

### Slip에 따른 농형유도전동기의 회로정수 산정

이수진, 이정중, 김성일, 홍정표  
한양대학교 자동차공학과

#### Calculation of the Parameter according to the Slip in Squirrel-Cage Induction Motor

Su-Jin Lee, Jeong-Jong Lee, Sung-Il Kim, Jung-Pyo Hong  
Department of Automotive Engineering, Hanyang University

**Abstract** - This paper describes the calculation of the equivalent circuit parameters according to the slip in squirrel-cage induction motor. Recently, the induction motor is demanded of the various operation condition. In order to acquire the accurate characteristic for the operation condition of the motor, equivalent circuit parameters have to be calculated accurately. So the equivalent circuit parameters are computed by using the finite element method, the reliable characteristic analysis is carried out by application of the parameter to the equivalent circuit analysis. From the analysis result using this combined equivalent circuit and finite element method is compared with the experimental results by a detailed equivalent circuit, the validity of the method is proved.

#### 1. 서 론

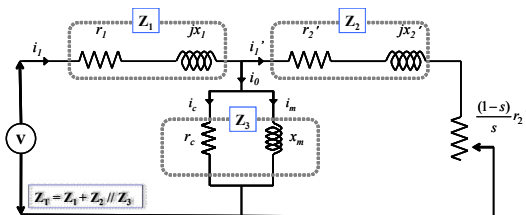
에너지 절감을 위하여 등장한 Hybrid Electric Vehicle (HEV)의 구동용 모터로는 제한된 공간으로 인하여 출력밀도가 높은 내입형 영구자석 동기 전동기(Interior Permanent Magnet Synchronous Motor)가 사용되어 진다[1]. 그러나 영구자석의 가격과 보급에 대한 문제가 거론되면서 영구자석을 사용하지 않는 유도전동기에 대한 관심이 증가 하였다. 그리고 현재 세계적인 자동차 회사들이 개발하고 있는 Fuel Cell Electric Vehicle (FCEV)과 Electric Vehicle (EV)의 구동용 모터에는 유도전동기가 많이 사용되고 있다. 요구되는 운전영역이 넓은 EV, FCEV와 같은 구동용 모터의 경우 각각의 운전 상태에 따라 적절히 제어 해주는 최적 제어전략이 필요하다. 따라서 전동기 설계 시 정격 상태에서의 임피던스만을 고려할 것이 아니라, 기동에서부터 정격에 이르기까지의 임피던스 변화를 고려하여야 한다. 그리고 전동기의 특성을 정확하게 예측하는 것은 매우 중요하기 때문에 등가회로 해석을 위해 필요한 1차측과 2차측의 저항, 1차측과 2차측의 누설리액턴스 그리고 여자리액턴스와 철손 저항과 같은 회로정수들의 slip의 변화에 따른 값의 변화를 고려하는 것이 필요하다.

본 논문에서는 유도전동기의 특성을 예측하기 위하여 slip에 따른 파라미터 변화를 고려한 등가회로를 구성하고 특성해석을 수행하였다. 본 논문에서 제시한 회로정수 산정법을 검증하기 위하여 간이등가회로가 아닌 상세등가회로를 이용한 실험을 통해 해석 치와 비교함으로써 본 논문의 타당성을 증명하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 등가회로를 이용한 특성해석

3상 농형 유도전동기의 등가회로는 그림 1과 같고, 식 (1)~(4)의 전압 방정식을 이용하여 등가회로해석을 수행한다. 등가회로 해석을 통하여 입력 전압에 대한 전류, 역률, 효율, 출력, 토크 등과 같은 전동기의 특성을 얻을 수 있다. 그리고 입력 전압에서 1차측 저항과 1차측 누설 리액턴스에 의한 전압강하 성분을 뺀 값을 유효기전력으로 취급한다[2].



