

비균일 공극형 단상 4/4극 하이브리드 SRM의 성능분석

정광일*, 안영주**, 안진우*
경성대학교*, 부경대학교**

Performance Analysis of Single-phase 4/4 poles Hybrid SRM of Non-uniform Air-gap

Guang-Il Jeong*, Young-Ju An**, Jin-Woo Ahn
Kyungseung University*, Puky ung National University**

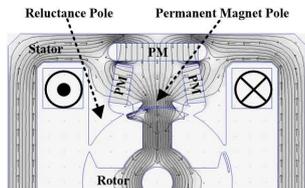
Abstract - 본 논문은 비균일 공극형 단상 4/4극 하이브리드 스위치드 릴럭턴스 전동기(이하, HSRM)를 제안한다. 제안된 HSRM의 회전자 형상은 비균일한 공극을 갖는 형상으로 테드존 구간과 토크리플, 출력특성에 기여한다. 이와 같은 특성을 검증하기 위해 균일한 공극을 갖는 단상 하이브리드 SRM의 토크 및 출력특성을 유한요소해석(FEA)을 통해 비교하였다. 그 결과 제안된 HSRM을 제작하였고 시험 결과를 통해 그 타당성을 검증하였다.

1. 서 론

SRM은 고정자에만 권선이 있고, 회전자에는 자석이 없는 이중 돌극형 구조로 전자기적인 구조가 단순하고 견고하며, 열악한 환경 및 고속 운전분야 적용이 유리한 전동기이다. 단상 SRM은 실용성이 검증된 단상 SRM인 2상 4/2, 3상 12/8, 4상 8/6 SRM에 비해 전력변환기의 전력소자를 일반적으로 2배에서 4배까지 절감할 수 있는 장점과 단순한 전력변환기, 고속운전특성, 낮은 스위칭 손실로 인해 높은 운전효율을 기대할 수 있다[1]-[3]. 하지만, 단상 SRM은 자기기동에 따른 문제점을 극복하기 위해서 특정 위치에서 구동이 가능하도록 보조권선을 사용하거나 영구자석을 사용하여 자기기동이 가능하도록 설계해야 된다[4].

그림 1의 단상 하이브리드 SRM은 분절된 영구자석의 극에 자속이 집중되도록 π 형태의 페라이트 자석을 사용하여, 한 주기의 전기각도 중 반 주기인 0° 에서 45° 는 여자권선의 릴럭턴스 토크가 발생되며, 여자권선이 턴-오프되는 시점에서 나머지 반 주기인 45° 에서 90° 의 영구자석에서 발생하는 코깅토크가 발생될 경우 보다 더 유연하게 자속이 발생되도록 영구자석을 배치한 형태이다[5]-[6]. 하지만, 분절된 영구자석의 극은 π 형태의 페라이트 자석사이에 배치되어 있어, 기구적으로 강성이 약하다. 또한, 분절된 영구자석의 극을 회전자와 일치하게 배치하기가 쉽지 않기 때문에 이에 따른 문제점이 기기의 특성을 저하시키는 원인이 된다. 본 논문은 새로운 단상 하이브리드 4/4 SRM(이하, HSRM)을 제안한다.

제안된 HSRM은 영구자석이 단순하고 권선을 지지하는 보빈에 의해 함께 고정되기 때문에 강성이 강하다. 그리고 높은 토크밀도를 발생하기 위해서 한 주기 중 반주기는 여자권선의 릴럭턴스 토크를 사용하고 나머지 반주기는 영구자석의 코깅토크를 사용한다. 또한, 비균일한 공극을 갖는 회전자 형상을 적용하므로 기존의 단상 하이브리드 SRM에 비해 높은 연속적인 출력토크를 가지고 낮은 토크리플을 얻도록 하였다. 유한요소해석 결과를 기반으로 3가지 해석 중 최소토크특성이 높고 토크리플이 작은 구조를 선택하여 시제품 전동기를 제작하였으며, 단상 하이브리드 SRM의 전용 제어기를 구성하여 특성시험을 수행하였다. 특성 시험을 통해 설계타당성 및 출력특성을 검증하였다.



