

단상 유도형 동기전동기의 파라미터 변화에 따른 동특성 해석

오세영*, 정대성, 임승빈, 이주
한양대학교 전기공학과

Dynamic Characteristic Analysis of Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor by Parameter Variation

Se-Young Oh, Dae-Sung Jung, Seung-Bin Lim, Ju Lee
Department of Electrical Engineering, Hanyang University

Abstract - In this paper, optimized model was designed for the starting characteristic of the Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor by using the Design of Experiment. A field pole angle, thickness and distance from center axis of permanent magnet were selected as design factor. We executed the transient state characteristic analysis of 8 test models. The transient state characteristic analysis was executed by using the 2 dimensional Finite Element Method and the Time Difference Method. We checked the fact that the selected design factor affected starting characteristic of the Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor. Depend on this result we found the optimized design point by using the response optimization.

1. 서 론

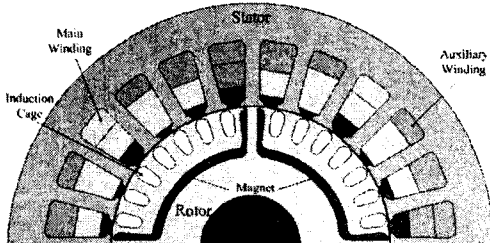
단상 유도형 동기전동기(Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor)는 일반 농형 유도 전동기와 같은 농형 바를 가지는 회전자 내부에 영구자석을 매입한 구조이다. 유도 현상을 최대한 이용하기 위해 영구자석을 농형 바 안쪽에 위치하는 형태를 취하고 있다.[1] 이러한 유도형 동기전동기는 정상상태에서 영구자석 동기전동기의 특성을 가지므로 슬립에 의한 유도현상이 없어 손실을 줄여 효율 향상을 도모할 수 있다. 그러나 기동에서 정상상태 도달까지의 과도상태에서는 유도기의 특성으로 기동특성을 만족해야하나 과도상태 시 농형 바에 의한 특성과 영구자석에 의한 특성이 중첩되어 회전자 바에 의해 발생한 기동 토크가 영구자석에 의해 발생한 브레이킹 토크의 방해로 받아 기동 특성이 나빠지고 기동 시간이 길어지는 단점이 있다.[2]

따라서 본 논문에서는 실험계획법(Design Of Experiments)을 이용하여 단상 유도형 동기전동기의 기동 특성 향상을 위한 최적설계를 수행하였다. 기본 모델을 유한 요소법과 시간 차분법을 이용하여 과도상태 특성 해석을 한 다음, 그 결과를 바탕으로 기동 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 설계인자를 선정하였다. 이 설계인자의 조합으로 나오는 모델의 개수를 최소화하고, 이렇게 줄어든 모델을 해석하여 그 결과 값을 가지고 반응 최적화를 통해 최적화 모델을 선정하였다. 최적화 모델을 가지고 과도상태 해석을 한 다음, 기본 모델의 해석 결과와 비교하여 실험계획법에 대한 신뢰도를 높였다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

그림 1은 본 논문에서 해석하고자하는 단상 유도형 동기전동기의 기본 모델의 1/2 횡단면이며 24개의 슬롯을 갖는 4극 단상 유도기의 고정자를 그대로 사용하였다. 회전자에는 자기 기동을 위한 28개의 농형 바와 동기 속도 회전을 위한 영구자석이 한 극에 3개의 세그먼트씩 총 12개가 삽입되어 있다. 영구자석은 기동 시 고정자 전류에 의해 감자의 우려가 있으므로, 선형적인 감자 특성을 가지며, 높은 보자력과 잔류자속 밀도를 갖는 NdFeB를 사용하였다. 영구자석의 착자 방향은 Radial 방향으로 된 것을 사용하였다. 회전자 내에 공기 덕트를 만들어 자속 장벽 효과를 주었다. 이 공기 덕트에 의해 영구자석의 양단에서 발생하는 누설자속을 방지하였다. 특성 해석에 이용된 모델의 공통적인 사양은 표 1에 나타내었다.



〈그림 1〉 4극 단상 유도형 동기 전동기 기본 모델

〈표 1〉 해석 모델의 기본 사양

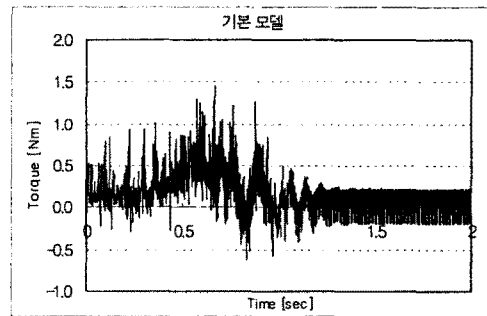
구분	사양	구분	사양
고정자 외경[mm]	82.95	정격 속도[rpm]	1800
회전자 외경[mm]	47.5	입력전압[V]	220
적층길이[mm]	45	주파수[Hz]	60
잔류자속밀도[T]	1.12	공극 길이[mm]	0.15