〈그림 1〉 3상 유도전동기의 등가회로

$$\vec{V}_1 = \vec{E}_1 + \vec{I}_1 Z_T \tag{1}$$

$$\vec{I}_1 = \vec{I}_o + \vec{I}_1' [A_s] \tag{2}$$

$$P = m_1 I_1'^2 \left( \frac{(1-s)r_2'}{s} \right) [W] \tag{3}$$

$$T = \frac{60}{2\pi} P \frac{1}{(1-S)N_s} [Nm] \tag{4}$$

여기서,  $r_1$ 과  $r_2'$ 은 각각 1차측 권선 저항, 2차측 도체바 저항을 나타내고,  $x_1$ 과  $x_2'$ 은 1차측 누설리액턴스와 2차측 누설리액턴스를 나타낸다. 그리고  $r_c$ 는 철손 저항을,  $x_m$ 은 여자리액턴스를 일컫는다. 기존에 사용되어온 방법은 정상상태에서의 회로정수를 산정하여 전 slip 영역에 대해 변화 없는 상수의 값으로 인식하였다[3]. 따라서 등가회로 해석을 통해 예측한 정상 상태의 전동기 특성은 실험 치와 비슷한 결과를 가지나 기동 시의 특성은 큰 오차를 가지게 된다. 그러나 최근 요구되는 유도전동기의 운전 상태가 다양해지면서 전 slip에서의 임피던스 변화를 고려한 특성 해석이 필요해 졌다. slip의 변화에 따라 자계의 분포가 달라짐으로써 회전자 도체바에서 유기되는 전류의 크기가 달라진다. 이로 인하여 철심의 포화계수가 변하게 되고, 2차측 와전류에 의한 회전자 자계의 양도 달라짐으로 특성 해석을 위한 회로정수 산정 시 slip 변화에 따른 회로정수의 변화를 고려해야만 한다.

##### 2.2 FEM을 이용한 회로정수의 산정

본 논문에서는 제질의 비선형성과 slip의 변화에 따른 자계의 분포를 고려하기 위하여 다음과 같은 회로정수를 유한요소해석을 통하여 산정하였다[4]. 그러나 FEM 2D 해석 시에는 코일의 단부를 고려 할 수 없는 단점이 있다. 회로 정수를 산정하기 위해서는 코일 단부의 저항 및 임피던스를 고려해야 한다. 특히, 농형 유도전동기의 경우 엔드링을 고려해야 하므로 본 논문에서는 간단하게 엔드링 부분을 2차측 도체의 도전율에 반영하여 2차원 유한 요소 해석을 수행하였다[5].

##### 2.2.1 해석 모델

그림 2는 본 논문에서 해석하고자하는 모델의 형상이며, 표 1은 해석을 위한 전동기 사양을 나타낸다. 본 논문의 모델은 4극 24슬롯이며, 철심의 재질은 35PN470이다.

##### 2.2.2 누설리액턴스와 자화리액턴스의 산정

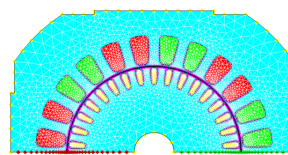
고정자의 쇄교자속과 회전자의 쇄교자속은 다음 식(5), (6)과 같이 표현 할 수 있다.  $L_{ms}$ 는 고정자권선 사이의 상호인덕턴스의 2배의 값이며,  $L_{ls}$ 는 고정자 권선의 누설인덕턴스(Leakage Inductance),  $L_{lr}$ 은 고정자측으로 환산된 회전자 권선의 누설 인덕턴스를 일컫는다[5].

$$\lambda_{abc_s} = \left( L_{ls} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) \vec{I}_{abc_s} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{abc_r} e^{-j\theta_r} \tag{5}$$

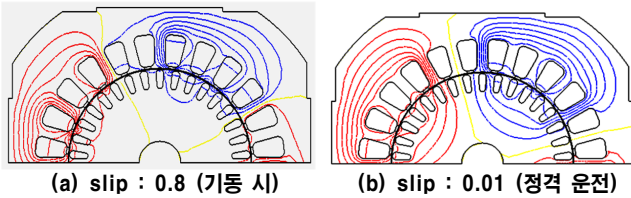
$$\lambda_{abc_r} = \left( L_{lr} + \frac{3}{2} L_{ms} \right) \vec{I}_{abc_r} + \frac{3}{2} L_{ms} I_{abc_s} e^{-j\theta_s} \tag{6}$$

〈표 1〉 해석 모델의 사양

항목	값
용량 [W]	130
전압 [V <sub>LL</sub> ] / 주파수[Hz]	100/ 50
전류 [Arms]	1.6
Pole/ Slot number	4 / 24
철심 재질	35PN470
축방향 길이 [mm]	42



〈그림 2〉 해석 모델의 형상



〈그림 3〉 Slip 변화에 따른 자계의 분포

### 2.2.3 철손저항과 2차측 저항

재질의 비선형성을 고려하기 위하여 FEM을 이용한 철손 해석을 수행하고, 해석 결과인 철손은 역기전력과 철손저항의 관계식으로 표현되므로, 그 관계로부터 속도에 따른 철손 저항을 산정한다.

