

기동과 효율을 고려한 단상 LSPM의 베리어 설계에 관한 연구

김원호, 이 주  
한양대학교 전기공학과

A study on the Barrier Design Considering Start performance and Efficiency in Single-phase Line-start Permanent Magnet Motor

WonHo Kim, 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, magnet is operated by breaking torque in starting region and alignment torque in driving region. Therefore, we need the design process considering the trade-off relationship.

In this paper, we propose the design process of a single-phase LSPM for a high starting torque and efficiency with equivalent circuit and FEM. And we use Taguchi Method for considering tolerance in manufacture. Finally, we compared the LSPM that is designed in this paper and conventional induction motor.

1. 서 론

단상 유도형 동기 전동기(LSPM)는 직입기동이 가능하다는 점에서 별도의 제어가 필요 없고 기존 단상 유도기와 비교해 고정자는 그대로 사용하면서도, 최대 토크와 효율은 더욱 향상시킬 수 있다.

그러나 회전자자의 형상에 따라 영구자석의 브레이킹 토크에 의해 기동이 되지 않거나, 동기 속도까지 도달하지 못하는 경우가 빈번하다. [1],[2] 또한 소형으로 갈수록 설계 파라미터의 작은 치수 변화에도 큰 성능 차이를 보여, 제작상 공차에 강건한 설계가 이루어지지 않을시 우리가 원하는 성능을 낼 수 없다. [3],[4]

이에 본 논문에서는 같은 정격에서 기동과 효율을 동시에 고려한 최적 설계를 위해 DOE와 유한요소법을 사용하였다. 특히 공차에 강건한 설계를 위해 다푸찌 메소드를 사용하여 제작 공차를 고려하였다. 또한 같은 고정자를 사용하는 기존 유도기와 LSPM과의 성능 비교를 통해 본 연구의 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2.1 LSPM의 구조

그림 1은 LSPM의 구조를 나타내고 있다. 본 논문에서는 기존 전동기와와의 호환성을 위해 60W급 단상 유도기 모델의 고정자와 권선을 그대로 사용하고, 회전자 부분만을 설계하였다. 영구자석은 일자 형태로 역기전력을 보다 정현적으로 하기 위해 한 극에 자석 두 개를 방사 방향으로 배치하고 위치는 농형바 엔드링부분을 넘지 않는 선에서 최대한 붙이는 구조를 택한다. 또한 베리어와 영구 자석 모두 농형바가 두께가 되는 부분을 침범하지 않는 범위에 놓이는 구조를 택함으로써 간단한 제조 공정으로 생산될 수 있도록 하였다. 표 1에 설계할 LSPM의 제원과 목표 사양을 나타내었다.

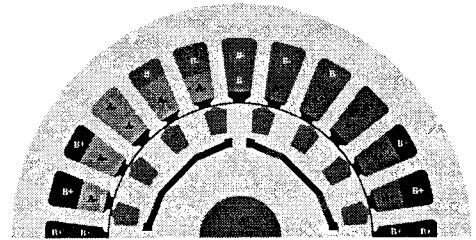


그림 1. LSPM의 구조

표 1. LSPM의 제원과 목표 사양

구분	사양 [단위]
Input Voltage	220 [V]
Frequency	60 [Hz]
Number of Pole	4
Number of Slot / Rotor bar	24 / 16
Stack Length	45 [mm]
Magnet Material / Steel Material	NdFeB / S60
Magnet Residual Flux Density	1.12 [T]
Rated Speed	1800 [rpm]
Rated Torque	2.5 [Nm]

2.2 회전자 설계 순서

회전자 설계 순서는 다음과 같다. 먼저 유도기의 자기 등가회로를 이용하여 회전자 농형바를 설계한다. 농형바는 기동 토크에 큰 영향을 미치며, 구동시에는 동기속도 이탈을 막기 위한 댐핑 역할만을 하기 때문에 기동 토크를 최대화 하는 형상으로 설계한다. 이 때 일반적인 단상 유도기의 슬롯과 농형바의 개수 조합은 회전자자의 치가 얇아 영구자석에 의한 자기 포화의 가능성이 크기 때문에 농형바 개수를 기존 유도기보다 작게 가져간다.

