

상용자석을 사용한 단상 하이브리드 SRM의 설계 및 구동 특성

Design and Drive Performance of Single-phase Hybrid SRM with Commercial Ferrite Permanent Magnets

안진우[†] · 허재훈^{*}
 (Jin-Woo Ahn · Jae-Hun Heo)

Abstract - Compared to a multiphase SRM, a single-phase SRM has some advantages, such as lower number of switches and power converter size, which leads to gradually increasing in the household appliances and industrial applications. But the torque dead zone is existed in the single-phase SRM which decreases the starting capability of the motor and increases the torque ripple. In order to solve the aforementioned problems, a single-phase hybrid SRM with commercial ferrite permanent magnet is proposed in this paper. Basic design principle for the proposed structure is described. To verify the proposed structure, FEM is employed to get the characteristics of the proposed structure. Based on the analysis, a prototype is designed and manufactured. And, the experimental system is also constructed. The validity of the proposed structure is verified by the experimental results.

Key Words : Single-phase, Hybrid SRM, motor design, FEM analysis

1. 서론

단상 SRM은 다상 SRM에 비해, 스위칭 소자와 인버터의 장점으로 인해, 가정용 및 산업용 기기로의 적용이 점점 늘고 있다. 그러나 단상 SRM은 출력토크의 데드-존이 존재하며, 이는 초기기동 및 토크맥동의 개선을 어렵게 한다[1]. 이를 위해, 기존의 단상 SRM에 영구자석을 추가한 구조의 단상 하이브리드 SRM이 많이 연구되고 있다.

단상 하이브리드 SRM은 영구자석의 삽입위치 및 극 형상에 따라 그 특성이 많이 다르다. 그림 1은 고정자를 두 부분으로 분절하고, 그 가운데 영구자석을 배치한 6/6극 구조로서, 영구자석과 권선전류가 형성하는 자속이 서로 합쳐서 증가할 수 있는 장점이 있지만, 일체형 고정자의 제작이 힘들고, 권선전류가 형성하는 토크로 회전하는 구간에서 영구자석이 형성하는 토크를 극복해야 하는 단점이 있다[2]. 그림 2의 SRM은 고정자의 극 가운데 영구자석을 배치한 4/4극 대칭 구조로서, 영구자석과 회전자 극이 겹치는 구간에서 두 종류의 자속이 동일한 자계회로를 이루며, 방향이 서로 반대이다[3]. 따라서 영구자석 극이 형성되는 부토크를 줄일 수 있다. 문헌 4의 SRM은 회전자에 영구자석을 배치한 구조로서, 운전 시 양방향의 전류를 필요로 하는 단점이 있다. 문헌 3의 SRM은 영구자석의 고정에 접착제를 사용하

여, 노출된 영구자석이 회전자와 충돌할 위험이 있는 반면, 문헌 5의 SRM은 고정자 내부에 영구자석을 배치하였으며, 이로 인해 평균 출력토크가 줄어드는 것이 단점이다. 문헌 6의 SRM은 영구자석의 배열을 달리하여 자속의 집중효과에 따른 토크증가를 보였지만, 분절된 고정자를 사용하여, SRM제작 시 균형 작업의 어려움을 초래한다.

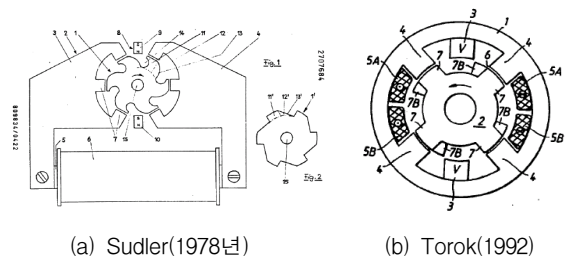


그림 1 초기의 하이브리드 SRM
 Fig. 1 Early stage hybrid SRM

본 논문에서는 단상 하이브리드 SRM의 구조로 영구자석의 위치가 고정자 내부의 주자속 자계회로에 배치되면서 고정자가 분절 안된 방식을 선정하였다. 또한, 이와 같은 구조에 따라 설계변수를 정하여 영구자석의 크기 및 위치를 포함한 SRM의 치수를 산정하였으며, FEM해석을 통해 전동기의 성능 및 특성평가를 행하였다. 마지막으로 설계된 전동기의 치수에 근거하여 시차 전동기를 제작하였으며, 실제 구동실험을 통해 전동기 설계의 정확성과 출력특성을 검증하였다.

