

자성웨지를 사용한 유도전동기의 특성해석

임달호*, 홍정표*, 임영훈*, 신흥교**, 최종구***
 * 한양대학교 전기공학과 ** 경상대학교 전기공학과 *** 이천전기

Characteristic Analysis on the Induction Motor using Magnetic Wedge

Im Dal Ho*, Hong Jung Pyo*, Im Young hun*, Shin Heung Gyo**, Choi Jong Gu***
 * Hanyang Univ. ** Kyungsang Nat'l Univ. *** Leechun co.

Abstract :

Magnetic wedge is proposed for improving the motor performance and to reduce the ripple of air gap flux. Carter's coefficient plays very important role when the ampere turns or exciting current is calculated. In this paper, we calculate the Carter's coe. by FEM taking into account the magnetic anisotropy of magnetic wedge in simple manner and analyze the effect of the wedge. And we analyze the slot leakage flux according to the wedge property.

1. 서론

슬롯구조를 갖고있는 일반 회전형유도전동기는 공극이 작아 슬롯에 의한 공극자속분포의 맥동현상이 나타나게되며, 이것은 회전자와 고정자 철심의 공극표면 부근에서 고조파 손실을 발생시키고, 효율저하와 온도 상승, 전자기적소음 및 기계적진동등의 발생 원인이 된다. 이에 대한 대책으로서 슬롯에 자성웨지(magnetic wedge)를 삽입하는 방법이 연구되어 왔으며 [1],[2], 최근에는 고효율 전동기개발을 목적으로 고조파손실을 감소시켜 전동기의 효율을 향상시키기 위한 자성웨지의 사용이 주목받고 있다.[3] 그러나, 이러한 목적으로 자성웨지를 사용할 경우에는 슬롯에서의 누설리액턴스의 증가로 인한 출력 및 기동특성의 저하가 문제되고 있으며, 이에 대한 정확한 특성해석이 필요하다.

따라서, 본논문에서는 자성웨지를 유도전동기에 채용할 경우, 자성웨지의 자기적 특성에 따른 유도전동기의 부하 및 기동특성 변화를 유한요소해석을 이용하여 분석하였다. 또한, 공극에서 나타나는 자속밀도의 맥동현상과 유효공극계산을 위한 카터계수(Carter's coe.)등의 설계 파라미터를 자성재료의 포화특성을 고려하여 유한요소법으로 산출하였다.

2. 적용이론

유한요소법을 이용하여 자성웨지의 자기적 특성변화에 따른 전동기의 특성변화 및 카터계수 산정을 위한 적용이론은 다음과 같다.

2-1. 유한요소해석

카터계수는 개념적으로 자기적인 공극이 불균일한 슬롯구조의 자기회로를 평활철심의 형태로 나타낼 때에 공극에서의 퍼미언스변화를 보정하기위한 것이다. 따라서, 카터계수 산정을 위해 자기벡터포텐셜을 계변수로 하여 경계조건을 부여하는 경우에는 공극퍼미언스가 변화한다는 관점이 아니라 외부에서 인가되는 기자력이 변화하는 형태로 보는 것이기 때문에 이보다는 기자력은 일정하고, 자성웨지나 슬롯폭이 변화할 때에 이를 공극퍼미언스의 변화로 나타낼 수 있는 자기스칼라포텐셜을 계변수로 하여 경계조건을 부여하는 것이 개념적으로 더 타당할 것으로 판단된다.

해석영역내에 자화전류가 분포하지않고 두 지점사이의 기자력을 알고있거나, 자계의 세기가 경계조건으로 주어지는 경우에는 자기스칼라포텐셜을 계변수로하여 정식화하면된다. 카터계수산정 및 공극자속의 맥동현상을 분석하기 위해 자기스칼라포텐셜, Ω 를 계변수로 하는 기본방정식은 식(1)과 같이 주어진다.[4]

$$\frac{\partial}{\partial x} (\mu_x \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial x}) + \frac{\partial}{\partial y} (\mu_y \cdot \frac{\partial \Omega}{\partial y}) = 0 \quad (1)$$

식(1)에서 μ_x, μ_y 는 각각 x, y방향의 투자율을 나타낸다. 식(1)에 대한 에너지범함수와 계변수 Ω 를 선택한 근사화한 요소방정식은 각각 다음과 같다.

