

고속전철용 견인 유도전동기의 회전자 슬롯수 변화에 따른 특성고찰

김병택^a, 박승용^a, 권병일^a, 박승찬^b, 이기호^c, 김근웅^c, 윤종학^c
 한양대학교 전기공학과^a, 한양대학교 공학기술연구소^b
 대우중공업(주) 철차연구소^c

Characteristic Investigations of an Asynchronous Traction Motor for High Speed Train According to Various Rotor Slot Number

^aB. T. Kim^a, S.Y.Kwak^a, B. I. Kwon^a, S. C. Park^b, K. H. Lee^c, 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 Center^c

Abstract - This paper deals with investigating some characteristics of the inverter-driven tractive induction motor according to the various rotor slot number. 2-D time-stepped finite element method considering the inverter voltage waveform is utilized for electromagnetic field analysis. As a result, harmonics spectra of torque and bar loss are compared in each case.

1. 서 론

3상 농형 유도전동기의 일반적 구동이론은 회전하는 기자력의 파형이 정현적인 것으로 가정하고 전개되어 있지만, 실제 에너지 전달의 매개에 해당하는 공극에서의 기자력 파형은 다양한 고조파성분을 포함하고 있다. 그 원인으로는 1) 고정자 권선 및 회전자 도체가 슬롯부분에 집중되어 나타나는 공간고조파와 2) 공극면이 슬롯의 개방면 때문에 평활하지 못하여 생기는 슬롯고조파, 그리고 3) 공극길이의 불균일에 기인한 자성체의 포화에 의해 발생하는 고조파 성분으로 나누어 볼 수 있다. 이와 같은 세 가지 원인으로 발생하는 고조파 성분은 전동기의 회전시, 독립적 혹은 상호적으로 전동기의 특성에 영향을 주게되어, crawling 등과 같은 기생 토오르크 성분은 물론 소음의 원인이 되기도 한다.

이와같은 악영향을 피하기 위해 1)의 경우 고정자 권선에 단절권을 시행하여 고조파 성분을 줄이며, 2)에 대해서는 스큐 슬롯을 적용하거나, 고정자 및 회전자 슬롯의 갭수비를 조절하여 고조파성분을 최소화 하는 방법을 사용한다. 이 중 고정자와 회전자의 슬롯의 갭수비를 결정하는 방법은 간단한 이론에 의해 쉽게 결정되어질 수 있지만[1], 많은 가정을 근거로 하였으므로, 실제의 경우 예상과 상당히 다른 결과를 초래하기도 하며,

최근 인버터를 이용한 제어특성을 고려할 때 기존의 슬롯수결정법에 의한 특성예측은 많은 오차를 수반하게 된다. 따라서, 전동기 특성의 정확한 예측을 위해서는 수치 계산을 통한 해석이 필요하다.

본 논문에서는 고속전철용으로 설계된 1150 kW급 3상 농형 유도전동기를 대상으로, 고정자 슬롯수 60개를 기준으로 3가지의 회전자 슬롯수에 대하여 특성을 고찰하였다. 해석방법으로는 인버터 전압을 구동원으로 하는 시간 차분유한요소법을 이용하였다.

2. 해석방법 및 모델

2.1 해석모델

해석모델은 1150kW급으로 설계된 3상 농형유도전동기로서 형상 및 사양은 그림1과 표1에 나타내었다.

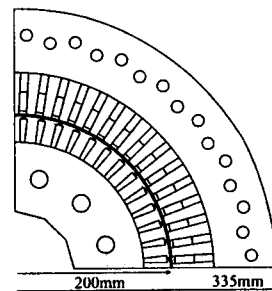


그림 1 해석모델

Fig. 1 Model for analysis

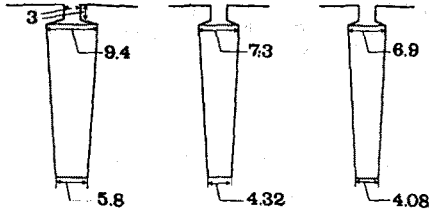
표 1. 해석모델의 사양

Table 1. Specifications of the model

극수	4	고정자저항	0.0428Ω
공극길이	2.2mm	바 저항율(CuCr)	$2.16 \times 10^{-8} \Omega \cdot m$
적층길이	430mm	회전자 bar 총면적	11,856mm ²

