

## 유한요소법을 이용한 영구자석 매입 동기형 릴럭턴스 전동기의 Ld, Lq 인덕턴스에 미치는 영구자석 특성분석

김기복\*, 최시현, 권선범, 이종호  
한밭대 전기공학과

### Effect Analysis of Magnet on Ld and Lq Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor Using Finite Element Method

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

**Abstract** - This study investigates the characteristics of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor (PMASynRM) using coupled FEM and Preisach modelling.

The focus of this paper is the characteristics analysis of d, q axis inductance according to magnetizing direction and quantity of interior permanent magnet for PMASynRM. Investigation on nonlinear characteristic of machine is performed by Preisachs theory application.

Comparisons are given with characteristics of normal Synchronous reluctance motor(SynRM) and those according to the quantity of residual flux density (0.3T and 0.4T) in PMASynRM, respectively.

#### 1. 서 론

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 SynRM의 회전자 설계를 통한 성능 향상을 위하여 상당한 노력이 이루어졌다 [1]-[4]. 영구자석을 적절하게 삽입한 PMASynRM은 토크밀도와 역률을 크게 향상시킬 수 있다[5]-[6].

그러나, 영구자석이 q축 기자력에 반발하도록 삽입되었을 때, 회전자 rib은 추가된 영구자석에 의해 포화된다. 이 포화 특성과 철손은 종종 PMASynRM의 성능의 중요한 요소로서 작용한다.

또한, 회전자의 d축 여자시 포화 특성은 자로의 차이로 인하여 q축의 포화 특성과 매우 다르다. d축 여자시, 포화 현상은 고정자 요크, 고정자 치 및 회전자 rib에서 결합되어 나타나며, d축 인덕턴스를 50%까지 감소시킬 수 있다.

고속 운전시 SynRM의 철손은 출력 저감의 중요한 원인이 될 수 있다. 그러므로, 일반적인 기기에서 철손에 대한 개략적인 산정이 가능한 반면, PMASynRM에서의 철손은 보다 정밀한 산정을 요구한다.

유한요소법(Finite element method; FEM)은 PMASynRM의 복잡한 내부 구조와 정밀한 자기 포화현상의 모델링이 가능하다. 비선형 해석 루틴에는 포화 및 히스테리시스 손실에 대한 정확한 예측이 가능한 프라이어호 모델을 채택하였다.

본 논문은 PMASynRM을 해석대상으로 프라이어호 모델링이 결합된 유한요소법을 이용하여 포화의 영향과 히스테리시스 손실을 고려한 특성분석을 수행하였다. 또한, 잔류자속밀도가 각각 0.3T와 0.4T인 영구자석을 매입한 PMASynRM과 일반적인 SynRM의 특성 비교를 수행하였다.

#### 2. 해석모델

##### 2.1 PMASynRM의 구조 및 특성

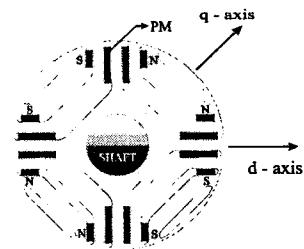


그림 1. PMASynRM의 회전자 단면도

일반적인 SynRM의 특성을 개선하기 위해 회전자의 자속 장벽에 영구자석을 매입하며, 그 원리는 다음과 같다. q축 자속 경로에 영구자석을 매입했을 때, d-q축에 대한 쇄교자속은 각각 식 (1), (2)와 같이 표현된다.

$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} \quad (1)$$

$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} + \lambda_{mq(pm)} \quad (2)$$

여기서,  $L_{ds}$ ,  $L_{qs}$ 는 각각 d축, q축 인덕턴스이며,  $L_{ds} \neq L_{qs}$ 이다. 또한, 토크는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$T_{pmr} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} [(L_{ds} - L_{qs}) i_{qs} i_{ds} + \lambda_{mq(pm)} i_{ds}] \quad (3)$$

식 (3)으로부터, PMASynRM의 이론적인 최대토크는  $L_{qs}$ 가 "0"일 때라고 생각할 수 있으며 식 (3)의 두 번째 항을 이용하여 가능하게 할 수 있다. 즉, 영구자석의 극성이 q축 자속 방향과 서로 반대라고 가정하고, 식 (3)의 토크를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$T_{pmr} = \frac{3}{2} \frac{p}{2} [L_{ds} i_{qs} i_{ds} - (L_{qs} i_{qs} - \lambda_{mq(pm)}) i_{ds}] \quad (4)$$

따라서, 식 (4)로부터 q축 자속 및 인덕턴스는 이론적으로 "0"에 이를 수 있다. 이때,  $L_{qs}$ 는 충분히 작기 때문에, 반발 자속을 위해 일반적으로 페라이트 영구자석이 사용된다.