그림 3과 같이 각각의 Slip에 따라 2차측에 쇄교되는 자속의 양이 달라지므로 도체바에 유기되는 전류의 크기가 달라지고 2차측의 유효 저항도 변한다. 전류의 크기의 제곱에 비례하고 도체바의 저항에 비례하는 동손은 FEM을 이용하여 산정하고 동손과 2차측에 유기되는 전류의 관계식으로부터 2차측 저항을 산정한다.

### 2.3 실험을 통한 검증

본 논문에서 제시한 회로산정법을 검증하기 위하여 상세 등가회로를 이용한 실험을 통하여 해석 치와 실험 치의 회로정수 및 특성을 비교, 검증 한다.

#### 2.3.1 간이등가회로를 이용한 시험법

간이등가회로를 이용하여 회로정수를 산정하는 시험을 할 경우 몇가지 가정을 하게 된다. 먼저 단락 시험을 이용하여 1차측 저항과 2차측 저항의 합, 1차측 누설리액턴스와 2차측 누설리액턴스의 합을 산정하는데 이때, 여자리액턴스와 철손 저항이 나머지 회로정수에 비해 매우 크다고 간주하여 여자전류가 흐르지 않는다고 가정한다. 그리고 1차측 누설리액턴스와 2차측 누설리액턴스의 양이 같다고 가정한다. 그러나 이러한 가정은 실제 전동기가 가지는 특성과 차이가 있으므로 오차를 수반하게 된다.

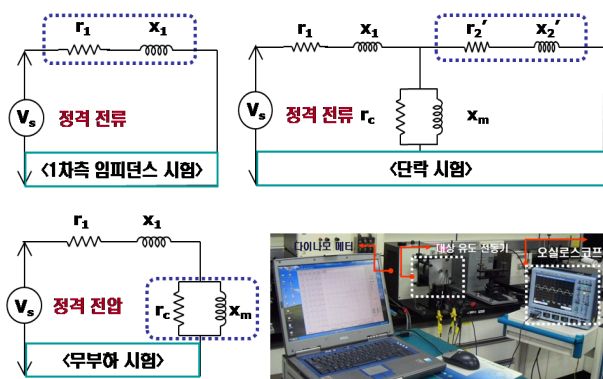
유도전동기의 경우 slip이 존재하므로 무부하 시험을 하더라도 회전자가 동기속도로 회전하지 못한다. 그래서 2차측에 유기되는 전류의 양이 전혀 없다고 할 수 없다. 그러나 무부하 시험을 통한 회로정수 산정 시 2차측에 유기되는 전류는 없다고 가정하므로 무부하 시험으로 산정하는 여자리액턴스와 철손 저항도 실제 값과 차이를 가지게 된다[6].

#### 2.3.2 상세등가회로를 이용한 시험법

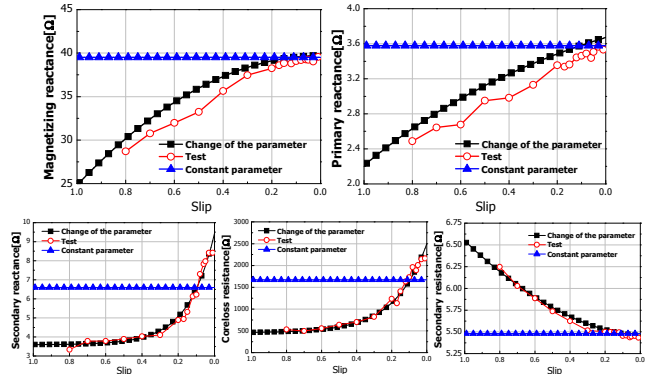
간이등가회로에서의 가정으로 인한 오차를 줄이기 위하여 상세등가회로를 이용하여 회로정수를 실험적으로 산정하였다. 간이등가회로에서 가정하고, 생략했던 부분들을 모두 포함한 등가회로를 이용하여 각각의 회로정수를 찾는다. 먼저 무부하 해석에서의 slip에 의해 발생하는 오차를 줄이기 위하여 회전자를 동기속도로 회전시켜 2차측에 유기되는 전류가 없도록 한 후 회로정수를 산정하였다. 그리고 1차측 누설 리액턴스를 산정하기 위하여 회전자를 제거하고 정격전류를 입력하여 1차측 누설 리액턴스를 산정하였다. 1차측 임피던스와 여자리액턴스를 고려하여 단락 시험 결과로부터 2차측 저항과 2차측 누설리액턴스를 산정하였다.

