

유한요소법과 프라이자흐 모델을 이용한 SynRM의 손실해석과 효율평가

조용현\*, 이일교\*, 이중호\*  
한밭대학교\*

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

Yong Hyun Cho\*, Il Kyo Lee\*, Jung Ho Lee\*  
Hanbat National University\*

**Abstract** - This paper deals with the loss analysis and 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

고속운전시 SynRM(Synchronous Reluctance Motor)의 철손은 출력 저감의 중요한 원인이 될 수 있다. 그러므로 일반적인 기기에서 철손에 대한 개략적인 산정이 가능한 반면 SynRM에서의 설계시 철손은 보다 정밀한 산정을 요구한다.

프라이자흐 모델링은 히스테리시스 현상을 가장 정밀하게 수치 묘사가 가능한 모델로서 세부적으로 많이 연구 되고 있다[1]-[3].

참고문헌 [4], [5]에서는 FEM과 프라이자흐 모델링의 결합을 통해 PMASynRM(Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor)의 인덕턴스 특성을 조사하였다.

참고문헌 [6], [7]에서는 LIM(Linear Induction Motor)과 SynRM에 벡터 제어 알고리즘과 결합된 과도해석방법이 제시되었다.

참고문헌 [8], [9]에서는 제어알고리즘과 결합된 분석법을 이용한 SynRM과 히스테리시스손의 과도현상 반응에 대해 연구되었다.

참고문헌 [10], [11]에서는 적합한 회전자 d,q축 전류 구성요소 조합 선택과 손실 최소 제어 알고리즘이 제안되었다.

본 논문에서는 SynRM의 정량적 손실해석과 효율평가를 위해 유한요소분석과 결합된 프라이자흐 모델을 사용하여 수행하였다.

또한 TMS320C31 DSP를 이용하여 부하에 따른 특성분석을 수행하여 출력특성을 비교하였다.

컴퓨터 시뮬레이션과 실험결과는 유한요소분석과 프라이자흐 모델링의 결합을 통한 정량적 손실분석이 타당함을 보여준다.

2. 본 론

2.1 FEM과 프라이자흐 모델링의 결합

회로방정식이 결합된 전체 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\left[ \begin{array}{cc} \mathbf{u}_0[S] & -[N] \\ [0] & [R] \end{array} \right] + \frac{1}{\Delta t} \left[ \begin{array}{cc} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{array} \right] \left\{ \begin{array}{c} \{A\} \\ \{I\} \end{array} \right\}_t = (1)$$

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

여기서, E: 권선의 E.M.F벡터, V: 공급전압벡터, I: 상전류벡터, L<sub>0</sub>: 누설인덕턴스, LG: 기전력과 관련된 계수행렬, M: 프라이자흐 모델에 의해 계산된 자화량

그림. 1은 제안된 해석방법에 의한 시뮬레이션 흐름을 보여준다.

SynRM의 토크는 Maxwell stress tensor에 의해 계산된다.

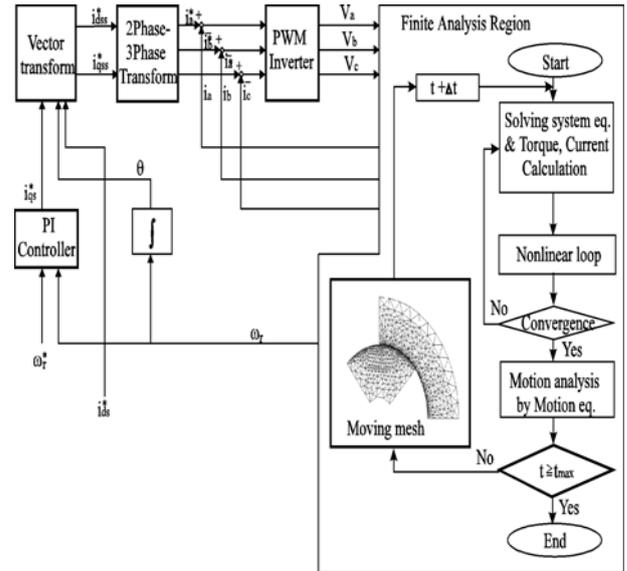
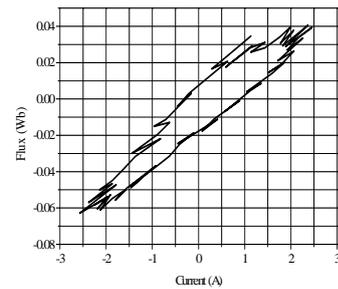
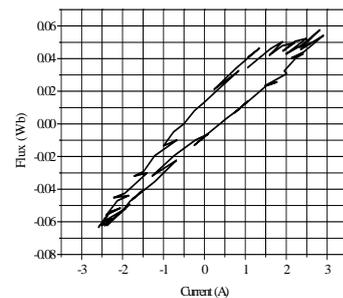