다음으로 영구자석 사이즈를 결정한다. 영구자석이 크면 최대토크는 커지나, 기동시 브레이킹 토크로 인해 기동토크를 줄이는 Trade off의 관계에 있다. 본 논문에서는 LSPM의 최대 문제 중 하나인 기동토크의 개선을 위해 영구자석 사이즈를 정격을 만족하는 범위에서 최소화 되도록 하였다. 이를 통해 기동토크를 확보하면서, 영구자석 사용량을 줄여 제작 단가도 낮추는 효과를 거둘수 있다. 사이즈 설계 방법으로 베리어를 고려한 자기 등가회로를 통해 러프한 설계를 한다.

마지막으로 베리어 설계는 DOE와 FEM을 통해 목적 함수를 효율과 기동특성, 제작시 공차에 강한지 여부로 놓고 다푸찌 메소드를 이용하여 결정한다.

이를 통해 나온 모델의 기동 특성, 효율과 최대 토크 등을 계산하여 목표 사양에 맞지 않을지 재설계를 통해 최종 모델을 도출한다. 그림 2는 회전자 설계 순서도를 간략하게 나타내고 있다.

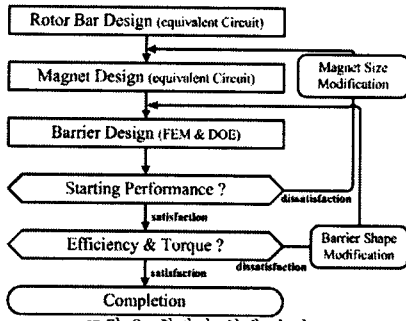


그림 2. 회전자 설계 순서도

### 2.3 다꾸찌 메소드를 이용한 베리어 설계

영구자석이 들어간 회전자에서 베리어의 역할은 영구자석에서 나온 자속이 누설되지 않고, 권선과 채교하도록 하는 역할을 한다. 효율적으로 설계된 베리어는 영구자석의 사이즈를 줄이고, 회전자의 관성 모멘트를 줄이는 효과가 있다. 또한, 제어가 없고 소형이기 때문에 0.1mm의 치수 차이에도 눈에 띄는 성능 변화를 보인다. 따라서 베리어 설계 시에는 제작시 변할 수 있는 공차부분까지 고려한 설계가 이루어져야 한다.

이에 본 논문에서는 기동 성능과 효율, 제작시 공차까지 고려한 베리어의 설계를 제안한다. 그 중, 제작시 공차는 설계자가 제어할 수 없는 인자임으로 이를 고려하기 위해 실험계획법을 이용한 설계중 다꾸찌 메소드를 이용하였다. 이는 제어할 수 없는 인자의 경우는 오차인자(노이즈)로 두고, 제어 가능한 요소를 조절하여 신호대 잡음비를 통해 노이즈에 강한 인자를 설계할 수 있게 한다.

먼저 목적함수는 기동시간의 최소화, 정격시 효율의 최대화로 두고 노이즈 인자는 3수준으로 제작시 공차로 고려하였다. (-0.1mm, 0mm, 0.1mm) 설계 변수는 베리어와 관련된 4가지 파라미터로 모두 3수준으로 결정하였다.

파라미터와 치수의 선정 기준은 누설과 포화가 의심되는 영역과 그와 관련된 부분으로 한정하였다. 일반적인 영구자석형 기기라면 얼라이먼트 토크가 클수록 좋기 때문에 베리어의 누설을 최소화하는 방향으로 선정하면 되지만, 기동시 브레이크 토크로 작동하여 Trade off 관계가 있는 단상 LSPM이기 때문에 이런 파라미터의 선정 기준이 의미가 있다.

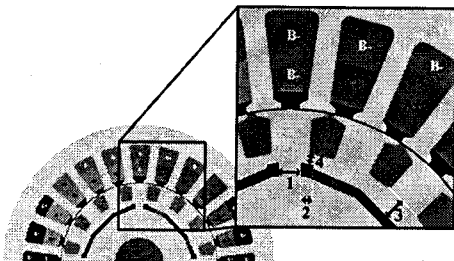


그림 3. 베리어 설계 변수

표 2. 설계변수와 노이즈 선정 치수

구분	파라미터 [단위]			
설계 변수	1 베리어간 거리 [mm]	1.8	2.2	2.6
	2 베리어 끝단 두께 [%]	25	50	75
	3 베리어와 농형바의 거리 [mm]	1.5	2.0	2.5
	4 리브 두께 [mm]	1.0	1.2	1.4
노이즈	제작 공차 [mm]	-0.1	0	0.1

