

프라이자흐 모델이 결합된 유한요소법을 이용한 슬롯수 관련 손실, 효율 평가 수행에 따른 집중권선 동기형 릴럭턴스전동기의 고정자 설계

박성준, 이미정, 이중호
한밭대 전기공학과

A Novel Stator Design of Synchronous Reluctance Motor by Loss & Efficiency Evaluations Related to Slot Numbers using Coupled Preisach Model & FEM

Seong-June Park*, Mi-Jeong Lee, Jung-Ho Lee
Dept. of Electrical Eng., Hanbat National University

Abstract - This paper deals with the stator design solution of a synchronous reluctance motor (SynRM) with various slot number by loss & torque evaluations related to the slot open, teeth width using coupled Preisach modeling & FEM.

The coupled Finite Elements Analysis (FEA) & Preisach model have been used to evaluate the nonlinear solution.

Comparisons are given with characteristics of a SynRM according to the stator winding, slot number, slot open, teeth width variation, respectively

$$\text{여기서, } K_y^{(e)} = \frac{V_0^{(e)}}{4\Delta^{(e)}}(c_{ic}c_{je} + d_{ie}d_{je}), F_i^{(e)} = -\Delta^{(e)} \frac{Ni}{3S}$$

$$M_i^{(e)} = V_0^{(e)}(M_x^{(e)}d_{ie} + M_y^{(e)}c_{ie})$$

전체 모델의 시스템 행렬은 식(4)와 같은 행렬로서 표현된다.

$$[K]\{A\} + \{F\} + \{M\} = 0 \tag{4}$$

1. 서 론

일반적으로 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 구조가 간단하고 견고하며 회전자에서 발생하는 손실이 거의 없기 때문에 성능이 우수하다. 회전자는 권선이 없는 간단한 구조로서 동기 속도로 회전하기 때문에 제어기는 다른 교류기 형태로 구성이 간단하다. SynRM 회전자 설계에 관한 많은 연구가 활발히 이루어지고 있다.[1]-[7]

동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)의 고정자 권선이 종래의 분포형이 아니라, 슬롯수 감소 및 집중권선형으로 했을 때는 공장 제조시 권선 작업이 단순해지며 동손이 저감되고 저가의 전동기를 확보할 수 있는 장점이 있다. 집중권선형 및 슬롯수 감소에 따라 나타나는 SynRM의 단점인 토크리플, 낮은 인덕턴스 비와 차, 효율 및 역률 등의 단점을 고려하지 않는다면 좋은 특성을 얻기는 힘들 것이다.

본 논문은 서로 다른 슬롯수의 SynRM을 대상으로 프라이자흐 모델이 결합된 유한 요소법을 이용하여 슬롯상태, 치 너비와 관련된 손실, 효율 평가를 수행하고, 설계해를 구하는 것이다.[8]-[9]

또한 고정자 슬롯수 및 슬롯 상태, 치 너비를 바탕으로 SynRM의 생산단가 문제와 성능을 개선하는 데 있다. 일반 분포권선형 SynRM(24, 12슬롯 모델)의 특징과 함께 각 고정자 치 너비의 변화에 따른 집중권선형 SynRM(6슬롯 모델)의 특성을 비교하였다. 이러한 구조적 변화 방법에 의하여 돌극비는 증가하고 결과적으로 기존 분포권선형 SynRM (24슬롯 모델)의 특성 이상을 얻을 수 있었다.

2. FEM과 프라이자흐 모델링의 결합

2.1 SynRM의 지배방정식

2차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} v_0 \left(\frac{\partial A_x}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v_0 \left(\frac{\partial A_x}{\partial y} \right) = -J_z - J_m \tag{1}$$

$$J_m = v_0 \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \tag{2}$$

2.2 정상 상태 시스템 행렬

요소 시스템 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K^{(e)}]\{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}\} = 0 \tag{3}$$

2.3 동특성해석시의 지배방정식 유도 및 정식화

회로방정식은 다음과 같다.

