

반응표면법을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 고토크밀도 및 저토크리플을 위한 용량별 최적설계

최윤철¹, 문성주¹, 이중호¹

1 대전시 유성구 한밭대학교 전기공학과

Optimum Design Criteria for Maximum Torque Density & Minimum Torque Ripple of SynRM according to the Rated Wattage using Response Surface Methodology

Yun-Chul Choi¹, Sung-Ju Mun¹, Jung-Ho Lee¹

1 Department of Electrical Engineering, Hanbat National University #16-1, Yuseong-gu, Daejeon, 305-719, KOREA

Abstract - This paper deals with optimum design criteria for maximum torque density & minimum torque ripple of Synchronous Reluctance Motor (SynRM) according to the rated wattage using response surface methodology (RSM). The RSM has been achieved to use the experimental design method in combination with Finite Element Method and well adapted to make analytical model for a complex problem considering a lot of interaction of design variables. The proposed procedure allows to define the rotor optimum shape for maximum torque density & minimum torque ripple starting from an existing motor or a preliminary design.

1. 서 론

단위 부피당 효율과 토크와 같은 문제는 SynRM 성능평가에 있어서 중요한 역할을 한다[1], [2]. 이러한 특성은 회전자 철심의 폭, 자속 장벽 폭의 비 K_w 에 관련된 회전자구조에 의존하며, 이를 기준으로 한 수치해석 및 설계를 필요로 한다. 그리고 토크리플을 감소하기 위해 설계 파라미터들의 적절한 조합을 선택하는 것 또한 중요하다.

반응표면법(RSM)은 물리적 시스템의 응답연구 중에서 “최적값”을 찾는 데 유용한 통계 및 수학적 방법이다[3].

일반적으로 반응표면법(RSM) 내에서 설계변수와 출력간의 관계를 나타내기 위해 다항식 모델이 만들어지기 때문에 이 모델은 출력을 예상하는데 사용될 수 있고, 설계 최적화는 보다 더 쉽게 수행될 수 있다. 적합한 모델의 특성은 실험 데이터를 기초로 한 통계표를 확인함으로써 평가된다[4].

이미 집중권선 SynRM에 관한 두 가지 논문이 발표되었다.

첫째, 24슬롯 SynRM의 회전자 최적설계 모델을 기초로 토크리플 저감을 위해 고정자의 치 폭, 슬롯 오픈 폭, 슬롯 깊이를 설계변수로 한 고정자 설계가 있다[5]. 둘째, [5]의 고정자 최적설계를 기초로 자속장벽 수, 자속장벽 폭을 설계변수로 하여 최적설계를 수행한 회전자 설계가 있다[6]. 하지만, 이러한 두 가지 접근방법은 분포권이 아닌 집중권에 대해서 고려하였다. 본 논문에서는 24슬롯 분포권 SynRM의 전체 철심영역의 폭과 전체 자속장벽의 폭의 비인 K_w , 자속장벽의 수 그리고 SynRM 회전자의 직경을 설계 변수로 정의했다.

본 논문의 주 관점은 각각의 정격 전력(1HP, 3HP-7HP) 상태에서 회전자의 지름(66.82, 71.4, 84.95, 92.1, 101, 109.1mm: 예비설계)에 따라, 출력과 토크리플의 비교를 통하여 설계 해를 구하는 것이다. 설계 해를 평가 하는데 있어서 유한요소해석(FEA)과 반응표면법(RSM)을 결합하여 사용하였다.

2. 본 론

2.1 SynRM의 초기모델

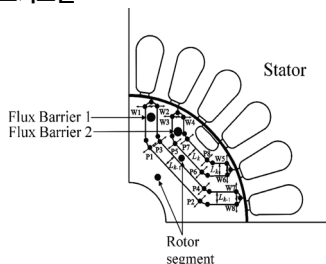


그림 1. SynRM의 설계변수와 변화 방향

본 논문에서의 정격전력은 적층길이(80mm)가 일정 할 때 회전자의 직경에 의해 정의 되어진다. 기기는 정격상태에서 역률이 84%, 효율이 82%, 3상 60Hz, 220V로 작동하는 것으로 가정한다.