〈그림 1〉 π 형태의 영구자석을 갖는 단상 SRM

2. 제안된 HSRM의 설계 및 특성분석

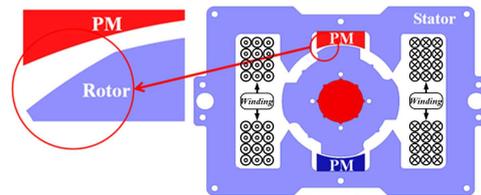
2.1 제안된 HSRM의 설계

제안된 HSRM의 설계에서 제한 조건은 정격전류가 30A 이하에서 정격토크가 0.4Nm 이상이다. 이때, 속도는 18,000rpm이다. 그리고 고정자 길이, 높이, 회전자 외경, 스택길이, 입력전압 및 전류는 표 1과 같다.

〈표 1〉 설계 조건

Parameter	KY1.3	Unit
입력전압	220(AC)/340(DC)	V
입력전류	35 ↓	A
정격토크	0.4 ↑	Nm
정격속도	18,000	rpm
효율	70	%
고정자	길이	78
	높이	58
회전자 외경	34	mm
스택길이	30	mm

그림 2는 제안된 HSRM의 구조를 보여준다. 그림 2는 릴럭턴스 토크를 발생시키는 4개의 고정자 극과 고정자 극 사이에 배치된 코깅토크를 발생시키는 2개의 영구자석이 배치되어 있고 회전자는 4극이다. 권선은 릴럭턴스 토크를 발생시키는 고정자 4극 중에 아래, 위의 근접한 고정자 2극을 감싸게 된다. 아래, 위의 근접한 권선은 병렬로 연결하게 된다. 회전자는 영구자석에 의해서 항상 자기기동이 가능한 위치에 정지된다.



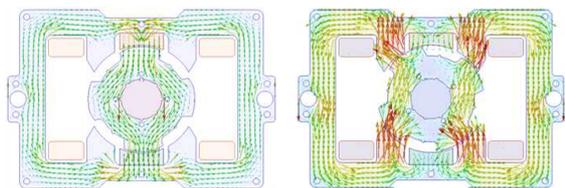
〈그림 2〉 HSRM의 구조

2.2 제안된 HSRM의 구동원리

1) 시작점(0°): 그림 3의 (1)과 같이 권선에 전압이 입력되지 않은 상태에서, 비균일 공극을 가지는 구조의 회전자 극은 고정자 사이에 배치된 2개의 영구자석에 의해 자기기동이 가능한 위치에 배치하게 된다.

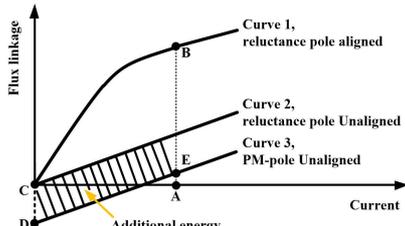
2) 권선여자 운전구간($0 \sim 45^\circ$): 전기각 45° 이내에서 여자권선을 통해 전압이 입력되어 권선이 여자되면, 회전자 극은 그림 3의 (b)와 같이 고정자 극에 정렬될 때까지 시계반대방향으로 회전하는 정토크가 발생된다. 여기서, 주목할 부분은 반시계방향으로 회전하는 정토크는 영구자석과 여자권선에서 발생하는 자속에 의해 정토크가 결정된다. 이때, 영구자석의 자속방향은 근접한 고정자 극을 통해 자속이 형성된다.

3) 영구자석 운전구간($45 \sim 90^\circ$): 전기각 45° 이후 여자권선의 전압이 0이 되도록 스위치를 턴-오프할 때 영구자석은 부토크에서 정토크로 발생하게 되어 그림 3의(a)와 같이 회전자는 다시 정렬위치에 놓이게 된다.



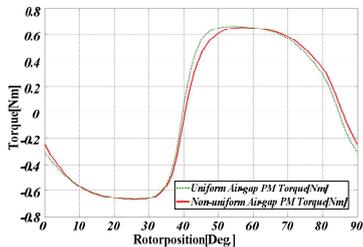
(a) 정렬위치 (b) 비정렬위치
〈그림 3〉 제안된 HSRM의 정렬 및 비정렬위치

그림 4는 영구자석이 연속적인 토크특성에 미치는 영향을 보여준다. 영구자석이 없는 단상 SRM의 쇄교자속은 curve 1, curve 2, 그리고 AB의 영역으로부터 평균토크가 결정된다. 만약 curve 2가 curve 3과 같이 -y축으로 쇄교자속을 가진다면, 같은 전류에서 평균토크는 증가하게 될 것이다. 이와 같이 -y축의 쇄교자속은 영구자석의 영향으로 발생된다.

