

운전조건을 고려한 대용량 철도 차량용 건인 유도전동기의 특성해석

김광덕*, 김용재**, 정상용*
 동아대*, 조선대**

Characteristic analysis & Design of a large power traction induction motor for rolling stock considering the operating condition

Kwang-duck Kim*, Yong-Jea Kim**, Sang-yong Jung*
 Dong-A University*, Chosun University**

Abstract - 본 논문에서는 대용량 철도 차량용 건인 유도전동기의 가변주파수에 따른 특성해석에 대해 다루고자 한다. 철도 차량용 건인 유도전동기는 가변속 운전을 하기 때문에 가변주파수에 대한 해석이 필요하고, 유도 전동기의 운전 상태를 결정하는 슬립 또한 운전 조건과 함께 고려해주어야 한다. 따라서 슬립과 주파수를 함께 고려하는 슬립주파수 해석을 통하여 유도전동기의 해석을 수행하였다. 또한 유도가 가변속 구동을 할 때, 건인용 전동기의 특성상 운전영역을 크게 정 토크 영역과 정 출력 영역 그리고 특성영역을 나누어서 특성해석을 하였으며, 특히 각각의 영역에서 주요 운전 점을 선정하여 특성해석을 수행하였다.

영역에서 출력이 일정한 일정출력영역 그리고 마지막으로 기준속도이상의 영역에서 각주파수가 최대로 유지되는 특성영역으로 나누어진다.[3]

1. 서 론

최근 철도 차량용 건인 전동기는 에너지 밀도와 효율이 높은 영구자석 전동기가 많이 사용되고 있다. 하지만 영구자석의 보급에 대한 문제와 높은 가격으로 인하여 산업경쟁력이 낮아지면서 영구자석을 사용하지 않는 유도전동기에 대한 관심이 다시 증가하는 추세를 보이고 있다. 유도전동기는 오랜 기간 동안 연구되어 왔고 신뢰성이 높은 전동기로서, 산업경쟁력의 강점을 지니고 있고 구조적 강건성도 우수하여 빈번한 기동, 차량의 진동, 내열성 및 신뢰성의 이점을 가지고 있다. 특히 가변속 운전을 하는 철도 차량용 구동시스템에서 요구되는 속도변화나 부하변동에 대해 응답성이 매우 빠르고 고속 운전특성이 우수하여 넓은 운전영역을 확보할 수 있어 철도 차량용 전동기에 적합하다.

유도전동기는 운전상태에 따라 정토크영역과 정출력영역 그리고 특성영역으로 나누어지는 각각의 운전 특성을 지니고 있다. 따라서 각 영역의 주요 운전 점을 선정하고 특성해석을 수행하여, 목표성능의 만족여부와 인가되는 전압과 전류 크기를 확인하여 제한 조건을 만족하는지 확인하여야 한다[1].

따라서 본 논문은 철도 차량의 가변속 구동 특성을 만족시키기 위해, 각각의 주요 운전 점에서 주파수 변화에 따른 슬립주파수 해석을 수행하였다. 해석방법은 전류원으로 해석하였으며, 각각의 운전 점에 대한 전압의 제한조건을 만족하는지에 대해 살펴보았다.[2]

2. 본 론

2.1 주파수 증가에 따른 유도전동기의 특징

유도 전동기는 근본적으로 인가 주파수에 비례하여 회전하는 전동기이므로, 속도제어를 위해서는 회전자계 속도를 제어하는 것이 효과적이다.[2] 식 (1)은 회전자계의 속도를 나타낸 식이다.

