

단상 유도동기전동기의 고효율 설계에 관한 연구

백수황*, 김병택**, 권병일*
*한양대학교, **군산대학교

A Study of High Efficiency Design of Single-phase Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor

Soo-whang Baek*, Byung-taek Kim**, Byung-il Kwon*
*Hanyang University, **Kunsan University

Abstract - 본 논문은 에너지 절감차원에서 단상 유도동기전동기의 효율을 개선하는 설계를 수행하였다. 회전자에 삽입되는 영구자석의 길이와 위치의 결정, 운전 시 고효율과 원활한 기동을 위한 운전 및 기동 커패시터의 값의 산정을 통하여 설계를 수행하였으며 이를 시작품 제작하여 실험으로서 설계의 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

현재 가전 및 산업분야에서 일정 속도를 필요로 하는 동력원으로 단상 유도전동기가 널리 사용되고 있다. 단상 유도전동기는 제조가 간단하고 별도의 기동장치 없이 운전이 가능하며 내구성이 뛰어난 장점이 있는 반면 Slip이 존재하고 2차측의 손실이 추가적으로 발생하여 효율이 낮은 단점을 지니고 있다. 따라서 에너지절약차원에서 이를 대체할 수 있는 전동기로 영구자석을 이용하는 전동기들이 연구되어지고 있으며, 기존의 단상 유도전동기의 회전자에 영구자석을 삽입한 단상 유도동기전동기(Line Start Permanent Motor)는 기동 시에는 유도전동기의 원리로서 동작하며, 동기화 후에는 동기기로써 동작하는 특징을 갖는다[1-2]. 따라서 동기기와 달리 기동을 위한 별도의 장치가 필요하지 않으며, 동기화 후에는 동기기와 같은 높은 효율을 갖는 장점을 갖는다[3-4]. 본 논문에서는 단상 유도전동기의 단점인 낮은 효율을 개선하고자하며 회전자에 삽입되는 영구자석의 길이 및 위치의 설계를 통해 영구자석의 사양을 결정하였다. 또한 원활한 기동특성과 과격운전 시 고효율을 갖는 기동 및 운전커패시터의 설계를 수행하였고, 2D 유한요소해석(FEM)을 이용하여 영구자석과 커패시터설계에 의한 효율의 개선여부를 해석하였다. 시작품을 제작하여 단상 유도동기전동기의 효율개선의 타당성을 실험과 비교하여 입증하였다.

2. 본 론

본 논문에서 설계한 단상 유도전동기는 고정자 권선 및 요크의 구조적인 부분은 그대로 사용하면서 회전자 부분만을 단상 유도동기전동기의 형태로 설계하여 효율개선을 주목적으로 한다. 표 1은 기존의 단상 유도전동기의 사양을 나타낸다.

표 1 단상 유도전동기의 기본사양

입력전압[V]	220	주파수[Hz]	60		
정격출력[W]	90	극수[pole]	4		
정격속도[rpm]	1680	적층길이[mm]	65		
정격토크[Nm]	0.53	정격효율[%]	63		
권선경 [mm]	main	0.4	권선수 [turns]	main	136/68/0
	aux.	0.4		aux.	0/71/148

표 2는 단상 유도동기전동기의 설계 목표치이다.

표 2 단상 유도전동기의 설계 목표치

정격출력[W]	효율[%]	정동토크[Nm]
100	73	1.2

그림 1은 본 논문에서 고효율 단상 유도동기전동기를 설계 하기위한 과정을 나타낸다. 회전자에 삽입되는 영구자석의 길이와 위치의 결정, 운전 및 기동 커패시터를 설계한다. 공극자속밀도와 정동특성을 만족시키지 못하면 고정자권선을 재권선하여 설계과정을 반복한다.

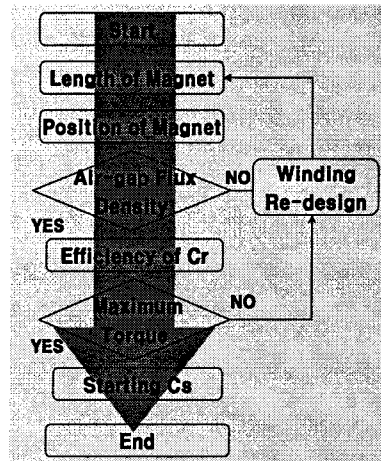


그림 1. 단상 유도동기전동기의 설계과정

2.1 영구자석의 길이와 위치 결정

단상 유도동기전동기의 회전자에 삽입되는 영구자석은 기동특성과 동기화 진입을 결정하는 중요한 설계 변수이다. 이는 전동기의 정동특성 및 효율에도 영향을 끼치기 때문에 영구자석 설계 과정은 전동기의 특성개선을 위한 중요한 과정이다. 영구자석 설계의 목표는 영구자석의 자속에 의해 나타나는 공극 자속 밀도가 높은 자속 밀도를 가짐과 동시에 정현적인 분포를 나타내도록 설계하는 것이다.

