

유한요소법을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 용량에 따른 회전자 구조설계와 SUMT를 이용한 최적설계

권선범*, 김기복, 이종호
한밭대학교 전기공학과

Optimum Design Criteria based on Capacity of Synchronous Reluctance Motor Using a Coupled FEM & SUMT

Sun-Bum Kwon*, Gi-Bok Kim, Jung-Ho Lee
Dept. of Electrical Eng., Hanbat National University

Abstract - This paper deals with an automatic optimum design based on capacity for a synchronous reluctance motor (SynRM). The focus of this paper is the design relative to the output power on the basis of rotor shape of a SynRM in each capacity. And optimization algorithm is used by means of sequential unconstrained minimization technique(SUMT). The coupled Finite Elements Analysis (FEA) & Preisach model have been used to evaluate nonlinear solutions. The proposed procedure allows to define the rotor geometric dimensions according to capacity starting from an existing motor or a preliminary design.

Key words : SUMT, SynRM, Rotor Optimum Design, FEA, Torque Density

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 유도전동기와 비교해서 구조가 간단하고, 견고하며, 회전자 권선이 없어 동손이 적고, 회전자 파라미터의 영향은 받지 않는다. 단위 부피당 효율과 토크와 같은 문제는 SynRM 성능평가에 중요하다. 이러한 특성은 회전자 철심의 폭, 자속 장벽 폭의 비 K_w 에 관련된 회전자 구조에 의존하며, 이를 기준으로 설계해야한다. 만약 K_w 가 0.5이면, 최대 출력 토크를 얻을 수 있다는 연구가 있다[1],[2]. 그리고 회전자 전체 철심의 폭과 자속 장벽 폭의 비 K_w 의 영향을 다룬 연구가 발표되었다[3]. 참고문헌 [1]은 Axsally laminati type을 대상으로 조사하였고, 참고문헌 [2]는 6개의 자속 장벽을 대상으로 연구를 수행하였다. 참고문헌 [3]은 340W 가전용 SynRM의 설계 해를 구하였고 그때의 K_w 는 1이다. 따라서 K_w 는 SynRM의 회전자에 관해서 모든 용량과 용도에 적용되는 고정된 값은 아니다. 본 연구는 순차비제약 최소화기법(SUMT)과 FEA가 결합된 기법을 이용하여 SynRM에 대해 용량별로 설계 기준 산정을 목표로 한다. 본 논문에서 SynRM의 회전자 철심 폭, 전체적인 자속 장벽폭의 비 K_w 는 설계변수이다. 본 논문의 주관점은 첫째로 각각의 성능(3.5HP - 8HP)을 대상으로 회전자 형상변화에 따른 출력의 비교를 통하여 설계를 구하고, 둘째 회전자 형상의 변화에 따른 자동 ACAD 파일 생성과 자동요소분할을 포함한 자동선처리(pre-process)기법 개발이다. 본 논문에서의 최적화 알고리즘은 순차비제약 최소화기법(SUMT)을 사용하였다.

2. 지배방정식 및 시스템 행렬

2.1 해석모델의 지배방정식

맥스웰 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 \tag{1}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{2}$$

$$\vec{B} = \frac{1}{\nu_0} \nabla \times \vec{M} \tag{3}$$

여기서, \vec{M} 은 자계강도 \vec{H} 에 대한 자성체의 자화의 세기이며, M 은 프라이자흐 모델로부터 구해진다. 자기벡터포텐셜 \vec{A} 와 등가자화전류 \vec{J}_m 은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{4}$$

$$\vec{J}_m = \nu_0 (\nabla \times \vec{M}) \tag{5}$$

식 (1)-(5)로부터 지배방정식은 식 (6)과 같이 된다.

$$\nu_0 (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \tag{6}$$

2.2 System Matrix

시스템 방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$[K^{(e)}]\{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}\} = 0 \tag{7}$$

여기서,

$$K_{ij}^{(e)} = \frac{\nu_0^{(e)}}{4 \Delta^{(e)}} (c_{ie} c_{je} + d_{ie} d_{je})$$

$$F_i^{(e)} = - \Delta^{(e)} \frac{N_i}{3S}$$

$$M_i^{(e)} = \nu_0^{(e)} (M_x^{(e)} d_{ie} + M_y^{(e)} c_{ie})$$

이다. 따라서, 전체 모델은 식 (8)과 같은 행렬로서 표현된다.

$$[K]\{A\} + \{F\} + \{M\} = 0 \tag{8}$$

2.3 프라이자흐 모델의 적용

전력기기에 대한 프라이자흐 모델링은 히스테리시스 특성 해석을 위해 좋은 방법으로 확인되었다[6].

