

## 철도차량용 견인전동기 파라미터 확인에 대한 연구

임상수<sup>\*†</sup>, 김정철<sup>\*</sup>, 정은성<sup>\*</sup>, 박성호<sup>\*</sup>

Sang Su Lim<sup>\*†</sup>, Jeong Cheol Kim<sup>\*</sup>, Eun Sung Chung<sup>\*</sup>, Seong Ho Park<sup>\*</sup>

**Abstract** Induction motor is known as competitive price, easy to maintenance and hard to its control. But the induction motor is normally used now in whole industry including rolling stock due to its control technology advancement. It is very important to know exact parameters of the induction motor to accurately control it. There are two methods to know the parameters of the induction motor, simulation method and test method. Simulation method is easy to check the parameters, but not accurate. On the other hand, test method is accurate, but there are several methods according to the calculation. So it is important to know that which calculation method is best for induction motor of rolling stock. This paper shows that which method is suitable to check the parameters of induction motor.

**Keywords** : Induction motor, Equivalent circuit, Parameter, Inverter control

**초 록** 유도전동기는 특유의 간단한 구조로 인해 다른 타입에 비해 경쟁력있는 비용과 취급의 용이성이 뛰어나지만 타 전동기에 비해 제어가 쉽지 않다. 하지만 최근 인버터 제어 기술의 발달에 힘입어 유도전동기가 철도차량을 비롯한 산업 전반에 걸쳐 널리 쓰이고 있다. 특히 철도차량용 전동기는 속도 변화가 빈번하여 인버터의 정밀한 제어가 요구되는데 이를 위해 견인전동기의 정확한 파라미터 확인은 필수적이다. 전동기 파라미터를 확인하는 방법으로는 시뮬레이션법과 시험을 통한 확인법이 있는데 시뮬레이션법은 계산 오차로 인해 실제 파라미터와 차이가 있고 시험을 통한 확인법은 비교적 정확하나 계산방법이 다양하여 적절한 시험법을 찾는 것이 중요하다. 본 논문에서는 철도차량용 견인전동기에 적합한 파라미터 확인 방법을 제시하고 인버터 제어에 활용하여 검증하고자 한다.

**주요어** : 유도 전동기, 등가회로, 파라미터, 인버터 제어

### 1. 서 론

철도차량에서 추진시스템은 차량을 움직이는 매우 중요한 장치로써, 크게 견인전동기와 견인전동기를 제어하는 주변환장치로 구성된다. 주변환장치가 철도차량을 움직이기 위해서는 견인전동기를 정밀하게 제어할 수 있어야 하는데 이 때 필수적으로 요구되는 것이 견인전동

† 교신저자: 현대로템 전장품개발팀(lim17@hyundai-rotem.co.kr)

\* 현대로템 전장품개발팀

기의 파라미터이다. 견인전동기 파라미터를 확인하는 방법으로는 시뮬레이션법과 시험을 통한 확인법이 있다. 시뮬레이션을 이용해 전동기 파라미터를 구하는 방법은 계산 오차로 인해 실제 파라미터와 거리가 있는데 특히 인버터를 사용하는 환경이라면 인버터에서 발생하는 고조파를 시뮬레이션에서 고려하기 힘들기 때문에 고조파 성분이 포함된 전동기 파라미터를 알아내기 힘들다. 두번째로 시험을 통한 전동기 파라미터 확인법은 시뮬레이션 방법에 비해 정확하나 그 계산방법이 매우 다양하여 유도 전동기 파라미터를 찾기 위한 적절한 시험 및 계산 방법을 찾는 것이 중요하다.

본 논문에서는 철도차량용 견인전동기에 적합한 파라미터 확인 방법을 제시하고 시뮬레이션을 통해 얻은 전동기 파라미터와 시험을 통해 얻은 전동기 파라미터를 인버터 제어 알고리즘에 적용하여 차량 속도 결과를 비교함으로써 본 논문에서 제시하는 방법의 적합성을 검증하고자 한다.

## 2. 본 론

### 2.1 유도 전동기 등가회로

유도 전동기 등가회로는 전동기를 저항이나 인덕턴스로 모델링한 회로로써 부하 변화에 대한 전동기의 특성 변화를 확인하여 인버터 제어에 활용되는 자료이다[1].

