

유한 요소법과 반응표면법이 결합된 동기형 릴럭턴스 전동기의 특성해석 및 이방성 회전자 설계

이일교*, 조용현*, 이중호*
국립한밭대학교*

Characteristics Analysis & Optimum Design of Anisotropy Rotor Synchronous Reluctance Motor Using Coupled Finite Element Method & Response Surface Methodology

Il Kyo Lee*, Young Hyun Cho*, Jung Ho Lee*
Hanbat National University*

Abstract - This paper deals with the characteristics analysis & optimum design of Synchronous Reluctance Motor (SynRM) with anisotropy rotor using a coupled Finite Element Method (FEM) & Response Surface Methodology (RSM). The focus of this paper is the characteristics analysis & optimum design relative to the output power on the basis of rotor materials of a SynRM. The coupled Finite Elements Analysis (FEA) & Preisach model have been used to evaluate nonlinear solutions. Comparisons are given with characteristics of normal synchronous reluctance motor and those of anisotropy rotor SynRM (ANISO-SynRM), respectively. The feasibility of using RSM with FEM in practical engineering problem is investigated with computational examples and comparison between the fitted response and the results obtained from an analytical solution according to the design variables of rotor in anisotropy rotor SynRM.

1. 서 론

SynRM회전자의 d축과 q축 인덕턴스의 차와 비를 크게 함으로써 토크특성이나 역률을 개선시킬 수 있기 때문에 회전자 설계에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.[1]-[2] 그러나 단편형 회전자와 관계된 기계적인 문제는 지금까지 무시 되었다. 단편형 회전자의 이점은 유도기처럼 회전자를 적층 할 수 있고, 편칭을 할 수 있다. 그러나 인접한 단편 사이에 얇은 립은 남게 된다. 이러한 립 때문에 q축 자속은 증가 할 수 있고, 토크는 작아지게 된다. 립의 영향을 줄이는 가장 간단한 방법은 정확한 비율로 립의 폭을 변경시키고 손실을 감소시키는 것이다.

다른 방법은 적절한 재료로 회전자를 주조해서 립을 없애는 것이다. 주조하는 재료는 와전류와 관계된 영향을 피하기 위해 비금속이어야 한다. 플라스틱재료가 사용 될 수 있으나, 적은 탄성 때문에 약간의 문제가 발생 될 수 있다. 적절한 양의 영구 자석을 추가함으로써 SynRM의 토크밀도와 역률은 상당히 증가 될 수 있다. 이것을 영구자석매입형 동기릴럭턴스 전동기라 부른다.(PMASynRM)[3]

새로운 해법으로는 이방성 재료를 사용한 회전자를 만들어 립의 자속을 없애는 것이다.

본 논문은 유한 요소법과 반응 표면법이 결합된 해석기법을 이용해 이방성SynRM의 특성 해석과 최적설계를 수행하였다.

2. 본 론

2.1 분석 모델

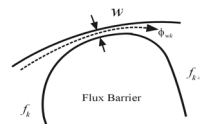
$$\phi_{wk} = B_s w l \tag{1}$$

$$\lambda_r = 4 / \sqrt{3} w l N B_s \tag{2}$$

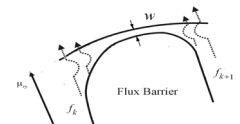
$$T = 3/2 P/2 (k_{dq} \lambda_{md} i_q - \lambda_r i_d) \tag{3}$$

그림 1의 B_s 는 립을 흐르는 자속밀도의 근사치이고 이것은 기자력이 나, 립의 길이에 관계가 있다. 그러나 철의 포화 때문에 계속 증가 할 수는 없다. 폭은 기계적인 설계로부터 선정된다. 그러나 매우 얇은 립을 만드는데 실질적인 한계는 존재한다. 립에서의 자속은 식 (1)로 주어진다. 토크 식은 식 (2)에서의 립의 자속으로 생기는 토크 손실로 식 (3)으로 변경 된다.