그림 1은 3개의 자속장벽 수에서 자속장벽 폭에 따른 형상변화를 위한 변화점 변수와 변화방향을 보여준다. 각각 한 쌍이 되는 (W1,W8), (W2,W7),(W3,W6).....은 q축을 기준으로 하여 대칭적으로 움직인다. 그리고 P1-P8점들은 식(1)에서 자속장벽 수(r)에 따른 변수인 자속장벽 폭에 따라 변화하는 상태로 움직인다.

식(2)에 나타낸 것처럼 SynRM의 회전자 자속 장벽의 폭과 전체 철심 영역의 폭의 비 K_w 는 0.1에서 1.2까지 고려되었다. 그리고 산업응용을 위해 기계적인 제약, rib 등에 제작조건을 고려해 자속 장벽수는 3, 4, 5, 6로 수행하였다. SynRM에서, Ld 와 Lq 는 토크와 역률에 영향을 준다. 본 논문의 경우 최적화에서 돌극비(Ld/Lq)내 자속 장벽은 적정수로 증가시키면 Ld는 증가하고 Lq가 감소하여 단위 전류 당 토크가 증가한다.

$$L_k = L_{r-1}, L_{k-1} = L_{r-2}, \dots, L_{k-(n-1)} = L_{r-n} \quad (n = 2, 3, 4) \quad (1)$$

여기서, 자속장벽수(r) ($r = 3, 4, 5$), $k = r - 1$

$$K_w = \frac{\sum(W_{air})}{\sum(W_{iron})} \quad (2)$$

여기서, $\sum(W_{air})$: 전체 자속 장벽의 폭
 $\sum(W_{iron})$: 전체 철심 영역의 폭

2.2 반응표면법

RSM은 설계변수와 응답간의 관계를 찾아 구하고, 관측된 자료를 사용하여 통계적인 근사방법을 통해 최적 시스템 응답을 찾아낸다. 여기서, 설계변수에 대응되는 응답 또는 출력값은 일반적으로 실제 실험이나 컴퓨터에 의한 시뮬레이션을 통해 얻어진다.

RSM에는 많은 실험적인 설계방법이 있다. 본 논문에서 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 중심합성계획법(Central composite design : CCD)을 이용하였으며 반응표면 설계에서 가장 일반적으로 사용되는 방법이다.

<표1> 분산분석 (ANOVA)

요인	자유도	제곱합	평균제곱	F_0
회귀	k	SS_R	$SS_R/k = MS_R$	MS_R/MS_E
잔차	$n - k - 1$	SS_E	$SS_E/(n - k - 1) = MS_E$	
총	$n - 1$	S_{yy}		

통계적인 근사방법인 RSM은 항상 오차를 포함하고 있으므로 추정된 근사함수의 정도를 확인해야만 한다. 본 논문에서 추정된 근사함수의 정도를 확인하기 위해 분산분석(Analysis of variance : ANOVA)을 이용하였으며 표 1에서 n 은 실험의 총계이고 k 는 적합한 모델에 대한 설계 변수의 수를 나타내었다[6].

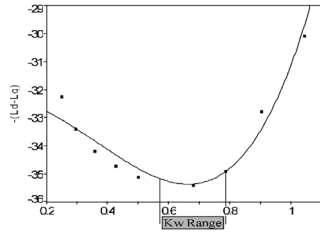
2.3 최적화 과정

그림 3는 전체 설계 흐름을 보여준다.

