

## 단상 유도형 동기 전동기(LSPM)의 특성해석에 관한 연구

(A Study on the Characteristics in Single-Phase Line-Start Permanent Magnet Motor)

정대성\* · 김승주 · 이진헌 · 최재학 · 이 주

(Dae-Sung Jung · Seung-Ju Kim · Jin-Hun Lee · Jae-Hak Choi · Ju Lee)

### 요 약

가전분야에서의 전동기 효율향상을 통한 에너지 소비절감 효과는 상당히 크지만 이를 위한 전동기의 설계/해석 기술 확보가 아직은 미흡한 상태이다. 이에 따라 유도형 동기전동기가 제안되었지만, 유도형 동기 전동기는 유도전동기와 동기전동기의 특성을 동시에 가지고 있어, 해석 및 설계가 쉽지 않다. 따라서 본 논문에서는 기존의 냉장고 압축기용 전동기인 단상유도전동기를 대체할 수 있는 단상 유도형 동기전동기를 이용해 파라미터에 따라 특성이 어떻게 바뀌는가에 대해 서술하였다. 그에 따라 단상유도전동기의 정상상태 특성을 해석하고 제안모델의 성능을 기존모델과 비교하고 실험하여 해석결과의 신뢰성을 검증한다. 또한 본 논문에서는 제안모델의 기존 고정자 형상이나 권선 스펙을 유지하고 회전자의 형상이나 구조만을 변경시켜 성능향상을 도모하였다. 해석방법으로는 전자장 수치 해석적인 방법으로 널리 이용되고 있는 유한요소법(Finite Element Method : FEM)을 이용하였다.

### Abstract

Electric motor efficient improvement from home appliance field is important to the effect reducing the energy consumption. But the electric motor design / analysis technology is still insufficient. Specially the electric motor design / analysis technology of satisfying characteristic of both the induction motor and the synchronous motor such as Line start permanent motor. Therefore the electric motor design / analysis technology is urgently demanded reliability. This paper proposes the single-phase line-start permanent magnet motor to develop the motor it will be able to alternate the sing-phase induction motor it is a refrigerator compressor motor. The sing-phase induction motor is analyzed in the steady state. And we have a certification test to compare our single-phase line-start permanent magnet motor with the sing-phase induction motor. In order to improve the performance, the stator of the single-phase line-start permanent magnet motor is same as the stator of the sing-phase induction motor and changes the rotor form and has the permanent magnet. It used the Finite Element Method(FEM) which is widely used with electronic-magnetic field numerical analysis method.

Key Words : Line-start Permanent Magnet, Single-phase, Finite Element Method

\* 주저자 : 한양대학교 전기공학과 박사과정  
Tel : 02-2220-0349, Fax : 02-2295-7111  
E-mail : jungds61@hanmail.net

접수일자 : 2007년 2월 1일  
1차심사 : 2007년 2월 5일, 2차심사 : 2007년 2월 22일  
심사완료 : 2007년 3월 9일

## 1. 서 론

가전(家電)분야에 있어 동력을 필요로 하는 장치의 대부분이 전동기를 구동원으로 이용하고 있다. 그 중에서도 단상유도전동기는 그 구조가 간단하고 제작이 용이할 뿐만 아니라 저가격등의 장점을 갖고 있어 가전분야의 동력으로 주로 이용되고 있다. 그러나 주권선과 보조권선의 기차력 차에 따른 불평형 자계로 진동 현상과 회전자의 동손에 의한 효율 저하 등의 문제점을 안고 있어 새로운 구조의 고효율 전동기가 강력히 요구되고 있지만 고효율 전동기의 설계와 해석 기술은 다소 미흡한 실정이다. 최근 일본에서 고효율 전동기로 단상유도형 동기전동기를 채택하여 양산을 시작했으며, 국내에서도 개발 중에 있다. 단상 유도형 동기전동기는 직입기동이 가능하다는 점에서 별도의 전원 공급 장치가 필요 없으며, 기존 단상유도기의 고정자를 그대로 이용할 수 있으며, 단상유도기보다 효율을 올릴 수 있다는 점에서 장점을 가지고 있지만, 회전자에 영구자석이 필요하고, 영구자석 착자와 회전자 다이케스팅이 필요하다는 점에서 양산성에 문제를 가지고 있다.