$$[V] = [R]\{I\} + [L_0] \frac{d}{dt} \{I\} + \{E\} \tag{5}$$

여기서, (1)을 풀기 위해, Galerkin법을 사용하고 해의 시간적인 변화를 고려하기 위해 시간에 대해 이산화 한 후, 각 시각에 대한 해를 구하는 시간차분법을 이용했다. 따라서 (1), (2)와 (5)를 결합한 지배방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_0[S] & -[N] \\ [0] & [R] \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} = \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix} \tag{6}$$

$$\frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}_{t-\Delta t} + \begin{Bmatrix} \{M\} \\ \{V\} \end{Bmatrix}_t$$

여기서, [LG]은 역기전력과 관련된 계수 행렬이고 [M]은 프라이자흐 모델에 의해 계산된 자화량이다.

2.4 해석 모델 및 프라이자흐 모델의 응용

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

$$M(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \tag{7}$$

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

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

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

3. 설계 방법

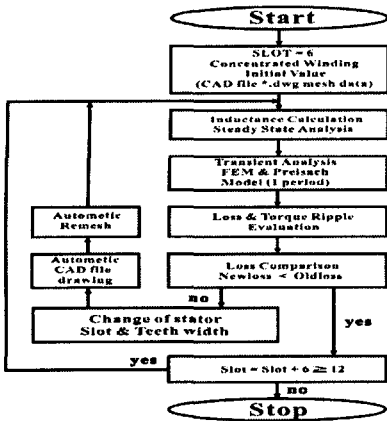


그림.1 SynRM 설계 순서도

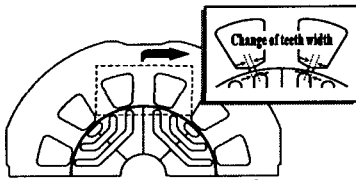


그림.2 치 구조의 변화

현재 SynRM의 회전자 자속 장벽에 대한 최적설계와 회전자 스큐등을 통한 특성 향상 연구등이 진행 중이다. 분포권선형 SynRM(24슬롯 모델)의 기본 전동기를 시작으로 슬롯 수 변화와 권선 법 변화에 따른 설계 방법을 그림.2에 나타내었다.

본 논문에서 SynRM의 슬롯수는 24,12슬롯 모델(분포권선형: 36턴/슬롯, 72턴/슬롯)이고 6슬롯 모델(집중권선형: 144턴/슬롯)을 고려했다. 슬롯 오픈 상태(SO)의 변화는 6,12슬롯 모델 기기에서 나타나는 토크 리플과 관계가 있다.

고정자 슬롯과 치의 형태는 열린 슬롯에서 닫힌 슬롯까지의 상태에 따라 그림.2에서 보는 것처럼 대칭적으로 그려진다. 그리고 새로운 CAD파일은 그림.1에서 보는 바와 같이 자동적으로 프로그램을 통하여 재 생성된다.

다음으로 자동 요소 분할이 이루어진다. 이러한 방법을 통하여 빠른 전 처리(pre-processor)작업을 수행한다. 현재 값과 이전 값을 비교하여 인덕턴스, 손실과 토크리플 평가를 수행한다.

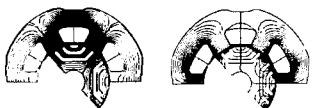
4. 해석결과 및 분석



(a) 24슬롯의 d, q축 자속흐름도(SO 2.3mm)



(b) 12슬롯의 d, q축 자속흐름도(SO 1.8mm)



(c) 6슬롯의 d, q축 자속흐름도(SO 4.24mm)

그림.3 각 구조의 d, q축 자속분포도

그림.3은 각 SynRM 설계 해의 d, q축 자속흐름을 보여준다. 그림.4, 5는 6슬롯 모델과 24슬롯 모델의 d, q축 인덕턴스, 차와 비의 특성 비교를 보여준다.

슬롯 오픈이 더 감소하면 d, q축 인덕턴스는 동시에 증가되므로 인덕턴스 차는 슬롯 오픈이 감소함에 따라 전류값 4A이하에서 d, q축 인덕턴스의 양상과 같이 증가하지만 인덕턴스 비는 각 슬롯 오픈의 경우에 있어서 거의 비슷한 양상을 보인다.

