

견인구동용 SRM의 설계 및 구동특성(I)

文載元*, 金泰亨**, 安珍雨†

Design and Driving Characteristic of SRM for Traction Drive

Jae-Won Moon, Tae-Hyoung Kim and Jin-Woo Ahn

요 약

본 논문에서는 견인 구동을 위한 스위치 릴럭턴스 전동기의 설계와 특성해석을 수행하였다. 이를 위하여 기계적 전기적으로 유효한 범위에서 각 파라미터의 값을 변경하면서 시뮬레이션 성능의 특성변화를 파악하였고 우수한 성능을 가지는 범위를 제시하였다. 제시된 범위를 바탕으로 설계파라미터를 조합하여 시작기를 설계하고 그 성능을 시뮬레이션 하였으며 시작기를 제작하여 실험하였다.

ABSTRACT

In this paper, the design and performance analysis of switched reluctance motor(SRM) according to the design parameters are researched for a traction drive. The parameters which are sensitive to the performance are examined and selected to have good performances. For the high performance of traction drive, some effective guide lines to have a good performance motor are suggested. The prototype machine is constructed to compare with the simulated and tested for the comparison of design results.

Key Words : Switched Reluctance Motor, Traction Drive

1. 서 론

릴럭턴스형 견인구동방식은 최초 1930년대 후반 영국 의 R. 데이비슨에 의해 제안되어 연구되었으나 이후 엔진을 이용한 연소기관에 비해 상대적으로 낮은 출력과 축전지 용량의 한계 그리고 전력소자의 용량 등이 문제 시되어 이에 대한 연구가 크게 이루어지지 않았다^[1].

그러나 근래 화석연료의 고갈과 함께 대기오염, 소음 등의 환경적인 문제가 대두되고, 고효율 전동기의 설계 기술의 발전, 전력소자의 고용량 저가격화, 고용량 축전지의 개발등으로 인해 그 응용이 활발히 진행

되고 있는 실정이다.

전기자동차에는 주로 저속에서 높은 토크를 얻기 위해 큰 전류가 흐르며, 고속에서는 전류량이 줄어드는 직류직권전동기가 이용된다. 그러나 일반적인 직류기의 경우 정류자와 브러쉬에서 발생하는 마찰로 인하여 발생하는 손실과 기계적 마모로 인하여 운전효율의 저하와 유지비용이 높다는 단점을 가진다^[1,2,3].

이에 본 논문에서는 직류직권전동기와 동일한 견인 특성을 가지며, 단순한 구조의 브러쉬리스 전동기인 스위치드 릴럭턴스 전동기(Switched Reluctance Motor, 이하 SRM)를 저속전기자동차(Low Speed Electric Vehicle, 이하 LSEV)에 적용하고자 한다. SRM은 이중 돌극형 자기구조와 집중권의 권선방식을 가진 단순한 구조의 전동기로 기계적 구조가 강인하고 전동기의 제작단가가 낮은 장점을 가지고 있다. 또한 직류직권전동기의 속도·토크특성을 가지고 있어 넓은 속도 범위 및 고속, 정·역회전특성이 우수하고 강인

†교신저자 : 정회원, 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수

E-mail : jwahn@ks.ac.kr

*정회원, 응진코웨이 환경기술연구소 선임연구원

**정회원, 경성대 전기공학과 박사과정

접수일자 : 2005. 4. 26 1차 심사 : 2005. 6. 30

심사완료 : 2006. 7. 13

하다는 특성을 가지고 있다. 이러한 장점으로 인하여 항공기, 전기자동차, 청소기, 송풍기등 고속의 운전이 요구되는 시스템에 대한 적용이 이루어지고 있다^[4].

본 논문에서는 LSEV용 SRM 전동기를 허용치수 이내에서 요구되는 토오크등의 성능을 고려하여 설계한다.^[5] 설계시 전동기의 설계 파라미터의 변화에 따른 특성을 분석하고 적정설계범위를 산출하여 시작전동기를 설계한다. 설계된 전동기는 자계해석과 시뮬레이션, 그리고 실험을 통해 특성을 해석하고 LSEV의 적용 및 효율성을 입증하고자 한다.

2. LSEV용 SRM의 설계

2.1 LSEV의 구동조건

LSEV 구동용 전동기의 설계를 위한 전원 및 부하 특성은 표 1과 같다. 구동용 전동기와 자동차 바퀴는 10:1의 감속비를 갖는다.

