

프라이자흐 모델과 유한요소법을 이용한 가변자속형 메모리 모터의 제자화, 감자 특성 해석

김기복, 권선범, 이종호
한밭대학교 전기공학과

Re-Demagnetization Operation Characteristics Analysis of a Variable Flux Memory Motor Using Coupled Preisach Modeling and FEM

Gi-Bok Kim, Sun-Bum Kwon, Jung-Ho Lee
Dept. of Electrical Eng., Hanbat National University

Abstract - This paper deals with the PM performance evaluations in a variable flux memory motor (VFMM) using a coupled 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 operation characteristics evaluation relative to magnetizing direction and quantity of permanent magnets on re-, demagnetization condition in a variable flux memory motor(VFMM)

1. 서 론

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

일반적으로 고효율 기기는 공극 자속 밀도의 발생에 따른 자속 집중 원리를 이용한다.

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

두 기기 모두 PM의 자화는 약제자 영역에서 일반적 PM 기기에서와 같은 감자 전류가 필요없이 오직 짧은 펄스 전류에 의해 간단히 변화시킬 수 있다.

가변 자속 메모리 모터의 특징은 회전자 마그넷에 의해 만들어진 공극 자속이 고정자 전류의 주기 동안의 비율안에서 지속적으로 변화 될수 있는 것과 제자화 전류는 정격치보다 작다는 것이다.

부하전류 i_a 는 마그넷을 감자시키지 않는다.

제자화, 감자의 효과는 VFMM의 성능평가에 중요 요소이다.

참고문헌 [1],[2]는 기하학적인 해석 방법과 메모리모터의 자기등가 회로를 사용한 공극자속 밀도등의 마그넷 특성을 분석한 메모리 모터의 유일한 연구이다.

유한요소법은 메모리모터와 같이 복잡한 내부구조를 모델링하고, 고정밀도의 자화특성을 모델링하는데 적합하다.

PM 자화의 특성에 대한 정확한 예측을 할 수 있는 프라이자흐 모델이 비선형 루틴에 포함된다.

본 논문은 유한요소법과 프라이자흐 모델이 결합된 해석 기법을 이용하여 가변자속 메모리 모터를 대상으로 연속적인 재-감자시 특성분석을 수행하였으며, 제안된 기법이 우수함을 확인하였다.

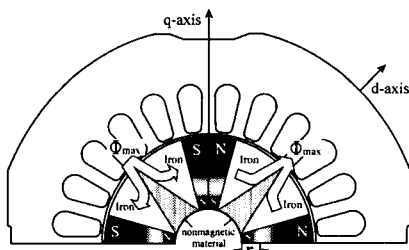


그림 1 부분 자화된 VFMM의 횡단면

2. VFMM의 동작 원리 및 해석해

2.1 VFMM의 원리와 분석 방법

2.1.1 VFMM의 동작 원리

4극 가변자속메모리모터의 횡단면을 그림1에 나타냈다.

접선방향으로 자화된 N극과 S극의 PM은 자속 ϕ_{max} 을 공극을 통해 고정자 쪽으로 보낸다.

회전자는 soft iron과 비자성체, PM으로 샌드위치 구조를 가지며 축에 기계적으로 고정되어 있다.

반대방향으로 고정자 전류의 i_d 펄스가 인가된 후, 회전자 마그넷은 부분적으로 감자된다.

각 회전자 마그넷 내부에 이전과 새로운 자화 방향으로 분리하는 지점이 축으로부터 r_0 의 거리에 만들어 진다.

공극에서의 자속밀도가 영이 되는 r_0 를 제로자속 반경이라 부른다.

2.1.2 VFMM의 해석해

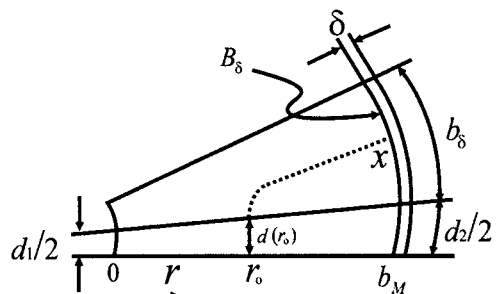


그림 2 가변자속 메모리 모터의 반극의 횡단면

VFMM의 반극 모델을 그림 2에 나타냈다.