$$X = \int_D \frac{1}{2} \mu (\nabla \Omega)^2 dD$$

$$\frac{\partial X^{(e)}}{\partial \Omega_{ie}} = \int_{D^{(e)}} \left(\mu_x \frac{\partial \Omega^{(e)}}{\partial x} \cdot \frac{\partial}{\partial \Omega_{ie}} \frac{\partial \Omega^{(e)}}{\partial x} + \mu_y \frac{\partial \Omega^{(e)}}{\partial y} \cdot \frac{\partial}{\partial \Omega_{ie}} \frac{\partial \Omega^{(e)}}{\partial y} \right) dD \quad (2)$$

식(2)를 이용하여 전체 해석영역의 계수방정식을 구성하고 미지수 Ω 를 구한 후, 식(3)으로부터 각 요소에서의 자계의세기를 구하게된다.

$$H_x = - \frac{\partial \Omega}{\partial x}, \quad H_y = - \frac{\partial \Omega}{\partial y} \quad (3)$$

2-2. 이방성 자계해석

자성웨지가 자기적으로 이방화특성을 갖고 있을 경우에는 이방성자계해석이 필요하며, 이에 대한 기본적인 적용이론은 다음과 같다.

방향성이 없는 등방성재료에 대하여 자계의 세기 H 와 자속밀도 B 의 관계는 다음의 관계가 성립한다.

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu H_x \\ \mu H_y \end{bmatrix} \quad (4)$$

한편, 방향성을 갖는 이방성재료에서는 자계의 세기 H 와 자속밀도 B 의 관계는 식(5)와 같이 투자율을 방향성을 고려하여 텐서량으로 나타내게된다.

$$\begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \mu_{xx} & \mu_{xy} \\ \mu_{yx} & \mu_{yy} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} \quad (5)$$

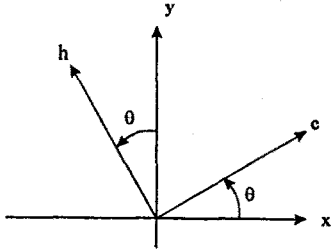


그림. 1 국부좌표계

이제, 식(5)를 유한요소법을 이용하여 정식화하기위해 자성재료의 자화특성을 그림.1 과 같이 국부좌표계 (local coordinate, e-h)를 이용하고 자화용이방향(easy direction)과 자화곤란방향(hard direction)으로 나누어 표현하자. 즉, 자화용이방향을 x축방향에 일치시키고 이 좌표계에서의 자계의 세기를 H' , 자속밀도를 B' 라 하면 다음의 관계가 성립한다.

$$B' = \begin{bmatrix} B_e \\ B_d \end{bmatrix} = \mu' H' = \begin{bmatrix} \mu_e & 0 \\ 0 & \mu_d \end{bmatrix} \begin{bmatrix} H_e \\ H_d \end{bmatrix} \quad (6)$$

여기에서, μ_e 는 자화용이축(easy direction) 방향의 투자율값이고 μ_d 는 자화곤란축(hard direction) 투자율값을 나타낸다. 한편, 다음과 같은 변환행렬 J 를 이용하여 식(6)을 식(5)의 형태로 다시쓰면 식(7)과 같다.

$$J = \begin{bmatrix} \cos \theta & \sin \theta \\ -\sin \theta & \cos \theta \end{bmatrix}$$

$$\begin{bmatrix} H_x \\ H_y \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} H_e \\ H_d \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} B_x \\ B_y \end{bmatrix} = J \cdot \begin{bmatrix} B_e \\ B_d \end{bmatrix} \quad (7)$$

위의 식들로 부터 식(5)에서 각 방향의 투자율은 다음과 같이 쓸 수있다.

$$\mu_{xx} = \mu_e \cdot \cos^2 \theta + \mu_d \cdot \sin^2 \theta$$

$$\mu_{yy} = \mu_e \cdot \sin^2 \theta + \mu_d \cdot \cos^2 \theta$$

$$\mu_{xy} = \mu_{yx} = (\mu_d - \mu_e) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta$$

이상의 결과를 이용하여 자기적 이방성을 고려하여 유한요소법으로 정식화할 때의 계수행렬 성분은 다음과 같다.

$$S_{ij} = \int_D \left\{ \mu_{xx} \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} + \mu_{yy} \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} + \mu_{yx} \frac{\partial N_i}{\partial x} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial y} + \mu_{xy} \frac{\partial N_i}{\partial y} \cdot \frac{\partial N_j}{\partial x} \right\} dD$$