유도형 동기전동기는 정상상태에서 동기전동기의 특성이 나타나 고효율화가 가능하다는 장점이 있어 외국의 선진 업체에서는 고효율화를 위한 유도형 동기전동기의 연구 및 개발에 박차를 가하고 있다. 국내에서도 유도형 동기전동기에 대한 연구가 진행되고 있지만, 유도형 동기전동기의 과도상태시의 특성해석이 어려워 현재의 연구 수준은 경험적인 방법으로 제작하여 시험, 평가하는 수준이다.

유도형 동기전동기는 정상상태에서 영구자석 동기전동기의 특성을 가지므로 슬립에 의한 유도현상이 없이 손실을 줄여 효율 향상을 도모할 수 있다. 그러나 기동에서 정상상태 도달까지의 과도상태에서는 유도기의 특성으로 기동특성을 만족해야하나 과도 상태 시 영구자석에 의한 breaking 토오크와 코깅 토오크가 존재하므로 기동 부하가 큰 압축기의 경우 기동특성을 만족하기가 어렵다. 또한 영구자석을 회전자 내부에 매입하는 경우 자기저항의 차에 의한 릴럭턴스 토오크가 발생하고 과도상태시의 인덕턴스의 변화에 의한 릴럭턴스 토오크의 변화가 기

동특성에 큰 영향을 줌으로 파라미터의 변화를 정량적으로 정밀하게 산정하여 설계에서 기동 특성을 만족하는 구조를 형성해야 한다[1].

국내기술의 대부분의 경우가 경험적인 방법으로 제작하여 시험, 평가하는 수준이며, 이러한 방법은 측정된 결과를 바탕으로 성능향상을 도모하기 때문에 결과 자체는 신뢰할 수 있으나 현상에 대한 분석과 원인, 결과가 분명하지 않기 때문에 재현성을 검증하기 위한 많은 시간과 노력이 소요되고 또한 재현성이 없는 경우가 종종 발생하여 특성 및 성능개선에 방향을 찾지 못하는 문제점에 빠질 수 있다.

따라서 본 논문에서는 유도형 동기전동기의 설계에 도움을 주고자 몇가지 파라미터에 대해 특성해석을 시도하였다. 특성해석을 위해 유한 요소법을 사용하였으며, 실험을 통하여 결과의 타당성을 검증하였다.

## 2. 본 론

### 2.1 LSPM의 구조 및 권선도

그림 1은 본 논문에서 특성해석을 하고자 하는 단상 유도 동기 전동기에 페라이트 영구자석을 사용한 모델과 희토류(NdFeb) 영구자석을 사용한 모델을 나타내고 있으며, 24개의 슬롯을 갖는 단상유도기의 고정자를 그대로 사용하였다. 회전자에는 28개의 농형바와 영구자석을 동시에 가진 구조이며 2극 전동기이므로 2개의 자석을 배열하였으며, 영구자석의 두께는 감자를 고려하여 설계하였다. 회전자에 삽입되는 영구 자석은 기동과 동기화 진입을 결정하는 중요한 설계 변수이며 전동기 특성 및 효율에도 영향을 주기 때문에 영구자석의 형태와 배치는 전동기의 기동 토크와 기동 시 속도 특성에 크게 영향을 미친다.

