

**유한요소법과 프라이자흐모델이 결합된 해석기법을 이용한 슬롯수에 따른 손실과 토크 특성을 통한 동기형 릴럭턴스 전동기 특성분석**

송한상\*, 이중호\*, 이병두\*  
국립 한밭대학교\*

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

Han-Sang Song\*, Jung-Ho Lee\*, Byeong-Du Lee\*

**Abstract** - This paper deals with the stator design solution of a synchronous reluctance motor (SynRM) with various slot numbers by loss & torque characteristics related to the slot open and 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 SynRM according to stator winding, slot number, slot open and teeth width variation.

**1. 서론**

일반적으로 동기형 릴럭턴스 모터(SynRM)에는 회전자 손실이 적고 간단한 구조, 강한 내구성 및 고효율을 가지고 있다. 이 모터는 회전자 권선이 없으며, 동기속도로 회전하므로 제어기는 기타 AC모터보다 더 단순하다. 따라서 보다 높은 효율 확보를 위해 SynRM 회전자 설계에 대한 많은 연구가 이루어 졌다[1]-[7].

동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)의 고정자 권선이 종래의 분포형이 아니라, 집중권선형으로 했을 때는 동손이 저감되고 저가의 전동기를 확보할 수 있는 장점이 있다.

본 논문은 일반 분포권선형 SynRM(24슬롯 모델)의 특징과 함께 고정자 치 너비의 변화에 따른 집중권선형 SynRM(6, 12슬롯 모델)의 특징을 비교하였다.

주 관점은 프라이자흐 모델과 FEM을 결합한 기법을 이용해 치 너비, 슬롯수와 관련된 손실, 토크 분석을 통한 각 SynRM의 특성분석을 다룬다.

**2. 유한요소법과 프라이자흐모델의 결합**

**2.1 SynRM의 지배 방정식**

맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2}$$

$$\vec{B} = \frac{1}{v_0} \vec{H} + \vec{M} \tag{3}$$

여기서,  $\vec{M}$ 은 프라이자흐 모델에 의해 계산된 자계세기  $\vec{H}$ 에 대한 자성재료의 자화이다. 자기 벡터 포텐셜  $A$ 와 등가 자화 전류  $\vec{J}_m$ 은 아래와 같이 표현 된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{4}$$

$$\vec{J}_m = v_0 (\nabla \times \vec{M}) \tag{5}$$

식 (1)-(5)로부터 식(6)의 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$v_0 (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \tag{6}$$

**2.1.1 시스템 행렬**

시스템 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

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

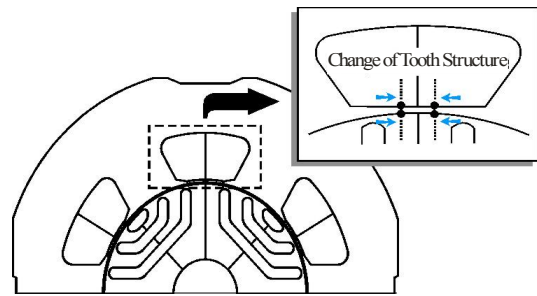
여기서,  $K_{ij}^{(e)} = \frac{V_0^{(e)}}{4\Delta^{(e)}} (C_{ie} C_{je} + d_{ie} d_{je})$ ,  $F_i^{(e)} = -\Delta^{(e)} \frac{N_i}{3S}$ ,