2-3. 카터계수 산출

슬롯구조를 갖는 기기의 유효공극을 계산하기위한 카터계수를 구하는 방법으로는 conformal mapping에 의한 방법이 보편적으로 널리 이용되고있다. conformal mapping에 의한 카터계수의 산출은 개방형 슬롯에 대해서는 비교적 정확하지만 슬롯의 구조가 복잡해질 경우에는 정확도가 떨어지는 문제가있다. 특히, 본 연구에서와 같이 슬롯에 자성웨지를 이용할 경우에는 기존의 식을 그대로 적용할 수가 없으며, 수치해석적인 방법에 의해 카터계수를 산출하여야한다.

conformal mapping에 의한 카터계수 산출식은 다음과 같다. [5]

$$k_c = \frac{t_s}{t_s - \frac{4}{\pi} \cdot \left\{ \frac{s}{2} \arctan \frac{s}{2g} - \frac{g}{2} \ln \left[1 + \left(\frac{s}{2g} \right)^2 \right] \right\}}$$

여기에서, $t_s, g, s, g_e = k_c \cdot g$ 는 각각 슬롯피치, 공극, 슬롯개구폭 및 유효공극을 나타낸다.

유한요소해석에 의한 카터계수 산정은 다음과 같이 자기스칼라포텐셜을 계변수로한 해석결과로부터 계산하게된다.

즉, 철심에서의 기자력손실을 무시하면, 식(8)과 같이 외부에서 인가되는 기자력은 자기저항과 공극의 기자력의 곱으로 표현할 수가 있다.

$$F = R \cdot \phi$$

$$P = \frac{\phi}{F} = \frac{\mu_0 \cdot t_s}{k_c \cdot g} \quad (8)$$

한편, 공극에 축적되는 자기축적에너지와 공극퍼미언스의 관계는 식(9)와 같다.

$$\begin{aligned} E_s &= \frac{1}{2} \cdot mmf \cdot flux = \frac{1}{2} \cdot \frac{flux^2}{P} \\ &= \frac{1}{2} \cdot mmf^2 \cdot P = \frac{1}{2} \mu_e \int_s (H^2) ds \end{aligned} \quad (9)$$

따라서, 식(9)로부터 공극퍼미언스를 계산하고, 식(8)을 이용하여 카터계수를 산출할 수 있다.

$$k_c = \frac{\mu_0 \cdot t_s}{P \cdot g}$$

3. 해석결과 검토

이상의 적용이론을 기초로하여 공극 0.6[mm], 슬롯 피치 12.33[mm]인 해석모델에 대하여 자성웨지가 카터계수에 미치는 영향을 검토해 보았다. 그림.2에 자기스칼라포텐셜을 계변수로한 해석결과와 등포텐셜분포를 나타내었다. 그림.3은 유한요소해석에 의한 계산결과와 해석해의 결과를 비교한 것이며, 여기에서, 곡선 A는 해석해에 의한 결과이며, B는 개방형슬롯에 대한 유한요소해석 결과를 나타내고 있으며, C는 반폐슬롯에 대한 유한요소해석결과이다. 그림.3에서 알 수 있듯이 슬롯의 형상이 개방형일 경우에는 두가지의 결과가 잘 일치하고 있으나, 반폐 슬롯일 경우에는 슬롯의 개구폭이 커질 수록 오차가 커지는 것을 알 수 있다. 자성웨지를 사용했을 경우에는 해석해의 오차는 더 커지게된다.

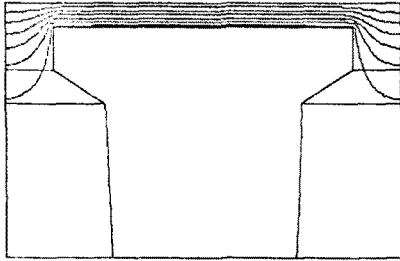


그림. 2 등포텐셜 분포

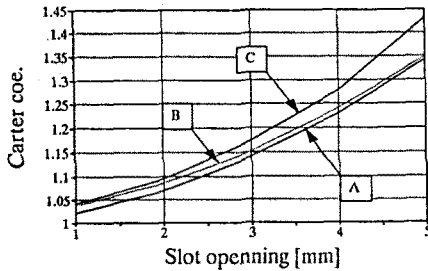


그림. 3 카터계수 산출의 비교

한편, 이 해석모델의 슬롯개구폭이 3.0[mm]일 경우, 자성웨지의 자기적 특성변화에 따른 카터계수의 산출 결과를 그림.4에 나타내었다. 여기에서, 곡선 A는 등방성 웨지에 대한 결과이며, B는 웨지가 자속의 방향으로 이방화 되어있을 경우이며, C는 웨지의 이방화방향이 자속방향과 수직인 경우이다. 그림.4의 계산결과를 살펴보면 등방성이며, 투자율이 높은 자성웨지를 사용하는 것이 카터계수를 작게하여 보다 효과적인 것으로 나타났다.

