

3상능형 유도전동기의 엔드링을 고려한 전동기 특성해석

하 경호, 김 영균, 신 상윤, 홍 정표, 김 규탁, 임 태빈

Charteristic Analysis Consdering End-ring of 3Phase Squirrel-cage Induction Motor

Kyung-ho Ha, Young-Kyoun Kim, Sang-yun Sin, Jung-pyo Hong, Gyu-tak Kim, Tae-bin Im
Chang-won Nat'l Univ., KETI

Abstract - This paper proposed the 2-D Finite Element analysis method taking into end-ring of squirrel cage induction motor. Secondary conductor resistance can be simply replaced new one considering end-ring resistance.

In the case of 2-D FEM, the end-ring resistance is hard to consdider. And the results without considering end-ring resistance have an error.

To verify the proposed method, we compared the analysis results and test ones.

해석모델은 4극 3상능형 유도전동기로서 전동기의 개략적 제원과 주요 치수는 표1과 같다. 고정자의 슬롯수는 36개, 회전자 슬롯은 폐슬롯으로 44개이며, 회전자 도봉은 알루미늄 다이캐스팅 구조를 갖고 있다. 자기적대칭성을 고려하여 한극에 대해서만 해석하였다.

표 1. 해석모델의 제원

전기적 사양		기계적 사양	
정격 출력	2.2 [kW]	공극	0.5 [mm]
정격 전류	9.0 [A]	상당 직렬턴수	246 개
선간 전압	220 [V]	적층길이	74.6 [mm ²]
고정자 저항	2.63 [Ω]	고정자 슬롯수	36 개
정격 속도	1720 [rpm]	회전자 슬롯수	44 개

1. 서 론

전기기기 중에서 회전형 3상능형 유도전동기는 가변속 구동장치로 산업 전반에 걸쳐 광범위하게 이용되고 있으며, 보다 효율적으로 운용하고 제어 특성을 향상시키기 위해서는 간편한 방법으로 기기의 정확한 특성예측이 필요로하다. 일반적으로 유도기의 경우 이론치와 실측치가 많은 차이를 갖게되는데 이러한 원인은 해석시 해석대상을 모델링 할 때에 재질정수에 대한 입력오류에 기인하는 경우가 많다.

전기기기의 해석방법에는 여러 가지가 있으나 유한요소법(FEM)이 가장 신뢰성 있게 보편적으로 사용되고 있다. 특히 3D FEM은 능형 유도전동기의 엔드링을 고려하여 해석할 수는 있으나 비용과 시간의 투자를 고려한다면 현실적으로 거의 불가능하다. 따라서, 2차원 해석으로도 해석 결과에 대한 신뢰도를 높이는 기술이 필요하다.

2차원 유한요소법으로 3상능형 유도전동기를 해석 할 경우 일반적으로 회전자 도봉 만의 저항을 고려하여 해석하고 있으나 엔드링 저항을 무시하고 해석할 경우 정확한 해석 결과를 기대할 수 없다.

본 논문에서는 간단한 방법으로 손쉽게 엔드링의 저항을 고려할 수 있는 2차원 유한요소해석 방법을 제시하였다. 즉, 해석적 방법으로 엔드링의 저항 값을 2차측 도봉 1개의 저항값으로 환산하여 도봉의 저항률을 새로운 저항률의 값으로 바꾸게 된다. 3상능형 유도전동기의 유한요소해석은 자기벡터포텐셜을 계변수로하여 시변계 지배방정식을 유도하고, 여자전원의 회로방정식과 결합하여 전압을 구동함수로 하였다.

엔드링 저항을 고려한 유한요소 해석결과의 타당성을 검증하기 위하여 해석결과와 전동기의 구동특성 실측치와 비교하여 타당성을 검증하였다.

