

동기형 릴럭턴스 전동기의 토크와 역률의 최대화를 위한 설계 및 해석

김원호, 김기찬, 원성홍, 안준선, 최승길*, 이주
한양대학교 전기공학과, *안산공업대학

Design and Analysis of Synchronous Reluctance Motors
for Maximum Torque and Power Factor

Won-Ho Kim, Ki-Chan Kim, Sung-Hong Won, Jun-Sun Ahn, Seung-Gil Choi*, Ju-Lee
Dept. of Electrical Engineering at HanYang Univ., *Ansan College of Technology

Abstract - In case of the synchronous reluctance motor, the torque is proportional to saliency difference and the power factor is in proportion to saliency ratio.

This paper presents the rotor design variable that has a effect on saliency difference and saliency ratio for getting a maximum torque and a power factor in the synchronous reluctance motor. To carry through the object, a number of the analysis model is reduced by DOE (Design of Experiments) and the main effects are found by the FEM (Finite Element Analysis).

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous reluctance motor, SynRM)는 회전자의 돌극 구조로 인한 릴럭턴스 토크가 발생하는 전동기로서 고정자는 유도전동기와 동일한 3상의 정현파 구조를 가지며 회전자의 구조가 간단하여 고속 또는 장시간 운전이 가능하다.

SynRM의 토크는 인덕턴스 차(L_d-L_q)에 비례하고, 역률은 인덕턴스 비(L_d/L_q)에 비례한다. 이런 요소들은 전동기의 회전자의 구조와 밀접한 연관을 가진다. 인덕턴스 차와 비의 극대화를 위해서는 최대 d축 인덕턴스와 최소 q축 인덕턴스가 필요하다. 큰 d축 인덕턴스를 얻기 위해서는 자속이 전계 극 표면을 따라 흘러야 하고, q축 자속을 적게 흘러 q축 인덕턴스를 최소화하는 방향으로 회전자를 설계해야 한다. 하지만 이와 관련된 회전자 설계 변수들의 모든 조합을 통해 나오는 많은 설계 모델들을 유한요소법을 이용해 해석하는 것은 적지 않은 시간이 소요될 뿐 아니라 우리가 원하는 설계모델을 찾을 수 없다는 가능성을 배제할 수 없다. [1][2]

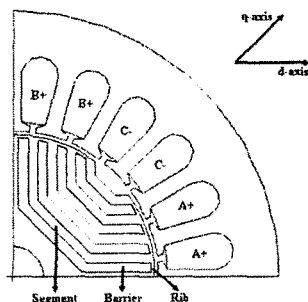
본 논문은 고정자의 내경과 외경, 축 방향 길이를 미리 선정한 세그먼트형 SynRM에서 인덕턴스에 영향을 미치는 회전자 설계 변수에 변화를 주어 어떤 것이 토크와 역률에 가장 큰 영향을 미치는지 알아보았다. 이를 위해 실험계획법을 이용하였고 설계목적함수를 인덕턴스 차와 인덕턴스 비의 최대화, 설계변수는 2수준 인자 6개와 3수준 인자 1개를 선정하였다. Main effect plot을 이용하여 토크와 역률에 공통적으로 큰 영향을 미치는 설계변수를 찾고 이를 바탕으로 전동기를 설계, 해석하고 향후 관련 전동기 설계에 반영할 수 있도록 하였다.

2. SynRM 사양 분석

2.1 기본 구조 및 공통 사양

본 논문에 사용되는 세그먼트형 SynRM의 단면도를 그림 1에 나타내었다. 회전자는 베리어와 세그먼트로 구성되어 있고 세그먼트들을 기계적으로 고정시키는 역할을 하는 리브(Rib)가 존재한다. 리브를 통해 회전자 표면을 타고 흐르는 자속량이 많아져서 L_d 의 값이 커지는 것을 막고, 제조공정의 편의성을 위하여 마지막 베리어는 리브가 없는 형상의 회전자 구조를 채택하였다. 고정자 권선은 유도전동기와 같이 정현파 분포를 갖고 3상, Y결선을 채택하였다. 회전자와 고정자의 철판재료는 S23으로 고정하였다.

표 1은 본 논문에 사용되는 전동기의 공통 사양을 나타내고 있다. 고정자의 외경과 내경, 축방향 길이는 미리 선정하였으며, 극수는 4극으로 제한하였다.