그림 2는 q축 자속에 완전히 반발하기 위해 영구자석의 영향을 반영한 페이저도를 나타낸다.

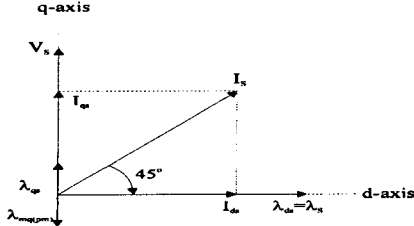


그림 2. PMASynRM의 페이저도

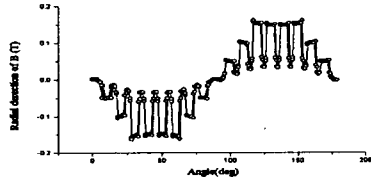


그림 3. q축 전류( $i_{qs}$ ) 1A 여자 시, 공극자속밀도 분포

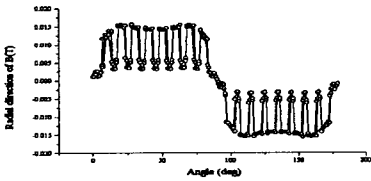


그림 4. 0.4T 영구자석 여자 시, 공극자속밀도 분포

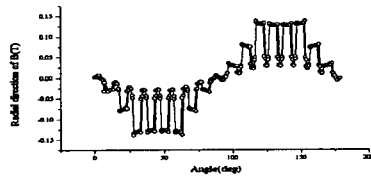


그림 5. q축 전류와 영구자석 동시 여자 시, 상호 반작용에 따른 공극자속밀도 분포

그림 3, 4는 PMASynRM에서 q축 전류  $i_{qs}$ 와 잔류자속 밀도가 0.4T인 영구자석이 각각 독립적으로 여자되었을 때, 공극에서의 자속밀도 분포를 나타내며, 두 자속의 상호 반작용에 따른 공극자속밀도 분포를 그림 5에 나타내었다.

## 2.2 FEM과 프라이자흐 모델링의 결합

### 2.2.1 PMASynRM의 지배방정식

맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{B} = \frac{1}{\nu_0} \vec{H} + \vec{M} \quad \vec{B} = \frac{1}{\nu_0} \vec{H} + \vec{M}_{pm} \quad (7)$$

여기서,  $\vec{M}$ ,  $\vec{M}_{pm}$ 은 각각 자계강도  $\vec{H}$ 에 대한 자성체와 영구자석의 자화의 세기이며,  $\vec{M}$ 은 프라이자흐 모델로부터 구해진다. 자기벡터포텐셜  $\vec{A}$ 와 등가자화전류  $\vec{J}_m$ ,  $\vec{J}_{PMm}$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (8)$$

$$\vec{J}_m = \nu_0 (\nabla \times \vec{M}) \quad \vec{J}_{PMm} = \nu_0 (\nabla \times \vec{M}_{pm}) \quad (9)$$

식 (5)-(9)로부터 지배방정식은 식 (10)과 같이 된다.

$$\nu_0 (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m + \vec{J}_{PMm} \quad (10)$$

### 2.2.2 System matrix

시스템 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K^{(e)}][A^{(e)}] + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}\} + \{M_{pm}^{(e)}\} = 0 \quad (11)$$

여기서,

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

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

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

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

이다. 따라서, 전체 모델은 식 (12)와 같은 행렬로서 표현된다.

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

### 2.3 해석결과 및 검토

일반적인 SynRM과 PMASynRM의 d-q축 여자에 따른 자속 분포를 그림 6에 나타내었다. 고정자 슬롯수는 36, 극수는 4이다.

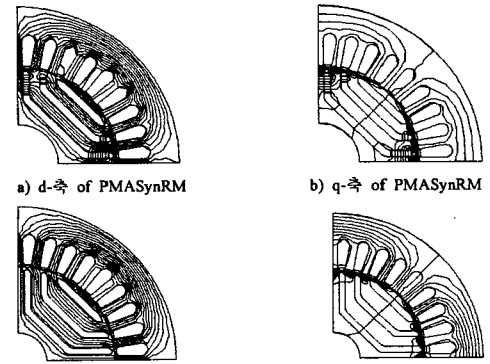


그림 6. d-q 축 자속밀도 분포

그림 6과 그림 7은 회전자의 d축에서의 포화 현상이 q 축의 현상과 매우 다르다는 것을 보여준다. 그림 6에서와 같이, 일반 SynRM과 PMASynRM의 포화는 특히, 회전자의 rib와 고정자 치부분에서 나타난다. 이 포화 현상은 그림 7에서 보는 바와 같이, 일반적인 SynRM과 PMASynRM의 높은 토크, 역률 및 효율에 영향을 미치지 않는  $L_d$ 를 감소시킬 수 있다.