[†] Corresponding Author : Dept. of Mechatronics, Kyungsoong University, Korea

E-mail : jwahn@ks.ac.kr

^{*} Dept. of Mechatronics, Kyungsoong University, Korea

Received : November 17, 2012; Accepted : January 22, 2013

2. 단상 하이브리드 SRM의 설계

2.1 설계조건 및 절차

본 논문의 단상 하이브리드 SRM은 단 방향으로 회전하는 펌프용도로 설정하고 있으며, 그 설계조건과 그 절차는 다음의 표 1 및 그림 2와 같다. 그 중 설계절차는 일반구조의 SRM설계를 준용하면서 추가로 영구자석 설계를 수행하였다.

표 1 설계조건

Table 1 Design conditions

Parameter	Value	Unit
Input voltage	100	V(ac)
Rated torque	0.470	N·m
Rated speed	3600	rpm
Rated current	4	A
Rated output power	180	W
Stator outer diameter	≤ 135	mm
Stator stack length	≤ 40	mm

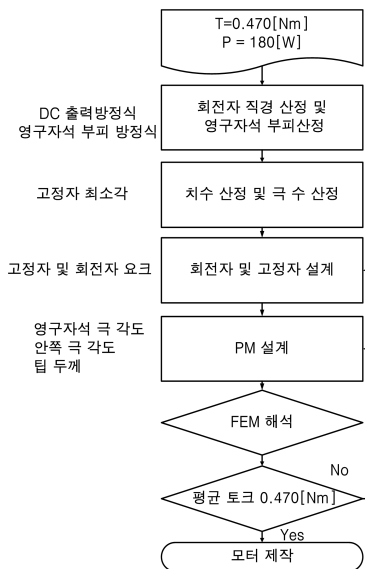


그림 2 설계절차

Fig. 2 Design steps

2.2 설계 변수

설계하고자 하는 단상 하이브리드 SRM의 구조는 그림 3과 같으며, 관련변수는 크게 고정자, 회전자 및 영구자석의 변수로 구분할 수 있다. 고정자관련 설계변수로는 극 각도, 내경과 요크 두께, 회전자관련 설계변수로는 주로 극 각도, 외경과 요크 두께가 있다. 그 중 고정자와 회전자의 요크 두께는 포화를 고려하여 모두 고정자극 폭의 1/2이상 되도록 하며, 회전자 극 각도는 고정자에 비해 크게 한다. 또한, 고정자 극 각도는 연속적인 토크의 출력을 위해 15~45°로 제한한다. 영구자석 관련 설계변수로는 주로 바깥 및 안쪽의 극 각도, 극끝 두께, 경사각 등이 있다.

2.3 치수 산정

(1) 영구자석 크기의 산정

하이브리드 단상 SRM에 사용될 영구자석의 크기는 다음의 식(1)로서 얻을 수 있다[7~9].

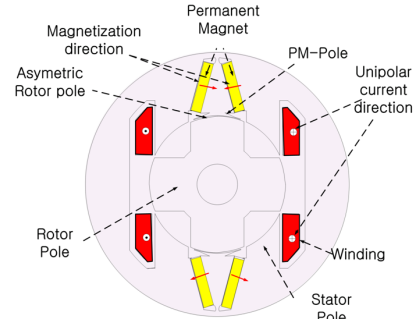


그림 3 SRM설계 변수

Fig. 3 Design parameters

$$K_{motor} = \frac{T}{V_{magnet} \cdot D_{rotor}^{\frac{1}{2}}} \quad (1)$$

여기서, K_{motor} 는 일반 범용의 경우 30000의 값을 갖는 상수이며, V_{magnet} 는 영구자석의 부피, D_{rotor} 는 회전자의 외경을 각각 나타내며, T 는 영구자석 부피에 따르는 출력토크값을 표시하고 있다.