표 1에서 전원으로 일반차량용 DC 12[V] 배터리 6개를 직렬연결하여 72[V]의 전원으로 사용하며, 적용될 자동차 바퀴의 경우 지름이 0.57[m]로써 1회전당 1.79[m] 자동차가 이동하게 된다. 그러므로 전동기가 5000[rpm]일 경우 감속비를 적용하여 자동차의 속도는 약 53.7[km/h]가 된다. 그리고 전동기의 최대출력을 결정하기 위해 시간에 따른 속도 및 이동거리의 변화에 대한 시뮬레이션 수행시 본 논문에서 달성하고자 하는 차량의 특성을 15초 이내에 40[km/h]까지 도달시키는 것으로 한다.

표 1 시작차량 규격

Table 1 Specifications of prototype EV

전원 사양	배터리	12[V] × 6[EA] × 120[AH]
	정격전류	50 - 60[A]
	전압	72[V]
운전 조건	기저속도	5000[rpm], 53.7[km/h]
	최대속도	7000[rpm], 75.2[km/h]
	가속도	15[sec] 에 40[km/h] 도달

2.2 LSEV용 SRM의 설계규격

SRM은 릴럭턴스 토크를 이용하므로, 회전자와 고정자에 모두 돌극이 있는 구조의 전동기이다. 이 돌극비의 조합에 의해서 여러 가지 전동기가 설계될 수 있다. 자기기동이 가능하고 일반적으로 많이 사용되는 극수조합으로는 6/4, 8/6, 12/8, 16/12 등이 가능하다. 그러나 이 중 8/6과 16/12는 상이 4개로 스위치소자의 개수가 증가하므로 경제적인 장점이 낮다. 그러므로

본 논문에서 적용할 대상전동기는 3상 구동의 6/4, 12/8의 비를 갖는 SRM이다.

표 2는 LSEV에 장착될 전동기의 설계규격을 보여 준다. 표 2의 설계규격을 만족하는 SRM을 설계하기 위한 설계규격은 필요사항(토크, 속도)과 제한사항(온도상승, 공급전압, 치수)으로 구성된다. 설계는 전동기와 컨트롤러를 규정하는 매개변수로 이루어지고 재료의 규격과 제작 절차들도 포함되며 때로는 설계절차에 전체치수도 포함된다^[6].

표 2 LSEV용 SRM의 설계 규격

Table 2 Specification of SRM for LSEV

항 목	사 양
출력	3.5[kW](연속) / 9[kW](2분)
사용전압	72[V](50~90[V])
토크	10[Nm](4000rpm)/22[Nm](2000rpm)
크기	직경 180[mm], 길이 190[mm] 이하
효율	85[%]이상
속도	주행속도 40[km/h], 회전속도 5000[rpm]
절연	H중
냉각	공냉식
사용/보존 온도	(-20°~60°)/(-30°~80°)

2.3 설계 파라미터에 따른 성능변화의 분석

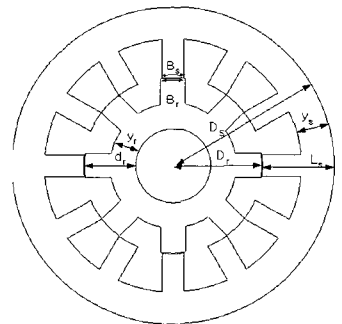


그림 1 설계를 위한 부위별 기호

Fig. 1 Motor notations for design

LSEV용 SRM의 설계를 위해 제시된 설계규격내에서 각 설계 파라미터를 변화하여 각 설계파라미터별 높은 성능을 나타내는 수치를 선정하였다. 시뮬레이션 시 조건은 전동기의 사양에 준하였다. 그림 1은 사용된 설계 파라미터의 기호를 나타낸다.

2.3.1 극호각에 따른 성능

정토크발생구간의 감소없이 슬롯면적을 크게 하기 위해서는 식 (1)에서 제시된 조건을 만족하여야 한다.

넓은 토크 발생구간을 가지기 위해서 고정자 극호각을 넓히게 될 경우 고정자극과 극사이의 간격이 좁아지게 되어 슬롯면적이 감소하게 된다.