본 논문의 프라이자흐 모델링에 M-H DATA가 B-H DATA를 대신하여 사용된다.

프라이자흐 모델은 M-H관계를 사용하여 모든 히스테리시스 현상에 있어 인가자계와 자화량 사이에는 위상차가 있기 때문에 벡터적 해석을 필요로 한다. 그러나 벡터 해석은 복잡하며 오차를 피할 수 없다. 그러므로 회전기의 해석에 대한 새로운 알고리즘 개발이 필요하다.

회전자는 입력자계 각 θ 를 따라 동기적으로 회전한다.

따라서 고정자의 영역은 x 축, y 축에 대해서 교번자계로 가정할 수 있으며, 회전자의 B와 H는 상수이며, x 축과 y 축에 대해서 또한 교번자계이다.

인가자계와 자화 사이의 각은 x, y 축에 위에서는 0 혹은 π 이다. 따라서 회전기기에 대한 프라이자흐 모델은 식 (9)에서 볼 수 있는 바와 같이 스칼라 모델로서 표현될 수 있다.

$$M(t) = \int \int_{\alpha > \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (9)$$

$$= \int \int_{S^+(\theta)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \int \int_{S^-(\theta)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

보다 편리한 계산을 위하여 식(10)과 같이 에버렛 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다.

$$E(\alpha, \beta) = \int \int_{\alpha, \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (10)$$

3. Design Strategy

3.1 디자인 알고리즘과 모델

모터 디자인은 인덕턴스 값과 모터 성능 결과를 평가하기 위하여 회전자 모양에 정확한 조사를 요구한다. 본 논문에서 우리들은 명백히 명시된 디자인 문제의 관점에서 가장 좋은 것을 발견하는 것을 고려하는 모터의 설계 최적화를 위해 자동적인 진행을 제안한다. 이 진행은 회전의 안쪽과 바깥쪽 직경 치수관계의 정의를 내리는 절차를 사용하며 현존하는 모터 또는 얻어진 기본 설계로부터 시작하여 회전자 기하학적 차원들을 정제하는 것을 허락한다. 프로그램에 의한 수학적 기법인 최적화는 자동적인 과정으로 FEA를 통합한다.

K_w 는 자속장벽의 수와 함께 출력에 관계된 변수이다.

$$K_w = \sum(W_{air}) / \sum(W_{iron}) \quad (11)$$

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

그림 1에서 W1-W10의 점들은 화살표 방향에 따라 움직이며 자속의 흐름경로를 결정한다. 각각 한쌍이 되는 (W1, W10), (W2, W9), (W3, W8)은 q축을 기준으로 하여 대칭적으로 움직인다. 그리고 P1-P10 점들은 유한요소법에서 요소면적 계산에 의하여 결정된 K_w 를 고려한 상태로 움직인다. 본 논문에서는 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, 6 그리고 7로 수정하였다.

그림 2는 전체적인 설계 흐름도이다.

회전자의 모양은 K_w 를 고려하여 그려진다. rib들은 기계적인 문제 때문에 고정된 값을 가지고 있다. 그림1에서 보여진 것과 같이 새로운 CAD 파일은 자속 장벽을 자동으로 K_w 의 변화에 관해서 다시 그려지며, 자동적으로 요소분할을 수행한다. 각각의 K_w 에 따른 인덕턴스 차와 비의 값이 저장된다. 각각의 K_w 를 기계의 기계적 제약시간이 도달하고 자속 장벽의 수가 변화될 때까지 이 진행은 계속된다. 각각의 용량에서의 설계해는 각각의 정격전류에서 얻는다. 자속장벽 수 3인경우의 K_w 에 따른 모양 변화의 예를 보여준다[5].

