

유한요소법과 프라이자흐모델이 결합된 해석기법을 이용한 PMASynRM과 SynRM의 효율특성 비교

이래화*, 장영진, 이종호
한밭대학교 전기공학과

Efficiency Evaluation of PMASynRM vs. SynRM Using Coupled FEM & Preisach Modeling

Rea-Hwa Lee*, Young-Jin Jang, Jung-Ho Lee
Dept. of Electrical Eng., Hanbat National University

Abstract--This paper deal with the efficiency evaluations in a Synchronous reluctance motor(SynRM) Vs. PMASynRM using a coupled transient finite element method(FEM) and Preisach modeling, which is presented to analyze the characteristics under the effect of saturation and hysteresis loss.

The focus of this paper is the efficiency evaluation relative to hysteresis loss, copper loss, etc. on the basis of load condition in a SynRM and PMASynRM. Computer simulation and experimental result for the efficiency using dynamometer show the propriety of the proposed method.

1. 서 론

고속운전시 SynRM의 철손은 출력 저감의 중요한 원인이 될 수 있다. 그러므로 일반적인 기기에서 철손에 대한 개략적인 산정이 가능한 반면, SynRM에서의 설계 시 철손은 보다 정밀한 산정을 요구한다. 프라이자흐 모델링은 히스테리시스 현상을 가장 정밀하게 수치 묘사가 가능한 모델로서 세부적으로 많이 연구 되고 있다 [1]-[3]. 동기형 릴리턴스 전동기의 개선방향으로 영구자석을 적절하게 삽입한 영구자석 매입형 동기 릴리턴스 전동기(PMASynRM)는 토크밀도와 역률을 크게 향상 시킬수 있다. 그러나, PMASynRM은 추가된 자석의 자속밀도로 인해서 SynRM보다 자기 포화가 더 크다.

본 논문에서는 PMASynRM과 SynRM을 해석대상으로 해서 프라이자흐 모델링이 결합된 유한 요소법을 이용하여 포화의 영향과 히스테리시스 손실을 고려한 특성 분석을 수행하였고, 동일 부하상태의 PMASynRM과 SynRM의 철손과 동손등의 효율을 평가 하였다[4]-[6].

2. PMASynRM의 모양과 원리

2.1 PMASynRM의 구조

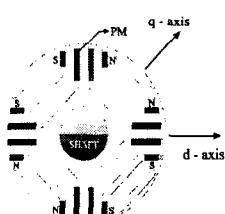


그림 1.PMASynRM의 회전자 단면도

그림 1은 PMASynRM의 회전자 단면을 보여준다. 일반동기 릴리턴스 전동기(SynRM)는 유도기 보다 적은 역률에서 동작한다. 이러한 문제를 해결하기 위해 회전자에 q축 자속 상쇄 방향으로 영구자석을 삽입하였다.

2.2 PMASynRM과 SynRM의 지배방정식

맥스웰의 방정식은 다음과 같다.

$$\nabla \times \vec{H} = \vec{J}_o \quad (1)$$

$$\nabla \cdot \vec{B} = 0 \quad (2)$$

$$\vec{B} = \frac{1}{\mu_0} \vec{H} + \vec{M} \quad \vec{B} = \frac{1}{\mu_0} \vec{H} + \vec{M}_{PM} \quad (3)$$

여기서, \vec{M} , \vec{M}_{PM} 은 각각 자계강도 \vec{H} 에 대한 자성체와 영구자석의 자화의 세기이며, \vec{M} 은 프라이자흐 모델로부터 구해진다. 자기비터포텐셜 \vec{A} 와 등가자화전류 \vec{J}_m , \vec{J}_{PMm} 은 다음과 같이 표현된다.

$$\vec{B} = \nabla \times \vec{A} \quad (4)$$

$$\vec{J}_m = \mu_0 (\nabla \times \vec{M}), \quad \vec{J}_{PMm} = \mu_0 (\nabla \times \vec{M}_{PM}) \quad (5)$$

식 (1)-(5)로부터 지배방정식은 (6)과 같다.

$$\nu_0 (\nabla \times \nabla \times \vec{A}) = \vec{J}_o + \vec{J}_m + \vec{J}_{PMm} \quad (6)$$

