

# 실험계획법을 이용한 단상 유도형 동기전동기의 최적 설계

論 文
56-4-9

## Optimal Design of Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor by using Design of Experiment

吳世泳<sup>†</sup> · 金承柱<sup>\*</sup> · 鄭大成<sup>\*</sup> · 李喆圭<sup>\*\*</sup> · 李衡雨<sup>\*\*\*</sup> · 李柱<sup>§</sup>  
(Se-Young Oh · Seung-Joo Kim · Dae-Sung Jung · Chul-kyu Lee · Hyung-Woo Lee · Ju Lee)

**Abstract** - In this paper, optimized model was designed for the starting characteristic of the Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor by using the Design of Experiment. A field pole angle, thickness and distance from center axis of permanent magnet were selected as design factor. We executed the transient state characteristic analysis of 8 test models. The transient state characteristic analysis was executed by using the 2 dimensional Finite Element Method and the Time Difference Method. We checked the fact that the selected design factor affected starting characteristic of the Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor. Depend on this result we found the optimized design point by using the response optimization.

**Key Words** : LSPM, DOE, 실험계획법, FEM, 유한요소법, 최적설계

### 1. 서 론

단상 유도형 동기전동기(Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Synchronous Motor)는 일반 농형 유도 전동기와 같은 농형 바를 가지는 회전자 내부에 영구자석을 매입한 구조이다. 유도 현상을 최대한 이용하기 위해 영구자석은 농형 바 안쪽에 위치하고 있다[1]. 이러한 유도형 동기전동기는 정상상태에서 영구자석 동기전동기의 특성을 가지므로 슬립에 의한 유도현상이 없어 손실을 줄여 효율 향상을 도모할 수 있다. 그러나 기동에서 정상상태 도달까지의 과도상태에서는 유도기의 특성으로 기동특성을 만족해야 하나, 과도상태 시 농형 바에 의한 특성과 영구자석에 의한 특성이 중첩되어 농형 바에 의해 발생한 기동 토크가 영구자석에 의해 발생한 브레이크 토크의 방해를 받아 기동 특성이 나빠지고 기동 시간이 길어지는 단점이 있다[2].

따라서 본 논문에서는 실험계획법(Design Of Experiments)을 이용하여 단상 유도형 동기전동기의 기동 특성 향상을 위한 최적설계를 수행하였다. 기본 모델을 유한 요소법과 시간 차분법을 이용하여 과도상태 특성 해석을 한 다음, 그 결과를 바탕으로 기동 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 설계인자를 선정하였다. 이 설계인자의 조합으로 나오는 모델의 개수를 최소화하고, 이렇게 줄어든 모델을 해석하여 그 결과 값을 가지고 반응 최적화를 통해 최적화 모델을

선정하였다. 최적화 모델의 해석 결과를 기본 모델과 비교하여 실험계획법에 대한 신뢰도를 높였다.

### 2. 본 론

#### 2.1 해석 모델

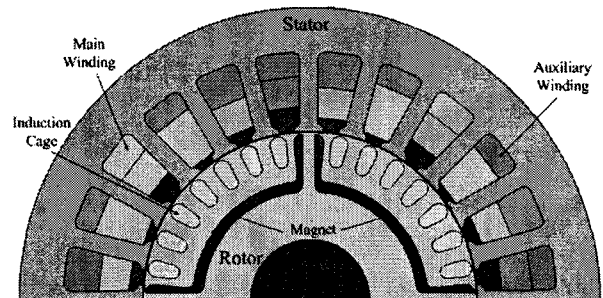


그림 1 4극 단상 유도형 동기 전동기 기본 모델  
Fig. 1 Base model of the single-phase LSPMSM with 4 pole