〈그림 1〉 세그먼트형 동기 릴럭턴스 전동기의 단면도

〈표 1〉 전동기의 공통 사양

항목	값	단위
고정자 외경	86	mm
고정자 내경	47	mm
사프트 반경	5	mm
축방향 길이	40	mm
상 수	3	phase
극 수	4	poles
매극매상당 슬롯수	2	개
슬롯 수	24	개

2.2 토크, 역률과 인덕턴스의 관계

전동기의 성능 평가시 중요한 요소들 중 하나인 토크와 역률은 SynRM의 페이저도를 이용하면 다음과 같은 식이 유도된다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_d i_q \quad (1)$$

$$PF = \frac{\frac{L_d}{L_q} - 1}{\frac{L_d}{L_q} + 1} \quad (2)$$

여기서 i_d, i_q 는 각각 d축, q축 전류이고, L_d, L_q 는 각각 d축과 q축의 인덕턴스이다. 식 (1)과 (2)에서 토크는 인덕턴스 차에, 역률은 인덕턴스 비의 직접적인 영향을 받는다. 위 식을 이용하여 본 논문에서는 토크와 역률 개선을 위해 인덕턴스 차와 인덕턴스 비를 동시에 높일 수 있는 회전자의 설계 변수를 제안하였다.

3. 실험 계획법을 이용한 주요인자 분석

SynRM에서 토크와 역률에 영향을 미치는 회전자의 설계변수는 여러 가지가 있다. 이들 설계변수의 조합으로 나오는 많은 설계 모델들을 유한요소법을 이용하여 해석하여 최적모델을 찾는 설계 방법은 적지 않은 시간이 소요될 뿐만 아니라 각 설계변수의 영향력 등을 정확히 알 수 없는 단점이 있다. 이에 본 논문에서는 토크와 역률을 최대화할 수 있는 설계목적함수를 정하고 이와 관련된 설계변수의 조합으로 나오는 해석모델의 개수를 실험 계획법을 이용하여 최소화하고, 이렇게 줄어든 모델들을 유한요소법으로 해석하여 목적함수에 가장 큰 영향을 미치는 주요인을 선정하였다.

절차를 하나씩 자세히 보면 먼저 설계목적함수는 인덕턴스 차와 인덕턴스 비의 최대값으로 설정하고, 설계변수는 이 설계목적함수에 영향을 미칠 것으로 예상되는 회전자의 설계인자들 중 7개를 선정하고 각각의 수준을 나누었다. 표 2에 설계목적함수와 설계변수를 정리하여 나타내었다.

다음으로 실험계획법을 이용하여 설계변수를 조합한다. 본 논문에서는 실험 계획법 중 Taguchi법을 이용하여 실험을 설계하였다. Factorial법을 이용 할시 $2^6 \times 3 = 192$ 번의 실험을 수행해야 하나 Taguchi법을 이용하면 실험횟수를 36회로 크게 줄이면서 신뢰할 수 있는 분석값을 얻을 수 있다.

이 실험설계를 바탕으로 유한요소법을 이용하여 실험을 실시하였고, 각 설계변수 조건에 따른 인덕턴스 차와 인덕턴스 비를 계산하였다. 설계변수 중 세그먼트들의 자속밀도평균은 여자전류의 값을 변화시켜서 조건에 맞추며, 인덕턴스를 계산하는 방법으로는 자속쇄교법을 사용하였다. 자속쇄교법은 자기벡터 포텐셜 \vec{A} 를 이용하여 쇄교자속수를 구한 후 이를 여자전류로 나누어서 인덕턴스를 구하게 되며 계산식은 다음과 같다.

$$\lambda = N\phi = N \int_s \vec{B} \cdot \vec{ds} = N \int_s (\nabla \times \vec{A}) \cdot \vec{ds} = N \oint_c \vec{A} \cdot \vec{dl} \quad (3)$$

