2007년도 대한전기학회 하계학술대회 논문집 2007. 7. 18 - 20

유한요소법과 프라이자흐 모델이 결합된 해석기법을 이용한 이방성 회전자 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성 분석

* 이명기[1], 임황빈[1], 이민명[1], 이중호[1]
[1]대전시 유성구 한밭대학교 전기공학과

Characteristics Analysis of Anisotropy Rotor SynRM Using a Coupled FEM & Preisach Model

* Myoung-Ki Lee[1], Hwang-Bin Lim[1], Min-Myung Lee[1], Jung-Ho Lee[1]
[1] Department of Electrical Engineering, Hanbat National University #16-1, Yuseong-gu, Daejeon, 305-719, KOREA

Abstract - This paper deals with the characteristics analysis of Synchronous Reluctance (SynRM) with anisotropy rotor using a coupled FEM & Preisach model. The focus of this paper is the design relative to the output power on the basis of rotor materials of a SynRM. The coupled Finite Elements Analysis (FEA) & Preisach model have been used to evaluate nonlinear solutions. Comparisons are given with characteristics of normal synchronous reluctance motor and those of anisotropy rotor SynRM (ANISO-SynRM), respectively.

1. 서 론

토크와 역률의 관점에서 SynRM의 효율은 기기의 인덕턴스 L_d와 L_q에 달려있다. $(L_d - L_q)$와 L_d/L_q비율의 큰 차는 기기의 특성향상에 도움이 되므로 SynRM [1]의 회전자 구조를 개선하기위하여 많은 연구가 수행되어왔다.

그러나 rib의 존재는 추가적인 q축 자속을 만들며, 토크 효율을 낮추게 된다. 영구 자석의 적정량을 추가함으로써, SynRM의 토크 밀도와 역률은 매우 증가하게 될 수 있다. 이것을 SynRM(PMASynRM) 이라 불린다. [2]

또 다른 해결책은 이방성 재질로서 사용하는 것이고, 결과적으로 rib의 자속을 제거된다. 이 논문은 유한요소법과 프라이자흐 모델이 결합된 해석기법을 이용한 이방성 회전자를 가진 SynRM의 특성분석을 다루었다.

2. 본 론

2.1 해석 모델

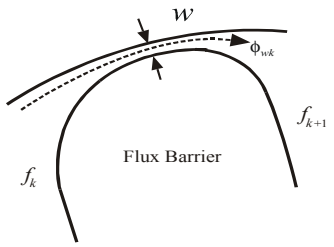
rib에서 흐르는 자속은 (1)에 의해 주어진다. 토크 방정식은 (3)에서와 같이 주어지고, 이러한 경우, 토크 손실은 (2)의 rib자속 때문에 발생한다.

회전자의 적당한 이방성 재질을 사용해서 SynRM((3)의 두 번째 항이 제거된)의 토크 밀도와 역률은 그림 2에서 보이는 것과 같이 매우 증가될 수 있다.

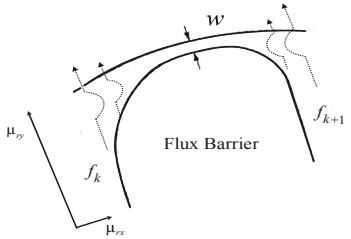
$$\phi_{wk} = B_s wl \tag{1}$$

$$\lambda_r = \frac{4}{\sqrt{3}} wl N B_s \tag{2}$$

$$T = \frac{3}{2}\frac{P}{2}\left(K_{dq}\lambda_{md} i_q - \lambda_r i_d\right) \tag{3}$$



