과를 바탕으로 안정적인 기동을 하며, 발생하는 토크가 설계치에 적합한 결과를 찾기 위해 실험계획법(DOE)을 사용하였다.

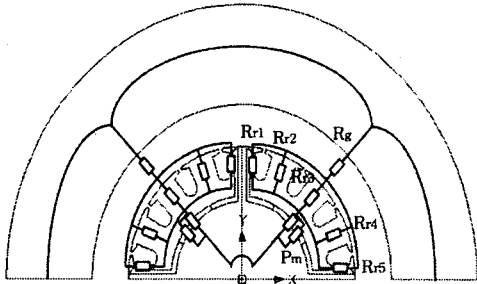


그림 2 자기 동가회로를 위한 flux도

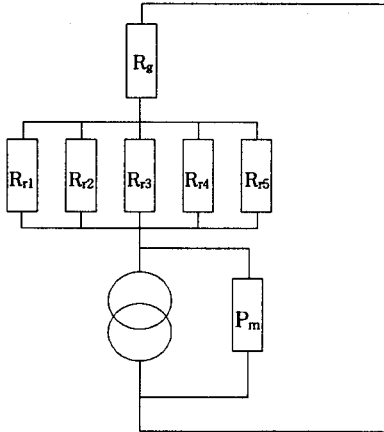


그림 3 LSPM의 자기동가회로

다음으로 실험계획법을 실시하기 위해 단상 유도형 동기전동기의 각 인자들이 전동기의 특성에 어떠한 영향을 주는지를 알기 위해 자극각도, 영구자석의 두께, 영구자석이 회전자 내에 매입되어 있는 깊이(영구자석 외경), 농형바의 저항 값의 4개의 인자를 설계 변수로 선정하여 이 설계 변수의 조합으로 나오는 해석 모델을 개수를 최소화 하고(DOE), 이렇게 줄어든 모델들을 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 표 2는 설계 변수들의 인자와 그 인자들의 수준을 나타내고 있으며 그림 4는 선정된 4개의 설계 변수들이 기동시간과 토크에 미치는 영향도와 그 경향을 나타내고 있다.

표 2 설계 변수의 인자와 인자 수준

Design factors	Value		Design level
	Min	Max	
Magnet arc [deg]	30	35	2
Magnet thickness [mm]	1	2	2
Magnet deep [mm]	14	15	2
Resistant [Ω]	1	2	2

DOE를 이용한 결과에서 기동시간이 원활히 이루어지면서, 최대의 토크를 내는 모델을 선정된 결과 자극각도 30°, 자석두께 1mm, 자석외경 16mm, 농형바의 저항 1(기본값)인 모델이 최적모델로 선정되었다.

2.3 특성해석

그림 5는 설계된 모델을 제작한 단상 LSPM의 로터와 하우징에 삽입된 모습 보여 주고 있다. Flux barrier는 다이캐스팅 할 때 알루미늄 주물이 삽입되지 않도록 수지로 채웠다.

설계된 모델의 타당성을 검증하기 위해 실험을 실시하였다.

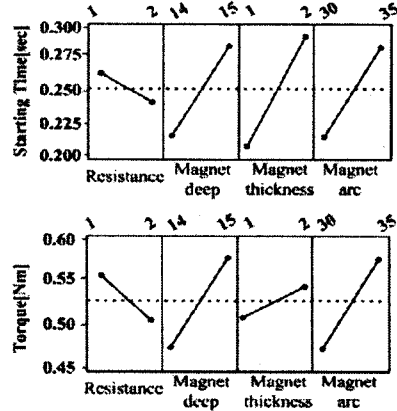


그림 4 설계인자 변화에 따른 경향분석

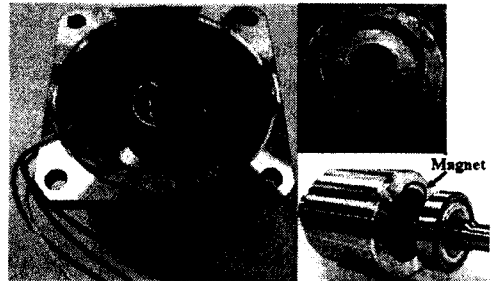


그림 5. 제작된 모터의 외형

2.3.1 역기전력

그림 6은 시뮬레이션과 실험의 역기전력을 나타내고 있다. 시뮬레이션의 주 권선과 보조권선의 역기전력은 각각 155(V), 175(V)였으며, 실험한 주 권선과 보조 권선의 역기전력은 각각 170(V), 178(V)였다.

그림 6에서 보는 것과 같이 시뮬레이션 결과와 실험 결과는 비교적 잘 맞는다. 역기전력은 다이아몬드 미터를 정격속도 1800rpm으로 회전시키고 주권선과 보조권선에 오실로스코프의 프로브를 연결하여 역기전력을 측정하였다. 측정된 역기전력과 시뮬레이션 결과를 비교했을 때 약간의 오차가 있으며, 이것은 측정상의 오차로 볼 수 있다.