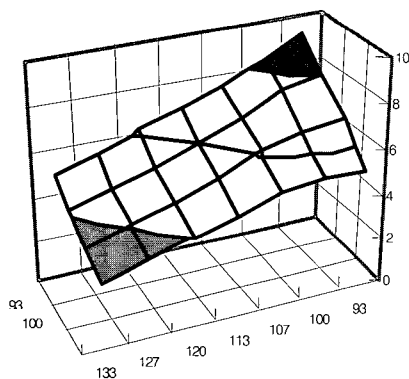
$$\beta_r \geq \beta_s \tag{1}$$

상여자시 전구간에서 토크발생을 위해서는 식 (2)와 같은 조건을 만족해야 한다. 비정렬위치상에서 상여자시 고정자와 회전자가 중첩되는 부분이 없다면 자기동 (self start)이 불가능 하게 된다.

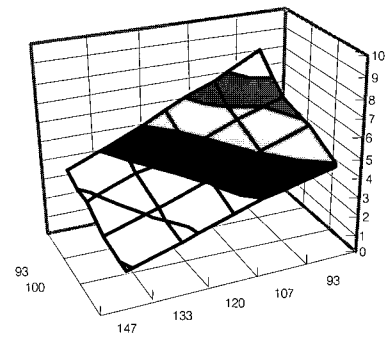
$$\text{Min}(\beta_s, \beta_r) \geq \varepsilon \tag{2}$$

제시된 조건을 바탕으로 시뮬레이션을 하였으며 시뮬레이션 결과를 극호각 대 스트로크각의 비율로 환산하여 아래의 그림 2과 같이 3차원 곡선으로 나타내었다.

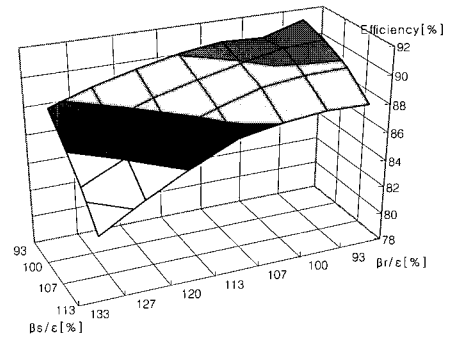
이 결과는 식 (1)이 12/8극, 6/4극에서 적합하게 적용됨을 보여준다. 회전자와 고정자의 극호각의 조합들 중에서 동일한 인덕턴스구간을 가지더라도 회전자의 극호각이 큰쪽이 슬롯영역의 확보뿐만 아니라 토크, 출력, 효율면에서 고정자 극호각이 큰 쪽보다 유리하다는 것을 알 수 있다. 또한 그림(a)와 (b)영역에서 각 극호각과 스트로크각과의 비가 1보다 작은 구간은 모든 출력요소에서 높은 값을 나타내었으나 자기동이 안 되는 구간이 발생하게 되므로 이 점을 유의해야 한다. 시뮬레이션의 결과, 회전자 극호가 고정자 극호에 비해 10%정도 큰 것이 우수한 성능을 나타냄을 알 수 있다.



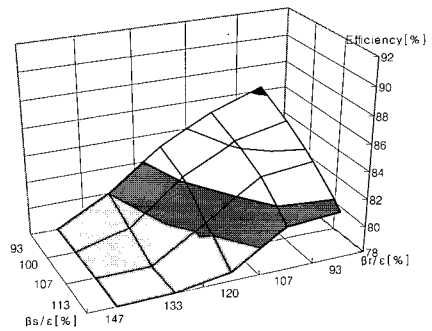
(a) torque(6/4)



(b) torque(12/8)



(c) efficiency(6/4)



(d) efficiency(12/8)

그림 2 극호각 변화에 따른 성능

Fig. 2 Performance according to stator and rotor pole arc

2.3.2 고정자 요크두께에 따른 성능

출력방정식에서 파악 할 수 있는 바와 같이, 회전자 직경은 토크에 직접적인 영향을 주므로 동일한 속도에

서 동일한 출력을 얻기 위해서는 회전자 직경의 크기가 변하여서는 안된다. 그러므로 크기가 고정된 고정자 외경과 회전자 외경에서 고정자 요크를 변화시킬 경우 고정자의 극높이도 비례적으로 변화하게 된다.

의 변화에 따른 그 성능의 변화를 시뮬레이션 하였으며, 그 결과를 그림 4에서 보여주고 있다. 기존 설계식에 의해 제시되었던 파라미터는 토크 요구에만 만족하는 성능을 보였다. 여기서 L_r 은 회전자외경에서 회전자축 직경을 제외한 길이를 의미한다.

