

## 농형 유도전동기의 2차원 유한요소해석을 위한 엔드링 저항과 인덕턴스 계산

정희준, 신판석, 우성현  
홍익대학교 전기공학과

### Calculations of Resistance and Inductance of End Ring of the Squirrel Cage Induction Motor for 2-Dimensional Finite Element Analysis

H.J.Chung, P.S.Shin, S.H.Woo  
Hongik University

**Abstract** – This paper proposes a calculating method of resistance and inductance of end ring of squirrel cage induction motor for 2D finite element analysis. The squirrel cage of induction motor consists of bars and end rings. The resistance and inductance of end ring have an effect on the result of the finite element calculation. If the end ring were excluded from the analysis, the good result could not be obtained. Therefore, we first simulate an axisymmetric magnetodynamic analysis for the end ring, and then calculate the interbar resistance and the end ring inductance. The calculated values are put into the external circuit of 2D finite element model of the induction motor. The proposed method is verified by comparing the numerical results with the experimental ones.

### 1. 서 론

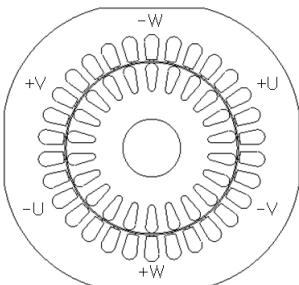
유도전동기는 매우 다양한 분야에서 광범위하게 사용되고 있어서 이에 관한 많은 연구가 진행되어 왔다. 유도전동기의 특성을 계산하는 방법으로는 크게 유도전동기의 자기시스템을 전기회로상수로 구성된 등가회로로 변환하여 특성을 해석하는 등가회로법과 전자장의 자배방정식인 맥스웰 방정식을 수치해석기법에 적용하여 해석하는 유한요소법이 있다. 등가회로법은 특성계산이 간편한 대신에 형상과 재질의 특성을 충분히 고려하지 못하여 계산 결과에 대한 신뢰성이 떨어지는 단점이 있고, 유한요소법은 재질의 비선형을 고려한 해석이 가능하고 자장의 분포를 예측함을 통해 보다 정확한 결과를 얻어낼 수 있는 장점이 있다. 그러나, 농형 유도전동기의 경우는 엔드링, 엔드린, 스큐, 슬롯고조파, 열, 도전율 등과 같은 많은 요인들을 고려하여 해석하지 않고서는 실측치와 해석결과는 많은 차이를 보이게 된다. 특히 2차축 도체인 엔드링의 저항 및 인덕턴스를 해석조건에 어떻게 반영시키는가가 해석결과에 큰 영향을 주게 된다. 기존에는 엔드링의 인덕턴스와 저항을 무시하거나 엔드링의 저항과 인덕턴스를 방정식에 대입하여 계산하는 방법을 사용하였으나 실측치와는 많은 오차를 보이고 있다.

본 논문에서는 2차원 유한요소법을 이용한 농형 유도전동기 해석에서 직접적으로 고려할 수 없는 부분인 엔드링의 특성값을 보다 정확하게 얻어내기 위하여 엔드링 만을 대상으로 2차원 축대칭을 수행하여 엔드링의 저항과 인덕턴스를 별도로 얻어낸 후, 이 특성값을 교류자제 해석을 이용한 2차원 평면 유한요소 모델의 외부회로에 대입하여 해석하고, 실측치와 비교하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 해석모델

본 논문에 사용된 모델은 2극 3상 농형 유도전동기로 고정자 30슬롯, 회전자 도체바 22개로 구성되어 있으며, 이에 대한 모델의 단면도와 상배치 및 구체적인 사양은 <그림 1>에 나타나 있다.

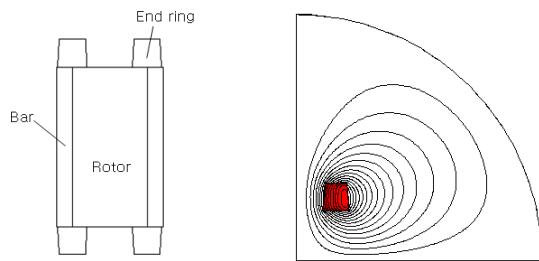


<그림 1> 해석모델과 사양

극수	2극
고정자 슬롯수	30개
회전자 도체바	22개
상저항( $20^{\circ}\text{C}$ )	$0.6 \Omega$
입력전압	220 V
입력주파수	60 Hz
정격출력	5750 W
정격속도	3500 rpm
정격토크	17 Nm

#### 2.2 해석방법

농형 유도전동기의 도체바 사이의 엔드링 인터바 저항과 인터바 인덕턴스를 추출하기 위하여 엔드링 부분만 별도로 모델링한 후 정현파 입력의 축대칭 교류자제 해석을 수행하였고, <그림 2>는 유도전동기 회전자의 세로 단면도와 엔드링에서의 등자속선도를 보여준다.



