

프라이자흐 모델이 결합된 유한요소해석 및 실험을 통한 동기형 릴럭턴스 전동기의 효율 특성 평가

이대동*, 이민명, 심재명, 이종호
한밭대 전기공학과

Efficiency Evaluations of Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM & Preisach Modelling

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

Abstract - This paper deals with the efficiency evaluations in a synchronous reluctance motor (SynRM) using a coupled transient finite element method (FEM) and Preisach modeling, which is presented to analyze the characteristics under the effect of saturation and hysteresis loss. The focus of this paper is the efficiency evaluation relative to hysteresis loss, copper loss, etc. on the basis of speed, load condition in a SynRM. Computer simulation and experimental result for the efficiency using dynamometer show the propriety of the proposed method.

1. 서 론

단위부피당 토크 및 효율 등은 전기기기의 성능 평가를 하는데 있어 중요하다. 이러한 특성은 기기의 손실과 포화의 영향을 받으므로 SynRM의 설계에 앞서 정밀한 수치 해석이 필요하다.

SynRM의 고속응용에 있어 전력손실의 주원인은 철손이다. 프라이자흐 모델링은 히스테리시스 현상을 가장 정밀하게 수치모사 가능한 모델로서 세계적으로 많이 연구되고 있다[1]-[3]. 전기기기에 대한 히스테리시스 현상의 영향을 논한 몇몇의 논문이 발표되었다.

참고문헌 [4], [5]는 PMASynRM에 대해 유한요소법과 프라이자흐 모델이 결합된 해석기법을 이용하여 인덕턴스 등 정상상태 특성을 분석하였다.

참고문헌 [6], [7]은 LIM과 SynRM에 대해 벡터 제어 알고리즘과 결합된 과도상태 해석기법을 개발 발표하였다.

참고문헌 [8], [9]는 제어 알고리즘과 프라이자흐 모델이 결합된 유한요소법을 이용한 SynRM의 과도상태 해석을 통해 히스테리시스 손실을 정성적으로 분석하였다.

참고문헌 [10]은 SynRM에 대해 프라이자흐 모델이 결합된 유한요소법을 이용하여 철손의 영향이 최소화되는 d축, q축 전류조합을 선택할 수 있는 제어 알고리즘을 도출하였다.

본 논문에서는 SynRM에 대해서 프라이자흐 모델이 결합된 유한요소법을 이용한 과도상태해석을 통해 손실의 정량적 해석이 수행된다.

본 논문의 주 관점은 SynRM의 속도와 부하조건에 기초한 히스테리시스 손실, 동손 등에 관련된 효율 평가이다.

또한, TMS320C31 DSP가 장착된 인버터와 부하장치, 동력계를 이용하여 실험을 수행하였다.

효율에 대한 컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과는 프라이자흐 모델링이 결합된 유한요소법의 효용성을 보여준다.

2. 프라이자흐 모델이 결합된 유한요소해석

A. SynRM의 지배방정식

2차원 지배방정식은 아래와 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} v_0 \left(\frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v_0 \left(\frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z - J_m \quad (1)$$

$$J_m = v_0 \left(\frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (2)$$

여기서, A_z : 자기벡터전포텐셜의 Z방향 성분, J_z : 전류 밀도, v_0 : 자기 저항률, M_x, M_y : 자계 H_x, H_y 에 대한 자화의 세기

B. 시스템 행렬

회로 방정식은 다음과 같다.

$$\{V\} = [R]\{I\} + [L_0] \frac{d}{dt} \{I\} + \{E\} \quad (3)$$

여기서, $\{E\}$: 권선의 E.M.F 벡터, $\{V\}$: 공급 전압 벡터, $\{I\}$: 상전류 벡터, $[L_0]$: 누설 인덕턴스

수렴성과 계산 시간을 고려하여 후퇴 차분법을 사용하였으며, 회로 방정식이 결합된 전체 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\left[\begin{array}{cc} \frac{1}{\mu} [S] & -[M] \\ [0] & [R] \end{array} \right] + \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \{A\} \\ \{I\} \end{array} \right] = \frac{1}{\Delta t} \left[\begin{array}{cc} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{array} \right] \left[\begin{array}{c} \{A\} \\ \{I\} \end{array} \right]_{t-\Delta t} + \left[\begin{array}{c} \{0\} \\ \{V\} \end{array} \right]$$

여기서 $[LG]$ 는 역기전력과 관련된 계수행렬이고 자화 $[M]$ 은 프라이자흐 모델에 의해 계산된 자화량이다.

C. 해석 모델과 프라이자흐 모델의 적용

SynRM의 2차원 해석 모델은 그림 1에 나타났다.

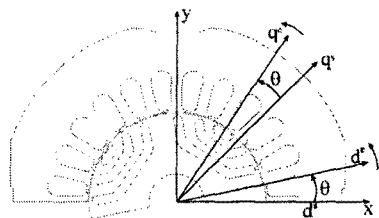


Fig. 1 Rotating (r), stationary (s), x, y axis of model

본 논문의 프라이자흐 모델은 M-H관계를 사용하였다. 모든 히스테리시스 현상이 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 입력자계각 θ 를 따라 동기적으로 회전한다. 따라서 고정자의 영역은 x축 y축에 대해서 교번 자계로 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.