2.3 System Matrix

시스템 방정식은 다음과 같이 쓸수 있다.

$$[K^{(e)}] \{A^{(e)}\} + \{F^{(e)}\} + \{M^{(e)}\} + \{M_{PM}^{(e)}\} = 0 \quad (7)$$

여기서,

$$K^{(e)} = \frac{\nu_0^{(e)}}{4 \Delta^{(e)}} (c_{ie} c_{je} + d_{ie} d_{je})$$

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

$$M_i^{(e)} = \nu_0^{(e)} (M_x^{(e)} d_{ie} + M_y^{(e)} c_{ie})$$

$$M_{PMi}^{(e)} = \nu_0^{(e)} (M_{PMx}^{(e)} d_{ie} + M_{PMy}^{(e)} c_{ie})$$

이다. 따라서, 전체 모델은 식 (8)과 같은 시스템 행렬로서 표현된다.

$$[K] \{A\} + \{F\} + \{M\} + \{M_{PM}\} = 0 \quad (8)$$

2.4 프라이자흐 모델의 응용

프라이자흐 모델은 M-H관계를 사용하였고, 모든 히스테리시스 현상에 있어 인가자계와 자화량 사이에는 위상차가 있기 때문에 벡터적 해석을 필요로 한다.

그러나 벡터적 해석은 복잡하며 오차를 피할 수 없다. 그러므로 회전기기의 해석에 대한 새로운 알고리즘 개발이 필요하다. 회전자는 입력자자계 각 θ 를 따라 동기적으로 회전한다. 따라서 고정자의 영역은 x 축 y 축에 위에서는 0 혹은 π 이다.

따라서 회전기기에 대한 프라이자흐 모델은 식(9)에서 볼 수 있는 바와 같이 스칼라 모델로서 표현되어질 수 있다.

$$M(t) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (9)$$

$$= \iint_{S^+(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta - \iint_{S^-(t)} \mu(\alpha, \beta) d\alpha d\beta$$

보다 편리한 계산을 위하여 식(10)과 같이 에버렛 평면으로 대체하여 해석을 수행하였다.

$$E(\alpha, \beta) = \iint_{\alpha \geq \beta} \mu(\alpha, \beta) \gamma_{\alpha\beta}(H(t)) d\alpha d\beta \quad (10)$$

3. 해석 결과 및 분석

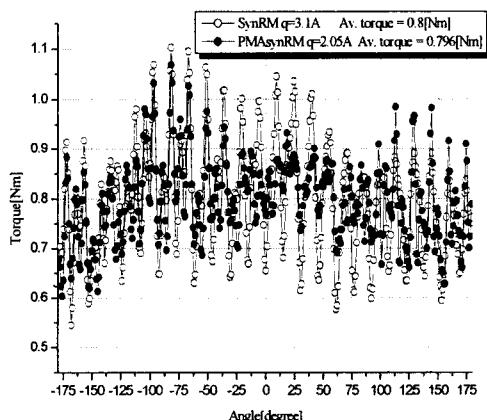


그림 2. SynRM과 PMASynRM의 토크 특성(부하 : 8 kg cm)

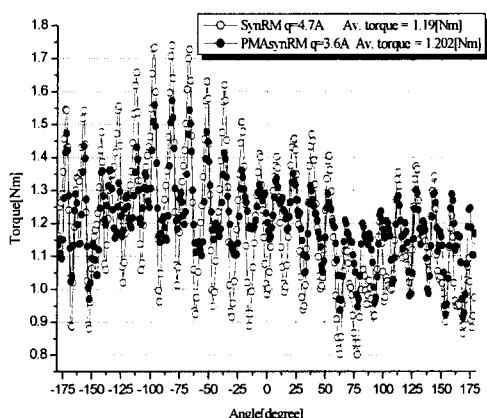


그림 3. SynRM과 PMASynRM의 토크 특성(부하 : 12kg cm)