그림 2 단상 유도 동기 전동기의 전기자 권선도를 나타내고 있다. 그림 2에서 보는 것과 같이 권선은 주권선과 보조권선으로 나뉘어 있으며 서로 다른 저항의 권선을 사용한다. 보통 보조권선은 주권선보다 가는 권선을 사용하여 저항을 크게 해주며, 커패시터와 직렬로 연결한다. Cs는 기동 커패시터

이며  $C_r$ 은 구동 커패시터 이다. 원활한 기동과 구동특성을 위해서는 가능한 큰 용량의 콘덴서가 필요하다. 반면, 작은 용량의 콘덴서는 기동토크도 작지만, 동기속도에서 상대적으로 작은 역토크를 발생시킨다[2]. 따라서 기동특성 향상을 위하여 큰 용량의 콘덴서와 정상상태 성능개선을 위하여 작은 용량의 콘덴서가 필요하다[3]. 여기서 구동커패시터  $4[\mu F]$ 와 기동커패시터  $100[\mu F]$ 를 이용하였다. 특성 해석에 이용된 모델의 사양은 표 1에 나타나 있다. 표 1은 해석모델의 기본적인 사양을 나타내고 있다.

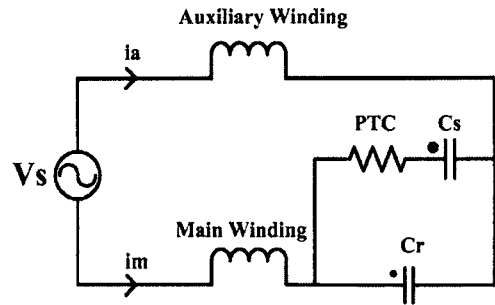
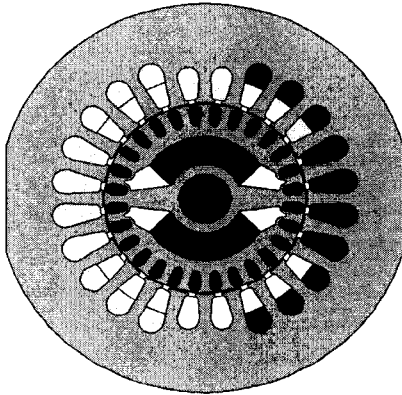


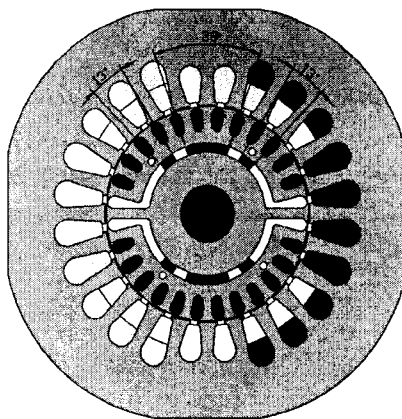
그림 2. 권선도  
Fig. 2. Stator winding connection

표 1. 해석 모델의 기본 사양  
Table 1. Characteristics of the LSPM

구 분	크 기	구 분	크기
고정자 외경[mm]	115.214	공극길이[mm]	0.32
회전자 외경[mm]	60.36	극수[P]	2
Shaft 외경[mm]	16	입력 전압[V]	220
주권선 저항 및 턴수	7.74/297	주파수[Hz]	60
보조권선 저항 및 턴수	7.81/191	적층폭[mm]	50
영구자석 크기[mm]	74.4	정격토크[ $kgf \cdot cm$ ]	4
정격속도[rpm]	3600	페라이트[T]	0.4
적층길이[mm]	45	NdFeb[T]	1.4



(a) Ferrite Magnet model



(b) NdFeB Magnet model

그림 1. 해석모델  
Fig. 1. Analysis models

단상 유도형 동기 전동기의 등가회로 해석 특성식은 고정자 축의 d-q축의 전압 방정식과 d축과 q축의 쇄교자속, 회전자 축의 전압 방정식과 d축과 q축의 쇄교 자속에 대한 d-q축의 등가 회로를 구성하고 이를 전동기의 운전방정식과 결합함으로써 유도할 수 있다. 등가 회로 해석 특성 식에서 과도 상태의 각각의 토크 식은 식 1과 같이 나타난다.

$$T_e = T_i + T_r + T_m \quad (1)$$

여기서  $T_i$ 는 농형바에 의한 유도 토크를 나타내는 식으로 식 (2)와 같고,  $T_r$ 는 d축과 q축의 인덕턴스 차에 의한 릴럭턴스 토크로 식 (3)과 같다. 또한  $T_m$ 은 영구자석에 의한 토크로 식 (4)과 같이 표현된다.