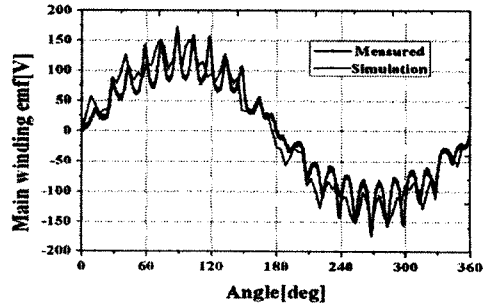


그림 6. 설계치와 실제작 모델의 역기전력 비교

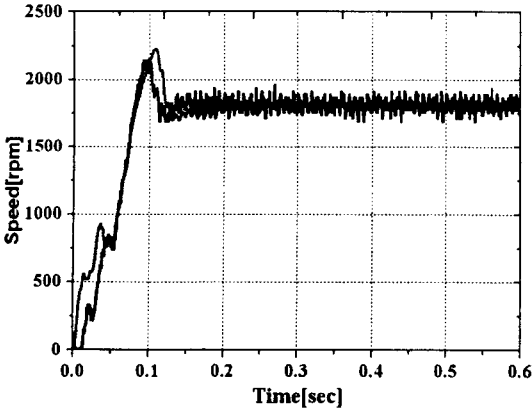


그림 7. 설계치와 실제작 모델의 기동파형 비교

2.3.2 속도 응답

그림 7은 무 부하 상태에서의 기동특성을 나타내고 있으며, 시뮬레이션 결과와 실험결과는 잘 맞는다. 속도를 측정하는데 있어 엔코더를 모터에 부착하고 엔코더에서 나오는 디지털 신호를 DSP로 신호연산을 한 뒤 D/A 컨버터를 통해 오실로스코프로 측정하였다. 과도상태에서 정상상태로 진입 할 때에 큰 오버슈트가 발생하는 것을 볼 수 있다. 이것은 회전자 초기 위치 따라 차이가 있으며 동기화에 진입 할 때에 영구자석에 의해 발생하는 breaking torque의 영향 때문이다. 이 breaking torque는 회전자의 초기 위치에 따라 양의 값일 수도 있고, 음의 값일 수도 있다. 양의 값이 작용 할 때는 오버슈트가 발생하며, 음의 값이 작용 할 때는 오버슈트가 없이 동기화에 진입한다.

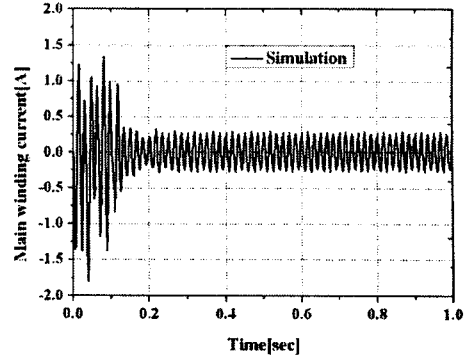
2.3.3 Results of current versus time

그림 8은 무부하 기동시 주 권선과 보조권선의 전류 파형을 나타낸다. 무부하시 주권선과 보조권선의 전류는 220V, 60Hz 상용전원을 인가하여 오실로스코프의 전류 프로브로 측정하였다. 실험결과와 시뮬레이션 값의 차이는 오실로스코프의 전류 프로브의 오프셋 값과 측정상의 오차 그리고 역기전력이 약간 감소하여 전류값이 상승한 것으로 사료된다.

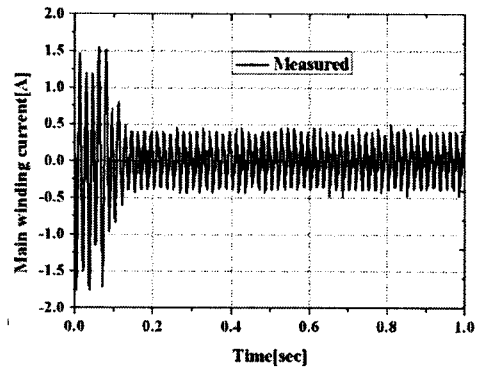
3. 결 론

본 논문에서는 에너지 절약 및 saving 차원에서 전동기의 고 효율화 요구에 부응할 수 있는 단상 LSPM을 설계하고 시제품을 제작하였다. 본 설계에서는 단상 유도기의 고정자, 베어링, 하우징, 샤프트 등을 그대로 사용하고 단상 LSPM의 로터만 최적 설계하는 방식으로 진행하였다. 단상 LSPM 로터에 삽입되는 영구자석은 실험계획법을 이용하여 기동 시간과 정상상태에서의 출력을 동시에 만족하는 영구자석의 위치, 그리고 영구자석의 사이즈를 설계하였다. 또한 영구자석의 자속을 유효하게 사용하기 위해 Flux barrier를 설계 하였으며 Rib으로 누설되는 자속을 줄이기 위한 농형바 최적의 위치를 선정하였다.

본 설계의 타당성을 검증하기 위해 실험을 하였으며 실험결과는 잘 맞았다. 본 연구의 결과로부터 동기화가 가능한 영구자석의 두께, 위치에 따른 동특성을 예측할 수 있었다.



(a) 주 권선의 전류 시뮬레이션 파형



(b) 주 권선의 전류 실험 파형

그림 8. 주권선 전류의 시뮬레이션과 실측파형

감사의 글

본 연구는 에너지 관리공단(Korea Energy Management Corporation)의 에너지 자원이기술개발사업(The Energy Technology R&D)의 지원에 의해 수행 되었습니다.

[참 고 문 헌]

- [1] Andrew M. Knight and Catherine I. McClay, "The Design of High-Efficiency Line-Start Motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 36, no. 6, pp.1555-1562, November/December 2000.
- [2] Byung-Taek Kim, Young-Kwan Kim and Duk-Jin Kim, "Analysis of Squirrel Cage Effect in Single Phase LSPM," KIEE International Transactions on EMECS, Vol. 4-B No.4, pp. 190~195, 2004
- [3] Kazumi Kurihara and M.Azizur Rahman, "High Efficiency Line-Start Interior Permanent Magnet Synchronous Motors," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 40, no.3, pp.789-796, May/June, 2004.
- [4] M.A.Rahman and A.M. Osheiba, "Performance for a large line-start permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Energy Conversion, vol.5, no.1, pp.211-217, 1990.
- [5] 정대성, 이주, 이철직, "단상 유도동기 전동기(LSPM)의 과도 특성에 관한 연구", 대한전기학회, 631-632, July, 2006