$$L = \frac{\lambda}{i} \quad (4)$$

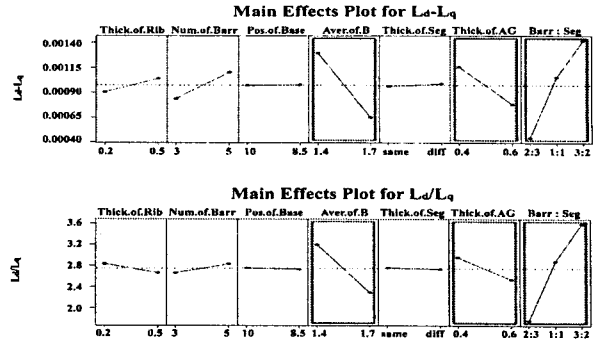
〈표 2〉 설계목적함수와 설계변수

설계목적함수 (토크와 역률의 최대화)		
Max (L _d - L _q) & Max (L _d / L _q)		
설계변수 (5인자*2수준 + 1인자*3수준)		
인자	수준	선정 배경
리브 두께	0.2mm	리브가 두꺼우면 q축의 인덕턴스가 증가되고, 얇으면 공정이 힘들 수 있고 고속운전 시 세그먼트에 가해지는 원심력에 의하여 구조적으로 리브가 비산될 수 있다.
	0.5mm	
베리어 수	3개	베리어 수가 너무 적으면 q축 자속이 많이 흐르게 되고, 베리어 수가 많아지면 회전자 기계적인 구조 때문에 제한을 받게 된다.
	5개	
베리어 바닥위치	10mm	베리어의 바닥위치에 따라 세그먼트의 길이가 변화하게 되어 d축과 q축에 흐르는 자속 패스 역시 변화하게 된다. 회전자 크기와 베리어 두께, 개수에 따라 제한될 수 있다.
	8.5mm	
세그먼트 자속밀도 평균	1.4T	세그먼트형에서는 한 세그먼트가 포화되더라도 리브와 옆 세그먼트를 통해 자속이 흐를 수 있으므로 각 세그먼트 사이의 자속밀도의 평균을 설계변수로 선정하였다.
	1.7T	
세그먼트 두께	Same	고정자의 치에 세그먼트들을 맞추기 위해 회전자 밖으로 갈수록 세그먼트의 두께를 점점 줄이면 더 많은 자속을 받을 수 있고 토크 리플을 줄일 수 있다.
	Different	
공극 두께	0.4mm	공극에서 고속회전 시 회전자 리브와 세그먼트 구조가 원심력에 견디지 못하고 팽창되어 고정자와 마찰할 수 있기 때문에 너무 작은 공극은 고려하지 않는다.
	0.6mm	
베리어와 세그먼트 두께비	2 : 3	베리어가 두꺼우면 q축 자속은 감소하지만 세그먼트가 얇아져서 포화되기 쉽다. 반면 베리어가 얇은 경우 q축 자속은 증가하지만 세그먼트가 두꺼워져 d축 자속도 증가한다.
	1 : 1	
	3 : 2	

표 3에 위의 방법을 이용하여 실시한 36회의 실험 중 인덕턴스 차와 인덕턴스 비가 각각 최대가 되는 실험의 데이터를 나타내었다. 실험을 통해 얻은 결과를 바탕으로 두 설계목적함수를 동시에 만족시킬 수 있는 설계변수를 찾기 위해 평균값을 이용한 분산분석법을 사용하였다. 그림 3은 분산분석법을 사용하여 나타낸 Main Effects Plot이다. 이를 바탕으로 결과를 분석해 보면 먼저 인덕턴스 차와 비를 동시에 향상시켜주는 변수는 영향이 큰 순으로 '베리어와 세그먼트 두께비', '세그먼트 자속밀도평균', '공극의 두께', '베리어의 수' 4개이다. '베리어와 세그먼트의 두께비'는 설계목적함수에 가장 중요한 인자이며 베리어가 세그먼트보다 15배 정도 크게 설계하는 것이 q축 자속과 세그먼트의 포화 사이의 적절한 타협점을 알 수 있다. '세그먼트 자속밀도평균' 역시 토크와 역률에 미치는 영향이 큰 인자이며 정격 구동 조건하에서 평균 자속 밀도는 포화값이 아닌 약간 낮은 값으로 설정해야 한다는 것을 확인할 수 있다. '공극의 두께'는 역시 작을수록 토크와 역률에 좋으나 기계적 강성을 고려해서 적절한 값을 찾아야 할 것이다. '베리어의 수'는 클수록 좋으나 토크에 비해 역률에는 영향력이 작음을 알 수 있다.

