

# 유한요소법과 프라이자흐 모델이 결합된 해석기법을 이용한 극 변환 메모리모터의 동특성해석

논문
60-5-9

## Characteristics Analysis in A Pole Changing Memory Motor Using Coupled FEM & Preisach Modeling

이 승 철\* · 이 중 호†  
(Seung-Chul Lee · Jung-Ho Lee)

**Abstract** - This paper deals with the PM performance evaluations in a pole changing memory motor (PCMM) using a coupled transient finite element method (FEM) and Preisach modeling, which is presented to analyze the magnetic characteristics of permanent magnets. The focus of this paper is the characteristics evaluation relative to magnetizing direction and the pole number of machine on re-demagnetization condition in a pole changing memory motor.

**Key Words** : Preisach modeling, FEM, Pole changing memory motor

### 1. 서 론

일반적인 전기기기의 고출력밀도와 함께 PM기기의 자속 조절 능력을 결합시킨 것이 메모리모터이다[1],[2].

메모리모터는 가변자속 (Flux Variable) 또는 극 변환 (Pole Changing) 두 종류가 있다.

메모리모터의 동작은 작은 고정자전류로 영구자석의 자화량을 변화시킬 수 있는 특성을 기초로한다. 회전자 자석의 자화량이 고정자 펄스에 의해 지속적으로 어떻게 변화되는지에 대한 설명이 참고문헌[1]-[2]에 나타나 있다.

메모리모터의 성능 평가에 자화방향 및 자화량은 중요한 요소이다. 다른 종류의 모터에서는 대략적인 히스테리시스와 자화특성에 대한 계산이 가능한 반면 메모리모터에서는 이들이 매우 중요한 요인이 되어 더욱더 정확히 계산하기 위해 노력해야한다. 프라이자흐 모델은 히스테리시스를 과약하는데 일반적이고 뛰어난 능력을 가지고 있기 때문에 지속적으로 연구가 수행되어왔다[3]-[4].

본 논문은 유한요소법과 프라이자흐 모델이 결합된 해석기법을 이용하여 극 변환 메모리모터를 대상으로 연속적인 재-감자시 특성분석을 수행하였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 PCMM의 동작 원리

극 변환 메모리모터(Pole Changing Memory Motor, 이하 PCMM)의 회전자는 샌드위치 형상으로 만들어지며, 여러 가지 방법을 통해 한 극 당 영구자석 한개 이상 같은 방향

으로 착자된 그룹을 형성할 수 있다.

그림 1에서 32개의 자화된 자석을 가지는 극 변환 메모리모터의 교차 단면적을 보여준다. 회전자에는 극 당 4개의 자석이 있으며 이것들은 모두 같은 방향으로 자화되고 있다. 고정자권선이 6극으로 채집속 된 후에 고정자전류의 작은 펄스가 회전자를 8극에서 6극으로 변화시킨다.

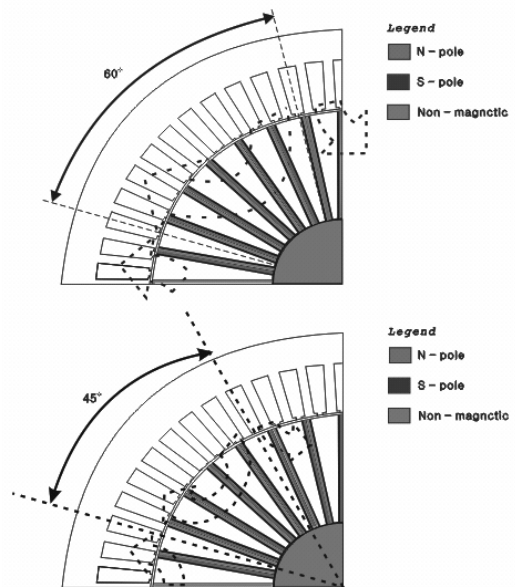


그림 1 6극과 8극 상태의 PCMM  
Fig. 1 6-pole and 8-pole magnetized PCMM

그림 1에서 보여지는 것처럼 극 당 자석의 수가 더 이상 정수가 아니기 때문에 (32/6=5.333), 일부 자석은 탈자 된 채로 남아있다.

