

유한 요소법에 의한 End-ring을 고려한 초고속 유도전동기의 설계 및 성능해석

정현호*, 김정호*, 구대현**, 조운현*
*동아대학교, **한국전기연구원

Design and Performance Analysis of High Speed Induction Motor considering end-ring by F.E.M.

Hyun Ho Jung*, Kyung Ho Kim*, Yun Hyun Cho*, Dae Hyun Koo**
*Dong-A University, **KERI

Abstract - This paper describes the design and the performance analysis of high speed induction motor considering end-ring using F.E.M. To investigate the flux distribution, the induced rotor current, the designed high speed induction motor is analyzed by 3-D F.E.M.

Also, to identify the design specification, the performance characteristic is analyzed and estimated into the torque, the current and the output power at the static and the transient state.

1. 서론

유도전동기 특성 해석을 위한 전자계 해석기술로는 주로 2차원 유한 요소법을 이용하여 왔다. 인버터 구동 유도전동기의 2차원 유한 요소법은 회전자 바와 end-ring의 표피효과를 고려한 정확한 해석이 불가능하다. 이에 인버터로 구동의 고주파수 운전이 요구하는 초고속전동기와 같이 회전자 바와 end-ring의 표피효과를 고려한 정확한 해석이 요구되는 경우에는 3차원 해석이 이루어져야 한다.

이에 본 연구에서는 터보 블로우용으로 30,000(rpm) 200KW의 3상 유도전동기를 설계하고, 설계된 전동기의 특성을 고찰하였다. 본 연구에 사용하는 전동기의 정격 속도에서 인버터 기본 주파수는 500(HZ)로 운전함으로써 2차 회전자 바와 엔드링에 유도전류를 정확하게 해석하기 위하여 3차원 유한 요소법으로 전류 밀도 분포 및 자속 밀도를 고찰하였다.

성능 특성으로는 정상상태와 과도상태 시에 토크, 전류 및 출력 특성을 고찰하였다.

2. 해석 모델 및 설계, 해석 방정식

본 연구에서는 초고속 30,000 (rpm) 유도전동기를 개발하기 위하여 그림 1과 같이 모델을 제시하였다.

고정자의 슬롯 구조는 폐 슬롯 형태로 운전시의 토크 리플을 최소화함으로써 진동과 소음을 최소화할 수 있는 구조로 제시되었다.

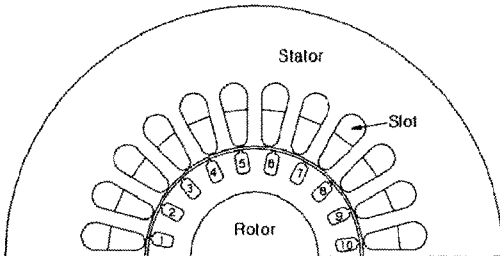


그림 1 초고속 유도전동기의 모델

전동기의 설계치수를 산정하기 위한 기본 특성식은 식

과 같다.

$$P = \frac{1}{1 + K_\phi} \frac{m}{m_1} \frac{\pi}{2} K_e K_i K_r \eta B_g A \frac{f}{p} D_g^2 L_e \quad (1)$$

여기서, K_ϕ 는 회전자와 고정자의 전기장하비, m 은 상수, m_1 은 고정자의 상수, K_e 는 EMF 상수, K_i 는 상당 실효치 전류와 최대전류의 비, A 는 고정자와 회전자 전기장하 합, f 는 주파수, p 는 극쌍수, D_g 는 공극의 직경, 그리고, L_e 는 유효 적층길이이다.

식(1)에서 전기장하와 자기장하 분배를 조절하여 공극내의 자속밀도를 기존의 전동기보다 낮게 설계하였다. 또한, 고주파수의 운전주파수로 운전됨으로 도체의 표피 효과에 의한 저항손을 최소화할 수 있는 리프션 전선을 사용하였다.

유한 요소법에 의한 특성 해석을 하기 위해서는 다음과 같은 지배 방정식을 기초로 하여 2차원, 3차원 유한요소해석법을 적용하여 해석하였다.

$$\begin{aligned} \nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times A \right) &= J_1 + J_2 \\ \nabla \cdot J_2 &= 0 \end{aligned} \quad (2)$$

여기서, A 는 자계벡터 포텐셜, J_1, J_2 은 1차측과 2차측 전류를 나타낸 것이다.

유도전동기의 end-ring을 고려한 2차원 해석을 하기 위하여 end-ring 저항과 bar의 저항은 그림 2의 모델을 기초로 하여 계산하였다.