<그림 1> Rib 단면도 및 자속의 통로



<그림 2> 이방성 모델의 Rib 자속 통로

2.2 유한요소법과 프라이자흐 모델이 결합된 해석기법

2.2.1 SynRM의 지배방정식

맥스웰의 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J_0} \tag{4}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{5}$$

$$\vec{B} = \frac{1}{\nu_0}\vec{H} + \vec{M} \tag{6}$$

여기서, $\vec{M}$은 프라이자흐 모델에 의해 계산된 자계세기 $\vec{H}$에 대한 자성체의 마그넷의 자화량이다. 자기 벡터 포텐셜 $\vec{A}$와 등가 자화 전류 $\vec{J_m}$은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{7}$$

$$\vec{J_m} = \nu_0(\nabla \times \vec{M}) \tag{8}$$

식 (4)-(8)로부터 지배방정식을 유도하면 다음과 같다.

$$\nu_0(\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J_0} + \vec{J_m} \tag{9}$$

2.2.2 System Matrix

시스템 행렬은 다음과 같다.

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

여기서,
$$K_{ij}^{(e)} = \frac{\nu_0^{(e)}}{4\Delta^{(e)}}(c_{ie}c_{je} + d_{ie}d_{je})$$
$$F_i^{(e)} = -\Delta^{(e)}\frac{Ni}{3S} \tag{10}$$
$$M_i^{(e)} = \nu_0^{(e)}\left(M_x^{(e)}d_{ie} + M_y^{(e)}c_{ie}\right)$$

$$M_{PMi}^{(e)} = \nu_0^{(e)}\left(M_{PMi}^{(e)}d_{ie} + M_{PMi}^{(e)}c_{ie}\right)$$

따라서, 전 모델에 대한 시스템 행렬은 다음과 같이 표현된다.

$$[K]\{A\} + \{F\} + \{M\} + \{M_{PM}\} = 0 \tag{11}$$

2.2.3 프라이자흐 모델의 적용

프라이자흐 모델은 $M-H$ 관계를 사용하여 모든 히스테리시스 현상에 있어 인가자계와 자화량 사이에는 위상차가 있기 때문에 벡터적 해석을 필요로 하나, 벡터해석은 복잡하며 오차를 피할 수 없다. 그러므로 회전기기의 해석에 대한 새로운 알고리즘 개발이 필요하다. 회전자는 입력자계 각 θ를 따라 동기적으로 회전한다. 따라서 고정자의 영역은 x축과 y축에 대하여 교번자계로 가정 할 수 있으며 회전자의 B와 H는 상수이며 x축과 y축에 대하여 또한 교번자계[3]이다. 따라서 회전기기에 대한 프라이자흐 모델은 scalar model로서 표현되어질 수 있다.

$$\begin{aligned} M(t) &= \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha,\beta)\gamma_{\alpha\beta}(H(t))d\alpha d\beta \\ &= \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha,\beta)d\alpha d\beta - \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha,\beta)d\alpha d\beta \end{aligned} \tag{12}$$

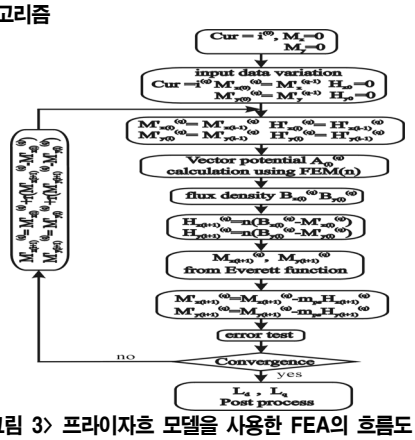
보다 편리한 계산을 위하여 프라이자흐 모델을 Everett Plane으로 대체하여 해석을 수행하였다.

$$E(\alpha,\beta) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha,\beta)\gamma_{\alpha\beta}(H(t))d\alpha d\beta \tag{13}$$

Everett plane에서는, 실험데이터(고정자: S40, 회전자: G9, 0.3mm)에서 얻은 M의 분포는 가우스분포 [4]-[6]를 따른다. 본 논문에서, Everett plane은 3개의 고정자(고정자의 한 개(S40, 등방성))와 회전자(G9: x-방향, y-방

향, 이방성)이다. 실험데이터에서 사용한 투자율 비율은 각각 10:100:1(S40:G9(y방향):G9(x방향))이다.

