

Manufacturing Driver and Measuring Performance of Disk type Single Phase Switched Reluctance Motor (DSPSRM)

李 鍾 漢* · 吳 永 雄** · 李 殷 雄*** · 李 敏 明§
 (Jong-Han Lee · Young-Woong Oh · Eun-Woong Lee · Min-Myung Lee)

Abstract - The main advantages of DSPSRM lie in the simple robust construction, low manufacturing cost and simple driving circuit. Especially, it is possible to make shortly the axial length of DSPSRM. Therefore, it is suitable to setup this motor in a narrow space. For practical use, prototype of DSPSRM was already manufactured. In this paper, we explain driving method and design driving circuit of DSPSRM. And then speed, torque and efficiency are measured. As a result of measurement, the torque was constant at normal speed and the speed was linearly increased as the current increase. Therefore, we verify that DSPSRM is suitable for low-speed fan load.

Key Words : DSPSRM, Current control, Speed, Torque, Efficiency

1. 서 론

순차적인 스위칭 동작에 의해 고정자극과 회전자극 사이의 자기저항을 최소화시키는 방향으로 연속적인 회전력을 얻는 SRM은 타전동기에 비해 구조적으로 간단하고, 단위체적당 토크가 높다는 장점을 갖고 있다[1]. SRM의 개발 초기의 토크 리플, 스위칭 등의 문제점들이 전력전자기술의 발달과 전자계 해석 기술의 발달 등으로 해결되어 최근에는 여러 분야에 실용화가 가능하게 되었다. SRM은 다양한 형태의 구조로 제작이 가능한 것도 장점이고, 구동방법도 다양하다. 대부분의 SRM이 3상과 같이 다상(poly phase)방식에 의해 구동되고 있으며, 단상(single phase)에 의해 구동되는 SRM은 몇몇 개발자에 의해 시도되었다[2]. 단상SRM은 다상 SRM에 비해 구조적으로 훨씬 간단하고, 견고하며, 특히 최소의 스위칭 소자로 구동드라이브를 구성할 수 있기 때문에 경제적으로도 실용 가치가 있다. 하지만 단상 SRM은 별도의 기동장치를 필수적으로 갖추어야 하고, 연속적인 토크 영역 사이에 불활성 영역(blank zone)이 발생하게 되어 불연속 토크로 인한 토크 리플이 발생하게 된다. 또한 SRM은 자기회로를 구성하는 부분과 구동드라이브가 결합된 전체적인 시스템에 의해 운전이 되며, 특히 타전동기에 비해 자기회로의 구조적 특징에 대한 스위칭 회로의 의존도가 높다. 이 때문에 자기회로의 구조적 특징을 고려한 구동드라이브의 설계 및 제작이 필수적이다.

본 연구에서는 단상에 의해 구동이 되고, 일반적인 SRM의 자기구조에서 벗어나 축방향 자속과 방사상 자속을 동시에

이용할 수 있는 디스크 형태로 설치장소가 좁고 유지보수가 어려운 곳에 사용되는 저속 팬부하용에 적합하게 기 제작한 DSPSRM[3][4]에 대해 구조적 특징을 고려해 구동드라이브를 설계 제작하고 여러 가지 실험을 통하여 특성을 해석하고자 한다.

2. DSPSRM의 구조 및 구동원리

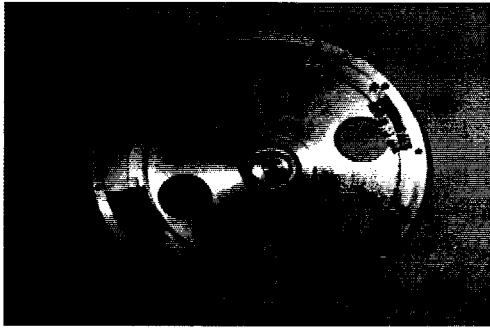
DSPSRM은 방사상 자속과 축방향 자속을 동시에 이용할 수 있도록 'ㄷ'자 모양의 고정자극과 '┌'자 모양의 회전자극이 각각 6개로 구성되어 있고, 단상 스위칭 전류에 의해 6개의 고정자극이 동시에 여자되는 하나의 환형(ring type) 권선으로 구성되어 있다. 또한 DSPSRM은 고정자극과 회전자극이 일치해 있는 위치에서 기동되지 않으므로 정지용 자석(parking magnet)이 필요하고 회전자의 위치를 정확하게 검출하기 위한 위치센서가 필수적으로 사용된다.

