

회전자 슬롯에 U자형 Iron bridge와 Slit이 있는 3상 농형 유도전동기의 특성 비교

°김병택^a, 권병일^a, 박승천^b, 김근웅^c, 윤종학^c
 한양대학교 전기공학과^a, 한양대학교 공학기술연구소^b
 대우중공업(주) 철자연구소

Comparision of the characteristics of 3-phase squirrel cage induction motor with slit and U-iron bridge type rotor slot

B. T. Kim^a, B. I. Kwon^a, S. C. Park^b, K. W. Kim^c, J. H. Yoon^c
 Dept. of Elec., Graduate School of Hanyang Univ.^a, RIET^b
 Daewoo Heavy Industry Ltd. Rolling Stock R&D Lab.^c

Abstract — This paper represents the comparison of harmonic loss characteristics of the inverter-driven 3-phase squirrel cage induction motor with slit and U-iron bridge slots of rotor. Two-dimensional time-stepped finite element method is used for electromagenetic field analysis. And spectrums of bar current, phase current, and torque are compared in each case.

본 논문에서는 고속전철용으로 설계된 1150Kw급 3상 농형유도전동기를 해석을 대상으로 Slit형 회전자슬롯과 3종류의 U자형 iron bridge가 있는 회전자슬롯을 갖는 전동기의 고조파손실 특성을 비교하였다. 특성해석은 인버터전압을 구동원으로 하여 시간 차분유한요소법으로 각각의 경우에 대한 상전류, 토크 및 회전자전류의 특성을 고찰하였다.

2. 해석방법 및 모델

1. 서 론

최근 유도전동기는 전력용반도체소자와 마이크로프로세서의 진보와 새로운 제어이론의 적용으로 기존에 직류기에 비해 단점이었던 제어성능을 확보할 수 있게 되어, 인버터구동 유도전동기의 경우 저주파수에서 고주파수까지의 광범위한 구동으로 우수한 속도제어 특성을 갖는다.

그러나 인버터특성상 출력전압에 시간고조파성분을 포함함으로 인해 몇 가지 문제점이 발생하게 된다. 즉 고조파전류에 의한 철손, 둉손 등의 고조파손실에 의한 열발생등이 대표적이다. 이와 같은 고조파 성분에 의한 손실을 감소시키기 위해 인버터구동시에 적합한 회전자형상들이 연구되었으며, 예로 U자형 iron-bridge와 Slit이 있는 회전자 슬롯이 제안되었다. 이 중에서 U자형 iron-bridge가 있는 슬롯형상이 고조파손실의 저감에 더 적합함을 한 개의 slot을 이용한 해석을 통하여 증명한 바가 있다[1]. 그러나 해석상의 한계로 인해 전동기의 전반적인 특성고찰이 부족하였으므로, 실제 인버터구동 유도전동기의 설계시 U자형 bridge의 형상변화에 따른 상전류 및 회전자전류, 토크등의 전자기적 특성을 고찰할 필요가 있다.

2.1 해석방법

특성해석방법은 전압원을 구동원으로 하는 시간차분 유한요소법을 이용하였으며 3상 농형유도전동기의 2차원해석시 지배방정식은 식(1)과 같다.

$$\frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial^2 A}{\partial x^2} + \frac{\partial^2 A}{\partial y^2} \right) = -J_o + \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \frac{U_b}{l_b} \quad (1)$$

여기서 U_b 와 l_b 는 회전자도체 양단에 걸리는 전압과 회전자 도체의 길이를 각각 나타낸다. 그리고 고정자의 각 상에 대하여 Kirchhoff의 전압법칙을 적용하면, 식(2)와 같은 고정자 회로방정식을 구할 수 있다.

$$\frac{d}{dt} [\psi] + [L_o] \frac{d}{dt} [I] + [R][I] = [V] \quad (2)$$

또한 회전자 회로방정식은 자기 벡터포텐셜 A 와 U_b/l_b 의 항으로 회전자의 각각의 회로에 대해 연립하여 구해질 수 있다[2].