회전자에 적당한 이방성 재질을 사용하여 SynRM의 토크밀도와 역률은 그림 2에서 보여 지는 것처럼 상당히 증가 될 수 있다.(식 (3)에서 두 번째 항이 없어진다)



<그림 1> 립의 윤곽과 립 자속의 흐름



<그림2> 이방성 모델의 자속 흐름

2.2 유한 요소법과 프라이자흐 모델의 결합

2.2.1 SynRM의 지배 방정식

맥스웰 방정식은 다음과 같다

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o \tag{4}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{5}$$

$$\vec{B} = \frac{1}{v_0} \vec{H} + \vec{M} \tag{6}$$

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

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{7}$$

$$\vec{J}_m = v_o (\nabla \times \vec{M}) \tag{8}$$

식 (4)-(8)로부터 식(9)의 지배 방정식을 얻을 수 있다.

$$v_o (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \tag{9}$$

2.2.2 시스템 행렬

시스템 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K^{(e)}] \{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}\} = 0 \tag{10}$$

여기서, 전체 모델은 식 (11)과 같은 행렬로서 표현된다.

$$[K] \{A\} + \{F\} + \{M\} = 0 \tag{11}$$

2.3 특성해석 결과 및 분석

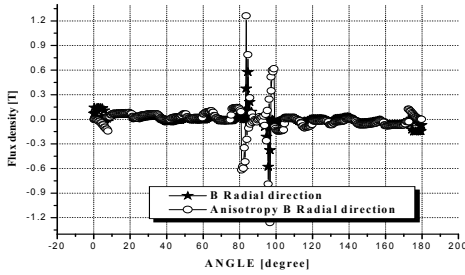
이방성 SynRM의 포화는 L_d 의 감소를 가져 올 수 있고, 등방성과 이방성 SynRM의 토크밀도, 역률, 효율에 영향을 준다. L_d 가 높은 입력 전류에서 포화에 의해 감소하고 정격 전류 범위(2A)에서 증가하더라도, L_d 는 이방성 SynRM에서 이방성 회전자 구조에 의해 감소된다. 이 변화로 인덕턴스의 비와 차는 역률과 토크밀도의 증가를 나타낸다.

그림 5, 6은 등방성과 이방성 SynRM의 radial direction과 tangential direction으로 분포된 립의 자속밀도를 각각 보여준다. radial direction 자속밀도가 각 기기의 0도에서 80도 까지 그리고 100도에서 180도까지 유사하지만 이방성 SynRM의 radial direction 자속밀도는 이방성 회전자 구조 때문에 등방성 SynRM의 자속밀도 보다 점차 높아진다. 그리고 tangential direction의 자속밀도는 각 기기의 0도에서 80도까지 그리고 100도에서 180도까지 유사하지만 이방성 SynRM의 tangential direction 자속밀도는 이방성 회전자 구조 때문에 등방성 SynRM 자속밀도보다 매우 낮음을 볼 수 있다.

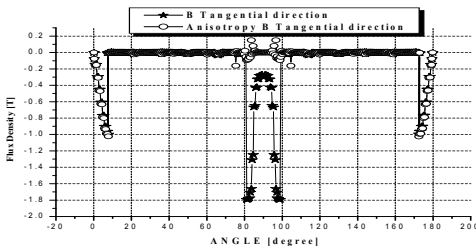
그림 3, 4는 이방성 회전자구조의 영향을 나타내고, q축의 립의 자속은 일부 위치에서는 완전히 사라진다고 할 수 있다.(0-5도, 175-180도의 각도는 제외한다)

그림 5, 6은 24슬롯과 2극을 가진 등방성과 이방성 SynRM q축의 자속분포를 보여준다.

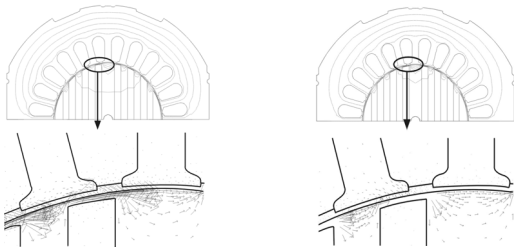
회전자 립 tangential direction의 자속은 등방성 SynRM에서 나타나지만 이방성 SynRM에서 공간 이방성이 그림 3, 4의 결과로서 만들어지기 때문에 회전자 립 tangential direction 자속은 거의 0의 값을 갖는다.



