

Q축 제로 인덕턴스를 위한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기 특성 연구

서준*, 김영현*, 김홍석**, 이중호*
한밭대학교*, 경남테크노파크**

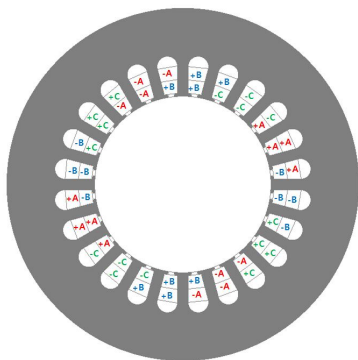
A Study on the Characteristics of PMASynRM for Zero Inductance of Q-axis

Jun Seo*, Young-Hyun Kim*, Hong-Seok Kim**, Jung-Ho Lee*
Hanbat National University*, GYEONGNAM TECHNOPARK**

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 PMASynRM and those according to the rated wattage in PMASynRM, respectively. And optimum design of PMASynRM is performed by Response Surface Methodology(RSM).

1. 서론

동기 릴럭턴스 전동기는 구조적인 면에서 회전자에 권선 구조가 없어 간단하며 고장이 적어 신뢰도가 높다. 이러한 구조적인 특성을 갖는 동기 릴럭턴스 전동기는 회전자의 d축과 q축의 인덕턴스 차 ($L_d - L_q$)와 비(L_d/L_q)를 크게 함으로써 토크특성이나 역률을 크게 개선시킬 수 있으며, 이와 관련하여 회전자의 설계에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다. 성능향상 방향으로, 영구자석을 적절하게 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기(PMASynRM)는 토크 밀도와 역률을 크게 향상시킬 수 있다[1]-[3]. 본 논문은 토크밀도와 토크리플을 개선하기 위해서 영구자석의 자로를 q축 자속의 반대 방향으로 삽입함으로써 q축 인덕턴스를 제로로 만들기 위한 특성연구를 진행하였고, 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기를 해석대상으로 유한요소법을 이용하여 포화의 영향을 고려한 특성분석을 수행하였다. 또한 반응표면법(RSM)을 이용하여 PMASynRM의 최적설계를 수행하였다.



〈그림 1〉 PMASynRM의 권선도

〈표 1〉 마그네틱 축소에 따른 분석 결과

항목	단위	값
고정자 외경	mm	69.5
고정자 내경	mm	35
극수		4
슬롯수		24
정격속도	rpm	3600
토크	Nm	10
전류	rms[A]	9
턴수	turn	11

반응 표면법이 결합된 유한요소분석은 최적설계 솔루션을 찾을 때 주로 사용되어 왔다[4]-[6]. 표 1은 본 연구에 사용한 PMASynRM의 상세 스펙이며, 고정자와 회전자 코어는 기존의 SynRM과 같으며 여기에 영구자석만 삽입한 형태로 그림 2에 회전자 구조에 나타내었다. 그림 1은 PMASynRM의 권선도를 나타낸 그림이다.

2. 본론

2.1 PMASynRM의 기본 특성

PMASynRM의 고정자는 유도전동기와 구조가 같으며, 회전자는 SynRM의 자속장벽에 영구자석이 삽입된 돌극 구조 회전자이다. 동기 릴럭턴스 전동기에서 발생하는 토크는 d축과 q축의 인덕턴스 차에 비례하고, 역률은 두 인덕턴스의 비와 관련된다.

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

q축 자속 경로에 영구자석을 매입했을 때, d축과 q축에 대한 쇠교자속은 각각 식 (1), 식 (2)와 같이 표현된다.

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

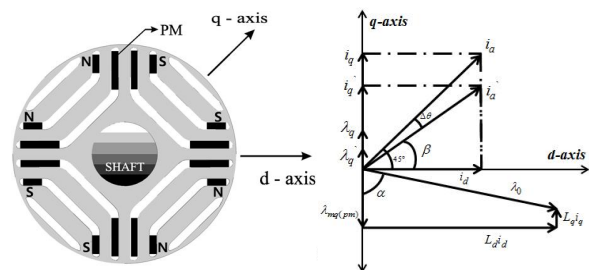
$$\lambda_{qs} = L_{qs} i_{qs} + \lambda_{mq(pm)} \quad (2)$$

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

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

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.