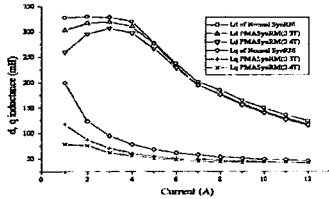


그림 7. 일반 SynRM과 PMASynRM (0.3T, 0.4T)의 d-q 축 인덕턴스

그림 6, 7에서, PMASynRM의  $L_d$ 가 포화에 의해 감소한 반면,  $L_q$ 는 영구자석에 의한 자속의 반작용에 의해 감소하였다. 이러한 변화는 그림 8, 9에서 보는 바와 같이, 인덕턴스 차 뿐만 아니라 돌극비를 증가시켰으며 이로써 PMASynRM의 토크 및 역률은 증가할 것임을 예측할 수 있다. 또한, 0.3T, 0.4T의 페라이트 영구자석은 토크 및 역률에 있어서, 각각 더 적합함을 알 수 있다.

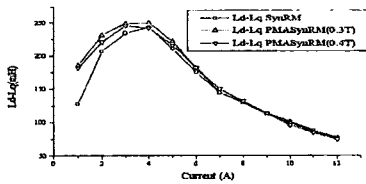


그림 8. 일반 SynRM과 PMASynRM (0.3T, 0.4T)의 d-q 축 인덕턴스 차

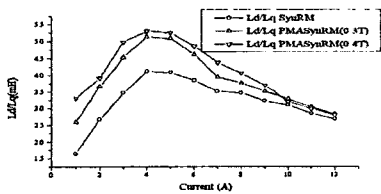


그림 9. 일반 SynRM과 PMASynRM (0.3T, 0.4T)의 d-q 축 인덕턴스 비

고정자에서의 철손은 일반적인 유도기와 유사하다. 반면, SynRM 회전자에서의 철손은 회전자가 고정자의 회전자계와 동기속도로 운전하기 때문에 거의 발생하지 않는다. 따라서, 대부분의 철손은 고정자에서 발생한다.

그림 10은 입력전류와 동기속도로 회전하고 있는 PMASynRM의 자속 분포를 나타낸 것이다. 영구자석의 잔류자속밀도가 0.3T, 인가전류가 5A, 25Hz일 경우, 치부분 요소에서의 히스테리시스 응답을 그림 11, 12에 나타냈다. 그림 11, 12에서 볼 수 있는 바와 같이 영구자석의 매입에도 불구하고, PMASynRM은 일반적인 SynRM보다 포화 정도는 더 증가하지만 유사한 히스테리시스 특성을 가지고 있음을 알 수 있다.

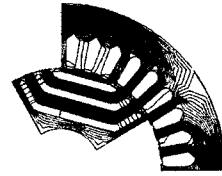


그림 10. 회전하는 PMASynRM의 자속 분포

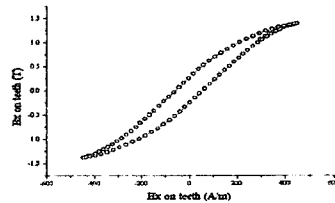


그림 11. SynRM에서의 한 치에서의 B-H curve

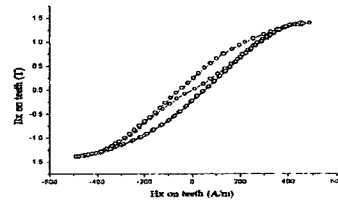


그림 12. PMASynRM에서의 한 치에서의 B-H curve

### 3. 결 론

PMASynRM에 있어,  $L_q$ 는 q축 자속과 반대 방향의 영구자석 매입에 의해 감소하였으며, 그 결과,  $L_d-L_q$  및  $L_d/L_q$ 가 증가하였다. 이것은 토크와 역률을 향상시키는데 도움을 줄 수 있다. PMASynRM에서 고폭과 역률 향상을 위해 이용되는 최적의 영구자석 자속량은 매우 작다.

따라서, 저가의 영구자석이 이용되어질 수 있다. 또한, 영구자석에 의해 추가되는 손실은 거의 무시 가능하다는 것을 히스테리시스 손실 해석을 통해 입증하였다.

### [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, "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.
- [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. 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.