여기서 부호는 다음과 같다.

d_1, d_2 : 축과 공극면에서의 PM 폭

b_M : 마그넷 반경

마그넷의 잔류 자속밀도 B_r , 보자력을 H_c , 공극자속 밀도를 B_δ , 그리고 기기 길이를 l 로 표현한다면 마그넷 퍼미언스 미분형 dG_M 과 공극 퍼미언스 미분형 dG_δ 을 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$dG_M = \frac{B_r dr}{H_c d(r)} = \frac{B_r l}{h_c (d_1 + \frac{d_2 - d_1}{b_M} r)} dr, \quad dG_\delta = \frac{\mu_0}{\delta} dx \quad (1)$$

$$d\Phi_r = d\Phi_M = d\Phi_\delta, \quad d\Phi_\delta = B_\delta l dx, \quad d\Phi_r = B_r l dr$$

$$d\Phi_\delta = \frac{d\Phi_r}{1 + \frac{dG_M}{dG_\delta}} \quad (2)$$

윗 식으로부터 다음과 같은 미분 방정식이 도출된다.

$$\frac{dx}{dr} = \frac{B_r}{B_\delta} - \frac{\delta}{d_1 + \frac{d_2 - d_1}{b_M} r} \cdot \frac{B_r}{\mu_0 H_c} \quad (3)$$

반경 방향 좌표 r과 등포텐셜인 원주방향 좌표 x에 대한 해는

$$x = \frac{B_r}{B_\delta} r - \frac{\delta B_r}{\mu_0 H_c} \cdot \frac{b_M}{d_2 - d_1} \ln \left(\frac{d_2 - d_1}{d_1 b_M} r + 1 \right) \quad (4)$$

이방정식에서 x와 r은 공극(x)과 마그넷(r)을 통해 흐르는 자속선 좌표로 정의한다.

그러므로, 이방정식은 회전자극에서의 등포텐션 contour을 묘사하며, 자속 contour 방정식이라고 불린다.

이 자속 contour 방정식은 VFMM의 2개의 중요한 파라미터를 정의하는데 사용된다.

최대 공극자속밀도 B_δ 는 $x = b_\delta$, $r = b_M$ 으로 대치함으로써 윗방정식으로부터 구할 수 있다.

원주길이 b_δ 는 반극 간격 τ_p 빼기 마그넷폭 d_2 이므로, 공극자속밀도 B_δ 는 다음과 같이 표현된다.

$$B_\delta = \frac{B_r}{\frac{B_r}{\mu_0 H_c} \cdot \frac{\delta/\tau}{d_2 - d_1/\tau_p}} \ln \frac{d_2}{d_1/\tau_p} + \frac{\pi}{\rho c} \left(\frac{1}{2} - d_2 \right) \quad (5)$$

c는 회전자의 반경과 마그넷의 반경방향 길이의 비이다.

$$d_2' = d_2/\tau_p$$

2.2 FEM과 프라이자흐 모델의 적용

2.2.1. VFMM의 지배방정식

맥스웰의 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 \quad (6)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (7)$$

$$\vec{B} = \frac{1}{v_0} \vec{H} + \vec{M}, \quad \vec{B} = \frac{1}{v_0} \vec{H} + \vec{M}_{PM} \quad (8)$$

여기서, \vec{M} , \vec{M}_{PM} 은 프라이자흐 모델에 의해 계산된 자계 강도 \vec{H} 에 대한 자성체와 마그넷의 자화량이다.

자기 벡터 포텐셜 \vec{A} 와 등가 자화 전류 \vec{J}_M , \vec{J}_{PM} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (9)$$

$$\vec{J}_M = v_0 (\nabla \times \vec{M}), \quad \vec{J}_{PM} = v_0 (\nabla \times \vec{M}_{PM}) \quad (10)$$

(6)-(10)으로부터 지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$v_0 (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \vec{J}_M + \vec{J}_{PM} \quad (11)$$

2.2.2. 시스템 행렬

시스템 행렬은 다음과 같다.

$$[K^{(e)}] \{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}\} + \{M_{PM}^{(e)}\} = 0 \quad (12)$$

$$K_{ij}^{(e)} = \frac{v_0^{(e)}}{4\Delta^{(e)}} (C_{ie} C_{je} + d_{ie} d_{je}), \quad F_i^{(e)} = -\Delta^{(e)} \frac{N_i}{3S}$$

$$M_i^{(e)} = v_0^{(e)} (M_X^{(e)} d_{ie} + M_Y^{(e)} C_{ie})$$

$$M_{PMi}^{(e)} = v_0^{(e)} (M_{PMX}^{(e)} d_{ie} + M_{PMY}^{(e)} C_{ie})$$

전모델에 대한 시스템 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$[K] \{A\} + \{F\} + \{M\} + \{M_{PM}\} = 0 \quad (13)$$

2.2.3. 프라이자흐 모델의 적용

프라이자흐 모델은 M-H관계를 사용하여 모든 히스테리시스 현상에 있어 인가자계와 자화량 사이에는 위상차

가 있기 때문에 벡터적 해석을 필요로 한다.

