

유한요소법과 프라이어하 모델을 이용한 250Kw급 견인유도전동기의 손실 특성 분석

임황빈, 조용현, 이중호
대전시 유성구 한밭대학교 전기공학과

Loss Distribution Analysis of 250 kW Traction Induction Motor Using Coupled FEM & Preisach Model

Hwang-Bin Lim, Yong-Hyun Cho, Jung-Ho Lee
Department of Electrical Engineering, Hanbat National University, Dukmyung-Dong, Yuseong-Gu, Daejeon, 305-719

Abstract - This paper deals with the loss distribution analysis of 250 kW traction induction motor using a coupled transient finite element method (FEM) and Preisach modeling, which is presented to analyze the characteristics under the effect of saturation and hysteresis loss. The focus of this paper is the efficiency evaluation relative to hysteresis loss, copper loss, etc. on the basis of speed condition a 250 kW Traction Induction Motor. Computer simulation and experimental result for the efficiency using dynamometer show the propriety of the proposed method.

1. 서 론

유도전동기는 산업분야에서 매우 중요하다. 오랜 시간 동안 3상 유도전동기의 운전 시 손실을 최소화 하고 효율을 증가하기 위한 수많은 연구의 대상이 되어 왔다.

유도전동기의 손실은 복합적이며 세부적이다. 유도전동기의 손실은 크게 1차, 2차 동손, 철손, 표류손, 기계손으로 나눌 수 있다.

동손은 도체에 전류가 흐르면서 발생하는 줄(J)열이며 동손을 저감시키기 위해서는 도체 저항의 저감이 최대 포인트가 된다.

철손은 적층된 전기강판에 외부에서 회전자계가 인가되어 발생하는 손실로 와전류손실과 히스테리시스 손실로 이루어져 있다.

표류손은 전동기 총 입력 에너지에서 출력 및 1차·2차 동손, 철손, 기계손을 뺀 나머지 손실이다. 부하 시 고조파 동손, 고조파 자속에 의한 철손 등이 복합돼 있어 아직 명확히 규명되고 있지 않다.

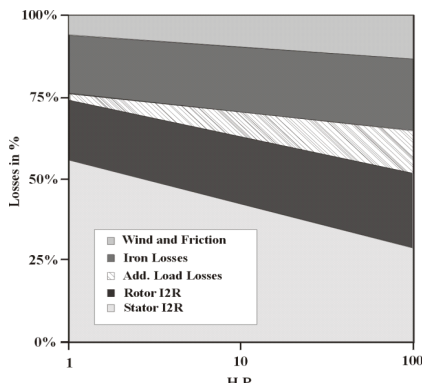
기계손은 전동기 운전 중의 베어링 마찰손, 냉각팬의 풍손 등에 의해 발생하는 손실이다.

유도전동기에 대한 모든 손실들을 최적화를 하기 위해서는 모든 개별적인 손실 타입뿐만 아니라 전기적과 기계적인 문제를 해결하는 것이 있어서 적분적 접근방법을 도입하는 것은 매우 중요하다.

이것은 모터 구성을 위한 최적설계를 요구한다. 그리고 그림 1에 나타나는 것처럼 등급에 의해 구조 크기 또는 등급에 의한 전형적인 손실 분포를 보여준다.

유도전동기의 특성해석법으로는 컴퓨터의 비약적인 발전에 따라 분포정수해석법의 일종인 유한요소법이 사용되기 시작하였다.

유한요소법에 의한 유도전동기의 해석은 전자장의 지배방정식인 맥스웰 방정식을 적용하여 유도전동기 내에서의 자장분포를 계산한 후 이를 이용하여 유도전동기의 여러 특성을 계산하는 방법이다. 이는 유도전동기의 실제 형상 및 재질특성이 적절히 반영되고 자장의 분포를 구할 수 있으므로 정확한 해석이 가능하다.



〈그림 1〉 전형적인 손실 분포

프라이어하 모델은 현재 일반적으로 Powerful Hysteresis model을 해석한다. 그리고 집중적으로 연구 되어진다.

프라이어하 모델은 히스테리시스 현상을 가장 정밀하게 수치모사 가능한 모델로서 기계적으로 많이 연구되고 있다.

몇몇의 논문에서는 기기의 히스테리시스 손실에 대한 영향을 논의 하였다.[1]-[3]

본 논문은 유한요소법과 프라이어하 모델을 이용해 250Kw급 견인 유도전동기에 대한 연구를 보여준다. 그리고 동특성 분석은 포화현상뿐만 아니라 철손의 원인이 되는 히스테리시스 현상을 충분히 고려하여 수행 하였다.

본 논문의 포커스는 250Kw급 견인 유도전동기의 속도 상황을 기본으로 히스테리시스 손실과 동손 등 손실에 대한 효율 평가이다.