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



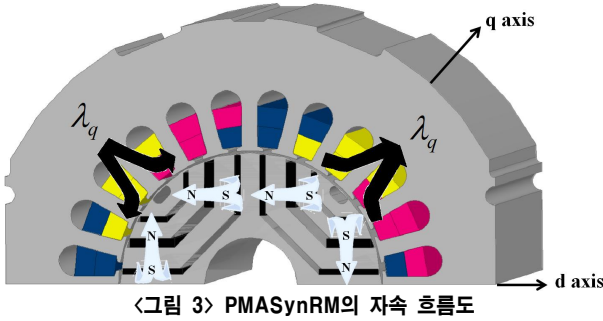
〈그림 2〉 PMASynRM의 전류 페이저도 & 회전자 구조

그림 3은 q축 자속을 완전히 제거하기 위한 영구자석의 영향을 고려한 페이저도를 나타낸다.

그림 2에서 볼 수 있는 바와 같이 q축 자속을 고려하기 위해 매입한 영구자석으로 인해 λ_q 가 λ'_q 로 감소했다면, 동일토크를 나타내기 위해서는 i_q 는 또한 i'_q 로 감소해야 한다. 따라서 최대 토크를 내는 전류각은 45° 에서 벗어나 나타나게 된다.

PMASynRM의 최대출력 포인트는 일반적인 동기 릴럭턴스 전동기의 최대출력 포인트 $\Delta\phi + 45^\circ$ 보다 $\Delta\theta$ 만큼 더 이동하여 나타난다고 볼

수 있다.

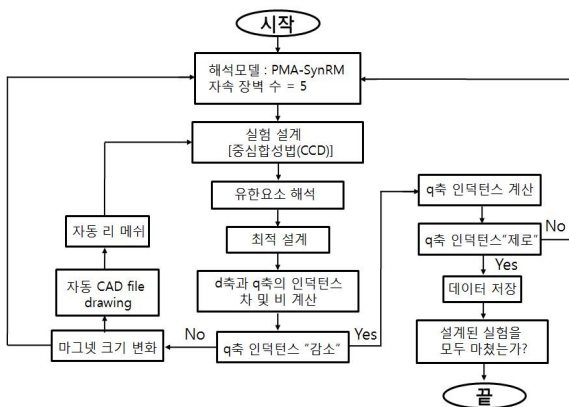


〈그림 3〉 PMASynRM의 자속 흐름도

그림 3은 영구자석이 q축 자속을 반발하는 원리를 나타낸다. SynRM에 q축 자속 상쇄 방향으로 영구 자석을 삽입함으로써 q축 인덕턴스를 최소화하여 토크, 역률, 효율을 증대 시키는 결과를 가져온다.

2.2 최적화 과정

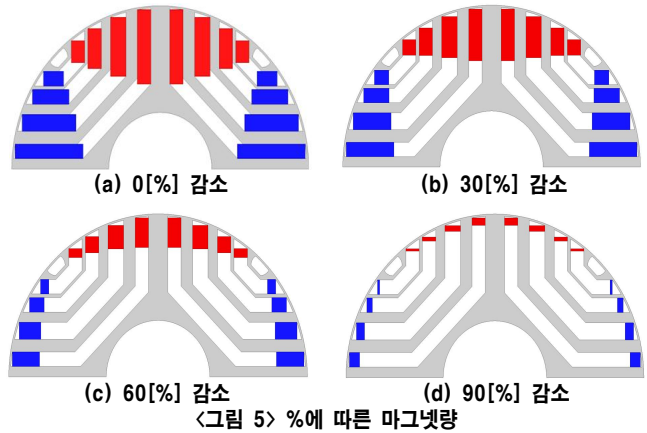
- 그림 4는 설계 흐름도를 나타내고, 그 시퀀스는 다음과 같다.
- ① 초기 시작기의 CAD파일 선처리(pre-processor)작업데이터를 작성한다.
 - ② 실험 설계(중심합성법(CCD))를 이용해 최적설계를 한다.
 - ③ 유한 요소 해석을 통하여 d축과 q축의 인덕턴스 차 및 비를 계산한다.
 - ④ q축 인덕턴스가 감소했는지 판별한다.
 - ⑤ 마그넷량 변화에 따라 변화된 q축 인덕턴스를 해석할 때, 유한 요소 해석을 위한 선처리 작업을 다수 수행해야하는 어려움이 따른다. 본 연구에서는 자동으로 형상변화에 따르는 CAD파일을 작성하고 메쉬를 하는 선처리 작업을 하는 프로그램을 설계 프로그램에 포함하여 설계시간을 단축한다.
 - ⑥ 마그넷량에 따라 q축 인덕턴스가 줄어드는지 판별한다.
 - ⑦ 자동으로 형상변화에 따르는 CAD파일을 작성하고 메쉬를 실행한다.
 - ⑧ 그림 6에 나타낸 것처럼 마그넷량 축소에 따른 q축 인덕턴스 값을 표 2에 작성하고, q축 인덕턴스가 최소 또는 제로가 되는 부분을 선정한다.
 - ⑨ 자동으로 형상변화에 따르는 CAD파일을 작성하고 메쉬를 실행한다.
 - ⑩ 계획된 실험을 모두 마치면 최적화과정을 끝낸다.