2. 본 론

2. 해석모델의 제원

3. 엔드링 저항의 환산

3.1 2차측 도봉의 전류

그림 1은 능형유도전동기의 회전자 전류의 경로와 전류분포를 나타낸 것이다.[1]

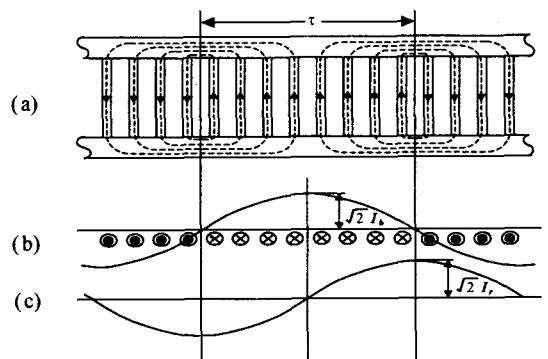


그림 1. 능형유도전동기의 회전자 회로의 전류

회전자 도봉에 흐르는 전류 I_b 는 1쌍의 자극 간격 2τ 를 1주기로서는 정현파 형태로 그림 1.(b)와 같이 분포한다고 보면, 회전자는 상수가 $\frac{Z_2}{(p/2)}$ 인 다상회로가 된다. 여기서 τ 는 회전자의 극간격이며, Z_2 는 2차측 도체수, p 는 극수이다. 회전자 1상에는 $p/2$ 개의 병렬 회로수가 있게 되고, 1개의 도봉이 1쌍의 직렬 도체수가 된다. 따라서, 2차측 입력은 식(1)과 같이 쓸 수 있으며, 이 식을 정리하면 2차측 도봉에 흐르는 전류는 식

(2)와 같다.

$$P_{2in} = \frac{Z_2}{p/2} E_b I_b \frac{p}{2} \cos \psi_2 \quad (1)$$

여기서, p : 극 수, Z_2 : 회전자 도체수
 ψ_2 : 2차측 역률, I_b : 도봉의 전류
 E_b : 정지시 도봉의 유기전압

$$I_b = \frac{P_{2in}}{\cos \phi_2 Z_2 E_b} \quad (2)$$

3.2 엔드링 전류

도봉에 흐르는 전류는 엔드링에 모여 1극 간격 τ 사이의 전류는 좌우로 나누어져 그림.1(a) 처럼 흐르게 된다. 따라서, 엔드링에 흐르는 전류의 최대치는 1극 간격 사이에 있는 Z_2/p 개의 도봉에 흐르는 전류합의 반과 같다. 한편, 도봉에 흐르는 전류가 정현적인 분포를 갖고있다고 보면 도봉 한 개의 최대전류에 $\pi/2$ 를 곱하여 평균값을 얻는다. 이러한 관계를 통하여 엔드링에 흐르는 전류는 식(3) 또는 식(4)와 같다.

$$I_r = \frac{Z_2}{p\pi} I_b \quad (3)$$

$$\sqrt{2} I_r = \frac{1}{2} \frac{Z_2}{p} \frac{2}{\pi} \sqrt{2} I_b \quad (4)$$

여기서 계산된 엔드링의 전류 I_r 은 실효치이다.

3.3 엔드링 저항의 환산

도봉 1개의 저항 R_b 는 식(5)와 같으며, 엔드링 1개의 둘레 길이를 중심부의 직경으로 계산한 엔드링 저항은 식(6)과 같다.

$$R_b = \rho \frac{l_b}{S_b} \quad (5)$$

$$R_r = \rho \pi \frac{D_r}{S_r} = \rho \frac{l_r}{S_r} \quad (6)$$

여기서 D_r : 엔드링 평균 직경,

S_r : 엔드링 단면적, S_b : 도봉의 단면적

l_r : 엔드링 둘레길이, l_b : 도봉의 길이

ρ : 알루미늄 저항률

이다.

이상에서 도봉의 저항과 전류, 엔드링의 저항과 전류를 각각 구하였으므로 회전자 전체의 동손을 구할 수 있다. 즉, 식(4)-식(6)을 이용하여 동손을 구하면 식(7)과 같다.

$$W_2 = Z_2 I_b^2 \left\{ R_b + 2 \frac{Z_2}{(p\pi)^2} R_r \right\} \\ = Z_2 I_b^2 R_2 \quad (7)$$

따라서 위 식으로부터 엔드링저항을 포함한 도봉 1개의 저항은 식(8)과 같이 쓸 수 있다.

$$R_2 = R_b + 2 \frac{Z_2}{(p\pi)^2} R_r \\ = \rho l_b \frac{1}{S_b} + \frac{2\rho l_r}{(p\pi)^2} \frac{Z_2}{S_r} \quad (8)$$