2. 해석 모델 및 해석 방법

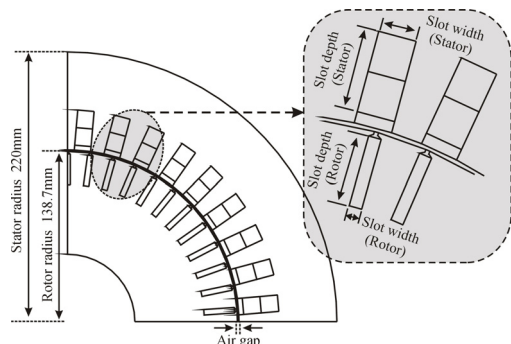
2.1 해석 모델

표1은 해석하고자 하는 250Kw급 견인 유도전동기의 사양이고, 그림 2는 본 논문에서 해석하고자 하는 250Kw급 견인 유도전동기의 한 극 모델이다.

〈표1〉 해석 모델의 사양

〈Table 1〉 Spec. of analysis model

Phase	3
극수	4
출력	250kW
입력전압	1350V
전류	130A



〈그림 2〉 해석 모델의 형상

2.2 프라이어하 모델이 결합된 2차원 유한요소법의 정식화

전자장 이론은 맥스웰의 전자방정식으로 부터 유도되는 편미분 방정식을 수치해석적인 방법을 이용하여 기기의 특성해석 및 설계를 수행하는 방법이다.

일반적으로 전자 에너지 변환 기기들은 축 방향 길이가 충분히 커서 축방향의 단부 효과를 무시한다면 전자계의 분포특성이 거의 동일하므로 2차원적인 해석이 가능하다.

맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2}$$

$$\vec{B} = \frac{1}{v_0} \vec{H} + \vec{M} \tag{3}$$

회전좌표계를 사용했을 때의 2차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \frac{1}{\mu} \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z - J_m + \sigma \frac{\partial A_z}{\partial t} + \sigma \frac{\partial \phi}{\partial t} \quad (4)$$

$$J_m = v_0 \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right)$$

여기서, A_z : 자기 벡터 포텐셜의 Z방향 성분, J_z : 전류밀도 σ : 회전자 바의 도전율, ϕ : 스칼라 포텐셜, μ : 투자율 M_x, M_y : 자계 H_x, H_y 에 대한 자화의 세기

주기경계조건은 $\sigma \partial \phi / \partial z = 0$ 을 사용하였다.
회로 방정식은 다음과 같다.

$$V = R \cdot i + L_o \cdot \frac{d}{dt} i + e \quad (5)$$

여기서, e : 권선의 E.M.F, V : 공급 전압, i : 상전류
식 (1)을 풀기 위해 우리는 Galerkin 유한요소법을 사용한다. 수렴성과 계산시간을 고려하여 후퇴차분법을 사용하였으며, 식 (1)과 (2)가 결합된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\left\{ \begin{array}{cc} \frac{1}{S} & -N \\ \mu & R \end{array} \right\} + \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} D & O \\ L_C N^T & L_0 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} A \\ I \end{array} \right\} = \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} D & O \\ L_C N^T & L_0 \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} A \\ I \end{array} \right\}_{t-\Delta t} + \left\{ \begin{array}{c} M \\ V \end{array} \right\}_t \quad (6)$$

여기서, $[M]$ 은 역기전력과 관련된 행렬이고, 자화 $\{M\}$ 은 Freisach 모델에 의해 계산된 자화량이다. L_C 는 고정자 철심 길이이다.

2.3 프라이자흐 모델의 적용

프라이자흐의 이론은 그림 3에 보여지는 것처럼 직사각형 hysteresis 곡선이 있는 자석 쌍극자의 무한한 흐름을 통해 자석 재질의 hysteresis를 설명한다.

프라이자흐 모델은 $M-H$ 관계를 사용하여 모든 히스테리시스 현상에 있어 인가자계와 자화량 사이에는 위상차가 있기 때문에 벡터적 해석을 필요로 하나, 벡터 해석은 복잡하며 오차를 피할 수 없다.

그러므로 회전기기의 해석에 대한 새로운 알고리즘 개발이 필요하다. 회전자는 입력자계 각 θ 를 따라 동기적으로 회전한다.

따라서 고정자의 영역은 x축과 y축에 대해서 교번자계로 가정할 수 있으며 회전자의 B와 H는 상수이며 x축과 y축에 대해서 또한 교번자계이다.

인가자계와 자화 사이의 각은 x, y축의 위에서는 0 혹은 π 이다. 따라서 회전기기에 대한 프라이자흐 모델은 식(7)에서 볼 수 있는 바와 같이 스칼라 모델로서 표현되어질 수 있다.

