

철손을 고려한 동기형 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석

이중호, 김정철, 현동석
 한양대학교 전기공학과
 LG전자 생활시스템 연구소

Finite Element Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss

Jung-Ho Lee, Jung-Chul Kim, Dong-Seok Hyun
 Dept. of Electrical Engineering, Hanyang University, Seoul, 133-791, Korea
 Living System Lab., LG Electronics Inc., Seoul 153-023, Korea

Abstract - A finite element analysis for a synchronous reluctance motor (SynRM) is presented with emphasis on the effect of saturation and iron losses. Preisachs model, which allows accurate prediction of iron losses, is adopted in this procedure to provide a nonlinear solution. This technique provide significant properties of proposed SynRM under the magnetic saturation and iron losses effect.

1. 서론

동기형 릴럭턴스 전동기는 적절한 설계에 의해 역률을 높일 수 있고, 단위부피당 토크가 유도 모터 보다 월등하다는 장점이 있어 현재 많은 연구가 이루어지고 있다 [1][2].

동기형 릴럭턴스 전동기의 회전자 구조는 돌극 구조를 가지며, 토크는 d축, q축 인덕턴스의 차(Ld - Lq)에 직접 관계되고, 최대역률은 두 인덕턴스의 비(Ld/Lq)에 크게 의존한다. 따라서 두 회로 정수는 전동기의 특성에 큰 영향을 주며, 특히 제어시 이들 회로정수의 정량적 해석은 필수적이라 하겠다. 림(rib)과 고정자 치부분에서 발생하는 자기적 포화 현상은 회로정수의 변화를 야기한다. 즉, 높은 돌극비에서 q축은 자기적 포화현상이 적은 반면, 경격운전시 높은 퍼미언스의 d축은 자기적 포화가 높게 된다. d축 기전력 여자시 자기적 포화현상은 고정자 요크, 치, 회전자의 림에서 야기되며, 모터의 토크, 효율, 역률에 영향을 주는 Ld 값은 심지어는 50%까지 떨어지게 되는 경우도 있다

따라서 동기형 릴럭턴스 전동기의 설계 및 제어시 비선형 해석에 의한 자기포화 현상의 고려는 필수적이라고 할 수 있다.

유한요소법과 같은 분포정수형 해석은 자기적 비선형성 및 복잡한 형상의 전동기를 비교적 정확하게 해석할 수 있는 장점을 지니고 있으며, 이미 동기형 릴럭턴스 전동기에 대한 정특성 해석연구는 많이 진행되어 있다.

고속영역에서 철손은 동기형 릴럭턴스 전동기의 주요 손실의 원인이 된다. 따라서 동기형 릴럭턴스 전동기에 대한 철손 해석은 필수적이라 하겠다.

프라이자흐 모델은 히스테리시스에 대한 정확한 수치모사가 가능한 모델로서 세계적으로 많이 연구되고 있다 [3][4].

본 논문은 동기형 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석에 있어서 비선형 해석루틴에 프라이자흐 모델을 적용한 모델을 제시하고 그 특성을 분석하였다.

2. 해석 모델

그림 1은 시작기의 회전자와 고정자의 단면이다. 고정자는 2층권, 분포권을 가진 4극, 400W급 유도기에서 사용되는 것이다.

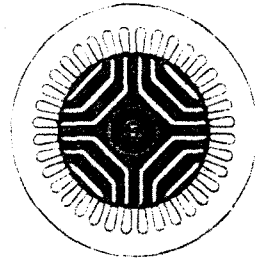


그림1. 전동기구조
 Fig.1 Motor structure

3. 프라이자흐 모델이 결합된 2차원 유한요소법의 정식화

3-1. 지배방정식 유도 및 정식화

동기형 릴럭턴스 전동기의 지배방정식은 식(1)~식(3)의 Maxwell 방정식 및 보조방정식으로 부터 유도된다.

$$\nabla \times H = J_o \quad (1)$$

$$\nabla \cdot B = 0 \quad (2)$$

$$B = \mu_0 H + M \quad (3)$$

여기서 M은 인가자계 H에 관한 자화이고, 다른 기호는 일반적인 의미를 갖는다.

자기 벡터 포텐 A와 등가자화전류 J_m은 다음과 같이 표현된다.

$$B = \nabla \times A \quad (4)$$

$$J_m = \nu_0 (\nabla \times M) \quad (5)$$

(1)-(5)식으로 부터 유도된 지배방정식은 다음과 같다.

$$\nu_0 (\nabla \times \nabla \times A) = J_o + J_m \quad (6)$$

1차 시험함수를 사용하여 Galerkin법으로 (7)과 같은 게 행렬 방정식을 구할 수 있다.

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

여기서, [K]는 계수 행렬이며, {F}는 구동 행렬이다.

3-1. 프라이자흐 모델이 적용된 해석모델

프라이자흐 모델의 기본적 개념은 그림 2에서와 같이 각

각의 자구가 유일하게 정의된 상승 하강 스위치계에 의해서 특성화되어 진다는 것이다. 따라서 자구는 그림 3에서와 같이 스위치계 $\mu(\alpha, \beta)$ 의 평면위에서 그들 분포의 가상 밀도 함수에 의해서 표현되어질 수 있다.