그림 1은 본 논문에서 최적 설계를 수행할 단상 유도형 동기전동기 기본모델의 1/2 횡단면이다. 여기서 고정자 부분은 24개의 슬롯을 갖는 4극 단상 유도기의 고정자 요크와 권선을 그대로 사용하였다. 회전자에는 자기 기동을 위한 28개의 농형 바와 동기속도 회전을 위한 영구자석이 한 극에 3개씩 총 12개가 삽입되어 있다. 영구자석은 기동 시 고정자 전류에 의해 감자의 우려가 있으므로, 선형적인 감자 특성을 가지며, 높은 보자력과 잔류자속 밀도를 갖는 NdFeB를 사용하였다. 영구자석의 착자 방향은 Radial 방향으로 된 것을 사용하였다. 또한 회전자는 내부에 자속 장벽을 만들어 영구자석의 양단에서 발생하는 누설자속량을 줄

† 교신저자, 學生會員 : 漢陽大 電氣工學科 碩士課程  
E-mail : osyone@hanyang.ac.kr

\* 正會員 : 漢陽大 電氣工學科 博士課程

\*\* 正會員 : (株)SPG 技術研究所 先任研究員 · 工博

\*\*\* 正會員 : 韓國鐵道技術研究院 先任研究員 · 工博

§ 正會員 : 漢陽大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2006年 10月 12日

最終完了 : 2007年 3月 1日

이는 구조로 되어있다. 최적 설계를 위한 특성해석에 이용된 모델의 공통적인 사양을 표 1에 나타내었다. 고정자 요크와 권선, 회전자 외경은 고정시키고, 오직 회전자 내부의 형상을 변경해서 최적 설계를 수행하였다.

표 1 해석 모델의 기본 사양

Table 1 Fundamental specifications of the analysis model

구분	사양	구분	사양
고정자 외경[mm]	82.95	정격 속도[rpm]	1800
회전자 외경[mm]	47.5	입력전압[V]	220
적층길이[mm]	45	주파수[Hz]	60
영구자석 잔류자속밀도[T]	1.12	공극 길이[mm]	0.15

2.2 해석 방법

그림 1의 기본 모델을 유한 요소법과 시간 차분법을 이용하여 과도상태 해석을 수행하였다. 과도상태 해석을 위해서는 운동방정식이 고려되어야 한다. 전동기의 기계적인 운동방정식은 다음과 같다.

$$T_e = T_L + J \frac{d\omega_m}{dt} + B\omega_m \quad (1)$$

여기서,  $T_e$ 는 전자기적 발생토크,  $\omega_m$ 은 회전자의 기계적 회전 각속도,  $T_L$ 은 부하토크,  $J$ 는 회전자의 관성 모멘트,  $B$ 는 점성 마찰계수이다.  $J$ 값은 상용 프로그램 Solidworks를 이용하여 구했고,  $B$ 값은 고려하지 않았다. 부하토크  $T_L$ 은 0.1Nm를 걸어주고 해석을 수행하였다[3].

자기 벡터 포텐셜과 전류밀도가 z축 성분을 가진다면 LSPMSM의 2차원 지배방정식은 자기 벡터 포텐셜  $A$ 에 의해 다음과 같이 표현된다.

$$\frac{1}{\mu} \left[ \frac{\partial}{\partial x} \left( \frac{\partial A_z}{\partial x} \right) + \frac{\partial}{\partial y} \left( \frac{\partial A_z}{\partial y} \right) \right] + J_o = 0 \quad (2)$$

여기서  $A_z$ 는 z성분의 자기 벡터 포텐셜,  $J_o$ 는 전류밀도이고  $\mu$ 는 투자율이다[4].

기본 모델의 과도상태 해석결과를 그림 2와 3에 나타내었다. 그림 2에서 약 0.13초 이후에 동기속도에 진입하게 되는데, 이때부터 동기속도인 1800rpm 근처에서 약간의 속도리플을 갖는다. 그림 3의 토크 파형을 살펴보면, 동기속도에 진입한 이후부터 평균토크는 부하토크인 0.1Nm만큼 발생하고, 큰 토크리플이 발생된다. 이 토크리플이 속도리플의 원인이 된다. 즉, 토크 파형에서 0.1Nm를 기준으로 토크가 (+)일 때는 속도가 1800rpm 이상으로 증가하고, (-)일 때는 속도가 점점 감소해서 1800rpm 이하로 감소하게 된다. 이 현상은 회전자의 농형 바가 댐퍼 역할을 하기 때문이다.