본 논문에서 표 1의 설계조건을 참조하여, V_{magnet} 를 구하면 $V_{magnet} = 31[\mu m^3]$ 이 얻어진다. 그림 2와 같이 4개의 영구자석이 존재하므로 1개당 약 $7.5[\mu m^3]$ 의 부피를 가진다. 그러나 이 값의 영구자석은 범용으로 구하기 어려우므로 이에 근접하면서 상용으로 얻기 쉬운 $5[\mu m^3]$ 을 택하였으며 이에 따라 영구자석 부피는 $20[\mu m^3]$ 이 된다. 이 값을 다시 식(1)에 대입하여 영구자석으로 인해 발생하는 출력토크를 구하면 약 $0.308[N \cdot m]$ 이 되며, 이는 정격토크의 약 60%이므로, 나머지는 권선전류로 토크를 보상한다. $5[\mu m^3]$ 의 영구자석의 사이즈는 $5[mm] \times 25[mm] \times 40[mm]$ 이며, 길이는 $40[mm]$ 로 표 1의 적층길이와 같다.

(2) 회전자 직경의 산정

하이브리드 단상 SRM의 회전자 직경은 다음의 DC전동기의 출력식(2)를 사용하여 얻을 수 있다.

$$\frac{D_{rotor}^2 \cdot l_{stack}}{V_T} = T \quad (2)$$

여기서, l_{stack} 는 적층의 길이, V_T 는 전동기 용량에 따른 출력 방열계수, T 는 권선전류가 발생하는 출력토크값을 각각 나타낸다.

영구자석이 발생하는 출력토크가 정격토크보다 작은 점을 고려하여, 식(2)의 T 를 선정하여 회전자 직경 D_{rotor} 를 얻은 후, FEM해석을 거쳐 성능 및 특성을 재검토하고, 이 값을 다시 조정 및 재설계한다. 최종 선정된 회전자 직경은

67.2[mm]이다.

(3) 회전자 및 고정자의 설계

회전자는 그림 4(a)의 회전자 극 형상과 같이 공극이 균일하지 않는 구조를 가지며, 이는 단 방향으로 회전하는 SRM에 많이 적용된다[10]. 회전자 극이 영구자석 극의 중심부터 멀어질 경우, 공극이 0.3[mm]부터 최종 100% 증가한 0.6[mm]로 변화시켰다. 고정자 극 각도 설계 시 연속적인 토크를 발생하기 위해 우선 다음의 식(3)을 통해 극의 최소 각도를 얻을 수 있다.

$$\min|\beta_s| = \frac{4\pi}{p_s p_r} \tag{3}$$

여기서, p_s 와 p_r 는 고정자와 회전자의 극수를 가리키는데, 본 논문의 그림 2의 구조를 살펴보면, 극의 최소 각도는 30°임을 알 수 있다.

얻어진 극 최소 각도를 기준으로 권선 점유면적을 고려하여, 고정자 극과 영구자석 극 각도를 모두 40°로 정하였으며, 회전자 극 각도는 고정자보다 6° 큰 46°로 선정하였다.

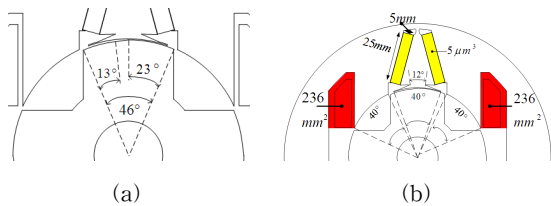


그림 4 설계된 전동기 형상 (a) 회전자 (b) 고정자
Fig. 4 Designed motor shape (a) rotor (b) stator

3. 전동기 자계특성 해석

3.1 영구자석 자계 해석

설계한 단상 하이브리드 SRM은 영구자석이 고정자 내부에 위치하는 형태로 영구자석의 극 각도, 배치 각도 및 극 팁두께에 따라 성능과 특성이 다를 수 있으므로 이에 따른 FEM해석이 필요하다.