단상 유도형 동기 전동기(LSPM)의 특성해석에 관한 연구

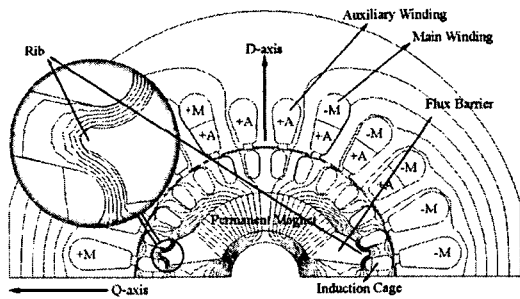
$$T_i = P(L_{md} I_a I_{2d} - L_{md} I_d I_{2q}) \quad (2)$$

$$T_r = P(L_d - L_q) I_a I_q \quad (3)$$

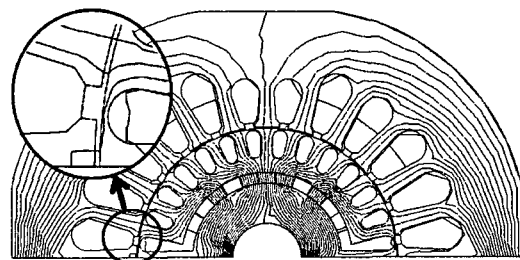
$$T_m = P L_{md} I_{pm} I_a \quad (4)$$

2.2 특성 해석 결과

해석적 방법에 의해 단상 유도형 동기기의 특성을 해석하기 위하여 Aegis사의 ACSL(Advanced Continuous Simulation Language)를 이용하여 모의시험을 수행하였다. 모의시험에 사용된 회로정수들은 유한요소해석에 의해서 계산된 값을 이용하여 페라이트 모델과 희토류(NdFeb) 모델의 특성을 해석하였다.



(a) 페라이트형 단상 유도형 동기기



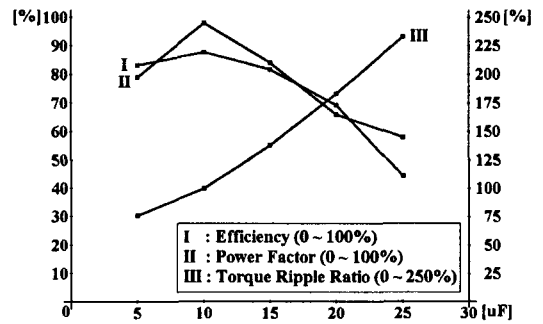
(b) 희토류형 단상 유도형 동기기

그림 3. 단상 유도형 동기전동기의 자속 분포도  
Fig. 3. Distribution of magnetic flux density

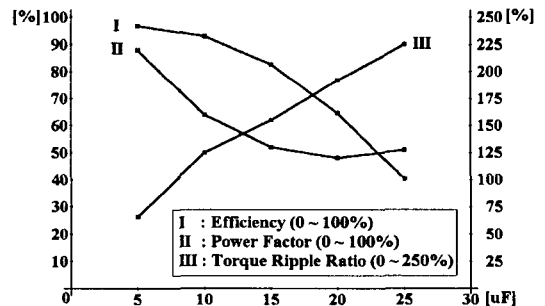
그림 3은 특성해석에 사용되는 회로정수들을 계산하기 위하여 유한요소해석을 수행한 후의 자속분포도를 나타내고 있다. 그림 3의 Rib부분의 자속은 누설분으로 효율에 악영향을 미치므로 누설 자속이 최

소화 되도록 Rib을 설계하여야 한다.

그림 4는 구동 커패시터의 변화에 따른 효율, 역률, 토크 리플률을 나타내고 있다. 페라이트 영구자석에서는 10[μF]의 구동 커패시터를 사용할 경우 최대 효율과 최대 역률을 얻을 수 있지만, 희토류계자석을 사용할 경우에는 구동 커패시터의 정전용량이 5[μF]에서, 비록 역률이 페라이트형의 역률보다는 작지만 최대의 효율을 얻을 수 있다.