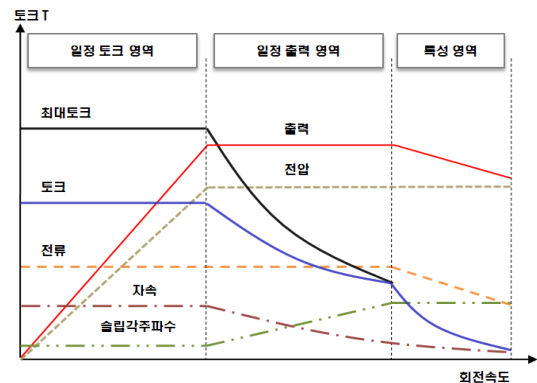
$$n_s = \frac{120f_s}{P} \quad (1)$$

속도를 구하는 기본적인 식 (1)에서, 전압은 일정하며 입력주파수가 변하게 되면 발생토크에도 영향을 미치게 된다. 이것은 공극 자속의 의해 토크가 영향을 받기 때문이다. 공극자속은 전압에 비례하고 주파수에 반비례하므로 일정한 전압에서 주파수가 증가된다면, 공극자속은 줄어들게 되고 결국 식 (2)에서 나타나듯이 토크가 감소하게 된다.

$$T \cong \frac{V_s^2}{(R_r/s)^2 + (\omega_s L_r)^2} \frac{R_r}{\omega_s s} \quad (2)$$

2.2 유도전동기의 속도영역

유도전동기의 가변속 구동은 주파수와 전압의 가변을 통해 이루어질 수 있는데 이를 통해 얻을 수 있는 유도전동기의 속도 범위는 출력 토크의 특성에 따라 다음과 같이 나눌 수 있다. 먼저 기준속도 이하의 영역에서 토크가 일정하게 유지되는 일정 토크 영역과 기준속도 이상의



〈그림 1〉 유도전동기의 특성 곡선

일정 토크 영역에서는 전압과 주파수가 비례하여 증가하기 때문에 공극자속이 일정하게 유지된다. 따라서 공극자속에 비례하는 토크는 일정하게 유지되며, 주파수의 증가에 따른 속도가 증가한다.

속도가 계속 증가하면, 이에 따라 역기전력이 증가하기 때문에 원하는 전류를 흐르게 하기 위해서는 전동기의 고정자 전압을 계속 증가시켜 주어야 한다. 그러나 전동기의 고정자 전압은 정격값 이상으로 제한되어 있기 때문에 어느 속도 이상에서 전동기의 전압은 정격 전압으로 일정하게 제한된다. 이때의 속도를 기준속도라고 하며, 기준속도 이상의 속도에서 유도 전동기는 일정전압으로 운전되므로 운전주파수의 증가에 따라 전압과 주파수의 비에 의해 결정되는 자속은 감소하게 되며 회전자 전류 역시 감소한다. 고정자 전압이 일정하면 운전 주파수 증가에 따

라 자속 $\phi \propto \frac{E_s}{f_s}$ 와 회전자 전류 I_r 이 감소하게 되어 슬립 각 주파수

에 일정한 경우 유도전동기의 출력 토크는 운전주파수의 제곱에 비례하여 감소함을 알 수 있다. 그러나 주파수 증가에 따라 슬립 각주파수를 증가시킨다면, 슬립이 증가되어 회전자 회로의 임피던스가 작아져서 전류를 일정하게 유지할 수 있다. 이와 같이 이 영역에서는 운전주파수 증가에 따라 슬립 각주파수를 증가시키는 운전을 한다. 이 영역에서 고정자 전압은 일정하며 전류 또한 일정하므로 일정 출력으로 운전되어 이 영역을 일정 출력 영역이라 한다.

일정 출력 영역에서 속도 증가를 위해 운전 주파수를 더욱 증가시키면 토크의 감소율을 낮추기 위해 슬립 각주파수를 증가시켜야 하는데 슬립은 다음과 같이 안정한 운전을 위한 그 최대값 s_{max} 가 존재하므로 슬립 각주파수를 증가시키는 데에는 한계가 있다. 슬립 각주파수가 한계치에 도달하여 더 증가시키지 못하는 경우에는 어쩔 수 없이 전류와 자속이 동시에 감소하여 결국 출력 토크는 속도의 제곱에 반비례하여 감소하게 된다. 또한 전류의 감소로 인하여 출력도 일정하게 유지되는 못한다. 이 영역에서는 언제나 최대 토크가 발생하는 최대 슬립에서 운전되므로 이 영역을 특성영역이라 부른다.