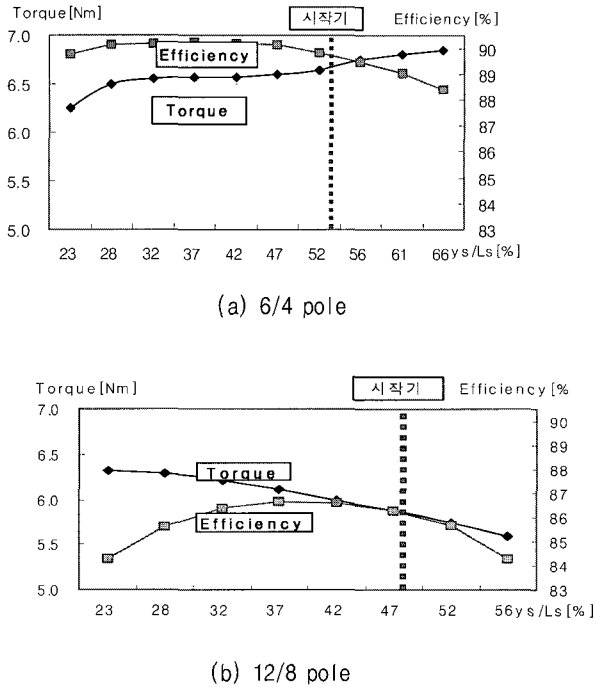


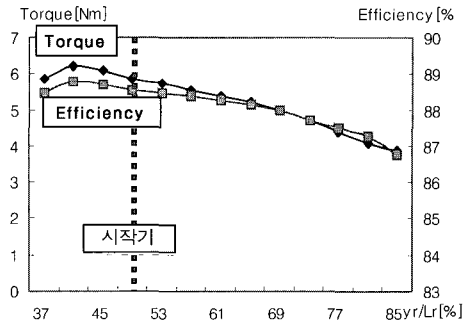
그림 3 고정자 요크두께에 따른 성능
Fig. 3 Performances according to stator yoke

그림 3은 고정자외경에서 고정자내경을 제외한 길이 L_s 가 일정한 상태에서 고정자요크의 크기 변화에 따른 출력을 나타낸 것이다.

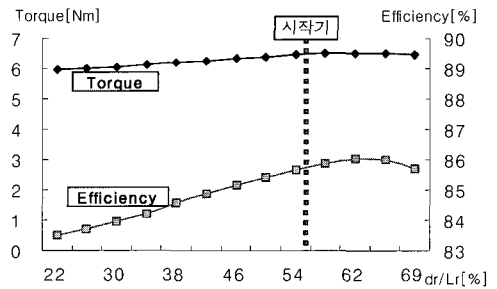
기존 설계식에 따라 선정된 고정자 요크의 값은 6/4극 및 12/8극 모두 양호한 성능을 보였다. 시작기의 파라미터로 선정된 위치는 성능면과 기계적 안정정도를 고려하여 선정되었다. 시뮬레이션 결과에서 선정위치보다 좌측의 일정구간이 토크 및 효율면에서 크게 나타나고 있으나 해당영역에서는 요크의 두께가 얇아져 자속의 포화가 크게 일어나고, 진동 및 소음이 증가하게 되어 사용되기 어렵다.

2.3.3 회전자 요크두께에 따른 성능

2.3.2절에서 밝힌 바와 같이 회전자의 직경은 토크에 직접적인 영향을 미치므로 본 절의 시뮬레이션에서도 회전자의 외경은 고정된 상태에서 회전자의 요크 두께



(a) 6/4 pole



(b) 12/8 pole

그림 4 회전자 요크두께의 변화에 따른 성능
Fig. 4 Performances according to rotor yoke

2.4 설계된 전동기의 성능해석

표 3 시작 전동기의 설계 정수
Table 3 Design parameters of the prototype SRM

	6/4	12/8		6/4	12/8
고정자극수	6	12	회전자극수	4	8
고정자극호	34°	14°	회전자극호	36°	16°
고정자외경	138[mm]	138[mm]	회전자외경	76[mm]	76[mm]
고정자계철 폭	14[mm]	16[mm]	회전자계철 폭	9[mm]	11[mm]
공극	0.25[mm]	0.25[mm]	철심길이	100[mm]	100[mm]
상당권선수	20turn	11turn	도체직경	1.914[mm]	1.726[mm]

표 4 시작 전동기의 시뮬레이션 성능
Table 4 Simulation results of prototype motor

구분	SRD Simulation		Flux2D Simulation	
	6/4	12/8	6/4	12/8
출력[Kw]	3.55	3.54	3.85	3.73
효율[%]	85.16	80.25	86.76	82.34
토크[Nm]	5.66	5.51	6.11	5.92

앞서 2.2절에서 수행된 각 설계 파라미터의 변화를 통하여 결정된 전동기의 설계치수는 표 3과 같다.

