

## PMA-SynRM에서 영구자석 배치에 따른 최적 설계 연구

김수용\*, 김원호\*\*, 임종빈\*\*, 이기덕\*\*, 유광현\*\*, 이 주\*\*  
 한양대학교\*, 한양대학교\*\*

### Study of Permanent Magnet Optimum Design on the PMA-SynRM

Su-Yong Kim\*, Won-Ho Kim\*\*, Jong-Bin Im\*\*, Ki-Deok Lee\*\*, Gwang-Hyeon Ryu\*\*, Ju Lee\*\*  
 Hanyang University\*, Hanyang University\*\*

**Abstract** - Average torque of PMA-SynRM(Permanent Magnet-assisted Synchronous Reluctance Motor) is changed by magnet form inserted to the barrier. Because the magnet form influences to the magnet-torque and reluctance torque. Therefore, this paper present a suitable permanent magnet form design for maximum torque when the magnet quantities are always fixed. And each motor characteristic such as average torque, torque ripple, cogging torque and back-EMF are analyzed by FEM(Finite Element Method) for optimal design..

#### 1. 서 론

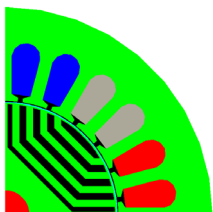
일반적으로 동기형 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 구조가 간단하고 견고하며 동기 속도로 회전하기 때문에 제어기의 구성이 간단하다. 하지만 다년간의 연구에 의하면, 회전자의 구조를 바꾸는 것으로는 더 이상 성능향상을 기대하기 힘들다는 것이 밝혀졌다. 이런 상황 속에서 최근 동기 릴럭턴스 모터와 영구자석 모터를 결합한 PMA-SynRM가 관심의 대상이 되고 있다. PMA-SynRM은 돌극비를 이용한 릴럭턴스 토크 뿐 아니라 영구자석에 의한 마그네틱 토크까지도 이용할 수 있으므로 SynRM에 비해 손쉽게 더 큰 토크를 얻을 수 있을 수 있고 IPM에 비해 비교적 넓은 정출력 구간을 이용할 수 있다. 하지만 SynRM 배리어에 영구자석을 삽입함으로써 좀 더 포화의 영향이 커지면서 영구자석을 어느 곳에 어떤 형상을 가지고 삽입하는지에 따라 모터의 토크특성이 크게 바뀌게 된다. [1][2]

따라서 본 논문에서는 PMA-SynRM의 배리어에 삽입한 영구자석의 양은 일정하게 하는 대신, 자석 삽입의 위치를 바꾸어 가면서 최대의 토크 특성을 가지는 모터의 형상을 제시하고자 한다.

#### 2. 본 론

##### 2.1 PMA-SynRM

본 논문에서 제시하는 모터 모델은 EPS(Electronic Power Steering)로 사용되는 것을 목표로 하였다. 그리고 SynRM 회전자 구조는 세그먼트형(Flux barrier type)으로 영구자석은 NdFe<sub>10</sub>를 삽입하였다. 또한 영구자석의 형상이 달라질 때마다 자속의 path 변화나 철심 포화에 의해서 릴럭턴스 토크와 마그네틱 토크의 양이 바뀌므로 최대 토크 전류 위상각이 바뀌게 된다. 따라서 각 형상마다 최대 토크를 가지는 전류 위상각을 재설정함을 통해서 항상 최대 평균토크를 가지도록 하였다. 그리고 각 영구자석의 삽입 형상에 따라서 최대토크 전류위상각, 평균토크, 토크리플, 코깅토크, 역기전력을 측정하여 각 모델별 비교파라미터로 삼았으며 계산의 편의를 위해 철손(iron loss)은 고려하지 않았다. 아래 <그림 1>은 영구자석 삽입 전의 SynRM을 나타내고 있고, <표-1>에서는 제안된 모터 사양이 제시되어 있다.



