

유한요소법과 프라이자흐 모델을 이용한  
극 변화 메모리 모터의 동특성 해석

이태훈\* , 문성주\* , 이중호\*  
국립한밭대학교

Dynamic Characteristics Analysis in A Pole Changing Memory Motor Using Coupled FEM & Preisach Modeling

Tae-Hoon Lee\* , Sung-joo Moon\* , Jung-Ho Lee\*  
Hanbat National University

**Abstract** - This paper deals with the PM performance evaluations in a pole changing memory motor (PCMM) using a coupled transient finite element method (FEM) and Preisach modeling, which is presented to analyze the magnetic characteristics of permanent magnets. The focus of this paper is the dynamic characteristics evaluation relative to magnetizing direction and the pole number of machine on redemagnetization condition in a pole changing memory motor

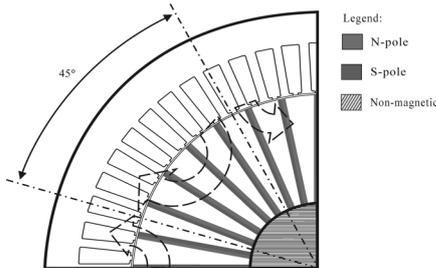
1. 서 론

이산속도제어가 요구되는 모터 드라이브시, 농형유도전동기가 독립적으로 사용되고 있다. 농형유도전동기는 고정자 극수와 같은 회전자 극수를 항상 유지하는 특성을 가지기 때문이다. 전형적인 영구자석기기는 항상 같은 극수를 유지하고 있으며, 어떤 속도에서 일정한 주파수로 동작된다. 만약 영구자석기기가 메모리 모터의 원리로부터 제작된다면, 농형유도기와 같이 간단하게 극수를 절환할수 있다.

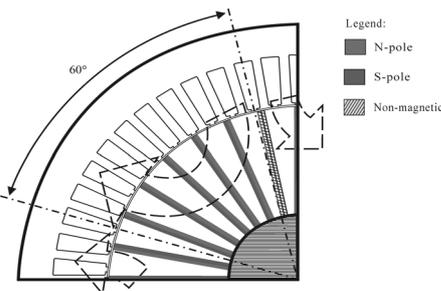
메모리모터의 동작은 작은 고정자전류로 영구자석의 자화량을 변화 시킬 수 있는 특성에 기초한다. 회전자자석의 자화량이 고정자 펄스에 의해 지속적으로 어떻게 변화되는지에 대한 설명이 참고문헌[1]-[2]에 나타나 있다.

2. 본 론

2.1 메모리 모터 동작 이론



<그림1> 8극 상태의 PCMM



<그림2> 6극 상태의 PCMM

참고문헌[1]에서 보여주듯이 메모리모터의 회전자는 샌드위치 형상으로 만들어지며, 여러 가지 방법을 통해 한 극당 영구자석 한개 이상 같은 방향으로 착자된 그룹을 형성할 수 있다. 결과적으로, 로터의 극 수는 변화하게 된다.

이러한 극 변환 메모리모터의 원리가 그림 1,2에서 설명되어 있다. 그림 1에서 32개의 자화된 자석을 가지는 극 변환 메모리 모터의 교차 단면적을 보여준다. 로터쪽에는 극당 4개의 자석이 있으며 이것들은 모두 같은 방향으로 자화되고 있다.

철심단편을 따른 영구자석들은 기계적으로 비자성체 축에 고정되어 회전자 환을 구성한다. 고정자권선이 6극으로 재접속 된 후에 고정자전류의 작은 펄스가 로터를 8극에서 6극으로 변화시킨다.

그림 2에서 보여지는 것처럼 극당 자석의 수가 더 이상 정수가 아니기 때문에(32/6=5.333), 일부 자석은 탈자된 채로 남아있다. 자화의 방향과 양 등의 문제는 메모리모터의 성능을 평가하는데 중요하다. 이러한 특성은 재료의 특성에 따르며 따라서 수치적인 평가가 필요하다.

다른 종류의 모터에서는 대략적인 히스테리시스와 자화특성에 대한 계산이 받아 지는 반면 메모리모터에서는 이들이 매우 중요한 요인이 되어 더욱더 정확히 계산하기 위해 노력해야한다.

프라이자흐 모델은 히스테리시스를 파악하는데 일반적이고 뛰어난 능력을 가지고 있기 때문에 지속적으로 연구가 수행되어왔다[3]-[4].

본 논문은 극 변환 메모리모터를 프라이자흐 모델과 유한요소법을 이용해 짧은 펄스전류에 의한 극 변환 상황에서의 동특성을 분석하였다.