<그림 2> 회전자 횡단면도와 엔드링 등자속선도

입력전압으로는 1V(rms)를 인가하였고, 주파수는 슬립주파수를 사용하였다. 엔드링만 해석할 시에는 재질이 비자성체이므로 선형해석이 되며, 따라서 입력전압이 변하여도 이에 따라 전류 및 자속도 같은 비율만큼 함께 증감하므로 결과적으로 엔드링의 저항 및 인덕턴스는 크게 변하지 않는다.

<그림 2>와 같은 대칭 엔드링이 아닌 비대칭 엔드링의 경우도, 해석방법은 동일하다.

실제 유도전동기의 운전영역에서 도체바와 엔드링의 온도는 상승하게 되며, 이로 인해 엔드링의 비저항은 커지게 되므로, 엔드링 해석시에 엔드링 재질의 비저항은 식 (1)로부터 온도 보정하여 할당하였다.

$$R = R_0 [1 + \alpha(T - T_0)] \quad (1)$$

여기서,  $R$ 과  $R_0$ 은 각각 온도  $T$ 와  $T_0$ 에서의 저항이고,  $\alpha$ 는 온도계수이다.

엔드링의 교류자제 해석결과로부터 엔드링의 인터바 저항  $R$ 과 인터바 인덕턴스  $L$ 은 식 (2)와 식 (3)을 통하여 얻어낼 수 있다.

$$R = \frac{P}{I^2 N_b} \quad (2)$$

$$L = \frac{Q}{I^2 \omega N_b} \quad (3)$$

여기서  $P$ 는 엔드링의 유효전력,  $I$ 는 엔드링에 흐르는 전류(rms),  $N_b$ 는 회전자의 도체바 개수,  $Q$ 는 공기와 엔드링을 포함하는 해석영역 전체에서의 무효전력,  $\omega$ 는 주파수이다.

엔드링 인덕턴스는 유한요소해석을 통해 얻어지는 엔드링의 쇄교자속과 전류를 이용하여 다음 식(4)로부터 얻을 수도 있다.

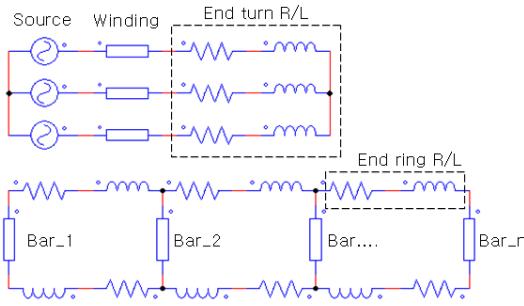
$$L = \frac{\Phi}{IN_b} \quad (4)$$

여기서  $\Phi$ 는 엔드링에 쇄교하는 자속이다.

식 (2)와 식 (3) 또는 식 (4)로부터 계산된 저항과 인덕턴스는 서로 일관된 도체바 사이의 인터바 저항과 인터바 인덕턴스이므로 <그림 3>과 같이 외부회로를 구성할 수 있다.

외부회로의 상측은 고정자인 1차측이고 3상전원과 권선 및 엔드린으

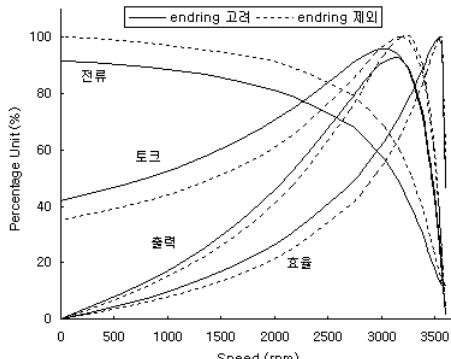
로 구성되어 있으며, 엔드린의 저항과 인덕턴스는 저항과 인덕터를 추가함으로써 구현이 가능하고, 하측은 회전자인 2차측으로써 n개의 도체바를 서로 병렬 연결한 후, 총  $2n-2$ 개의 저항과 인덕턴스를 회전자의 도체바 사이에 배치하여 회로를 구성하였다.



〈그림 3〉 엔드링을 고려한 외부회로

### 2.3 해석결과

<그림 4>는 유도전동기의 엔드링을 고려한 유한요소해석 결과와 엔드링을 고려하지 않은 유한요소해석 결과를 슬립의 변화에 따라 백분율로 나타낸 그림으로, 슬립은 20구간을 선정하여 해석하였으며, 그림에서 실선은 엔드링을 고려한 해석결과, 점선은 엔드링을 제외한 해석결과를 나타낸다.



〈그림 4〉 슬립변화에 따른 해석결과 비교

엔드링에 대한 저항과 인덕턴스를 외부회로에 반영한 경우, 2차측 도체의 저항 성분이 증가하므로, 이로 인해 전체 구간에서 유도전류가 크게 흐르게 되고, 기동토크 및 최대 토크가 발생하는 슬립값도 증가하여 토크의 비례주이 현상을 잘 나타내고 있다. 또한, 출력 및 효율도 엔드링을 고려하지 않은 결과보다 높게 나타나고 있음을 알 수 있다.