그러나 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 x축 y축에 대해서 교번자계로 가정할 수 있으며 회전자의 B와 H는 상수이며 x축과 y축에 대해서 또한 교번자계이다.

인가자계와 자화 사이의 각은 x, y축에 위에서는 0 혹은 π 이다.

따라서 회전기기에 대한 프라이자흐 모델은 식(7)에서 볼 수 있는 바와 같이 스칼라 모델로서 표현 되어질 수 있다.

$$M(t) = \iint_{\alpha, \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (14)$$

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

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

$$E(\alpha, \beta) = \iint_{\alpha, \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (15)$$

2.2.4. 계산 알고리즘

스텝 1에서 반대방향으로 고정자 전류 i_d 의 펄스가 가해진 후, 제안된 해석기법을 통해 해의 수렴을 수행한다.

두 번째로, 스텝 1에서의 PM의 마지막 자화량을 초기값으로 하고, 전류를 제거한 후, 자화 특성을 분석한다.

펄스 전류의 양에 따른 회전자 마그넷의 부분 감자 특성을 분석할 수 있다.

이때, 각 마그넷 내부에 이전과 새로운 자화 방향으로 분리된 지점이 축으로부터 r_0 인 지점에 장벽으로서 나타난다.

여기서, 페라이트 마그넷의 리코일(recoil) 투자율은 1.05이다.

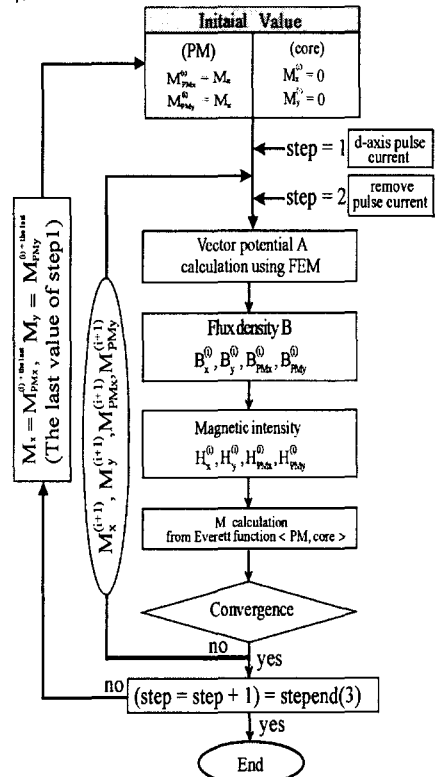


그림 3. 프라이자흐 모델을 사용한 FEM의 흐름도

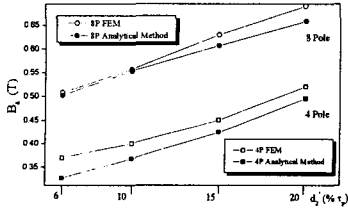


그림 4. 극수에 의한 d_2/τ_p 함수에 따른 B_δ 특성

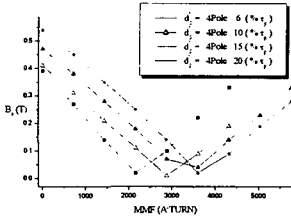


그림 5. 4극 MMF에서 d_2/τ_p 의 함수에 따른 B_δ 특성

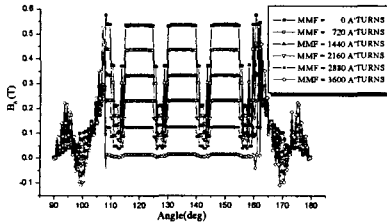


그림 6. 마그넷두께 20% (τ_p)에서 감자MMF가 주어지는 동안의 4극 기기에서 자속 밀도 분포

3. 해석 결과 및 분석 (Result & discussion)

그림 4는 펄스 전류가 없는 상태에서, 극쌍수와 상대 마그넷 두께 d_2/τ_p 를 기초로 하여, 식(5) 및 유한요소해석으로부터 계산된 공극 자속 밀도 B_δ 특성을 보여준다.