유도형 동기전동기가 동기속도인 1800rpm으로 회전할 때는 농형 바에 전류가 흐르지 않지만, 동기속도 이상이나 이하의 속도로 회전하게 되면 농형 바에 유도기전력이 형성되어 전류가 흐르게 된다. 이 전류는 회전자에서 기자력을 발생시켜 회전속도가 동기속도가 되도록 댐퍼 역할을 한다.

2.3 실험계획법 (Design Of Experiments)

실험계획법(Design Of Experiments)은 실험에 대한 계획 방법을 의미하는 것으로, 제품 품질특성에 영향을 미치는 요인들이 어떤 것들인지를 알아보기 위하여 실험의 배치와 실시를 어떻게 하고, 또 얻어진 데이터를 어떠한 통계적 방법으로 분석을 하는지에 관한 이론이다. 이와 같은 실험계획법을 이용하면 이상변동을 가져오는 많은 원인 중에서 중요한 원인을 효율적으로 선정, 그 효과를 수량적으로 측정할 수 있게 된다.[5]

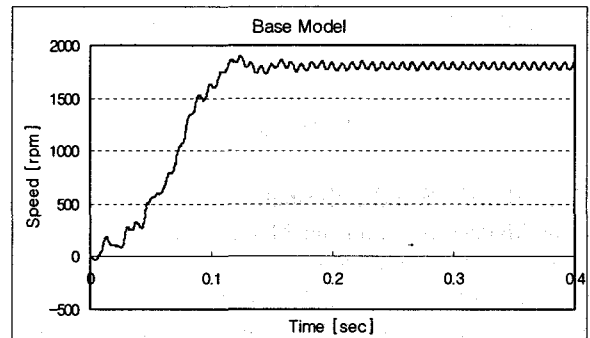


그림 2 기본 모델의 속도 파형  
Fig. 2 Speed wave form of the base model

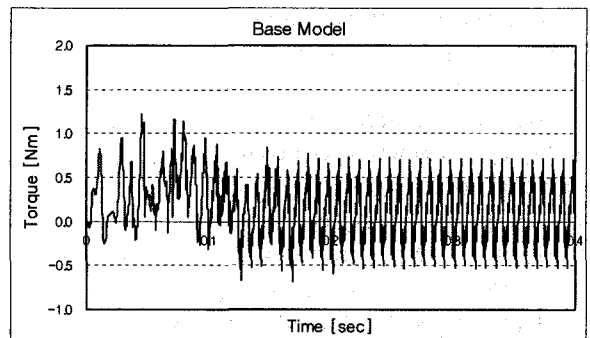


그림 3 기본 모델의 토크 파형  
Fig. 3 Torque wave form of the base model

유도형 동기전동기의 기동 특성에 큰 영향을 미칠 것으로 예상되는 회전자의 설계인자를 그림 4와 같이 선정하였다. 그리고 그 범위를 표 2에 나타내었다. 목적함수로는 동기속도 진입시간, 토크리플, 권선전류의 크기를 선정하였다. 이 목적함수들이 모두 최소가 되도록 최적화를 수행하였다. 즉, 동기속도 진입시간이 짧을수록, 토크리플과 권선전류의 크기가 작을수록 좋은 모델이 된다.

