

효율 향상을 위한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 특성해석과 최적설계

문성주\*, 이태훈\*, 이중호\*  
한밭대학교\*

Characteristic Analysis & Optimum Design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor for Premium Efficiency Performance

Sung-Ju Mun\*, Tae-Hoon Lee\*, Jung-Ho Lee\*  
Hanbat National University\*

**Abstract** - This paper deals with the characteristic analysis & optimum design of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor(PMASynRM) for Premium Efficiency Performance. The focus of this paper is characteristic analysis of d and q-axis inductances and torque according to magnetizing quantity of interior permanent magnet for PMASynRM. The d and q-axis current component ratios, load angles of a PMASynRM are investigated quantitatively on the basis of the proposed analysis method and the experimental test. Comparisons are given with output characteristic curves of normal SynRM and those according to the load in PMASynRM, respectively. And optimum design of PMASynRM is performed by Response Surface Methodology(RSM).

1. 서 론

동기 릴럭턴스 전동기는 회전자 d축과 q축의 인덕턴스 차(L<sub>d</sub>-L<sub>q</sub>)와 비(L<sub>d</sub>/L<sub>q</sub>)를 크게 함으로써 토크특성이나 역률을 크게 개선시킬 수 있으며, 이와 관련하여 회전자 설계에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

동기형 릴럭턴스 전동기 성능향상 방향으로, 영구자석을 적절하게 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기(PMASynRM)는 토크밀도와 역률을 크게 향상시킬 수 있다.[1],[2]

본 논문은 토크밀도와 역률을 개선하기 위해서 영구자석의 자로를 q축 자속의 반대 방향으로 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기를 해석대상으로 유한요소법을 이용하여 포화의 영향을 고려한 특성분석을 수행하였다.

시작기 제작과 드라이버를 구성하고 벡터제어 운전실험을 각 부하별로 수행하여 기존 동기 릴럭턴스 전동기와 비교한 특성곡선을 도출하였고, 출력상승과 성능향상이 확보됨을 확인하였다.

또한 반응표면법(RSM)을 이용하여 PMASynRM의 최적설계를 수행하였다.

2. PMASynRM 특성해석 및 최적설계

2.1 PMASynRM의 기본특성

동기 릴럭턴스 전동기(PMASynRM)는 정현과 회전 자계로 구동되므로 고정자는 유도전동기의 고정자와 구조가 같으며, 고정자 권선은 분포권으로 시행되고 회전자는 극당 3개의 자속 장벽을 가지고 있다.

전자기 토크를 d, q축 변수로 표현하면 일반 동기기의 토크 식과 동일한 식 (1)과 같이 나타낼 수 있다.

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (L_{ds} - L_{qs}) i_{ds} i_{qs} \tag{1}$$

식(1)에서 보는 바와 같이 SynRM의 토크는 회전자 회전하는 공극자속과 일치하려고 하는 힘으로 회전자는 릴럭턴스가 최소가 되는 자속경로를 유지하면서 공극자속의 회전속도와 동일하게 회전하게 된다.

i<sub>ds</sub>와 i<sub>qs</sub>는 그림 2.1에 의해 식 (2)와 같이 표현할 수 있으며, 식 (2)를 식 (1)에 대입하면 식 (3)과 같은 전자기 토크를 유도할 수 있다.

$$i_{ds} = I_a \cos \phi, \quad i_{qs} = I_a \sin \phi \tag{2}$$

$$T_e = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} (L_d - L_q) I_a^2 \frac{\sin 2\phi}{2} \tag{3}$$

일반적인 SynRM의 특성을 개선하기 위해 회전자 자속 장벽에 영구자석을 매입하면, 그 특성개선 원리 및 토크 표현식은 다음과 같다.

q축 자속 경로에 영구자석을 매입했을 때, d축과 q축에 대한 쇠교자속은 각각 식 (4), 식 (5)와 같이 표현된다.

