

부하조건을 고려한 영구자석형 동기발전기의 철손 특성 해석

장석명\*, 고경진\*, 김현규\*, 이성호\*\*, 성태현\*\*\*  
 충남대학교\*, 한국생산기술연구원\*\*, 한국전력연구원\*\*\*

An Analysis on Core Loss Characteristics for Permanent Magnet Synchronous Generator considering the Load Conditions

Seok-Myeong Jang\*, Kyoung-Jin Ko\*, Hyun-Kyu Kim\*, Sung-Ho Lee\*\*, Tae-Hyun Sung\*\*\*  
 Chungnam National University\*, KITECH\*\*, KEPRI\*\*\*

**Abstract** - This paper deals with an improved core loss calculation under the load conditions, namely, no-load, AC-load and DC-load of multi-pole PM generator from curve fitting method using modified Steinmetz equation considered anomalous loss. For an accurate calculation, magnetic field analyses in stator core considering the time harmonics are performed. And using the nonlinear finite element analysis (FEA), we applied separated rotating and alternating magnetic field to core loss calculation. In order to verify the core loss results by proposed method, the experimental system for no-load core loss measurement has been implemented with DC motor, power analyzer and manufactured PM generator. And, the analysis results with rotational speed agree extremely well with those obtained by measurement.

1. 서 론

영구자석 기기에서의 손실은 대부분 동손, 철손, 회전자손으로 구분되어지며 이 중 동손과 철손이 손실의 대부분을 차지한다. 동손의 경우 직류 및 교류 저항의 정확한 계산이 가능하여 기기의 설계 시에 이를 고려한 설계가 가능하나 철손은 [1]-[6]에서와 같이 그 연구가 지속적으로 진행되고 있음에도 불구하고 아직도 그 정확한 예측이 힘든 실정이다. 대부분 Steinmetz 방정식을 이용하여 curve fitting method (CFM)나 직접 실험에 의해 얻어진 철손 측정 결과로부터 철손을 예측하며, 하경호 외는 [2]에서 자계의 거동, 즉, 회전자계 영역과 교번자계 영역을 구분하여 좀 더 향상된 철손 예측을 수행하였다. 본 논문에서도 마찬가지로 철심 제작자에 의해 제공되는 교번자계에 의한 철손데이터를 Steinmetz 방정식으로 CFM을 이용하여 각각의 주파수 영역에서의 철손 계수를 도출하였고 회전자계 영역과 교번자계 영역을 구분하여 철손을 예측하고자 한다. 그러나 Steinmetz 방정식에서 보이는 바와 같이 철손은 주파수와 자속밀도의 합수로써 주파수에 따라 그 값은 비례하거나 자승에 비례하여 증가하게 된다. 이로부터 본 논문에서는 유한요소 해석법을 이용하여 고정자의 영역을 세분화하고, 원주방향 및 반경방향 자속밀도를 계산하였으며 FFT를 이용하여 각각의 고조파에서의 자속밀도를 계산하여 이를 철손 예측에 적용하였다. 제안된 방법에 의해 도출된 철손 해석결과는 기존의 해석법과 실험에 의한 결과와 비교되어 타당성을 입증하였으며, 부하조건에 따른 철손특성의 해를 도출하고, 고조파전원에 의해 발생하는 고조파 자계가 철손에 미치는 영향을 규명하였다.