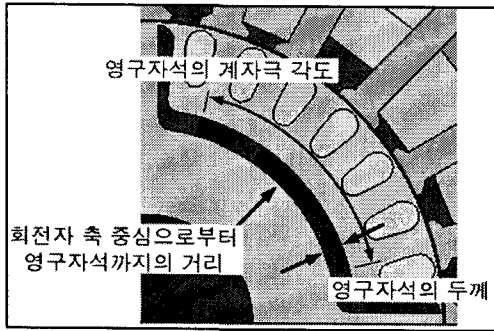


그림 4 단상 동기형 유도전동기의 설계인자  
Fig. 4 Design factors of the single-phase LSPMSM

표 2 설계인자의 범위  
Table 2 The limits of design factors

설계인자	기호	범위	단위
영구자석의 계자극 각도	Pole Arc	30 ~ 73	°
회전자 축 중심으로부터 영구자석까지의 거리	Position	13 ~ 17	mm
영구자석의 두께	Thickness	0.8 ~ 2.25	mm

표 3은 설계인자 범위의 최대값과 최소값을 Full Factorial 방법으로 배열하여 얻은 8개의 실험 모델을 보여주고 있다. 이 표를 근거로 8개의 실험 모델을 표 4와 같이 모델링하여 과도상태 해석을 수행하였다.

표 3 풀 팩토리얼의 데이터 배열  
Table 3 Data array of Full factorial

해석 모델	Pole Arc[°]	Position[mm]	Thickness[mm]
Model 1	30	13	0.8
Model 2	73	13	0.8
Model 3	30	17	0.8
Model 4	73	17	0.8
Model 5	30	13	2.25
Model 6	73	13	2.25
Model 7	30	17	2.25
Model 8	73	17	2.25

2.4 해석 결과

기본 모델과 표 3과 4의 8개 실험 모델을 과도상태 해석한 결과가 표 5에 보인다. 동기속도 진입시간은 정상상태에서도 속도 파형에 리플이 존재하기 때문에 1800rpm에서 5% 이내에서만 변동하기 시작할 때의 시각을 선정했다. 토크리플과 권선전류는 동기속도에 진입하기 이전의 값은 무의미하므로, 동기속도에 진입한 이후인 0.2초부터 0.4초까지의 결과 파형을 가지고 계산하였다.

표 5에 보이는 결과를 가지고 요인분석을 수행하였다. 그 결과가 그림 5~7에 보인다. 즉, 그림 5~7은 설계인자로 선정한 3개의 인자들이 동기속도 진입시간, 토크 리플과 권선전류의 크기에 미치는 영향도와 그 경향을 나타내고 있

다. 동기속도 진입시간은 계자극이 클수록, 회전자 중심으로부터 영구자석의 거리가 가까울수록, 영구자석의 두께가 얇을수록 빨라지는 것을 확인 할 수 있다. 토크리플은 계자극이 클수록, 회전자 중심으로부터 영구자석의 거리가 멀수록, 영구자석의 두께가 두꺼울수록 줄어드는 것을 알 수 있다. 마찬가지로 권선전류는 계자극이 작을수록, 회전자 중심으로부터 영구자석의 거리가 가까울수록, 영구자석의 두께가 얇을수록 줄어드는 것을 알 수 있다.