(a) 페라이트형 단상 유도형 동기기



(b) 희토류형 단상 유도형 동기기

그림 4. 구동 커패시터 변화에 따른 특성해석결과  
Fig. 4. The characteristic analysis result with operating capacitor variable

그림 5과 그림 6은 희토류형 단상 유도동기기의 회로정수를 이용하여 계산한 속도, 토크, 전류의 과도상태 해석결과이다. 125[μF]의 기동콘덴서와 5[μF]의 구동콘덴서를 이용하였다. 그림 5에서 정상상태속도가 정격속도인 3600[rpm] 근처에서 떨고 있는 것을 볼 수 있다. 이는 그림 6의 토크가 진동하고 있으므로 속도도 진동하게 되는데, 동기 속도를 이탈하게 되면 유도기 동작에 의하여 속도

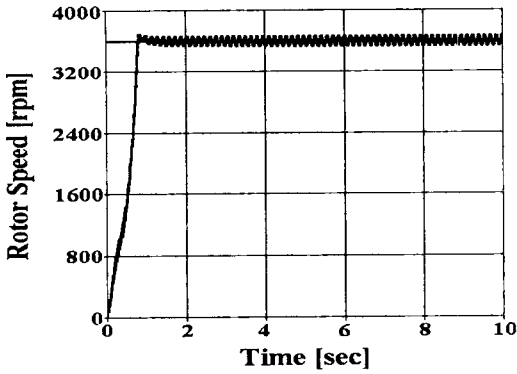


그림 5. 속도 특성 해석(ACSL 해석 결과)  
Fig. 5. The analysis of speed characteristic

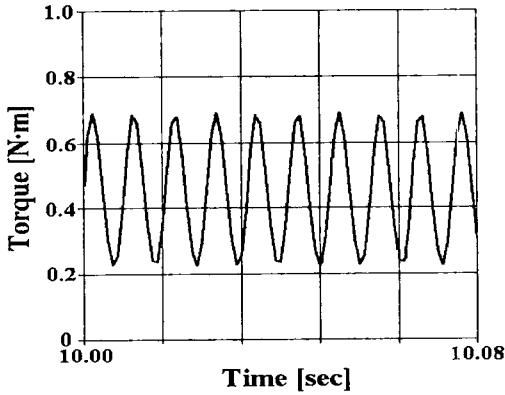


그림 6. 토크 특성 해석(ACSL 해석 결과)  
Fig. 6. The analysis of torque characteristic

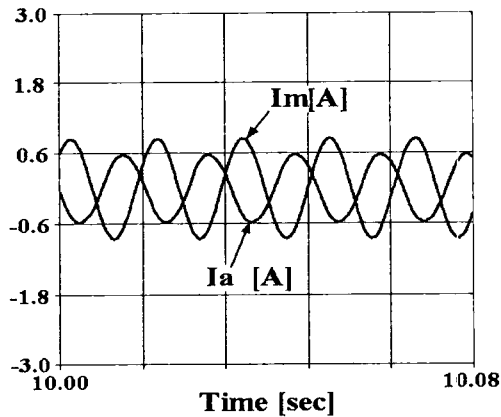
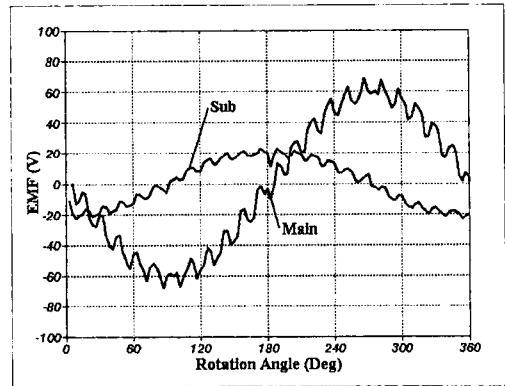