\* 준 회원 : 한밭대 전기공학과 석사과정  
† 교신저자, 시니어회원 : 한밭대 전기공학과 부교수  
E-mail : limotor@hanbat.ac.kr  
접수일자 : 2010년 9월 14일  
최종완료 : 2011년 2월 23일

### 2.2 극 당 자속량과 자기등가회로

회전자가 극 당 4개의 자석으로 이루어지고 모든 자석들이 자화된다고 하면 대략적인 자속밀도분포는 그림 2에 나타냈다.

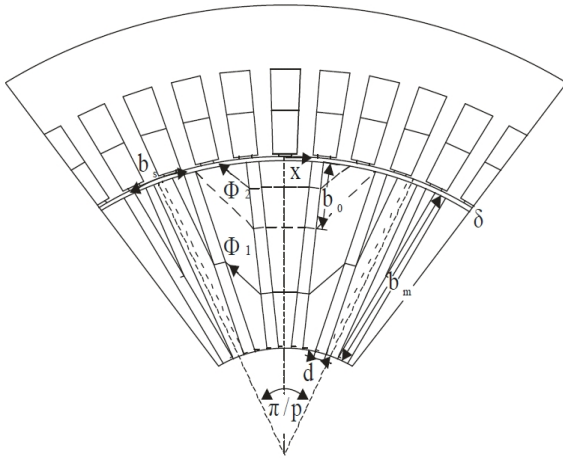


그림 2 제안된 모델의 극 당 4개 자석의 PCMM의 단면도  
 Fig. 2 Cross-sectional view of the PCMM with four magnets per pole

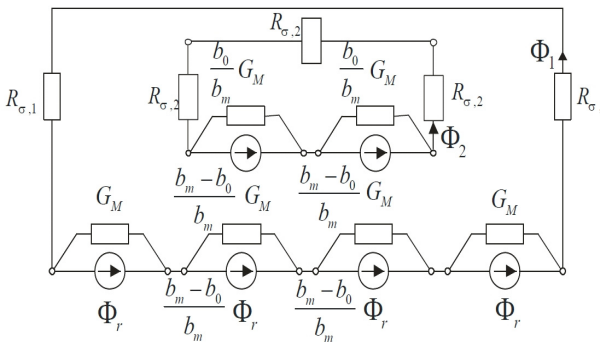


그림 3 자기등가회로  
 Fig. 3 Magnetic equivalent circuit of proposed model

그림 2의 자속  $\Phi_1$ 은 오직 반지름방향 높이  $b_m - b_0$ 의 자석 중앙 부분으로만 흐르고 자속  $\Phi_2$ 은 오직 반지름방향 높이  $b_0$ 의 자석 중앙 부분으로만 흐른다고 가정한다.

슬롯에 전류가 안 흐르기 때문에 자석들은 회전자 슬롯 자속밀도의 접선방향 성분은 접선방향으로 자화된다.

그림 3에서 보여주듯이 그림 2에서 높이  $b_0$ 는 한 극의 자기등가회로를 사용해서 계산할 수 있으며 회전자 자석의 잔류 자속  $B_r$ 과 보자력  $H_c$ 를 구할 수 있다.

$$G_M = \frac{\Phi_r}{\Theta_c} = \frac{B_r l b_m}{H_c d}, \quad R_{\delta,1} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{l \frac{b_s}{2}} \quad (1)$$

$$R_{\delta,2} = \frac{1}{\mu_0} \frac{\delta}{l b_s}, \quad Bt(r) = const \quad (2)$$

그림 3의 자속  $\Phi_1$ 과  $\Phi_2$ 에 대한 해는 잔류자속  $\Phi_r$ 의 함수로써 극 당 자속  $\Phi_{pole}$ 를 찾는데 도움을 준다.

$$\frac{\Phi_{pole}}{\Phi_r} = 2 \frac{5y+1}{5y^2+5y+1} \quad (3)$$

y는 공극과 자기저항 사이의 비율을 의미한다.

$$y = \frac{R_{\delta,2}}{R_M} = R_{\delta,2} G_M \quad (4)$$

극 당 자석 개수의 증가는 잔류자속  $\Phi_{pole}/\Phi_r$ 에 대한 극 당 자속의 높은 비율을 가져온다.

극 당 자석의 무한한 개수에 대한 비율  $\delta/d$ 과  $\Phi_{pole}/\Phi_r$ 의 상관성은 그림 4에서 보여준다.