2.2 결합된 프라이자흐 모델과 FEM

2.2.1 PCMM의 지배방정식

맥스웰방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{B} = \frac{1}{v_o} \vec{H} + \vec{M} \quad (3)$$

M은 자속밀도 H에 대한 자성재료의 자화량이다. 자기의 벡터 방향A와 이에 상응하는 자화전류  $J_m$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4)$$

$$\vec{J}_m = v_o (\nabla \times \vec{M}) \quad (5)$$

(1)-(5)로 부터 지배방정식은 (6)으로 주어진다.

$$v_o (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (6)$$

이동을 고려한 2차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} v_0 \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v_0 \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z - J_m \quad (7)$$

$$J_m = v_0 \left( \frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (8)$$

$A_z$  : 자기벡터 방향의 Z성분  
 $J_z$  : current density  
 $v_0$  : 자기저항  
 $M_x, M_y$  : 자계강도  $H_x, H_y$ 에 의한 자성물질의 자화량

### 2.2.2 System Matrix

회로 방정식은 다음 같이 쓰여 진다.

$$\{V\} = [R]\{I\} + [L_0] \frac{d}{dt} \{I\} + \{E\} \quad (9)$$

$\{E\}$  : 권선의 E.M.F 벡터  
 $\{V\}$  : 공급 전압 벡터  
 $\{I\}$  : 상전류 벡터  
 $[L_0]$  : 누설 인덕턴스

(7)식을 풀기위해 Galerkin 유한요소법을 사용하였고, (9)번식에서는 수렴성과 계산시간을 고려하여 회로 방정식이 결합된 후퇴차분법을 사용하였다. (7), (8), (9)번식을 결합한 시스템 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} v_0[S] - [N] \\ [0] \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} [0] & -[0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}_t = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}_{t-\Delta t} + \begin{Bmatrix} \{M\} \\ \{V\} \end{Bmatrix}_t \quad (10)$$

[LG]는 EMF와 관련된 매트릭스 계수이다. 자화량[M]은 프라이자흐 모델링에 의해 계산된다.

### 2.2.3 프라이자흐 모델의 응용

본 논문의 프라이자흐 모델은  $M-H$ 관계를 사용하였다. 모든 히스테리시스 현상에 있어 인가자계와 자화량 사이에는 위상차가 있기 때문에 벡터적 해석을 피할 수 없다.

그러므로 회전기기의 해석에 대한 새로운 알고리즘 개발이 필요하다. 회전자는 입력자계각  $\theta$ 를 따라서 고정자의 영역은 x, y 축에 대해서 교번 자계로 가정할 수 있으며 회전자의 B와 H는 상수이며 x축과 y축에 대해서 또한 교번 자계이다.

기준으로 보면 교번하는 계로 가정할 수 있다. 인가 자계와 자화사이의 각은 x축과 y축 위에서는 0혹은  $\pi$ 가 된다.

따라서 회전기기에 대한 프라이자흐 모델은 식 (10)에서 볼수 있는 바와 같이 스칼라 모델로서 표현되어 질 수 있다. [5]-[7]

같은 축에서 계산된  $M, H$ 가 같은 벡터 방향을 가지는 것은 당연하다. 그러므로 자화  $M$ 은 회전기기의 전기량을 간단히 계산함으로써 해석할 수 있다. [8]

$$M(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta = \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (11)$$

보다 편리한 계산을 위하여 식 (12)와 같이 Everett 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다.

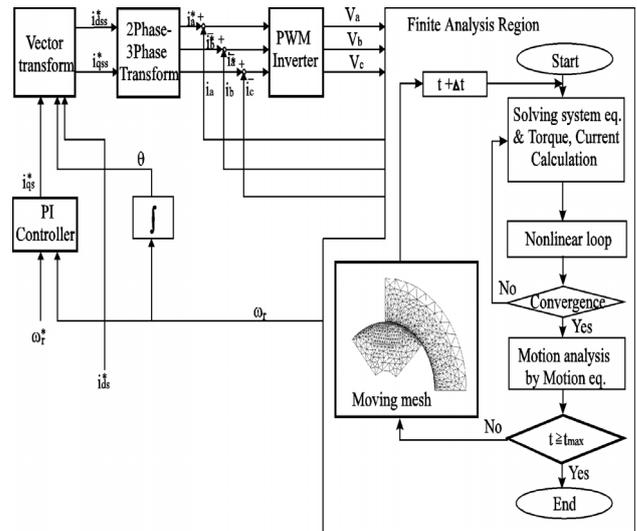
$$E(\alpha, \beta) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (12)$$

Everett 평면에서 자화의 분포는 재료 S40과 페라이트 자석 실험에 의한 데이터에 의하여 설정되며 가우스모델에 따른다.

### 3. 시뮬레이션

그림3은 제안된 해석방법에 의한 시뮬레이션 흐름도를 보여준다. 전압소스는 인버터에 의한 PWM이며 제어를 위해 자속기준 제어 알고리즘이 구현되어졌다.

PCMM의 토크는 Maxwell stress tensor에 의해 계산된다.



<그림3> 해석시스템의 블럭선도

### [참 고 문 헌]

- [1] V. Ostovic, "Memory motor-A new class of controllable flux PM machines for a true wide speed operation," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 2001, pp. 2577-2584.
- [2] V. Ostovic, "Pole changing permanent magnet maxhine," IEEE Trans. On Industry Applycation, Vol.38, No.6, pp.1493-1499, Dec, 2002
- [3] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST
- [4] 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.
- [5] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Preisach Modelling", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 1203-1206. May 1999.
- [6] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Effect of Magnet on Ld and Lq Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor", IEEE Tranl.on Magn Vol.35, No. 5, pp. 1199-1202, May 1999.
- [7] 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
- [8] P. Materu and R. Krishnan, "Estimation of switched reluctance motor losses," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, Pittsburgh, PA, 1988, p79-90