### 2.2 등가회로 파라미터

유도 전동기 운전은 고정자 회로에서 회전자 회로로 유기되는 전압과 전류에 의해 좌우되는데 이 과정은 변압기와 매우 유사하며 등가회로 역시 비슷한 구성을 갖는다. 유도 전동기 등가회로는 그림 1과 같다.  $R_1$ 은 고정자 저항을,  $X_1$ 은 고정자 자기 인덕턴스를 모델링하였고  $R_2$ 는 회전자 저항을,  $X_2$ 는 회전자 자기 인덕턴스를 뜻한다.  $R_c$ 는 철손에 해당하는 저항을,  $X_m$ 은 상호 인덕턴스를 나타낸다.

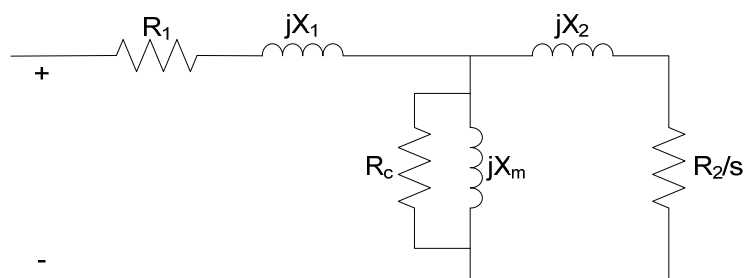


그림. 1 유도 전동기 등가회로

### 2.3 시뮬레이션을 통한 파라미터 측정법

유도 전동기의 형상을 바탕으로 시뮬레이션하여 파라미터를 측정하는 방법이다. 보통 상용 프로그램을 사용하며 프로그램에 유도전동기의 고정자 내외경 치수, 슬롯 깊이, 폭 등 설계하고자 하는 전동기 사양을 입력하여 파라미터를 얻어내고 이를 바탕으로 견인전동기의 특성을 파악하는데 사용한다.

## 2.4 시험을 통한 파라미터 측정법

등가회로 파라미터를 추정하기 위해서 권선저항 측정 시험과 무부하 시험, 구속 시험을 실시하며 각 시험을 통해 얻은 전압과 전류, 입력 전력, 역률, 주파수 등을 바탕으로 파라미터를 계산한다.

### 2.4.1 권선저항 측정 시험

그림 2와 같이 고정자 코일에 직류 전압을 걸어주면 고정자 코일로 직류 전류가 흐르므로  $R_1$ 을 구할 수 있다. 직류 전류가 흐르기 때문에 인덕턴스 성분인  $X_1$ 과 회전자 회로 성분이 무시된다. 철도 차량용 견인전동기의 경우 권선저항이 매우 낮으므로 저저항기를 사용하며 권선저항은 온도에 영향을 받으므로 견인 전동기 사용 온도로 환산하여 관리한다.

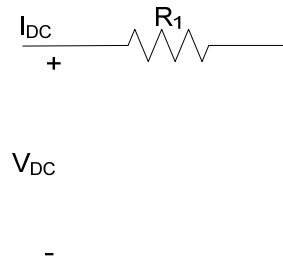


그림. 2 권선저항 측정 시험

### 2.4.2 구속 시험

구속시험은 변압기의 단락시험과 유사한 시험으로 회전자가 움직이지 못하게 고정시키고 실시한다. 회전자의 회전 속도는 “0” 이므로 슬립은 1이 되고 등가회로에서  $R_2/s$  성분이  $R_2$ 로 유도된다. 코어 회로의  $R_c$ 와  $X_m$ 이 회전자 회로의 임피던스보다 크므로 코어 회로를 무시하고 그림 3과 같이 등가회로를 구성할 수 있다.