첫 번째 숫자는 극 당 자석의 총 개수 그리고 두번째 숫자는 극 당 자화된 자석 개수이다.

표 1은 본 논문에서 제안한 모델의 자기 등가 회로 모델의 파라미터이다. 그림 4는 참고문헌 [3]의 32개의 자석 테이터와 상당히 일치한다는 것을 확인시켜 준다.

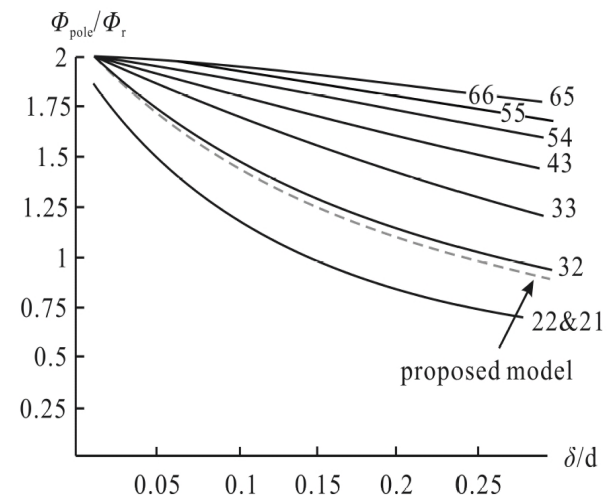


그림 4 자석두께와 공극 사이의 비  
 Fig. 4 Relative flux per pole as a function of airgap width to magnet thickness ratio of proposed model

표 1 자기등가회로의 파라미터  
 Table 1 Fault simulation results Parameters of Magnetic Equivalent Circuit in Model of This paper

$\delta$	$G_M$ (const)	$R_{\delta,2}$	$B_r$ (const)	y	$\Phi_{pole}/\Phi_r$
0.05	$4.03 \times 10^{-6}$	7648.78	0.4	0.313	1.6793
0.1	$4.03 \times 10^{-6}$	15297.58	0.4	0.616	1.3165
0.15	$4.03 \times 10^{-6}$	22946.36	0.4	0.924	1.1366
0.2	$4.03 \times 10^{-6}$	30595.15	0.4	1.232	0.9709
0.25	$4.03 \times 10^{-6}$	38243.94	0.4	1.54	0.8463
0.5	$4.03 \times 10^{-6}$	76487.88	0.4	3.08	0.5138

### 2.3 프라이자흐 모델과 FEM

#### 2.3.1 PCMM의 지배방정식

맥스웰방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o \quad (5)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (6)$$

$$\vec{B} = \frac{1}{v_0} \vec{H} + \vec{M} \quad (7)$$

M은 자속밀도 H에 대한 자성재료의 자화량이다. 자기의 벡터방향A와 이에 상응하는 자화전류  $J_m$ 는 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (8)$$

$$\vec{J}_m = v_0 (\nabla \times \vec{M}) \quad (9)$$

식(5)-(9)로 부터 지배방정식은 식(10)으로 주어진다.

$$v_0 (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_m \quad (10)$$

이동을 고려한 2차원 지배방정식은 다음과 같다.

$$\frac{\partial}{\partial x} v_0 \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} v_0 \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) = -J_z - J_m \quad (11)$$

$$J_m = v_0 \left( \frac{\partial M_y}{\partial x} - \frac{\partial M_x}{\partial y} \right) \quad (12)$$

- $A_z$  : 자기벡터 방향의 Z성분
- $J_z$  : current density
- $v_0$  : 자기저항
- $M_x, M_y$  : 자계강도  $H_x, H_y$ 에 의한 자성물질의 자화량

#### 2.3.2 System Matrix

회로 방정식은 다음 같이 쓰여 진다.

$$\{V\} = [R]\{I\} + [L_0] \frac{d}{dt} \{E\} \quad (13)$$

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

식(11)을 풀기위해 Galerkin 유한요소법을 사용하였고, 식

(13)에서는 수렴성과 계산시간을 고려하여 회로 방정식이 결합된 후퇴차분법을 사용하였다. 식(11), (12), (13)을 결합한 시스템 행렬은 다음과 같이 주어진다.

$$\begin{bmatrix} v_0[S] - [M] \\ [0] \quad [R] \end{bmatrix} + \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} [0] & -[0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{B\} \end{Bmatrix}_t \quad (14)$$

$$= \frac{1}{\Delta t} \begin{bmatrix} [0] & [0] \\ [LG]^T & [L_0] \end{bmatrix} \begin{Bmatrix} \{A\} \\ \{I\} \end{Bmatrix}_{t-\Delta t} + \begin{Bmatrix} M \\ V \end{Bmatrix}_t$$

[LG]는 EMF와 관련된 매트리스 계수이다. 자화량[M]은 프라이자흐 모델링에 의해 계산된다.

