

회전속도를 고려한 영구자석형 풍력발전기의 철손 해석

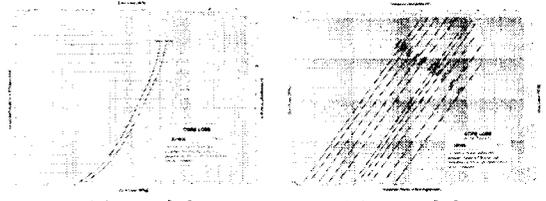
장석명¹, 고경진¹, 최장영¹, 이성호²
 충남대학교¹, 한국생산기술연구원²

Coreloss Analysis of Permanent Magnet Generator Considering the operating Speed for Wind Power Application

Seok-Myeong Jang¹, Kyoung-Jin Ko¹, Jang-Young Choi¹ and Sung-Ho Lee²

Chungnam National University¹, Korea Institute Industrial Technology Gwangju Research Center²

Abstract - Core loss form a larger proportion of the total losses. This paper deals with the analysis on the core loss in PM generator considering the operating speed for wind power application. Using the data information from a manufacturer and nonlinear curve fitting, this paper investigates the magnetic behavior and its core losses in the stator core using the electrical steels.



(a) 60%이하 (b) 100%이상
 그림 1. 제조사로부터 주어진 중량당 철손 데이터

1. 서 론

최근 수송가가 몇 안 되는 도서지방이나 산간에서 20kW정도의 단독 발전/배터리 시스템용 소·중용량 풍력발전기의 수요가 증가하고 있으며 이와 관련된 많은 연구도 수행되고 있다. 이러한 용도의 발전기는 터빈과 직접 연결하기 쉬우며, 또한 발전기를 풍력 타워에 설치하기가 용이하도록 작고 가벼워야만 한다.[1] 이 경우 기어 박스 없이 발전기를 풍력터빈에 직접 연결하면 기어박스를 통해 연결한 경우 보다 전체무게를 감소시켜 경량화됨은 물론 풍력발전시스템의 전체 효율 및 신뢰성을 높일 수 있고 유지 보수비를 경감시킬 수 있는 장점을 갖는다.[2] 그러나 기어 박스가 없는 풍력발전기는 그 특성상 시간과 공간에 따라, 즉 풍향과 풍속에 따라 그 회전속도가 가변된다. 다만 컨버터등의 시스템에서 발전기의 설계시 총속도 범위내에서는 일정 출력이 발생될 수 있도록 제어한다. 그러나 철손과 같은 손실에서는 풍향에 따라 회전속도가 직접적으로 영향을 미치게 된다. 그래서 본 논문에서는 영구자석형 풍력발전기의 회전속도에 따른 철손의 해석방법을 제시하였다. 먼저 고정자에 사용되는 철심의 제조사에 의해 제공되는 철손데이터를 재정렬하고 curve fitting을 통해 주파수에 따른 Steinmetz 식의 계수를 예측하였다. 그리고 구해진 계수로 부터 다시 curve fitting을 통해 주파수 함수로의 계수 함수를 도출하였으며 이 식으로부터 제공된 철손데이터 이외의 영역에서의 철손을 예측하였다. 또한 철심내 자속밀도의 거동을 분석하여 회전자계 영역과 교번자계 영역을 구분하고 철손계산에 적용하였으며 이로부터 구해진 해석값을 유효요소법에 의한 해석 결과와 비교하여 그 타당성을 입증하였다.

2. 철손의 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_c)로 구분되어 진다. 즉, 히스테리시스 손실은 자성

재료가 단위 시간당 히스테리시스 루프를 몇회 주회하는가에 의해 결정되어, 이는 주파수 f 와 자속밀도 B^n 에 비례한다. 그리고 와전류 손실은 주파수 증가에 따른 재료의 도전성에 의해 발생하는 기전력변화에 의해 발생되어, f 와 B^2 에 비례한다. 그러므로, 이상적인 정현파 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.

식 (1)의 Steinmetz 식은 철심내의 자속밀도가 1T이상 되거나 높은 주파수 영역에서는 그 오차가 매우 크게되어 식 (2)와 같은 수정된 Steinmetz 식이 적용되었다.[3]

$$P_c = P_h + P_e$$

$$= k_h f B^{(a+bB)} + k_e f^2 B^2 \quad (2)$$

여기서 a와 b는 상수이다.

그런데, 앞서 언급된 히스테리시스 손실이나 와전류 손실 성분 외에 재료내부의 자구폭이나 판에 미치는 장력에 의해 발생하는 이상 와전류 손실성분이 존재하는 것으로 알려지고 있다. 이를 고려하여 식 (1)에 이상 와전류 손실분, P_a 를 더하여 식 (3)을 도출할 수 있다.[3]