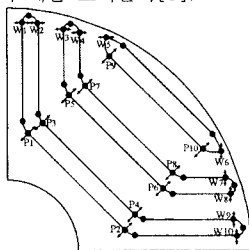


그림 1. 형상변화를 위한 변수 점과 방향

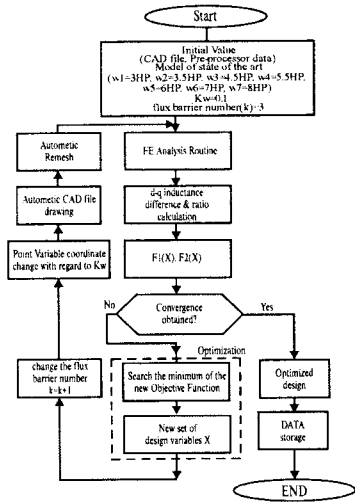


그림 2. 설계 흐름도

3.2 Design Result and Discussion

그림 3, 4는 수많은 해석결과 중 자속 장벽 K_w , 전류 그리고 자속 장벽의 수(3.7)에 따른 SynRM (4.5HP)의 인덕턴스 차이 특성 예를 보여준다. 그림 4는 높은 자속 장벽의 수로 인해 철 폭(K_w 의 증가)의 감소에 의한 포화가 원인이 되어 인덕턴스 차의 급격한 감소가 야기 되는 것을 보여준다.

그림 5는 각각의 정격 전류와 자속 장벽의 수 4에서 각 용량의 K_w 에 따른 인덕턴스 차 특성을 보여주며, K_w 가 0.6- 0.8사이에서 적정치가 나타남을 알 수 있다. 또한 다른 자속장벽의 수(3, 5, 6, 7) 경우에 대하여 유사한 특성을 보인다.

그림 6, 7은 각각의 정격 전류에서 K_w 와 각 용량별로 자속 장벽의 수에 따른 인덕턴스 차와 비 특성을 보여준다. 각 용량 3HP, 3.5HP, 4.5HP(회전자 직경 71.4 ϕ)는 최대 인덕턴스 차가 자속 장벽 3인 경우이고 $K_w = 0.68$, 그리고 최대 역률의 인덕턴스 비율이 자속 장벽 3인 경우로 $K_w = 0.68$ 이다. 용량 5.5HP, 6HP, 7 HP, 8HP(회전자 직경 85.75 ϕ) 경우 각각 정격 전류, 최대의 인덕턴스 차가 자속 장벽 5인 경우이고 $K_w = 0.69$. 그리고 최대 인덕턴스 비는 자속 장벽 5인 경우 $K_w = 0.69$ 로 나타났다. 인덕턴스 차 비를 고려하여 설계해는 TABLE 1에 나타내었다. 설계해는 회전자 직경에 관련되어 나타나는 것으로 분석되었고, 모터 디자인에 중요한 데이터가 될 수 있을 것으로 사료된다.

그림 8, 9는 4.5HP, 7HP의 설계해 예를 보여준다.

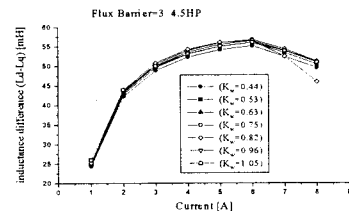


그림 3. K_w , 전류 그리고 자속 장벽 3(4.5HP)에 따른 인덕턴스 차의 특성

TABLE 1. 정격전류에서의 각 용량별 설계

OutPut	Ld-Lq	Ld/Lq	K_w	Flux Barrier
3HP	59.1	4.6	0.6867	3
3.5HP	54.9	5.1	0.6803	3
4.5HP	51.3	5.0	0.681	3
5.5HP	68.9	4.4	0.6985	5
6HP	54.7	4.3	0.6954	5
7HP	28.5	4.5	0.6903	5
8HP	23.27	4.6	0.6919	5

