

프라이자흐 모델이 결합된 유한요소법을 이용한 슬롯수, 권선법에 따른 동기형 릴럭턴스전동기의 특성해석

변찬근\*, 장영진, 이미정, 이준호  
한밭대 전기공학과

Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Related to Slot Numbers and winding using Coupled Preisach Model & FEM

Chan-Geun Byun, Young-Jin Jang, Mi-Jung Lee, Jung-Ho Lee  
Dept. of Electrical Eng., Hanbat National University

**Abstract-** This paper deals with the characteristic Analysis of synchronous reluctance motors (SynRMs) using coupled Preisach modeling & FEM. The focus of this paper is the characteristic Analysis relative to Inductances and losses on the basis of stator slot number, winding in SynRMs. The coupled Finite Elements Analysis (FEA) & Preisach model has been used to evaluate the nonlinear solution.

Comparisons are given with characteristics of normal distributed winding SynRM and those according to stator slot number, winding in concentrated winding SynRM, respectively.

해지며, 동손이 저감되고 저가의 전동기를 확보할 수 있는 장점이 있다. 그러나 단점으로는 소음과 진동이 증가하며, 토크리플 또한 상승하고, 저효율을 가져올 수 있다.

본 논문은 같은 회전자 구조를 가진 24슬롯, 12슬롯 분포형 권선구조 SynRM 과 6슬롯의 집중권선형 SynRM을 해석대상으로 프라이자흐 모델링이 결합된 유한요소법을 이용하여 인덕턴스 분석과 히스테리시스 손실특성분석을 수행하고, 종합적인 SynRM설계 방향을 마련하고자한다.

1. 서 론

2. 해석모델

가전용 및 산업용 전동기의 대부분은 유도 전동기이지만, 특정 응용 분야에서는 이를 대체할 새로운 전동기의 필요성이 증대되고 있다. 특히, 최근에 인버터가 저가화 되면서 가변속 전동기의 적용이 가능하게 되어 가변속 전동기에 대한 연구에 한층 박차를 가하게 되었다.

이중 한 방향으로 영구자석이 없으며, 소음면에서도 스위치드 릴럭턴스 전동기(SRM)보다 유리한 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)가 각광을 받고 연구되고 있다. SynRM의 회전자는 권선이 없는 간단한 구조이므로 고장이 적어 신뢰도가 높아서 장시간 운전이 필요한 곳에 적합하며 유지 보수가 용이하다. 또한 영구자석형 전동기와는 달리 고 강도, 저 비용의 재질을 사용한 회전자 제작이 가능하며, 유도전동기에 비해 회전자에 발생되는 손실이 적어 기동과 정지가 빈번한 경우에 유리하므로 최근 국내외적으로 개발이 활발하다[1]-[7].

동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous reluctance motor; SynRM)의 토크와 역률 특성은 전동기의 d-q축 인덕턴스인  $L_d$ ,  $L_q$ 의 영향을 받는다. 두 축의 인덕턴스 차이인  $L_d - L_q$ 와 인덕턴스 비인 돌극비  $L_d/L_q$ 가 클수록 전동기의 특성은 향상된다. 따라서, 돌극비를 충분히 확보하지 못할 경우, 전동기의 토크, 역률 및 효율은 동급 유도전동기에 비해 그 특성이 떨어진다.

종래에는 주로 SynRM의 회전자 설계를 통한 성능 향상을 위하여 상당한 노력이 이루어졌다 [8].

그러나 고정자 구조설계에 관한 연구는 이루어지지 않고 있으며, 이에 대한 분석이 필요하다 사료된다.