<그림 1>

Basic SynRM 형상

구분	사양	구분	사양
고정자 외경[mm]	43	적층길이[mm]	40
		정격 속도[rpm]	1800
회전자 외경[mm]	23.3	입력전류[A]	15
		주파수[Hz]	60
영구자석 관류자속밀도[T]	1.1	공극 길이[mm]	0.2
		출력[W]	33

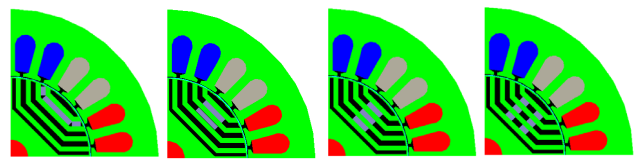
<표 1>

제안된 PMA-SynRM 사양

##### 2.2 PMA-SynRM 형상에 따른 영향 분석

배리어 내 영구자석의 배치에 따라 4가지 모델을 제시했고 <그림 2>

에 각 형상들을 나타내고 있다.



A type B type C type D type

<그림 2> 영구자석에 따른 PMA-SynRM 형상

##### 2.2.1 최대 토크 전류 위상각( $\beta$ )

형상	Basic	A	B	C	D
위상각( $^\circ$ )	48	46	47	48	46

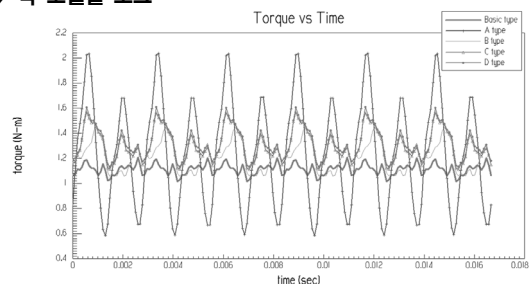
##### <표 2> 각 모델별 최대 전류 위상각

Basic type에서 릴럭턴스 토크만 존재할 경우 최대 토크 전류 위상각은 48도를 나타냈으며, 영구자석 삽입 모델별 위상각은 1~2도 정도의 감소하여 릴럭턴스 토크는 줄어들고 마그네틱 토크는 상승했다는 것을 알 수 있다. 이것을 확인하기 위해 <표 3>을 살펴보면 위상각이 가장 많이 줄어든 A, D type의 경우 마그네틱 토크가 다른 type에 비해 큰 비율을 차지하고 있음을 확인할 수 있다.

##### 2.2.2 평균 토크

형상	Basic	A	B	C	D
평균토크(Nm)	1.113	1.241	1.212	1.303	1.328
마그네틱 토크(Nm)	0	0.366	0.33	0.294	0.305
릴럭턴스 토크(Nm)	1.113	0.882	0.886	1.032	1.023

##### <표 3> 각 모델별 토크



<그림 3> 각 모델별 평균 토크 파형

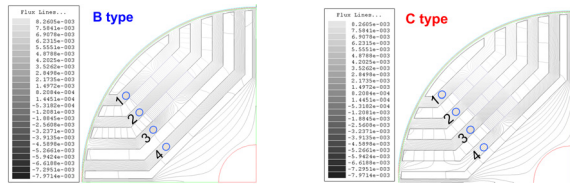
기본 Basic 모델에 비해 배리어에 영구자석을 삽입한 형태 모두에서 평균 토크가 상승했음을 <표 3>과 <그림 3> 통해 알 수 있다. 이것은 돌극비에 의한 릴럭턴스 토크뿐만 아니라 영구자석에 의한 마그네틱 토크가 더해져 나타난 결과이고 식 (1)에 의해 나타내어진다.

$$T_e = P_n \Phi_a I_q + P_n (L_d - L_q) I_d I_q \quad (1)$$

A type이 B type에 비해 평균토크가 더 크게 계산되었다. 이는 공극과 가까운 위치의 1층에만 영구자석이 배치되어 쇠교자속의 양이 상승했기 때문으로 <표 3>에서 마그네틱 토크가 다른 type에 비해 크게 나오는 것을 확인할 수 있다.

B type과 C type을 비교해 보면, C type 평균토크가 7.5% 상승했다. 이것은 영구자석 삽입 형상이 2층 -> 3층으로 달라지면서 B type에 비해 영구자석에서 나오는 자속이 공극으로 도달하는 path 수가 늘어남

서 포화의 영향이 줄어들어 공극자속밀도가 상승하였기 때문이다. <그림 4>와 <표 4>를 보면 C type이 각 세그먼트에서의 자속밀도가 감소했음을 알 수 있다.

