

유한요소법과 SUMT를 이용한 동기형 릴럭턴스 전동기의 토크와 부피에 따른 회전자 설계의 함수화

論 文

55B-11-6

Rotor design functional standard of Synchronous Reluctance Motor according to torque/volume using FEM & SUMT

李來權* · 李重浩†
(Rae-Hwa Lee · Jung-Ho Lee)

Abstract -This paper deals with an automatic rotor design functional standard computation based on torque/volume for a synchronous reluctance motor(SynRM).

The focus of this paper is the design relative to the torque/volume on the basis of each rated watt according to the rotor diameters of a SynRM. The coupled finite elements analysis (FEA) & sequential unconstrained minimization technique (SUMT) have been used to evaluate design solutions.

The proposed procedure allows to define the rotor geometric design function according to the rotor diameter and rated watt starting from an existing motor or a preliminary design.

Key Words : SUMT, SynRM, FEA, Rotor design functional standard, K_w

1. 서 론

동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 유도전동기와 비교해서 구조가 간단하고, 견고하며, 회전자 권선이 없어 동손이 적고, 회전자 파라미터의 영향은 받지 않는다[1]-[6]. 단위 부피당 효율과 토크와 같은 문제는 SynRM 성능평가에 중요하다[7]-[9]. 이러한 특성은 회전자 철심의 폭, 자속 장벽 폭의 비 K_w 에 관련된 회전자구조에 의존하며, 이를 기준으로 설계해야 한다. 만약 K_w 가 0.5 일 경우, 최대 출력토크 뿐만 아니라, 전체의 전류범위에서 최대 인덕턴스의 차를 얻는 것이 가능하다는 논문이 발표되었다.[10],[11]. 그리고 회전자 전체 철심의 폭과 자속 장벽 폭의 비 K_w 의 영향을 다룬 연구가 발표되었다[12].

참고문헌[10]은 Axially laminated type 을 대상으로 조사한 것이, 참고문헌[11]은 6개의 자속 장벽을 대상으로 연구를 수행한 것이다. 또한 참고문헌 [12]는 340W 가전용 SynRM의 설계 해를 구하였고 그때의 K_w 의 값은 1이다. 따라서 K_w 는 SynRM의 회전자에 관해서 모든 용량과 용도에 적용되는 고정된 값은 아니다. 따라서 설계방법은 자속장벽 수, K_w , 정격용량, 전류가 주어 졌을 때의 토크밀도와 역률에 관련된다[13].

참고문헌 [13]에서의 설계 해법은 각각의 정격용량에서 회전자의 형상을 다양하게 설계해서 인덕턴스의 차와 비를 비교하여 설계해를 구하였다. 기존의 초기모델로부터 최적

의 설계해를 구하였으며, 자속장벽 수, K_w 는 회전자의 지름에 관련되어 있는 값이라는 것을 알 수 있었다. (3HP, 3.5HP, 4.5HP(회전자 지름:71.4mm)), (5.5HP, 6HP, 7HP, 8HP(회전자 지름:85.75mm)), 각각의 회전자의 적층의 길이는 다르다.)

본 논문에서는 토크밀 역률 특성에 영향을 미치는 여러 설계변수 중 자속 장벽의 개수 외에 전체 철심영역의 폭과 전체 자속장벽의 폭의 비인 K_w , 여기에 추가로 SynRM 회전자의 직경을 설계 변수로 하였다.

본 논문의 주 관점은 회전자의 적층의 크기는 80mm로 일정하게 하고 회전자의 지름(66.82, 71.4, 84.95, 92.1, 101, 109.1mm: 초기설계)의 크기가 다른 각각의 정격 용량(1HP, 3HP-7HP)에서 각 용량별로 K_w 의 값의 크기와 자속장벽의 개수를 다르게 하여 용량별로 토크의 크기를 구한다. 구해진 토크가 최대값일 때의 최적 설계해를 구하는 것이다.