고정자 권선 구조가 분포형일 때가 일반적인 SynRM의 구조이며, 이때 정현적인 자속분포를 가지고 센서리스알고리즘 도출이 용이하며, 고성능, 저소음, 저진동 특성이 장점이지만 공장제조시 권선작업이 어려운 단점이 있다. 고정자구조를 집중권선형으로 했을때는 권선작업이 단순

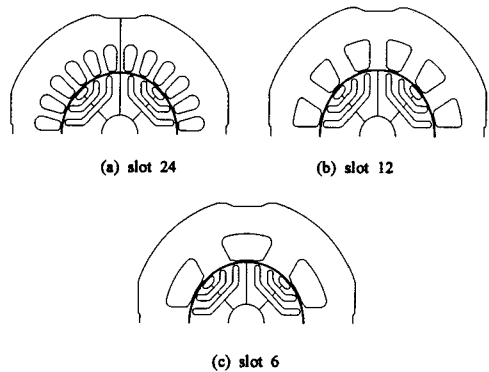


그림 1. 해석모델

표 2.1 기본 모델의 사양

Table 2.1 Specification of the analysis model

단편형 동기 릴럭턴스 전동기	
상수	3
극수	4
출력 [W]	340 [W]
속도 [rpm]	3600[rpm]
1차 저항 [ $\Omega$ ]	0.784 [ $\Omega$ ]
권선	144턴/상, 분포권, 집중권(6슬롯)
슬롯	6개, 12개, 24개
회전자 적층 길이[mm]	77 [mm]
공극 [mm]	0.4 [mm]

### 3. FEM과 프라이자흐 모델링의 결합

#### 3.1. SynRM의 지배방정식

맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 \quad (1)$$

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

$$\vec{B} = \frac{1}{\nu_0} \vec{H} + \vec{M} \quad (3)$$

여기서,  $\vec{M}$  은 자계장도  $\vec{H}$ 에 대한 자성체의 자화의 세기이며,  $M$ 은 프라이자흐 모델로부터 구해진다. 자기벡터포텐셜  $\vec{A}$ 와 등가자화전류  $\vec{J}_m$ 은 다음과 같이 표현된다.

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

$$\vec{J}_m = \nu_0 (\nabla \times \vec{M}) \quad (5)$$

식 (1)-(5)로부터 지배방정식은 식 (6)과 같이 된다.

$$\nu_0 (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \quad (6)$$

#### 3.2. System matrix

시스템 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K^{(e)}] \{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}\} = 0 \quad (7)$$

여기서,

$$K_{ij}^{(e)} = \frac{\nu_0}{4\Delta^{(e)}} (c_{ie} c_{je} + d_{ie} d_{je})$$

$$F_i^{(e)} = -\Delta^{(e)} \frac{N_i}{3S}$$

$$M_i^{(e)} = \nu_0^{(e)} (M_x^{(e)} d_{ie} + M_y^{(e)} c_{ie})$$

이다. 따라서, 전체 모델은 식 (8)와 같은 행렬로서 표현된다.

$$[K] \{A\} + \{F\} + \{M\} = 0 \quad (8)$$

#### 3.3 해석결과 및 검토

본 논문에서는 정특성 해석을 위하여 전류원 해석을 시행하였으며, 전류 입력는 다음과 같다.

$$i_d^e = x[A] \quad i_q^e = 0[A] \quad (9)$$

$$i_d^s = i_d^e \cdot \cos(\theta + \tau) + i_q^e \cdot \sin(\theta + \tau) \quad (10)$$

$$i_q^s = -i_d^e \cdot \sin(\theta + \tau) + i_q^e \cdot \cos(\theta + \tau)$$

$$i_a^s = i_d^s$$

$$i_b^s = -i_d^s/2 - \sqrt{3}/2 \cdot i_q^s \quad (11)$$

$$i_c^s = -i_d^s/2 + \sqrt{3}/2 \cdot i_q^s$$

여기서,  $i_d^e, i_q^e$ : d, q회전좌표축 전류,  $i_d^s, i_q^s$ 는 텐서(tensor)변환 후의 d, q 고정좌표축 전류,  $i_a^s, i_b^s, i_c^s$ 는 2상에서 3상 변환 후의 3상 고정좌표축 전류이다. 따라서,  $i_d^e$ 에 d축 전류값을 주고,  $i_q^e$ 을 0으로 하면, d

축에 기자력이 인가되며,  $i_q^e$ 에 q축 전류값을 주고,  $i_d^e$ 을 0으로 하면, q축에 기자력이 인가된다. 그러므로 위와 같은 방법으로 전류를 인가하면, 각축의 회로정수가 기기의 특성을 결정짓는 들극형 전력 변환기의 전류원 해석이 편리하게 된다.