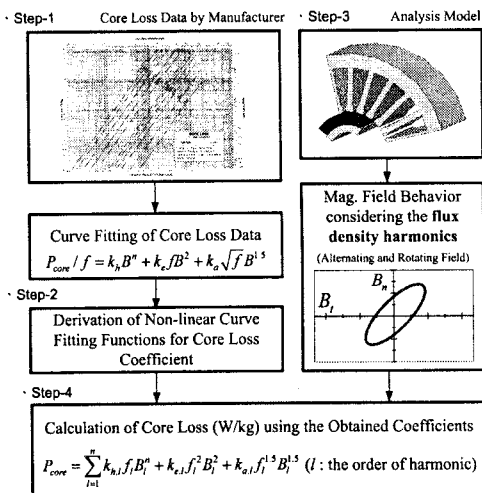


그림 1. 자계 고조파를 고려한 철손 특성 해석 과정

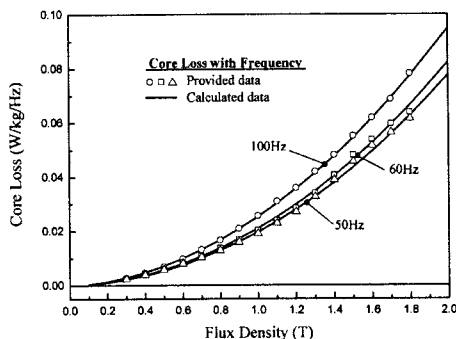


그림 2. CFM에 의한 주파수별 철손 예측 결과

2. 고조파 자계를 고려한 철손 특성 해석

2.1 철손 특성식

일반적으로 철손은 시변하는 자계에 의해 철심내 자구의 변화에 따른 에너지 손실에 기인하는 히스테리시스 손실( $P_h$ )과 철심의 도전율에 의해 발생하는 와전류 손실( $P_e$ )로 구분되어 진다. 즉, 히스테리시스 손실은 자성재료 가 단위 시간당 히스테리시스 루프를 몇회 주회하는가에 의해 결정되어, 이는 주파수와 자속밀도에 비례한다. 그리고 와전류 손실은 주파수 증가에 따른 재료의 도전성에 의해 발생하는 기전력변화에 의해 발생되어, 주파수와 자속밀도의 자승에 비례한다. 그러므로, 이상적인 정

현과 자계의 크기와 주파수의 변화에 따른 철손식인 Steinmetz 식을 식(1)과 같이 표현할 수 있다.

$$P_c = P_h + P_e = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 \quad (1)$$

여기서,  $f$ 는 발전기의 회전속도에 따른 자계의 주파수,  $B$ 는 영구자석에 의한 철심의 자속밀도,  $k_h$ 와  $k_e$ 는 각각 히스테리시스 손실 계수와 와전류 손실 계수이며,  $n$ 은 Steinmetz 상수이다.

철손의 해석적 예측에 있어 이 계수들의 예측이 가장 중요하다. 이는 철심의 재질에 따라 그 크기가 다르며, 주파수에 따라 그 크기가 비선형적으로 변하게 된다. 그러나, 식 (1)의 Steinmetz 식은 철심내의 자속밀도가 1-T 이상 되거나 높은 주파수 영역에서는 그 오차가 매우 크다. 그리고, 앞서 언급된 히스테리시스 손실이나 와전류 손실 성분 외에 재료내부의 자구폭이나 판에 미치는 장력에 의해 발생하는 이상 와전류 손실성분이 존재하는 것으로 알려지고 있어, 이를 고려하여 식 (1)에 이상 와전류 손실분,  $P_a$ 를 더하여 식 (2)를 도출할 수 있다.[1]

$$P_c = P_h + P_e + P_a = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (2)$$

여기서,  $k_a$ 는 이상 와전류 손실 계수이다.

## 2.2 철손 특성 해석 과정

그림 1은 본 논문에서 제시된 고조파 자계를 고려한 철손 특성 해석 과정을 보여준다. 우선 제조사에서 제공된 철손데이터로부터 각 주파수별 철손을 다시 도시하고, 계산의 용이를 위해 중량당 철손을 주파수로 나누어 식 (3)을 이용하여 curve fitting 함으로써 주파수에 따른 각 계수들을 예측하였다.

$$P_c / f = k_h B^n + k_e f B^2 + k_a f^{0.5} B^{1.5} \quad (3)$$

그림 2는 식 (3)에 의해 재정렬된 철손데이터와 CFM으로부터 도출된 철손계수합수를 이용하여 계산한 해석결과를 도시한 것이다.

## 2.3 고조파를 고려한 자계 특성 해석

고정자 형상과 고조파 전원에 의한 고정자 코어내의 자계분포 외곽은 철손의 증가를 야기한다. 이는 고정자의 각각의 부분에서 철손의 발생률이 다름을 의미하며, 세분화된 영역의 자계의 크기뿐만 아니라 그 파형에 대한 주파수 분석이 필요함을 의미한다. 본 논문에서는 그림 3과 같이 고정자 코어 1/48 차.술.뎀 모델의 영역을 35개의 영역으로 세분화하고 각각의 영역에서 부하조건에 따른 자계 분포 특성 해석을 수행하였다. 그림 4는 각각의 영역에서의 부하조건별 자계분포 특성을 보여주고 있으며, 부하에 따라 반경방향과 원주방향 자속밀도의 크기뿐만 아니라 궤적에서도 많은 차이를 보이는 것을 확인할 수 있다. 그리고, 그림 5는 각 영역에서의 원주방향 자속밀도와 반경방향 자속밀도의 FFT 해석 결과를 보여주고 있으며 부하조건에 따라 그 고조파별 크기가 많은 차이를 보임을 확인할 수 있다.