그림. 1 해석 시스템의 블록선도  
Fig. 1 Block diagram of analysis system

3. 해석 결과 및 분석



(a) load (6kg-cm)



(b) load (8kg-cm)

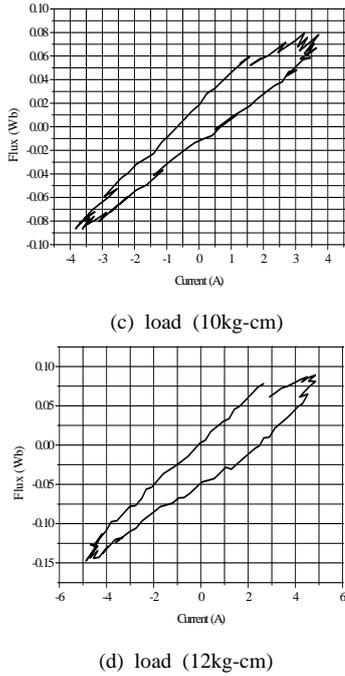


그림. 2 해석 시스템의 블록선도

Fig. 2  $i-\lambda$  loci in each load condition at 2000 rpm

<표 1> 2000RPM에서 손실 분석 시뮬레이션

<TABLE 1> LOSS EVALUATION IN SIMULATION AT 2000RPM

load (kg-cm)	output (W)	Hysteresis loss (W)	Copper Loss (W)	mechanical loss (W)	the rest loss (W)	phase current (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

<표 2> 2000RPM에서의 효율 분석 실험

<TABLE 2> EFFICIENCY EVALUATION IN EXPERIMENTAL TEST AT 2000RPM

Load (kg-cm)	input (W)	output (W)	Efficiency (%)	q-axis current (A)	phase current (A)	current angle (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

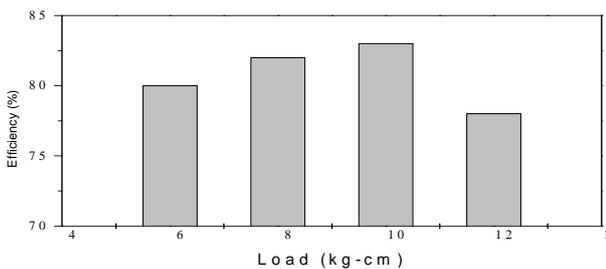


그림. 3 각 하중에서의 효율

Fig. 3 Efficiency in each load condition

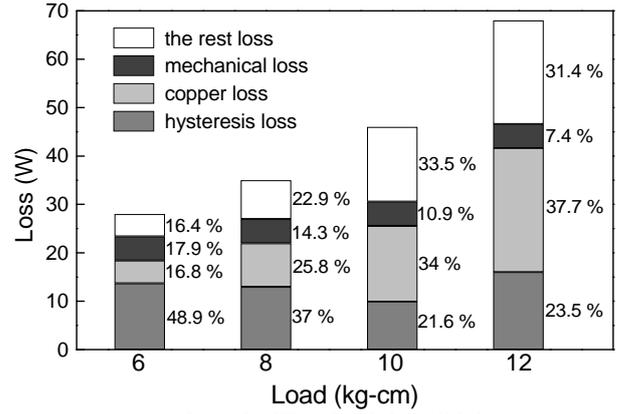


그림. 4 각 하중조건에서의 손실분석

Fig. 4 Loss analysis in each load condition

그림. 2는 2000rpm에서 각 부하조건에 1주기  $i-\lambda$  궤적을 나타낸다. 히스테리시스손은  $i-\lambda$  궤적면적에 주파수(66.7Hz)의 곱으로 계산할 수 있다. 그리고 동손은 상전류의 평균제곱근의 값에 제곱과 저항의 곱에 의해 계산될 수 있다.

기계손은 각 부하조건에서 대략 5[W]이다. 이것은 시험적인 데이터이다.

나머지 손실들은 와전류손과 표류손등이 있다. 이 손실들은 <표 1>에 나타났다.

시뮬레이션에서의 출력은 실험시의 것과 동일하다. 그러므로 상전류는 <표 2>에서 보여진 상전류와 유사하다.

그림. 3은 각 부하조건에서의 효율을 보여주고 있다.

최대 효율전류 각(55.2°)는 철손의 영향으로 인해 45°부터 벗어남을 알 수 있다.

그림. 4는 각 부하조건에 손실 분석을 나타내고 있다.

증가한 부하로 인해 동손이 증가하는 반면 히스테리시스손의 비율은 정확하게 최대 효율조건에 최소로 됨을 알 수 있다.

[참고 문헌]

- [1] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST
- [2] I. D. Mayeroz, "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. D. 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, pp1876-1879, 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, May1999.
- [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. 2629-2623, 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.