그림1은 DSPSRM의 회전자와 권선이 감겨진 고정자를 나타낸 것이다. 그러므로 DSPSRM은 구조적으로 간단하고 견고하며 무엇보다 축방향 길이를 줄일 수 있다는 장점이 있고, 외륜회전자(outer rotor)의 형태로 되어 있기 때문에 구동전원 배치가 안정되며 특히 저속 팬 구동용으로 사용하기에 적합하다. 그림2는 DSPSRM의 구조를 나타낸 그림이다.

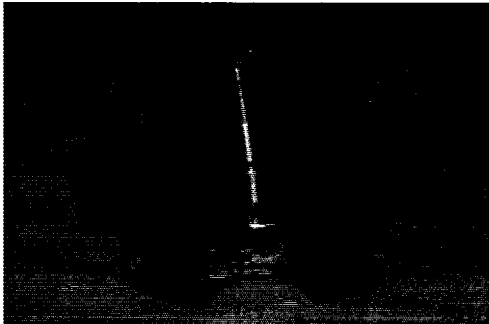
고정자극과 회전자극의 철손과 포화에 의한 영향을 무시하였을 때 DSPSRM의 등가회로는 그림 3과 같이 간소화하여 표현할 수 있고 그림 3(a)의 등가회로에 대한 회로방정식은 식(1)과 같다. 식(1)에서 시변수 L 과 i 를 고려하여 회로방정식을 표현하면 식(2)와 같고, 그림3(b)는 식(2)에 대한 등가회로이다.

$$V = iR + \frac{d}{dt}(L, i) \quad (1)$$

* 正 會 員 : 忠南大 大學院 電氣工學科 碩士
 ** 準 會 員 : 忠南大 大學院 電氣工學科 碩士課程
 *** 正 會 員 : 忠南大 工大 電氣工學科 教授 · 工博
 § 正 會 員 : 大田産業大 電氣科 教授 · 工博
 接受日字 : 1999年 9月 6日
 最終完了 : 1999年 12月 8日



(a) rotor



(b) stator

그림 1 회전자와 여자권선이 감긴 고정자
Fig. 1 Rotor and stator with exciting winding

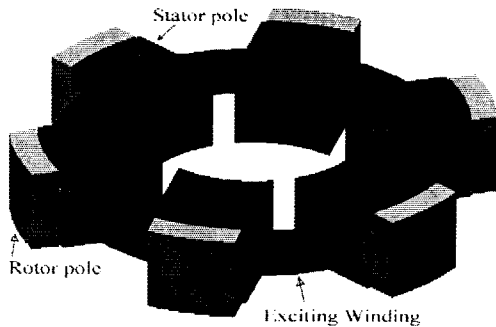


그림 2 DSPSRM의 구조
Fig. 2 Structure of DSPSRM

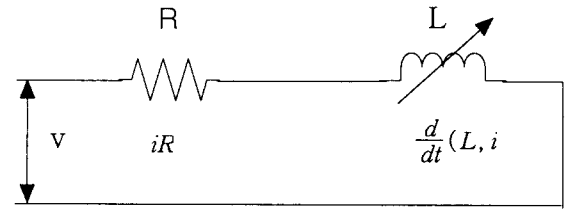
$$V = iR + L \cdot \frac{di}{dt} + i \cdot \frac{dL}{dt} \quad (2)$$

여기서, $R' = R + R_v$, $R_v = \frac{dL}{dt}$ 이라고 정의하면 식 (2)는 식(3)과 같이 간단하게 정의할 수 있다.