## 2.4 자계 거동 해석

대부분의 전기기계의 설계자들이 사용하는 철손데이터는 Epstein 실험에 의해 얻어진 것으로 변압기와 같은 교번자계만을 갖는 기기에서는 그 데이터의 이용이 매우 바람직하나, 복잡한 자계분포를 갖는 모터나 발전기에서는 교번자계뿐만 아니라 회전자계 영역이 매우 많이 발생하게 되어 Epstein 실험에 의한 데이터를 이용한 CFM으로 얻어진 철손 해석결과는 타당성이 매우 결여된다. 실제 하경호 [2]와 M.Enokizono [3]은 반경방향 자속밀도와 원주방향 자속밀도에 대한 측비를 정의하고 이 측비에 의해 교번자계와 회전자계를 정의내렸다. 또한, 손대락 외-는 철손 해석 및 측정 기술개발에 관한 연구에서 철심내 자속밀도가 같은 경우 회전자계 영역의

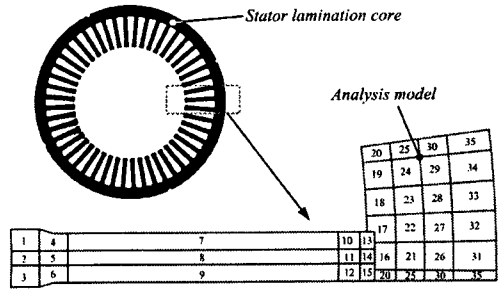


그림 3. 고정자 코어와 해석 영역 모델

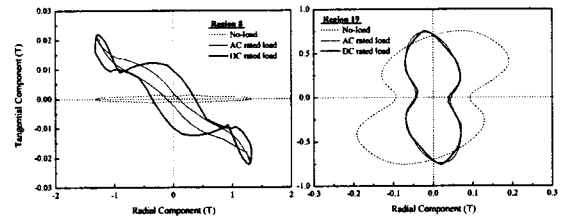


그림 4. 부하조건에 따른 영역별 자계 해석 결과

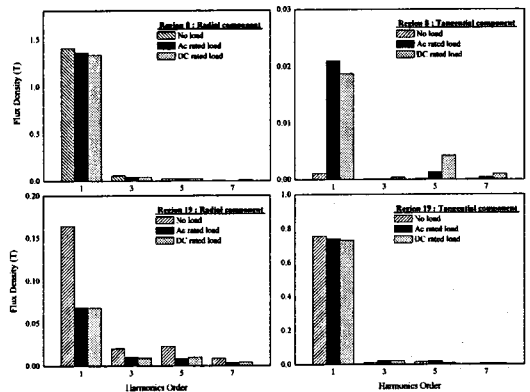


그림 5. 부하조건에 따른 영역별 자계 고조파 해석 결과

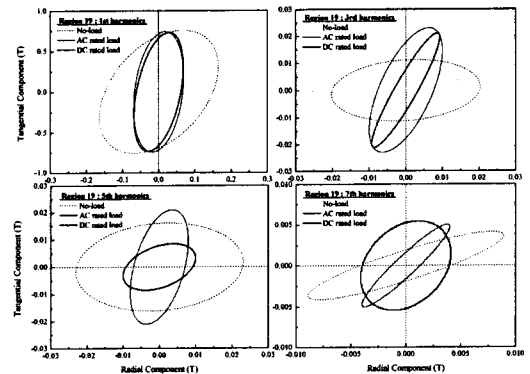


그림 6. 고조파별 자계 거동 해석 결과

철손 발생이 교번자계 영역에서 철손 발생의 100% 이상 증가함을 실험을 통해 규명하였다. 따라서, 본 논문

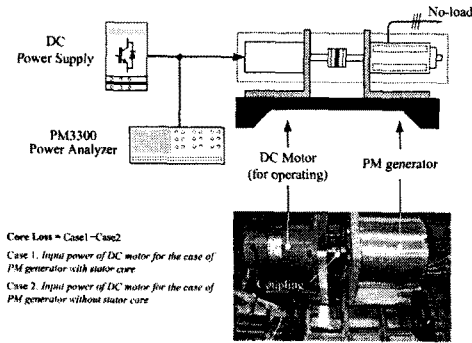


그림 7. 무부하 철손 측정을 위한 실험 장치

에서는 그림 6에서 보여지는 것처럼 각각의 해석 영역에서 고조파별 자계 거동 분석을 통해 교번자계와 회전자계를 구분하고 이를 식 (4)에 적용하여 최종적인 철손 결과를 도출하였다.

$$P_{core} = \sum_{l=1, \text{odd}}^{\infty} k_{hl} \int B_l^n + k_{el} (\int)^2 B_l^2 + k_{al} (\int)^{1.5} B_l^{1.5} \quad (4)$$

### 3. 특성 해석 결과 및 실험적 검증

그림 7은 무부하 철손의 실험적 계측을 위한 실험 장치를 보여준다. 발전기의 기계적 입력을 위해 DC 전동기를 사용하였고, 이를 구동하기 위한 DC 전력 공급장치가 이용되었다. 계측 대상인 영구자석 발전기가 고정자 코어를 가지고 있을 경우의 DC 전력 공급 장치의 입력과 고정자 코어가 없을 경우의 DC 전력 공급 장치의 입력의 차로부터 회전속도에 따른 철손을 계측하였다.