시간 차분 유한요소법을 이용할 때 식(1),(2)의 시간 미분식을 포함하는 벡터포텐셜과 전류는 식

(3)와 같이 표현된다

$$\begin{aligned}\frac{\partial A}{\partial t} &= \frac{A_{t+\Delta t} - A_t}{\Delta t} \\ \frac{\partial I}{\partial t} &= \frac{I_{t+\Delta t} - I_t}{\Delta t}\end{aligned}\quad (3)$$

지배방정식과 고정자 및 회전자 회로방정식을 결합하여 식(4)와 같은 계방정식을 만들 수 있다.

$$\begin{aligned}& \left[\begin{array}{cc|c} [S] + \frac{[T]}{\Delta t} & [H] & -[C] \\ \frac{[G]}{\Delta t} & [Y] & [0] \\ -[C]^T & [0] & -\frac{[L_o] + \Delta t [R]}{h_{eff}} \end{array} \right] \begin{bmatrix} [A] \\ [U_b] \\ [I] \end{bmatrix}_{t+\Delta t} \\ &= \left[\begin{array}{cc|c} [S] + \frac{[T]}{\Delta t} & [H] & -[C] \\ \frac{[G]}{\Delta t} & [Y] & [0] \\ -[C]^T & [0] & -\frac{[L_o]}{h_{eff}} \end{array} \right] \begin{bmatrix} [A] \\ [U_b] \\ [I] \end{bmatrix}_t \\ &+ \begin{bmatrix} [G] \\ \frac{\Delta t}{h_{eff}} [V] \end{bmatrix}_t\end{aligned}\quad (4)$$

계방정식(4)를 계산하면, 식(5)를 이용하여 회전자 도체에 흐르는 전류를 구할 수 있으며, 토오크는 공극부분에서의 자속밀도로부터 Maxwell Stress Tensor Method를 이용하여 계산하였다.

$$I_b = \int_{S_b} \left[-\sigma \frac{\partial A}{\partial t} - \sigma \frac{U_b}{l_b} \right] dx dy \quad (5)$$

2.2 해석모델

해석모델은 1150Kw급으로 설계된 3상 농형유도 전동기로서 형상 및 사양은 그림1과 표1에 나타내었다.

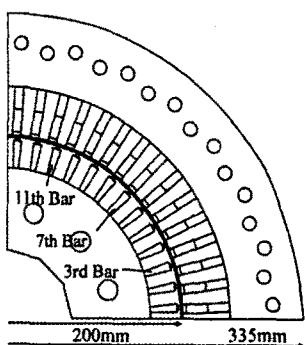


그림 1 해석모델

Fig. 1 Model for analysis

표1. 해석모델의 사양

Table 1. Spec. of the model

극수	4	고정자저항	0.0428Ω
공극길이	2.2mm	바 저항율(CuCr)	$2.16 \times 10^{-8} \Omega m$
적층길이	340mm	회전자면적	224mm

회전자형상은 Slit type과 U-iron bridge 슬롯의 opening의 길이를 변화시켜 특성해석을 하였으며, 각각의 경우에 대한 형상은 그림(2)에 나타내었다.

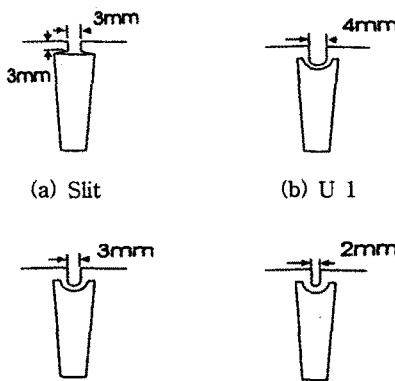


그림 2 회전자슬롯 형상

Fig. 2 Figures of rotor slot

3. 해석 결과 비교

특성해석은 인버터구동 주파수 70Hz, 회전속도 2078rpm일 때 그림2에 나타낸 회전자형상에 대해 하였으며, 차분간격은 매 주기당 64회로 해석하였다. 전동기 구동전압은 Square Wave Inverter에서 출력되는 전압으로, DC 링크단의 전압은 2948 V이다.

이 때의 상전류와 고조파특성은 그림3, 4과 같다.