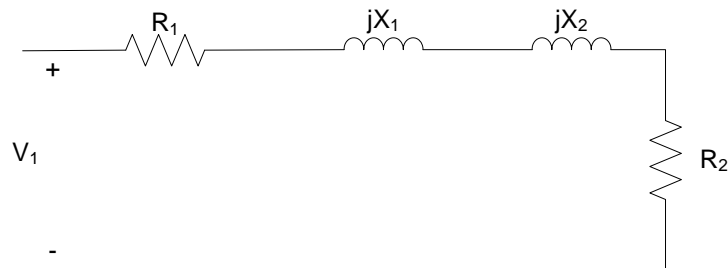


그림. 3 구속시험

$$Z_{lr} = \frac{V_{1,lr}}{I_{1,lr}} \angle \theta \quad (1)$$

$$R_2 = \text{Re}\{Z_{lr}\} - R_1 \quad (2)$$

$$X_1 = X_2 = \frac{\text{Im}\{Z_{lr}\}}{2} \quad (3)$$

회전자를 구속시킨 뒤 정격 주파수에서 전압을 서서히 높여 정격 전류가 흐를 때 전압 및 역률을 기록한다. 식 1을 이용하여 인가 전압 및 전류, 역률로 전체 저항 및 인덕턴스를 구한 뒤, 식 2을 통해 전체 저항에서  $R_1$ 을 빼서  $R_2$ 를 구한다. 전동차에서 사용되는 전동기는  $X_1$ 와  $X_2$ 는 거의 같으므로 식 3을 사용하여 전체 인덕턴스를 반으로 나눠  $X_1$ ,  $X_2$ 를 결정한다.

### 2.4.3 무부하 시험

전동기를 무부하로 구동시키면 회전자에는 오직 마찰손과 풍손에 의한 부하만 걸리며 그로 인해 슬립은 매우 작다. (0.001 이하) 슬립이 작으므로 코어 회로에 비해  $R_2/s$ 분이 매우 커져서 회전자 회로를 무시할 수 있다. 무부하 시험 시 등가회로는 그림 4와 같다.

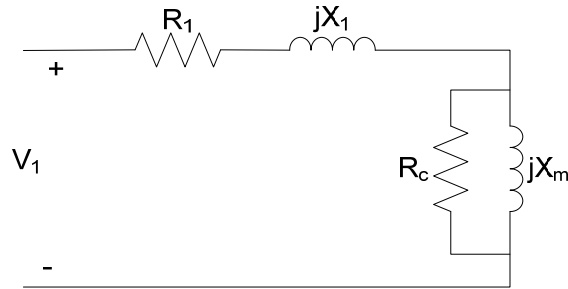


그림. 4 무부하 시험

전동기를 무부하 상태에서 정격 전압을 인가하여 이때의 전류와 역률, 주파수를 기록한다. 인가 전압 및 전류, 역률, 주파수를 이용하여 식 4와 같이 전체 임피던스를 구한다. 식 5를 이용하여 전체 임피던스에서 고정자 임피던스를 빼고 남은 코어 임피던스를 식 6과 같이 어드미턴스화한다. 식 7과 식 8과 같이 유효분은  $R_c$ 로, 무효분은  $X_m$ 으로 계산한다.

$$Z_{nl} = \frac{V_{1,nl}}{I_{1,nl}} \angle \theta \quad (4)$$

$$Z_{fnl} = Z_{nl} - (R_1 + jX_1) \quad (5)$$

$$Y_{fnl} = \frac{1}{Z_{fnl}} \quad (6)$$

$$R_c = \frac{1}{\text{Re}\{Y_{fnl}\}} \quad (7)$$

$$X_m = \frac{-1}{\text{Im}\{Y_{fnl}\}} \quad (8)$$

## 2.5 검증 실험

시뮬레이션을 통한 파라미터 추출법과 시험을 통한 파라미터 추출법을 실시하여 표 1과 같은 전동기 파라미터를 얻었다.  $R_1$ 과  $L_1$ ,  $L_2$  값은 2가지 방법에 따라 큰 차이가 없지만  $R_2$ 와  $L_m$ 은 다소 차이가 있는 것을 확인할 수 있다. 이는 2가지 방법에 적용된 전원이 상이하여 발생된 결과로 시뮬레이션 시 인가 전압을 정현파로 가정하고 해석하였지만 시험은 인버터 전원을 인가하여 측정하여서 발생된 차이로 여겨진다.