단상 유도동기전동기를 설계하기 위해 사용된 영구자석은 선형적인 감자특성을 가지며, 높은 보자력과 잔류자속 밀도를 갖는 Nd계열의 영구자석을 사용하였다. 자석의 대략적인 크기를 결정하기 위해서 식 (1)을 이용하여 영구자석의 단면적을 계산하고 식 (2)를 이용하여 영구자석의 길이를 계산한다.

$$B_m A_m = K_l B_g A_g \quad (1)$$

$$H_m l_m = H_g l_g + V_m \quad (2)$$

B_m, B_g, A_m, A_g 는 각각 자석과 공극의 자속밀도, 자석과 공극의 면적을 나타내며, K_l 은 누설 계수이다. H_m, H_g, l_m, l_g 는 자석과 공극의 자계 세기와 자석과 공극의 길이이며, V_m 는 기자력 강하이다.

또한, 회전자에 자석을 삽입함으로써 d축과 q축의 인덕턴스 차이가 발생한다. 자석의 투자율이 공기와 거의 같기 때문에 자석의 삽입은 d축 인덕턴스 값의 감소를 일으킨다. 즉, d축 인덕턴스 값의 감소를 최소화하며, 기동 시 전동기의 고정자 측에 높은 전류가 흐르므로 갑자기 되지 않는 범위 내에서 경제적으로 얇게 설계하여야 함을 고려하여 방사 방향의 영구자석의 두께는 1.5[mm]로 결정하였다. 식 (1)과 식 (2)에 의해 계산된 영구자석의 크기는 대략적인 크기이므로 영구자석에 의한 공극의 자속 밀도를 유한 요소법으로 확인하여 영구자석의 크기와 위치를 결정하며 이를 표 3에 나타내었다.

표 3 영구자석 사양

구분	사양
B_r [T]	1.1
H_c [kA/m]	836
영구자석에 의한 공극 자속밀도 [T]	0.5
영구자석의 넓이 [mm ²]	845
영구자석의 두께 [mm]	1.5

그림 2는 설계한 영구자석에 의한 공극 자속 밀도를 알아보기 위해 회전자 내부에 영구자석을 삽입하고 FEM해석을 통해 영구자석에 의한 공극 자속밀도를 확인한 결과이다. 일반적으로 자석의 두께가 같다면 한 극에서 발생하는 영구자석에 의한 공극 자속 밀도는 자석의 길이가 길수록 증가하는 특성을 갖는다.

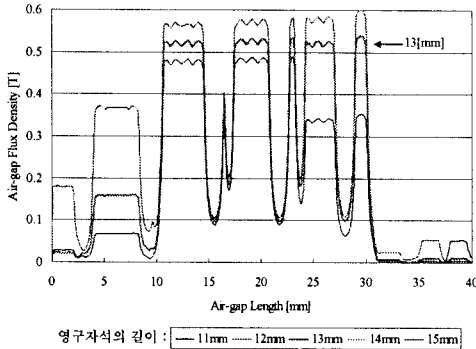


그림 2. 공극자속밀도 파형

자석의 길이에 따른 공극자속밀도를 분석하였을 때 회전자에 삽입되는 영구자석의 길이는 13[mm]의 자석길이를 갖는 경우가 목적인 기동특성과 동기화에 대하여 최적의 특성을 낼 수 있는 13[mm]로 결정하였다.

영구자석의 위치는 회전자의 삽입된 자석의 특성을 최대한화하기 위하여 공극에서 멀리 떨어지지 않도록 할 필요가 있다. 즉, 제작성을 고려하여 회전자 바에서 최대한 가까운 위치에서의 최소 0.5[mm]간격으로 기준반원을 생성하여 결정하였다.

그림 3은 영구자석의 위치와 길이가 결정된 후 회전자에 영구자석이 삽입된 단상 유도동기전동기의 1/2모델 단면을 나타낸다. 4극 전동기이므로 4개의 영구자석을 방사형으로 삽입하는 기본구조를 갖는다.

