

유한요소법에 의한 유도동기 전동기의 특성 해석

김 도완\*, 조 동혁\*, 오 시덕\*, 정 현교\*\*

\*효성(주) 중공업 연구소 기전팀, \*\*서울대학교 전기공학부

Analysis of the Characteristics of Line Starter Permanent Magnet Motor BY Finite Element Method

Kim do-wan, Cho Dong-Hyuk, Oh Si-Doek, Jung Hyun-Gyo

**Abstract** - 에너지와 환경에 대한 관심이 증대되면서 전동기의 고효율화의 필요성이 증대되고 있다. 현재 유도전동기의 고효율화에 대한 연구가 진행되고 있지만 슬립으로 인한 회전자 동손의 감소는 한계점이 존재한다. 또한 영구자석 동기전동기는 별도의 기동장치가 필요하므로 제품의 단가가 증가하게 된다. 이에 기동은 유도기의 특성을 이용하고 정격시는 동기전동기로 운전하는 영구자석 매입형 유도성 기동전동기의 효율성이 높아지고 있다. 본 논문에서는 유도동기전동기의 과도상태 토크 특성 및 동기시의 효율 등을 유한요소법을 이용하여 계산하였다. 본 해석법을 현재 생산중인 섬유기계용 유도 동기 전동기에 적용하여 그 특성을 해석하였다.

2. 본 론

2.1 FEM 정식화

유한요소 해석은 다음의 지배방정식에서 유도된다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_s + \vec{J}_e + \vec{J}_M \quad (1)$$

위식에서 와전류항  $\vec{J}_e$ 는 벡터 포텐셜  $\vec{A}$ 로 치환하고 영구자석에 의한 효과는 등가전류항으로 치환할 수 있다.

$$\vec{J}_e = -\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} - \nabla \phi \quad (2)$$

$$\vec{J}_M = \frac{1}{\mu_0} \left( \frac{\partial M_x}{\partial x} - \frac{\partial M_y}{\partial y} \right) \quad (3)$$

위식에서 시간미분항을 다음 식과 같이 현재 스텝과 이전 스텝의 시간 차분항으로 나타낸다.

$$\frac{\partial \vec{A}}{\partial t} = \frac{\vec{A}_{i+1} - \vec{A}_i}{\Delta t} \quad (4)$$

여기에 고정자 회로방정식을 삽입하여 전압원을 고려한다.

$$V = RI + L_e \frac{dI}{dt} + N \frac{d\phi}{dt} \quad (5)$$

그 다음 회전자 회로방정식을 고려하고 철심의 비선형 특성을 계산하기 위해 Newton-Raphson법을 이용하여 최종적으로 계산해야 하는 행렬식은 다음의 형태가 된다.

$$\begin{bmatrix} [K] + [T] + [R] & [E] & [S] \\ [E]^T & [P] & [0] \\ [S]^T & [0] & [Z] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [\delta A] \\ [\delta \nabla \phi] \\ [\delta I] \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} [0] \\ [0] \\ [V] \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} [K] + [T] & [E] & [S] \\ [E]^T & [P] & [0] \\ [S]^T & [0] & [Z] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} [A] \\ [\nabla \phi] \\ [I] \end{bmatrix} \quad (6)$$

1. 서 론

최근 환경문제에 대한 관심이 높아지면서 에너지 소비가 환경에 미치는 영향이 경제적, 사회적으로 부각됨에 따라 산업 분야에서 전력량의 대부분을 소비하는 전동기의 고효율화에 대한 관심이 매우 증가되고 있다. 특히 최근에 자석소재가 기존의 페라이트에서 희토류로 발전함에 따라 고성능 영구자석의 보급이 확대되어 정상 운전시 효율이 높은 동기전동기의 개발이 가능해졌다. 따라서 동기화만 가능하다면 기존의 고효율 유도전동기에 비해 동기전동기를 사용하는 것이 2차 동손을 제거할 수 있으므로 효율면에서 유리하다. 또한 정상운전시 회전자 전류손실이 없으므로 온도상승이 낮아 베어링 및 절연수명을 높일 수 있다.

이상의 동기전동기의 장점을 이용하고 기동을 가능하게 하기 위해 동기전동기에 회전자 슬롯을 삽입하여 기동시에는 유도기로서 동작하고 정상상태시는 동기기로 동작하는 유도동기전동기에 대한 개발이 활발해지고 있다. 영구자석 매입형 유도성 기동 동기전동기는 유도전동기와 영구자석 전동기의 혼합구조로써 회전자 내부에 영구자석이 매입되어 있고 회전자 외주면을 따라 알루미늄 다이캐스팅된 슬롯이 배치되어 있어서 상용전원에서의 자기시동기 가능하며 정상운전시에는 영구자석 동기기로 운전되기 때문에 기존의 고효율보다 높은 효율을 가질 수 있다.

이상의 유도동기 전동기를 해석하기 위해 본 논문에서는 유한요소법을 사용하였다. 유도동기 전동기는 동기인입 과정이 중요하므로 과도상태이 필요하며 회전자의 위치에 따라 인덕턴스가 크게 변화하므로 시간차분 해석이 필요하다. 이상의 방법을 3마력 섬유기계용 유도동기 전동기에 적용하여 그 특성을 계산하였다.