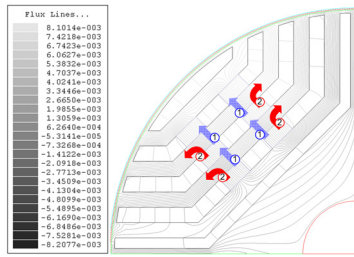


<그림 4> B, C type 자속

	1	2	3	4
B type	2.05(T)	1.46(T)	1.77(T)	1.41(T)
C type	1.93(T)	1.41(T)	1.37(T)	0.87(T)

<표 4> 각 point에서 자속밀도

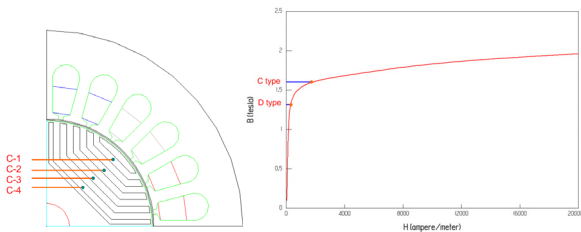
C type과 D type을 비교해 보면, D type의 평균 토크가 2% 상승했다.



<그림 4> C, D type 자속 path

이는 D type의 경우에 배리어 층상에 간격을 좁을 통해서 영구자석에서 만들어진 자속이 공극으로 향하는 path의 길이가 C type에 비해 짧아져서 <그림 5>의 1번 화살표처럼 자석에서 나와 자석으로 들어가는 누설자속량이 줄어들고 2번 화살표처럼 세그먼트로 흐르는 자속량이 늘어났기 때문이다. 그 증거로 <그림 6>의 (c)를 보면 C-2 포인트에서 자속량이 C type에 비해 낮게 측정된 것을 볼 수 있다.

뿐만 아니라 배리어의 간격은 포화의 영향을 줄여주는 것을 볼 수 있다. <그림 6>의 (a) 포인트 자속밀도를 측정해 본 결과, 표-(c)와 같이 나왔고 이를 (b)에서와 같이 강판의 B-H커브에 대입해 보면 C type의 경우는 이미 강판이 포화의 영향을 받고 있지만 D type의 경우는 영향을 받지 않음을 알 수 있다.



(a)

(b)철심의 B-H 커브

	C-1	C-2	C-3	C-4
C type	0.95(T)	1.59(T)	1.72(T)	0.06(T)
D type	0.72(T)	1.23(T)	1.42(T)	0.63(T)

(c) 자속밀도

<그림 6> C, D type 회전자에서의 자속밀도 분석

### 2.2.3 토크 리플과 무부하 역기전력

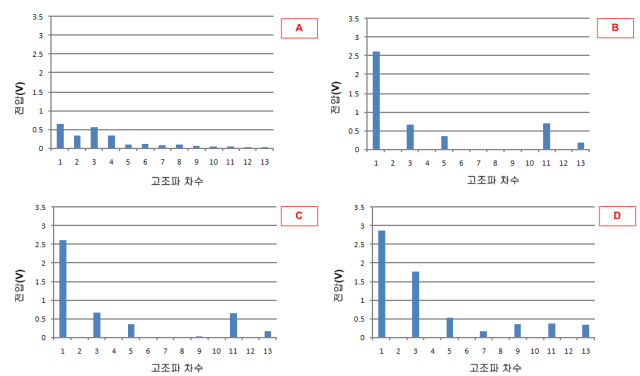
형상	Basic	A	B	C	D
토크리플(%)	17	116	20	34	36
무부하 역기전력(V)	0	4.33	2.49	1.99	2.01

<표 5> 각 모델별 토크 리플과 무부하 역기전력

토크 리플은 Basic type에 비해 PMA-SynRM type 전체에서 높게 나왔다. 이는 고정자에서 만들어내는 자속은 일정하지만 영구자석 삽입으로 인해 공극에서의 자속량이 늘어나면서 발생된 것으로 보인다.