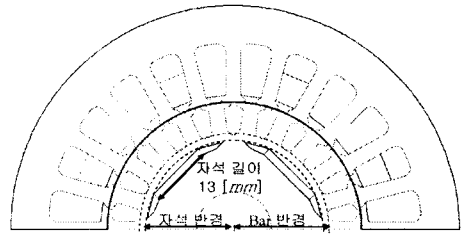


그림 3. 단상 유도동기전동기의 1/2모델 단면

2.2 운전커패시터의 설계

기존 단상 유도전동기모델은 6[μF] 운전커패시터를 사용하였다. 단상 유도동기전동기의 경우 운전커패시터의 설계 시 고효율을 위하여 이보다 낮은 용량의 커패시터로서 결정할 필요가 있다. 여기서 해석 시 초기속도를 동기속도로 시작하므로 기동부분 특성은 해석하지 않아 해석시간을 단축시킬 수 있다.

그림 4에는 2~4[μF]범위의 운전커패시터 용량을 가변시켜 정격운전시의 효율을 분석한 그래프이다. 이 때 3[μF]를 사용하였을 때가 해석상으로 정격운전 점에서 75.1[%]의 효율을 발생함을 확인하였다. 이는 기존 단상 유도전동기 모델의 효율보다 약 12[%]정도 개선된 값이다. 만약 목표한 효율 미달 시 역기전력을 증가시키기 위해 영구자석의 길이를 증가시킬 필요가 있다.

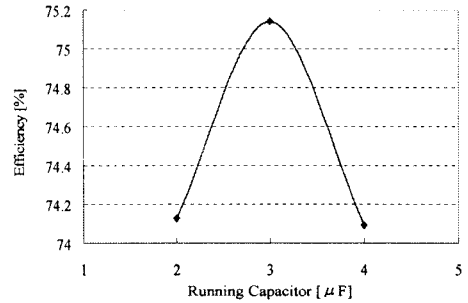


그림 4. 운전커패시터 변경에 따른 효율 분포

2.3 기동커패시터의 설계 및 정동토크 만족 확인

일반적으로 단상 전동기는 운전 시 불평형 자계를 형성한다. 또한 단상 유도동기전동기의 경우, 기동 시 역방향 자계와 추가적으로 영구자석에 의한 기동을 방해하는 브레이킹 토크를 생성하므로 기동토크를 크게 하기 위한 커패시터 값을 계산하여 보조연선에 연결하여야 한다. 식 (3)은 정동토크를 내기 위한 기동커패시터를 결정하는 식이다.

$$X_c = \frac{X_{2d}}{R_d} - \frac{R_c}{R_s} \left[X_s + \frac{aX_{m2} (r_{2d}^2 + X_{2q} X_{2d})}{r_{2d}^2 + x_{2d}^2} \right] - \frac{R_c Z_d}{R_s} \left(1 + \frac{R_d}{R_s} \right) \quad (3)$$

여기서, R_d, R_c 는 d축 저항, q축 저항이다. r_{2d}, r_{2q} 는 d축 2차 저항, q축 2차 저항, X_{m2}, X_{mq} 는 d축, q축 자화 리액턴스이다.

또한 기동커패시터의 설계 시 전동기의 기동이 가능하면서 기동전류의 크기가 작은 커패시터를 선정해야 한다. 기동전류가 크다면 회전자에 삽입되어있는 자석이 기동 시 발생하는 고온에 의해 감소되어 전동기의 특성저하를 불러일으키는 등 악영향을 미칠 수 있게 되기 때문에 이를 고려하여야 한다. 위의 조건을 만족시키는 기동커패시터의 값은 15[μF]이다.

정동토크는 영구자석과 운전커패시터의 설계를 마친 후 정격부하에서부터 점차 부하를 증가시키면서 특성을

분석한다. 이때 전동기가 동기화를 상실하여 탈조하기 시작하는 그 시점에서의 토크 값이 단상 유도동기전동기의 정동토크 값이 된다.

그림 5는 시간에 따른 부하토크의 가변곡선을 나타낸다. 이는 초기에 정격부하 0.53[Nm]로 운전하다가 0.4초부터 1.2초까지 각 0.1초 구간마다 부하토크를 0.1[Nm]씩 증가시킴을 의미한다. 산출된 기동커패시터와 운전커패시터 값을 이용하여 설계한 단상 유도동기전동기의 시간과 부하에 따른 속도변화를 그림 6에 나타냈다.

