

유한요소법과 프라이자흐모델이 결합된 해석기법을 이용한 Pole Changing Memory Motor의 동특성해석

이승철, 송한상, 이중호
한밭대학교

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

Seung chul Lee, Han Sang Song, Jung Ho Lee
Hanbat 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 characteristics evaluation relative to magnetizing direction and the pole number of machine on re-, demagnetization condition in a pole changing memory motor.

화된다고 하면 대략적인 자속밀도분포는 그림2에 보여 진다.

1. 서 론

일반적인 전기기기의 고출력밀도와 함께 PM기기의 자속 조절 능력을 결합시킨 것이 메모리모터이다[1],[2].

메모리모터는 가변자속 (Flux Variable) 또는 극 변환 (Pole Changing) 두 종류가 있다.

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

메모리모터의 성능 평가에 자화방향 및 자화량은 중요한 요소이다. 다른 종류의 모터에서는 대략적인 히스테리시스와 자화특성에 대한 계산이 가능한 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 유한요소법과 프라이자흐 모델이 결합된 해석 기법을 이용하여 극 변환 메모리모터를 대상으로 연속적인 재-감자시 특성분석을 수행하였으며, 제안된 기법이 우수함을 확인하였다.

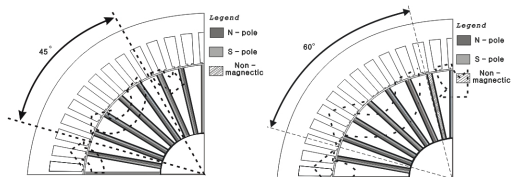
2. 본 론

2.1 PCMM의 동작 원리

극 변환 메모리모터의 회전자는 샌드위치 형상으로 만들어지며, 여러 가지 방법을 통해 한 극 당 영구자석 한개 이상 같은 방향으로 착자된 그룹을 형성할 수 있다. 결과적으로, 회전자의 극 수는 변화하게 된다.[1]

그림 1에서 32개의 자화된 자석을 가지는 극 변환 메모리 모터의 교차 단면적을 보여준다. 회전자에는 극 당 4개의 자석이 있으며 이것들은 모두 같은 방향으로 자화되고 있다. 고정자권선이 6극으로 재접속 된 후에 고정자전류의 작은 펄스가 회전자자석을 8극에서 6극으로 자화를 변화시킨다.

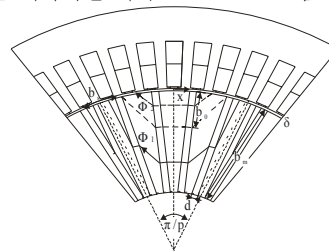
그림 1에서 보여지는 것처럼 극 당 자석의 수가 더 이상 정수가 아니기 때문에 (32/6=5.333), 일부 자석은 탈자 된 채로 남아있다.



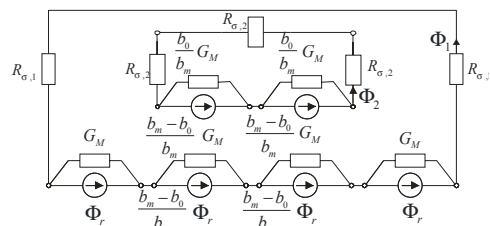
〈그림 1〉 8극 과 6극 상태의 PCMM

2.2. 극 당 자속의 측정과 자기등가회로

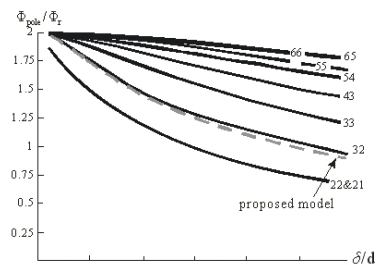
회전자가 극 당 4개의 자석으로 이루어지고 모든 자석들이 자



〈그림 2〉 극 당 4개 자석의 PCMM의 단면도



〈그림 3〉 자기등가회로



〈그림 4〉 자석두께와 공극 사이의 비

〈표 1〉 자기등가회로의 파라미터

δ/d	G_M (const)	$R_{\sigma,2}$	B_r (const)	y	Φ_{pole}/Φ_r
0.05	4.03×10^{-6}	7648.78	0.4	0.313	1.6793
0.1	4.03×10^{-6}	15297.58	0.4	0.616	1.3165
0.15	4.03×10^{-6}	22946.36	0.4	0.924	1.1366
0.2	4.03×10^{-6}	30595.15	0.4	1.232	0.9709
0.25	4.03×10^{-6}	38243.94	0.4	1.54	0.8463
0.5	4.03×10^{-6}	76487.88	0.4	3.08	0.5138

그림 2의 자속 Φ_1 은 왼쪽과 오른쪽 자석의 모든 영역을 흐르지만 오직 반지름방향 높이 $b_m - b_0$ 의 자석 중앙 부분으로만 흐른다. 그림 2의 자속 Φ_2 은 오직 반지름방향 높이 b_0 의 자석 중앙 부분으로만 흐른다.

전자의 슬롯에 전류가 안 흐르기 때문에 자석들은 회전자 슬롯 자속밀도의 접선방향 성분은 접선방향으로 자화된다.