A type 토크 리플의 경우 다른 type에 비해 매우 높은 수치인 116%가 발생했다. 그 이유를 분석하기 위해 무부하 역기전력 파형을 FFT(Fast Fourier Transform)분석 하여 기본파와 고조파를 분리하였고 이는 <그림 7>에 나타난다. A type 역기전력 기본파의 경우 다른 type의 기본파에 비해 1/3의 수치를 보이고 있다. 뿐만 아니라, 고조파도 모든 차수에서 관측되었으며 특히 3차 고조파는 기본파와 비슷한 값을 보였다. 이런 이유들로 A type의 경우에 토크리플이 크게 나온 것으로 판단된다.

무부하 역기전력은 A type에서 가장 높게 측정됐다. 이는 역기전력이 제곱의 평균으로 구하는 RMS치로 계산되었기 때문에 코일의 세그자속량과는 무관하다.

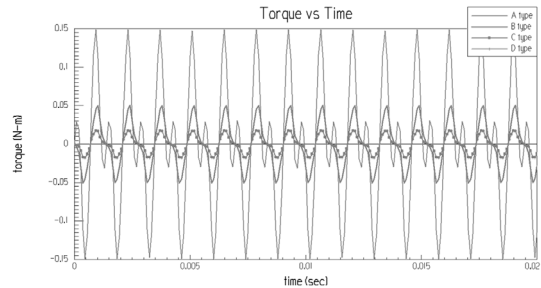


<그림 7> 각 형상별 역기전력 FFT 분석

### 2.2.4 코깅토크

형상	Basic	A	B	C	D
코깅토크(Nm)	0	0.081	0.029	0.01	0.01

<표 6> 각 모델별 코깅토크



<그림 8> 각 형상별 코깅토크

코깅토크는 영구자석의 자속과 자기저항의 변화에 따라 발생한다. A type의 경우는 다른 type보다 공극가까이에 영구자석이 위치하여 다른 type 보다 공극에서의 자속량이 크다. 따라서 식 (2)에 따라 자속은 제곱에 비례하므로 영구자석과 철심 사이에 인력이 크게 작용함으로 인하여 <그림 7>과 같이 큰 코깅토크가 발생하였지만, B, C type으로 갈수록 영구자석이 2층, 3층로 분산되면서 코깅토크의 영향이 크게 줄어드는 경향을 나타내고 있다.

$$T_{cogging} = \frac{1}{2} \phi^2 \frac{dR}{d\theta} \quad (2)$$

### 3. 결 론

본 논문에서는 PMA-SynRM의 토크 특성 향상을 위해 영구자석의 형상에 따른 최적 설계를 수행하였다. 회전자 형상에 대한 여러 가지 설계 인자들 중 영구자석 삽입 형상을 설계 인자로 선정하였으며 4개의 실험 모델을 유한 요소법을 통해서 해석을 수행하였다.

최종적으로 해석 결과 데이터를 분석해 본 결과, 영구자석을 사이트에 삽입하기 보다는 배리어 가운데에 삽입하고, 회전자의 세그먼트를 모두 자속 path로 사용할 수 있는 구조로 영구자석 삽입하고, 또한 배리어 하나 하나의 자석을 삽입하기 보다는 두 개로 나누어 삽입한 D type이 가장 이상적인 구조로 판단된다.

### [참고 문헌]

- [1] Duru, H.T., "Design and analysis of a permanent magnet assisted synchronous reluctance motor", Electric Machines and Drives Conference, 2003. IEMDC'03. IEEE International Volume 1, 1-4 June 2003 Page(s):346 - 352 vol.1
- [2] Bianchi, N., "Rotor Flux-Barrier Design for Torque Ripple Reduction in Synchronous Reluctance and PM-Assisted Synchronous Reluctance Motors", Industry Applications, IEEE Transactions on Volume 45, Issue 3, May-june 2009 Page(s):921 - 928
- [3] S. Morimoto, Y. Takeda, T. Hirasu: "Loss Minimization Control of permanent Magnet Synchronous Motor Drives", IEEE Trans. on Industry Electronics, IE-41, No. 5, pp.511-517 (1994)