高出力 應用을 위한 永久磁石 埋入形 同期 릴럭턴스 電動機의 特性解析

장영진*, 김상길**, 신홍교***,박성준,*이중호*
한발대학교*, 대전기능대학**, 경상대학교***

Characteristic Analysis of Permanent MagnetAssisted Synchronous Reluctance Motorfor High Power Application

Young-Jin Jang*, Sang-Gil Kim**, Heung-Kyo Shin***, Seong-June Park*, Jung-Ho Lee*
Hanbat National University*, Daejeon Polytechnic College**, GyeongSang National University***

Abstract - In this paper, finite element analysis for a PMASynRM is presented and the characteristic analysis of inductance and torque is performed under the effect of saturation. The focus of this paper is characteristic analysis of d and q-axis inductances and torque according to magnetizing quantity of interior permanent magnet for PMASynRM. The d and q-axis current component ratios, load angles of a PMASynRM are investigated quantitatively on the basis of the proposed analysis method and the experimental test. Comparisons are given with output characteristic curves of normal SynRM and those according to the load in PMASynRM, respectively. And it is confirmed that the proposed model results in high output power performance.

1. 서 론

동기 릴럭턴스 전동기(SynRM)는 회전자의 d축과 q축의 인덕턴스 차(L_d-L_q)와 비(L_d/L_q)를 크게 함으로써 토크특성이나 역률을 크게 개선시킬 수 있으며, 이와 관련하여 회전자의 설계에 관한 연구가 활발히 이루어지고 있다.

동기형 릴럭턴스 전동기 개선방향으로서, 영구자석을 적절하게 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기(Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor : PMASynRM)는 토크밀도와 역률을 크게 향상시킬 수 있다.[1]-[5]

본 논문은 토크밀도와 역률을 개선하기 위해서 영구자석의 자로를 q축 자속의 반대 방향으로 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기를 해석대상으로 유한요소법을 이용하여 포화의 영향을 고려한 특성분석을 수행하였다.

영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 유한요소해석에 있어서 인덕턴스 특성 및 토크특성 분석을 각각의 잔류 자속밀도 량(0.1T ~ 0.4T)에 따라 수행하였다.

본 논문의 중점으로는 PMASynRM에 삽입된 영구자석의 자화량에 따른 d, q축 인덕턴스와 출력 특성분석이다.

TMS320C31 DSP를 이용해서, 부하에 따른 특성 분석을 수행 하여 출력특성을 비교 하였다.

2. PMASynRM의 모양과 원리

2.2.1 PMASynRM의 원리

그림 1은 PMASynRM의 회전자 단편을 보여준다. 일반 동기 릴럭턴스 전동기(SynRM)은 유도기 보다 적은 역률에서 동작한다. 이러한 문제를 해결하기 위해서 회전자에 q축 자속 상쇄 방향으로 영구 자석을 삽입 하였다. 이러한 PMASynRM의 특성 개선원리 및 토크 표현식은 다음과 같다.

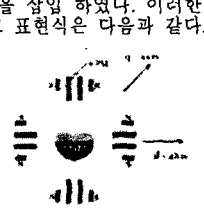

그림1 PMASynRM의 회전자 구조

q축 자속 경로에 영구자석을 매입했을 때, d축과 q축에 대한 쇄교자속은 각각 식 (1), 식 (2)과 같이 표현된다.

$$\lambda_d = L_d i_d \tag{1}$$

$$\lambda_q = L_q i_q + \lambda_{mq(pm)} \tag{2}$$

여기서, L_d와 L_q는 각각 d축과 q축 인덕턴스이며, $L_d \neq L_q$이다. 또한, 토크는 식 (3)과 같이 표현된다.

$$T_{pmr} = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\left[(L_d - L_q)i_q i_d + \lambda_{mq(pm)} i_d\right] \tag{3}$$

식 (3)에서 볼수 있듯이 PMASynRM의 최대 토크는 L_q가 0일때 발생함 을 알수 있다. 즉, 식 (3)의 두 번째 항인 L_d-L_q의 값이 커짐으로서 최대 토크를 얻을 수 있다. 즉, 영구자석의 극성이 q축 자속 방향과 서로 반대라고 가정하고, 식 (3)의 토크를 다시 쓰면 다음과 같다.

$$T_{pmr} = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\left[L_d i_q i_d - (L_q i_q - \lambda_{mq(pm)}) i_d\right] \tag{4}$$

따라서, 식 (4)로부터 q축 자속 및 인덕턴스는 이론적으로 '0'에 이를수 있다. 이 경우 L_q는 충분히 작기 때문에, 반발 자속을 위해 페라이트 영구자석이 사용된다.

그림 2는 q축 자속에 완전히 반발하기 위해 영구자석의 영향을 반영한 페이저도를 나타낸다.