제안된 최적 설계기법은 기존의 모터 또는 초기설계로부터 회전자 지름과 정격용량에 따라 회전자의 기하학적인 설계함수를 정의한다.

2. SynRM의 직경에 따른 초기 모델 설계

참고문헌 4에 의하면 회전자 지름은 두 가지 경우가 있고, 각각의 정격용량은 적층길이에 따라 결정 되어졌다. 본 논문에서의 정격용량은 적층길이(80mm)가 일정 할 때 그림 1(a),(b)에서 보여 지는 것처럼 회전자의 길이에 의해 정의 되어진다.

정격용량과 모터의 크기와의 관계는 식(1)에 의해 나타낼 수 있다. 기기는 정격상태에서 역률이 84%, 효율이 82%, 3상 60Hz, 220V라고 가정한다.

† 교신저자, 正 會 員 : 한밭대학교 전기공학과 조교수

E-mail : limotor@hanbat.ac.kr

* 學生會員 : 한밭대학교 전기공학과 석사과정

接受日字 : 2006年 9月 14日

最終完了 : 2006年 10月 2日

표 1은 각각의 정격 용량시의 초기 모델의 사양을 나타낸다.

표 1 초기 모델 사양

Table 1 Initial Design Model Specification

Rated watt	Rotor diameter(mm)	Rated voltage(V)	Rated current(A)	Stack length(mm)	Slot number
1HP	66.822	220	2	80	24
3HP	71.4	220	6	80	24
4HP	84.95	220	11	80	24
5HP	92.1	220	14	80	24
6HP	101	220	17	80	24
7HP	109.1	220	20	80	24

$$P_N \times 10^3 = k_N D_g^2 L(\omega) B_g f / p \quad (1)$$

$$C_g = E / (2.22 f \phi k_p)$$

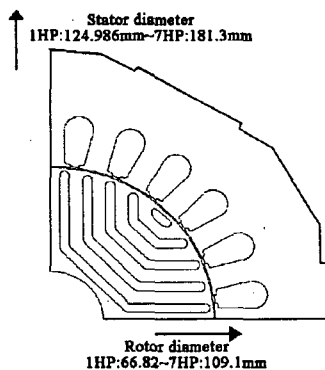
$$N_s = 3 \times P \times (2 \sim 4)$$

$$I = P_N \times 10^3 / (3 \eta P_f)$$

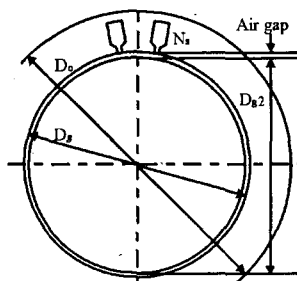
$$\phi = B_g (\pi D_g / P) L$$

$$\delta = (0.1 + 2 D_g) \times 10^{-3}$$

여기서, P_N : 정격용량(kW), B_g : 공극의 평균자속밀도, f : 주파수, P : 극 수, E : 상전압, k_p : 상수(0.9), k_N : 상수(12), C_g : 각 상의 도체수, η : 효율, P_f : 역률, δ : 공극의 길이, L : 적층 길이(80mm)



(a) 지름 증가 범위
(a) Enlarged diameter range



(b) 설계변수
(b) Design parameter

그림 1 초기 회전자와 고정자 설계
Fig 1 Initial rotor and stator design

4. 설계 변수를 고려한 회전자 설계 과정

SUMT에 의해 최적해를 구하는 문제는 수학적으로, 함수 $F=F(Y)$, $Y=(y_1, y_2, \dots, y_n)$ 를 최소화하는 것이 목적이다. 수 F 는 목적함수이고, Y 는 독립변수이다. 각 변수는 상하의 경계 upper and/or lower bounds에 의해 ($Y_{li} < Y_i < Y_{ui}$, $i=1, 2, 3, \dots, y_n$) 제한되어져야 하고, 이러한 변수들은 구조적 제약에 따라 변화 되어진다.