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

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

보다 편리한 계산을 위하여 식 6와 같이 에버렛 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다. [11]

$$E(\alpha, \beta) = \int \int_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (6)$$

3. 토크와 전류와의 관계

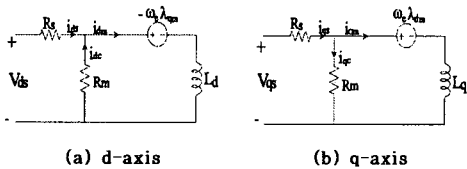


Fig. 2. d-q axis equivalent circuit including iron loss

SynRM의 일반적 토크 표현은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) \cdot i_a \cdot \frac{\cos \varphi}{2} \quad (7)$$

여기서 φ 는 그림 3에서와 같이 전류각이다. φ 가 45° 일때 토크는 최대치이다. SynRM의 d, q축 등가 회로는 그림 2에 나타냈다. 여기서 R_m 은 철손등가 저항이다.

그림 2의 회로로부터 유도된 고정자표류에서의 정상상태 토크방정식은 다음과 같다.

$$T_e = \frac{3}{2} \frac{P}{2} (L_d - L_q) i_{dm} i_{qm} \quad (8)$$

$$i_{ds} = i_{dm} - i_{dc}, i_{qs} = i_{qm} - i_{qc} \quad (9)$$

$$i_{dc} = \frac{\omega_e \lambda_{qm}}{R_m} = \frac{\omega_e L_q i_{qm}}{R_m}, \quad (10)$$

$$i_{qc} = \frac{\omega_e \lambda_{dm}}{R_m} = \frac{\omega_e L_d i_{dm}}{R_m}$$

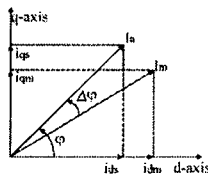


Fig. 3 Current vector orientation angle error between i_a and I_m

식 (8)(9)(10)에서 볼 수 있듯이 토크의 직접 관계된 고정자 전류성분 i_{dm} , i_{qm} 은 입력 고정자 전류 성분 i_{ds} , i_{qs} 와 같지 않으며 상호 커플링되어 있다. 따라서 최대토크를 나타내는 φ 는 45° 를 벗어난다. 이런 부가적인 상호 커플링은 정확한 토크제어를 어렵게 만든다.

4. 시뮬레이션과 실험

그림 4는 해석시의 블록선도를 보여준다. PWM 인버터가 결합된 벡터제어 알고리즘이 동특성과 PWM 입력에 기인하는 히스테리시스 특성을 분석하기 위해 제안된 해석모델에 적용되어졌다. 제안된 해석기법은 벡터제어기부분에서 스텝속도명령(2000rpm), 샘플링 타임(200 μ sec)을 적용했다. 부하조건은 6, 8, 10, 12(kg-cm)이고, 실험조건과 같다. 그림 5는 TMS320C31 DSP가 장착된 인버터와 부하장치 및 동력계를 보여준다.

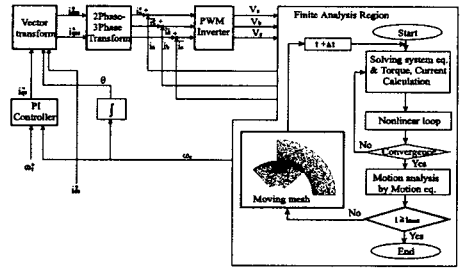


Fig. 4 Block diagram of analysis system

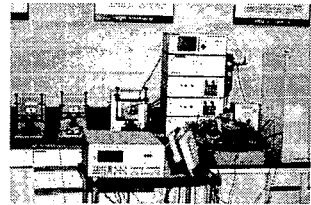
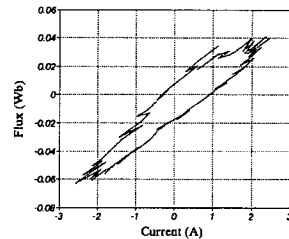
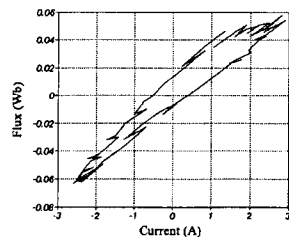


Fig. 5 TMS320C31 DSP installed experimental device and dynamometer.