2.2.4 계산 알고리즘



〈그림 3〉 프라이자흐 모델을 사용한 FEA의 흐름도

그림 3은 제안한 해석기법의 흐름도를 보여준다. 여기서 자계 H는 다음과 같다.

$$H = \nu_0(B - M) \tag{14}$$

이 때 H, B, M의 참값을 H^*, B^*, M^*라하고 M, H의 오차를 $\Delta e_m, \Delta e_h$라 하면, H는 다음과 같다.

$$\begin{aligned} H &= H^* + \Delta e_h = \nu_0\left(B^* - M^* - \Delta e_m\right) \\ |\Delta e_h| &= \nu_0 |\Delta e_m| \end{aligned} \tag{15}$$

결국 자화의 오차$|\Delta e_h|$는 자화의 오차에 ν_0를 곱한 값이 되어 수렴이 불안정하다. 따라서 Pseudo permeability가 사용되었다.

$$\begin{aligned} &B = \mu_0 H + M = \mu_0(1 + \mu_{ps}/\mu)H + M' \\ &\text{여기서, } M' = M - \mu_{ps} H,\ \mu_{ps}\text{: Pseudo permeability} \end{aligned} \tag{16}$$

본 논문에서, Pseudo permeability는 투자율의 차에 의한 각각 고정자(S40, 등방성)와 회전자(G9: x-방향, y-방향(이방성))이다.

$$\begin{aligned} H &= \nu(B - M') \\ \nu &= \frac{1}{\mu_0}(1 + \mu_{ps}/\mu) \\ |\Delta e_h| &= \nu |\Delta e_m{}'| \end{aligned} \tag{17}$$

그러므로 $|\Delta e_h|$의 수렴은 안정화 되고 system 방정식(8)에 있는 ν_0, M은 ν, M'으로 대치된다. 단순반복법은 빠른 수렴을 위해 반복 루프에 적용되었고, 자화 M은 다음과 같이 표현된다.

$$M_{i+1}^{(\theta)} = M_i^{(\theta)} + r\left(M_{i+1}^{(\theta)} + M_i^{(\theta)}\right) \tag{18}$$

여기서 r은 완화인자이며, 본 연구에서는 0.5가 사용되었다.

x-축과 y-축 벡터성분으로 구성되는 자속밀도와 자계는 FEM에서 계산된다. 각 자화의 벡터성분은 Everett 밀도분포를 가진 x-축과 y-축 자계에서 독립적으로 계산된다.

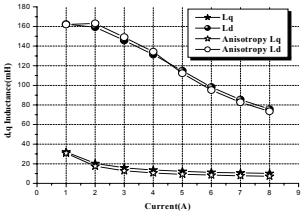
2.3 해석 결과 및 분석

그림 4는 회전자의 d-축에 있는 포화효과가 q축의 포화효과와는 아주 다르다는 것을 보여준다. 일반 SynRM과 부분의 회전자를 가지고 있는 ANISO-SynRM의 포화는 회전자 rib과 고정자 치에서 두드러지게 나타난다. 이 포화는 일반 SynRM과 ANISO-SynRM의 높은 토크 밀도, 역률, 효율에서 효과를 가지는 L_d인덕턴스를 감소시킬 수 있다. 토크 밀도와 역률은 이방성 회전자 구조에 의해 향상될 수 있다. L_d가 높은 입력 전류에서 포화에 의해 감소하고 정격 전류 범위 (2A)에서 증가하더라도, L_q는 ANISO-SynRM에서 이방성 회전자 구조에 의하여 감소한다. 이 변화로 인덕턴스 비와 차이는 역률과 토크 밀도의 증가를 수반하여 증가하는 것을 보여준다.