〈그림 4〉 설계 흐름도

2.3 PMA-SynRM의 Q축 제로 인덕턴스

위에서 언급했듯이 PMA-SynRM의 최대토크는 식 (3), (4)으로부터 L_{qs} 가 "0"일 때라고 생각할 수 있으며, 즉 영구자석의 자속이 q축 자속과 같을 때 최대 토크를 얻을 수 있음을 의미한다. 마그넷의 자속량은 마그넷 크기에 따라서 바뀌며 마그넷량 축소에 따른 L_{qs} 값을 구하였고, 그림 5에서 나타낸 것처럼 마그넷 크기는 각각의 마그넷 크기를 % 비율로 하여 축소하였다. 그리고 모터는 5hp(3.7[kW]) 기준으로 하여 분석을 수행하였다. 표 2는 full magnet 일때의 토크 특성을 기준으로 하여 마그넷량이 축소됨에 따라 그에 따른 전류를 증가하여 초기 토크와 같게 만들었다. 표1에서 나타내고 있는것과 같이 L_{qs} 를 제로로 만들진 못하였으나, L_{qs} 가 줄어들에 따라 L_{ds}/L_{qs} 비가 커짐으로써 토크리플이 감소함을 확인하였다.



〈그림 5〉 %에 따른 마그넷량

〈표 2〉 마그넷량 축소에 따른 분석 결과

(Beta = 50[deg])

Reduced ratio	Total Torque[Nm]	Irms[A]	Ld-Lq	Ld/Lq	Torque Ripple[%]
0[%]	10.00295124	12.0	0.017364	7.410556	23.61
10[%]	10.02638599	12.2	0.017306	7.555556	21.91
20[%]	9.974520639	12.4	0.01725	7.708146	21.23
30[%]	10.09533268	12.8	0.016977	7.762146	20.11
40[%]	9.993116722	13.0	0.016861	7.860342	20.14
50[%]	10.05788718	13.4	0.01654	7.852476	20.91
60[%]	9.999951404	13.7	0.016281	7.822158	21.57
70[%]	10.00880282	14.1	0.015921	7.678271	22.67
80[%]	10.00875574	14.5	0.015571	7.456443	23.30
90[%]	10.00295124	14.8	0.015276	7.117649	24.14

3. 결 론

본 논문은 위의 조건 하에서 마그넷량을 조절하여 인덕턴스의 차 및 비를 비교하여 설계 해를 찾아내었고, 마그넷 변화에 따른 자동 CAD파일 작성프로그램을 개발하고 이에 따른 자동 선처리 프로그램의 개발을 통해 설계과정 시간을 단축하였다. 기존의 설계로부터 시작해, 최적의 설계 해를 선택하였다. 그리고 반응 표면법을 이용하여 마그넷의 폭을 설계변수로 하여 최적설계를 수행하였다. 이와같은 해석 수행능력을 충분히 활용하여 PMASynRM의 q축 인덕턴스를 제로화하여 토크특성을 향상시키고자 하였으나, q축 인덕턴스 감소에 따른 토크특성 향상만을 검증하였고, 제로화 시키지는 못하였다. 향후 연구시에는 보조권선 삽입 등의 추가적인 연구를 통하여 최종적으로 q축의 인덕턴스를 제로화 하는 연구를 수행할 예정이다.

〔참 고 문 헌〕

- [1] K. B. Pyun, J. Lee "A study of Maximum-Power Control Simulation for PMA-SynRM", 대한전기학회, Vol 2009, No4, pp. 103-105, 2009.
- [2] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance motor", IEEE Transaction on Magnetics, Vol 35, No5, pp. 1203-1206, may 1999.
- [3] M. Sanada, Y. Inoue, S. Morimoto "Rotor structure for reducing demagnetization of magnet in a PMASynRM with ferrite permanent magnet and its characteristics", IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), pp. 4189-4194, 2011.
- [4] R. P. Tomas, Statistical methods for Quality Improvement. New York: Wiley, 2000.
- [5] J.T. Li, Z.J. Liu, M.A. Jabbar, X.K. Gao: Design optimization for cogging torque minimization using response surface methodology, IEEE Transactions on Magnetics, Vol 40, No 2, 2004, pp.1176-1179.
- [6] J. M. Park, S. I. Kim, J. P. Hong, J. H. Lee, "Rotor design on Torque Ripple Reduction for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology", IEEE Transactions on Magnetics, vol. 42, No. 10, pp.3479-3481. Oct. 2006.