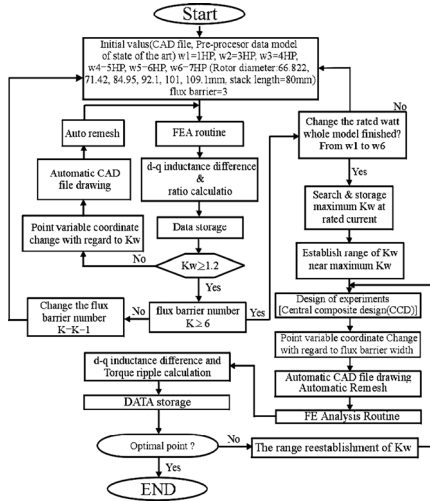
회전자의 모양은 K_w 의 값에 따라 그려진다. 림은 기계적인 제약으로 값이 고정 되어있고, 새로운 CAD 파일은 그림 4에서 나타나는 것처럼 K_w 와 자속장벽 수의 변화를 고려하여 다시 그려진다.

그 후 자동 메쉬 과정이 있다. 메쉬가 되어질 때, 노드의 수, 요소의 수, 영역, 경계상태 등은 변하지 않고, 자속장벽의 수가 같을 경우, 회전자의 x, y 의 값만 변경된다. 자동으로 형상변화에 따르는 CAD파일을 작성하고 선처리 작업을 하는 프로그램을 설계프로그램에 포함하여 설계시간을 단축 할 수 있다. 또한, 이러한 절차는 각각의 K_w 에 대한 기기의 한계치까지 실행되면, 자속 장벽수를 변화시킨다.

각각의 정격용량에 대한 설계해석은 중심합성법을 통해 얻을 수 있다. 그리고 K_w 의 범위는 그림 2에서 나타낸 것처럼 최대의 인덕턴스의 차 ($L_d - L_q$) 부근에서 설정한다. 결과적으로, 이러한 과정을 통해 최대 토크밀도와 최소 토크리플에 대한 최적화가 수행된다.



〈그림 2〉 4HP(84.95mm)에 대한 K_w 의 범위



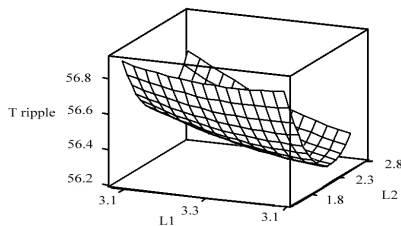
〈그림 3〉 설계 흐름도

2.4 설계결과 및 분석

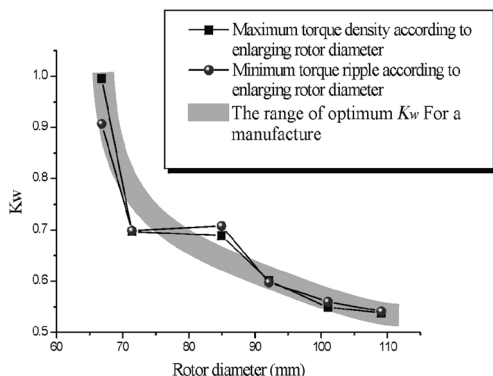
중심합성법의 실험적인 설계와 관련된 반응값은 유한요소 해석을 기초로 한 시뮬레이션을 통해 얻을 수 있고 이 값들은 표2, 3에 나타난다. 그리고 7HP의 L1, L2에 대한 반응표면 예를 그림 4에서 나타낸다.

그림 5은 회전자 직경(1HP-7HP)이 증가함에 따른 K_w 값의 결과를 나타내고 있다. 각각의 정격용량(1HP-7HP)과 정격전류의 경우, 최대 토크 밀도와 최소 토크리플의 값은 회전자의 직경이 감소함에 따라 $K_w=1$ 에 거의 가까워짐을 알 수 있다. 즉, 이 값들은 회전자 직경과 정격용량이 증가함에 따라 $K_w=0.5$ 에 가까워지고, 자속장벽의 수는 늘어난다는 것을 알 수 있다. 그리고 인덕턴스의 차와 토크리플을 고려한 설계 해는 표4에서 나타내고 있다.

설계 해는 회전자의 지름과 연관 되어 있고, 유사한 특성의 모터 설계에 있어서 중요한 자료가 될 수 있다.