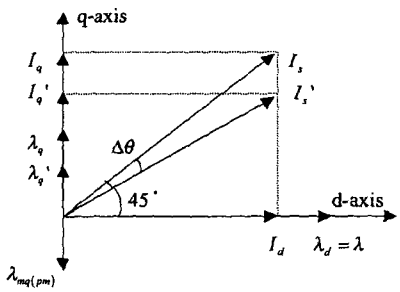

그림 2 PMASynRM의 전류 페이저도

2.2 PMASynRM의 2D-FEM Modeling

맥스웰의 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_0 \tag{5}$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \tag{6}$$

$$\vec{B} = 1/\upsilon_0 \cdot \vec{H} + \vec{M}_{PM} \tag{7}$$

벡터 포텐셜 $\vec{A}$와 등가 자화 전류 $\vec{J}_{PMm}$을 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \tag{8}$$

$$\vec{J}_{PMm} = \upsilon_0(\nabla \times \vec{M}_{PM}) \tag{9}$$

식(1)-(5)로부터 지배 방정식을 유도하면,

$$\upsilon_0(\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_0 + \vec{J}_{PMm} \tag{10}$$

2.3 System matrix

시스템 방정식을 다음과 같이 쓸수 있다.

$$[K^{(e)}]\{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}_{PM}\} = 0 \tag{11}$$

여기서, $K^{(e)}_{ij} = \frac{\upsilon_0^{(e)}}{4\Delta^{(e)}}(c_{ie}c_{je} + d_{ie}d_{je})$

$$F^{(e)}_i = -\Delta^{(e)}\frac{Ni}{3S}$$

$$M^{(e)}_{PMi} = \upsilon_0^{(e)}(M^{(e)}_{PMx}d_{ie} + M^{(e)}_{PMy}c_{ie})$$

따라서, 전체 모델은 식(12)와 같은 행렬로서 표현된다.

$$[K]\{A\} + \{F\} + \{M_{PM}\} = 0 \tag{12}$$

2.3 공극 자속 밀도와 인덕턴스 특성

그림 3과 4는 각각 q축전류와 영구자석(ferrite 0.1T-0.4T)을 인가 했을때의 radial 방향의 공극 자속 밀도 분포을 보여 준다. 그림 5는 q축 전류 3A와 자석의 자속밀도(0.1T-0.4T)을 함께 인가 했을때, 공극 자속밀도 분포도를 보여주고 있다. 그림에서 보는 바와 같이 자석의 자속밀도량에 따라 q축의 공극 자속밀도가 줄어드는 것을 볼수가 있다. 그림6은 기기의 포화 효과에 따른 d, q축 인덕턴스 특성을 보여준다. 회전자 단편을 가진 일반SynRM과 PMASynRM의 포화는 특히 회전자 립이나 고정자 치부분에서 많이 나타난다. 이러한 포화는 d축 인덕턴스를 줄이고, 일반 SynRM이나 PMASynRM의 토크, 역률, 효율에 영향을 미친다.

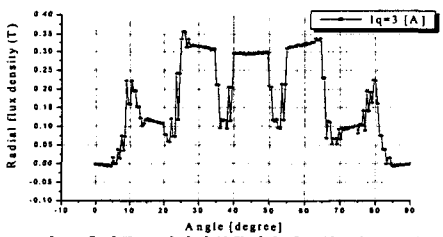

그림3 q축전류3A인가시공극자속밀도분포(Radial)

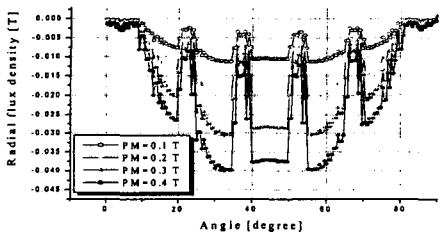

그림4.PM0.4T인가시공극자속밀도분포(Radial)

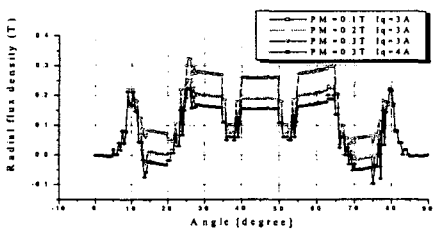

그림5 PM0.4T,d축 전류3A인가시 공극자속밀도분포(Radial)

그림 6에서, 보듯이 PMASynRM의 d축 인덕턴스는 포화에 의해 줄어든 반면에, q축 인덕턴스는 영구자석을 반대 방향으로 삽입한 효과로 줄었음을 볼수 있다. 이론상으로, 저 전류 상태에서 0.4T 패라이트 영구자석의 경우 q축 인덕턴스가 0으로 가까워 짐을 알수 있다. 그림 7과8에서 인덕턴스 차와 비의 변화는 역률과 토크를 증가 시킬수 있음을 알수있다. 또한, 해석 결과가 보여주는 바와 같이 토크와 역률 향상을 위해 0.4T 페라이트 자석이 적절함을 보이고 있다.