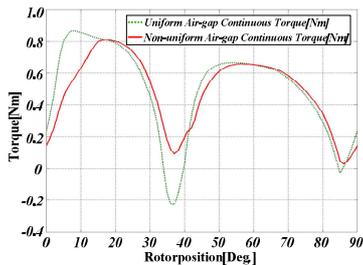


<그림 4> 영구자석이 평균토크에 미치는 영향

제안된 HSRM과 균일한 공극을 가지는 단상 SRM의 토크특성을 비교하였으며, 이를 그림 5 및 6에서 보여준다. 그림 5에서 제안된 HSRM은 코깅토크가 높을 때 여자권선의 토크가 최대가 되는 특성을 가지고 있다. 하지만, 균일한 회전자를 가지는 단상 하이브리드 SRM은 반대의 특성을 가지며, 그 결과 그림 6와 같이 제안된 HSRM은 균일한 회전자를 가지는 단상 SRM에 비해 토크리플이 작고 부토크가 발생하는 구간이 존재하지 않는다.



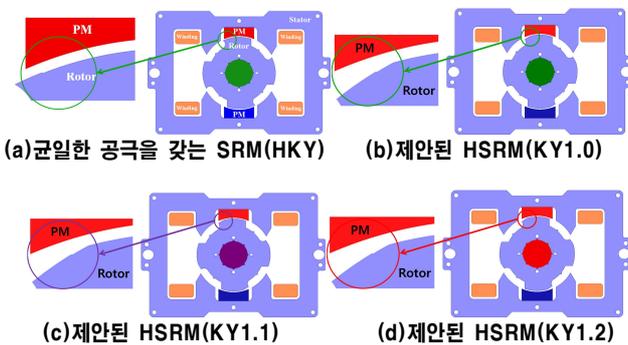
<그림 5> 영구자석이 평균토크에 미치는 영향



<그림 6> 연속적인 토크특성

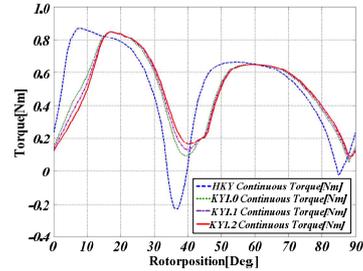
2.3 제안된 HSRM의 최적화 설계

그림 7은 제안된 SRM이 낮은 토크리플 특성을 얻기 위한 최적화 설계모델이다. 최적화 설계는 비균일한 공극을 갖도록 회전자 극호각을 각각, KY1.0은 0.5mm에서 1.0mm, KY1.1는 0.5mm에서 1.1mm, KY1.2는 0.5mm에서 1.2mm의 3가지 형상으로 릴럭턴스토크 및 코깅토크를 포함한 연속적인토크 특성을 해석하였다.



<그림 7> 제안된 HSRM의 최적화 모델

그림 8은 제안된 HSRM의 토크 특성을 보여준다. 균일한 공극의 HKY보다 비균일한 공극을 갖는 KY1.0과 KY1.1, KY1.2의 최소토크가 크고 토크리플이 작음을 보여준다.



<그림 8> 제안된 HSRM의 연속적인 토크특성

표 2에서 균일한 공극을 가지는 HKY는 비균일한 공극을 가지는 KY1.0과 KY1.1, KY1.2에 비해 연속적인 토크는 높지만, 부토크가 발생하며, 최소토크가 작고 이에 따른 토크리플이 크다. 표 2에서 KY1.2는 KY1.0과 KY1.1에 비해 최소 토크가 크고 토크리플이 작으므로 시작품으로 KY1.2를 선정하였다.