그림.6, 7은 각 12슬롯 모델과 24슬롯 모델의 슬롯 오픈에 따른 d, q축 인덕턴스, 차와 비를 보여준다. 인덕턴스 차와 비는 슬롯오픈의 감소에 따라 전류값 4A이하에서 d, q축 인덕턴스의 양상과 같이 증가한다.

그리고 이것은 24슬롯 모델보다 더 크다. 24슬롯 모델의 인덕턴스 차와 비의 특성은 그림.4, 5에서 보여준 것처럼 4A이하에서는 6,12슬롯 모델보다 작고 4A이상에서는 6,12슬롯 모델에서 더 큰 포화로 인해 인덕턴스의 감소로 더 크게 나타난다.

그림.8, 9는 $i_d=2(A)$, $i_q=2.5(A)$ 인가 시 슬롯 오픈에 따른 6,12슬롯 모델의 토크 특성을 보여준다.

그림.8, 9에서 보여준 것처럼 6슬롯 모델의 최대 토크 평균값은 0.28[Nm](SO 4.24mm)에서 나타나고 12슬롯 모델은 0.39[Nm](SO 1.8mm)로 나타난다.

그리고 두 기기의 토크밀도 크기는 그림.10에서 보여주는 것처럼 24슬롯 모델보다 크다. 12슬롯 모델의 토크 리플은 6슬롯 모델보다 작다.

그러나 12슬롯모델은 더 많은 고조파성분은 갖는다. 6,12슬롯모델에서 24슬롯모델보다 더 큰 토크리플을 보여주는 원인은 구조에 따른 큰 인덕턴스 변화이다.

그림.11의 각 해석 모델에 대한 동특성 유한요소 해석(FEA)에서의 히스테리시스 손실의 응답을 보여주며, 이때 $i_d=2(A)$, $i_q=2.5(A)$, $load=6kg-cm$, $주파수=66.7(Hz)$ 이다.

6슬롯 모델에서 히스테리시스 손실의 값은 75.4W로 나타내고 12슬롯 모델은 가장 낮은 히스테리시스 손실 값인 17.3W로 나타낸다. 이 값은 24슬롯 모델의 18.7W보다 적지만 유사한 값이다.

일반적으로 6슬롯모델은 넓은 철의 면적에 기인하는 큰 히스테리시스 손실의 특성을 보인다.

12슬롯 모델에서 토크 밀도의 증가를 고려하면 더 많은 토크 리플(23%)에 불구하고 12슬롯 모델(특히 SO 1.8mm)이 종래의 24슬롯 모델보다 더 좋은 특성을 보일 수 있다.