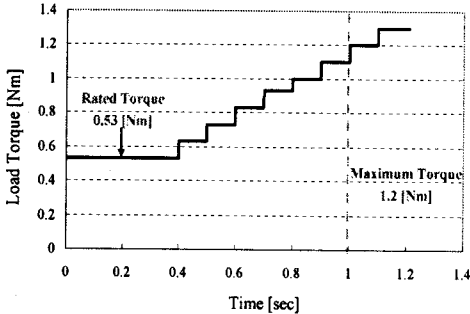


그림 5. 부하토크 가변 곡선

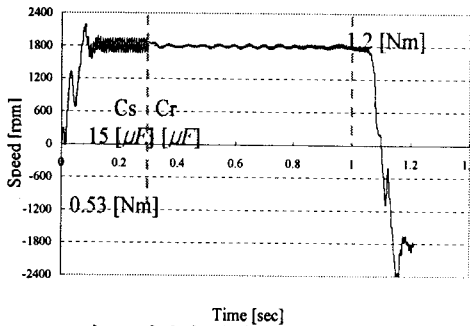
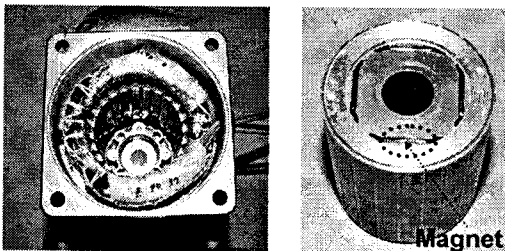


그림 6. 시간과 부하에 따른 속도변화

초기 기동 시부터 0.3초까지는 기동커패시터 15[uF]을 이용하여 정격부하인 0.53[Nm]조건으로 운전을 한다. 0.3초부터 전동기가 동기속도를 상실하는 1초 이후 시점까지는 운전커패시터 3[uF]만을 이용하는 조건대로 부하를 점차 증가시키는 해석을 한다. 해석결과 동기속도로 진입함을 확인하였으며 1.2[Nm]의 정동토크를 발생함을 알 수 있다.

2.4 실험결과

설계모델의 타당성을 검증하기 위해 시제품을 제작하였으며 실험을 수행 하였다. 그림 7은 제작한 시제품 모델의 고정자와 회전자를 나타낸다.



(a) 고정자 (b) 회전자

그림 7. 시제품 사진

그림 8은 출력대비 효율 곡선이다. 정격 부하토크가 0.53[Nm]일 때 출력이 100[W]이고 효율은 73.5[%]를 나타내었다.

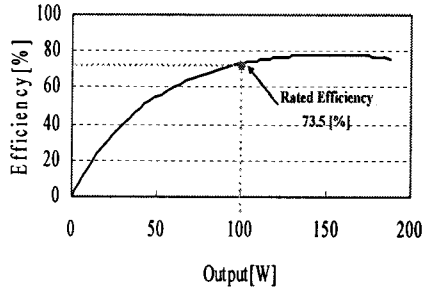


그림 8. 시제품의 출력대비 효율특성 실험곡선

FEM해석 결과는 정격효율이 약 75.1[%]로 실험 결과 대비 약 1.6[%]의 차이를 나타내었다. 이것은 해석 시 강판 재질정보에 철손을 고려하지 않아 실제와 차이가 있기 때문이라 사료된다.

3. 결 론

본 연구에서는 단상 유도동기전동기를 단상 유도전동기 회전자에 영구자석을 삽입하는 방식으로 설계하였으며 영구자석은 단상 유도 동기 전동기의 기동 및 동기화, 효율에 영향을 미치므로 영구자석에 의한 공극자속 밀도를 고려하여 영구자석의 크기 및 위치를 설계하였다. 정격운전 시의 고효율과 원활한 기동을 위한 운전 및 기동커패시터의 설계 또한 수행하였으며, FEM을 이용하여 특성을 해석하였다. 설계한 단상 유도동기전동기의 시제품을 제작하고 특성을 실험하였으며 실험결과 정격부하토크에서 동기속도를 유지하였고 정격출력 100[W]의 효율은 73.5[%]로 해석 결과와 잘 일치하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] I. Boldea, S. A Nasar, "Unified Analysis of 1-phase AC Motors Having Capacitors in Auxiliary Windings", IEEE Trans. Energy Conversion, Vol. 14, No. 3, pp.577-582, 1999
- [2] E. S. Hamdi, "Design of Small Electrical Machines", pp.155-184, John Wiley & Sons
- [3] Kazumi Kurihara, M. Azizur Rahman, "High Efficiency Line-start Interior Permanent Magnet Synchronous Motors", IEEE Trans. Ind. Appl. Vol. 40, No.3, pp.789-796, May/June, 2004
- [4] Soon Hyo Kwon, Byoung Yull Yang, Kwang chul, Byung Il Kwon, "Design and Characteristics Analysis of Single Phase Line Start Permanent Magnet Synchronous Motor", PE2-5, CEFC'2004, 2004.06.