식 2는 zandel 함수로 구해진 비제약 최소화 함수와 제약조건을 포함한 목적함수를 회전자 직경에 따라 나타낸 것이다.

본 논문은 K_w 는 0.1에서 1.2로 고려 하였고, 산업용용을 위해 기계적인 제약, rib의 제작조건을 고려해 자속 장벽수는 3, 4, 5, 6, 7로 하였다. SynRM의 최적화에 대한 관점으로 최대토크를 설정하였고, 인덕턴스의 차(L_d-L_q)의 최대화를 위해 목적함수 $F(Y)$ 가 K_w 를 기준으로 계산 되어진다. 최적화 알고리즘(SUMT)는 변화하는 디자인에 따라 목적함수의 국부 최소를 발견하는 기법이다.

$$F1(Y) = -10.40Y^2 - 20.127Y - 82.16 \quad (66.822mm) \quad (2)$$

$$F2(Y) = 170.80Y^3 - 181.40Y^2 - 112.31 \quad (71.4mm)$$

$$F3(Y) = 52.65Y^3 - 51.48Y^{2.5} - 32.31 \quad (84.95)$$

$$F4(Y) = -109.20Y^2 - 780.24Y^{0.5} + 635.51Y + 178.09 \quad (92.1mm)$$

$$F5(Y) = -473.10Y^2 + 1181.32Y^{1.5} - 796.96Y + 29.41 \quad (101mm)$$

$$F6(Y) = -397.05Y^2 + 980.41Y^{1.5} - 653.21Y + 18.92 \quad (109.1mm)$$

그림 2는 설계흐름도를 보여준다. 시행 순서는 다음과 같다.

- ① Initial Value : 초기 시작기의 CAD 파일 선처리 (Pre-processor) 작업 데이터를 작성한다. (각 용량별)
- ② Finite Element Analysis : 유한요소법으로 각각의 정격 전류치에 따른 정특성 해석을 수행한다.
- ③ Computation of Inductance Ratio/Difference and Comparison: 인덕턴스 비와 차를 계산한 후 data를 저장한다. 이후 Kw가 제한치 1.2에 도달했는가를 판단한다.
- ④ Automatic CAD File Drawing & Pre-processor for FEA: Kw의 변화에 따르는 변화된 회전자의 형상을 해석할때, 유한 요소 해석을 위한 선처리 작업을 다수 수행해야하는 번거로움이 따른다. 본 연구에서는 자동으로 형상변화에 따르는 CAD화일을 작성하고 선처리 작업을 하는 프로그램을 설계 프로그램에 포함하여 설계시간을 단축한다.
- ⑤ Change the flux barrier number : Kw가 한계치에 도달하면 flux barrier의 수를 증가시킨다.
- ⑥ Search & Storage Maximum Kw at rated Current : 각각의 자속장벽에 대하여 정격전류시의 최대 Kw를 저장한다
- ⑦ 최적화를 위한 zandel 함수를 만든다.
- ⑧ F1(Y) ~ F6(Y): 구해진 d축 및 q축 인덕턴스와 제약함수를 zandel을 이용하여 목적함수로 나타낸다.
- ⑨ Search the minimum of the new Objective Function : 인덕턴스 비와 차를 계산한 후 이전 모델과 비교, 최적 모델을 찾는다.

이와같은 흐름도에 의하여 3-7개의 자속장벽을 갖는 SynRM의 용량별 시작모델을 기준으로 하여 회전자 철심 세그먼트가 차지하는 폭에 대해 전체 자속장벽의 영역이 차지하는 폭의 비(K_w)를 변화시켜가면서 그 특성을 고찰 하였다.