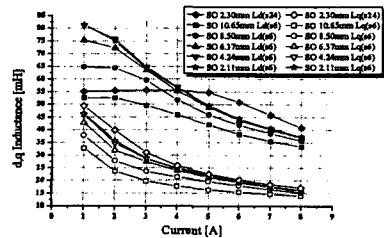


그림.4 전류에 따른 6슬롯 모델의 d, q축 인덕턴스

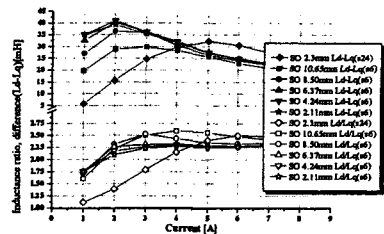


그림.5 전류에 따른 6슬롯 모델의 d, q축 인덕턴스 차와 비

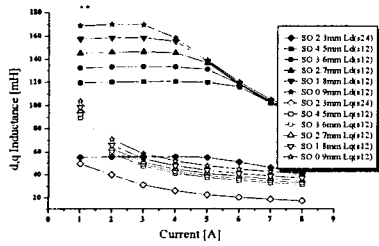


그림.6 전류에 따른 12슬롯 모델의 d, q축 인덕턴스

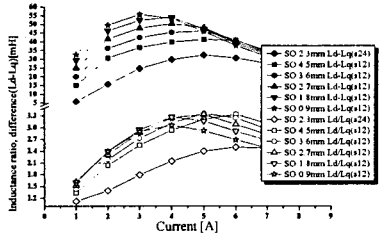


그림.7 전류에 따른 12슬롯 모델의 d, q축 인덕턴스 차와 비

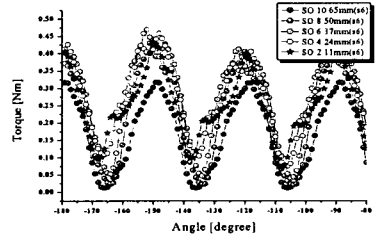


그림.8 6슬롯 모델의 토크 특성

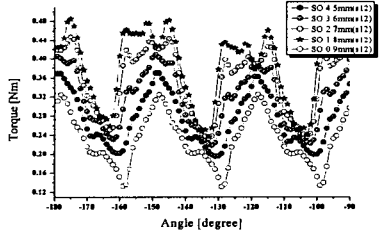


그림.9 12슬롯 모델의 토크 특성

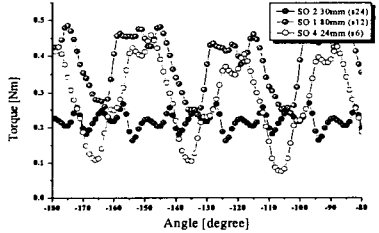
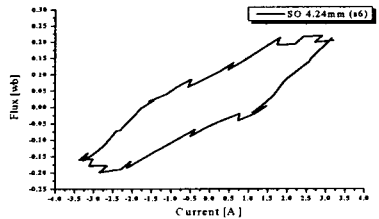
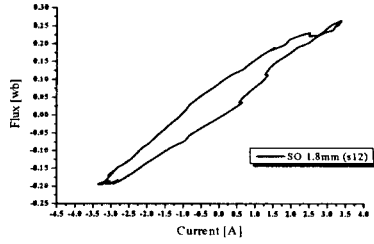


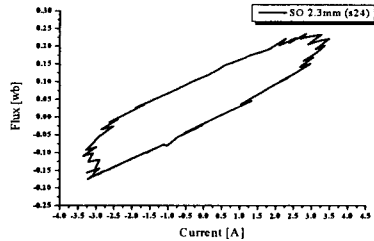
그림.10 각각 다른 모델의 설계해석에 관한 토크특성



(a) 6슬롯 모델 (히스테리시스 손실: 75.4W)



(b) 12슬롯 모델 (히스테리시스 손실: 17.3W)



(c) 24슬롯 모델 (히스테리시스 손실: 18.7W)

그림.11 각 모델에 대한 히스테리시스 손실

5. 결론

많은 연구들이 고정자를 제외한 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)의 회전자 설계 분야에서만 실행되어져 왔다. 본 논문에서는 일반 분포권선형 SynRM(12, 24슬롯모델)의 특징과 함께 각 고정자 치 너비의 변화에 따른 집중권선형 SynRM(6슬롯 모델)을 비교하였다.

해석 결과를 비교해보면 12슬롯 모델은 히스테리시스 손실이 기존 24슬롯 모델과 비슷한 수준이고, 고효율 확보 및 동손이 감소하여 공장 제조 시 권선 작업이 보다 단순해지면서 제조단가가 저감되므로 높은 산업 경쟁력을 얻을 수 있을 것으로 사료된다.

[참고 문헌]

- [1] 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 1209-1212, July 2000.
- [2] J. H. Lee, S. C. Ahn, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of LIM Using Coupled FEM & Control algorithm", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 36, No. 7, pp 1876-1879, July 2000.
- [3] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Hysteresis Modelling of Synchronous Reluctance Motor Considering PWM input Voltage", *Journal of Physica B*, Vol. 275, pp 238-247, Jan. 2000.
- [4] 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.
- [5] 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 Transaction on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 1199-1202, May 1999.
- [6] 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.
- [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] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST
- [9] I. D. Mayeroyz, "Mathematical Models of Hysteresis," *IEEE Trans. In Magnetics*, Vol. MAG-22, No.5, pp.603-608 Sep. 1986.
- [10] 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, pp. 1077-1096