

프라이자흐 모델이 결합된 유한요소 해석을 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 철손 최소화 회전자 구조 설계

이대동*, 이민명, 심재명, 이준호
한밭대 전기공학과

Design Solutions to Minimize Iron Core Loss in Synchronous Reluctance Motors Using Preisach Model & FEM

D. D. Lee*, M. M. Lee, J. M. Sim, J. H. Lee
Dept. of Electrical Eng., Hanbat National University

Abstract- This paper deals with an automatic design procedure for the minimization of iron core loss in a synchronous reluctance motor (SynRM). The focus of this paper is the design relative to hysteresis loss on the basis of rotor shape of a SynRM in the same torque density.

The coupled Finite Elements Analysis (FEA) & Preisach model have been used to evaluate the iron core loss with the rotor shape. The proposed procedure allows to define the rotor geometric dimensions starting from an existing motor or a preliminary design. The iron loss has been reduced with a rotor design variation.

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(Synchronous Reluctance motor :SynRM)는 유도전동기와 비교해서 구조가 간단하고 견고하며 회전자 권선이 없다는 장점이 있다.

단위부피당 토크 및 효율 등은 전기 기기의 성능 평가에 중요하다. 이러한 특성은 기기의 손실과 포화의 영향을 받으므로 SynRM의 설계에 앞서 정밀한 수치 해석이 필요하다[1]-[4].

SynRM의 고속응용에 있어 전력손실의 주원인은 철손이다.

본 논문은 프라이자흐 모델과 유한요소법(FEM)이 결합된 해석기법을 이용한 SynRM 설계과정을 다룬다.

본 논문에 있어 회전자 전체 철심영역의 폭에 대한 전체 자속장벽의 폭의 비(Kw)는 0.46으로 하였다.

비 Kw는 토크와 관련된 중요한 요소이다. 비 Kw는 모든 회전자의 변화된 형상에 적용되는 고정된 값으로 수행했으며, 따라서 설계는 같은 토크조건하에서 수행되어진다.

본 논문의 주 관점은 첫 번째로 위 조건하에서 회전자 형상변화에 따른 히스테리시스 손실의 비교를 통한 철손 최소화 설계치를 찾는 것이고, 둘째로는 회전자 형상의 변화에 따른 자동 ACAD 파일 생성과 자동 유소분할을 포함한 자동선처리(Pre-Process)기법개발이다.

히스테리시스 총손실과 그 특성은 각각의 회전자형상 SynRM에서 정량적, 정성적으로 분석되어진다.

2. 프라이자흐 모델 결합된 유한요소해석

A. SynRM의 지배 방정식

지배방정식은 다음과 같이 쓸 수 있다.

$$v_0(\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \vec{J}_m \tag{1}$$

B.시스템 행렬

시스템 행렬은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$[K^{(e)}][A^{(e)}] + [F^{(e)}] + [M^{(e)}] = 0 \tag{2}$$

여기서,

$$K_{ij}^{(e)} = -\frac{v_0^{(e)}}{4d^{(e)}}(c_{ie}c_{je} + d_{ie}d_{je})$$

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

$$M_i^{(e)} = v_0^{(e)}(M_x^{(e)}d_{ie} + M_y^{(e)}c_{ie})$$

그 전체 모델에 대한 시스템 행렬은 다음과 같이 표현되어진다.

$$[K](A)+(F)+(M) = 0 \tag{3}$$

C. 프라이자흐 모델의 적용

프라이자흐 모델은 히스테리시스 현상을 가장 정밀하게 수치모사 가능한 모델로서 세계적으로 많이 연구되고 있다. [5]-[6]

본 논문의 프라이자흐 모델은 M-H관계를 사용하였다.

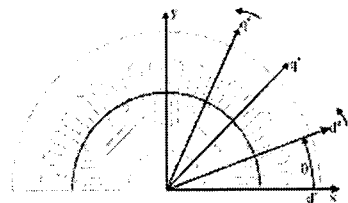


Fig. 1 Rotating(e), stationary(s),x,y axis

모든 히스테리시스 현상에 있어 인가자계와 자화량 사이에는 위상차가 있기 때문에 벡터적 해석을 필요로 한다. 그러나 벡터해석은 복잡하며 오차를 피할 수 없다. 그러므로 회전기기의 해석에 대한 새로운 알고리즘 개발이 필요하다.