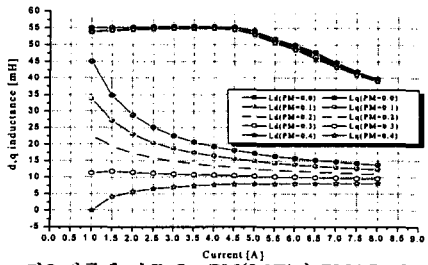

그림6 전류에 따른 SynRM(0.0T)과 PMASynRM (0.1T-0.4T)의 d축, q축 인덕턴스

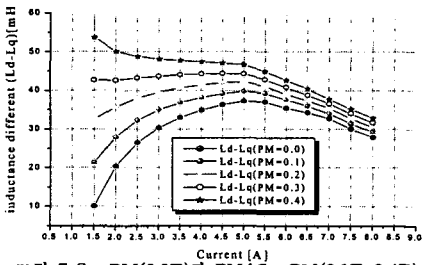

그림 7 SynRM(0.0T)과 PMASynRM(0.1T-0.4T)의 인덕턴스 차

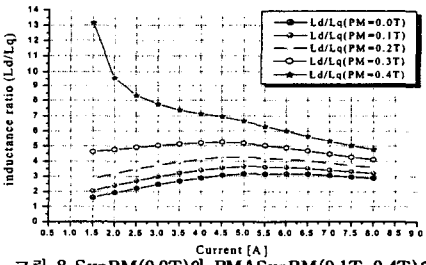

그림 8 SynRM(0.0T)와 PMASynRM(0.1T-0.4T)의 인덕턴스 비

유한요소 해석시 토크는 맥스웰 응력법으로 계산하였다. 또한, 그림 7에서 처럼 자석의 영향이 고려된 인덕턴스 차를 가지고, 토크수식을 다시 쓰면,

$$T_e = \frac{3}{2}\frac{p}{2}\left(L_d - L_q\right)i_a^2 \cdot \frac{\sin 2\varphi}{2} \tag{13}$$

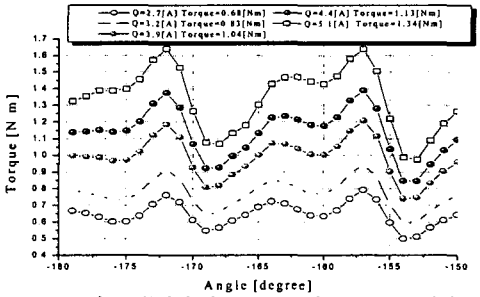

그림 9 부하에 따른 SynRM의 FEA 토크 특성

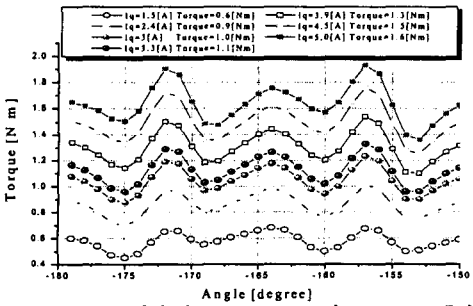

그림 10 부하에 따른 PMASynRM의 FEA 토크 특성

그림 9, 10은 같은 부하 상태에서의 SynRM과 PMASynRM의 FEA토크 특성을 보여준다.(여기서, d축 전류는 2.5A). 한가지 주목할것은 그림에서 보듯이 PMASynRM이 SynRM보다 적은 전류로 거의 같은크기의 토크특성을 보인다는 것이다.

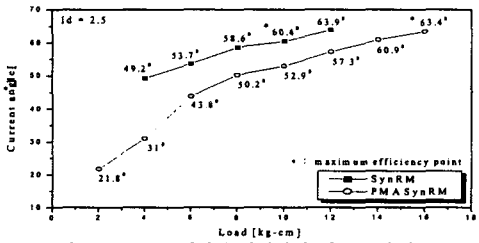

그림 11 3000rpm에서의 부하각과 최대 효율점

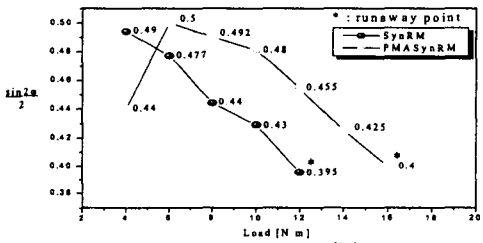

그림 12 3000rpm에서의 $\frac{\sin(2\phi)}{2}$ 특성

표2.1 SynRM과 PMASynRM의 FEA, 수식(13)에 의한 비교표

Table 2.1 Comparison of Torque By FEA and EQ.(13)