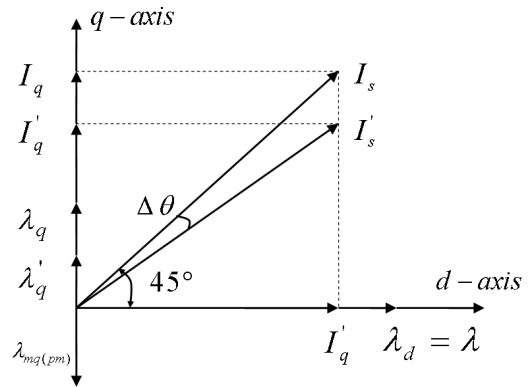
$$\lambda_{ds} = L_{ds} i_{ds} \tag{4}$$

$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} + \lambda_{mq(pm)} \tag{5}$$

여기서, L<sub>ds</sub>와 L<sub>qs</sub>는 각각 d축과 q축 인덕턴스이며, L<sub>ds</sub> ≠ L<sub>qs</sub>이다. 또한, 토크는 식 (6)과 같이 표현된다.

$$T_{pmr} = \frac{3}{2} \cdot \frac{P}{2} [(L_{ds} - L_{qs}) i_{qs} i_{ds} + \lambda_{mq(pm)} i_{ds}] \tag{6}$$

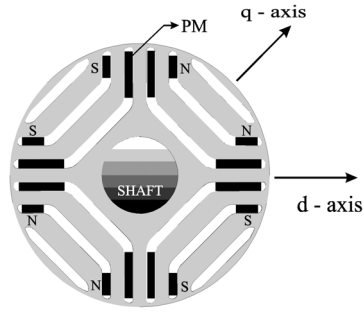
그림 1은 q축 자속을 완전히 제거하기 위한 영구자석의 영향을 고려한 페이저도를 나타낸다.



<그림 1> PMASynRM의 전류 페이저도

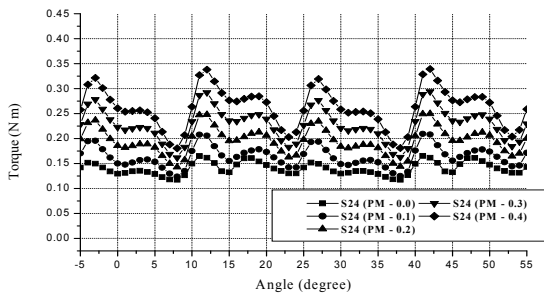
그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 q축 자속을 고려하기 위해 매입한 영구자석으로 인해 λ<sub>q</sub>가 λ'<sub>q</sub>로 감소했다면, 동일 토크를 나타내기 위해서는 i<sub>q</sub>는 또한 i'<sub>q</sub>로 감소해야 한다. 따라서 최대 토크를 내는 전류각은 식 (3)에서 보여주는 바와 같이 45°에서 벗어나 나타나게 된다. 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 최대출력 포인트는 일반적 동기 릴럭턴스 전동기의 최대출력 포인트 Δφ + 45° 보다 Δθ만큼 더 이동하여 나타난다고 볼 수 있다.

그림 2는 PMASynRM의 회전자 단편을 보여준다.



〈그림 2〉 PMASynRM의 회전자 구조

## 2.2 PMASynRM의 특성해석 및 실험

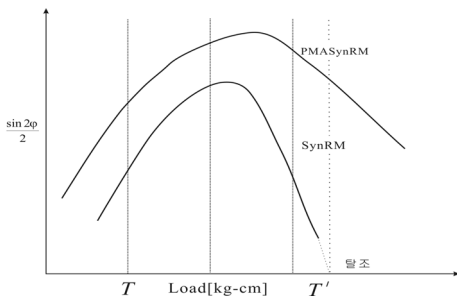


〈그림 3〉 SynRM(0.0T)와 PMASynRM(0.1-0.4T)의 토크특성

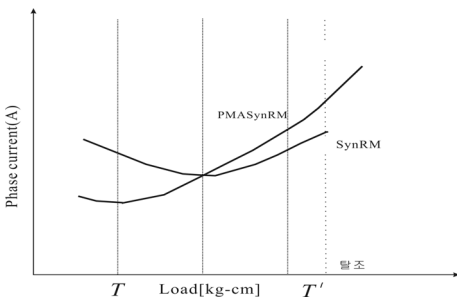
그림 3에서 볼 수 있는 바와 같이 평균토크는 영구자석의 잔류 자속밀도가 증가함에 따라 상승하지만, 토크 리플도 증가함을 알 수 있다.