〈그림 3〉 등방성과 이방성 반지름방향 자속밀도 분포

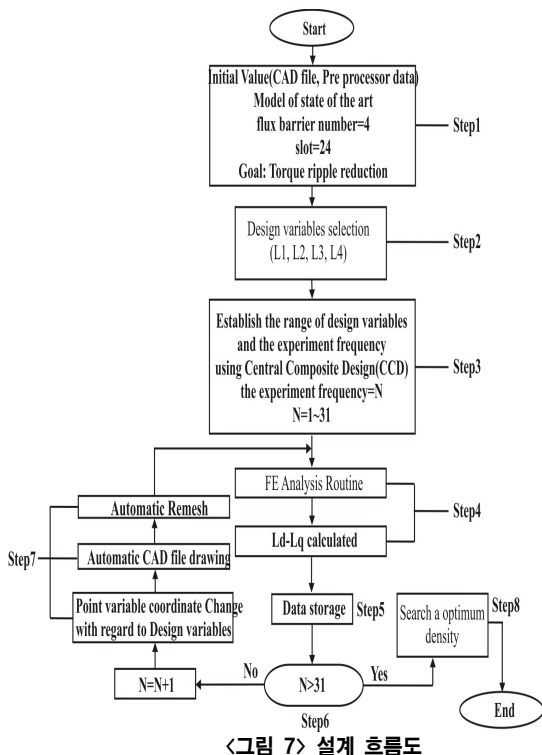


〈그림 4〉 등방성과 이방성 SynRM의 접선방향 자속밀도 분포

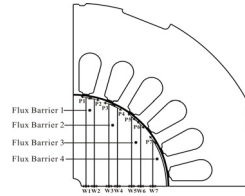


〈그림 5〉 SynRM의 q축 경로 〈그림 6〉 이방성SynRM의 q축 경로

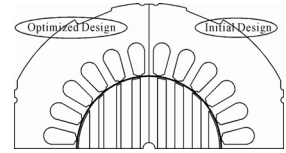
2.4 반응표면법을 이용한 최적화



〈그림 7〉 설계 흐름도



〈그림 8〉 SynRM의 디자인과 변수들과 변화 방향



〈그림 9〉 회전자의 초기 모형 최적화된 모형

그림 7은 반응표면법을 이용한 설계 흐름도를 보여준다. 회전자의 형상 좌표는 설계 변수의 조건에서 그려진다. 그리고 CAD 파일은 자동적으로 자속 장벽 폭의 변화에 대하여 다시 그려진다. 여기서 동일한 자속 장벽 수에서 회전자의 x, y좌표만 변하고 절점번호, 요소 번호, 경계 조건 등은 변하지 않는다.

〈표 1〉 설계변수의 범위(4 flux barrier 수)

Design Variables	The level of design variables				
	-2	-1	0	1	2
L1 (mm)	1.1256	2.1256	3.1256	4.1256	5.1256
L2 (mm)	0.7239	2.2239	3.7239	5.2239	6.7239
L3 (mm)	0.9290	2.4290	3.9290	5.4290	6.9290
L4 (mm)	1.6000	3.1000	4.6000	6.1000	7.6000

〈표 2〉 중심합성법을 이용한 실험 결과

h	L1	L2	L3	L4	Ld-Lq
1	2.1256	2.2239	5.4290	3.1000	12.9
2	2.1256	2.2239	2.4290	3.1000	13.1
3	2.1256	5.2239	2.4290	6.1000	14.4
...
10	3.1256	3.7239	3.9290	4.6000	14.3
11	4.1256	2.2239	2.4290	6.1000	15.2
12	4.1256	2.2239	2.4290	3.1000	14.4
13	3.1256	3.7239	3.9290	4.6000	14.3
...
29	3.1256	3.7239	3.9290	4.6000	14.3
30	5.1256	3.7239	3.9290	4.6000	12.9
31	3.1256	0.7239	3.9290	4.6000	12.4

L1: Flux Barrier1, L2: Flux Barrier2, L3: Flux Barrier3, L4: Flux Barrier4

2.5 결과 및 토론

표 1은 중심합성계획법에 의한 설계변수의 범위를 나타내며 표 2는 표 1의 설계변수를 바탕으로 유한요소해석을 수행한 반응값을 나타낸다. 표 2에 나타난 L_d , L_q 차는 유한요소법으로 구하였다.

3. 결론

제안된 특성 분석 방법은 자기 비선형 특성과 히스테리시스 현상을 가진 기기를 평가하는데 적합함을 확인하였다.

이를 통해 이방성 SynRM은 등방성 SynRM 보다 립의 자속이 줄고 토크밀도와 역률이 개선 될 수 있음을 확인하였다.

[참고 문헌]

- [1]S.B.Kwon, S.J.Park, J.H.Lee, "Optimum Design Criteria Based on the Rated Watt of a Synchronous Reluctance Motor Using a Coupled FEM & SUMT", *IEEE Transactions on Magnetics* Vol.41, No.10, pp 3970-3972, Oct.2005
- [2]J.H.Lee, "Design solutions to Minimize Iron Core Loss in Synchronous Reluctance Motor using Preisach Model and FEM", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.38, No.5, pp 3276-3278, September, 2002
- [3]J.H.Lee, D.S.Hyun, "Hysteresis Analysis for permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Preisach Modeling", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol. 35, No.5, pp.1203-1206, May 1999.