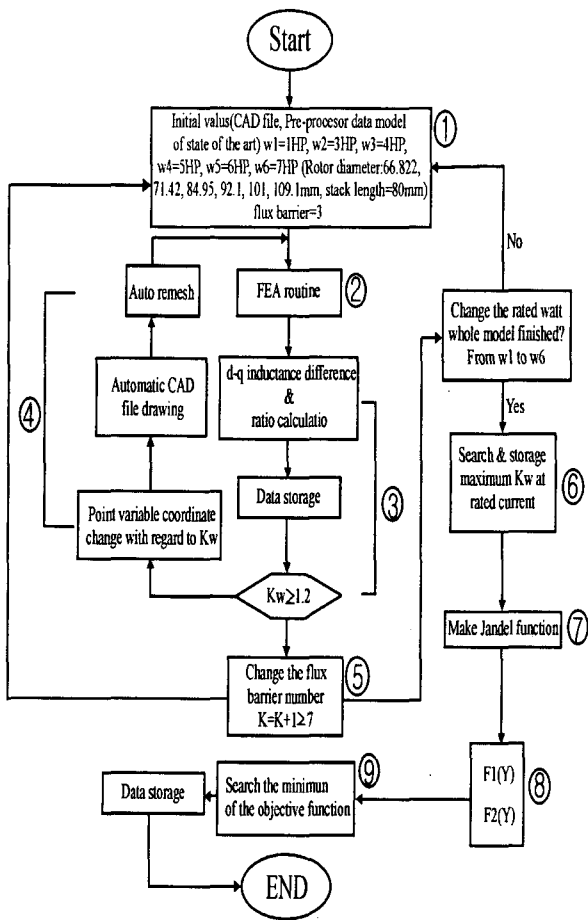


그림 2 설계 흐름도
Fig. 2 Flow chart total design strategy

5. 설계결과 분석

본절에서는 1HP-7HP 가지의 최적해를 도출한 것을 보여주고 전체 용량에 대한 결과 분석을 나타낸다.

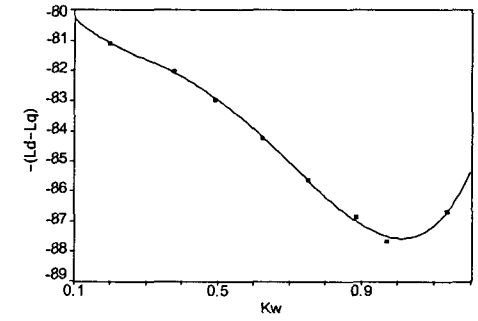
그림 3(a)-(f)는 각각의 정격용량(회전자 지름:66.822mm 71.4mm, 84.95mm, 92.1mm, 101mm, 109.1mm)에서의 zandel 함수를 보여준다. 1HP, 3HP, 4HP에서는 자속장벽의 개수는 3개이고, 5HP는 자속장벽의 개수는 5개, 6HP, 7HP는 자속장벽의 수는 6개이다. 함수에서 y축의 값 $-(L_d - L_q)$ 이 최소값일때 토크가 가장 커지는데, 이때의 K_w 의 값이 최적 설계값이 된다.

각 정격용량에서 정격전류를 주었을 경우 K_w 의 값을 찾아냈으며, 전체 설계 결과를 표 2에 나타내었다. 설계 결과를 보면 직경이 가장 작은 1HP의 K_w 의 값은 0.968 이고, 직경이 가장 큰 7HP의 K_w 의 값은 0.5465의 값을 얻었다. 값을 분석해 보면 직경이 작으면 K_w 의 값은 1에 가까워지고, 직경이 증가함에 따라 K_w 의 값은 0.5의 값에 가까워진다. 자속장벽의 개수도 지름의 증가에 따라 많아지는 것을 볼 수 있다. 정격전류의 상승으로 포화량이 증가 하지만, 회전자의 반경의 증가로 자속장벽 개수를 확보 할 수 있는 범위가 늘어날 수 있음으로 분석 된다.