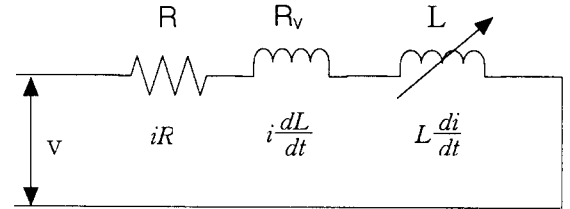
$$V = i \cdot R' + L \cdot \frac{di}{dt} \quad (3)$$

식(3)으로부터 DSPSRM이 저속에서 운전되면 $R' \cong R$ 이 되고 전동기의 등가회로는 거의 R-L 회로의 특성을 갖게 된다. 또한 속도가 증가하게 되면 R_v 는 R' 에 영향을 미치게 된다. 이는

스위치 on 주기동안에 L이 증가하면 R_v 가 저항성분에 더해



(a)



(b)

그림 3 등가회로
Fig. 3 Equivalent circuit

지게 되어 즉 역기전력이 커지므로 변환되는 에너지가 줄어들게 된다. 그리하여 전체적으로 발생 토크를 감소시키므로 변환되는 에너지가 줄어들지 않는 정전류 제어방식을 선택하여야 할 것이다.

3. DSPSRM의 구동 시스템

3.1 구동 및 제어 방식

DSPSRM의 에너지변환과 토크 발생은 인덕턴스에 의해 이루어지므로 구동시 인덕턴스의 변화를 살피는 것은 매우 중요하다. 고정자가 여자되었을 때 회전자의 위치에 따른 인덕턴스의 변화는 그림 4와 같다. 이와 같은 인덕턴스의 변화주기는 회전자의 극수를 N_r 이라 할 때 식(4)와 같이 결정된다.

$$\tau = \frac{2\pi}{N_r} \quad (4)$$

인덕턴스는 고정자극과 회전자극이 겹쳐지는 양에 의해 $L_a - L_u$ 로 결정되며 이것은 회전자의 상관위치로 판별할 수 있다. 그러므로 본 연구에서는 회전자의 위치에 따른 정확한 인덕턴스의 변화를 파악하기 위해 이미 예측된 시작기 토크 특성에서 부토크가 발생하는 시점을 파악하여 전원의 인가시점과 도전시간을 결정하였다[4]. 그림 5는 고정자극과 회전자극모양의 엔코더를 나타낸 것이다. 그러므로 항상 일정구간의 도통시간을 갖게 된다.

DSPSRM의 제어방법으로는 일반 다상 SRM과 같이 전류제어(current control)방식과 각도제어(angle control)방식으로 구분되지만, 저속용으로 설계, 제작되었고, 회전자극 모양의 엔코더로 도통시간이 일정하게 되므로 전류에 의해 속도를 조절하는 일정구간전류제어방식을 사용한다. 전류제어방식은 저속 운전시역기전력과 인덕턴스의 증가가 낮으므로 인가전압이 같아더라도