회전자는 그림 1에서 볼 수 있는 바와 같이 입력자계 각 θ 를 따라 동기적으로 회전한다.

따라서 고정자의 영역은 x축 y축에 대해서 교번자계로 가정할 수 있으며 회전자의 B와 H는 상수이며 x축과 y축에 대해서 또한 교번자계이다.

인가자계와 자화 사이의 각은 x, y축에 위에서는 0 혹은 π 이다.

따라서 회전기기에 대한 프라이자흐 모델은 식 5에서

볼 수 있는 바와 같이 스칼라 모델로서 표현되어질 수 있다.

$$M(t) = \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (4)$$

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

보다 편리한 계산을 위하여 식 6와 같이 에버렛 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다. [7]

$$E(\alpha, \beta) = \int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (5)$$

3. 설계 과정

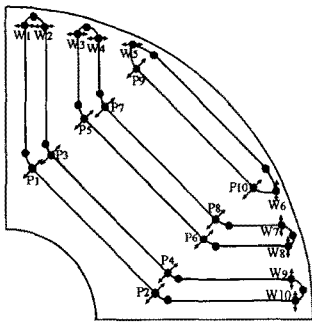


Fig. 2 point variables and direction of shape change

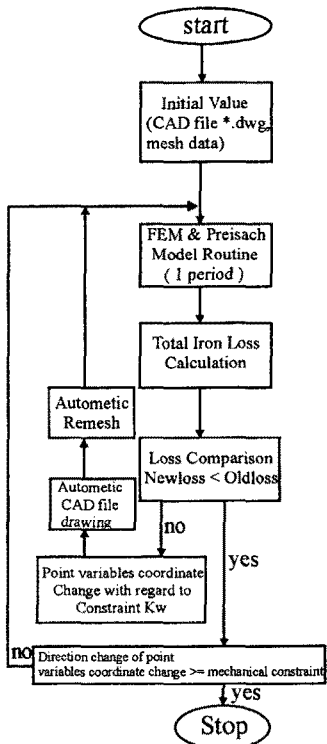


Fig. 3 Flow chart of total design procedure

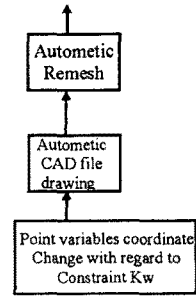


Fig. 4 Automatic CAD file drawing and mesh generation

그림 2는 형상변화 방향과 변화점을 보여주고 그림 3은 총 설계흐름도이다.

그림 2에서 보는 바와 같이 공극에서의 자속 흐름을 결정짓는 점 W1 - W10 은 화살표 방향에 따라 움직인다.

각 쌍 (W1,W10), (W2,W9), (W3,W8)...은 q축을 기준으로 대칭적으로 움직인다.

그리고 P1-P10 의 점들은 비 Kw의 제약조건을 만족시켜주도록 움직인다.

립은 기계적 강도 문제 때문에 고정된 값(0.5mm)을 유지한다.

그림 4에서 볼 수 있는 바와 같이 변화점의 좌표가 자동적으로 변화함에 따라 새로운 CAD 파일이 생성되어진다. 그리고 자동 선 처리 과정이 뒤따른다.

이러한 선 처리 과정에 있어 회전자의 x, y 좌표 데이터만 변할 뿐 절점번호, 요소번호, 영역, 경계조건, 등은 변하지 않는다.

SynRM의 총 히스테리시스 손실은 그림 5와 식 6에서 계산되어진다.

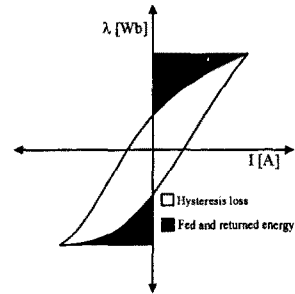


Fig. 5 Energy state of the hysteresis loop

$$W_{1cycle} = \text{Hysteresis - Loss}_{1cycle} = \int_{1cycle} id\lambda \quad (6)$$

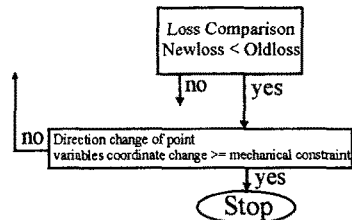


Fig. 6 Loss comparison and direction change of point variables

히스테리시스 손실에 대한 현재값과 과거값에 대한 비교가 수행되어지고 만약 과거값이 현재값보다 크면은 변화점의 방향은 변화되어진다.