자성체에 있어서의 프라이자흐 모델에 따라서, 자화 $M(t)$ 는 여러 논문에서 언급된 것과 같이 스위치계 $\mu(\alpha, \beta)$ 위에서 그들의 단위 자화의 분포에 관한 분자 자화의 기대값으로서 정의되어 질 수 있다.

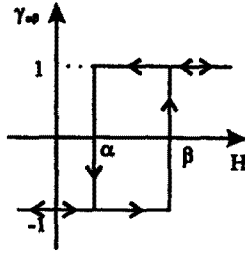


그림 2. 직사각형 히스테리시스
Fig. 2 Rectangular hysteresis of dipole

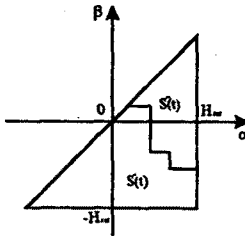


그림 3. 프라이자흐 루프 평면
Fig. 3 Preisach loop diagram

인가자계 H 를 포함하고 있는 자화 M 은 다음과 같이 표현되어진다.

$$M(t) = \left(\int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta, \theta) \gamma_{\alpha\beta} |H(t)| \operatorname{sgn}(\cos \varphi) d\alpha d\beta \right) a_0 \quad (8)$$

여기서 φ 는 그림 3에서 보는 바와 같이 인가자계와 자화 사이의 차이각이다.

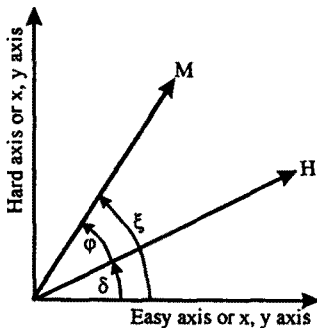


그림 4. 인가자계와 자화
Fig. 4 Applied field and magnetization

본 논문에서는 입력은 전류원이며, 입력형태는 다음과 같다.

$$i_d^e = x[A], \quad i_q^e = 0[A] \quad (9)$$

$$i_d^s = i_d^e \cdot \cos(\theta + \tau) + i_q^e \cdot \sin(\theta + \tau) \quad (10)$$

$$i_q^s = -i_d^e \cdot \sin(\theta + \tau) + i_q^e \cdot \cos(\theta + \tau) \quad (11)$$

$$i_d^s = i_d^s, \quad i_q^s = -i_d^s/2 - \sqrt{3}/2 \cdot i_q^s \quad (12)$$

$$i_c^s = -i_d^s/2 + \sqrt{3}/2 \cdot i_q^s$$

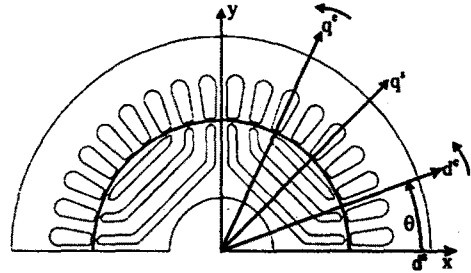


그림 5. 입력전류와 회전각도의 관계
Fig. 5 Relation of input current and rot

여기서 τ 는 초기 얼라인(aligned)각이고, 회전자는 그림 4에서 보는 바와 같이 입력전류각 θ 에 따라서 동기적으로 회전한다. 따라서 고정자 영역은 x, y 축위를 기준으로 보면 교번하는 field로 가정할 수 있다. 한편 회전자 영역의 B 와 H 는 일정한 값을 가지며 회전하지만, x, y 축을 기준으로 보면 이것 또한 교번하는 field로 가정할 수 있다. 따라서 x 축과 y 축 위에서의 φ 는 0 혹은 π 가 된다.

결과적으로 (8)식은 (13)식과 같이 벡터 프라이자흐 모델의 특별한 경우인 스칼라 프라이자흐 모델로 바꾸어 쓸수있다.

$$M(t) = \int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} |H(t)| d\alpha d\beta = \quad (13)$$

$$\int \int_{S^{(+)}(t)} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} |H(t)| d\alpha d\beta - \int \int_{S^{(-)}(t)} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta} |H(t)| d\alpha d\beta$$

여기서, S 는 그림 4와 같이 프라이자흐 (α, β) 평면위의 $H_{s\alpha} \geq \alpha \geq \beta \geq -H_{s\alpha}$ 인 삼각 영역이다. 그리고 $\gamma_{\alpha\beta} |H(t)|$ 는 단위 히스테리시스 작용자이고, 영역 $S^{(+)}(t)$ 위에서 $M_s = +1$ 의 값을 가고 반면에 $S^{(-)}(t)$ 위에서 $M_s = -1$ 의 값을 가지는 hysteron이다.