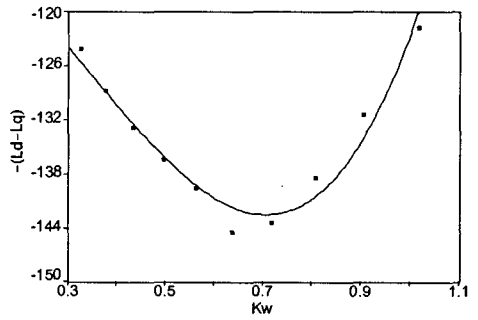
이 결과는 참고문헌 10-13에서 보여주는 국내의 선행연구와 일치함을 알 수 있다.

그림 4는 구해진 설계해로 만들어진 모델의 d축의 자속 흐름도를 보여준다.

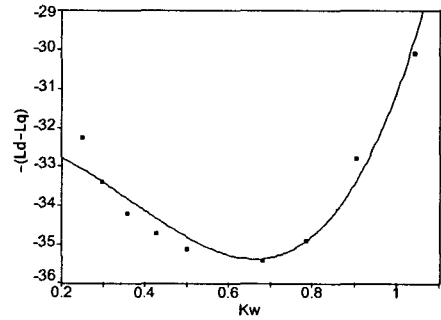
그림 5는 SynRM 회전자 크기와 K_w 값의 설계 함수를 나타낸다. 여기서 a의 오차는 $\Delta(L_d - L_q)$ 는 각각 1.13과 0.3이다. 이 크기는 SynRM의 토크에 영향이 거의 없다. 따라서 SynRM의 회전자의 설계해는 회전자의 직경에 관계가 있고, 그 설계 기준은 지수 함수로 설계화 할 수 있다.