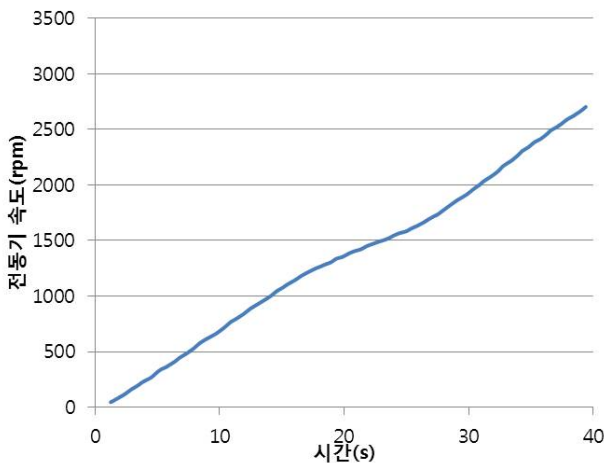
표 1 시뮬레이션 및 시험을 통한 파라미터 추출 결과값 비교

항목	$R_1$ [ohm]	$R_2$ [ohm]	$L_1$ [H]	$L_2$ [H]	$L_m$ [H]
시뮬레이션	0.2726	0.4357	0.00326	0.003233	0.108555
시험	0.27907011	0.562203	0.003417	0.003389	0.073117

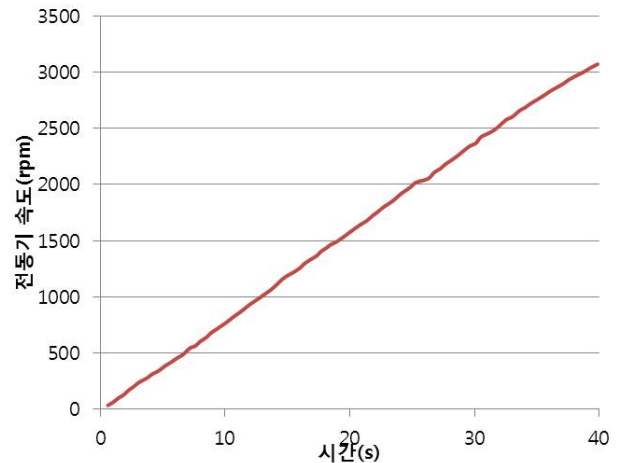
표 1의 결과를 인버터 제어 알고리즘에 적용하여 전동기를 구동시키고 속도를 측정하는 실험을 하여 인버터 제어성을 평가하였다.

실험에 사용된 전동기는 당사 180kW, 교류 3상 농형 유도 전동기를 사용하였으며 인버터는 당사 전압형 PWM 인버터를 사용하였다. 역전 신호 100% 조건으로 인버터를 구동하여 차트 레코더로 전동기 속도를 측정하였다.

그림 5 (a)는 시뮬레이션을 통한 파라미터 측정법을 사용하여, 그림 5 (b)는 시험을 통한 파라미터 측정법을 사용하여 얻은 결과이다. 그림 5 (a)는 (b)와 다르게 속도 곡선이 직선으로 일정하게 증가하지 못하고 20초 부근에서 꺾이는 것을 확인할 수 있다. 전동기 파라미터 불일치에 따른 제어 불안정으로 인해 발생된 현상으로 보여진다.



(a) 시뮬레이션을 통한 파라미터 측정법 사용



(b) 시험을 통한 파라미터 측정법 사용

그림. 5 파라미터 측정 방법에 따른 속도 곡형 비교

### 3. 결 론

본 논문에서는 철도차량용 견인전동기의 파라미터를 시험을 통해 추출하는 방법을 제시하고 실제 인버터 제어를 통해 파라미터 추출 방법에 대한 타당성을 증명하였다. 시뮬레이션을 통해 얻은 파라미터로 인버터를 제어하였을 때 토크 제어가 정밀하지 못하여 속도 곡선이 일정하게 증가하지 못하는 반면 시험을 통해 얻은 파라미터로 인버터를 제어하였을 때는 속도 곡선이 일정하게 증가하는 것을 확인하였다. 인버터 정밀 제어를 위해 시험을 통한 유도 전동기 파라미터 측정법을 사용하는 것이 적합함을 본 실험을 통해 증명하였다.

### 참고문헌

- [1] S. Chapman, *Electric Machinery Fundamentals*, 4<sup>th</sup> ed. New York, NY: McGraw-Hill Education, 2005.
- [2] Sinisa Jurkovic, "Induction motor parameters extraction"
- [3] Keun Lee (2012) Estimation of induction motor equivalent circuit parameters from nameplate data, *North American Power Symposium*, Champaign, Sept. 2012