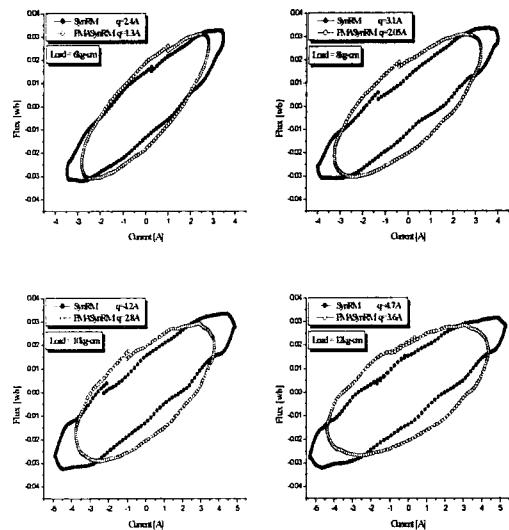


그림 4. 부하에 따른 $i - \lambda$ 면적

그림 2와 그림3은 SynRM과 PMASynRM의 부하 8 kg cm 와 12kg cm 일때의 토크 특성을 각각 나타내고 있다. 그림4의 $i - \lambda$ 의 면적은 서로 같은 부하에서의 SynRM과 PMASynRM의 특성을 보여주고 있다. 평균 토크밀도는 같은 부하일때 같은 값을 갖지만, SynRM의 토크리플이 그림2와 그림3에서 보는 바와 같이 PMASynRM의 토크리플보다 크다는 것을 볼수 있다..

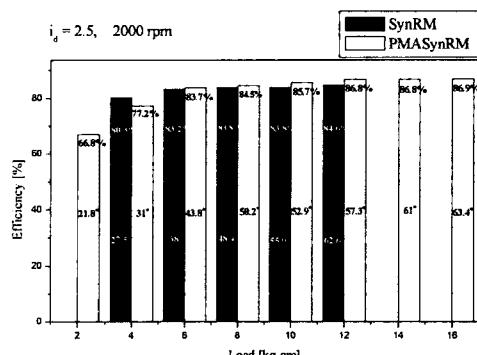


그림 5. 실험에서 부하에 따른 SynRM과 PMASynRM의 효율, 전류각, 말초위치

표1.SynRM과PMASynRM에서의 손실비교.

부하 (kg·cm)	효율 (%)	철손 (W)	동손 (W)	기타손 (W)	상전류 (W)
SynRM					
6	83.2	12.33	19.38	5.29	4.06
8	83.8	14.67	25.2	7.13	4.63
10	83.8	16.34	30.11	12.55	5.06
12	84.6	18.68	37.9	10.42	5.6
PMASynRM					
6	83.7	16.34	14.06	5.6	3.46
8	84.5	17.68	17.87	9.45	3.9
10	85.7	18.34	20.14	12.52	4.14
12	86.8	21.34	25.19	9.47	4.63

q 축 인덕턴스는 PMASynRM에서 이론적으로 0에 가깝게 만들 수 있다. 상쇄자속은 L_q 가 작을 때 페라이트 자석으로부터 정상적으로 얻을 수 있다. L_d 는 오직 자기 포화로 감소 하는 반면에, L_q 는 PMASynRM의 영구자석이 자속을 추가적으로 방해함으로서 감소된다. 그러므로 SynRM의 높은 전류는 PMASynRM과 같은 토크 밀도를 내기 위함이고, 높은 전류의 크기는 그림 4로서 알 수 있다. 또한 이러한 이유로 해서 SynRM의 토크리플이 커진다. 실험치로 얻어진 정상적인 SynRM과 PMASynRM의 효율과 전류각 특성이 그림5에서 부하에 따라 나타났다.

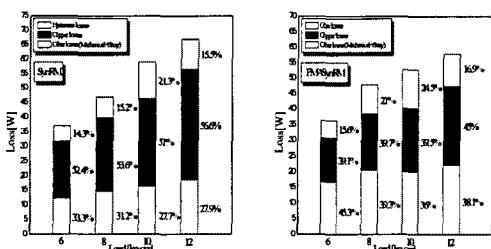


그림 6 SynRM과 PMASynRM의 부하에 따른 손실분석

히스테리시스손은 $i - \lambda$ 의 면적에 의해 계산되고, 동손은 저항의 크기와 전류의 실효치에 의해 계산 되어진다. 그밖의 손실인 외전류손과 기계손등은 표1에 나타내었다.

시뮬레이션에서 출력은 실험치와 같다. 그러므로 상전류는 실험치의 상전류와 유사하다.

