

단상유도전동기의 동 다이캐스팅과 손실 저감을 위한 고정자 설계

이상훈, 김기찬, 김광수, 김수용, 김원호, 이 주
한양대학교 전기공학과

The Copper Rotor Die-casting of Single Phase Induction Motor and the Stator Design for Reducing Loss

Sang-Hoon Lee, Ki-Chan Kim, Kwang-Soo Kim, Won-Ho Kim, Soo-Yong Kim, Ju Lee
Dept. of Electrical Engineering at Hanyang University

Abstract - There has been, in recent years, effort to make cast copper rotors for industrial use of induction motors. Because the incorporation of copper for the conductor bars and end rings of the induction motor in place of aluminum would result in attractive improvements in motor energy efficiency. The purpose of this method is a reducing the copper loss as using higher conductivity of copper. In this paper as the single phase induction motor is studied, the stator slots and coil turn number is designed for adjusting the slot fill factor and improving its efficiency. At this time design is basis on calculation of reducing loss. And finally this paper shows that the before and after result is compared and analyzed.

그림1에 고정자 설계 방향이 나타나있다. 설계 시 회전자는 기존 모델의 형상을 그대로 사용하게 된다. 설계 후 FEM을 이용한 모델들 간의 효율비교 시 사용될 식 또한 그림1에 나타나있다.

2.2.1 손실 계산

예상되는 손실 저감 양을 수식적으로 예측 후 설계를 진행하였다. 이때 사용된 아래의 수식들은 기존의 여러 책들에 언급되어진 수식들과는 다르게 FEM 해석 시에 이용한 모델의 재질 정보 및 손실 계산 방법에 기초하여 수정하여 이용하였다.

1. 동 손

$$P_{Copper} = P_{Main} + P_{Aux.} + P_{Cu2}$$

$$= I_m^2 R_m + I_a^2 R_a + P_{Cu2}$$
 (1)

여기서, P_{Cu2} 는 Power Loss로 Conductivity가 존재하는 재질에서 발생하는 와류손이다. 본 논문의 모델에서는 2차 축에서 발생하는 와류손을 말하며 아래와 같이 계산된다.

$$P_{Cu2} = R_2 \sum_{n=1}^n I_n^2$$

$$= R_2 \sum_{n=1}^n \int_{A_n} \| J_z \|^2 da$$
 (2)

여기서, R_2 : 농형 바 저항, n : 총 농형 바 수, A_n : 농형 바 단면적이다 [1].

2. 철 손

$$P_{Core} = P_{Hyst} + P_{Dmn}$$

$$= P_{Hyst} + P_{Class} + P_{Exc}$$

$$= k_h B_{max}^n f + k_c B_{max}^2 f^2 + k_e B_{max}^{1.5} f^{1.5}$$

$$\approx k_h B_{max}^n f$$
 (3)

여기서, k_h, n : 히스테리시스 상수 이다.

$$P_{Class} = \pi^2 \sigma d^2 B_{max}^2 f^2 / 6$$
 (4)

이 성분은 우리가 일반적으로 알고 있는 고전적인 전자계 이론에 기초된 와전류에 의한 손실 성분으로 이 때 σ 는 재질 도전율이며, d 는 적층 두께를 나타낸다. 본 논문에서는 해석 시 철심의 도전율을 무시했으므로 이 성분의 영향은 고려되지 않았다. 또한 P_{Exc} 성분은 철심을 구성하는 결정의 크기에 따라 달라지는 추가적인 와전류 손실 성분으로 대부분의 경우 철심의 도전율을 무시하고 재질에 따라 계수를 달리하여 고려되어진다. 하지만 본 논문에서 동일한 재질을 사용한 모델들 사이에서 효율 비교를 함에 따라 Excess Loss는 손실 저감 인자로 고려되지 않았다 [2].

2.2.2 손실을 고려한 슬롯 치수 및 턴 수 설계

아래에 있는 그림2는 식(1)을 이용하여 동손을 계산할 때 이용된다. 주권선 및 보조권선의 턴 수가 각각 47/47/25/7=>51/51/30/13, 23/45/26=>25/46/31로 증가할 경우 도체의 각 부분을 $L1, L2, L3$ 나누어 늘어난 길이를 예측한 후 동손을 계산하였다. 식(2)의 Power Loss의 경우 동 바의 Conductivity가 일정하므로 동손의 저감에 영향을 미치지 않을 것으로 예상하였다.

1. 서 론

최근 유류비의 상승과 에너지 자원 한계에 대한 위기가 고조됨에 따라 여느 때와는 다르게 에너지 절약에 대한 관심이 지속적으로 증가하고 있다. 이에 따라 전동기의 고효율화가 반드시 이루어져야하는 상황에서 유도전동기 시장의 70%이상을 차지하고 있는 중·소형급 유도전동기의 프리미엄급 개발은 반드시 이루어져야한다. 프리미엄급 고효율 전동기가 개발되면, 국내 소비전력의 55%를 사용하는 유도전동기 효율을 4%이상 향상시킬 수 있어 막대한 에너지 절감 효과가 기대된다. 이에 따라 최근에 가장 많이 이루어지는 연구 중 하나가 동 다이캐스팅 유도전동기 개발이다. 동 다이캐스팅 3상 유도전동기의 경우 국내 및 해외에서 연구가 활발히 진행되고 있지만 단상 유도전동기의 경우 연구가 아직 미미한 상황이다.