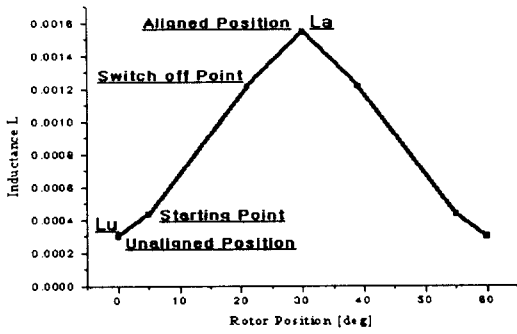


그림 4 회전자 위치에 따른 인덕턴스 변화
Fig. 4 Inductance vs. Rotor Position

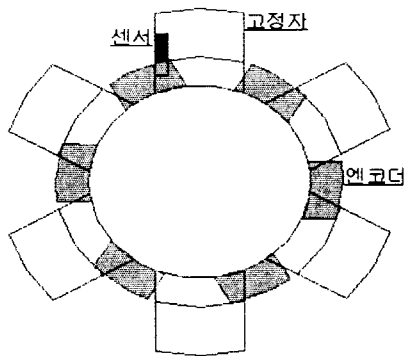


그림 5 엔코더에 의한 위치검출
Fig. 5 Position detection by encoder

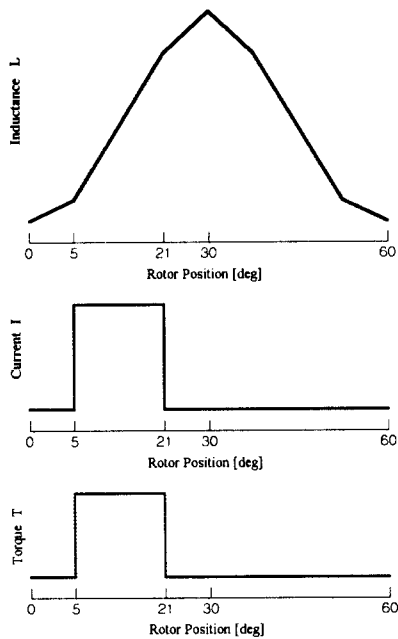


그림 6 전류제어방식
Fig. 6 Current control method

때문에 전류를 스위칭 소자의 정격전류보다 작게 제한하기 위해 초핑방식을 사용하여 제어하는 방법으로 PWM방식과 전류조정방식이 있고, 모터에 인가되는 전류는 부하나 속도에 의

해 결정된다[5]. 그림 6은 DSPSRM의 에너지변환 한 주기동안의 인덕턴스 변화와 회전자의 위치에 따라 인가되는 전류 그리고 그에 따라 발생하는 토크와의 관계를 나타내었다.

3.2 구동회로의 설계 및 제작

DSPSRM의 구동회로는 구동방식과 제어방식에 따라 달라진다. 하지만 구조적으로 타전동기에 비해 간단하고, 견고한 장점을 더욱 살리기 위해서는 구동회로 또한 간단하며 제어성능이 우수하도록 해야 한다. 이와 같은 이유로 본 연구에서는 그림 7과 같이 두 개의 스위치와 다이오드로 구성된 비교적 간단하고 제어의 다양성이 뛰어난 브리지 형태의 컨버터를 사용하였다[6]. 이 컨버터의 동작원리는 스위치 Q1과 Q2를 on 시켜 DC 전원 전압을 권선에 인가하고, 제어방식에 따라 한 개의 스위치를 off 시켜 권선에 흐르는 전류가 전원측으로 에너지를 환원시킴으로써 인덕턴스가 부의 기울기로 변하기 전에 소멸되도록 하거나 감소시켜 이로 인한 부 토크의 발생을 억제할 수 있도록 하는 것이다.

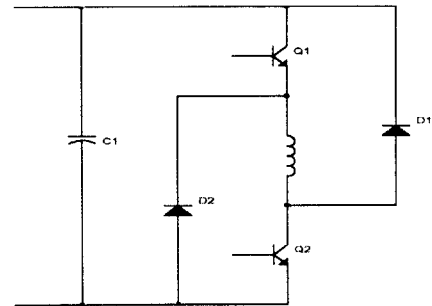


그림 7 비대칭 브리지형 컨버터
Fig. 7 Asymmetric Bridge Converter

또한 본 연구의 DSPSRM은 저속용으로 설계되었으므로 제어 방식으로는 전류 제어방식을 사용하는데 일반적으로 실제 전류가 기준 전류보다 크거나 또는 작은 경우에 따라 스위칭이 이루어지는 히스테리시스 전류 제어 방식이 많이 사용되나 본 연구에서는 출력 브리지 회로의 스위칭을 통하여 전류제어 폭을 제한하는 초퍼 증폭기를 이용한 고정 오프 시간 방식을 이용하였다. 이상과 같은 전류제어기가 사용되는 브리지 컨버터를 구성하기 위해서는 여러 개의 스위칭 소자와 다이오드를 사용하여야 하기 때문에 회로가 복잡해지므로 간단한 구동회로의 장점을 최대한 발휘하기 위해 본 연구에서는 전류제어를 위한 전력변환회로는 시스템의 소경량화를 위해 LMD18245를 사용하였다.