표 3. 직교배열법에 의한 실험 순서

	변수 1	변수 2	변수 3	변수 4
실험1	1.8	25	1.5	1.0
실험2	1.8	50	2.0	1.2
실험3	1.8	75	2.5	1.4
실험4	2.2	25	2.0	1.4
실험5	2.2	50	2.5	1.0
실험6	2.2	75	1.5	1.2
실험7	2.6	25	2.5	1.2
실험8	2.6	50	1.5	1.4
실험9	2.6	75	2.0	1.0

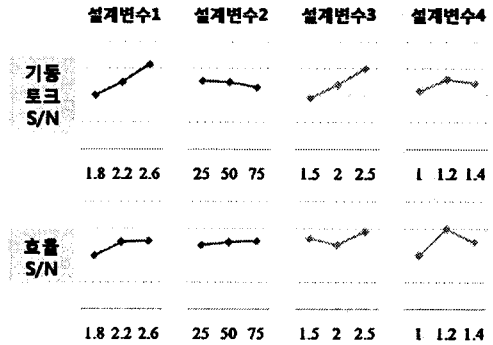


그림 4. 기동토크와 효율의 S/N Main Effect Plot

각 공차별로 9번씩 총 27번의 실험을 FEM으로 수행하였다. 기동 토크와 효율 모두 노이즈에 대하여 좋은 성능을 나타내는 것이 중요하므로, 신호대 잡음비는 식 (1)과 같은 망대특성을 사용하였다.

$$S/N = -10 \log_{10} \frac{1}{n} \sum_{i=1}^n \frac{1}{y_i^2} \quad (1)$$

표 3은 직교배열법에 의한 실험계획법의 순서를 나타낸 것이며, 그림 4는 S/N의 Main Effect Plot을 나타낸 것이다.

결과를 확인해 보면 기동 토크에 가장 큰 영향을 미치는 인자로는 설계변수 1과 3 정도로 압축할 수 있다. 또 효율과 가장 관련있는 인자로는 설계변수 4를 들 수 있다. 위 결과에서 특이한 것은 설계변수 1번과 4번의 경우 작으면 작을수록 누설되는 자속이 작아져 효율이 향상할 것으로 예상했는데 결과는 그렇지 않았다. 이유는 리브가 작아져 누설이 작아지면 쇄교자속이 많아져서 출력에 도움이 되지만, 큰 토크 리플로 인한 동기 속도의 리플이 발생하여 댄핑을 위한 2차측 동손이 커지는 것을 알 수 있었다. 그러므로 LSPM의 경우 효율을 높이기 위해서는 누설 뿐 아니라 토크 리플과의 관계도 중요하다는 것을 알 수 있다.

설계 변수 2는 기동토크와 효율이 Trade off 관계에 있지만 큰 영향력이 아니므로 기동토크 향상에 비중을 두고 최적 설계값을 정하였다. 위 결과를 바탕으로 선정된 최적 베리어 파라미터값은 표 4에 나타내었다.

표 4. 최종 선정된 베리어 파라미터값

파라미터	최종값	파라미터	최종값
베리어간 거리	2.6	베리어와 농형바의 거리	2.5
베리어 끝단 두께	25	리브 두께	1.2

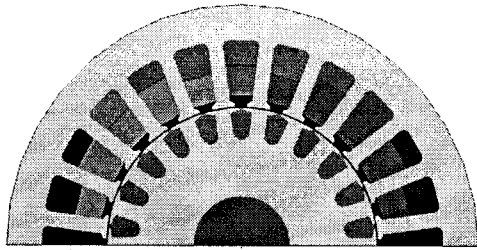


그림 5. 성능 비교에 사용된 단상 유도기 모델

### 2.4 최종 설계 모델과 기존 전동기 비교

최종 설계된 모델의 타당성을 검증하기 위해 기존 상용화되고 있는 단상 유도기 모델과의 성능을 비교하였다. 기존 모델의 단면도는 그림 5에 나타내었다. 유도기는 부하에 따라 슬립에 의해 속도가 변하므로, 토크를 일정하게 맞춰가며 다른 파라미터의 성능을 비교하였다.

그림 6은 부하 토크를 점점 증가시키며 속도를 측정 한 파형이다. 기동시간은 브레이킹 토크가 존재함에도 거의 비슷하게 정상상태까지 도달하는 것을 알 수 있다. 이는 기존의 유도기 농형바는 기동과 구동시 모두를 고려하여 설계되지만, LSPM의 농형바는 기동에만 초점이 맞춰졌기 때문인 것으로 판단된다. 기동 시간 뿐 아니라 기동 토크 역시 유도기를 능가하지는 못하지만 90%정도 까지 따라가 기동 토크를 고려한 설계가 타당함을 확인할 수 있었다.