따라서, 식(8)을 정리하여 다시쓰면 식(9)와 같으며, 도봉의 저항률 ρ 를 엔드링저항을 포함한 도봉 1개의 새로운 저항률 ρ' 로 변환하면 식(10)과 같다.

$$R_2 = \rho' \times \frac{l_b}{S_b} \\ = \frac{l_b}{S_b} \left(\rho + \frac{S_b}{l_b} \frac{2\rho l_r Z_2}{(P\pi)^2 S_r} \right) \quad (9)$$

$$\rho' = \rho + \frac{S_b}{l_b} \frac{2\rho l_r Z_2}{(P\pi)^2 S_r} \quad (10)$$

4. 유한요소해석

자기벡터 포텐셜을 계변수로하는 지배방정식은 식(11)과 같으며, 전압방정식은 식(12)와 같다.[2],[3]

$$\nabla \times \left(\frac{1}{\mu} \nabla \times \vec{A} \right) + \sigma \left[-\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \vec{v} \times (\nabla \times \vec{A}) - \nabla \phi \right] \\ - \vec{J}_0 = 0 \quad (11)$$

$$V = R_m I_m + L_m \frac{dI_m}{dt} + E_m \quad (12)$$

여기서,

R_m : 해석영역의 내부저항과 외부저항의 합성저항

L_m : 코일단부의 누설리액턴스

E_m : 권선에 유기된 역기전력

이다.

2차원으로 해석하기 위한 해석상의 가정은 다음과 같다.

- 전자기적현상은 정현적으로 변화한다.
- 자기벡터포텐셜 \vec{A} 는 z축방향만 존재한다.
- 재료의 투자율이 등방성이다.

자기벡터포텐셜 \vec{A} 를 근사화하고 Galerkin법으로 정식화하면 식(14)와 같은 계방정식을 얻게된다.

$$\begin{bmatrix} [S] & [Q_m] \\ [F_m] & [Z_m] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [I_M] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ [V] \end{bmatrix} \quad (14)$$

위의 식(14)에 경계조건을 적용하여 해석하면 된다.

5. 해석결과 및 고찰

회전자 알루미늄 도봉의 저항률의 실측값은 $3.81 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$ 이었으며, 엔드링의 첫수로부터 엔드링을 도봉으로 환산한 새로운 저항률 ρ' 은 $5.88 \times 10^{-8} [\Omega \cdot m]$ 로 증가하였다. 유한요소해석시에 엔드링의 누설리액턴스는 무시하였으며, 무부하손실은 실험치로부터 115.6[W]

를 적용하여 해석치에서 무부하손실을 뺀 값을 유효도오 크로 보았다. 그림 2에 정격회전속도 1720rpm에서 유한요소법으로 해석한 동포텐셜 분포와 자속 밀도 분포를 나타내었다.

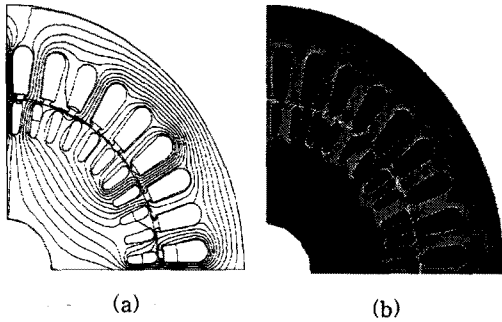


그림 2. 동포텐셜 / 자속밀도 분포

엔드링을 고려하여 새로운 저항을 ρ' 를 적용한 것과 고려하지 않은 특성해석 결과를 그림 3에 나타내었다. 실선은 엔드링을 고려한 결과이며 점선은 엔드링 저항을 고려하지 않은 특성해석 결과이다.

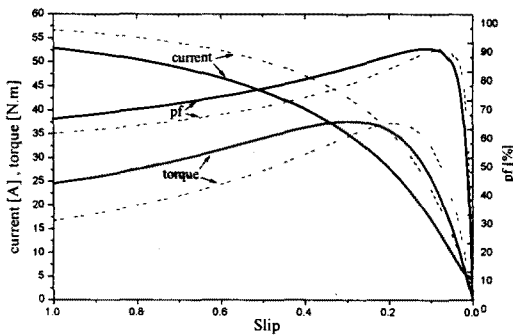


그림3.저항을 보정 전.후의 특성해석

저항을 보정하였을 경우 2차측 저항은 54.3% 정도 증가하였으며, 엔드링을 고려한 효율과 역률등 전반적인 특성해석 값이 더 큰 양상을 보이고 있다.