LMD18245는 평균전류 3[A], 55[V], DMOS 전-브리지 모터 드라이버로서 4비트의 D/A 변환기, 기준전류와 실제 상전류를 비교하여 오차신호를 발생시키는 증폭기, 제어로직회로, 전력변환회로가 단일 칩속에 내장되어 있어 간단히 전류레벨을 바꿀 수 있는 구동드라이브로 엔코더 센서신호에 의해 전류가 인가될 시점에서 원칩 마이크로프로세서 80C196KC20의 포트 로 LMD18245에 내장된 DA컨버터를 제어하여 전류레벨을 선택해 실험하였고, 엔코더 센서신호에 의해 스위치 오프시점에는 LMD18245의 Braking 기능을 사용하였다. 그림 8은 LMD18245의 내부 구조를 나타낸 것이다.

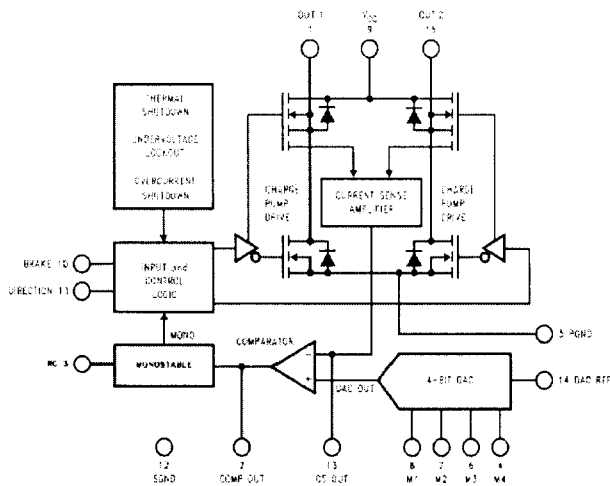


그림 8 LMD18245의 내부구조
Fig. 8 Structure of LMD18245

4. 특성 실험 및 결과

본 연구에서는 구동드라이브의 스위칭 동작과 시작기의 구동시 속도에 대한 토크와 효율에 대한 특성을 실험하였다. 실험에 사용된 DSPSRM의 시작기는 DC 48[V], 평균 전류 1.5[A]에 의해 구동되었고, 고정자에 대한 회전자의 위치에 따라 회전자극 모양의 엔코더에 의해 검출된 위치 신호를 사용하여 구동회로를 제어하였다. 그림 9는 DSPSRM의 구동 시스템을 나타낸 것이다. 그림 10은 회전자의 위치를 검출한 파형에 따라 고정자에 인가되는 전류의 파형을 나타낸 것이다. 그림 10에서 A부분은 회전자극이 고정자극과 근접하는 순간으로 인덕턴스 L_u 에서 증가하기 시작하므로 펄스전류의 인가시점으로 사용되고, B부분은 회전자극이 고정자극과 정렬된 위치에 해당되므로 인덕턴스가 최대값 L_a 에서 최소값 L_u 로 감소하기 시작하여 부토크가 발생하므로 펄스전류를 off시키는 순간을 결정하게 된다. 또한 그림 11은 고정오프시간방식으로 전류를 제어하였을 때의 고정자 여자권선에 인가되는 전류 파형이 가장 자세하게 나타날 때를 보인 것이다.

그림 10과 같은 전류를 인가하여 시작기에 대한 속도 대 토크, 속도 대 효율 특성을 실험하였다. 그림 12는 속도변화에 따른 토크 및 효율 특성을 나타낸 것이다.

일반적으로 구동하고 있는 전동기의 토크는 부하토크에 대해 식(5)와 같이 표현할 수 있다.