그림6은 서로 다른 부하상태에서 전체의 손실에 대한 각각의 손실을 보여준다.

부하 때문에 증가한 전류로 히스테리시스손은 커지지만, 그들의 동손에 대한 비율은 더 커지므로 전체적인 비율로는 감소된다.

그림2와 그림3 그리고 표1에서 보여지는 것과 같이 같은 토크를 내기 위한 높은 전류 때문에 SynRM에서의 동손비율은 PMASynRM에서 보다 크다. 따라서, PMASynRM의 히스테리시스 손실은 SynRM에서의 것 보다 높은 비율을 갖는 반면, 히스테리시스의 크기는 비슷하다.

이를 분석하기 위해 PMASynRM과 SynRM의 치요크 부분에서의 히스테리시스 분석을 전류 i_q 가 4[A]이고, 주파수가 25Hz일 때 수행하였다.

분석 결과로부터 우리는 고정자와 치부분에서의 히스테리시스의 크기를 볼 수 있고, 그림7과 그림8에서 보는 것처럼 요크부분 보다 크다.

그리고 PMASynRM이 SynRM보다 포화가 잘 되지만, 영구자석을 삽입함에도 불구하고 비슷한 히스테리시스의 특성을 갖는 것으로 파악된다.

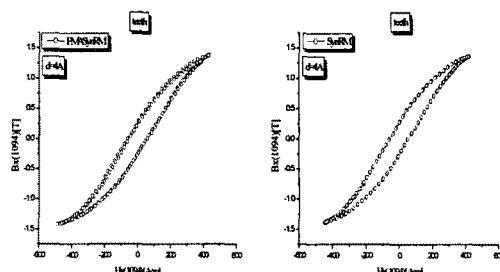


그림 7 PMASynRM과 SynRM의 치부분에서의 B-H 곡선

4 결 론

자기적 비선형을 가진 기기의 히스테리시스 손실에 관련된 해석 기법이 제안 되었다.

PMASynRM은 q 축 자속 상쇄 방향으로 영구자석을 삽입함으로써 q 축 인덕턴스를 줄이는 효과를 가져와 $L_d - L_q$ 와 L_q/L_d 를 증가 시키며, 이러한 증가는 토크 역률을 개선하는데 도움을 주었다.

실험과 이론적인 증명을 통하여 PMASynRM이 높은 출력이 되는 것을 확인 할 수 있었고, 제안된 기법이 각 손실에 대한 정확한 평가가 가능함을 확인하였다.

[참고문헌]

- [1] A. Ivanyi, Hysteresis Models in Electromagnetic Computation, AKADEMIAI KIADO, BUDAPEST
- [2] I. D. Mayeroz, "Mathematical Models of Hysteresis." IEEE Trans. Magn., Vol. 22, No.5, pp.603-608 Sept.1986
- [3] A. Visintin, Differential models of hysteresis, Applied Mathematical Sciences, Springer, 1994
- [4] J. H. Lee, D. S. Hyun, "Hysteresis Analysis for permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor by Coupled FEM & Priesach Modelling", IEEE Trans. Magn., Vol. 35, No. 5, pp. 1203-1206, May, 1999
- [5] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun, "Effect of Magnet on L_d and L_q Inductance of Permanent Magnet Assisted Synchronous Reluctance Motor, IEEE Trans. Magn., Vol. 35. No. 5 pp. 1199-1202, May 1999.
- [6] J. H. Lee, J. C. Kim, D. S. Hyun. "Dynamic Chataacteristic Analysis of Synchronous Reluctance Motor Considering Saturation and Iron Loss by FEM", IEEE Trans. Magn., Vol. 34, No. 5, pp. 2629-2632, Sep. 1998.

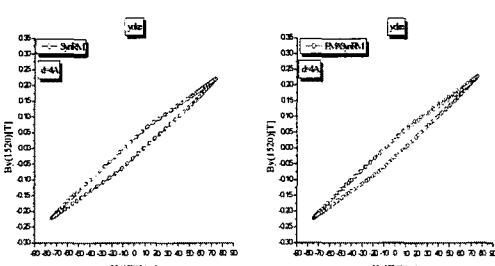


그림 8 PMASynRM과 SynRM의 치부분에서의 B-H 곡선