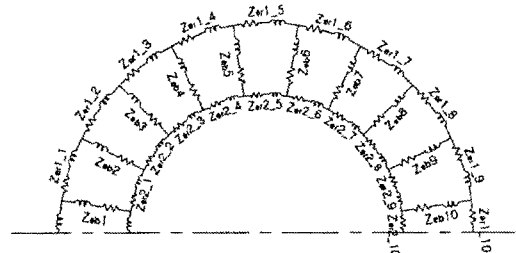


그림 2 유도전동기의 회전자 모델링

회전자 저항은 bar와 2개의 end-ring 저항으로 구어지며, 아래 식 (3)과 같이 구해진다.

$$R_2 = R_b + \frac{R_{er}}{2N_b \sin^2 \left(\frac{p\pi}{N_b} \right)}$$

여기서, R_b 는 bar의 저항, R_{er} 은 end ring의 저항, N_b 는 rotor bar의 개수, 그리고 p 는 극 쌍수를 나타낸다. 이때 회전자의 end-ring의 손실은 식 (4)과 같다.

$$W_{er} = \left(\frac{I_b S_2}{\sqrt{2\pi P}} \right)^2 \times \frac{\rho_r \pi D_{er}}{A_{er}} \times 2 \quad (4)$$

$$= I_b^2 \frac{S_2^2 D_{er} \rho_r}{\pi P^2 A_{er}}$$

여기서, I_b 는 bar의 최대전류, S_2 는 2차측 슬롯수, P 는 극수, ρ_r 는 end-ring의 저항률, D_r 은 end-ring의 평균 직경, 그리고, A_{er} 은 end-ring의 단면적을 나타낸다.

따라서, 2차측 회전자 bar와 end-ring 저항의 저항손은 식 (5)와 같이 쓸 수 있다.

$$W_r = \frac{I_b^2}{m} \left(\frac{S_2 L_2 \rho_b}{2A_b} + \frac{S_2^2 D_r \rho_r}{\pi P^2 A_r} \right) \quad (5)$$

여기서, L_2 는 코어의 길이, ρ_b 는 bar의 저항율, 그리고, A_b 는 bar의 단면적을 나타낸다.

본 연구에서 설계된 초고속 유도전동기 제원은 아래의 표 1과 같다.

표 1 초고속 유도전동기 사양 및 제원

항목	치수	항목	치수
극수	2 pole	고정자	외경 290 [mm]
정격출력	200 [KW]	고정자	내경 128 [mm]
정격전압	380 [V]	고정자	슬롯수 24
주파수	500 [Hz]	회전자	외경 125 [mm]
정격속도	29,820 [rpm]	회전자	내경 75 [mm]
공극	1.5 [mm]	회전자	슬롯수 20

3. 해석 결과

본 논문에서 29,820[rpm] 200[KW]의 초고속 유도전동기는 2극으로서 설계, 해석되었다. 고속 회전운동을 하는 가변속 전동기의 회전자와 고정자에서 발생하는 진동과 소음을 최소화하기 위해서는 공극 자속의 파형이 분석되어야 한다.

공극 자속 형태는 슬롯의 형태, 특히 슬롯 개구폭과 슬롯결합이 중요한 설계 변수가 된다. 본 연구에서 설계된 유도전동기의 자기적 특성을 고찰하기 위하여 3차원 유한요소법을 이용하여 해석하였다.

먼저 고정자 슬롯의 자기적 특성을 고찰하기 위하여 2차원 유한요소법에 의한 자체 해석을 정격 슬롯과 기동시에 전자계 해석을 하였다. 특히 초고속 유도전동기의 진동을 최소화하기 위해서 3차원 공극의 자속분포를 해석하였다.

그림 2와 그림 3은 정격부하에서의 자속선과 공극의 자속 밀도이다. 공극의 자속밀도는 최대 0.65[T]의 값을 갖는다.

그림 4는 3차원 유한요소법을 통한 회전자바의 전류밀도 분포도를 나타내고 있다. 그림 5는 회전자 각각의 바

에 흐르는 전류를 나타낸 것이다.



그림 2 정격부하에서의 자속선도

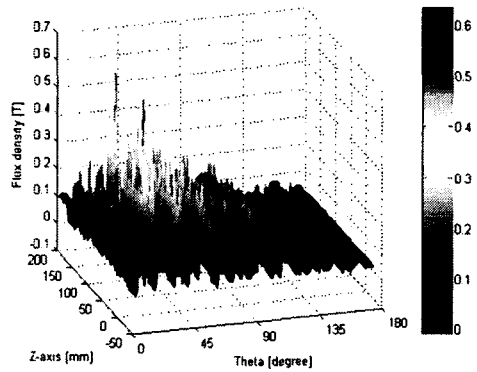


그림 3 공극의 자속밀도

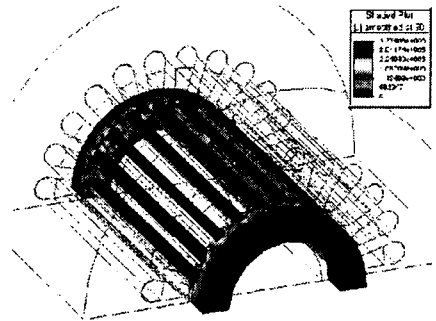
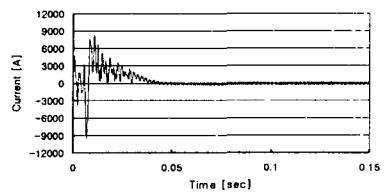
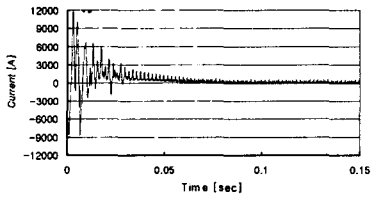