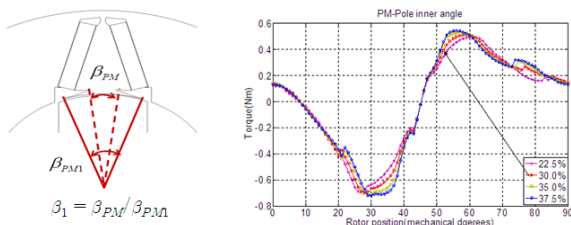


그림 5 영구자석 극 각도에 따른 토크특성
Fig. 5 Torque characteristic of PM pole-arc

(1) 영구자석 극 각도에 따른 토크특성

영구자석 바깥쪽의 극 각도가 40°로 고정된 조건하에서 안쪽의 극 각도를 증가할 경우 영구자석의 자속이 통과하는

자계회로의 자기저항이 감소하게 되며, 이에 따라 영구자석이 발생하는 평균 출력토크가 증가하게 된다. 그림 5에 이와 같은 조건에서의 FEM해석결과를 보여주고 있다.

(2) 영구자석 배치각도에 따른 토크특성

영구자석이 고정자에서의 배치각도가 증가할수록 자속경로가 길어지며, 자속밀도가 분산되면서 평균토크가 줄어든다. 그림 6은 이러한 영구자석의 배치각도에 따른 FEM해석을 보이고 있다. 이때의 토크특성을 살펴보면 비록 배치각도가 증가할수록 평균토크가 감소되지만 부토크도 따라 감소하게 되므로, 설계한 단상 하이브리드 SRM에서는 평균토크의 60%를 출력할 수 있는 15°를 선정하였다.

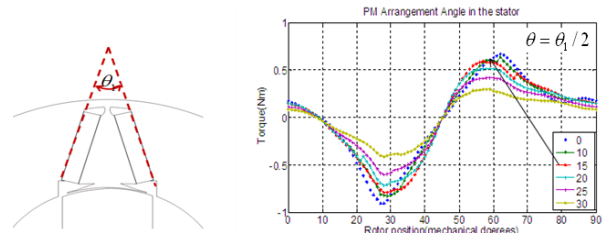


그림 6 영구자석 배치각도에 따른 토크특성
Fig. 6 Torque characteristic of PM arrangement angle

(3) 영구자석 극 팁두께에 따른 토크특성

비록 영구자석의 바깥쪽의 극 각도가 40°이지만, 안쪽의 극 각도를 작게 함으로 자속의 분포를 중심으로 밀집케 하는 효과를 갖게 한다. 이 팁은 고정자와 회전자의 극이 일치되었을 경우 영구자석의 극이 쉽게 회전을 끌어당기는 역할을 한다. 그러나 팁에서의 자속포화가 발생하면서, 기계적으로 손상될 위험이 존재하므로 팁두께에 따른 FEM해석이 필요하며, 그 특성은 그림 7에 보이고 있다. 해석결과를 통해 팁두께가 0.3[mm]이상으로 두꺼워질 경우 출력토크가 급격히 감소되는 경향을 보이며, 이는 영구자석으로 인한 출력토크의 감소를 초래하므로 팁두께를 0.3[mm]로 제한하였다.

