

2005년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2005. 7. 18 - 20
표류부하손 저감형 유도전동기 설계기술

이정일¹⁾, 김근웅¹⁾, 권중록¹⁾, 권병훈²⁾, 김진오²⁾

1)현대중공업 기계전기연구소, 2)현대중공업 전전시스템사업본부

A Study on the Reducing Method of Stray Load Loss in Induction Motor

J.L. Lee, K.W. Kim, J.L. Kwon, B.H. Kim, J.O. Kim

Hyundai Heavy Industries, Co., Ltd

Abstract - In this paper, through the theoretical study on reducing method and analysis of stray load loss of induction motor, we suggest the improved design considering the slot combination, skew, air gap and manufacturing method. For verifying the suggested design, the test was performed by IEEE 112. As a result, the reducing technology on the stray load loss was established.

1. 서 론

최근 유도전동기는 에너지 절감을 목적으로 기존의 고효율 등급보다 높은 프리미엄 등급의 제품이 요구되고 그 수요가 증가하고 있는 추세이다. 체적 또는 재료의 증가 없이 효율 향상을 위해서는 표류부하손의 저감이 요구된다. 표류부하손은 손실과 온도상승 증가는 물론 유효토크를 저감시키므로 발생 원인과 저감방법을 이해하는 것은 매우 중요하다.

본 연구에서는 표류부하손 저감기술에 대한 이론적 고찰을 토대로 설계적, 제작적 관점에서 유도전동기 표류부하손 저감설계안을 도출하고, 검증모델의 제작, 시험 및 평가를 통해 설계결과를 검증한다.

2. 본 론

2.1 표류부하손 원인 및 분류

슬롯의 존재로 인한 전류 집중과 권선 분포에 의한 기자력은 다양한 형태의 고조파를 함유하고 있으며, 기자력은 무부하시와는 다른 누설 경로 및 자속을 발생시켜 철심, 도체 및 도전성 부품 간에 토크 맥동, 와전류 손실을 발생시킨다. 표류부하손은 고조파 형태, 누설경로에 따라 표 1과 같이 분류할 수 있다.

표 1. 표류부하손 성분 분류

구 분	발생원인	발생위치
표면손	주 자속 퍼미언스 변화	무부하 철손
	지그재그 누설자속	부하 철손
맥동손	퍼미언스 변화	무부하 철손
	지그재그 누설	부하 철손
횡류손	회전자 고조파 전류	회전자 동손
	스큐 누설자속	철손
고조파손	회전자 슬롯, 오버행 외류손	동손, 철손
누설자속손	고정자 슬롯, 오버행 외류손	동손, 철손

표면손은 철심 표면의 부가 철손으로 무부하시는 주

자속의 퍼미언스 변화, 부하시는 지그재그 자속에 의해 발생된다.

치 자속 맥동손은 고정자 치와 회전자 치의 상대적 이동에 의해 발생하는 손실로 주 자속과 누설자속 고조파의 치 자속 맥동은 고정자와 회전자의 치에 부가적인 철손을 발생시킨다.

치 자속 맥동에 의한 회전자 동손은 맥동자속에 의해 농형 권선에 유기되는 회전자 동손으로 자속을 결정하는 파라미터와 함께 권선의 임피던스에 좌우된다.

횡류손은 스큐가 있는 경우 회전자 도체간의 전압차에 의한 횡전류(cross current)에 손실로 슬롯조합과 접촉 저항에 큰 영향을 받는다.

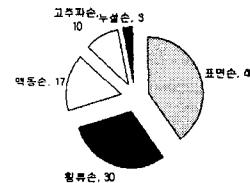


그림 1 표류손 분포

저압 농형유도전동기의 실현을 통해 연구된 결과^[3]에 따르면 표류부하손은 그림 1과 같이 횡류손과 표면손이 전체 표류부하손의 70%정도를 차지하고 있음을 알 수 있다.

2.2 표류부하손 저감기술의 이론적 고찰

2.2.1 표면손(Surface loss)

슬롯 오픈에 의한 퍼미언스 변동과 슬롯의 전류집중에 의한 기자력 분포는 슬롯 주파수와 공극자속의 맥동을 일으켜 철심 표면에 손실을 발생시킨다.

