

유한요소법(FEM)과 프라이자호모델을 사용한 동기형 릴럭턴스 모터의 센서리스 벡터제어 제정수 산정

김홍석<sup>1</sup>, 박종민<sup>1</sup>, 이민명<sup>1</sup>, 이종호<sup>1</sup>, 천장성<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>한밭대학교 전기공학과, <sup>2</sup>TSA Co., Ltd.

Sensorless Vector Control Parameters Estimation of Synchronous Reluctance Motor Using a Coupled FEM & Preisach Model

Hong Seok Kim<sup>1</sup>, Jung Min Park<sup>1</sup>, Min Myung Lee<sup>1</sup>, Jung Ho Lee<sup>1</sup> and Jang-Sung Chun<sup>2</sup>  
<sup>1</sup>Dept. of Electrical Engineering, Hanbat National University, <sup>2</sup>TSA Co., Ltd.

**Abstract** - This study investigates the dynamic characteristics of Synchronous Reluctance Motor (SynRM), with segmental rotor structure, using finite element method in which the moving mesh technique is considered. The focus of this paper is the sensorless vector control parameters estimation of SynRM under saturation and iron loss. Comparisons are given with dynamic characteristics of normal single B-H nonlinear solutions and those of proposed FEM & Preisach model of synchronous reluctance motor, respectively.

1. 서 론

SynRM은 고속운전과 정밀 센서리스 벡터제어가 요구되어지기 때문에 포화의 영향력을 간과해서는 않된다. 돌극비가 큰 경우 q축은 포화현상이 적게 나타나지만, 높은 퍼미언스의 d축은 자기포화가 일어나기 쉽다. d축 여자시 자기적 포화현상은 고정자 요크, 치, 회전자 rib에서 일어나게 되며, SynRM의 효율, 토크밀도, 역활에 영향을 미치는 Ld 인덕턴스가 50%까지 줄어들 수가 있다. 그러므로 상기결점을 무시한 채 SynRM으로부터 좋은 제어 응답 특성을 기대하기는 힘들다.

전압방정식과는 달리 유한요소법(FEM)은 SynRM의 복잡한 내부 특성을 모델링 할 수 있다.

고속용에서 철손은 SynRM 손실의 주된 요인이 된다. 그러므로, 다른 종류의 기계 보다 SynRM의 철손은 더 정확하게 계산해야 한다. 철손의 정확한 예측이 가능한 Preisach모델이 비선형 해석을 하기 위해 적용되어진다. [1]-[3]

본 논문에서는 SynRM에 대해 유한요소법(FEM) & Preisach모델을 적용하여 센서리스 벡터제어 파라미터 도출을 위해 포화와 철손 하에서 동특성 해석이 수행되어진다. 동특성 해석을 위해 이동메쉬 기법이 사용되고, 벡터제어 알고리즘이 결합된다. SynRM의 단일 B-H 비선형 해석과 제안된 FEM & Preisach모델의 동특성을 비교가 수행된다.

2. 프라이자호 모델이 결합된 유한요소해석

2.1. 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,  $J_z$ : 전류밀도,  $v_0$ : 자기저항률,  $M_x, M_y$  자계  $H_x, H_y$ 에 대한 자화의 세기

2.1.2 시스템 행렬

회로방정식은 다음과 같다.

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

여기서  $\{E\}$ : 권선의 EMF벡터,  $\{VRICH\}$ 의 벡터,  $\{IRICH\}$ 의 벡터,  $[L_0]$ 의 인덕턴스

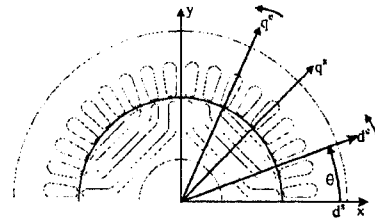
수렴성과 계산시간을 고려하여 후퇴차분법을 사용하였으며, 회로방정식이 결합된 전체 시스템 방정식은 다음과 같다.

$$\begin{bmatrix} \frac{1}{\Delta t} [S] & -[N] \\ \mu & [R] \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} 0 & 0 \\ [LG]^T & [L_0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{bmatrix} = \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \{M\} \\ \{V\} \end{bmatrix} \quad (4)$$

$[LG]$ 는 역기전력과 관련된 계수 행렬이고 자화  $\{M\}$ 은 프라이자호 모델에 의해 계산된 자화량이다.

2.1.3 프라이자 모델의 적용

SynRM의 2차원 해석 모델은 그림 1에 나타났다.



<그림 1> Rotating (e), stationary (s), x, y axis

본 논문의 프라이자호 모델은 M-H관계를 사용하였다. 모든 히스테리시스 현상에 있어 인가자계와 자화량 사이에는 위상차가 있기 때문에 벡터적 해석을 피할 수 없다.