## 2.2 기계방정식과의 결합

유도동기 전동기의 과도특성 해석을 위해서는 각 스텝에서의 토크를 구한 후 시간차분만큼의 회전자를 이동시킨 후 다시 토크를 계산하는 방법을 사용해야 한다. 토크 계산을 위해 Maxwell Stress Tensor법을 사용하였다. 먼저 전류가 흐를 때 발생하는 힘은 다음과 같다.

$$\vec{j} = \vec{j} \times \vec{B} \quad (7)$$

여기서 전류항 대신 전류에 의해 생긴 자기장으로 치환하면 다음과 같다.

$$\vec{j} = \nabla \times \vec{H} \times (\mu, \vec{H}) \quad (8)$$

위 식에서 최종적으로 전자기 시스템의 힘을 계산하면 다음과 같은 텐서로 표현할 수 있다.

$$F_m = \frac{\partial T_{mn}}{\partial x_n}, n=1,3 \quad (9)$$

여기서

$$T_{mn} = \mu H_m H_n - \frac{\mu}{2} \delta_{mn} H_k H_k \quad (10)$$

## 2.3 해석 사례

이상의 방법을 현재 시판중인 3마력 유도동기 전동기에 적용하였다. 본 전동기는 섬유기계용 전동기로써 기동시는 회전자 도체로 인해 기동되고 정상상태가 되면 동기전동기로써 일정속도로 운전되게 된다. 전동기 사양은 다음 표와 같다.

표 1. 해석 유도동기 전동기의 사양 단위 [mm]

|     |         |     |          |
|-----|---------|-----|----------|
| 용량  | 3 [Hp]  | 전압  | 220 [V]  |
| 주파수 | 60 [Hz] | 극수  | 4 [Pole] |
| 공극  | 0.35    | 축길이 | 110      |
| 고정자 |         | 회전자 |          |
| 외경  | 223.5   | 외경  | 139      |
| 내경  | 139.7   | 내경  | 34       |
| 슬롯수 | 36      | 슬롯수 | 40       |
| 자석  | 22x6    | 도전율 | 50 [%]   |

이상의 유도동기 전동기에 대하여 유한요소 해석을 한 결과 유도전동기의 정격 슬립에서의 자속분포는 다음과 같다.

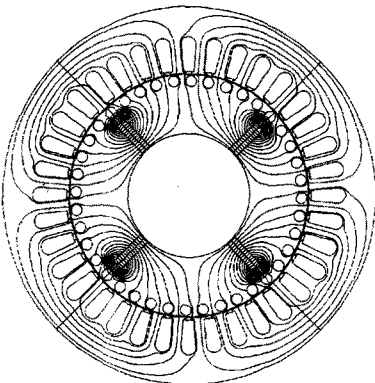


그림 1. 정격슬립에서의 유도동기 전동기의 자속분포도

유도동기 전동기는 기동시에 영구자석의 효과로 인해 유도기만 있을 때와는 달리 진동하는 토크가 발생한다. 아래 그림에 기동시에 자속분포가 제시되어 있다. 그림 (a)를 보면 고정자 전원의 회전자속분포와 자석의 자속분포가 일치할 경우이고 그림 (b)는 회전자계 분포와 자석의 자속분포가 (-)가 되는 상황이다. 이 때는 토크가 (-)방향으로 표현되게 된다.

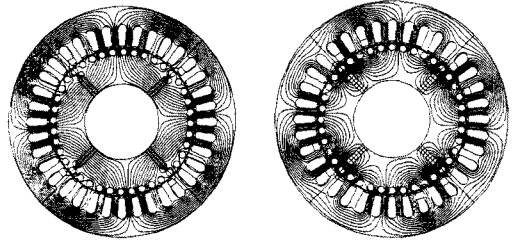


그림 2. 기동시의 유도동기 전동기의 자속분포도

기동시부터 정상시까지 전류 특성은 그림 3에 제시되어 있다. 정격부하를 인가하고 해석하였으므로 1.5초 후에 전류가 일정하게 나타나서 동기화 되었음을 알 수 있다.

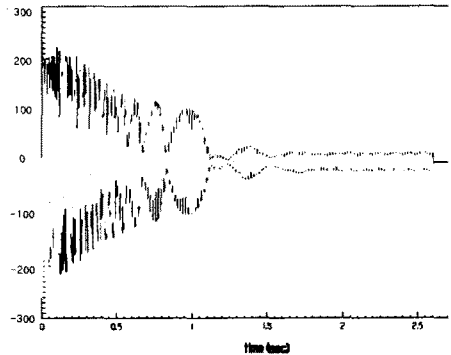


그림 3. 유도동기 전동기의 전류

그림 4에는 기동시부터 정상시까지 속도변화가 제시되어 있다. 기동시부터 유도기에 의해 속도가 증가하다가 동기속도 근처에서 영구자석에 의해 순간적으로 가속하여 1800[rpm]이상이 되면 그 후에 동기화가 되는 것을 알 수 있다. 만약 동기기와 유도기토크의 합이 동기속도 이상으로 가속할 만큼보다 부족하면 동기화가 되지 못하고 유도기의 정격슬립 근처에서 계속 진동하게 된다.