#### 3.4 인덕턴스 계산

SynRM의 경우 파라미터 중에서 인덕턴스의 값이 전류, 토크, 역률등의 특성을 결정하는 중요한 요소가 된다. 본 연구에서 정확한 인덕턴스의 값을 추출하기 위해 시행한 유한요소해석에서 각상의 자속을 구하는 식은 다음과 같다.

$$\lambda = N \int B \cdot dS = N(A_1 - A_2)L_c \quad (12)$$

여기서,  $L_c$ 는 1차축 적층폭,  $N$ 은 코일 턴수,  $A_1, A_2$ 은 슬롯에서의 자기벡터 포텐셜이다.

식 (12)를 이용하여 각 상에서의 쇄교자속을 구한 후 텐서(tensor) 변환을 이용하여, 각각 d축과 q축의 자속을 계산한다. 마찬가지로, 전류도 텐서(tensor)변환을 이용하여 d, q축 성분을 계산한 후, 인덕턴스를 계산하면 다음과 같다.

$$L_d = \frac{\lambda_d}{I_d}, \quad L_q = \frac{\lambda_q}{I_q} \quad (13)$$

입력전류의 증가에 따른 d, q축 인덕턴스 성분의 변화 곡선은 d축으로의 전류인가시 q축 전류는 영(zero)이며, q축으로의 전류인가시 d축 전류는 영(zero)이다. 따라서, 상호간섭의 영향은 무시한다.

### 4. 해석결과 및 분석

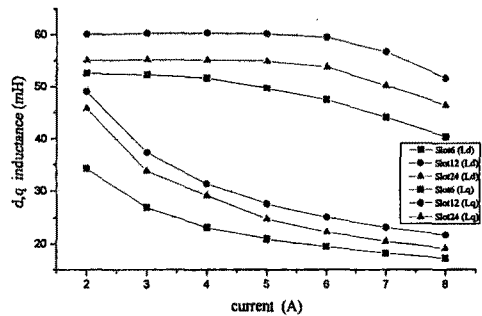


그림 2. 전류에 따른 각 모델의 d, q 축 인덕턴스 특성

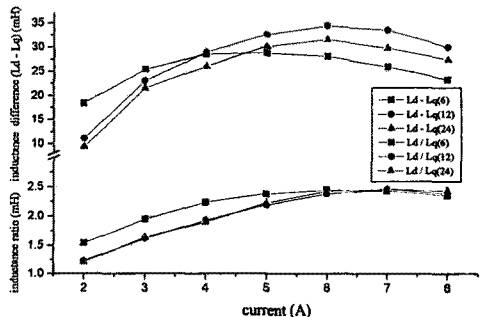


그림 3. 전류에 따른 각 모델의 d, q 축 인덕턴스 차 및 비

그림 2, 3은 입력 전류에 따른 각모델의 d, q 인덕턴스와 인덕턴스 차와 비를 보여준다.

저전류 입력에서는 슬롯 6개를 가진 집중권선형 구조가 좋은 인덕턴스 차와 비를 가지는 특성을 보여주지만 포화가 진행될수록 특성이 악화됨을 볼 수 있다. 또한 슬롯 12개의 분포권선구조는 슬롯 24개의 분포권선구조보다 전반적으로 좋은 특성을 보여준다.

그림 4는 각 구조의 치부분에서의 히스테리시스 특성을 보여준다. 6슬롯의 집중권선형의 경우 넓은 치구조 때문에 치에서의 포화 및 손실은 적게 나타났지만, 전류와 자속에 대한 상당 1사이클 히스테리시스 손실은 집중권선형 6슬롯은 1.125J 분포권선형 12슬롯은 0.88J 분포권선형 24슬롯은 0.72J로 집중권선형으로 했을 경우 기전체의 철손이 많은 것으로 나타났다.

그림 5는 각 모델의 d, q축 자속 분포도를 보여준다.