2.2 해석방법

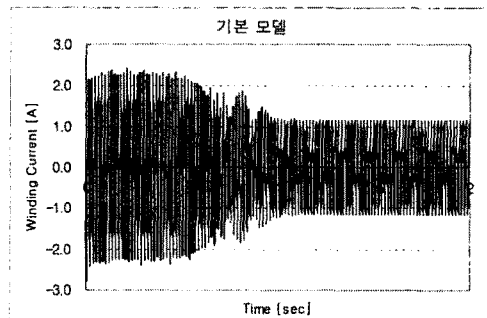
그림1의 기본 모델을 유한 요소법과 시간 차분법을 이용하여 과도상태 해석을 수행하였다. 과도상태 해석을 위해서는 운동방정식이 고려되어야 한다. 전동기의 기계적인 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (1)$$

여기서, T_e 는 전자기적 발생토크, ω_m 은 회전자의 기계적 회전 각속도, T_L 은 부하토크, J 는 회전자의 관성 모멘트, B 는 점성 마찰계수이다. J 값은 상용 프로그램 Solidworks를 이용하여 구했고, B 값은 고려하지 않았다. 부하토크 T_L 은 0.1Nm를 걸어주고 해석을 수행하였다. 해석 결과를 그림 2와 3, 그리고 8에 나타내었다.



〈그림 2〉 기본 모델 토크 파형



〈그림 3〉 기본 모델의 주권선 전류 파형

기본 모델의 해석 결과 약 1초 이후에 동기화에 진입하게 되는데, 이때부터 일정한 크기의 파형을 유지한다. 이때의 토크와 주권선에 흐르는 전류를 측정하였는데, 이는 정상상태에서의 출력 특성에 미치는 영향을 고려하기 위한 것이다. 기동 특성 향상을 위해 회전자의 형상을 변경했으나 이로 인하여 정상 상태에서의 특성이 오히려 기존의 것보다 더 악화되는 경우가 발생할 수 있다. 이러한 경우를 방지하기 위해 토크와 주권선에 흐르는 전류를 고려했다. 정상상태에서의 토크 리플이 기존의 것보다 커져서는 안 되기 때문에 토크를 고려했고, 같은 출력을 내는데 주권선에 많은 전류가 흐를 경우 손실이 커져서 전동기의 효율이 떨어지기 때문에 주권선 전류를

고려하게 되었다. 기동 특성 향상을 위한 회전자 설계를 하되 정상상태에서의 특성에 악영향을 주지 않는 범위에서 진행되어야 한다. 그래서 설계 목표를 동기화 진입 시간을 앞당기는데 주력하되, 동기화된 이후 토크 리플과 주권선에 흐르는 전류가 기존의 것보다 커서는 안 된다는 계약을 달았다.

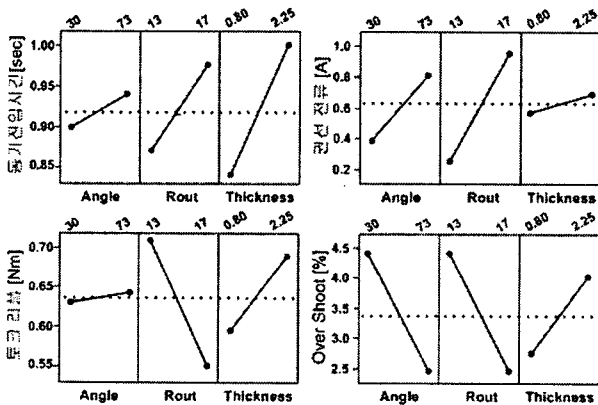
2.3 실험계획법(Design Of Experiments)

실험계획법(Design Of Experiments)은 실험에 대한 계획방법을 의미하는 것으로, 제품 품질특성에 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 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 효율적으로 선정, 그 효과를 수량적으로 측정할 수 있게 된다.[3]

〈표 2〉 설계인자의 범위

설계인자	범위	단위
영구자석의 제자극 각도	30 ~ 73	°
회전자 축 중심으로부터 영구자석까지의 거리	13 ~ 17	mm
영구자석의 두께	0.8 ~ 2.25	mm

출력에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 회전자의 영구자석의 위치와 두께, 제자극 각도를 설계인자로 선정하였고 그 범위를 표 2에 나타내었다. 목적함수로 동기화 진입 시간, 주권선 전류, 토크 리플, Over-shoot를 선정하였다. 이 목적함수들은 모두 최소화되도록 최적화를 수행하였다. 본 논문의 주된 목적은 동기화 진입 시간을 기본 모델보다 앞당기는 것이지만, 다른 요소들(주권선 전류, 토크 리플, Over-shoot 등)을 무시해서는 과도 특성을 향상 시켰다고 말할 수 없으므로, 4개의 목적함수를 모두 고려해서 반응 최적화를 수행하였다. 그림 4는 설계인자로 선정한 3개의 인자들이 동기화 진입 시간, 주권선 전류, 토크 리플과 Over-shoot에 미치는 영향도와 그 경향을 나타내고 있다. 영구자석의 두께가 얇을수록 목적한 4가지 특성을 만족하지만, 다른 인자들은 서로 상충되는 것을 확인할 수 있었다.