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

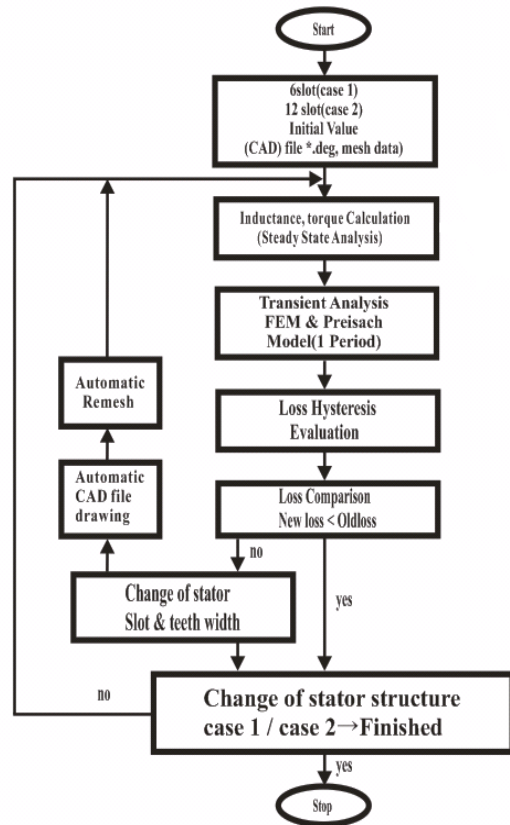
전체 모델의 시스템 행렬은 식 (8)과 같은 행렬로서 표현된다.

$$[K] \{A\} + \{F\} + \{M\} = 0 \tag{8}$$

**3. 해석 모형과 설계 절차**



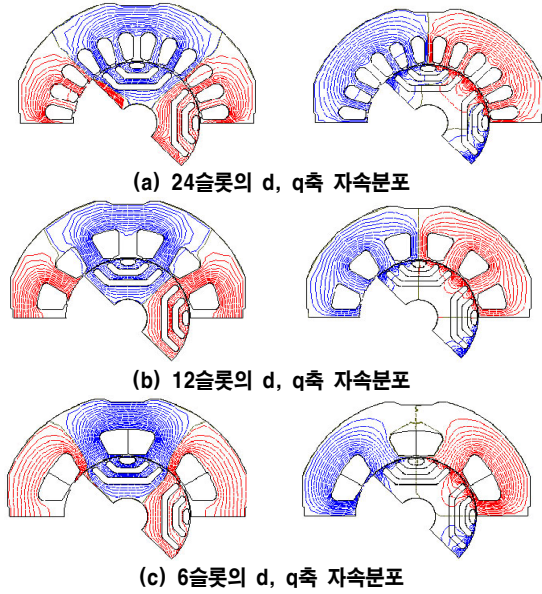
**<그림 1> 집중권 SynRM (6slot)의 치와 고정자 슬롯 형상 및 설계변수 예**



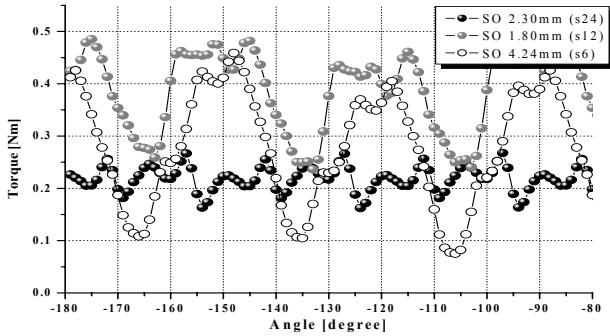
**<그림 2> 설계 흐름도**

그림 2는 설계 흐름도를 보여준다. 회전자의 형상 좌표는 그림 1의 설계 변수의 조건에 따라 그려진다. 그리고 CAD파일은 자동적으로 슬롯수와 자속장벽 폭의 변화에 따라 다시 그려진다.