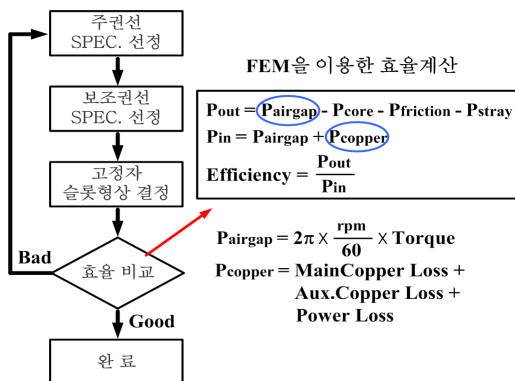
본 논문에서는 기존 알루미늄 다이캐스팅 모델에 동 다이캐스팅을 하였을 때 효율의 향상을 FEM과 실험결과로 보여주고 손실 저감을 통한 추가적인 효율 향상을 이루기 위해 권선 턴 수 설계를 진행하였다. 이때 설계는 손실 저감 양을 수식적으로 예측하여 이루어졌다.

2. 본 론

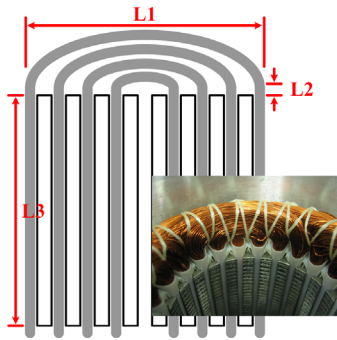
2.1 프리미엄급 기본 모델

기존에 설계된 0.5마력 알루미늄 바를 이용한 단상유도전동기의 경우 표준형의 슬롯 조합인 36/48 구조를 가지고 있다. 이런 조합의 경우 소음이 적은 장점이 있으며, 토크리플의 측면에서는 4극보다 6극이 성능이 좋지 않기 때문에 4극 권선법이 채택되었다. 본 논문의 모델에서는 주권선과 보조권선을 4/3구조로 사용하였다.

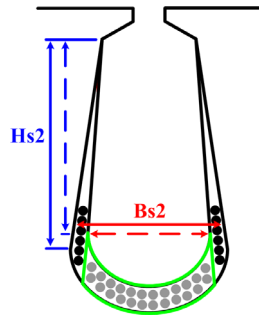
2.2 턴 수 재설계 및 슬롯치수 설계



<그림 1> 기존 회전자를 활용한 설계 방향



〈그림 2〉 권선 길이



〈그림 3〉 슬롯 당 권선 턴

〈표 1〉 권선 턴 수 설계

주권선		보조권선	
조정 전	조정 후	조정 전	조정 후
51/45/33/17	51/51/30/13	0/0/23/43/50	0/0/25/46/31
584	580	464	408

철손의 경우 식(3)에서 나타난 것처럼 본 논문의 모델에서는 히스테리시스 손실만을 고려하게 된다. 식(3)에서도 알 수 있듯이 히스테리시스 손실은 최대 자속밀도의 1.5~2.5승에 비례하게 되며, 일반적으로는 자속 밀도의 제곱에 비례하게 된다. 본 논문에서는 아래의 식을 이용하여 고정자 치부의 면적을 계산한 후, 면적당 흐르는 자속량을 이용하여 철손의 저감 폭을 예상하였다.

$$STA = F \times L \times S1 \times TW/P \quad (5)$$

$$\Phi_{\max} = \frac{E_s}{4.44 \times N \times f}, B_{\max} = \frac{\Phi_{\max}}{STA} \quad (6)$$

여기서, STA: 고정자 치부 면적, TW: 고정자 치 폭, F: 적층계수, L: 적층길이, S1: 고정자 슬롯 수, P: 극 수 이다.

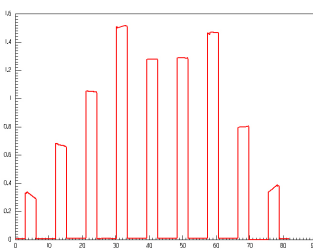
위의 그림3에서 Bs2/Hs2 길이는 6.3/11.1에서 6.5/12로 늘어났다. 이에 따라 치의 Top 폭은 거의 변함이 없고 Bottom 폭이 12%정도 줄어들었다. 하지만 15%정도의 턴 수 증가에 따라 각 도체에 흐르는 전류의 감소로 인해 상대적인 자속밀도는 줄어들 것으로 예측하였다. 특히 슬롯 치수의 변경 시 치 폭과 무관한 그림4의 회색으로 나타난 도체들에 의한 자속의 저감을 추가적으로 얻어낼 수 있었다.