#### 2.3.3 실험 결과 및 분석

그림(5)의 실험 결과와 해석 결과를 비교해 보면 회로정수의 값이 slip에 따라 변화하는 값을 알 수 있다. 철손 저항 및 2차측 리액턴스, 2차측 저항에 대한 해석 치의 경우 실험 치와 같은 값을 가지나 여자리액턴스와 1차측 리액턴스의 값은 오차를 많이 포함하고 있다. 특히 slip이 큰 기동 시 파라미터의 값이 많은 차이를 보이는 것을 알 수 있다.



〈그림 4〉 시험을 위한 상세등가회로와 시험장치



〈그림 5〉 Slip 변화에 따른 회로정수의 실험 치와 해석치의 비교

그림 (6)은 등가회로를 이용한 해석 치와 실험치의 결과를 비교하였다. 토크와 효율은 slip에 따른 등가회로의 변화를 고려한 해석 결과와 실험 치가 일치하는 것을 알 수 있으나 역률과, 전류의 크기는 slip이 큰 영역에서 오차를 크게 가지는 것을 알 수 있다. 다음과 같은 오차가 발생하는 원인은 slip이 큰 영역의 경우 전류의 양이 크고 고조파 함유량이 많으므로 기본파만으로 산정하는 해석 치와는 차이가 있는 것으로 판단된다.

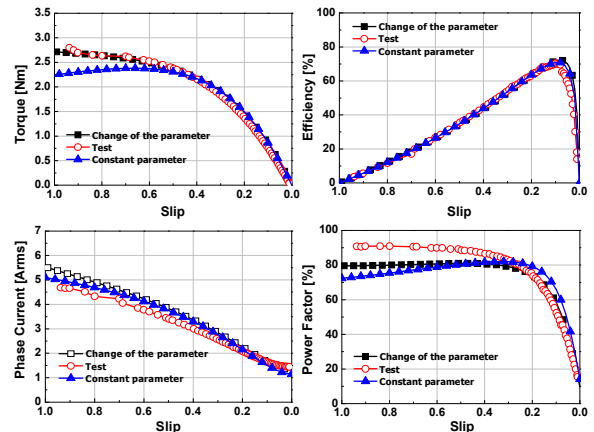
### 3. 결론

본 논문에서는 삼상 농형유도전동기의 등가회로해석 시 slip의 변화에 따른 회로정수의 변화를 고려하지 않는 기존 방법의 문제점을 인식하고 slip에 따른 회로정수의 변화를 등가회로에 반영함으로써 더 정확한 특성해석을 수행 할 수 있는 방법을 제시하였다. 특히 FEM 해석법의 장점과 등가회로 해석법의 장점을 결합하여 유도전동기의 특성을 해석함으로써 실제 전동기의 운전 조건을 잘 반영한 특성 예측을 할 수 있을 것으로 판단된다. 등가회로 해석 결과와 실험 치를 함께 비교한 결과 토크 및 효율의 특성이 실험 치와 일치함을 알 수 있다.

향후 제안된 방법의 적용으로 유도전동기의 설계 시 전동기 특성을 예측하고 해석 치와 실험 치의 오차를 줄일 수 있을 것으로 사료된다.

### [참고 문헌]

- [1] 정재우, 권순오, 홍정표 “극 수와 슬롯 수 조합에 따른 HEV용 IPMSM의 특성 비교 및 분석,” 대한전기학회 하계학술대회, pp. 1017-1018, 2007
- [2] 박민호, “유도기기,” 동명사, 1996
- [3] D.Shen, G. Meunier, J., L. Cpulomb, and J.C. Sabonnadiere, “Solution of Magnetic Fields and Electrical Circuits Combined Problems,” *IEEE Trans.Magn*, vol. MAG21, no.6, pp. 2288-2291, 1985
- [4] S. Wiliamson and M. J. ROBINSON, “Calculation of cage induction motor equivalent circuit parameters using finite elements,” *IEE Proc.-B*, Vol. 138, No. 5, pp. 264-276, Sep, 1991
- [5] 하경호, 김영근, 신상윤, 홍정표 “3상 농형 유도전동기의 엔드링을 고려한 전동기 특성해석,” 대한전기학회 하계학술대회, pp. 155-158, 1998
- [6] 설승기, “전기기기 제어론,” 홍릉과학출판사, 2005
- [5] B. S. Guru, H. R. Hiziroglu “Electric Machinery and Transformers,” Harcourt Brace & Company, 1995



〈그림 6〉 Slip 변화를 고려한 등가회로 해석의 결과와 실험치의 비교