시스템을 구성하여 실험을 통한 실험결과 데이터를 비교 분석하면 그림 4, 5와 같은 일반 동기 릴럭턴스 전동기와 비교하여 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 부하에 따른 전류특성과 전류특성을 얻을 수 있다.

그림 4, 5에서 볼 수 있는 바와 같이 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기가 고출력을 얻을 수 있음을 확인할 수 있다.

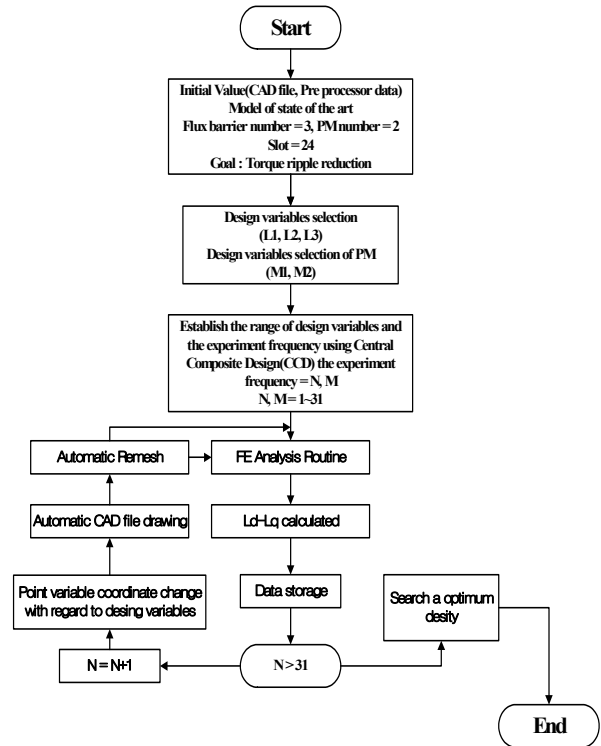


〈그림 4〉 SynRM과 PMASynRM의  $\frac{\sin(2\phi)}{2}$  특성



〈그림 5〉 PMASynRM과 SynRM의 일반화된 전류 특성곡선

## 2.3 반응표면법을 이용한 최적설계



〈그림 4〉 설계 흐름도

그림 4는 설계 흐름도를 보여준다. 회전자의 형상 좌표는 설계 변수의 조건에서 그려진다. 그리고 CAD파일은 자동적으로 자속장벽, 영구자석 폭의 변화에 대하여 다시 그려진다. 여기서 동일한 자속장벽 수에서 회전자의 x, y좌표만이 변하고 마디번호, 요소 번호, 경계 조건 등은 변하지 않는다.

## 3. 결 론

본 논문은 동기 릴럭턴스 전동기의 q축 인덕턴스를 감소시켜 토크밀도 및 역률을 개선하기 위해서 영구자석의 자로를 q축 자속의 반대방향으로 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기를 해석대상으로 유한요소법을 이용하여 포화의 영향을 고려한 특성분석을 수행하였고, 시작기를 제작하고 실험을 통해 일반 동기 릴럭턴스 전동기와 비교를 수행하였다.

제안한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 고출력 고성능 특성이 유한요소해석과 실험을 통해 확보되었다.

반응표면법을 이용하여 자속장벽 수, 자속장벽 폭을 설계변수로 하여 최적설계를 수행하였다.

이러한 특성곡선을 적절히 이용하면 부하별, 용량별 설계기준이 될 수 있으므로, 이는 고출력 전동기를 필요로 하는 분야 또는 응용분야에 유도기 및 BLDC 전동기의 대체용으로 적합할 것으로 사료된다.

## [참 고 문 헌]

- [1] J. H. Lee, D. S. Hyun, May 1999, Hysteresis Analysis for the Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor By Coupled FEM & Preisach Modelling, IEEE Trans. on Magn., Vol. 35(5):1195-1198.
- [2] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, May 1999, Effect of Magnet on Ld and Lq Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, IEEE Transaction on Magnetics., Vol. 35(5) : 1199-1202.