그림 3에서 보여주듯이 그림 2에서 높이 b_0 는 한 극의 자기등가회로를 사용해서 계산될 수 있으며 회전자 자석의 잔류 자속

B_r 과 보자력 H_c 를 구할 수 있다.

$$G_M = \frac{\Phi_r}{\Theta_c} = \frac{B_r l b_m}{H_c d}, \quad R_{\delta,1} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{l \frac{b_s}{2}}$$

$$R_{\delta,2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{l b_s}, \quad B_r = \text{const}$$

그림 3의 자속 Φ_1 과 Φ_2 에 대한 해는 잔류자속 Φ_r 의 함수로써 극 당 자속 Φ_{pole} 를 찾는데 도움을 준다.

$$\frac{\Phi_{pole}}{\Phi_r} = 2 \frac{5y+1}{5y^2+5y+1}$$

y 는 공극과 자기저항 사이의 비율을 의미한다.

$$y = \frac{R_{\delta,2}}{R_M} = R_{\delta,2} G_M$$

극 당 자석 개수의 증가는 잔여자속 Φ_{pole}/Φ_r 에 대한 극당 자속의 높은 비율을 가져온다.

극 당 자석의 무한한 개수에 대한 비율 δ/d 와 Φ_{pole}/Φ_r 의 상관성은 그림 4에서 보여준다.

첫 번째 숫자는 극 당 자석의 총 개수 그리고 두 번째 숫자는 극 당 자화된 자석 개수이다.

표 1은 본 논문의 자기 등가 회로 모델의 파라미터이다. 그림 4는 [3]의 32개의 자석 데이터와 밀접하게 일치한다는 것을 확인시켜 준다.

2.3 프라이자흐 모델과 FEM

2.3.1 PCMM의 지배방정식

지배방정식은 식(1)은 다음과 같다.

$$v_0 (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (1)$$

이동을 고려한 2차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} v_0 \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v_0 \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z - J_m \quad (2)$$

$$J_m = v_0 \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (3)$$

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

2.3.2 System matrix

회로 방정식은 다음 같이 쓰여 진다.

$$\{V\} = [R]\{I\} + [L_0] \frac{d}{dt} \{I\} + \{E\} \quad (4)$$

식(2)를 풀기위해 Galerkin 유한요소법을 사용하였고, (4)번식에서는 수렴성과 계산시간을 고려하여 회로 방정식이 결합된 후 퇴차분법을 사용하였다. 식(2), (3), (4)를 결합한 시스템 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{aligned} & \left[\begin{array}{cc} v_0 [S] - [N] & \\ [0] & [R] \end{array} \right] + \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} [0] & -[0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{A\} \\ \{I\} \end{array} \right\}_t \\ & = \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{A\} \\ \{I\} \end{array} \right\}_{t-\Delta t} + \left\{ \begin{array}{c} \{M\} \\ \{V\} \end{array} \right\}_t \end{aligned} \quad (5)$$

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

2.3.3 프라이자흐 모델의 응용

본 논문의 프라이자흐 모델은 $M-H$ 관계를 사용하였다.

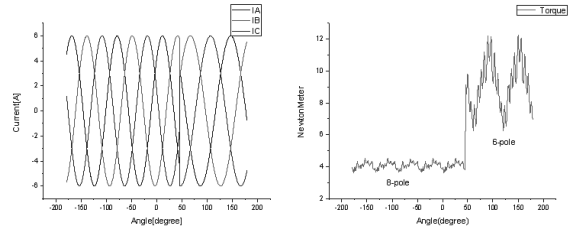
$$M(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (6)$$

$$= \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \quad (7)$$

보다 편리한 계산을 위하여 식(8)과 같이 Everett 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다.

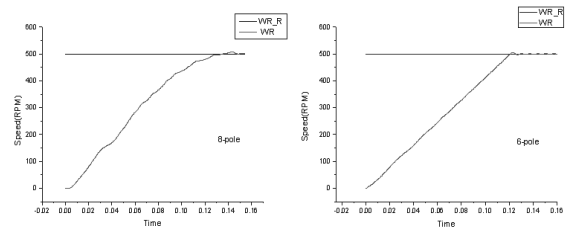
$$E(\alpha, \beta) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (8)$$

2.4 실험결과

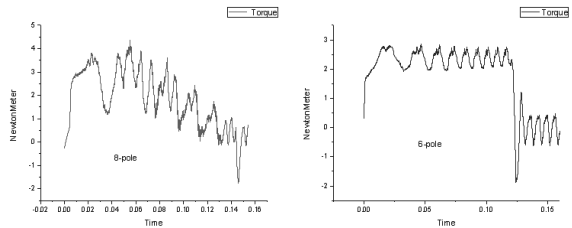


<그림 5> 8/6극 극 변환 메모리 모터의 입력 전류와 토크응답

그림 5는 8-6극 극 변환 메모리모터의 입력전류와 토크응답을 나타내고, 입력전류가 45도에서 8극에서 6극으로 전류가 전환되는 것을 볼 수 있다.



<그림 6> 8극 과 6극의 속도응답곡선



<그림 7> 8극 과 6극의 토크특성곡선

8극과 6극에서의 동작시 속도 및 토크특성은 그림 6, 7에서 나타났다.

극 변환 메모리모터는 벡터 컨트럴 시스템에서 잘 적용할 수 있다는 것을 확인할 수 있었고, 다양한 컨트럴 모드에서 영구자석형 모터에 추가적으로 자속 제어능력이 부가적으로 실현 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.

3. 결 론

제시된 모델의 분석을 위한 자석 및 자성재료의 비선형, 히스테리시스 현상과 자화의 평가를 위해 적합한 자화특성 해석방법이 제안되었다. 8극과 6극의 고정자 MMF에 따른 극 변환 메모리 모터의 자화방향과 자화량은 제안된 방법으로 분석되었다.

컴퓨터 모델링과 시뮬레이션 결과 동작특성은 제안된 유한요소법과 프라이자흐 모델링 해석방법이 본 모델 해석방법으로서 적합함을 보여준다.

[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," IEEETrans. On Industry Applcation, Vol38, No.6, pp.1493-1499Dec, 2002
- [3] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST
- [4] 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