마그넷 두께가 d_2 로 정해졌을 경우, 극쌍수가 증가하면, 자속 집중 효과의 증가에 기인하여 높은 공극 자속 밀도가 나타남을 알 수 있다.

4, 8극 모델에 대한 유한 요소 해석으로부터 계산된 공극 자속 밀도 B_δ 는 자속 contour 방정식으로부터 계산된 값보다 약 10% 크게 나타난다.

이는 방정식(5)는 리코일(recoil) 투자율을 무시한 결과이다. VFMM의 또 다른 주요 파라미터는 회전자 마그넷에 의해 만들어지는 공극 자속밀도를 영으로 하는데 필요한 감자 기자력이다.

감자 기자력 계산은, 참고문헌 [2]에서와 같이 r_0 계산식과 경험적인 값을 사용해서 구하는 대신에 제안된 수치해석 기법을 사용하여 수행하였다.

그림 5는 4극 모델을 대상으로 마그넷의 두께와 감자 기자력 양에 따른 공극 자속밀도 B_δ 특성을 보여준다. 그림 6은 마그넷 두께 20% (τ_p)의 4극 모델을 대상으로 감자 기자력에 따른 공극 자속밀도 분포 특성을 보여준다.

그림 7은 그림 6의 상황에서 마그넷의 자화 방향과 패턴 그리고 r_0 지점을 나타낸다.

그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이, 감자기자력이 커지면서 r_0 의 위치가 변화됨을 알 수 있으며, net 공극 자속이 제로로 되는 기자력의 크기(이 경우 4320A·turn)를 결정하는데 복잡한 방정식을 사용하는 것보다 편리함을 확인할 수 있다.

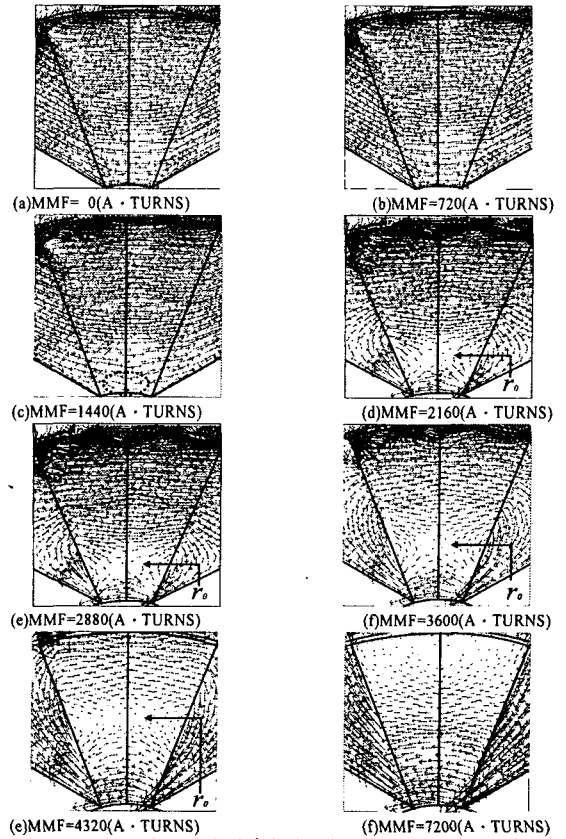


그림 7. 자화 방향과 마그넷의 자속 패턴

4. 결 론

자성체와 마그넷과 같이 비선형, 히스테리시스 현상등을 지닌 기기의 해석에 알맞은 기법이 제안되었다.

제안된 기법을 사용하여 VFMM의 감자 기자력 및 기구구조에 따른 마그넷 내부의 자화 특성을 다양한 방향으로 조사하여, 제안된 기법의 우수성을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1] V. Ostovic, "Pole changing permanent magnet machines," IEEE Trans. on Industry Applications, Vol. 38, No.6, pp.1493-1499 Dec. 2002
- [2] 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.
- [3] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST
- [4] A. Visintin, Differential models of hysteresis, Applied Mathematical Sciences, Springer, 1994.
- [5] 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 1 209-1213, July 2000.
- [6] 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. 120 3-1206, May 1999.
- [7] J. C. Kim, J. H. Lee, I. S. Jung, D. S. Hyun, "Vector Control Scheme of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp. 2522-2525, Sep. 1998.
- [8] 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. 26 29-2632, Sep. 1998.
- [9] D. H. Everett, A general approach hysteresis, Part III, "A formal treatment of the independent domain model of hysteresis", Trans. on Faraday Soc., Vol. 50, pp1077-1096, 1954.