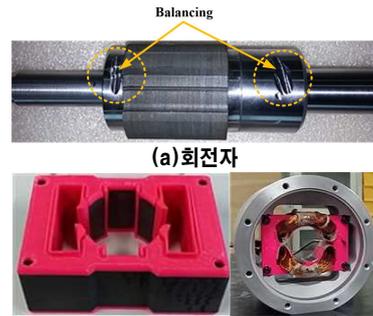
<표 2> 제안된 HSRM의 토크특성

Parameter	HKY	KY1.0	KY1.1	KY1.2	Unit
영구자석의 평균토크	0.425	0.398	0.395	0.392	Nm
연속적인 출력토크	0.500	0.605	0.603	0.600	rpm
최소토크	-0.231	0.051	0.061	0.089	Nm
토크리플	110	92	90.8	88.5	%

3. 제안된 HSRM의 제작 및 운전특성

3.1 시작전동기 제작

제안한 KY1.2 구조의 특성을 검증하기 위해 유한요소해석을 통해 검증된 특성을 기반으로 시작전동기를 제작하였다. 그림 9의 (a)는 제작된 회전자 형상을 보여주며, 회전자의 balancing은 회전시에 축의 직각방향으로 발생하는 진동의 균형을 잡기 위한 것이다. 그림 9의 (b)는 권선 및 영구자석을 지지하기 위한 보빈을 포함한 고정자 형상이다. 그림 9의 (c)는 제작된 프레임에 보여준다.



(b)고정자 (c)프레임 <그림 9> 제작된 KY1.2

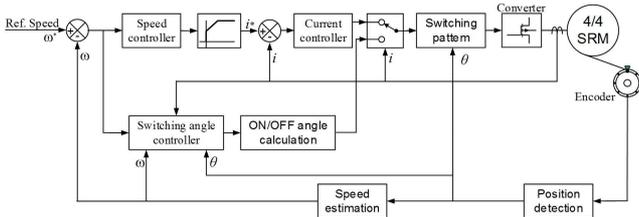
표 3은 제작된 KY1.2의 중요 파라미터를 보여준다. 여기서, 회전자의 극호각(42/30°) 및 공극(0.5 to 1.2)은 비균일 공극에 따른 것이다.

<표 3> 제안된 KY1.2의 파라미터

Parameter	KY1.2	Unit
고정자 길이	78	mm
회전자 외경	34	mm
스택길이	30	mm
공극	0.5 to 1.2	mm
고정자 극호각	30	°
회전자 극호각	42/30	°
상당 권수	184	turn
영구자석의 양	1211×2	mm ³

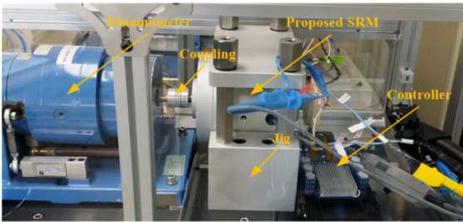
3.2 구동 시험 및 특성

그림 10은 제안된 KY1.2의 구동 시스템을 보여준다. 제안된 KY1.2는 18,000rpm을 유지하기 위해 속도제어 기법을 적용하였다. 속도제어는 회전자의 위치와 전류제어기의 신호를 피드백 받게 되며, 이때 회전자의 위치 정보는 쿨링을 위한 임펠러의 삽입된 자석을 통해 위치정보를 얻게 된다.



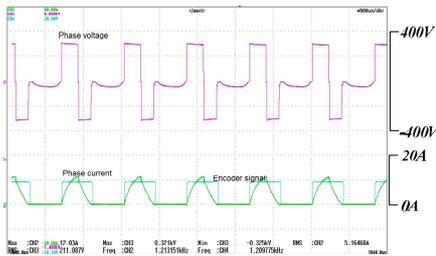
〈그림 10〉 제안된 HSRM의 제어도

그림 11은 제작된 KY1.2의 구동을 위한 시험환경을 보여준다. 시험측정을 위한 부하장치는 부하토크 제어가 가능한 다이노미터를 사용하였다. 제작된 KY1.2의 특성시험은 속도 18,000rpm, 토크 0.6Nm까지 시험하였다.