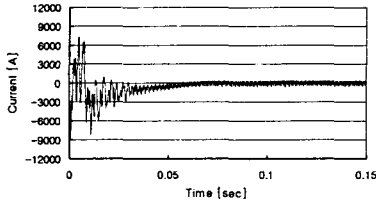
그림 4 회전자 단락환의 전류밀도 분포도



(a) bar 1



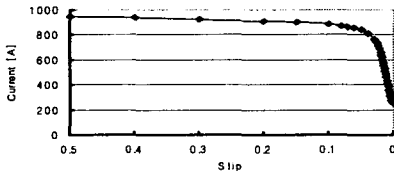
(b) bar 5



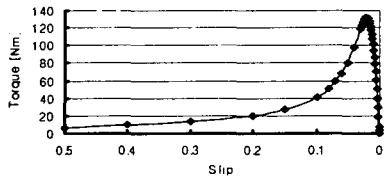
(c) bar 10

그림 5 회전자 바에 흐르는 전류

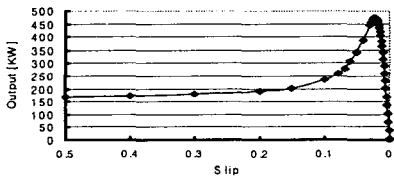
그림 6은 입력주파수 500[Hz]인 380V 2극기 시작기에 대한 슬립이 0.5에서 동기 속도 슬립 0까지 변화할 때 전류, 토크 및 출력의 특성 곡선을 나타낸다. 그 결과로 최대 토크가 130[N.m]이며, 정격 토크 65[N.m]로 슬립 0.006에서 정격 출력 200KW가 발생하는 전동기의 정특성을 나타낸다.



(a) 전류 곡선



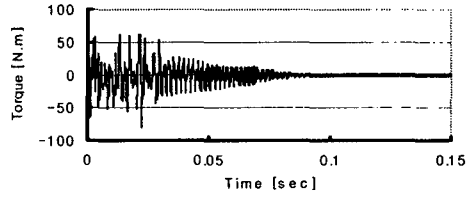
(b) 토크 곡선



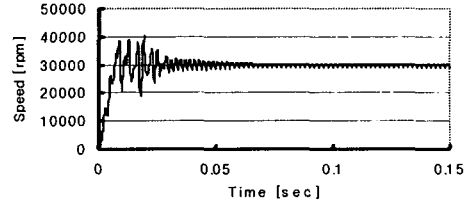
(c) 출력 곡선

그림 6 슬립변화에 따른 특성 곡선

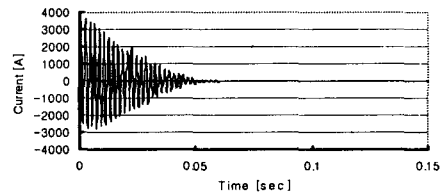
그림 7의 (a), (b), (c)는 무부하시 초고속 유도전동기의 토크 곡선과 속도응답 곡선 및 상전류 곡선을 시간에 따라서 보여주고 있다. 최초 기동시부터 0.03초까지는 급격한 변화를 보이고 있으나 0.03초 이후에는 파형이 점차 안정되어 지고, 0.08초 이후에는 완전히 안정되고 있음을 나타내고 있다.



(a) 토크 곡선



(b) 속도 곡선



(c) 상전류 곡선

그림 7 무부하시의 특성 곡선

4. 결 론

본 논문은 30,000 (rpm) 초고속 유도전동기에 대한 설계 및 유한 요소법에 의한 성능 특성을 고찰하였다. 회전자의 end-ring을 고려한 자속 밀도분포, 전류 밀도분포, 등을 고찰하기 위하여 3차원 유한 요소법을 적용하여 특성을 고찰하였다. 또한, 설계 사양에 대한 성능 특성은 정상상태와 과도 상태의 특성으로 토크, 전류, 출력, 등으로 설계의 타당성을 입증하였다

이 논문은 기초전력공학연구원의 지원에 의하여 수행되었음

[참 고 문 헌]

- [1] Rares C. Krause, Analysis Of Electric Machinery. McGraw-Hill Book Company. 1986
- [2] A. Arkkio, "Analysis of induction motors based on the numerical solution of the magnetic field and circuit equations", Helsinki 1987, Acta Polytechnica Scandinavica, Electrical Engineering Series No. 59.
- [3] Surong Huang, Jian Luo, F. Leonardi and T.A. Lipo "A General Approach to Sizing and Power Density Equations for Comparison of Electrical Machines", IEEE Trans. on Ind. Applications, Vol.34, No.1, pp.92-97, Jan./Feb. 1998