표 4 8개의 해석 모델  
Table 4 8 analysis models

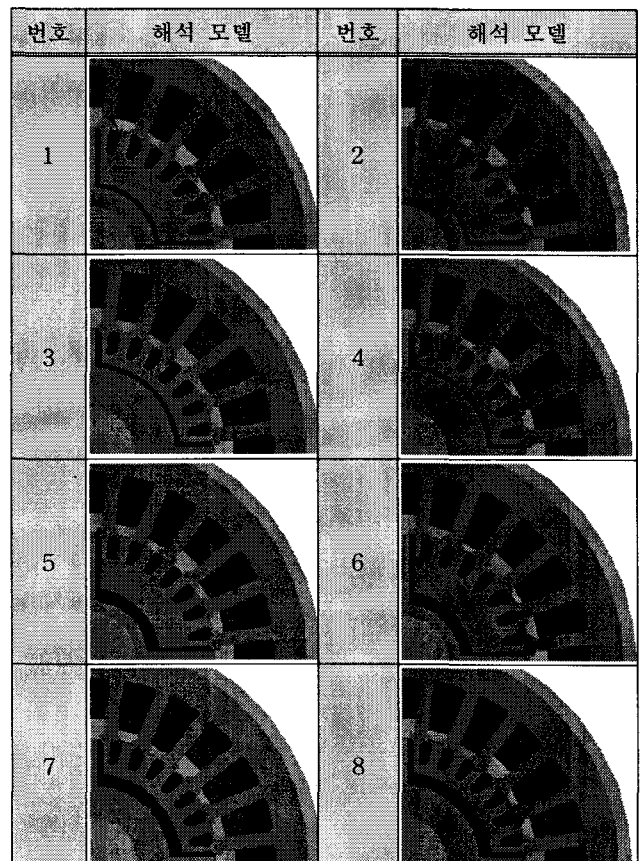


표 5 기본 모델과 8개 실험 모델의 해석 결과  
Table 5 Simulation results of the base model and 8 test models

해석 모델	동기속도 진입시간 [초]	토크리플 [Nm]	권선전류 최대값 [A]
Model 1	0.131	1.758	0.615
Model 2	0.104	1.666	0.615
Model 3	0.142	1.246	0.864
Model 4	0.119	1.411	1.256
Model 5	0.131	1.659	0.629
Model 6	0.128	1.167	0.693
Model 7	0.153	1.421	1.075
Model 8	0.169	1.525	1.732
Base Model	0.131	1.329	1.281

그림 6과 7을 보면, 토크리플과 권선전류의 특성이 상충되는 것을 확인할 수 있다. 즉, 토크리플을 줄이기 위해 계자극 각도, 영구자석의 위치와 두께를 최대로 하면 권선전류는 오히려 늘어나게 된다. 따라서 이러한 특성을 고려하여 적절한 설계점을 찾아야 한다.

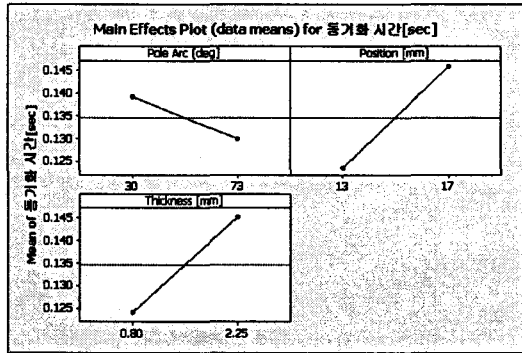


그림 5 동기속도 진입시간의 메인 이펙트 플롯  
Fig. 5 Main effect plot of the synchronized time

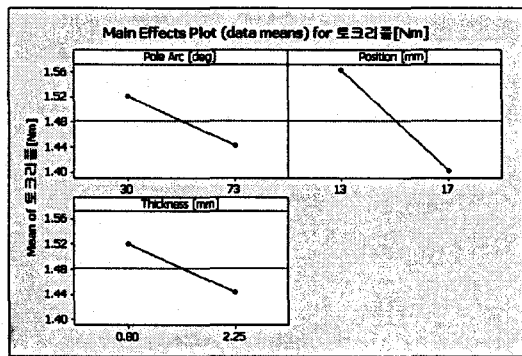


그림 6 토크리플의 메인 이펙트 플롯  
Fig. 6 Main effect plot of the torque ripple

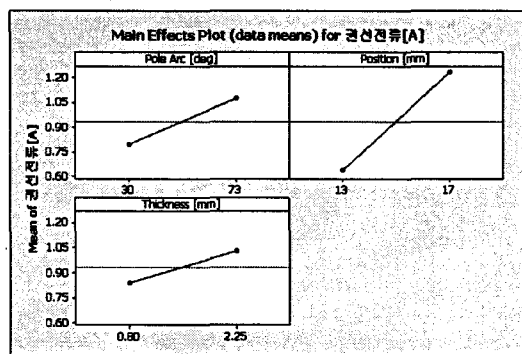


그림 7 권선전류의 메인 이펙트 플롯  
Fig. 7 Main effect plot of the winding current

동기속도 진입시간을 앞당기고, 토크리플과 권선전류의 크기를 저감하기 위한 적절한 설계점을 찾기 위해 MINITAB 프로그램을 이용하여 반응 최적화를 실시하였다. 그리고 그 결과를 그림 8에 나타내었다. 그림의 대괄호안의 치수가 최적화된 모델의 설계점이다. 이것은 앞의 표 3의 Model 6에 해당한다. 표 5의 Model 6에 해당하는 결과 값