이러한 과정은 그림 6에서 볼 수 있는 바와 같이 기기의 기계적 제약 조건에 다다를때까지 계속 되어진다.

4. 해석결과

그림 7은 각각의 형상에 따른 총히스테리시스 손실을 보여준다. 이것은 해석순서는 아니며 case 3은 회전자의 초기형상이다.

그림 7에서 볼 수 있는 바와 같이 case 1은 최소손실값 0.53059(J/1 cycle)를 나타냈으며 case6은 최대손실값 0.58014(J/cycle)를 나타냈다.

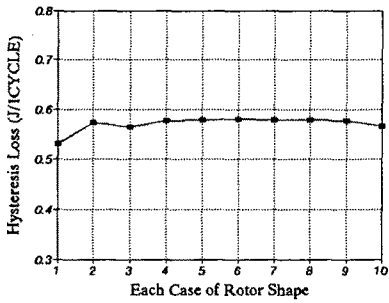


Fig. 7 Total hysteresis loss of each rotor shape

그림 8, 9는 case1과 case6의 회전자 형상과 자속선도를 보여준다.

설계는 2[A], 25[Hz]에서 수행되어졌다. 따라서 저주파인 관계로 SynRM의 와전류 손실은 고속시에 비해 상당히 작으며 무시할 수 있다. 그림 8은 요소분할 형상과 요소번호 962를 보여준다. 그림 9는 case1과 case6에 있어 요소 962의 히스테리시스 특성을 보여준다.

그림 9 (a)의 히스테리시스 손실은 235.3850(J/m³), 그림 9(b)의 손실은 236.4314(J/m³)이다. 이 결과는 그림 7의 결과와 유사성을 보여준다.



Fig. 8 Flux plot and shape of case1

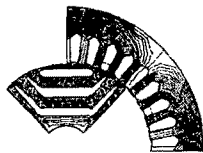


Fig. 9 Flux plot and shape of case6

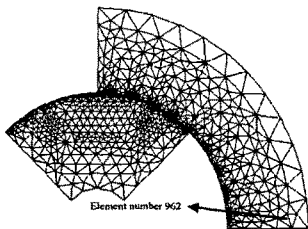
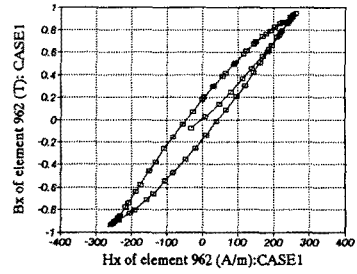
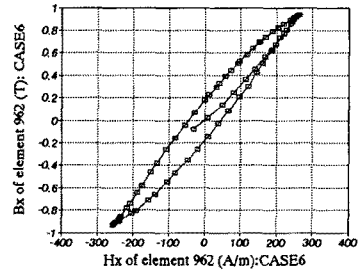


Fig. 11 Mesh shape and element number 962



(a)



(b)

Fig. 12 B-H loop of element 962 in case1 (a) and case6(b)

5. 결론

자기적 비선형성을 가진 기기의 히스테리시스 손실에 관련된 설계기법이 제안되었다. 고정된 Kw하에서 형상 변화에 따른 히스테리시스 손실비교를 통해 설계해가 결정되어졌다.

제한된 기법에 의해 각각의 총 히스테리시스 손실과 특성이 정량적으로 분석되어졌으며, 초기설계 모델로부터 철손 최소화 회전자 형상을 결정지을 수 있었다.

[참고 문헌]

- [1] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM", IEEE Trans. on Magn., Vol. 34, No. 5, pp2 62 9-2632, September, 1998.
- [2] 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.
- [3] J. H. Lee, J.C. Kim, I. S. Jung, D. S. Hyun, Vector Control Scheme of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss, IEEE Trans. on Magn., Vol. 34, No. 5, pp3522-3525, September, 1998.
- [4] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Hysteresis Modeling of Synchronous Reluctance Motor considering PWM Input Voltage", Journal of Physica B, Vol. 275, pp238-247, January, 2000.
- [5] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST
- [6] I. D. Mayeroyz, Mathematical Models of Hysteresis, Springer, 1991.
- [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 pp1077-1096, 1954.