#### 2.3.3 프라이자흐 모델의 응용

본 논문의 프라이자흐 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 입력자계각  $\theta$ 를 따라서 고정자의 영역은 x, y축에 대해서 교번 자계로 가정할 수 있으며 회전자의 B와 H는 상수이며 x축과 y축에 대해서 또한 교번 자계이다.

x축 및 y축 기준으로 보면 교번하는 계로 가정할 수 있다. 인가 자계와 자화사이의 각은 x축과 y축 위에서는 0혹은  $\pi$ 가 된다.

따라서 회전기기에 대한 프라이자흐 모델은 식(14)에서 볼수 있는 바와 같이 스칼라 모델로서 표현되어 질 수 있다. [5]-[7]

같은 축에서 계산된 M, H가 같은 벡터 방향을 가지는 것은 당연하다. 그러므로 자화 M은 회전기기의 전기량을 간단히 계산함으로써 해석할 수 있다. [8]

$$M(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (15)$$

$$= \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

보다 편리한 계산을 위하여 식(16)와 같이 Everett 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다.

$$E(\alpha, \beta) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (16)$$

### 2.4 해석 알고리즘

PWM fed 인버터를 가진 제어 알고리즘이 그림 5에서 나타난 것처럼 PWM 입력에 따른 동 특성과 자석특성 해석을 위해 제안된 해석모델에 적용된다.

그림 6은 극 변환 메모리모터의 유한요소법과 프라이자흐 모델을 사용한 유한요소법의 흐름도이다.

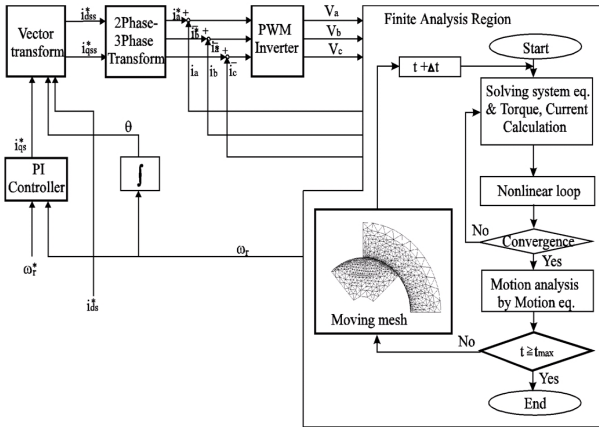


그림 5 해석 시스템의 블록선도  
Fig. 5 Block diagram of analysis system

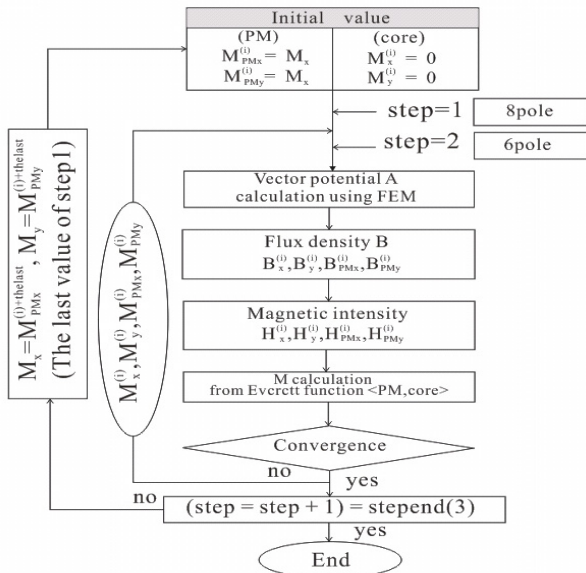


그림 6 프라이자흐 모델을 사용한 FEM의 흐름도  
Fig. 6 Flow chart of FEM using Preisach's model

2.5 실험 결과

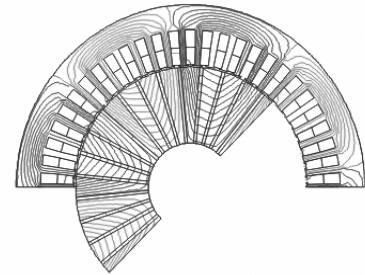
그림 8은 8-6극 극 변환 메모리모터의 입력전류와 토크 응답을 나타내고, 입력전류가 45도에서 8극에서 6극으로 전류가 전환되는 것을 볼 수 있다.