무부하시 고정자 슬롯 오픈에 의한 퍼미언스 변동으로 회전자 표면에 발생되는 무부하 철손은 식 1)과 같고, 슬롯 오픈에 의한 자속맥동 (β)은 그림 2, 극표면 손실계수는 그림 3과 같다.

$$W_{SO} = 2D_1 L \left(\frac{B_g}{100} \right)^2 K_B C_\beta \lambda_1 \quad (1)$$

여기서, D_1 : 공극직경 (in), L : 철심장 (in),

B_g : 공극 자속밀도 (kline/in²), λ_1 : 고정자 슬롯피치

K_B : 슬롯 오픈에 의한 극표면 손실계수

C_β : 회전자 철손계수 @ 100,000 line/in²

부하전류에 의한 계단파 기자력은 무부하 퍼미언스와 유사하지만 크기와 위상이 다른 고조파를 발생시킨다. 기자력 고조파 비율과 퍼미언스 고조파에 대한 기자력 고조파 비율은 다음과 같이 되며, 부하전류에 의한 회전자 표면손은 식 2)와 같다.

$$\frac{\text{mmf ripple}}{\text{기본파}} = \frac{1}{2s+1}$$

$$\frac{\text{기자력고조파}}{\text{파미언스고조파}} = \frac{2(2-\beta)}{\beta(2s+1)} \left(\frac{I}{I_0} \right)$$

여기서, s : 극당 고정자 슬롯수, I, I_0 : 부하, 무부하 전류

$$W_{SL2} = 2D_1 L \left(\frac{I}{sl_0} \right)^2 \left(\frac{B_s}{100} \right)^2 C_{sl} \lambda_1 (W) \quad 2)$$

회전자의 표면손은 식 1)의 무부하 표면손과 식 2)의 부하 표면손의 합으로서 자속밀도의 제곱에 비례하나, 실제는 자기포화에 의한 고조파 맥동자속의 감소로 손실은 감소한다.

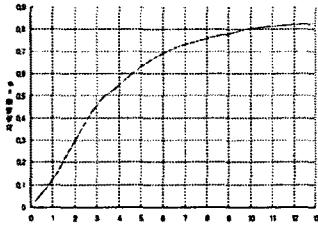


그림 2. 자속맥동

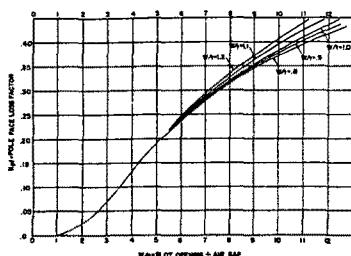


그림 3. 극 표면 손실계수

부하전류에 의한 고정자 표면손은 식 2)로부터 계산되나, 치 피치에 대한 슬롯 오프닝 비율과 표면손 발생 면적에 대한 보정이 필요하다.

$$W_{SL1} = 2D_1 L \left(\frac{I}{sl_0} \right)^2 \left(\frac{B_s}{100} \right)^2 C_{sl} \lambda_2 (W) \quad 3)$$

여기서, r : 극당 회전자 슬롯수, λ_2 : 회전자 슬롯피치

2.2.2. 맥동손

치에서 발생되는 맥동손은 슬롯조합에 매우 큰 영향을 받는다. 회전자 슬롯수가 고정자와 동일한 경우 회전자에 발생되는 고조파 손실만이 표면손에 기여하나, 회전자 슬롯수가 고정자 보다 큰 경우 고정자 슬롯 고조파 자속이 회전자 치에 침투하여 회전자 치에 맥동손과 유기전류에 의한 동손을 발생시키며 슬롯조합비(Z_s/Z_1)에 비례한다.

$$W_{tr} = \frac{2}{\pi} D_1 L_e d_{tr} C_s \frac{L_e}{L} \left(\frac{w_o}{t} \right)^2 \beta^2 \sigma^2 \sin^2 \left(\frac{Z_1}{Z_2} \pi \right) \quad 4)$$

여기서, d_{tr} : 회전자 치 깊이, $\sigma : \frac{w_o}{g}$ 변화에 대한 정수

L_e : 유효철심장, w_o , t : 슬롯 오픈 폭, 치폭

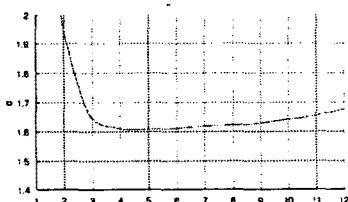


그림 4. w_o/g 에 대한 정수(σ)변화

그러나, 스큐된 경우 슬롯조합에 관계없이 회전자는 고정자 슬롯 고조파 자속의 영향을 받아 인접 도체간 전압차로 회전자 철심에 전류를 유기하여 치 맥동손과 고조파 회전자 동손을 발생시킨다. 회전자 슬롯 기자력에 의해서도 고정자 치 자속은 맥동하나, 고정자 퀸션은 회전자 슬롯고조파에 대해 개방된 회로를 가지므로 치 자속 맥동에 의한 유기전류는 거의 없어 고정자 치에서의 맥동손은 무시 할 수 있다.