3. 제어기의 설계 및 구성

SRM의 고정자 권선의 전류를 단방향으로 제어하기 위해 많은 구동 회로가 제안되어 사용되는데 컨버터의 비용절감과 성능향상을 두 전제로 한다. SRM의 토크는 전류방향에는 무관하고 전류의 제곱에 비례하므로, 권선전류를 제어하기 위해 스위치를 턴 오프 할 때는 전류가 완전히 소멸할 때까지 연속성을 유지하기 위한 회로가 구성되어야 하고 유도성 회로특성 또한 고려해서 설계되어야 한다.

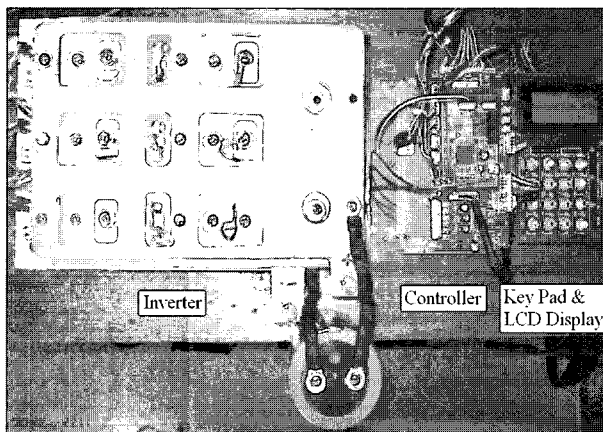


그림 5 제작된 구동 인버터와 제어기
Fig. 5 Inverter and controller for SRM

그림 5는 실제 제작된 12/8 SRM의 구동 인버터와 제어기를 보여준다. 제어용 프로세서로는 TMS320F2406A이며, TI(Texas Instrument)사의 마이크로프로세서 제품군 중에서 AC유도전동기, BLDC 및 SRM 등을 제어하기에 적합하게 설계된 마이크로프로

세서이다. 특히 가변속 제어 시스템을 구현하기 위한 프로세서로 저가형이면서 신뢰성이 매우 높아 현재 고성능 산업용 전동기구의 제어용 프로세서로서 각광을 받고 있다. 그리고 16비트의 고정소수점 방식으로 최대 40MIPS(Million Instruction Per Second)의 고속 처리능력을 보유하고 있고, 산업용 전동기 제어 전용으로 설계되어 있으며, 가격 또한 저렴하다. 내부적으로 16채널의 10비트 AD 컨버터를 내장하고 있어서, SRM의 제어에 효과적인 상전류의 검출 및 직류 링크단의 검출 그리고 직류 링크전압의 검출 및 외부 불림저항의 전압값도 고해상도로 검출 할 수 있다.

내부에 4개의 16비트 타이머로부터 12개의 PWM의 구현이 가능하여 3상 SRM 전동기의 스위칭이 충분히 독립적으로 구현될 수 있다. 또한 엔코더의 신호를 실시간으로 측정가능한 QEP (Quadrature Encoder Pulse) 기능으로 범용의 증분형 엔코더로부터 직접 위치를 측정가능하고, SRM에 사용되는 일반적인 Optical Encoder로부터 직접 속도의 계산이 가능한 장점을 가지고 있다.

그림 6은 제어기의 전체적인 구성을 나타내며 입력값은 풋패달에 의한 속도 지령치, 전류센서를 통한 상전류값, 엔코더에 의한 위치값이고, 출력은 게이트엠프 입력으로 들어가는 PWM 출력이다.