을 살펴보면, 동기속도 진입시간, 토크리플과 권선전류의 크기가 기본모델의 해석결과보다 작은 값이 나온 것을 알 수 있다.

New	Hi	Pole Arc	Position	Thickness
D	Cur	73.0	17.0	2.250
0.82083	Lo	[73.0]	[13.0]	[2.250]
		30.0	13.0	0.80
동기화 시간[s]				
Minimum				
y = 0.1282				
d = 0.71760				
토크리플[Nm]				
Minimum				
y = 1.1666				
d = 0.90480				
권선전류[A]				
Minimum				
y = 0.6927				
d = 0.85179				

그림 8 반응 최적화 결과  
Fig. 8 Result of the response optimization

최적화 모델(Model 6)의 토크 파형을 그림 9에 나타내었다. 그림 3의 기본 모델 토크 파형과 비교했을 때, 리플이 약간 줄어든 것을 확인할 수 있다.

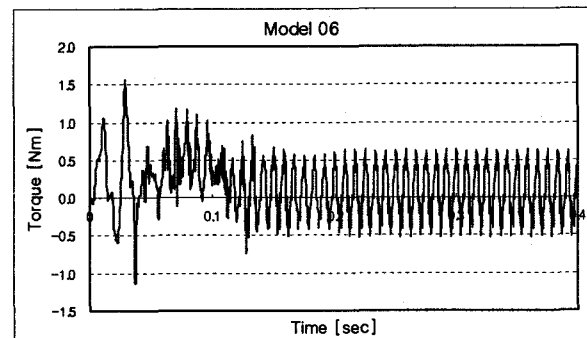


그림 9 최적화 모델의 토크 파형  
Fig. 9 Torque wave form of the optimum model

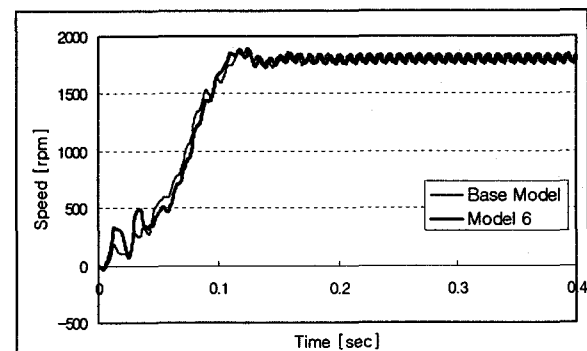


그림 10 기본 모델과 최적화 모델의 속도 파형 비교  
Fig. 10 Comparison of the speed wave form of the base model and the optimum model

그림 10은 기본 모델과 최적화 모델의 속도 특성을 비교한 그림이다. 가는 선이 기본 모델의 속도 특성이고, 굵은 선이 최적화 모델의 속도 특성이다. 동기속도 진입시간이 그래프 상으로는 큰 차이를 보이지 않는다. 수치상으로도 기본 모델이 0.131초, 최적화 모델이 0.128초로 아주 근소한 차이를 보인다.

따라서 본 논문에서는 실험계획법을 통하여 기본 모델에 비해 권선전류는 1/2로 크게 줄어 들고, 동기속도 진입시간과 토크리플은 아주 근소하게 줄어드는 최적화 모델을 선정할 수 있었다.