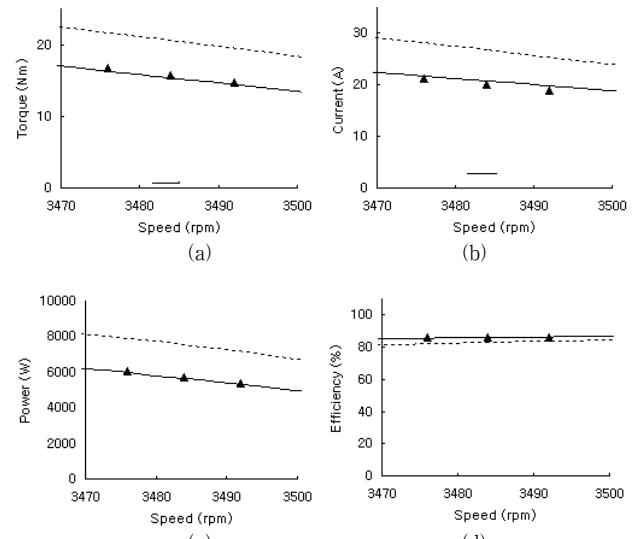
정격속도인 3484rpm에서, 엔드링을 유한요소해석에서 고려한 경우와 제외한 경우 및 실제 유도전동기 실측치를 <표 1>에 나타내었다. 엔드링을 해석모델에서 제외할 경우 해석결과는 매우 큰 오차를 보이고 있으며, 엔드링에 대한 교류자계 해석을 통해 계산된 엔드링의 인터바 저항과 인터바 인덕턴스를 외부회로에 입력하여 해석한 경우, 실측치와 잘 부합함을 알 수 있다.

〈표 1〉 정격시(3484rpm)의 특성비교

	유한요소해석 (엔드링 제외)	유한요소해석 (엔드링 고려)	실측치
토크(Nm)	20.6	15.4	15.7
전류(A)	26.8	20.7	20.1
출력(W)	7526.4	5625.2	5724.7
역율(%)	88.6	83.4	86.6
효율(%)	83.3	85.7	86.0

<그림 5>는 3492rpm, 3484rpm, 3476rpm에서의 엔드링을 고려한 유한요소해석의 결과와 고려하지 않은 유한요소해석의 결과 및 실측치의 토크(a), 전류(b), 효율(c), 출력(d)를 각각 도시한 그림으로, 그림에서 실선은 엔드링을 고려한 해석치, 점선은 엔드링을 제외한 해석치 및 삼각형은 실측치를 나타내며, 엔드링을 고려하지 않은 해석의 경우 실측치와 매우 큰 오차를 보이는 반면, 본 논문에 제시된 방법에 의해 계산된 엔드링의 저항과 인덕턴스를 입력한 경우 그 결과가 매우 정확함을 확인

할 수 있다.



〈그림 5〉 해석결과와 실측치 비교

### 3. 결 론

유한요소법을 이용한 농형 유도전동기의 2차원 해석에서 엔드링의 고려는 반드시 필요하며, 따라서 엔드링의 저항과 인덕턴스를 정확히 얻어내는 것이 매우 중요하다. 엔드링의 저항과 인덕턴스는 엔드링만 모델링 하여 별도의 교류자계 해석을 통하여 얻어낼 수 있으며, 비대칭 엔드링에 대해서도 적용이 가능하다. 이 때 엔드링 재질의 온도보정을 해주어야 보다 정확한 결과를 얻을 수 있다.

제안된 해석방법은 별도의 엔드링 해석을 통해 기준의 실험식이나 해석식을 이용한 방법보다 보다 편하고 정확하게 엔드링의 저항과 인덕턴스를 계산해낼 수 있으므로, 2차원 유한요소법을 통해서도 농형 유도전동기에 대한 빠르고 정확한 해석이 가능하므로 농형 유도전동기의 특성 연구에 매우 효과적인 방법으로 사료된다.

본 논문은 산업자원부 전력기반조성센터에서 지원한 대학전력연구센터(과제번호2006-0273)의 사업으로 수행되었습니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 하경호, 홍정표, 김규탁, 임태빈, “엔드링을 고려한 농형 유도전동기의 2차원 유한요소해석”, 전기학회지 논문, 48권, 1999
- [2] Cyril G. Veinott, “Theory and Design of Small Induction Motors”, Magna Physics Publishing Division of Motorsoft Inc., 1980
- [3] S. J. Salon, “Finite Element Analysis of Electrical Machines”, Kluwer Academic Publishers, 1995
- [4] P. Alger, “Induction Machines: Their Behavior and Uses”, Gordon and Breach Science Publishers, 1995
- [5] A. B. J. Reece, “Finite Element Methods in Electrical Power Engineering”, Oxford University Press, 2000
- [6] 박민우, “3차원 유한요소법을 이용한 농형유도전동기 단락환의 저항 계산”, 단국대학교 석사학위 논문, 1996