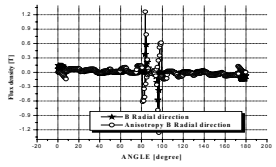
그림 5와 그림 6은 각각 SynRM과 ANISO-SynRM의 접선 방향과 반지름 방향의 rib 자속밀도분포를 보여준다.

반지름 방향 자속밀도가 각 기계의 0도에서 80도까지 그리고 100도에서 180도까지 유사하지만 ANISO-SynRM의 반지름 방향 자속밀도는 이방성 구조 때문에 80도에서 100도에서 SynRM의 자속밀도보다도 약간 높은 것을 볼 수 있다.

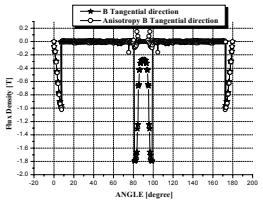
그리고 접선 방향 자속밀도가 각 기계의 0도에서 80도까지 그리고 100도에서 180도까지 유사하지만 ANISO-SynRM의 접선 방향 자속밀도는 이방성 구조 때문에 80도에서 100도에서 SynRM의 자속밀도보다도 매우 낮은 것을 볼 수 있다. 그림 5와 그림 6은 q축 rib 자속이 그림 7과 그림 8에 보이는 것과 같이 몇몇 위치(0도에서 5도와 175도에서 180도를 제외하고, 모든 rib이 아닌)에서 완벽하게 사라졌다고 가정한 이방성 회전자 구조의 효과를 보여준다. 24슬롯과 2극을 가진 일반적인 고정자에서 q축 여자, 일반 SynRM과 ANISO-SynRM을 위한 자속분포는 그림 7과 그림 8에 보여진다. 회전자 rib 접선 자속은 일반 SynRM에서 나타나지만, ANISO-SynRM에서 공간 이방성이 그림 5와 그림 6의 결과로서 만들어지기 때문에, 회전자 rib 접선 자속은 거의 0이다.



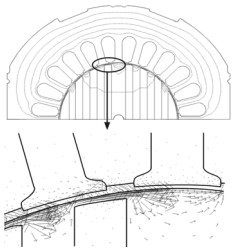
〈그림 4〉 일반 SynRM 과 ANISO-SynRM의 d축과 q축 인덕턴스



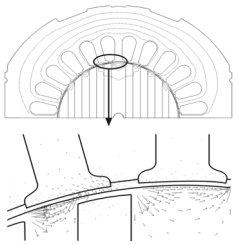
〈그림 5〉 일반 SynRM과 ANISO-SynRM의 반지름방향 Rib 자속밀도분포



〈그림 6〉 일반 SynRM과 ANISO-SynRM의 접선방향 Rib 자속밀도분포



〈그림 7〉 SynRM의 q축 도면



〈그림 8〉 ANISO-SynRM의 q축 도면

3. 결 론

본 논문은 유한요소법과 프라이자흐 모델이 결합된 해석기법을 이용한 이방성 회전자 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성 분석을 다루었다.

ANISO-SynRM은 $L_d - L_q$와 L_d/L_q을 향상 시키며 증가된 $L_d - L_q$와 L_d/L_q는 토크 밀도와 역률을 향상시키는데 도움을 줄 수 있으리라 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] S. B. Kwon, S. J. Park, J. H. Lee, "Optimum Design Criteria Based on the Rated Watt of a Synchronous Reluctance Motor Using a Coupled FEM and SUMT", *IEEE Transactions on Magnetics,* Vol.41, No.10, pp 3970~3972, Oct. 2005.

[2] 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.

[3] 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.

[4] D. H. Everett : A general approach to hysteresis, Part III., "A formal treatment of the independent domain model of hysteresis", *Trans. on Faraday Soc.,* Vol 50 pp 1077-1096, 1954.

[5] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST

[6] A. Visintin, Differential models of hysteresis, Applied Methematical Sciences, Springer, 1994.