2.2.3. 횡류손

스큐된 회전자의 인접 도체 간의 전위차는 철심 중앙에서 최대가 되고 철심 양단에서는 동등하다. 회전자 슬롯이 절연된 경우 전위차로 발생되는 유기 전류의 경로가 차단되나, 대부분은 절연되어 있지 않아 철심을 경유한 인접 바간 횡 전류로 횡류손이 발생되며, 식 5)와 같다.

$$W_q = \frac{2r_q}{L} \frac{Z_2^2}{4\pi^2} \left(\frac{E_v}{X_{0v}} \right)^2 \frac{1}{(1+\tau_{dv})} \left(\frac{t_v}{R} \right)^2 \quad 5)$$

여기서, r_q : 접촉저항, E_v : 단위길이당 바전압

X_v : 고조파 바 리액턴스

τ_{dv} : 디퍼런셜(differential) 누설계수

R : 회전자 반경, t_v : 총 스큐량 ($= \tan \alpha \times L$)

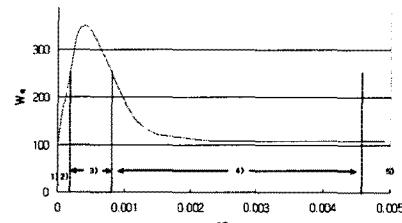


그림 5. 접촉저항 vs 횡류손

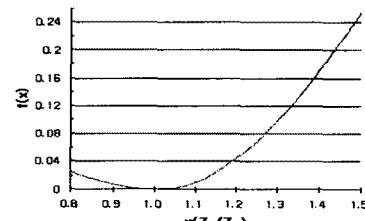


그림 6. 슬롯조합 대 횡류손

횡류손은 로터 바와 철심간의 접촉저항과 슬롯조합의 영향을 받으며, 횡류손 분포는 그림 5와 같이 접촉저항에 따라 다음과 같은 분포를 갖는다.

1) 번 영역($r_q = 0$)에서는 횡전류 손실은 없으며 바 손실은 스큐가 없는 경우와 동일하다.

2) 번 영역(r_q low)에서 횡전류 손실은 직선곡선으로 접촉저항에 비례한다.

3) 번 영역은 접촉저항이 매우 낮은 범위에서 높은 범위까지 분포하며 횡전류 손실이 가장 크게 발생한다.

4) 번 영역은 접촉저항이 매우 큰 영역으로 횡류손은 접촉저항에 반비례하며 생곡선 분포를 갖는다.

5) 번 영역은 접촉저항이 무한대인 영역으로 횡류손은 접촉저항에 반비례하며 철심장의 제곱승에 비례한다.

전동기 설계관점에서 검토하면, 접촉저항이 낮은 영역에서 횡류손은 철심장과는 비례하고 스큐량(t_v)의 제곱승에 비례하는 반면, 접촉저항이 높은 영역은 철심장 길이에 반비례, t_v 의 제곱승에 반비례한다.

2.3 표류부하손 저감방안

중형 유도전동기를 대상으로 설계 및 제작관점에서 검토 된 저감방안을 요약하면 표 2 와 같다.

표 2 유도전동기 표류부하손 저감방법

구 분	저감방법	
	설계 관점	제작 관점
표면손	- 극 표면 손실 저감 ; 슬롯 오픈 대 공극 비율(w_0/g) 최소화	- 철심 손실계수 저감 ; 면칭, 적층 등에 의한 bur, 스트레스 저감
액동손	- 극 표면 손실 저감 - $Z_r > Z_s$ - Non-skew 우선	- 철심 손실계수 저감 - skew 적용된 경우 슬롯절연 실시
횡류손	- 이상기동 억제, 스큐가 필요없는 슬롯조합	- 회전자 슬롯절연 또는 열 충격 실시

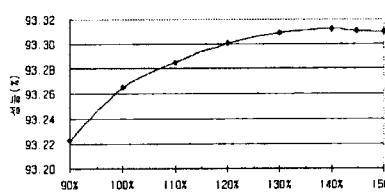
첫째, 설계관점에서 고조파에 의한 이상기동 현상을 억제하면서도 표류부하손을 저감 할 수 있도록 슬롯조합, 슬롯형상, 공극길이, 권선파치, 스큐를 선정하였으며 표 3과 같다.