그리고 표1에서는 위의 손실 저감을 기초로 하여 주권선 및 보조권선의 기본적인 턴 수 설계 및 재조정 후의 값을 총 턴 수와 상당 직렬 턴수로 나타내었다.

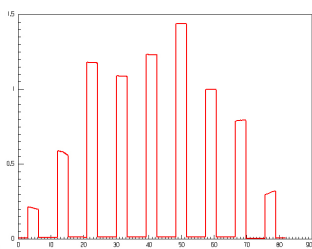
2.3 FEM 해석결과

〈표 2〉 모델 별 FEM 해석결과

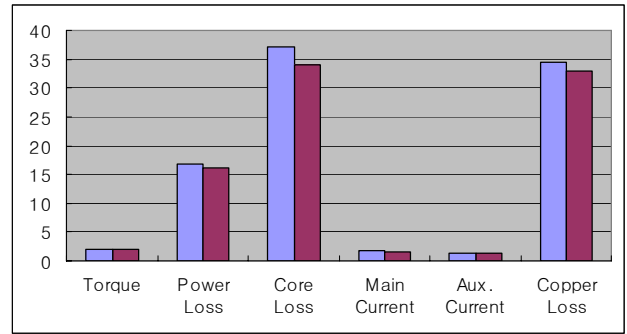
항 목	알루미늄 바	동 바	개선모델+동 바
Torque	2.03	2.04	2.04
Power Loss	42.51	16.69	16.14
Core Loss	33.5	37.2	34.1
Main current	1.937	1.829	1.615
Aux. current	1.221	1.257	1.240
Pcopper	61.52	34.48	32.89
rpm	1680	1771	1764
Efficiency	77.28	82.67	83.72



〈그림 4〉 기존 모델



〈그림 5〉 개선 모델



〈그림 6〉 기존 모델과 개선 모델의 손실 비교

그림4와 그림5는 기존 및 개선 모델에서 치에서의 자속밀도 분포를 보여준다. 그래프의 y축은 자속밀도 크기를 나타내며 두 그림에서 기존 모델의 y축 레벨 최대치는 1.6T 이며 개선 모델은 1.5T이다. 또한 두 모델에서 0도~90도까지의 평균 자속밀도는 각각 0.0290과 0.0261의 값을 가진다. 이것으로 설계과정에서의 철손 저감 방법이 타당했음을 알 수 있다.

또한 그림6에 동 다이캐스팅 한 기존 모델과 개선 모델의 FEM 해석 결과를 손실 별로 비교하여 나타내었다. 그림에서 보듯이 설계 전에 예상되었던 것처럼 철손과 동손이 가장 많이 줄었음을 확인할 수 있었다.

2.4 실험

〈표 3〉 기존 모델 실험 데이터

	토크	rpm	출력	전압	전류	역률	콘덴서	효율
알루미늄 바	2.05	1747	375	220.9	3.04	79.4	12uF	70.23
동 바	2.02	1770	374.4	220.3	2.83	82.2	12uF	72.96

실험결과, FEM 결과와는 효율 향상분이 약 2%정도 차이가 있었으며 또한 실험 결과와 FEM 해석결과와의 효율 차이가 모든 모델들에서 약 10%정도가 발생하였다.

이러한 결과는 각각 다음과 같은 원인들 때문인 것으로 사료된다.

1. 시제품 제작 시 동 다이캐스팅 제작공정상의 문제
2. 소용량 단상유도기의 설계와 제작상의 오차

3. 결 론

본 논문에서는 프리미엄급 단상유도전동기 설계를 위하여 기존에 개발된 알루미늄 바를 사용한 0.5마력 단상유도전동기를 동 다이캐스팅으로 대체하였을 때 증가된 효율을 비교하고 추가적인 효율향상을 위해 턴 수 재설계시 증가하는 효율 상승량을 예상하여 설계를 진행하였으며 이를 실험으로 검증하였다.

또한 FEM 해석 후 각 모델의 손실비교 및 치에서의 자속밀도분포를 비교함으로써 설계 후 철손과 동손의 저감이 이루어 졌음을 확인하였다.

하지만 FEM 해석결과와 실험결과와의 차이는 추후에 연구가 더 진행되어야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

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

[참 고 문 헌]

[1] JJ Germishuizen, A Jockel and MJ Kamper, "NUMERICAL CALCULATION OF IRON-AND PULSATION LOSSES ON INDUCTION MACHINES WITH OPEN STATOR SLOTS"
 [2] Katsumi Yamazaki, Makoto Tanida and Hitoshi Satomi. "Iron Loss Analysis of Rotating Machines Considering Skin Effect and Excess Loss in Electrical Steel Sheets". Electromagnetic Field Computation, 2006 12th Biennial IEEE Conference on 2006 Page(s):322 - 322
 [3] J. L. Kirtley Jr., J. G. Cowie., E. F. Brush, Jr., D. T. Peters and R. Kimmich, "Improving Induction Motor Efficiency with Die-cast Copper Rotor Cages", Power Engineering Society General Meeting, 2007. IEEE, Digital Object Identifier 10.1109/PES.2007.385767