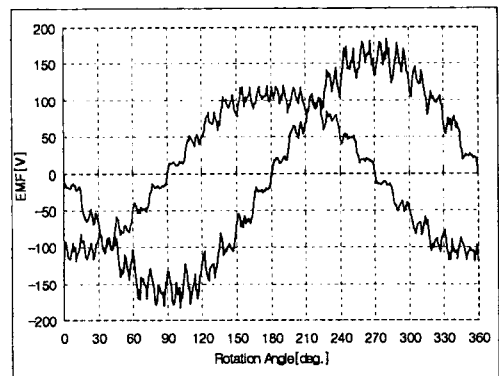
그림 7. 전류특성해석(ACSL 해석 결과)  
Fig. 7. The analysis of current characteristic

가 정상상태로 회귀하기 때문에 속도의 평균치가 동기속도를 추종하는 것으로 간주해야 한다. 그림 7에서 보듯이, 주권선과 보조권선의 전류가 2상 평형이 아니므로 전류 불평형에 의한 토오크 리플은 피할 수 없다.

그림 8은 단상 유도형 동기전동기의 무부하시 주권선과 보조권선에 유기되는 역기전력 파형을 Sample와 Stator Model에 따라 나타내고 있다. 그림에서 알 수 있듯이 주권선의 역기전력이 보조권선 역기전력 보다 더 큰 것을 알 수 있으며 이는 역기전력은 턴수와 속도에 따라 변하는 파라미터로서 주권선의 턴수가 보조권선의 턴수보다 많기 때문이다.

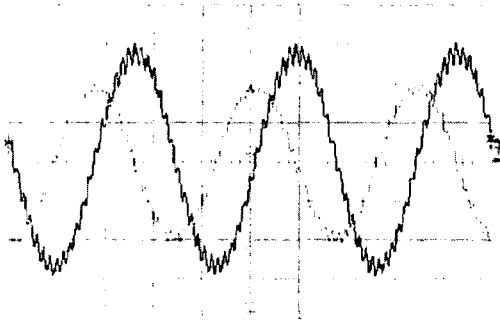


(a) 페라이트 모델의 역기전력

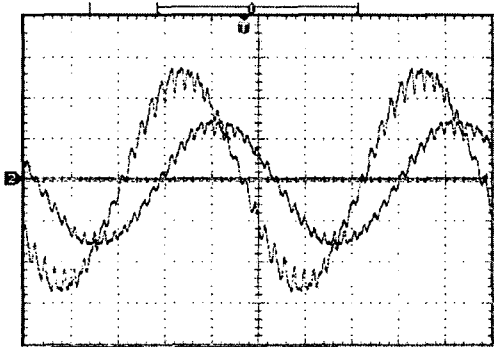


(b) NdFeb 모델의 역기전력

그림 8. 각 모델의 역기전력 시뮬레이션 파형  
Fig. 8. The simulation EMF result



(a) 페라이트 모델의 역기전력



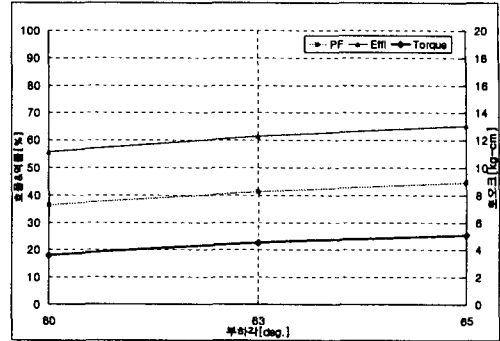
(b) 희토류형 모델의 역기전력

그림 9. 각 모델의 역기전력 실험파형  
Fig. 9. The measured EMF result

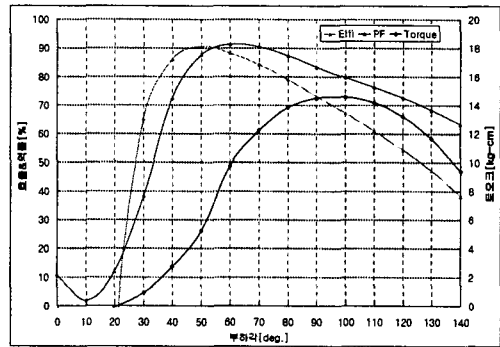
그림 9는 시뮬레이션 결과와 실험 결과를 비교, 검토함으로써 시뮬레이션 결과의 타당성을 검증하기 위해 모델을 제작하여 무부하시 3,600[rpm]에서의 역기전력 파형을 측정하였다.