2.3 유도전동기의 전압과 전류 제한 조건

앞서 언급한 가변속 운전특성을 바탕으로 속도에 따라 전류와 전압이 어떠한 제한 조건을 갖는지 살펴보았다. 인버터가 출력할 수 있는 최대 전압은 사용 가능한 직류 링크측 전압 V_{dc} 에 의해 결정된다. 이와 같

이 전동기에서 사용 가능한 상전압의 최대값은 V_{max} 로 제한할 수 있다. 본 논문에서는 전류원으로 해석을 하였으므로, 각 운전 점에 맞는 전류를 넣어 전압의 조건을 만족하는지 확인하였다. 아래의 식은 전류원 해석 시 전압의 제한 식을 나타낸다[4].

$$V = E + RI = j2\pi f\phi + RI \quad (3)$$

$$Re(V) = -2\pi fIm(\phi) + R \cdot Re(I) \quad (4)$$

$$Im(V) = 2\pi fRe(\phi) + R \cdot Im(I) \quad (5)$$

$$V_{peak} = \sqrt{Re(V)^2 + Im(V)^2} \quad (6)$$

위 식에서 V는 1차측 전압, E는 유도 기전력, R은 상당 코일저항, I는 코일에 흐르는 전류, ϕ 는 자속이다. $Re(V)$ 와 $Im(V)$ 는 유효와 무효 1차측 전압이며, $Re(\phi)$ 와 $Im(\phi)$ 는 유효와 무효 자속을 나타내며, $Re(I)$ 와 $Im(I)$ 는 유효와 무효 1차측 전류를 나타낸다.

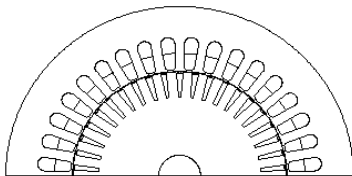
2.4 유도전동기의 해석 모델 및 결과

본 논문에서 다룬 유도전동기의 해석모델을 <표 1>에 나타내었다.

<표 1> 해석 모델의 제한

목표사양	출력	65kW
	운전범위	0-3600rpm
	과속도	4320rpm
전원 사양	모터 선간전압	min.500V - max. 640V
	인버터 최저 전압	640Vdc

유도전동기의 해석 모델을 <그림 2>과 같이 선정하였다.



<그림 2> 선정된 모델

2.4.1 건인용 유도전동기 성능곡선

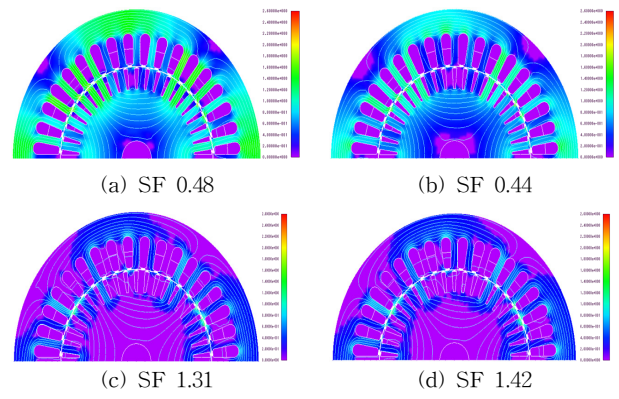
<그림 2>는 본 논문에서 특성해석을 수행하기 위해 선정된 유도전동기 모델의 단면도이다. 유도전동기의 각 운전 영역에서 토크 및 슬립 주파수 등의 특성을 확인하기 위하여 운전 점에 대한 해석을 수행 하였다. 운전영역은 앞서 설명한 것과 같이 정 토크 영역과 정 출력 영역으로 구분하였으며 여기서 운전 점 A는 정 토크 운전이 끝나는 지점이며, 운전 점 B는 V/f가 끝나는 지점, 운전 점 C는 일정 출력 영역이 끝나는 지점, 마지막으로 운전점 D는 최대속도 일 때의 운전 점으로 지정하여, 각 운전 점에서의 토크 및 슬립에 대한 결과를 분석하였다.