$$T = J \frac{d^2\theta}{dt^2} + D \frac{d\theta}{dt} + T_f \quad (5)$$

여기서, $J \frac{d^2\theta}{dt^2}$: 부하 및 회전자 가속 토크

$D \frac{d\theta}{dt}$: 속도에 비례하는 마찰토크

T_f : 속도와 무관한 외력

기계적 마찰에 의한 영향을 무시하였을 때 DSPSRM의 토크는 회전자의 관성모멘트 J 에 의한 가속토크와 무겁게 제작된 회전

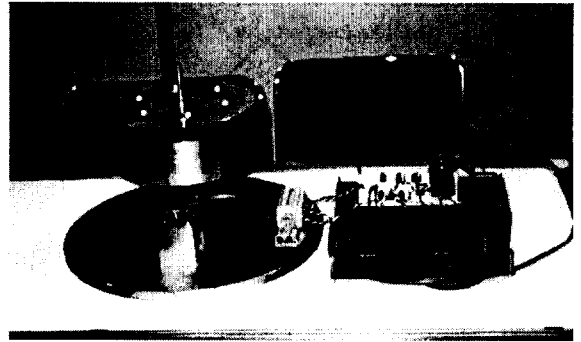


그림 9 DSPSRM의 구동 시스템
Fig. 9 Drive system of DSPSRM

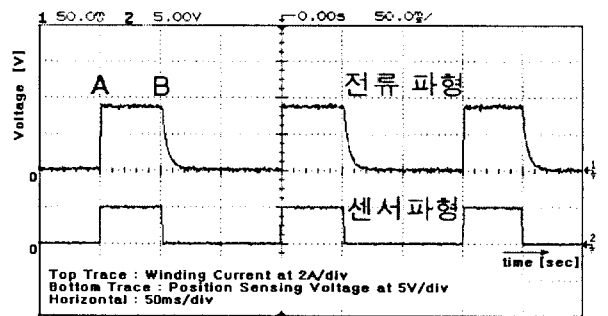
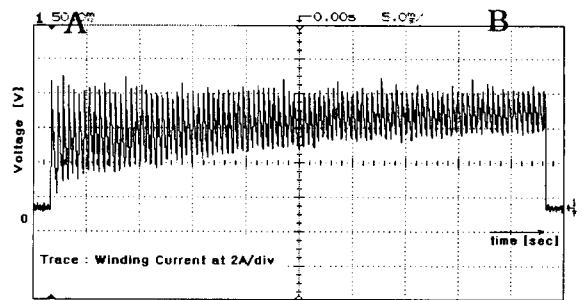


그림 10 센서 파형에 의해 인가되는 전류 파형
Fig. 10 Current waveform being applied by sensor wave



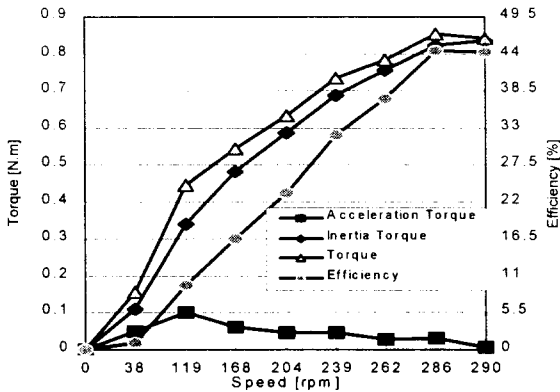
A point : Switching on, B point : Switching off

그림 11 고정오프시간 방식의 전류 제어
Fig. 11 Current control by fixed off time method

자의 중량에 의한 관성부하토크 T_f 를 고려하여 구하였다. 또한 정상속도에서 토크 변화가 거의 일정하게 유지되므로 펌부하 구동용으로 사용하기에 적합함을 확인할 수 있었다.

그림 12에서 속도 대 효율 특성을 보면 속도에 따라 효율이 증가함을 확인하였다. 그림 13은 속도 대 전류 특성을 나타낸 것이다. 그림 13에서처럼 평균 인가 전류 1.2[A]까지는 선형적으로 속도가 증가한다. 그 이상의 전류에서는 속도가 크게 증가하지만 on, off 제어구간이 일정하게 정해져있기 때문에 off시점

이후에 빠르게 감소하지 못하는 잔류전류를 소멸시킬 수 있는 제어방식의 보완이 필요하다.