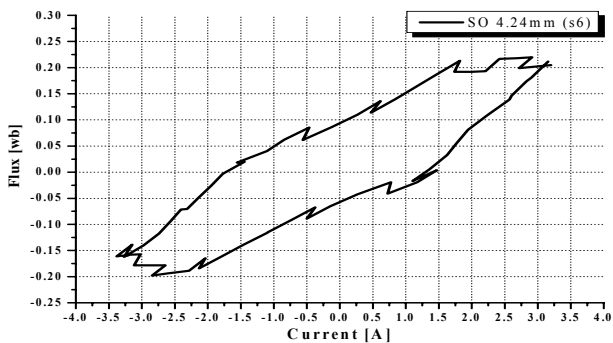
#### 4. 결과 및 분석



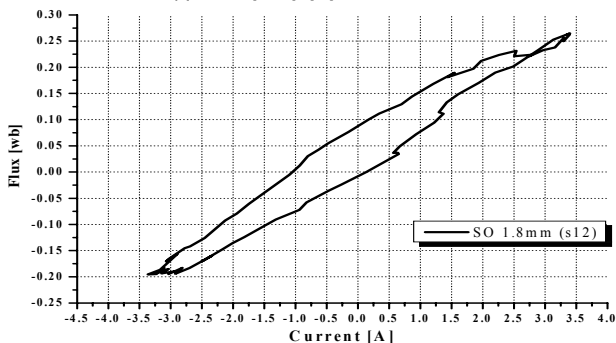
〈그림 3〉 해석모델의 d, q축 자속분포



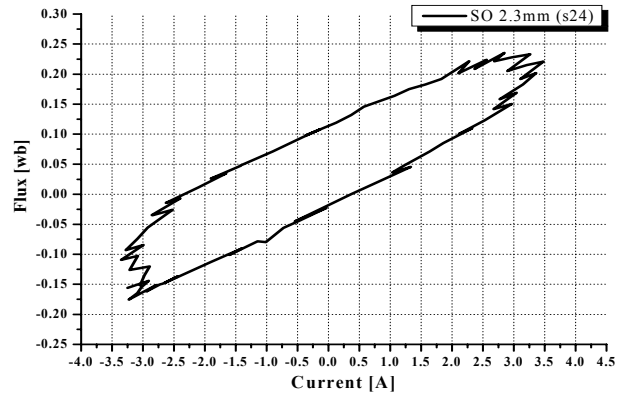
〈그림 4〉 각 모델별 설계해 토크특성



(a) 6슬롯모델(히스테리시스 손실 75.4 W)



(b) 12슬롯모델(히스테리시스 손실 17.3 W)



(c) 24슬롯모델(히스테리시스 손실 18.7 W)

〈그림 5〉 각 모델별 히스테리시스 특성

그림 3은 각 SynRM의 d, q축 자속 분포를 보여준다. 그림 4는 각 모델별 최적설계해의 토크특성을 나타내며, 두 기기(6슬롯, 12슬롯)의 토크 밀도 진폭은 24슬롯모델보다 크다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 FEA(유한요소해석)에 의한 히스테리시스 손실 응답을 보여준다. ( $i_d=2[A]$ ,  $i_q=2.5[A]$ , 부하= $6[\text{kg} \cdot \text{cm}]$ , 주파수= $66.7[\text{Hz}]$ )

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

#### 5. 결 론

본 논문에서는 일반 분포권선형 SynRM(24슬롯 모델)과 고정자 치 너비의 변화에 따른 집중권선형 SynRM(6슬롯 모델)을 비교하였다.

해석 결과를 비교해보면 12슬롯 모델은 히스테리시스 손실이 기존 24슬롯 모델과 비슷한 수준이며, 고효율 확보가 가능하고, 동손이 감소한다. 따라서 공장 제조시 권선 작업이보다 단순해지면서 제조단가가 저감되므로 높은 산업 경쟁력을 얻을 수 있을 것으로 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", *IEEETransactiononMagnetics*, Vol.36, No.7, pp1209-1212, July 2000.
- [2] J. H. Lee, S. C. Ahn, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of LIM Using Coupled FEM & Control algorithm", *IEEETransactiononMagnetics*, Vol.36, No.7, pp1876-1879, July 2000.
- [3] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Hysteresis Modelling of Synchronous Reluctance Motor Considering PWM input Voltage", *JournalofPhysicaB*, Vol.275, pp238-247, Jan. 2000.
- [4] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Preisach Modelling", *IEEETransactiononMagnetics*, 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", *IEEETransactiononMagnetics*, 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", *IEEETransactiononMagnetics*, 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", *IEEETransactiononMagnetics*, 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," *IEEETrans.InMagnetics*, Vol.MAG-22, No.5, pp.603-608 Sept.1986