### 3. 결 론

본 논문에서는 단상 유도형 동기전동기의 기동 특성 향상을 위해 실험계획법을 이용하여 최적 설계를 수행하였다. 단상 유도형 동기전동기의 회전자에 대한 여러 가지 설계인자들 중 3개의 설계인자를 선정하였고, 이를 가지고 실험계획법을 사용하여 8개의 실험 모델을 선정하였으며, 이 8개의 실험 모델을 유한 요소법과 시간 차분법을 이용하여 과도상태 해석을 수행하였다. 해석 결과 Data를 실험계획법을 통하여 분석하여 본 논문에서 요구되는 동기속도 진입시간 개선과 토크리플과 권선전류의 저감 효과를 동시에 얻을 수 있는 설계점을 찾을 수 있었다.

### 감사의 글

본 연구는 2006년도 에너지관리공단의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

### 참 고 문 헌

- [1] 김병국, 김태현, 조원영, 이인재, 조운현, "직립기동 영구자석 동기 전동기의 브레이크 토크 특성 해석", 대한전기학회 EMECS학회 추계학술대회 논문집, pp. 86-88, 2005.
- [2] 이철규, 권순효, 양병렬, 권병일, "단상 유도동기전동기의 기동 특성 개선을 위한 회전자 바 형상 설계", 대한전기학회논문지, 54B권 8호, pp. 370-376, 2005.
- [3] Andrew M. Knight, John C. Salmon "Modeling the Dynamic Behaviour of Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Motors", IEEE Industry Applications Conference Thirty-Fourth IAS Annual Meeting, Vol. 4, pp. 2582-2588, 3-7 Oct. 1999.
- [4] 최재학, 김태형, 장기봉, 이상돈, 이주, "DC Link 전압 리플과 환류 다이오드를 고려한 스위치드 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석 기법", 대한전기학회논문지, 54B권 1호, pp. 1-8, 2005.
- [5] 박동규, "최신 실험계획법", 機電研究社, pp. 13-17, 1999.

## 저 자 소 개



### 오 세 영 (吳世泳)

1980년 11월 4일생. 2006년 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업. 2006년~현재 동대학원 전기공학과 석사과정.

Tel : (02) 2220-0349

E-mail : osyone@hanyang.ac.kr



### 김 승 주 (金承柱)

1978년 7월 6일생. 2001년 한라대 전기공학과 졸업. 2006년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (02) 2220-0349

E-mail : w3ksj@dreamwiz.com



### 정 대 성 (鄭大成)

1977년 4월 10일생. 2004년 한경대 전기공학과 졸업. 2006년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.

Tel : (02) 2220-0349

E-mail : jungds61@hanmail.net



### 이 철 규 (李喆圭)

1973년 1월 4일생. 1995년 한양대학교 전기공학과 졸업. 1999년~2001년 한양대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2001년~2004년 동 대학원 전자전기제어계측공학과 졸업(박사). 2004년~2005년 한양대학교 에너지변환시스템 연구실 박사후과정, 2005년~현재 (주)에스피지 기술연구소 선임연구원.

Tel : (032) 820-8380

Fax : (032) 818-8208

E-mail : leeck@spg.co.kr



**이 형 우 (李 衡 雨)**

1998년 한양대 전기공학과 졸업, 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2003년 미국 Texas A&M Univ. 전기공학과 졸업(공학). 2004년 미국 Cornell Univ. 이론응용역학과 객원 연구원. 2005년 한양대학교 BK사업단 계약교수. 2006년~현재 한국철도기술연구원 선임연구원.

Tel : 031-460-5426

Fax : 031-460-5459

E-mail : krhwlee@krri.re.kr



**이 주 (李 柱)**

1963년 8월 30일생. 1986년 한양대 전기공학과 졸업. 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988~1993년 국방과학연구소 연구원. 1997년 일본 큐슈대학교 SYSTEM 정보과학연구과 졸업(공학). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 공대 전기제어생체공학부 부교수.

Tel : (02) 2220-0342

Fax : (02) 2295-7111

E-mail : julee@hanyang.ac.kr