〈표 3〉 최대 인덕턴스 차와 인덕턴스 비의 실험결과 비교

변수	실험	Max(L _d -L _q) 실험	Max(L _d /L _q) 실험
리브 두께		0.5	0.2
베리어 수		5	3
베리어바닥 위치		10	10
자속밀도 평균		1.4	1.4
세그먼트 두께		different	same
공극 두께		0.4	0.4
베리어 : 세그먼트		3:2	3:2
d축 쇄교자속		0.0342301	0.0365018
q축 쇄교자속		0.0090285	0.0081539
정격 전류		11.9	16.8
L _d -L _q		0.002117774	0.001687375
L _d /L _q		3.791304944	4.476606286



〈그림 2〉 인덕턴스차와 인덕턴스비 각각의 주요인 분석

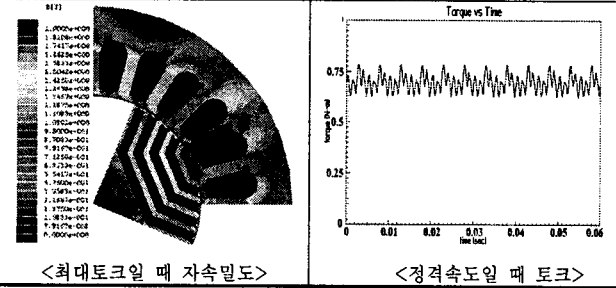
'리브의 두께'는 크게 하면 토크는 좋아지나 상대적으로 역률은 나빠진다. 리브의 두께가 두꺼워지면 q축 인덕턴스가 증가하나 d축의 측면에서도 자속을 받아들이며 d축 인덕턴스도 같이 증가하게 되어 이런 결과가 발생하였다. 향후 수준을 더 나누어 적절한 리브의 두께를 세밀히 확인할 필요성이 있다. '베리어 바닥의 위치'와 '세그먼트의 두께'는 인덕턴스에 큰 영향을 미치지 않음을 확인할 수 있다.

4. 주요인자를 이용한 최종모델 제안

토크와 효율을 동시에 높여주는 4개의 인자는 결과값을 그대로 활용하였고, 리브의 크기는 두 수준의 중간값을, 베리어 바닥의 위치는 세그먼트 개수와 두께 등을 고려하여 조정하였다. 마지막으로 세그먼트 두께는 공정의 편의를 위해 같게 설계하였다. 표 4에 모델의 사양 및 결과를 나타내었다. 스킴 등을 고려하지 않아서 토크 리플이 큰 편이나 같은 사양의 모터보다 토크 및 역률이 향상되었다.

〈표 4〉 최종 제안모델의 사양 및 결과

항목	값	항목	값
리브 두께	0.3mm	세그먼트 두께	Same
공극 두께	0.4mm	베리어와세그먼트두께비	3:2
베리어 바닥위치	9mm	상당총턴수	200턴
세그먼트자속밀도평균	1.4T	정격 전류	10.5A
베리어 수	5개	회전 속도	1000rpm
정격 토크	0.695N·m	역률	0.587



〈최대토크일 때 자속밀도〉

〈정격속도일 때 토크〉

5. 결 론

본 논문에서 SynRM의 회전자 설계변수 중 토크와 역률에 가장 큰 영향을 미치는 인자가 '베리어와 세그먼트의 두께비'이며, 나머지 인자들과 토크, 역률의 관계를 규명하고 이를 바탕으로 설계 모델을 제안하였다. 향후 토크와 역률과 관련된 중요인자들은 수준을 좀 더 세밀히 나누어 설계 시 가장 최적의 설계치를 사용할 수 있게 하는 연구가 더해져야 할 것으로 사료된다.

감사의 글

본 논문은 에너지관리공단에서 시행한 프리미엄급 고효율 단상 유도전동기 설계/해석 사업으로 수행되었음. 과제번호(2005-01-0031-3-010)

[참 고 문 헌]

[1] D.A.Staton, T.J.E.Miller, S.E.Wood, "Maximising the saliency ratio of the synchronous reluctance motor", IEE Proceedings-B, Vol. 140, No4, pp249-259 July 1993
 [2] Vagati. A., Franceschini. G., Marongiu. I., Troglia. G.P, "Design criteria of high performance synchronous reluctance motors", Conference Record of the 1992 IEEE vol. 1, pp 66-73 Oct. 1992