프라이자흐 평면위에서의 밀도 분포는 자기입자들의 보자력과 상호작용에 대한 많은 정보를 주지만 실측곡선으로부터 구한 밀도 값을 적분하는 과정이 복잡하고 미적분 과정에서 발생하는 오차로 인해 수치해석에 적용하기는 불편하다. 이에 보다 더 편리한 수치해석을 위해 프

라이자흐 평면을 다음과 같은 에버렛 함수로 대체한다(5).

$$E(\alpha, \beta) = \int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (14)$$

그림 6은 제안한 해석기법의 해석 흐름도를 보여준다.

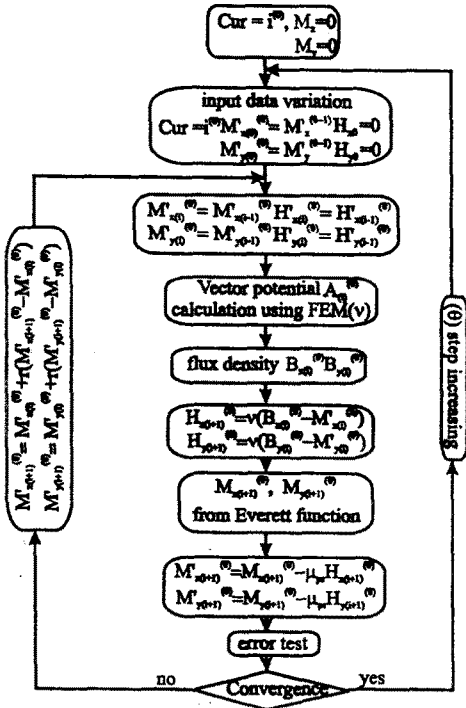


그림 6 해석 흐름도
Fig. 6 Analysis flow chart

3. 시뮬레이션 및 결과 고찰

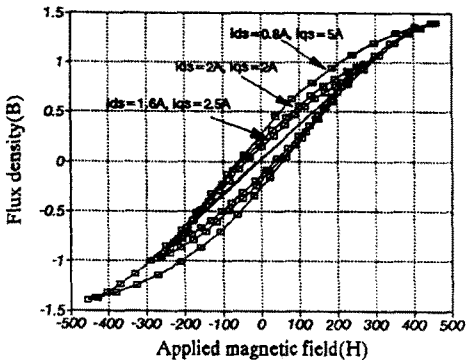


그림 7 다양한 전류비에 따른 B-H 특성
Fig. 7 B-H curves according to various curre

동기형 릴럭턴스 전동기의 고정자 철손은 일반적 유도 전동기의 철손과 유사하다. 반면 회전자 자속은 회전자와 동기적으로 회전하기 때문에 철손은 거의 영에 가

깝고 항상 일정한 값을 유지한다. 따라서 거의 모든 철손은 고정자에 국한된다. 그리고 동기형 릴럭턴스 전동기의 최대 효율 조건은 다음과 같다.

$$\frac{L_d}{L_q} = \frac{i_d}{i_q} \quad (15)$$

그림 7은 동일 토크 2.17[Nm]에서의 각각의 전류비가 철손에 미치는 영향을 알아본 것이다. 그림 7의 데이터는 고정자 치의 임의의 요소에 관한 것이다.

최대효율 조건인 d축전류 1.6 q축 전류 2.5에서 손실이가장 적음을 해석 결과로부터 알 수 있었다.

그림8은 25HZ, d축전류 1.6[A], q축 전류 2.5[A]에서 동기적으로 회전하고 있는 동기형 릴럭턴스 전동기의 자속선도를 보여준다.

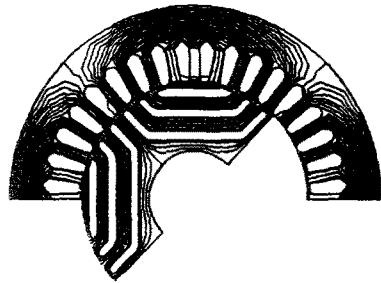


그림 8 자속선도
Fig. 8 Flux plot

5. 결론

본 연구에서는 유한요소법과 프라이자흐 모델이 혼합적용된 해석기법을 동기형 릴럭턴스 전동기를 대상으로 하여 제안하였다.

동기형 릴럭턴스 전동기의 최대 효율 조건을 해석 사례로 제안된 기법의 효용성을 입증하였다. 본 연구에서 제안된 해석기법은 전동기의 설계 및 제어알고리즘 개발에 유용하게 사용될 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 이중호, 김정철, 현동식, "단반형 회전자구조 동기형 릴럭턴스전동기와 유도전동기의 특성비교에 관한 연구", 대한전기학회논문지, 제47권, 제9호, pp1343-1350, 1998. 9
- [2] 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.
- [3] 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, pp2629-2632, September, 1998.
- [4] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, ACADEMIAI KIADO, BUDAPEST.
- [5] Everett, D. H. : A general approach to hysteresis, Part III., "A formal treatment of the independent domain model of hysteresis", *Trans. on Faraday Soc.*, Vol. 50 pp1077-1096, 1954.
- [6] J. H. Lee, D. M. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Iron Core Loss Minimization Scheme on Vector Control for Synchronous Reluctance Motor", *IEEE-IAS Annual Meeting 1998, St. Louis, Missouri, USA, Oct. 1998, Vol. 1, pp 677-684.*