그러므로 회전기기의 해석에 대한 새로운 알고리즘 개발이 필요하다. 회전자는 그림. 1에서 볼 수 있는 바와 같이 입력자계와  $\theta$ 를 따라 동기적으로 회전한다. 따라서 고정자의 영역은 x, y축에 대해서 교번 자계로 가정할 수 있으며 회전자의 B와 H는 상수이며 x축과 y축에 대해서 또한 교번자계이다. 기준으로 보면 교번하는 계로 가정할 수 있다. 인가자계와 자화사이의 각은 x축과 y축 위에서는 0 혹은  $\pi$ 가 된다.

따라서 회전기기에 대한 프라이자호 모델은 식 (5)에서 볼 수 있는 바와 같이 스칼라 모델로써 표현되어 질 수 있다.

같은 축에서 계산된 M, H가 같은 벡터 방향을 가지는 것은 당연하다. 그러므로 자화 M은 회전기기의 전기량을 간단히 계산함으로써 분석할 수 있다.

$$\begin{aligned} M(t) &= \iint_{\alpha > \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha, \beta}(H(t)) d\alpha d\beta \\ &= \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta \end{aligned} \quad (5)$$

보다 편리한 계산을 위하여 식 (6)과 같이 에버렛 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다. [8]

$$E(\alpha, \beta) = \iint_{\alpha > \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha, \beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (6)$$

2.2 결합 알고리즘

PWM fed 인버터를 가진 제어 알고리즘이 그림 2에 나타낸 것처럼 PWM입력에 따른 동특성과 히스테리시스특성 분석을 위해 제안된 해석모델에 적용된다.

제안된 해석방법은 벡터제어 논리부분에 스펙속도 명령 (300rpm)이 적용되고, 샘플링 타임은 100(msec)이다.

SynRM의 토크는 맥스웰 용력법의 선적분에 의해 계산한다.

$$T_r = \int \frac{w}{2\mu_0} (B_x^2 - B_y^2) n_x + 2n_y B_x B_y dl \quad (7)$$

$n_x$ 과  $n_y$ 은 단위 법선 벡터이다. w은 주로 적층폭이다.

동특성 해석에서 SynRM의 속도는 다음에 의해 계산된다.

$$T = J \frac{d^2}{dt^2} - T_1 \quad (8)$$

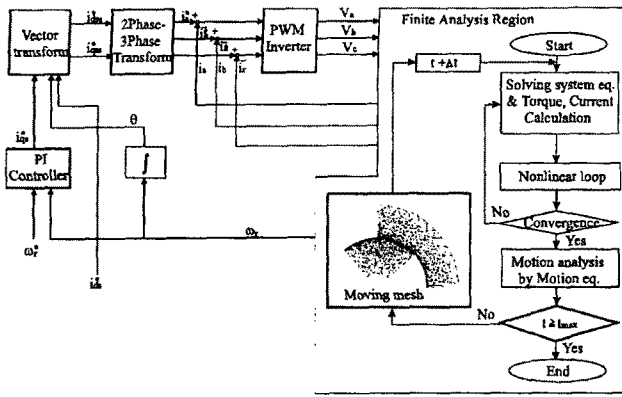
수렴의 안정성을 위해 가투자율을 도입했으며, 계산시 수렴을 빠르게 하기 위하여 자화 M에 대하여 단순반복법을 적용하였다.

x, y성분으로 구성된 자속밀도와 자계의 세기는 유한요소법(FEM)에 의해 계산된다.

각 상의 쇠교자속은 다음과 같다.

$$\lambda = N \int \vec{B} \cdot d\vec{S} = N(A_1 - A_2)w \quad (9)$$

w은 주로 적층폭이다. N은 코일 턴수이고,  $A_1, A_2$ 은 슬롯에서의 자기벡터 포텐셜의 평균값이다.



〈그림 2〉 분석시스템의 블록선도

### 2. 3 시뮬레이션 결과

그림. 3은 속도응답 특성을 나타내고, 그림. 4(a), (b)는 단일 B-H 비선형 해석과 제안된 방법의 3상 전류특성을 나타낸다.

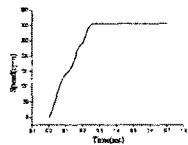
그림. 4의 (a)는 단일 B-H 해석으로 전류응답은 거의 정현적인 반면, (b)는 히스테리시스현상의 영향으로 왜곡되어 나타난다.

그림. 5, 그림. 6은 단일 B-H와 제안된 방법에서 각각 토크전류, 자화전류, 토크응답을 나타낸다. SynRM에서 릴턴턴스 토크리플응답은 그림. 3의 속도응답에 영향을 미치는 것을 보여준다.