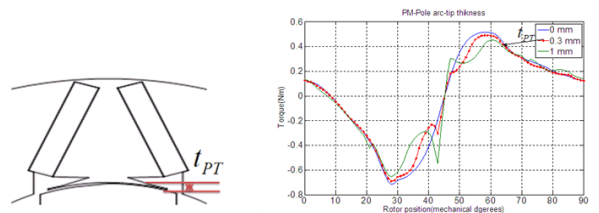


그림 7 영구자석 극 팁두께에 따른 토크특성
Fig. 7 Torque characteristic of PM pole-tip thickness

3.2 단상 SRM의 FEM해석

표 2는 FEM해석을 통해 산정된 단상 하이브리드 SRM의 일부 변수값 들을 보여주고 있다. 그림 8은 5[A]의 권선 전류와 영구자석에 의해 발생하는 출력토크 및 전체 출력토크파형을 보이고 있다. 이 회전자위치에 따른 토크파형으로부터 영구자석의 부토크가 전체 출력토크에 미치는 영향을

알 수 있다. 상권선에 5[A]의 일정전류가 흐를 때 권선전류의 여자에 의한 출력토크의 평균값은 0.614[N·m]이고, 영구자석에 의한 출력토크의 평균값은 0.346[N·m]이며, 전체 출력토크의 평균값은 0.48[N·m]으로서 표 1의 설계조건에서의 정격토크값을 만족한다.

표 2 설계된 SRM의 변수값

Table 2 Parameter value of the designed SRM

Parameter	Value	Unit
회전자와 고정자간의 외경비	0.49	-
고정자요크와 고정자극 각도간의 비	0.82	-
회전자 요크와 고정자 극 각도간의 비	0.7	-
고정자 및 회전자의 극 각도	40/46	°
영구자석 배치각도	30	°
영구자석의 안쪽과 바깥쪽의 극각도 비	30	%
영구자석의 틱 두께	0.3	mm

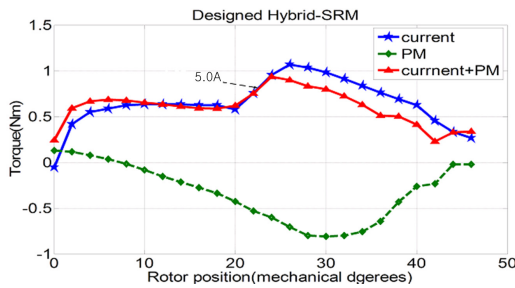


그림 8 영구자석의 부토크 영향

Fig. 8 Effect of negative torque by PM

그림 9는 회전자위치에 따른 전체 토크의 프로파일, 그림 10은 설계된 단상 하이브리드 SRM의 인덕턴스 프로파일을 각각 보이고 있다. 그림 10(a)에 영구자석 영향을 고려했을 경우의 전체 인덕턴스 프로파일을 나타내고 있으며, 비선형 공극으로 인해 그 공극이 바뀌는 시작점인 23°부터 인덕턴스가 급격하게 증가함을 보인다. 이는 영구자석으로 인한 토크가 급격히 증가하는 시점이기 때문에 토크리플을 줄이는 작용을 한다.

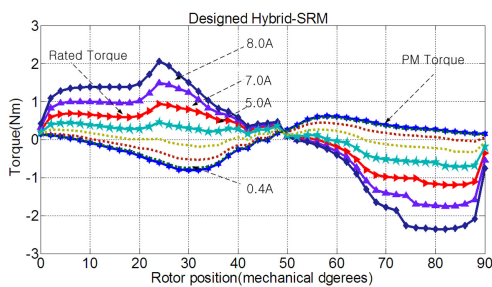
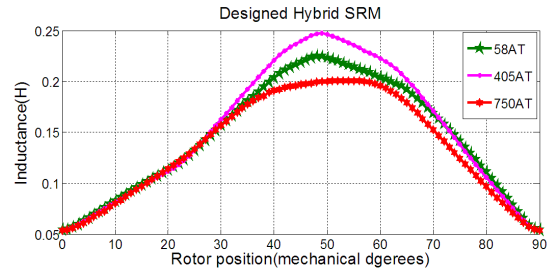