〈그림 4〉 7HP의 L1, L2에 대한 반응표면 예 (6개의 자속장벽)



〈그림 5〉 회전자 직경의 증가에 따른 K_w

〈표2〉 7HP에 대한 설계변수의 범위

설계변수	설계변수의 범위				
	-2	-1	0	1	2
L1 (mm)	3.083	3.183	3.283	3.383	3.483
L2 (mm)	1.483	1.783	2.083	2.383	2.483
L3 (mm)	1.483	1.783	2.083	2.383	2.483
L4 (mm)	1.483	1.783	2.083	2.383	2.483
L5 (mm)	2.948	3.048	3.148	3.248	3.348

〈표3〉 7HP에 대한 중심합성계획법을 이용한 실험 결과

	L1	L2	L3	L4	L5	L_d-L_q	Torque Ripple	K_w
1	3.383	1.783	1.783	2.383	3.248	58.68	57.0	0.493
:	:	:	:	:	:	:	:	:
5	3.183	2.383	1.783	1.783	3.048	58.47	56.8	0.483
6	3.283	2.083	2.683	2.083	3.148	59.09	56.0	0.541
7	3.283	2.083	2.083	2.083	3.148	58.80	56.4	0.505
:	:	:	:	:	:	:	:	:
11	3.383	1.783	2.383	1.783	3.248	58.94	56.4	0.507
12	3.383	2.383	1.783	2.383	3.048	59.44	56.6	0.538
:	:	:	:	:	:	:	:	:
32	3.283	1.483	2.083	2.083	3.148	57.68	57.0	0.453

〈표4〉 각 정격용량의 설계 해

Rated watt	L_d-L_q	Torque Ripple (%)	K_w (Ripple)	Diameter (mm)	Rated Current (A)	Flux barrier
1hp	178.7	37.4	0.996 (0.915)	66.822	2	3
3hp	114.3	66.2	0.697 (0.697)	71.4	6	3
4hp	35.54	26.5	0.689 (0.708)	84.95	11	5
5hp	86.69	26.8	0.601 (0.598)	92.1	14	5
6hp	69.77	40.5	0.549 (0.560)	101	17	6
7hp	59.45	56	0.538 (0.541)	109.1	20	6

3. 결 론

자속장벽의 수, K_w , 정격용량 그리고 특히 회전자의 직경에 따른 SynRM의 토크밀도, 역률, 토크리플과 관련된 설계 방법이 제안 되었다.

본 논문은 위의 조건 하에서 회전자를 변형시키고 인덕턴스의 차와 토크리플의 비고를 통하여 설계 해를 찾아냈다. 또한 형상변화에 따르는 자동 CAD파일 작성프로그램을 개발하고 이에 따르는 자동 선처리 프로그램의 개발을 통해 설계과정 시간을 단축하였다. 기존의 설계로부터 시작해, 최적의 설계 해를 선택하였다. 그리고 자속장벽, K_w 는 회전자의 지름과 관련해서 정해질 수 있다는 것을 확인했다.

기기의 최적화 방법으로 반응표면법의 접근은 분포권 24슬롯 SynRM의 최적설계의 결과에 의해 입증되었다. 따라서 반응표면법은 SynRM과 다른 기기의 최적 설계를 위해 좋은 수단으로 고려되어질 수 있다.

〈참 고 문 헌〉

- [1] J. H. Lee, "Efficiency Evaluations of Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM and Preisach Modeling", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 39, No. 5, pp 3271-3274, September, 2003.
- [2] J. H. Lee, "Design Solutions to Minimize Iron Core Loss in Synchronous Reluctance Motor using Preisach Model and FEM" IEEE Transaction on Magnetics, Vol.38, No. 5, pp 3276-3278, September, 2002.
- [3] R. P. Tomas, Statistical methods for Quality Improvement. New York: Wiley, 2000.
- [4] 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.
- [5] S. J. Park, S. J. Jeon, J. H. Lee, "Optimum design criteria for a synchronous reluctance motor with concentrated winding using response surface methodology", Journal of Applied Physics(MMM), vol.99, issu 8, April. 2006.
- [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.