<표 2> 해석 결과

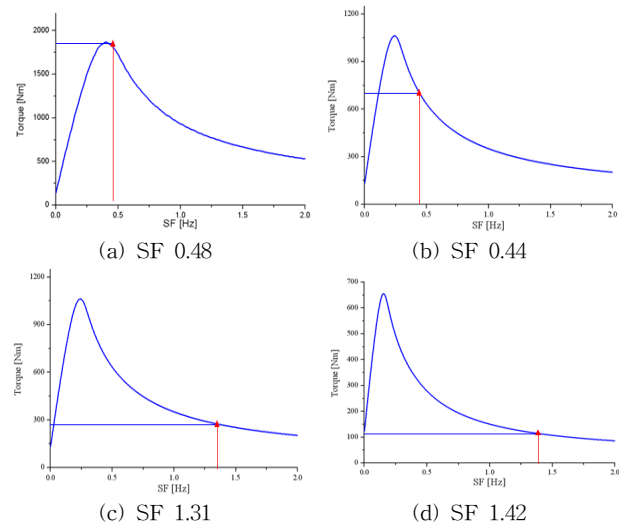
항목	입력전류 (RMS)	속도 (RPM)	토크 (Nm)	슬립 (%)	SF (Hz)
운전점A	163	355	1776.72	3.54	0.48
운전점B	92	888	703.47	1.47	0.44
운전점C	92	2219	281.12	1.74	1.31
운전점D	58	3551	108.50	1.19	1.42

전동기의 전류는 통상 허용 열정격을 초과하지 않도록 정격 값으로 제한되는데, 경우에 따라서는 냉각조건을 고려하여 고출력을 낼 수 있도록 정격의 150%-300% 정도의 전류를 단시간 동안 허용하기도 한다. 따라서 운전점 A에서 순간적인 토크의 증가로 인하여 정격전류 이상의 전류를 필요하다는 것을 알 수 있으며, 일정 출력 영역인 운전점 B에서 운전점 C까지는 슬립주파수의 증가에 따라 토크의 크기가 감소하는 것을 알 수 있다. 마지막으로 최대 속도 운전점인 D점에서는 슬립이 가장 낮아지고 토크가 가장 작은 것을 알 수 있다.

아래의 그림(2)는 각 운전점에 따른 자속밀도 분포를 그림(3)은 슬립주파수 해석결과를 나타낸다.



<그림 3> 운전점 별 자속밀도(Flux Density) 결과



<그림 4> 운전점 별 슬립 주파수 해석을 통한 토크 결과

3. 결 론

본 논문에서는 철도 차량 건인용 유도전동기의 설계 모델을 유한 요소법을 이용한 전자기 수치해석을 통하여 토크 및 전압, 주파수 특성 등을 검토를 하였다. 특히 유도전동기의 속도 및 토크를 결정하는 중요한 요소인 주파수 및 슬립을 결정하기 위해 슬립주파수 해석을 하였으며, 각 운전 영역에 대해서도 중요한 운전점을 선정하여 특성해석을 하였다. 또한 설계단계에서 유도전동기의 전압과 전류 제한 조건을 검토함으로써 실제 운전 시 문제가 발생하지 않도록 하였다. 결론적으로 철도 건인용 유도전동기에 대한 수치해석적인 특성해석을 바탕으로 성능사양을 만족하는 것을 확인할 수 있었다.

< 감사의 글 >

본 논문은 교육과학기술부의 한국연구재단(2011-0005679)과 지식경제부의 산업원천기술개발사업(10035411)의 지원을 받아 수행된 연구임.

[참 고 문 헌]

- [1] 김상훈, 설승기, 박민호, "약계자 영역에서 유도전동기의 최대 토크 운전", 전기학회논문지, 제 43권 제3호 1994.2, page(s):225-232
- [2] Liang Xiaoding, R. Laughy, J. Liu, "Investigation of Induction Motors Starting and Operation with Variable Frequency Drives", Electrical and Computer Engineering, 2007, page(s) : 556-561
- [3] C.D Pitis, M.W Zeller, "Power savings obtained from supply voltage variation on squirrel cage induction motors" Electric Power Conference, 2008, page(s):1-3
- [4] Ion Boldea, Syed A. Nasar "The Induction Machines Design Handbook, Second Edition." 2nd Edition, CRC Press. 2009