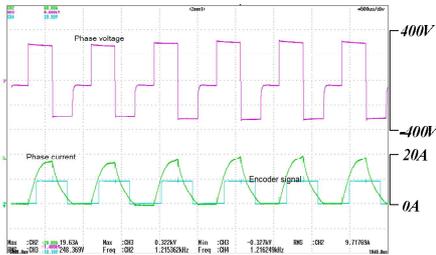


〈그림 11〉 시험환경

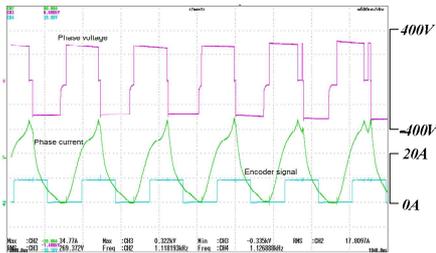
그림 12는 제안된 HSRM의 성능시험결과를 보여준다. 구동속도 18,000rpm, 토크 0.1Nm, 0.3Nm, 0.6Nm에서 시험하였다.



(a) 토크:0.1Nm, speed:18,000rpm



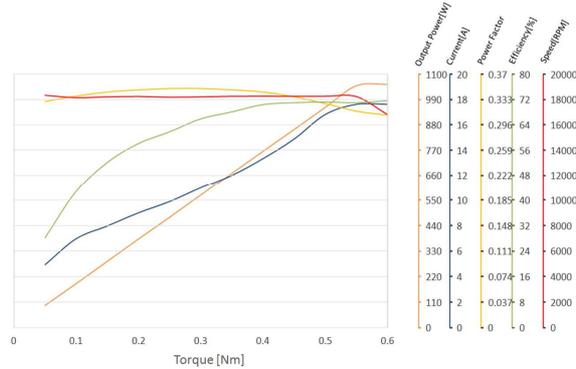
(b) 토크:0.3Nm, speed:18,000rpm



(c) 토크:0.6Nm, speed:18,000rpm

〈그림 12〉 제안된 HSRM의 시험결과

그림 13은 제안된 HSRM의 속도, 토크, 효율등의 특성곡선을 보여준다. 특성곡선에서 속도가 18,000rpm에서 토크는 0.6Nm이며 효율은 71%이다. 실제조건에서 효율은 70%에 비해 1% 증가하였으며 토크는 정격 전류에서 0.2Nm 증가 하였다.



〈그림 13〉 제안된 HSRM의 S-T 특성곡선

4. 결 론

제안된 HSRM은 낮은 토크리플을 갖기 위해 비균일 공극을 갖는 회전자를 적용하였다. 비균일 공극을 갖는 회전자를 적용할 때 균일한 공극을 갖는 회전자를 적용할 때 보다 부토크가 적고 최소토크특성을 높일 수 있었으며 높은 최소토크특성으로 인해 토크리플을 줄일 수 있었다. 제작된 전동기는 전용 제어기를 구성하여 특성시험을 수행하였다. 시험결과 설계의 타당성과 우수한 출력특성을 확인하였다.

[감사의 글]

This work was supported by the Ministry of Education, (MOE) through BK21 Plus.

[참 고 문 헌]

- [1] J. M. Stephenson, 'Switched reluctance motors', US Patent, No. 5, 548, 173, Aug. 1996.
- [2] P. Lurkens, 'Single-phase reluctance motor adapted to start in a desired direction of rotation', US Patent, No. 5, 428, 257, Jun. 1995.
- [3] K. Jaehyuck, R. Krishnan, 'Single controllable switch based switched reluctance motor drive for low cost variable speed applications', Proc. Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE), San Jose, California, Sep. 20-24, 2009, pp. 2535-2542
- [4] J. H. Kim, E. W. Lee, and J. H. Lee, "Design of the starting device installed in the single phase switched reluctance motor," IEEE Trans. Magn., vol. 43, no. 4, Apr. 2007. pp. 1741-1744
- [5] K. Lu, P. O. Rasmussen, S. J. Watkins, and F. Blaabjerg, "A new low-cost hybrid switched reluctance motor for adjustable-speed pump applications, IEEE Trans. Ind. Appl., vol. 47, no. 1, 2011, pp. 314-321
- [6] J. Uffe, K. Lu, P. O. Rasmussen, D. H. Lee, J. W. Ahn, "Sensorless control of low-cost single phase hybrid switched reluctance motor drive", IEEE ECCE, 2013, pp. 3792-3798