각 모델의 역기전력 값은 시뮬레이션치로 (a)는 126V(p-p), (b)는 320V(p-p)이며, 실험값으로는 (a)는 120V(p-p), (b)는 290V(p-p)이다.

본 유한요소해석은 철손, 풍손, 기계손, 표유부손 등을 고려하지 않은 결과이며, 단지 동손만을 고려하였다. 그림 10은 정상상태에서 단상 유도형 동기전동기의 효율, 역률, 토오르크를 부하각에 따라 나타내었다. 제시된 그림에서 요구 토오르크 4.5[kgfc<sub>m</sub>]를 만족하는 점에서 부하각이 결정되며, 이 부하각에서 효율과 역률을 계산하였다.



(a) 페라이트 모델의 출력 특성



(b) NdFeB모델의 출력 특성

그림 10. 각 모델의 출력 특성  
Fig. 10. The power of Ferrite Magnet model and NdFeB Magnet model

### 3. 결 론

영구자석 매입형 단상 유도 동기 전동기는 농형바에 의해 기동이 이루어지며, 회전자에 삽입되는 영구자석은 기동과 동기속도 진입을 결정하는 중요한 설계 변수이다. 또한 영구자석은 단상 유도 동기 전동의 특성 및 효율에도 영향을 주기 때문에 영구자석의 선택은 매우 중요하므로 페라이트형 단상 유도 동기 전동기와 희토류형 단상 유도형 동기 전동기의 특성을 각각 검토함으로써 특성에 맞는 단상 유도형 동기 전동기 영구자석 설계에 많은 도움이 되리라 사료된다.

본 연구는 에너지 관리공단(Korea Energy Management Corporation)의 에너지 자원기술개발사업(The Energy Technology R&D)의 지원에 의해 수행되었습니다.

### References

- [1] Kazumi Kurihara and Rahman, "High-Efficiency Line-Start Interior Permanent-Magnet Synchronous Motors.", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. 40, NO. 3, MAY/JUNE 2004.
- [2] T.J.E Miller, "Single-phase permanent-magnet motor analysis.", IEEE TRANSACTIONS ON INDUSTRY APPLICATIONS, VOL. IA-21, NO.4, pp.651-658, May 1985.
- [3] T.J.E Miller, "Synchronization of Line Start Permanent Magnet AC Motors", IEEE TRANSACTIONS ON POWER APPARATUS AND SYSTEMS, VOL. PAS-103, NO. 7, JULY 1984.

### ◇ 저자소개 ◇

#### 정대성 (鄭大成)

1977년 4월 10일생. 2004년 한경대 전기공학과 졸업. 2006년 한양대 전기공학과 졸업(석사). 2006년~현재 동 대학원 박사과정.  
Tel : (02)2220-0349  
E-mail : jungds61@hanyang.ac.kr

#### 김승주 (金承柱)

1978년 7월 6일생. 1997년 한라대 전기공학과 졸업. 2006년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.  
Tel : (02)2220-0349  
E-mail : w3ksj@dreamwiz.com

#### 이진현 (李珍憲)

1979년 9월 9일생. 2006년 한양대 전자전기컴퓨터공학부 졸업(학사). 동 대학원 석사과정.  
Tel : (02)2220-0349  
E-mail : hjin0909@hotmail.com

#### 최재학 (崔在學)

1973년 8월 9일생. 1999년 한양대 전기공학과 졸업. 2001년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 2005년~현재 LG전자 DA연구소 선임연구원.  
Tel : (02)818-2968  
E-mail : civy@lge.com

#### 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(박사). 1997년 한국철도기술연구원 선임연구원. 1997년~현재 한양대 전기제어생체공학부 부교수.  
Tel : (02)2220-0349  
E-mail : jungds61@hanyang.ac.kr