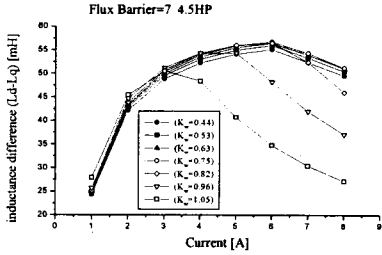


그림 4. K_w 전류 그리고 자속 장벽 3(4.5HP)에 따른 인덕턴스 차 특성

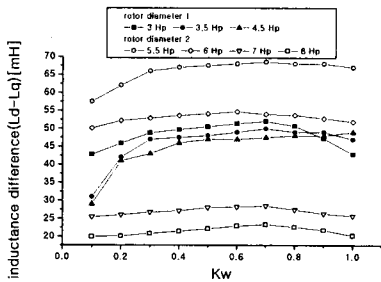


그림 5. 정격전류와 정격와트에 대한 K_w 와 자속장벽 3에 따른 인덕턴스 차 특성

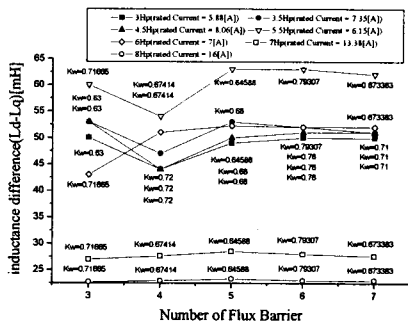


그림 6. 정격전류와 정격와트에 대한 자속장벽의 숫자와 K_w 에 따른 인덕턴스 차 특성

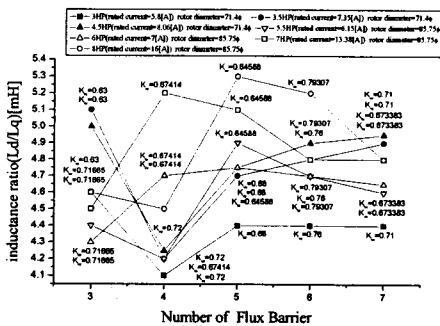


그림 7. 정격전류와 정격와트에 대한 자속장벽의 숫자와 K_w 에 따른 인덕턴스 비 특성

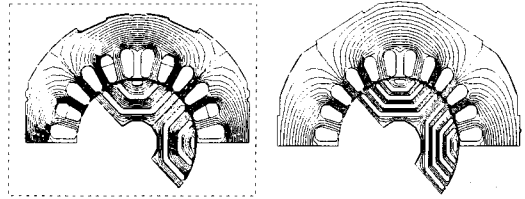


그림 8. 3.5HP SynRM 디자인 해석에 대한 d축 자속 흐름

그림 9. 7HP SynRM 디자인 해석에 대한 d축 자속 흐름

4. 결 론

본 논문에서는 용량을 기준으로 자속장벽 수에 따른 SynRM과 K_w 설계 해를 구하였다. 또한 자동 ACAD 파일 생성과 자동요소분할을 포함한 자동선처리(p re-process)기법을 개발하였다. 순차비제약 최소화기법(SUMT)을 사용하여 각 용량별 설계 해가 결정되었고, 회전자 직경이 K_w 와 Flux Barrier 수를 결정하는 요소임을 확인하였다.

REFERENCES

- [1]Takayoshi Matsuo, Thomas A.Lipo, Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine, IEEE Transaction on Energy Conversion, Vol.9, No.2, pp 359-365, June 1994.
- [2]Hiroyuki Kiriya, Shinichiro Kawano, Yukio Honda, Toshiro Higaki, High Performance Synchronous Reluctance Motor with Multi-flux Barrier for the Appliance Industry, IEEE Industry Application vol. 1, pp. 111-117, 1998.
- [3]Jung Ho Lee, Design and Efficiency Characteristic Test of 340W Home Appliance Synchronous Reluctance Motor, Transaction of KIEE, Vol. 52B, No. 2, Feb., 2003.
- [4]J. H. Lee, D. S. Hyun, Effect of Magnet on Ld and Lq Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor , *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 35, No. 3, pp1199-1202, May, 1999.
- [5]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, pp3276-3278, September, 2002.
- [6]J. H. Lee, D. S. Hyun, Hysteresis Analysis for the Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Preisach Modelling , *IEEE Trans. on Magn.*, Vol. 35, No. 3, pp1203-1206, May, 1999.
- [7]D. H. Everett, A general approach hysteresis, Part III, A formal treatment of the independent domain model of hysteresis , *Trans. on Faraday Soc.*, Vol. 50, pp 1077-1096, 1954[1].