같은 축에서 계산된 M, H 가 같은 벡터 방향을 가지는 것은 당연하다. 그러므로 자화 M 은 회전기기의 전기량을 간단히 계산함으로써 분석할 수 있다.

$$M(t) = \int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (7)$$

$$= \int \int_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \int \int_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

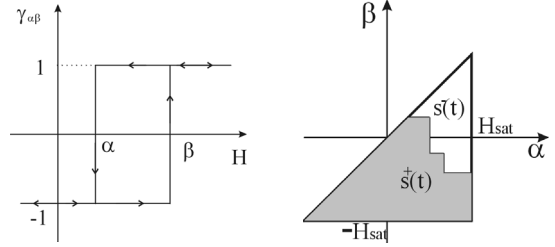
여기서 $S(t)$ 는 그림 4(프라이자흐 도식으로 알려져 있는)에서 (α, β) 평면상에 삼각형 부분 $H_{sat} \geq \alpha \geq \beta \geq -H_{sat}$ 이며, H_{sat} 는 포화자계 세기이며, α 와 β 는 증가하는 양과 음 방향에서 자기장의 세기이고, $\mu(\alpha, \beta)$ 는 쌍극자의 분포함수이며, 만약 $S^+(t)$ 상의 $(\alpha, \beta) \in S$, $\gamma_{\alpha\beta}(H(t)) = 1$ 이고, $S^-(t)$ 상의 $\gamma_{\alpha\beta}(H(t)) = -1$ 이라면, $\mu(\alpha, \beta) = \mu(-\alpha, -\beta)$, 그리고 $\mu(\alpha, \beta) = 0$ 이다. $S^+(t)$ 와 $S^-(t)$ 사이의 접점은 자화의 내력과 현상에 의해 결정된다.

프라이자흐 평면에서의 밀도 분포는 자기입자들의 보자력과 상호작용에 대한 많은 정보를 주지만 실측곡선으로부터 구한 밀도 값을 적분하는 과정이 복잡하고 미적분 과정에서 발생하는 오차로 인해 수치해석에 적용하기는 불편하다. 이제 보다 편리한 계산을 위하여 식 (8)과

같이 에버렛 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다.

$$E(\alpha, \beta) = \int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (8)$$

Everett plane에서는, 실험적인 데이터에서 받아들여지는 M의 분포는 가우스분포 [4]-[6]이 있다.

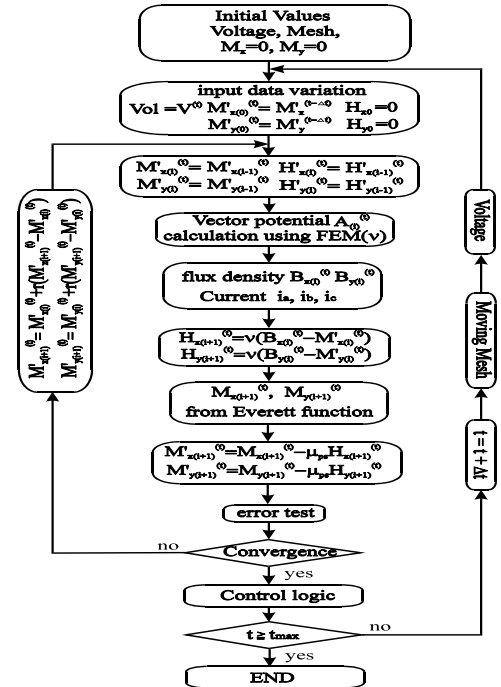


〈그림 3〉 직사각형의 히스테리시스 루프

〈그림 4〉 전형적인 프라이자흐 쌍극자의 Diagram

2.4 유한요소법과 프라이자흐 모델을 이용한 해석 알고리즘

그림 5는 유도전동기의 해석을 위해 프라이자흐 모델과 유한요소법을 이용한 해석 Flow-Chart를 보여준다.



〈그림 5〉 유한요소법과 프라이자흐 모델을 결합한 해석 흐름도

[참고 문헌]

- [1] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp. 2629-2632, Sep. 1998
- [2] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Characteristics Computation on PWM Fed Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM & Preisach Modeling", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 36, No. 7, pp 1209-1213, July 2000.
- [3] J. H. Lee, "Efficiency evaluations of Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM & Preisach Modeling", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 39, No. 5, pp 3271-3273, Sep. 2003.
- [4] D. H. Everett : A general approach to hysteresis, Part III, "A formal treatment of the independent domain model of hysteresis", Trans. on Faraday Soc., Vol 50 pp 1077-1096, 1954.
- [5] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMAI KIADO, BUDAPEST
- [6] A. Visintin, Differential models of hysteresis, Applied Mathematical Sciences, Springer, 1994.