엔드링을 고려한 유한요소해석결과와 실측치를 비교하기 위하여 Dynamometer 계측장비를 이용하여 구동 특성을 측정하였다. 표 2는 정격속도 1720 [rpm]에서의 전동기의 특성해석 결과를 실험치와 비교한 결과이다. 실험치의 출력과 입력이 약간 크게 나타나며 효율과 역률은 잘 일치하고 있다.

표 2. 정격시의 특성비교

FEM 해석(엔드링고려)		실험치	
정격 전류	9.13 [A]	정격 전류	9.75 [A]
1차 입력	2.88 [kW]	1차입력	3.26 [kW]
발생토크	13.88 [N.m]	발생토크	15.31 [N.m]
출력	2.50 [kW]	출력	2.76 [kW]
효율	87.22 [%]	효율	88.30 [%]
역률	82.33 [%]	역률	79.71 [%]

그림 4에 실측치와 엔드링의 저항을 고려한 특성해석 결과를 슬립의 변화에 따라 나타내었다. 그림에서 도트는 실험치를 나타내며 실선은 해석값이다. 특성해석 결

과의 양상은 실측치가 이론치보다 약간 큰 양상을 보이거나 엔드링을 고려한 유한요소법특성해석 결과와 실측치가 잘부합 됨을 알 수 있다.

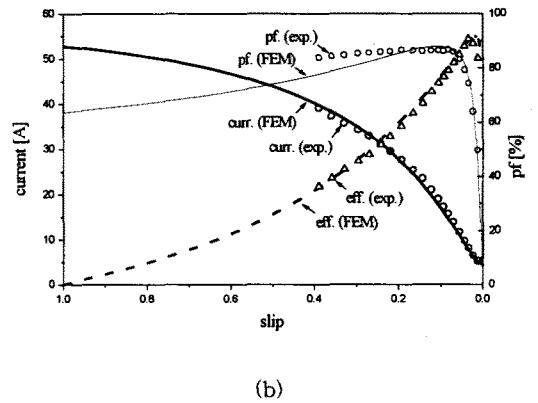
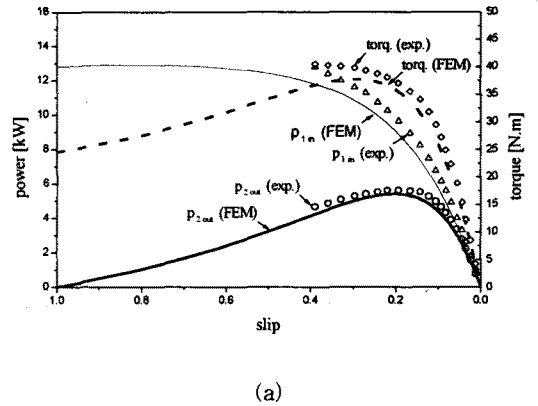


그림 4. 슬립변화에 따른 전동기 특성

6. 결 론

본 논문에서는 농형 유도전동기를 대상으로 2차원 유한요소해석시에 엔드링을 고려할 수 없는 문제점을 해결하기 위하여 엔드링의 저항을 회전자 도봉의 저항으로 환산하여 해석하는 방법을 제시하였다. 또한 제시된 방법에 의한 유한요소해석 결과와 실측치의 특성해석 결과를 비교 검토하여 만족 할 만한 결과를 얻을 수 있었다. 제안된 해석기법은 2차원 해석으로도 엔드링의 영향을 고려하여 빠르고 정확한 해석이 가능하므로 유한요소법을 이용한 설계와 특성해석 연구에 유용한 방법으로 사료된다.

본 연구는 KETI의 지원으로 수행되었음.

(참 고 문 헌)

- [1] 竹内壽太郎, "新版電氣機器設計學", 오-ム社, 1版, 1974
- [2] 任達鎬, "電氣系의 有限要素法", 東明社, 4版, 1995
- [3] S.J.SALON, "Finite Element of Electrical Machines", Kluwer Academic Publishers, 1995