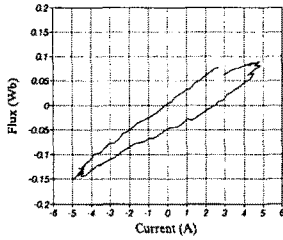
(a)load (6kg-cm)



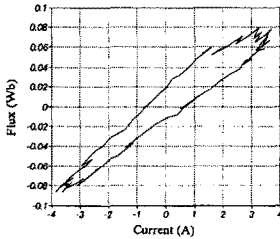
(b)load (8kg-cm)

표 3 실험에 의한 효율 평가

부하 (kg-cm)	입력 (W)	출력 (W)	효율 (%)	q속 전류 (A)	상전류 (A)	전류각 (deg.)
6	150	122	80	2.35	2	39.2
8	198	163	82	2.8	2.77	47.9
10	250	204	83	3.3	3.65	55.2
12	312	244	78	3.9	4.7	61.5



(c)load (10kg-cm)



(d)load (12kg-cm)

Fig. 6 i-l loci in each load condition

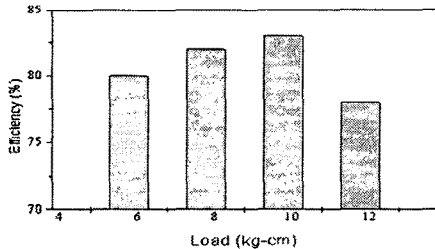


Fig. 8 Efficiency in each load condition

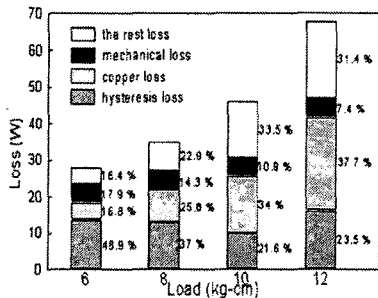


Fig. 9 loss analysis in each load condition

표 2 시뮬레이션의 효율 평가

부하 (kg-cm)	출력 (W)	히스테리시스 손실 (W)	동손 (W)	기계손 (W)	나머지 손실 (W)	상전류 (A)
6	122	13.70	4.7	5	4.6	2.2
8	163	12.96	9.03	5	8.01	2.7
10	204	9.92	15.65	5	15.43	3.68
12	244	16.02	25.61	5	21.37	4.7

그림 6은 각 부하조건에 있어서 한 사이클당 i-l 궤적을 보여준다. 히스테리시스 손실은 i-l 궤적의 면적과 주파수의 곱에 의해서 계산되어지고 동손은 상전류의 rms치의 제곱과 저항의 곱에 의해서 계산되어진다.

실험에 의해 구한 기계손은 약 5(W)이다. 나머지 손실은 와전류 손실과 표유부하손 등이다. 이러한 손실들을 표 2에 나타냈다. 시뮬레이션에서의 출력은 실험시에 출력과 같게 수행하였으며 따라서 상전류는 표 3에서 보는 바와 같이 실험치와 거의 유사하다. 그림 7은 각각의 부하조건에서의 효율을 보여준다. 그림 7에서 볼수 있는 바와 같이 최고효율 전류각(55.2°)은 $\psi = 45^\circ$ 로부터 벗어남을 알 수 있다. 그림 8은 각각의 부하조건에서 총 손실에 대한 각각의 손실비를 보여준다. 최대 효율 상황(10kg-cm)에서 증가된 부하에 기인한 전류의 상승이 동손을 증가시킨 반면에 히스테리시스 손실의 비는 감소됨이 확인되었다.

5. 결론

자기적 비선형성과 PWM 입력이 수반된 전력변환기기의 히스테리시스 해석에 적합한 과도상태 해석 기법이 제안되었다. SynRM의 히스테리시스 손실 및 동손 등이 제안된 해석기법을 통해 정량적으로 분석되어졌다.

기계적 진동 및 와전류 손실 등 고려하지 못한 요소를 첨가한 기법으로 발전된다면 고효율 전력변환기기 설계기술에 유용하게 사용되리라 사료된다.

[참고 문헌]

- (1) A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST
- (2) I. D. Mayeroyz, Mathematical Models of Hysteresis, *IEEE Trans. In Magnetics*, Vol. MAG-22, No.5, pp.603-608 Sept. 1986
- (3) A. Visintin, Differential models of hysteresis, Applied Mathematical Sciences, Springer, 1994.
- (4) J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Characteristics Computation on PWM Fed Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM & Preisach Modeling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 36, No. 7, pp 1209-1212, July 2000.
- (5) J. H. Lee, S. C. Ahn, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of LIM Using Coupled FEM & Control algorithm", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 36, No. 7, pp 1876-1879, July 2000.
- (6) J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Hysteresis Modelling of Synchronous Reluctance Motor Considering PWM input Voltage", *Journal of Physica B*, Vol. 275, pp 238-247, Jan. 2000.
- (7) J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Preisach Modelling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 1203-1206, May 1999.
- (8) J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Effect of Magnet on Ld and Lq Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 1199-1202, May 1999.
- (9) J. C. Kim, J. H. Lee, I. S. Jung, D. S. Hyun, "Vector Control Scheme of Synchronous Reluctance Motor Considering Iron Core Loss", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp. 2522-2525, Sep. 1998.
- (10) J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Dynamic Characteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 34, No. 5, pp. 2629-2632, Sep. 1998.
- (11) 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.