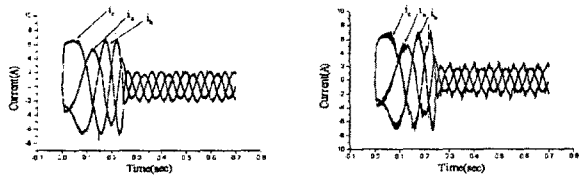
그림 7(a), (b)은 단일 B-H와 제안된 방법에서  $i-\lambda$ 의 위상관계를 나타낸다. SynRM의 전체 히스테리시스 손실인  $i, \lambda$  위상차 제안된 해석방법을 기초로 조사할 수 있다. 그림. 8은 제안된 해석방법에서 FE영역의 자속각을 나타낸다.

그림. 2의 제어알고리즘의 속도제어기와 위치제어기에 구현된 회로상수는 낮은 속도에서 포화와 철손 때문에 파라미터 변동이 예상되기 때문에 센서리스 백터제어를 위해 오차 분석을 본 해석시스템을 통해 수행할 수 있다.

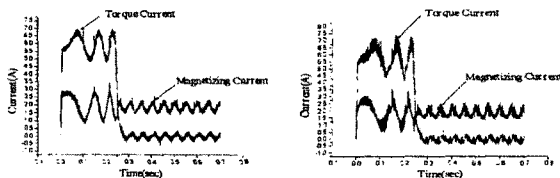
그림. 9는 시동시와 정상상태에서 해석 모델의 자속흐름도를 나타낸다.



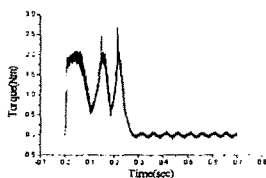
〈그림 3〉 속도응답



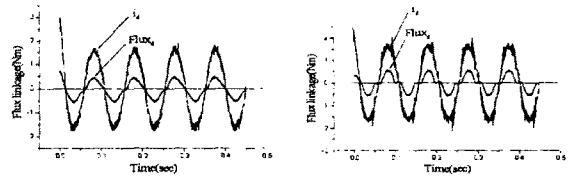
(a)단일 B-H곡선 (b)결합된 프리자흐 모델&FEM  
〈그림 4〉 3상 전류 특성



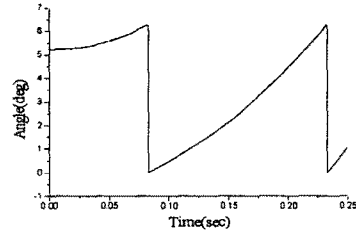
(a)단일 B-H곡선 (b)결합된 프리자흐 모델&FEM  
〈그림 5〉 토크 & 자화 전류 응답



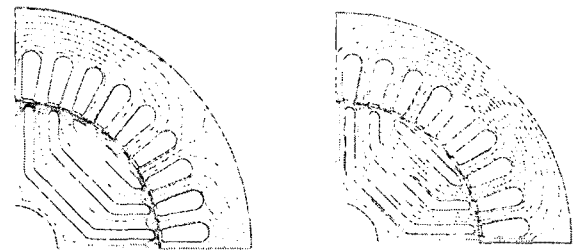
〈그림 6〉 토크 응답



(a)단일 B-H곡선 (b)결합된 프리자흐 모델&FEM  
〈그림 7〉  $i-\lambda$ 의 상관관계



〈그림 8〉 FE영역의 자속각



(a)시동시 (b)정상 상태  
〈그림 9〉 분석모델의 자속 흐름도

## 3. 결 론

자기적 비선형과 PWM입력전압을 갖는 기기의 히스테리시스 분석을 위해 과도적인 특성해석 방법을 제안하였다.

SynRM의 제어특성은 제안된 프리자흐 모델을 적용한 해석방법을 기초로 조사 되었다.

스물레이션을 통해, SynRM의 센서리스 백터제어를 위한 제어파라미터특성이 연구되어질 수 있으며 철손과 포화의 영향하에 제어파라미터는 제안된 제어 방법으로 적당히 선택되어질 수 있다.

### [참 고 문 헌]

- [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 Transaction on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp. 2629-2632, Sep. 1998.
- [2] 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 1209-1213, July 2000.
- [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 Transaction on Magnetics, Vol. 34, No. 5, pp 3522-3525, September, 1998.
- [4] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST.
- [5] I. D. Mayeroyz, Mathematical Models of Hysteresis, Springer, 1991..
- [6] A. Visintin, Differential models of hysteresis, Applied Mathematical Sciences, Springer, 1994.
- [7] E. Della Torre, Gy. Kadar, "Vector Preisach and the Moving Model", Journal of Appl. Physics, Vol.63, pp3004-3006, 1988.
- [8] D. H. Everett, A general approach hysteresis, Part III, "A formal treatment of the independent domain model of hysteresis", Transactions on Faraday Soc., Vol. 50 pp1077-1096, 1954.