그림 3 상전류파형

Fig. 3 Phase current wave form

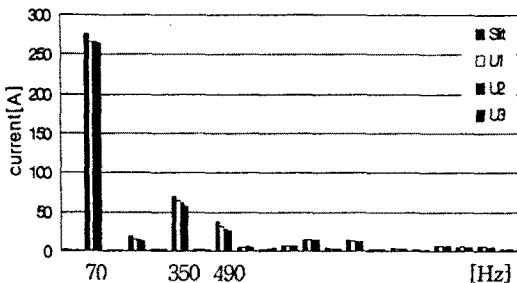


그림 4 상전류의 고조파분석
Fig. 4 Spectrum of phase current

그림3, 4와 같이 고정자 전류성분중 5, 7고조파성분이 U자형 iron-bridge의 경우가 Slit형의 경우보다 작으며, slot opening이 작을수록 감소가 더 커짐을 알 수 있다. 그러므로 이 성분의 고조파 동손이 감소하게 된다. 그리고 회전자도체에서 발생하는 고조파손실을 파악하기위하여 회전자 도체의 전류특성을 구하였고 고조파성분분석을 행하였다.

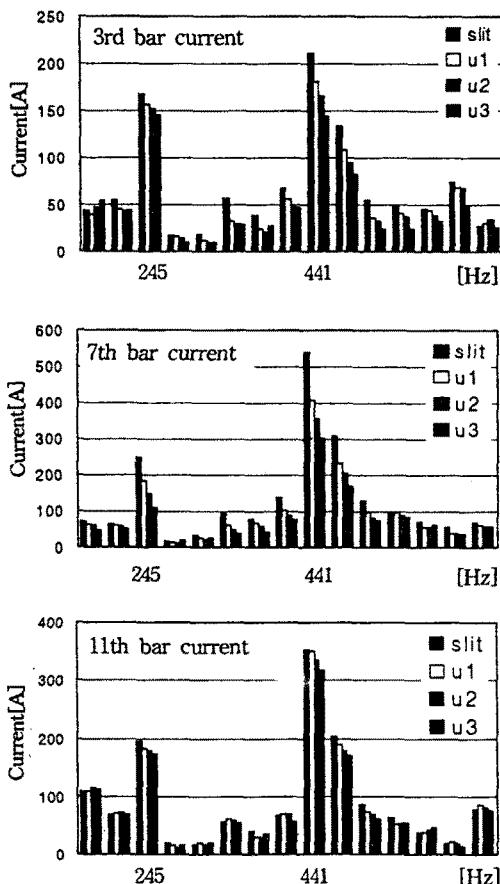


그림 5 회전자도체 전류의 고조파분석
Fig. 5 Spectrum of rotor bar current

위 그림과 같이 회전자도체의 245, 441Hz의 고조파 전류성분의 감소가 두드러짐을 알 수 있으며, 이는 고조파동손의 감소를 의미한다.

또한, 이 때의 토크에 대한 고조파 특성은 다음과 같다.

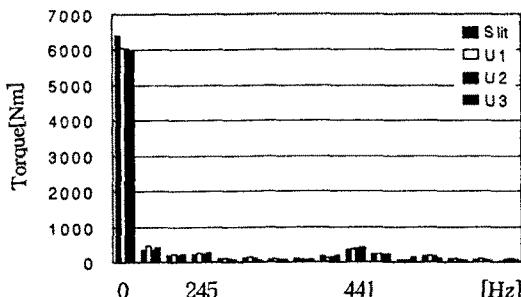


그림 6 토크의 고조파분석
Fig. 6 Spectrum of torque

토크에 대한 고조파 성분분석으로부터 U자형 iron-bridge이 경우가 Slit형의 경우보다 평균토크의 크기가 감소됨을 알 수 있으며, 이는 회전자 슬롯부분의 누설 인덕턴스가 크기 때문이다.

4. 결 론

본 논문에서는 고속 전철용으로 설계된 3상 농형 유도전동기의 인버터 구동시 고조파 손실특성을 파악하기위하여, 회전자 슬롯형상을 U자형 iron-bridge와 Slit형에 대해 특성해석을 하였다. 또한 U자형 iron-bridge형상의 경우 Slot opening의 길이를 변화시켜 특성비교를 하였다. 이로부터 Slit형보다 U자형 iron-bridge 슬롯의 경우가 평균토크는 약간 감소하지만, 상전류의 5, 7고조파성분과 회전자전류의 245, 441Hz성분이 뚜렷히 감소하므로 1, 2차축의 고조파 동손의 저감을 예상할 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] Hans-Peter Nee , On rotor slot design and harmonic phenomena of inverter-fed induction motors , Stockholm Royal Institute of Technology, Thesis of Ph.D, pp. 24-62. 1996.
- [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