표 3 슬롯조합, 권선, 스큐 개선방안

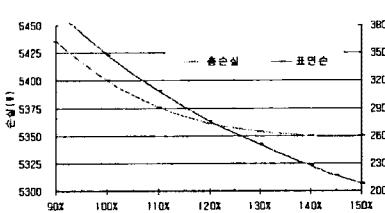
프레임	225 (표준)	225 (고효율)	250 /280
용량	55kW	55kW	75-132kW
슬롯조합	48/40	60/50	72/58
극 짹수	2	2	2
결선방식	2D	2D	2D
스큐	1/48	1/60	1/72
개선내용	- 225 프레임 표준형 40차 동기토크 제거 - 225 고효율, 250/280 프레임 Non-skew 적용		

단, 공극길이는 표류부하손의 주 요인인 표면손과 액동손 특성, 전동기 요구성능, 해외사의 적용조사를 통해 식 6)의 Levi에 제안 된 경험식 계산결과의 115~120 %를 적용하였다. 그럼 7은 공극길이 변화에 대한 전동기 성능 및 손실변화 특성이다.

$$g = 6.26 \times 10^{-3} p^{-1/2} D \quad (\text{mm}) \quad 6)$$



a) 성능(효율) 특성



b) 손실특성

그림 7 공극변화 특성

둘째, 제작관점에서 고정자 철심의 적층공정의 개선으

로 고정자와 회전간의 공극을 안정화하였다.

2.4 시험 및 평가

표류부하손 측정은 정확한 효율 측정법으로 공인 된 IEEE B법을 적용하였으며, 표 4와 같이 표류부하손을 위한 각 방안에 대해 전동기를 조립하여 시험하였다.

표 4 검증모델 조립조건

회전자 고정자	기준(skew)	공극증가 (skew)	공극증가 (Non-skew)
기준	A	-	-
적층개선	B (적층개선)	C (적층+공극) Non-skew	D (적층+공극) Non-skew

기 제작된 모델(A)을 기준한 시험결과를 요약하면 표 5와 같다.

적층방법을 개선한 결과 편심을 감소로 표류부하손 및 고조파 회전자 동손의 감소로 전동기 효율이 향상되었다. 또한, 철손도 감소가 예상되었으나 증가되었으며, 철심에 인가된 스트레스, 고조파 성분 등 설계 및 제작적 요인에 대한 상세한 분석이 요구된다.

공극증가 시험결과, 고조파 누설자속 및 극 표면 손실계수의 감소로 회전자 동손 및 표류부하손이 감소되었으며 그 효과가 가장 현저하였다.

스큐가 없는 모델을 시험한 결과, 스큐가 필요치 않는 슬롯조합이 적용된 경우 이상기동 현상이 전혀 발생치 않을 뿐더러 표류부하손 및 전동기 성능이 동등한 수준임을 확인하였다. 그러나, 철손과 표류부하손이 증가 된 원인은 적층개선 결과와 같이 제작적 요인을 고려한 상세분석이 요구된다.

표 5 250 프레임 75 kW 시험결과

구 분	적층개선 (B)	공극증가 (C)	Non Skew (D)
편심율(%)	-16	-13.8	-6.9
철손	+8.2	-1.1	+1.0
2차동손	-2.5	-7.0	+8.2
표류손	-5.9	-8.3	+1.8
효율(%)	+0.14	+0.2	-0.2

3. 결 론

표류부하손 원인 및 저감방법에 대한 이론적 고찰을 통해 설계 및 제작관점에서 손실 저감방안을 도출하여, 중형 유도전동기를 검증모델로 스큐, 공극, 내경적층에 따른 표류부하손 특성을 시험, 평가하였다.

[참 고 문 헌]

- [1] 박정태, 이정일, 권중록 "Rotor 외경면에 따른 표류손 증감의 검증과 분석", 현대중공업 기술개발본부 연구보고서, 2001
- [2] 박정태, 이정일, "유도전동기 표류부하손 평가기술 개발", 현대중공업 기술개발본부 연구보고서, 2001
- [3]. H. Nishizawa, K. Itomi, etc, "Study on reliable reduction of stray load losses in three-phase motor for mass production," IEEE Trans. on Energy Conversion, Vol. EC-
- [4] K. Hitosugi, S. Moriyasu, N. Shiozaki, "Cross Current Losses in the Rotor of Induction Motors with Cage Bars", 일본전기학회 D, 119권 2호 평성 11년, pp 217-225
- [5] Adnan M. Okok, "Stray-Load Losses and Stray Torques in Induction Machines", AIEE, Trans 1958.
- [6] Christofides, N., "Origins of load losses in induction motors with cast aluminium rotors," Proc. IEE, vol 112
- [7] T.A. Lipo, "Introduction to AC Machine Design", Vol. 1, 1996