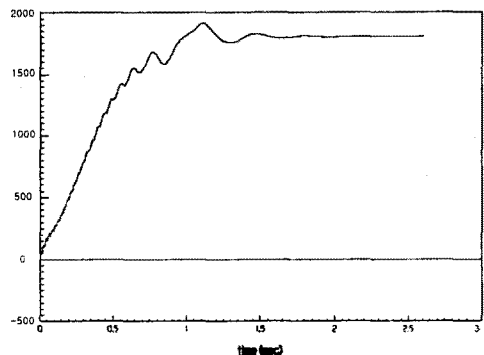


그림 4. 유도동기 전동기의 속도

기동시부터 정상시까지 토크 특성은 그림 5에 제시되어 있다. 일반 유도기에 비해 (-)토크가 상대적으로 큰 경향을 볼 수 있다. 즉 기동시에도 (-)토크가 크게 나타나 토크의 진동폭이 증가하고 정격근처에서도 (-)토크가 발생함을 알 수 있다. 이는 영구자석이 동기인입시에 유도기의 회전자계에 반발하는 힘으로 작용하여 토크를 감소시킴을 알 수 있다.

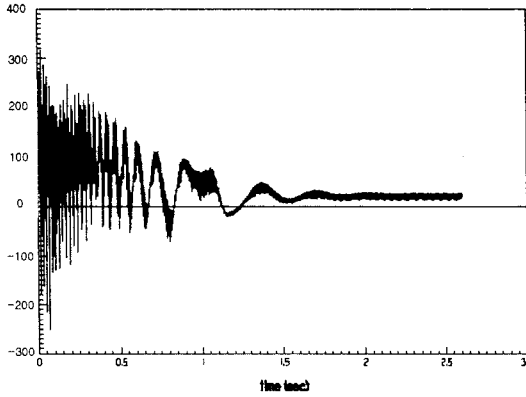


그림 5 유도동기 전동기의 토크

그림 6에서는 최초 기동시의 토크가 제시되어 있다. 그림을 보면 (-)방향으로 토크가 일반 유도전동기에 비해 크게 나타나는 것을 알 수 있는데 이는 고정자 전류에 의한 회전자계가 회전할 때 아직 회전자는 정지상태이므로 영구자석이 양(+)과 음(-)의 방향으로 진동하는 토크를 생성시키기 때문이다.

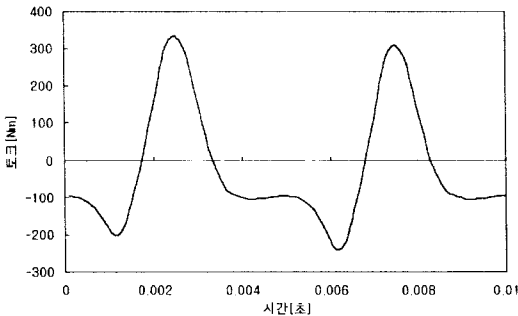


그림 6. 유도동기 전동기의 기동순간의 토크

### 3. 결 론

본 논문에서는 유도동기 전동기를 유한요소법을 이용하여 해석하였다. 유도동기 전동기는 정상시에 동기기로 운전되므로 효율면에서 기존 고효율 유도기에 비해 훨씬 유리하다. 그러나 해석시에 유도기와 동기기의 효과가 복합적으로 나타나므로 그 해석상에 어려움이 존재한다. 즉 회전에 따른 인덕턴스의 변화를 고려하기 위한 시간 차분법과 동기인입시의 특성을 정확히 파악하기 위한 기계방정식을 결합한 과도특성 해석이 필수적이다. 본 논문에서는 이러한 특성을 고려하여 삼유기계용 3마력 전동기에 대하여 그 해석을 수행하였으며 토크 및 전류 특성을 파악하였다. 이상의 해석법을 보다 효율이 높고 기동특성이 우수한 유도동기전동기를 설계하는데 도움이 될 것으로 사료된다.

### (참 고 문 헌)

- [1] M.A. Rahmen, "Performance of Large Line-Start anent Magnet Synchronous Motors", IEEE Trans. on E Conversion, Vol.5 No.1 ,211-217, March 1990.
- [2] Liviu MINCIUNA, "Contradictions in Permanent et Synchronous Motor Parameters upon Line\_Starting" mization of ELectrical and Electronic Equipments, 311 998
- [3] G. G. Soto, A. Yahiaoui, E. Mendes, and F. Bouillault, "Nemerial and Experimental Determination of an induction machine parameters depending on the Magnetic Current," *Record of ICEM*, vol. 1, pp. 263-247, 1998.
- [4] K. Leblebicioglu, H. B. Ertan, and A. Cekic, "Prediction of Indetion Motor parameters from Numerical Field Solutions," *EMPS Journal*, vol. 27, no. 2, pp. 107-121, 1999.