#### 3.1 회전속도에 따른 철손 특성

제안된 해석법에 의해 얻어진 부하에 따른 철손 특성 해석 결과는 그림 8에서 보여지는 바와 같이 예측되어진 것처럼 발전기의 회전속도에 따라 철손이 증가함을 보여준 것은 물론, 실험결과와 비교되어 기존의 해석법보다 해석결과와 정확도가 매우 향상되었음을 확인할 수 있다.

#### 3.2 부하조건에 따른 철손 특성

그림 9는 제안된 해석법에 의한 부하조건에 따른 철손 예측 결과를 도시한 것이다. 부하전류에 의해 고조파 자계에 의한 영향이 매우 클 것으로 생각되었지만, 동기발전기의 특성상 부하전류에 의한 전자기 반작용에 의해 고정자 코어내의 자속밀도가 감소하게 되어 무부하시에 가장 큰 철손 값을 보이고 있으며, 동일 출력시의 AC 부하와 DC 부하에 따른 결과는 그림에서 보여지는 바와 같이 DC 부하가 약간 더 크게 나타남을 확인할 수 있다. 이는 AC 부하보다 DC 부하가 전류의 고조파 성분 에 의해 자계의 고조파가 더 크게 나타나기 때문인 것으로 사료된다.

### 4. 결론

본 논문은 부하조건을 고려한 철손 특성 해석법을 제시하였다. 부하전류에 따른 고조파 자계 성분을 고려하였고, 각 고조파별 자계 거동 분석을 통하여 무부하, 3상 교류부하, 직류부하시의 철손을 예측하여 비교·제시하였다. 본 논문에서 제시된 해석 기법에 의한 철손해석 결과는 기존의 해석법과 실험에 의한 결과와 비교되어 그 해석법의 타당성을 입증하였으며, 영구자석 기기의

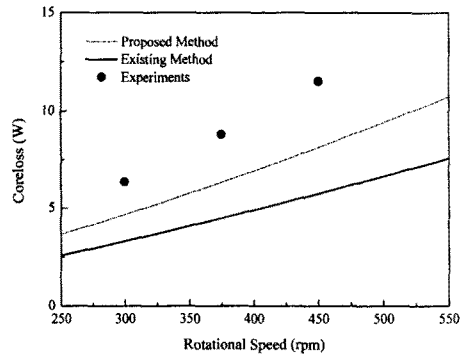


그림 8. 회전속도에 따른 무부하 철손 특성 해석 결과

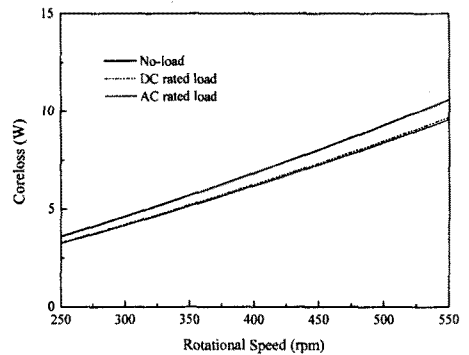


그림 9. 회전속도에 따른 부하별 철손 특성 해석 결과

초기 설계시에 철손을 고려한 특성 예측에 대한 정확성 및 신뢰성이 더 향상될 것으로 사료된다.

### [참 고 문 헌]

[1] Y. Chen, and P. Pillay, "An improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation," 37th IAS Annual Meeting Conference Record, Vol.2, pp.759-766, 2002.  
 [2] Koung-Ho Ha, Sang-Yoon Cha, Jae-Kwan Kim, Jung-Pyo Hong, "Analysis of magnetic field behavior and iron loss in stator core of permanent magnet type motor," Transactions of the KIEE, vol.55, pp.76-82, Feb. 2006. (Korean)  
 [3] M.Enokizono, T.Suzuki, J.Sievert, J.Xu, "Rotational power loss of silicon steel sheet," IEEE Trans. Magn., vol.26, no.5, pp.2562-2564, 1990.  
 [4] L. Ma, M. Sanada, S. Morimoto and Y. Takeda, "Iron loss prediction considering the rotational field and flux density harmonics in IPMSM and SynRM," IEE Proc.-Electr.PowerAppl., Vol.150, No.6, Nov.2003.  
 [5] Seok-Myeong Jang, Han-Wook Cho, Kyoung-Jin Ko, "Analysis on the core loss and windage loss in permanent magnet synchronous motor for high-speed application," Transaction of the KIEE, vol.55B, no.10, pp.511-520, 2006.  
 [6] Carlos A.Hernandez-Aramburo, Tim C.Green, Alexander C.Smith, "Estimating rotational iron losses in an induction machine," IEEE Trans. Magn., vol.39, no.6, pp.3527-3533, Nov. 2003.