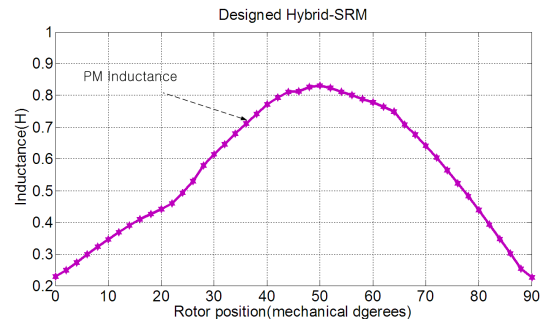
그림 9 전체 토크의 프로파일

Fig. 9 Total torque profile

그림 11은 영구자석 틱의 효과를 보이고 있다. 별마크션은 짧은 틱 영구자석 극을 가진 형태이고, 세모-마크션은 긴 틱을 가진 형태이다. 긴 틱 영구자석 극은 권선 전류가 발생하는 토크가 급격히 줄어드는 구간에서 45-90°구간의



(a)



(b)

그림 10 인덕턴스 프로파일 (a) 전체 인덕턴스 프로파일 (b) 영구자석에 의한 인덕턴스 프로파일

Fig. 10 Inductance profile (a) total inductance profile (b) inductance profile with PM

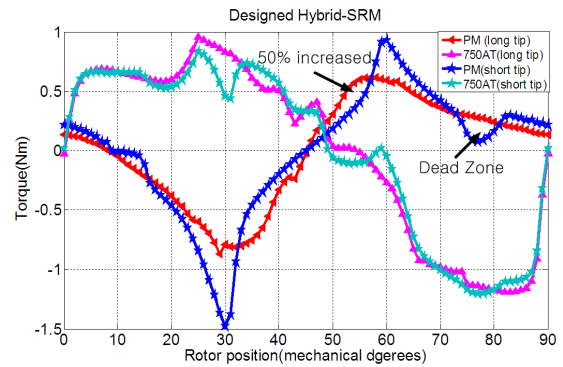


그림 11 짧은 틱의 형태와 긴 틱을 가지는 전동기의 토크 특성

Fig. 11 Torque characteristic of the short-tip and long-tip PM

토크를 50%이상 증가하게 하는 효과를 갖는다. 그러나 영구자석 틱에서 일어나는 자속포화으로 인해 영구자속에 의한 평균토크가 46-90°구간에서 약 26% 줄었고, 전체 평균토크는 정격여자 시 약 10% 감소한다. 그러나 짧은 틱일 경우 75-80°구간의 토크가 거의 0에 근접하므로, 연속적인 토크를 출력할 수 없게 된다. 이에 반해, 긴 틱일 경우 연속적인 토크를 출력할 수 있는 영역이 넓다. 따라서 긴 틱을 사용하는 경우, 영구자석의 부피를 늘려 성능을 향상하게 하는 장점이 있다.

4. 단상 하이브리드 SRM의 구동특성

4.1 시작전동기의 제작

설계 및 FEM해석을 거쳐 산정된 전동기의 치수에 근거하여 단상 하이브리드 SRM을 제작하였다. 최종 제작된 전동기의 규격은 다음의 표 3과 같으며, 그림 12에 제작된 시작전동기를 보여주고 있다.

표 3 설계된 SRM의 규격

Table 3 Specification of designed SRM

Parameter	Value	Unit
Output power	180	W
Outer stator diameter	135	mm
Minimum air gap	0.3	mm
Rotor diameter	67.2	mm
Shaft diameter	20	mm
Stack length	40	mm
Lamination thickness	0.35	mm
Permanent magnet volume	20	μm^3
Permanent magnet weight	118	g
Permanent magnet quality	Y30BH(C8)	-
Phase resistance	16	Ω
Number of turns	150	turns

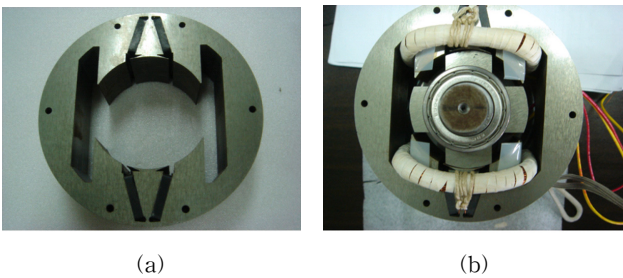


그림 12 실제 제작된 전동기 (a) 고정자 (b) 조립 후
Fig. 12 Prototype SRM (a) stator (b) motor assembled

4.2 구동실험 및 특성

그림 13은 단상 하이브리드 SRM의 구동시스템을 보여준다. 전력변환기는 단상 비대칭 컨버터를 위치검출은 포토센서를 사용하는 등 경제성을 고려하여 간단한 아날로그회로를 사용하였다.