2.2 회전자 슬롯수 및 형상결정

회전자 슬롯수의 선정은 고정자 슬롯수 60개를 기준으로 할 때, 기본설계한 회전자 슬롯수 52와 이와 동일한 차수의 전자력의 공간 고조파를 발생시킬 것으로 예상되는 68개 및 72개의 경우로 하였다. 각각의 경우에 대한 형상의 기준은 회전자 도체가 차지하는 총면적과 슬롯깊이를 동일하게 하도록 정하였으며, 그림 2와 같다.



a) 52개일 때 b) 68개일 때 c) 72개일 때
그림 2 회전자슬롯 형상

Fig. 2 Shapes of rotor slot

2.3 해석방법

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

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

$$+ \sigma \frac{\partial A}{\partial t} + \sigma \frac{U_b}{l_b}$$

여기서, U_b 와 l_b 는 해석영역 내부의 회전자 도체 양단에 걸리는 전압과 회전자 도체의 길이를 각각 나타낸다. 그리고 고정자의 각 상에 대하여 Kirichhoff의 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 A와 U_b/l_b 의 향으로 회전자의 각각의 회로에 대해 연립하여 구해질 수 있다[2].

시간 차분 유한요소법을 이용할 때 식(1),(2)의 시간 미분식을 포함하는 벡터포텐셜과 전류는 후퇴차분법을 적용하였으며, 지배방정식과 고정자 및 회전자 회로방정식을 결합하면 식(3)와 같은 계방정식을 만들 수 있다.

$$\begin{bmatrix} [S] + \frac{[T]}{\Delta t} & [H] & -[C] \\ \frac{[G]}{\Delta t} & [Y] & [0] \\ -[C]^T & [0] & -\frac{[L_o] + \Delta t [R]}{h_{eff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [U_b] \\ [I] \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} [G] \\ \frac{\Delta t}{h_{eff}} [V] \end{bmatrix} = 0 \quad (3)$$

계 방정식 (3)를 계산하면, 회전자 도체에 흐르는 전류를 구할 수 있으며, 토오크는 공극부분에서의 자속밀도로부터 Maxwell stress tensor method를 이용하여 계산하였다.

3. 해석 결과 비교

인버터구동 주파수 55Hz, 회전속도 1635 rpm일 때 그림 2에 나타난 회전자 형상에 대하여 특성 해석을 하였으며, 차분간격은 매 주기당 200회로 해석하였다. 전동기 구동 전압은 square wave inverter에서 출력되는 전압이며, DC 링크단의 전압은 2800 V이다. 이 때의 토오크 파형은 그림3과 같다.

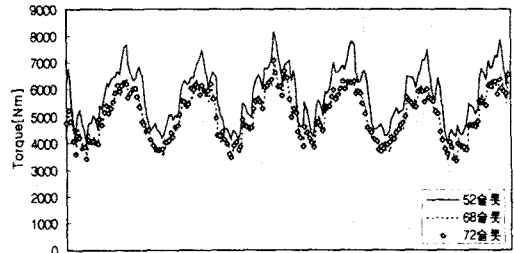
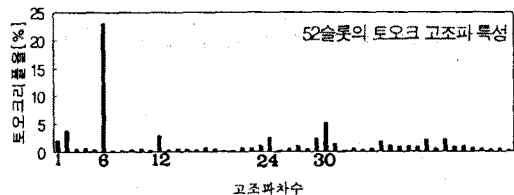


그림 3 토오크 리플
Fig. 3 Torque ripple

그림 3의 토오크 특성에서 슬롯수 52개의 경우보다 나머지의 경우가 평균토오크의 크기가 작아지는 것은 슬롯수의 증가에 따라 슬롯개방면이 많아짐으로써 유효공극길이 길어지는 영향에 기인한 것으로 볼 수 있으며, 설계시 이에 대한 고려가 필요할 것임을 알 수 있다. 이와 같이 평균토오크의 크기가 상이하므로 토오크의 고조파 분석은 평균토오크대 고조파성분의 비로 나타내어 알 수 있으며, 그림 4에 나타내었다.