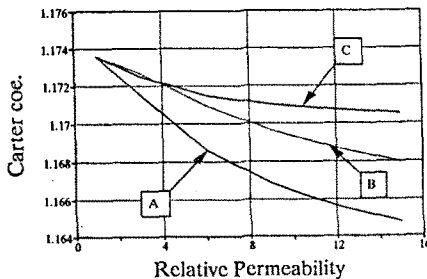


그림. 4 자성웨지에 따른 카터계수 변화

그러나, 실질적인 전동기의 자기회로를 고려한다면 자성웨지의 투자율이 높을 수록 슬롯의 누설자속이 증가하게되어 특성을 저하시키게된다.

그림.5에 3상 6극 전동기에 대하여 정격운전시(슬립=0.02)에 자성웨지를 사용하지 않은 경우를 1.0으로하여 자성웨지의 자기적 특성변화에 따른 슬롯누설자속의 비를 나타내었다. 그림. 5에서 A는 등방성웨지에 대한 계산 결과이며, B는 이방성웨지에 대한 계산결과이다.

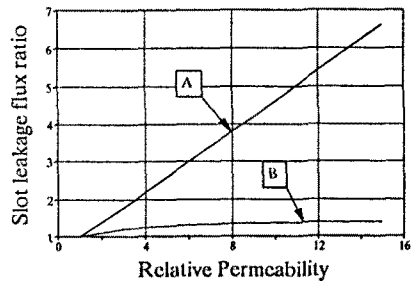


그림. 5 자성웨지에 따른 슬롯누설자속 변화

이상의 결과로부터 알 수 있듯이 무부하 상태에서 자성웨지의 비투자율이 높을 수록 카터계수는 감소하나, 부하특성을 고려한다면 이것이 슬롯누설을 증가시키게되므로 자기이방성 특성을 갖는 자성웨지를 채용하는 것이 바람직할 것으로 판단된다.

4. 결 론

자기스칼라 포텐셜을 계변수로하여 자성웨이 적용시의 카터계수와 공극자속밀도의 맥동현상을 검토해보았다. 검토결과 자성웨지를 사용하는 것이 카터계수를 줄이고 맥동율도 줄일 수 있는 것으로 나타났다. 한편, 비투자율이 높은 등방성 자성웨지를 사용할 경우에도 양호한 것으로 나타났으나, 부하특성을 비롯한 기동시의 슬롯누설자속이 증가하여 특성이 저하된다. 따라서, 이방성 자성웨지를 채용하는 것이 바람직하며, 자화용이축 방향을 자속과 같은 방향으로 하는 것이 좋은 것으로 나타났다.

현재, 기동특성을 포함한 부하특성에 대하여 자성웨이 지가 미치는 영향에 대한 분석을 진행하고있다.

참고문헌

- [1] 穴澤義久, 加賀昭夫, 赤上陽出男, "フェライト磁性くびおを用いた小形誘導電動機の特性とカター係數", 電氣學會論文誌, Vol.104, No.4, pp246-252, 1984
- [2] Akio Kaga, Yoshihisa Anazawa, Hideo Akagami, Seoji Watabe and Motohiko Makino, "A RESEARCH OF EFFICIENCY IMPROVEMENT BY MEANS OF WEDGING WITH SOFT FERRITE IN SMALL INDUCTION MOTORS", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-18, No. 6, pp. 1547-1549, 1982
- [3] Y. Takeda, T. Yagisawa, A. Suyama and M. Yamamoto, "APPLICATION OF MAGNETIC WEDGES FOR LARGE MOTORS", IEEE Trans. on Magnetics, Vol. MAG-20, No. 9, pp. 1780-1782, 1984
- [4] 任達鎔, 電氣系的有限要素法, 東明社, 1986
- [5] ENRICO LEVI, POLYPHASE MOTORS, JOHN WILEY & SONS, 1984