부하[Nm]	상전류[A]	Ld-Lq[mH]	토크 (FEA) [Nm]	토크 (식13) [Nm]
		SynRM		
0.61	4.06	34.4	0.83	0.81
0.82	4.63	36.1	1.04	1.03
1.02	5.06	37.3	1.13	1.23
1.22	5.68	38.1	1.34	1.46
		PMASynRM		
0.61	3.47	49.4	0.86	0.88
0.82	3.91	48.3	1.01	1.19
1.02	4.14	48.2	1.12	1.18
1.22	4.63	47.8	1.3	1.4
1.43	5.15	47.6	1.5	1.61
1.63	5.59	47.5	1.64	1.78

표2.1은 SynRM과 PMASynRM의 유한요소분석에 의한 방법과 일반적 토크 수식(13)에 의한 계산 결과값을 비교하고 있다. 표2.1에서 볼수 있듯이 두 계산의 값이 거의 같음을 알수가 있다. 또한, 실험상의 부하값에 비해 유한요소해석 및 계산식에 의한 토크 값이 20%증가 됨을 볼수가 있었는데 이것은 유한요소 해석 및 계산식으로 계산시 손실이 고려가 안 되었기 때문이다.

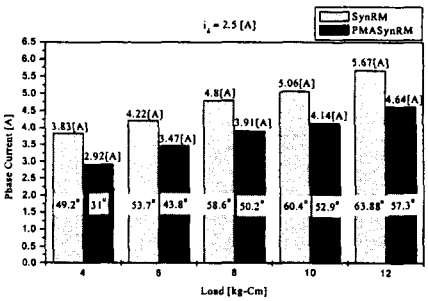

그림 13 3000rpm에서의 전류 특성

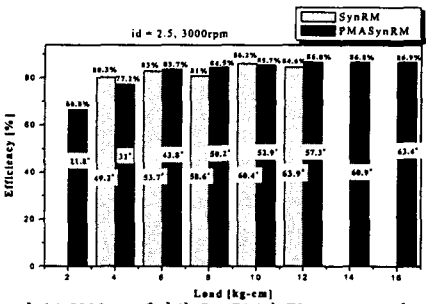

그림 14 3000rpm에서의 SynRM과 PMASynRM의 부하각 특성과 효율

그림 11에서 볼수있듯이 같은 토크(부하) 상태에서의 SynRM이 PMASynRM보다 큰 전류가 필요하고 그에 따른 높은 전류각을 보이고 있다. 그러므로 SynRM의 탈조점은 그림12에 보이는 것처럼 PMASynRM보다 낮은 부하인 12kg-cm에서 발생함을 볼수가 있다.

그림 13, 14는 SynRM과 PMASynRM의 실험 특성으로서 출력과 전류 특성,효율을 비교 하여 나타내고 있다. 이것은 PMASynRM이 SynRM보다 큰 부하 상태에서도 동작됨을 보여주고 출력의 증가를 가져옴을 알수 있다.

3. 결 론

PMASynRM은 q축 자속 상쇄 방향으로 영구자석을 삽입함으로써 q축 인덕턴스를 줄이는 효과를 가져와 Ld-Lq와 Ld/Lq을 증가 시키으며. 이러한 증가는 토크와 역률을 개선하는 데 도움을 주었다.

본 논문에서 제안한 영구자석 매입형 동기 릴럭턴스 전동기의 고출력 고성능 특성이 유한요소해석과 실험을 통해 확인 하였다. 이러한 특성곡선을 적절히 이용하면 부하별, 용량별 설계기준이 될 수 있으며, 이는 고출력 전동기를 필요로 하는 분야 또는 응용분야에 유도기 및 BLDC 전동기의 대체용으로 적합할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[1] V. B. Honsinger,:"The inductances Ld and Lq of Reluctance Machines,"*IEEE Trans.*, PAS-90, (1), pp. 298-304, 1971

[2] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Effect of Magnet on Ld and Lq Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 1199-1202, May 1999

[3] J. H. Lee, "Efficiency Evaluations of Synchrous Reluctance Motor Using Coupled FEM and Preisach Modeling", *IEEE Transation on Magnectics*, Vol. 39, NO. 5, pp 3271~3274, September, 2003

[4] J. H. Lee, "Design Solutions to Minimize Iron Core Loss in Synchronous Reluctance Motor Using Preisach Model and FEM" *IEEE Transation on Magnetics*, Vol. 38, No. 5, pp 3276~3278, Seotember, 2002.

[5] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Preisach Modelling", *IEEE Transaction on Magnetics*, Vol. 35, No. 5, pp. 1203-1206,May 1999