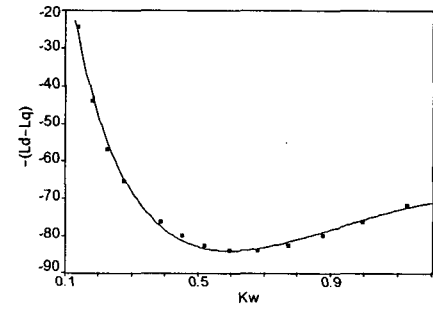
(a) 1HP:66.822mm



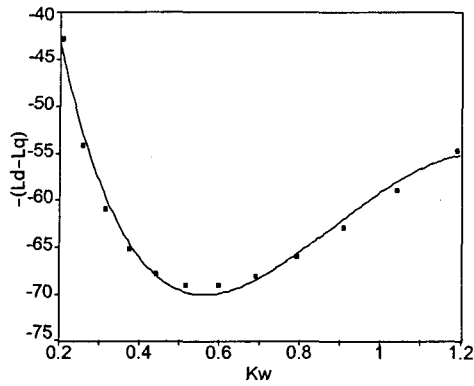
(b) 3HP:71.4mm



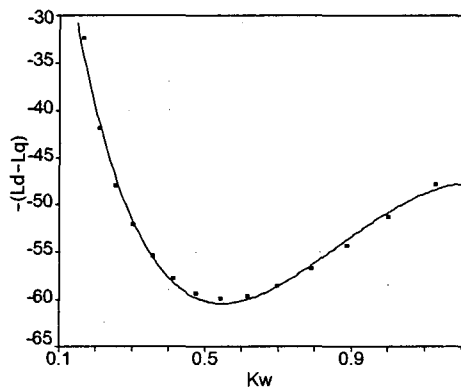
(c) 4HP:84.95mm



(d) 5HP:92.1mm



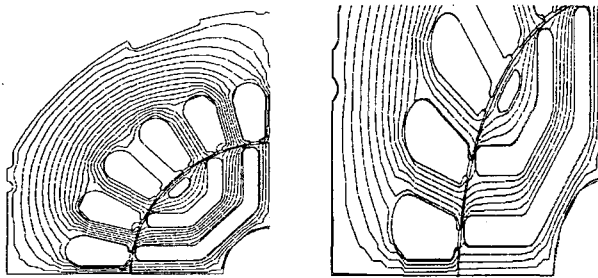
(e) 6HP:101mm



(f) 7HP:109.1mm

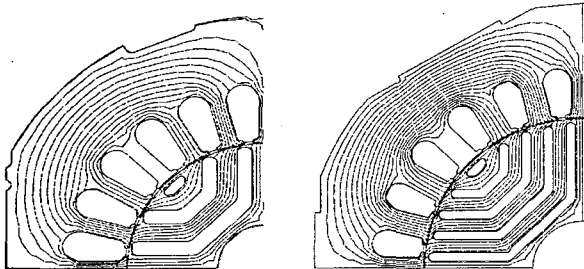
그림 3 각 용량별 zandel 함수

Fig. 3 Zandel function for each rated watt



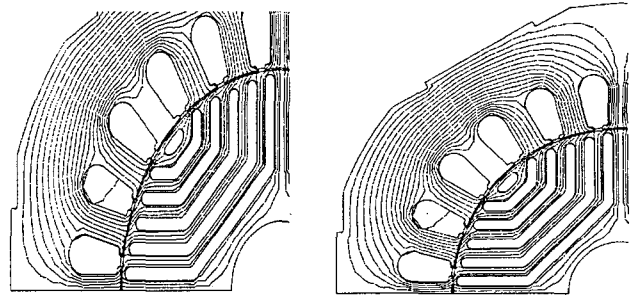
(a) 1HP:66.822 mm

(b) 3HP:71.4 mm



(c) 4HP:84.95 mm

(d) 5HP:92.1 mm



(e) 6HP:101 mm

(f) 7HP:109.1 mm

그림 4 설계해의 결과로 설계된 모델의 d축 자속흐름

Fig. 4 (a)-(f) shows the d-axis flux plots of designed models result in the design solution

표 2 각 정격 용량의 설계해

Table 2 Design solutions of each rated watt

Rated watt	$L_d - L_q$	K_w	Diameter (mm)	Rated current(A)	Flux barrier
1HP	87.68	0.968	66.822	2	3
3HP	54.94	0.708	71.4	6	3
4HP	35.4316	0.6645	84.95	11	3
5HP	84.0694	0.596	92.1	14	5
6HP	69.1375	0.5635	101.0	17	6
7HP	60.0284	0.5465	109.1	20	6

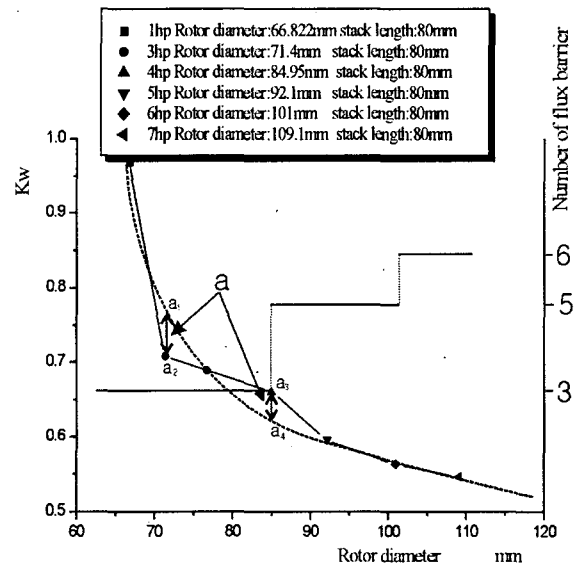


그림 5 회전자 지름에 따른 K_w 함수

Fig. 5 K_w function according to rotor diameter increasing

6. 결 론

본 연구에서 SynRM의 토크 및 역률 특성에 영향을 미치는 자속장벽의수, K_w 등의 최적 설계치는 회전자의 직경에 의해 정해진다는 것을 알 수 있으며, 직경에 따른 K_w 치와 자속장벽수의 정량적 최적 설계의 기준치를 제시하였다. 이