그림 8에서 보여주듯이, 6극의 주파수는 8극 보다 더 느리고, 정출력이기 때문에 6극의 토크는 8극보다 더 크다는 것을 그림 10에서 보여준다.

고정자 권선이 6극 형태로 재 연결 된 후, 짧은 전류펄스를 통해 고정자 전류가 8극에서 6극으로 자화 되는 것을 그림 7에서 확인할 수 있다. 극 당 자석의 수가 정수가 아니기 때문에 일부 자석이 탈자 되어있는 것을 확인할 수 있다.

그림 5의 동특성해석시스템의 블록선도에 의해서 8극과 6극에서의 동작시 속도 및 토크특성은 그림 9, 10에서 나타났다.

극 변환 메모리모터는 벡터 컨트롤 시스템에서 잘 적용할 수 있다는 것을 확인할 수 있었고, 다양한 컨트롤 모드에서 영구자석형 모터에 추가적으로 자속 제어능능이 부가적으로 실현 가능하다는 것을 확인할 수 있었다.



demagnetization

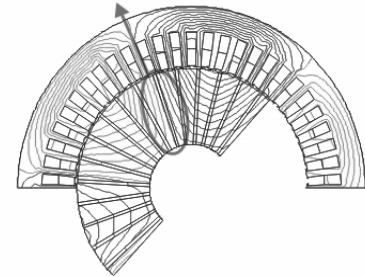


그림 7 8/6극 극 변환 메모리 모터의 자속분포  
Fig. 7 8pole and 6pole Flux plots of PCMM

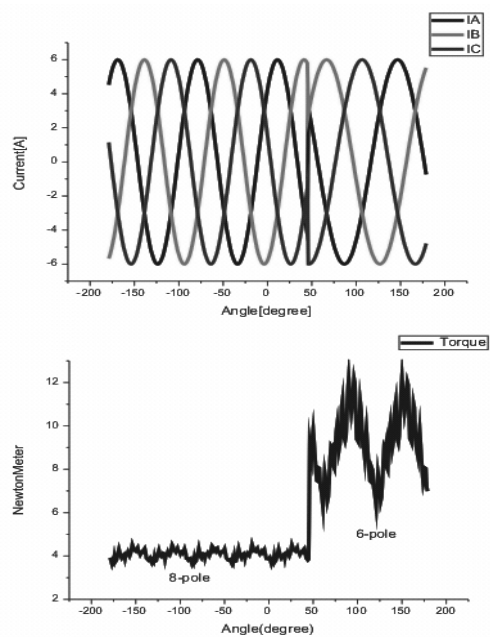


그림 8 8/6극 극 변환 메모리 모터의 입력 전류와 토크응답  
Fig. 8 Input current and Torque response of PCMM 8pole/6pole drive