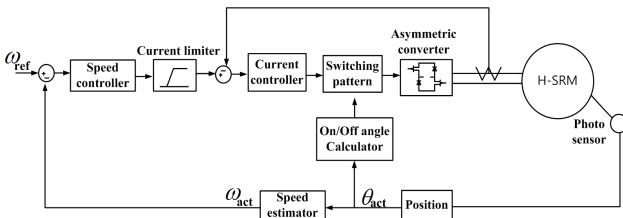


그림 13 하이브리드 SRM 구동시스템
Fig. 13 Drive system for hybrid SRM

그림 14는 단상 하이브리드 SRM의 구동을 위한 실험구성을 보여주고 있다. 실험에서 회전자 위치는 포토 센서를

사용하여 제작하였으며, 전동기의 성능측정을 위한 부하장치로는 부하토크 조정이 가능한 다이내모미터를 사용하였다.

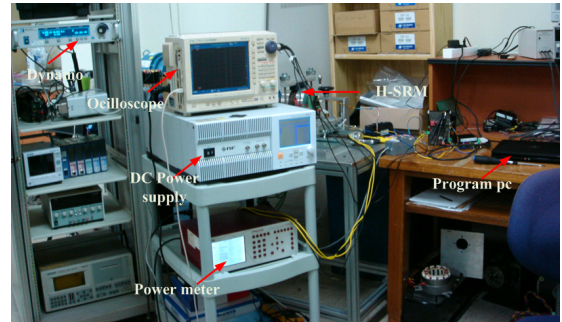
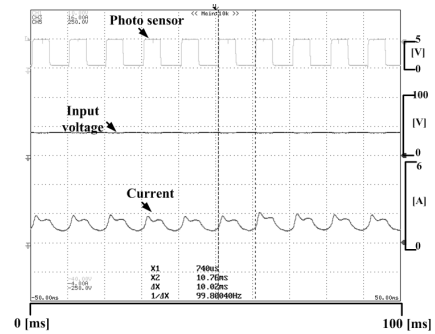
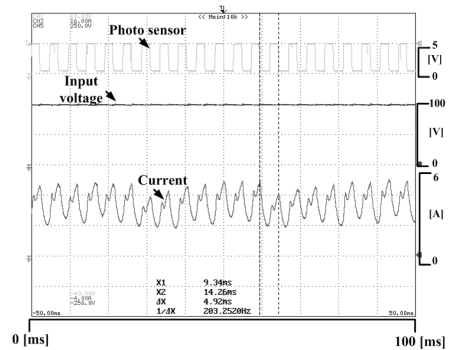


그림 13 실험구성도
Fig. 13 Experimental set-up

실제 제작된 SRM의 인덕턴스는 최대 0.25[H]이었으며, 이는 설계 시의 값과 거의 일치하다. 그림 15에 운전속도가 각각 1500과 3000[rpm]일 경우의 실험결과를 보여주고 있다. 결과파형은 위로부터 포토센서의 출력 신호, 입력전압 및 상전류 등이다. 실험결과로부터 상전류가 연속적으로 흐르는 것을 확인할 수 있다.



(a)



(b)

그림 14 시험결과 (a) 1500rpm (b) 3000rpm
Fig. 14 Experimental results (a) 1500rpm (b) 3000rpm

전동기의 성능시험결과 3000[rpm]에서 출력 120[W], 효율 40[%]로 측정되었으며, 향후 영구자석의 크기선정과 배치, 자기회로의 재설계를 통해 성능향상이 기대된다.