Drive : LMD18245, Current Control, On-Off : 5° - 21°
 Rated Torque : 0.85(N.m), Mean Current : 1.2(A)
 Output : 25(W)

그림 12 속도 대 토오크, 효율
 Fig. 12 Speed vs. Torque, Efficiency

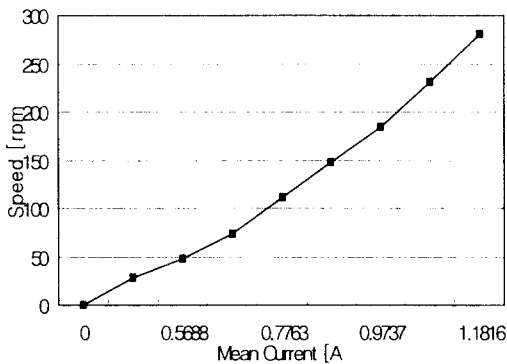


그림 13 전류 대 속도
 Fig. 13 Current VS Speed

5. 결 론

DSPSRM은 여러 분야의 기술적 발달에 힘입어 구조적인 장점과 경제적인 이점을 바탕으로 많은 분야에 실용화할 수 있고, 여러 가지 형태로 제작될 수 있음을 확인하였다. 또한 DSPSRM을 설계, 제작하기 위해 구조 및 구동원리를 규명하고, 기존의 SRM 구동 및 제어 이론을 바탕으로 이미 제작된 시작기에 대한 자기회로의 구조적 특징을 고려한 구동드라이브를 제작하였다. 특히 원칩 구동드라이브를 사용하여 회로를 더욱 간소화 시킴으로써 DSPSRM의 장점을 살릴 수 있었다. 그리고 속도 대 전류, 토오크, 효율 특성을 살펴본 결과 저속에서의 토오크 변화가 거의 일정하게 유지되므로 연구목적과 같이 팬 부하 구동에 적합함을 확인할 수 있었다.

본 연구결과를 바탕으로 앞으로 자기회로의 특성을 고려한 최적 설계 및 제작하고 그에 맞는 구동드라이브를 제작하여 단상 유도전동기 사용시와 비교하고 다양한 특성 실험을 통한 자기회로를 개선하는 등의 실용화를 위한 연구가 이어져야 할 것이다.

참 고 문 헌

- [1] P.J.Lawrenson, "Variable-speed switched reluctance motors", IEE, Proc. Vol.127, No.4, pp.253-265 July 1980.
- [2] C.C.Chan, "Single-phase switched reluctance motors", IEE Proc., Vol.134, Pt.B, No.1, pp.53-56, January 1987.
- [3] 이종한, 오영웅, 임수생, 이은웅 "3차원 FEM 해석에 의한 디스크형 단상 SRM의 시작기 제작과 특성 해석", 대한전기학회 논문지, 제 48권, 제 6호, pp.31.6-321. Jun. 1999.
- [4] J.H.Lee, E.W.Lee, D.J.Lee, "Approximated torque characteristic characteristics disk type single phase SRM by 3D modeling", ICEE, Kyung Ju, pp.13-16, 1998.7.
- [5] T.J.Miller, "Switched Reluctance Motors and their control" Magna Physics publishing and clarendon press Oxford, 1993.
- [6] H.R.Bolton and D.A.G.Pedder, "Low cost reluctance drive system for low power, low speed application", IEE Conf. Publ.179, pp.82-92, 1979.

저 자 소 개



이 종 한(李鍾漢)
 1970년 3월 29일생. 1993년 충남대 전기공학교육과 졸업. 1999년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 천안공업고등학교 전기과 교사. Tel : 0417-568-0798



오 영 웅(吳永雄)
 1976년 4월 30일생. 1998년 충남대 공대 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정. Tel : 042-821-7601



이 은 응(李殷雄)
 1944년 8월 14일생. 1971년 한양대 공대 전기공학과 졸업. 1974년 동 대학교 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1983년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1982년~1983년, 1985년~1986년 캐나다 McGill대학교 방문교수. 현재 충남대 전기공학과 교수.
 Tel : 042-821-5652, E-mail : ewlee@hanbat.cnu.ac.kr



이 민 명(李敏明)
 1943년 4월 14일생. 1982년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사), 1992년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공학박), 뉴질랜드 오클랜드대학 명예연구교수(94~95), 대전산업대 산업대학원장(96~98), 대한전기학회 대전지부장(98~99), 현재 대전산업대 전기공학과 교수.
 Tel : 042-630-0297