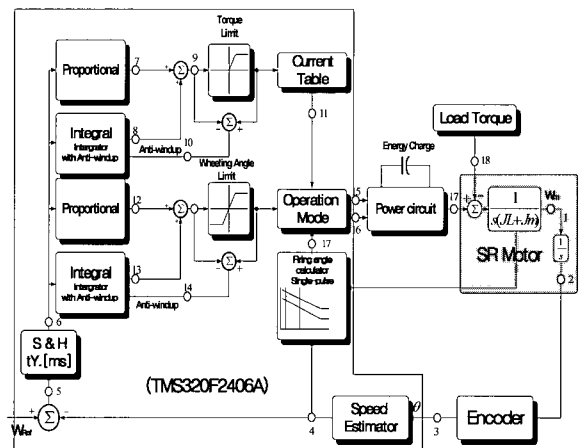
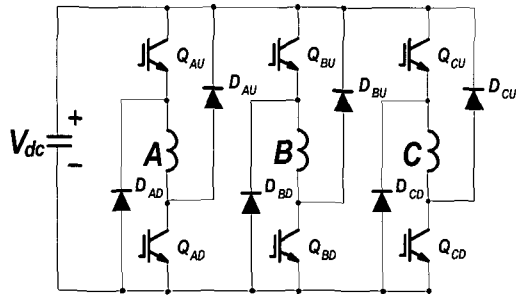
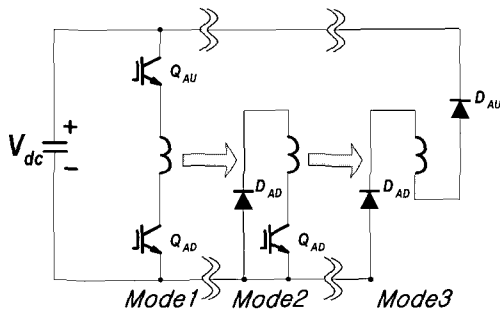


그림 6 제어기의 전체구성
Fig. 6 Structure of the controller

본 연구에서는 비대칭 브릿지 컨버터를 채택하였다. 그림 7은 상당 두 개의 스위치와 다이오드를 가지는 비대칭 브릿지 컨버터(Asymmetric bridge converter)로서 크게 3단계의 동작모드를 가진다.



(a) 비대칭 컨버터의 구조



(b) 동작모드

그림 7 비대칭 브릿지 컨버터와 동작모드
Fig. 7 Asymmetric bridge converter and operation mode

모드 1은 두 스위치를 모두 턴 온 시켜 DC전원전압 (V_{DC})을 권선에 인가하여 전류를 흐르게 한다. 모드 2는 권선에 전류가 흐르고 있을 때, 제어방식에 따라 한 개 혹은 두 스위치를 턴 오프하여 전류가 한 개의 다이오드와 스위치 및 권선을 순환하게 하거나, 두 스위치를 모두 턴 오프하여 권선전류가 두 다이오드를 통해서 전원측으로 에너지를 환원시키는 방법으로 전류가 감소되도록 한다. 모드 3에서는 두 스위치를 동시에 턴 오프하여 전류(commutation)시키게 되는데, 인던턴스가 음의 기울기를 가지기전에 전류를 완전히 소멸시키도록 해야 한다. 그렇지 않으면 부토크를 발생시키게 되어 전동기의 평균토크가 줄어들게 되며 에너지 변환효율도 감소하게 된다.

4. 실험 결과 및 검토

본 논문에서는 제작된 전동기 및 구동시스템의 성능의 기본 특성을 알아보기 위하여 턴 온각과 턴 오프각을 고정시킨 고정각 여자방식과 PWM을 이용하여 상전류를 제한한 전류제한법을 사용하였다.

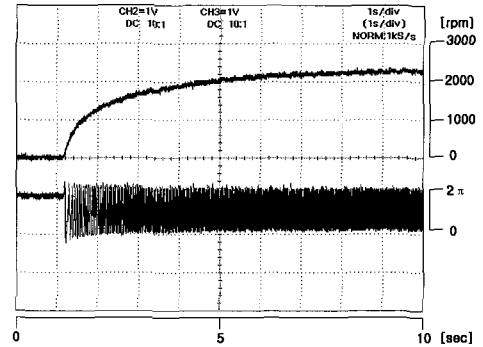
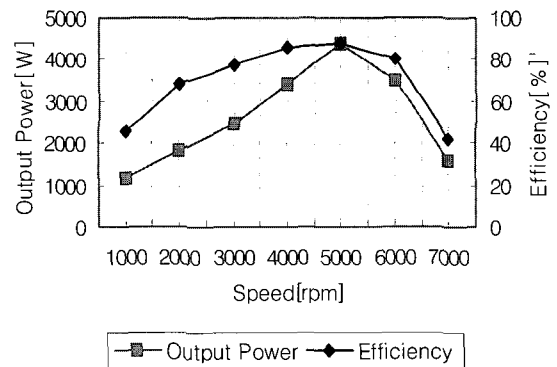
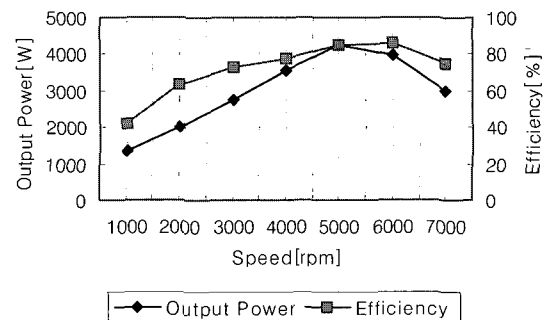