5. 결 론

본 논문에서는 180[W], 3600[rpm]의 단상 하이브리드 SRM을 설계하고 해석하였다. 고정자와 회전자의 구조, 상용 영구자석의 크기와 위치 등을 고려하여 전동기의 설계 및 자계해석과 구동실험을 행하였다. 또한, 영구자석에 따른 설계변수를 선정하고, 영구자석에 따른 특성들의 파악 및 분석을 통하여 토크리플을 줄이는 설계도 행하였다. 선정된 전동기의 치수에 근거하여 시차 전동기를 제작하였으며, 이 전동기의 초기구동실험을 통해 설계 타당성과 출력특성을 검토하였다.

감사의 글

본 논문은 2012 경성대학교 학술연구비 지원으로 수행된 연구결과이며, 대학의 지원에 감사드립니다.

References

[1] R. Krishnan "Switched Reluctance Motors Drives: Modeling, Simulation, Analysis, Design, and Application," CRC Press, 2001.

[2] Roland Sudler and Jean-Francois Schwab, German patent de2707684: ein phasen schrittmotor, 1978.

[3] Vilmos Török, Swedish patent se467852: Elektrisk motor, 1992.

[4] J. Oyama, T. Higuchi, T. Abe, K. Haraguchi, E. Yamada, and F. Profumo. "Hybrid type novel switched reluctance motor," 29th Annual IEEE Power Electronics Specialist Conference, volume 1, pp. 857-863, 1998.

[5] Walter Wissmach. "Single-Phase Switched Reluctance Motors-Design and Application," PhD thesis, École PolyTechnique Fédérale de Lausanne, 2003.

[6] Kaiyuan Lu, Rasmussen PO, Watkins SJ, Blaabjerg F. "A new low-cost hybrid switched reluctance motor for adjustable-speed pump applications," 41st IAS annual meeting. conference record of the 2006 IEEE, pp. 849-54. 2006.

[7] Kaiyuan Lu, Rasmussen PO, Watkins SJ, Blaabjerg F. A new low-cost hybrid switched reluctance motor for adjustable-speed pump applications. Industry Applications, IEEE Transactions on.47(1): pp.314-21. 2011.

[8] K.J. Binns and D.W. Shimmin. "Relationship between rated torque and size of permanent magnet machines," IEE Proceedings - Electric Power Applications, 143(6) pp.417-422, 1996.

[8] Uffe Jakobsen, Kaiyuan Lu., "Flux concentration and pole shaping in a single phase hybrid switched reluctance motor drive," Applied power electronics conference and exposition (APEC), 2010 twenty-fifth

annual IEEE, pp. 98-102. 2010.

[10] M. Tanujaya, D. H. Lee, Y. J. Ahn and J. W. Ahn, "A Novel 6/5 Switched Reluctance Motor with Short Flux Path: Concept, Design and Analysis," Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems, Vol.1, No. 1 pp47~53, 2012.

[11] J. H Heo, Y.J An, J.W Ahn "Design of Single-phase Hybrid SRM with Commercial Ferrite Permanent Magnets," Proc. of KIEE/EMECs Autumn Conference, pp106~108, 2011

저 자 소 개



안진우 (安珍雨)

1958년생. 1984년 부산대 전기공학과 졸업, 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사), 현재 경성대 메카트로닉스공학과 교수, 당학회 이사, 학술위원장, Journal of International Conference on Electrical Machines and Systems (JICEMS) 편집위원장, 지식경제부지정 고령친화 이지라이프 RIS사업단장, IEEE/IAS 이사, ICEMS2013, IEEE/ICIT2014 조직위원장
Tel : 051-663-4773
E-mail : jwahn@ks.ac.kr



허재훈 (許才訓)

1986년생, 2010년 경성대학교 메카트로닉스공학과 졸업, 2012년 동 대학원 메카트로닉스공학과 졸업(석사), 2012년~ 현재 ㈜동양기전 선행연구센터 연구원
Tel : 02-6112-6355
E-mail : jhheo@dy.co.kr