그림 7은 회전자에서 발생하는 2차측 동손이다. 이상적인 경우 동기는 2차측 동손이 0이어야 하나 속도 곡선에서 보듯 리플의 발생으로 댐핑 전류에 의한 동손이 발생한다. 그러나 부하 토크가 커짐에 따라 점점 작아져서 정격 부하인 0.35Nm에서는 거의 발생하지 않는 것을 확인할 수 있다. 이에 반해 유도기는 부하에 따라 2차측 동손이 커짐으로 효율이 낮아질 것으로 예상할 수 있다.

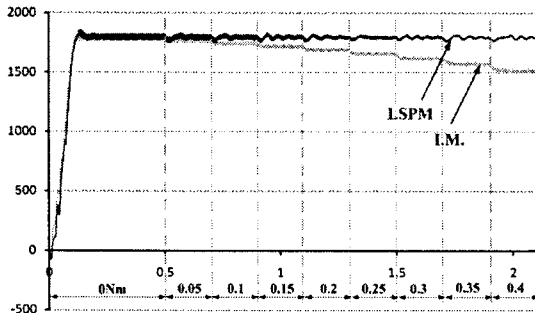


그림 6. LSPM과 유도 전동기의 부하토크별 속도

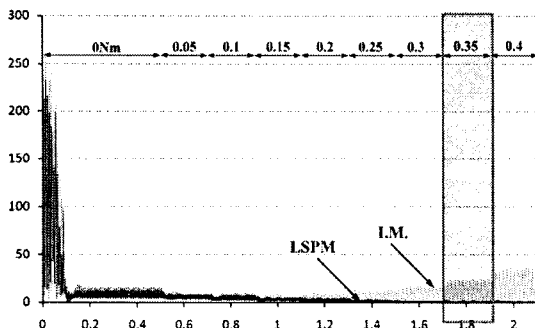


그림 7. LSPM과 유도 전동기의 2차측 동손

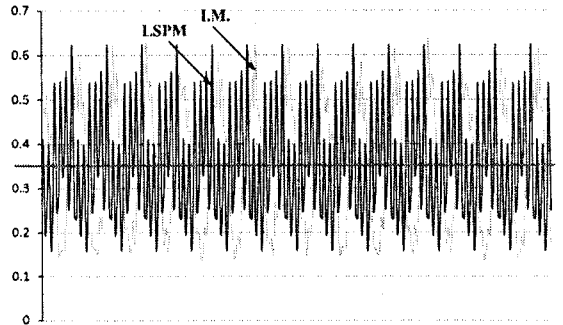


그림 8. LSPM과 유도 전동기의 정격에서의 토크

그림 8은 정격 부하(3.5Nm)에서 정상 상태 토크를 나타내고 있다. 일반적으로 LSPM의 경우 유도기보다 토크 리플이 크지만, 최종 모델은 유도기와 토크 리플면에서 큰 차이가 없다.

마지막으로 정상상태에서 효율을 측정 한 결과 기존 유도기가 62%인데 반해, LSPM의 경우 74%까지 증가했다.

위 결과를 토대로 분석한 결과 본 논문에서 제시한 효율과 기동 동시에 고려한 설계법이 타당한 것을 확인할 수 있다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 에너지 절감과 관련된 전동기 고 효율화와 발 맞추어 단상 유도전동기를 대체할 수 있는 단상 유도형 동기전동기의 설계 방법을 제안하였다. 범용성을 위해 유도기의 고정자와 권선, 베어링, 하우징, 샤프트 등은 그대로 사용하고 회전자만 교체함으로써 정격에서 효율을 증가시켰다.

설계방법으로 회전자 농형바와 영구자석 사이즈는 등가회로를 이용하여 계산하고, 베리어는 FEM과 다꾸찌 메소드를 통해 효율과 기동토크를 최대화시키는 설계를 하였다. 이 때, 제작공차를 고려해 강건한 설계가 될 수 있도록 하였다.

최종적으로 설계된 모델과 기존의 유도 전동기의 성능을 비교, 분석함으로써 타당성을 검증하였다.

### 감사의 글

본 연구는 에너지 관리공단(Korea Energy Management Corporation)의 에너지 자원기술개발사업(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. Applicant., vol. 40, no.3, pp.789-796, May/June, 2004.
- [4] M.A.Rahman and A.M. Osheiba, "Performance fo a large line-start permanent magnet synchronous motor," IEEE Trans. Energy Conversion, vol.5, no.1, pp.211-217, 1990.