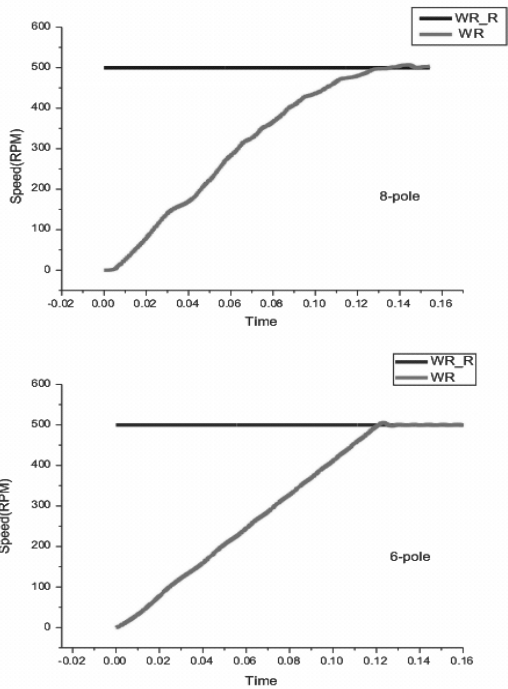


그림 9 8극 과 6극의 속도응답곡선  
 Fig. 9 Speed response of 8pole and 6pole

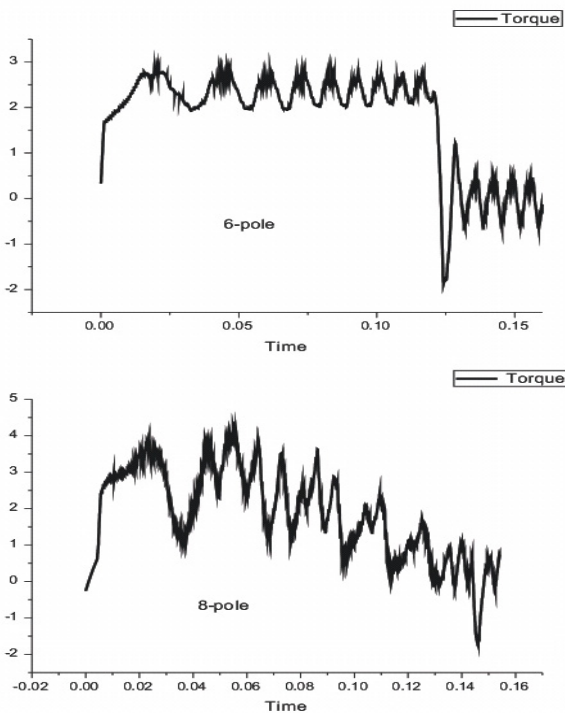


그림 10 8극 과 6극의 토크특성곡선  
 Fig. 10 Torque Characteristics of 8pole and 6pole PCMM

### 3. 결 론

제시된 모델의 분석을 위한 자석 및 자성재료의 비선형, 히스테리시스 현상과 자화의 평가를 위해 적합한 자화특성

해석방법이 제안되었다.

8극과 6극의 고정자 MMF에 따른 극 변환 메모리 모터의 자화방향과 자화량은 제안된 방법으로 분석 되었다.

컴퓨터 모델링과 시뮬레이션 결과 동작특성은 제안된 유한요소법과 프라이자흐 모델링 해석방법이 본 모델 해석방법으로서 적합함을 보여준다.

### 감사의 글

이 논문은 2010년도 정부(교육과학기술부)의 재원으로 한국연구재단의 기초연구사업 지원을 받아 수행된 것임(2010-0005711)"

### 참 고 문 헌

- [1] V. Ostovic, "Memory motor-A new class of controllable flux PM machines for a true wide speed operation," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, 2001, pp. 2577-2584.
- [2] V.Ostovic, "Pole changing permanent magnet maxhine," IEEETrans. On Industry Applycation, Vol38, No.6, pp.1493-1 499Dec, 2002
- [3] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST
- [4] 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
- [5] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Priesach Modelling", IEEE Transaction on Magnetics, Vol. 35, No. 5, pp. 1203-1206. May 1999.
- [6] 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 Tranl.on Magn Vol.35, No. 5, pp. 1199-1202, May 1999.
- [7] 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
- [8] P. Materu and R. Krishnan, "Estimation of switched reluctance motor losses," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, Pittsburgh, PA, 1988, p79-80

## 저 자 소 개



### 이 승 철 (李 承 哲)

1982년 4월 21일생. 2010년 한밭대학교  
전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공  
학과 석사과정

Tel : 042-821-1626

E-mail : scjs123@nate.com



### 이 중 호 (李 重 浩)

1968년 8월 21일생. 1993년 한양대 공대  
전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기  
공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전  
기공학과 졸업(공박). 1999년 9월 ~2000  
년 2월 한양대학교 부설 산업과학연구소  
선임 연구원. 2000년 3월 ~2002년 2월 도

립 충북과학대학 전기과 전임강사. 2002년 3월 ~현재 국  
립한밭대학교 전기공학과 부교수.

대한전기학회 시니어 회원 1992 ~현재 B부문 편집이사

Tel : 042-821-1098

E-mail : limotor@hanbat.ac.kr

Home page : <http://limotor.byus.net>