러한 선행연구는 SynRM 개발을 목표로 하는 산업체에 설계 기준으로 유효하게 사용되리라 사료 된다. 또한 설계 기준의 신뢰성 및 안정성 확보를 위하여 자기적 비선형성 및 복잡한 형상의 전동기를 정확 하게 해석 할 수 있는 장점을 가지고 있는 유한 요소법을 이용하여 해석을 수행 하였다. 그리고 형상변화에 따르는 자동 CAD파일 작성프로그램을 개발하고 이에 따르는 자동선처리 프로그램의 개발을 통해 설계과정 시간을 단축하였다.

감사의 글

이 논문은 산업자원부에서 시행하는 연구 개발 프로그램의 지원에 의해 연구 되었습니다.

참 고 문 헌

[1] Y. J. Jang, J. H. Lee, "Characteristic Analysis of Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motor for High Power Application", *Journal of Applied Physics*, Vol.97, No.10, 10Q503, May, 2005.

[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, D. S. Hyun, "Hysteresis Modeling of Synchronous Reluctance Motor considering PWM Input Voltage", *Journal of Physica B*, Vol. 275, pp238-247, January, 2000.

[4] J. H. Lee, D. S. Hyun, " Hysteresis Analysis for the Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Preisach Modeling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.35, No.3, pp1203-1206, May, 1999.

[5] 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, pp2629-2632, September, 1998.

[6] 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, pp3522-3525, September, 1998.

[7] J. H. Lee, "Efficiency Evaluations of Synchronous Reluctance Motor Using Coupled FEM and Preisach Modeling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 39, No. 5, pp 3271-3274, September, 2003.

[8] J. H. Lee, 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. 3, pp1199-1202, May, 1999.

[9] J.H. Lee, "Design Solutions to Minimize Iron Core Loss in Synchronous Reluctance Motor using Preisach Model and FEM" *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol.38, No. 5, pp 3276~3278, September, 2002.

[10] Takayoshi Matsuo, Thomas A.Lipo, "Rotor Design Optimization of Synchronous Reluctance Machine", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.9, No.2, pp.359-365, June 1994

[11] Hiroyuki Kiriyama, Shinichiro Kawano, Yukio Honda, Toshiro Higaki, "High Performance Synchronous Reluctance Motor with Multi-flux Barrier for the Appliance Industry", *IEEE Industry Application* Vol. 1. pp. 111-117, 1998.

[12] Jung Ho Lee, "Design and Efficiency Characteristic Test of 340W Home Appliance Synchronous Reluctance Motor", *Transaction of KIEE*, Vol.52B, No.2, Feb., 2003.

[13] S. B. Kwon, S. J. Park, J. H. Lee, "Optimum Design Criteria Based on the Rated Watt of a Synchronous Reluctance Motor Using a Coupled FEM and SUMT", *IEEE Transactions on Magnetics*, Vol.41, No.10, pp 3970~3972, Oct. 2005.

저 자 소 개



이 중 호(李重浩)

1968년 8월 21일생. 1993년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1999년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 1999년 9월-2000년 2월 한양대학교 부설 산업 과학 연구소 선임 연구원. 2000년 3월-2002년 2월 독립 충북과학대학 전기과 전임강사. 2002년 3월-현재 국립 한밭대학교 전기공학과 조교수
Tel : 042-821-1098, Fax : 042-821-1088
E-mail : limotor@hanbat.ac.kr
Home page : www.motorlovelab.com



이 래 화(李來樺)

1979년 12월 5일생. 2004년 한밭대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사 과정
Tel: 042-821-1626, Fax: 042-821-1088
E-mail : naezone@hanmail.net.