그림 8 전동기의 속도 응답 특성
Fig. 8 Speed Response

그림 8은 전동기의 속도 응답 특성을 나타낸다. 초기 구동에서 제어된 속도의 정상상태까지의 응답 시간을 보여준다. 그림 9는 측정된 시작기의 성능을 나타낸다.



(a) 6/4



(b) 12/8

그림 9 시작기의 성능
Fig. 9 Performance of prototype motor

5. 결 론

본 논문에서는 SRM의 설계 파라미터의 조정에 따른 성능의 변화를 시뮬레이션을 통하여 분석하였으며, 시작기를 제작하여 실험을 통하여 특성을 확인하였다. 이에 기존 제공되는 설계식에 의한 산출방법을 이용하여 파라미터에 따른 시뮬레이션시 기준이 되는 값을 산정하였다. 제시된 기준값에서 기계적 전기적으로 유효한 범위를 제시하였으며 각 파라미터의 값을 변경하면서 시뮬레이션 성능의 특성변화를 파악하였다. 이 결과를 바탕으로 각 파라미터간의 비율로 우수한 성능을 가지는 범위를 제시하였다. 이를 검증하기 위해 제시된 각 유효범위내에서 적절히 설계파라미터를 조합하여 시작기를 설계하고 그 성능을 시뮬레이션 하였으며 결과를 바탕으로 시작기를 제작하여 실험하였다. 실험결과 시작기는 요구성능에 만족할 수 있었으며 이를 통하여 제시된 범위의 유효함을 검증하였다.

향후 시작 구동시스템을 탑재한 전기자동차의 구동 시스템에 대한 추가적인 연구를 수행하여 SRM의 건인구동 효율성을 보일 것이다.

참 고 문 헌

- [1] Michael H. Westbrook, "The Electric Car", The Institution of Electrical Engineers Power and Energy Series 38, pp 2-31, 2001.
- [2] Harris, M. R. and Miller, T.J.E., "Comparision of Design and Performance Parameters in Switched Reluctance and Induction Motors. IEEE Fourth International", Conference on Electrical Machineds and Drives, pp.303-307, 13-15 September, 1991.
- [3] P. J. Lawrenson, J. M. Stephenson and P. T. Blenkinsop et al, "Variable-speed Switched Reluctance Motors", IEE Proc. B, vol.127, pp.253-265, no.4, 1980.
- [4] T.J.E Miller, "Switched Reluctance Motors and their control", Magna physics publishing and clarendon press, 1993.
- [5] 안진우, "스위치드 릴럭턴스 전동기", 오성미디어, 2001.
- [6] 김태형, 문재원, 안진우, "SRM의 설계파라미터 변환에 따른 성능해석", 대한전기학회 전기기기 및 에너지 변환 시스템학회 추계학술대회 논문집, pp.18-20, 2003.10.

저 자 소 개



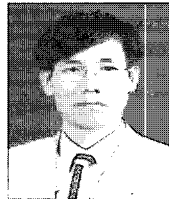
문재원(文載元)

1971년생. 1994년 경성대 전기공학과 졸업. 1996년 부산대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 2004년 1월~2006년 1월 미국 RPI(Rensselaer Polytechnic Institute) 방문 연구원. 2006년 2월~현재 웅진코웨이 환경기술연구소 선임연구원.



김태형(金泰亨)

1977년생. 2003년 경성대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2005년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



안진우(安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업. 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1995년 12월~1996년 2월 영국 글래스고우대 방문연구원. 1998년 8월~1999년 8월 미국 위스콘신대 방문교수. 1992년~현재 경성대 전기전자메카트로닉스공학부 교수.