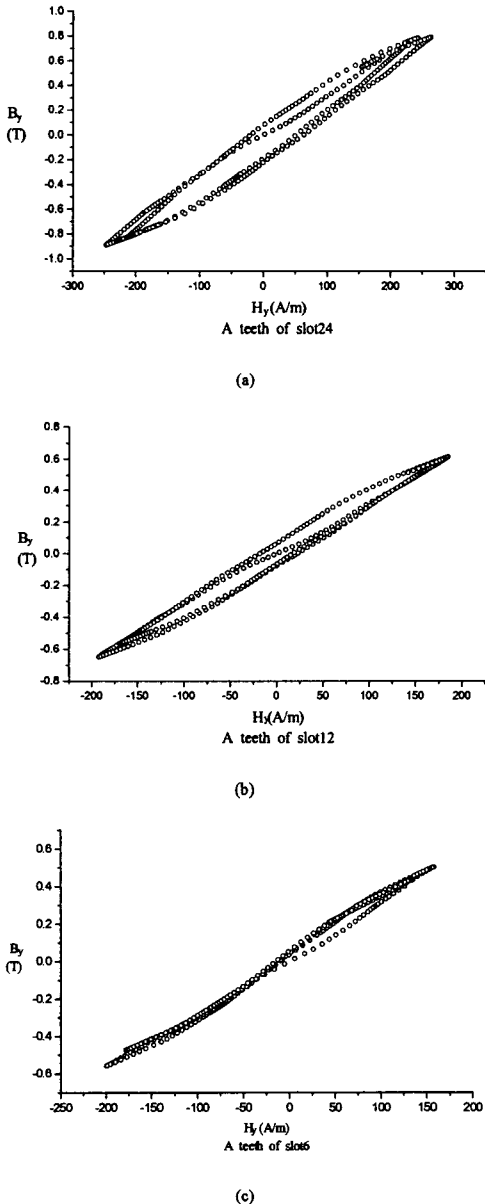


그림 4. 각 구조 치요소에서의 히스테리시스 특성

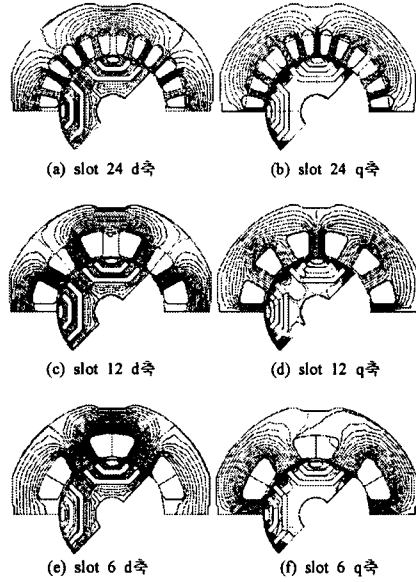


그림 5. 각 구조의 d, q축 자속분포

## 5. 결 론

본 논문은 같은 회전자 구조를 가진 24슬롯, 12슬롯 분포형 권선구조 SynRM 과 6슬롯의 집중권선형 SynRM을 해석대상으로 프라이자흐 모델링이 결합된 유한요소법을 이용하여 인덕턴스 분석과 히스테리시스 손실특성분석을 수행하였다. 인덕턴스 특성은 슬롯 6개의 집중권선형이 좋은 특성을 보이지만 포화영역에서는 특성이 악화되며, 높은 철손을 보임을 알 수 있으며, 분포 권선형 12슬롯은 24슬롯보다 좋은 인덕턴스특성을 보이지만 철손이 보다 큰 것으로 나타났다. 동손은 6슬롯의 집중권선형으로 상당히 저감시킬 수 있으므로 보다 정량적인 손실 분석을 수행한다면 적절한 SynRM의 설계 방향을 산정할 수 있으리라 사료된다.

## [참 고 문 헌]

- [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] J. H. Lee, "Design Solution to Minimized Iron Core Loss in Synchronous Reluctance Motor Using Preisach Model and FEM", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 38, No. 5, pp. 3276-3278, Sep. 2002.