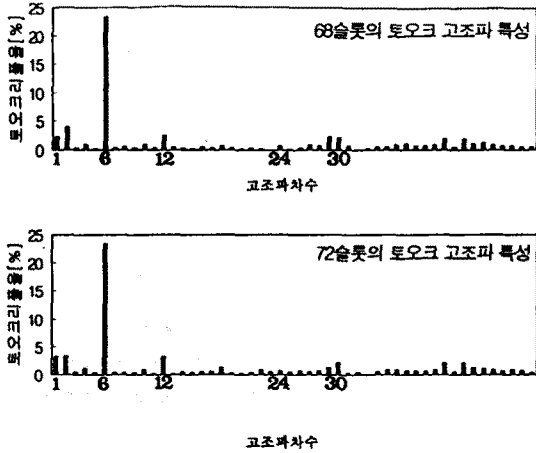


그림 4 토오크의 고조파분석
Fig. 4 Spectrum of torque

그림 4로부터 세가지의 경우 모두 square wave inverter 의 시간고조파로 인하여 6고조파 성분이 우세함을 알 수 있으나, 특히 24 및 30 고조파성분의 경우 52개의 슬롯을 가진 경우가 68 및 72개의 경우보다 고조파 리플률이 큰 것을 볼 수 있다. 평균 토오크에 대한 26-35 고조파성분 및 그 이외의 고조파 성분의 실효치 비를 표 2에 나타내었다.

표 2. 고조파 토오크의 실효치 비교
Table 2. Comparison of harmonic torque

	평균토오크	26-35고조파 성분의 실효치	이외의 고조파 성분의 실효치
52슬롯	5791 [Nm]	4.3%	17.2%
68슬롯	5010 [Nm]	2.5%	17.2%
72슬롯	5013 [Nm]	2.1%	17.3%

또한 이때의 회전자 도체에 생기는 손실특성과 고조파 분석결과를 그림 5 및 그림 6에 나타내었다.

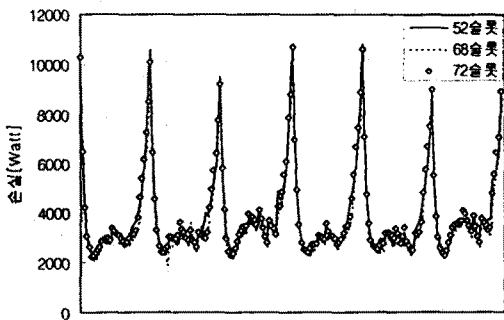


그림 5 회전자도체의 손실파형
Fig. 5 Rotor bar loss wave form

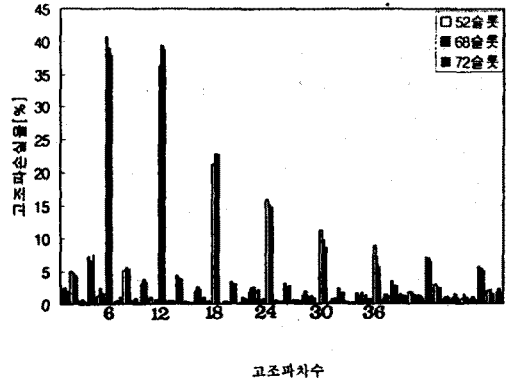


그림 6 평균 손실대비 고조파 손실특성
Fig. 6 Spectrum of rotor bar Loss

그림 5, 그림 6의 손실 특성으로부터 52개의 슬롯수 인 경우 6고조파 손실분이 크게 나타나며, 고조파 토오크로 크게 나타나는 24-36 고조파 부근의 손실분도 커짐을 볼 수 있다. 평균손실에 대한 26-35 고조파 손실 성분과 그외의 고조파손실분의 실효치를 비교하여 표3에 나타내었으며, 이는 토오크의 고조파 특성결과와 일치함을 알 수 있다.

표 3. 고조파손실분의 실효치비교
Table 3. Comparison of Harmonic loss

	평균손실	26-35고조파 성분의 실효치	이외의 고조파 성분의 실효치
52슬롯	3864 [W]	8.6%	44.9%
68슬롯	3650 [W]	7.5%	45.6%
72슬롯	3901 [W]	6.8%	44.6%

4. 결 론

본 논문에서는 고속전철용 건인유도전동기의 회전자 슬롯수 변화에 대한 전동기의 특성을 고찰하기 위하여, 60 개의 고정자 슬롯수에 관하여, 회전자 슬롯수가 52개, 68개 및 72개 일때의 토오크와 회전자 손실특성을 해석하였다. 해석결과로부터, 68개 및 72개의 회전자 슬롯의 경우는 52개의 슬롯수를 가지는 경우보다 평균 토오크가 감소하므로 회전자 슬롯 개방폭의 설계가 필요하며, 토오크 리플의 24차 및 30차 고조파 성분이 감소함을 알 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] 小林 孝司, "誘導電動機の電機設計と騒音", '96 モータ技術シンポジウム, 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