〈그림 4〉 설계인자들의 영향 분석

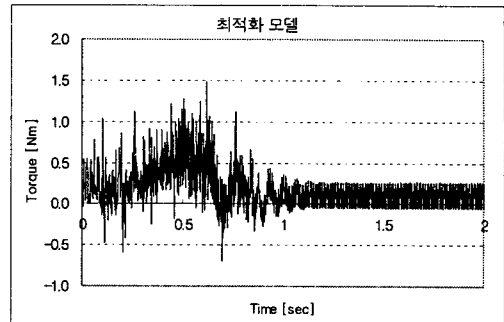
동기화 진입 시간을 앞당기고, 주권선의 전류를 낮추며, 토크 리플과 Over-shoot를 저감하기 위해 MINTAB 프로그램을 이용하여 반응 최적화를 실시하여 그 결과를 그림 5에 나타내었다. 그림의 팔호안의 치수가 최적화된 모델의 설계 점이다.

Optimal D	Angle	Rout	Thickness
Hi	73.0	17.0	2.250
Lo	[35.9748]	[16.3567]	[0.80]
0.11050	30.0	13.0	0.80
동기진입시간			
Minimum			
Y=0.8390			
d=0.20852			
권선전류[A]			
Minimum			
Y=0.5668			
d=0.30877			
토크리플[Nm]			
Minimum			
Y=0.4178			
d=0.00534			
OS[%]			
Minimum			
Y=2.8336			
d=0.43328			

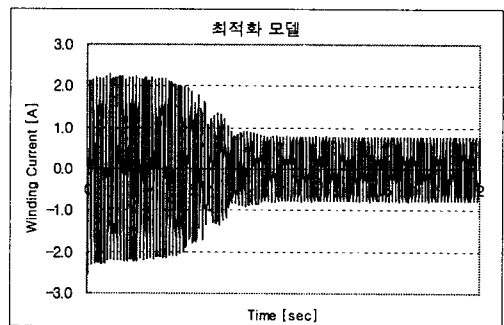
〈그림 5〉 반응 최적화 결과

2.4 해석 결과

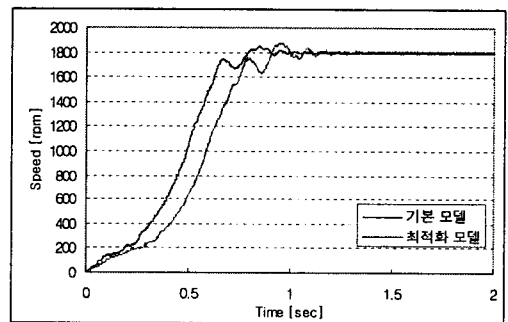
그림 5의 반응 최적화 결과를 통해 산출된 모델을 가지고 과도상태 해석을 수행하였다. 그 결과를 그림 6, 7, 8에 걸쳐서 나타내었다. 최적화 모델에서 동기화 진입 후의 토크 리플이 약 27% 줄어들었고, 주권선 전류의 실효치도 약 32% 줄어든 것을 확인할 수 있었다. Over-shoot도 약 31% 줄어들었고, 동기화 진입 시간도 1.05초에서 0.84초로 약 20% 감소한 것을 확인할 수 있었다.



〈그림 6〉 최적화 모델의 토크 파형



〈그림 7〉 최적화 모델의 주권선 전류 파형



〈그림 8〉 기본 모델과 최적화 모델의 속도 파형 비교

3. 결 론

본 논문에서는 단상 유도형 동기전동기의 기동 특성 향상을 위해 실험 계획법을 이용하여 최적설계를 수행하였다. 단상 유도형 동기전동기의 회전자의 형상에 대한 여러 가지 설계인자들 중 3개의 설계인자를 선정하여, 이를 가지고 실험계획법을 사용하여 8개의 실험 모델을 선정하였으며, 이 8개의 실험 모델을 유한 요소법과 시간 차분법을 이용하여 과도상태 해석을 수행하였다. 해석 결과 값들을 실험계획법을 이용, 분석하여 본 논문에서 요구되는 동기진입 시간 개선과 토크 리플 저감, 주권선 전류 저감, Over-shoot의 저감 효과를 동시에 얻을 수 있는 설계 점을 찾을 수 있었다.

감사의 글

본 논문은 에너지관리공단에서 시행한 프리미엄급 고효율 단상 유도전동기 설계/해석 사업으로 수행되었습니다. 과제번호(2005-01-0031-3-010)

참고 문헌

- [1] 김병국, 김태현, 조원영, 이인재, 조원현, “직립기동 영구자석 동기 전동기의 브레이크 토크 특성 해석”, 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp. 86-88, 2005
- [2] T. J. E. Miller, “Synchronization of Line Start Permanent Magnet AC Motors”, IEEE Transaction on Power Apparatus and System, Vol. PAS-103, No. 7, July 1984
- [3] “최신 실험계획법,” 機電硏究社, 박동규