$$P_c = P_h + P_e + P_a$$

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

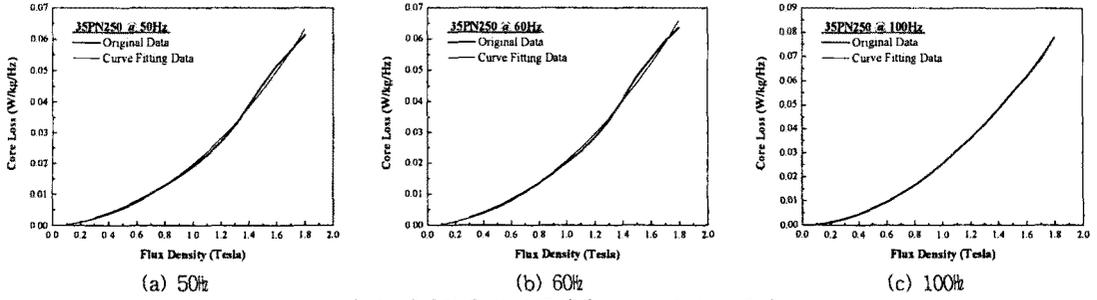
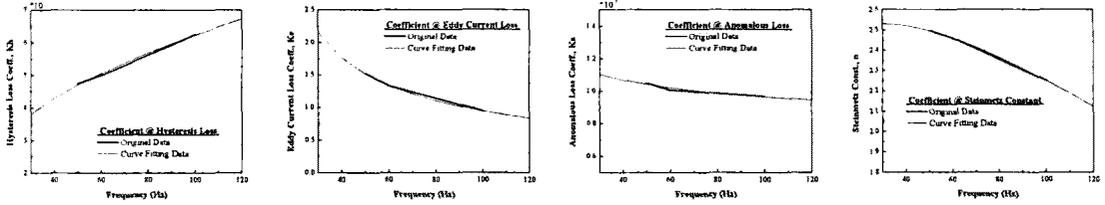


그림 2. 재정렬된 P_c/f 곡선과 curve fitting 곡선



(a) 히스테리시스 손실계수 (b) 와전류 손실계수 (c) 이상 와전류 손실계수 (d) Steinmetz 상수

그림 3. 주파수에 따른 철손 계수 및 curve fitting 곡선

여기서, k_a 는 이상 와전류 손실 계수이다.

2.2 자속밀도-철손곡선을 활용한 철손 해석법

본 논문에서는 식 (3)의 Steinmetz 식을 이용하여 철손을 계산한다. 먼저 그림 1의 제조사에서 제공된 철손 데이터로부터 각 주파수별 철손을 다시 도식한다. 여기서 계산의 용이를 위해 증량당 철손을 주파수로 나누어 도식하였다. 이 데이터로부터 식 (4)를 이용하여 curve fitting 함으로써 주파수에 따른 각 계수들을 예측하였다.

$$P_c / f = (P_h + P_e + P_a) / f \quad (4)$$

$$= k_h B^n + k_e f B^2 + k_a f^{0.5} B^{1.5}$$

그림 2는 식 (4)에 의해 재정렬된 철손데이터와 curve fitting에 의한 곡선을 나타낸다.

표 1. Curve Fitting에 의한 주파수별 철손 계수

f	$K_h(10^{-3})$	$K_e(10^{-3})$	$K_a(10^{-3})$	n
50	4.733	0.153	1.049	2.497
60	4.996	0.133	1.006	2.460
100	6.257	0.095	0.967	2.25

그림 2의 curve fitting 곡선으로부터 주파수별 철손 계수를 구하면 표 1과 같다. 이로부터 그림 3과 같이 주파수에 따른 철손 계수를 도식하고 이 계수를 다시 curve fitting 함으로써 Steinmetz 식을 만족하는 철손 계수 합수를 도출하였다. 도출된 철손 계수 합수는 표 2에 나타내었다. 표 2에 도출된 철손 계수 합수에 의해 구해진 철손은 그림 4에서 보여지는 바와같이 제공된 철손 데이터와 잘 일치함을 알 수 있다. 이는 임의의 자속밀도 및 주파수 영역에서의 철손 계수의 계산이 가능하여, 제공된 철손 데이터에서 주어진 자속밀도 및 주파수 영역에서의 증량당 철손뿐만 아니라, 이 외의 영역에서도 그 예측이 가능하다.

표 2. Curve Fitting에 의한 주파수별 철손 계수 합수

합수 : $Y = A * X^B$					
Y	A	B	X		
k_e	0.0022	-0.6824	f		
k_a	0.0016	-0.1115			
k_h	0.0009	0.4120			
합수 : $Y = A * X^B + C * X + D$					
n	A	B	C	D	f
	1.1141	0.1555	-0.0095	0.9292	

2.3 자계의 거동 분석

일반적으로 제작자로부터 주어지는 철손데이터는 교번 자계에 의한 철손데이터가 대부분이다. 그러나 회전기의 자속밀도의 거동은 비정현적인 자계 분포를 발생시키게 되어 이로부터 철손의 증가를 야기하게 된다.[4][5] 그래서 본 논문에서는 고정자 철심의 내부를 치와 요크를 4 영역으로 구분하여 각 영역에서의 자속밀도 제적을 분석 함으로써 이를 교번자계와 회전자계로 구분하여 철손의 계산에 고려하였다. 그래서 본 논문에서는 그림 5(a)의 고정자 철심을 그림 5(b)와 같이 자속밀도 해석영역을 구분하였으며 각 영역에서 반경방향과 원주방향의 자속 밀도를 각각 구함으로써 그림 6과 같이 그 제적을 도식 하였습니다. 회전자계 영역과 교번자계 영역을 구분하기 위해 축비가 0.1보다 작으면 교번자계, 그 이상의 영역에서는 회전자계로 정의하였다.[1] 손대락 외- 는 철손 해석 및 측정 기술개발에 관한 연구에서 철심 내 자속밀도가 같은 경우 회전자계 영역의 철손 발생이 교번자계 영역에서 철손 발생의 100% 이상 증가함을 실험을 통해 규명한 바 있다.[6] 따라서 본 논문에서 curve fitting의 해 구해진 증량당 철손의 해석에 자계의 거동에 따른 철손 증가분을 고려하여 계산하였다. 즉 본 논문에서는 그림 6의 자속밀도 제적으로부터 그림 5(b)에 표시된 teeth top과 bottom 영역을 회전자계 영역으로 정의하고 교번자계 상태에서 계산된 철손에 100%를 증분하여 철손을 계산하였다.

2.4 철손 해석 결과

그림 7은 본 논문에서 제안된 철손 해석 방법에 의해

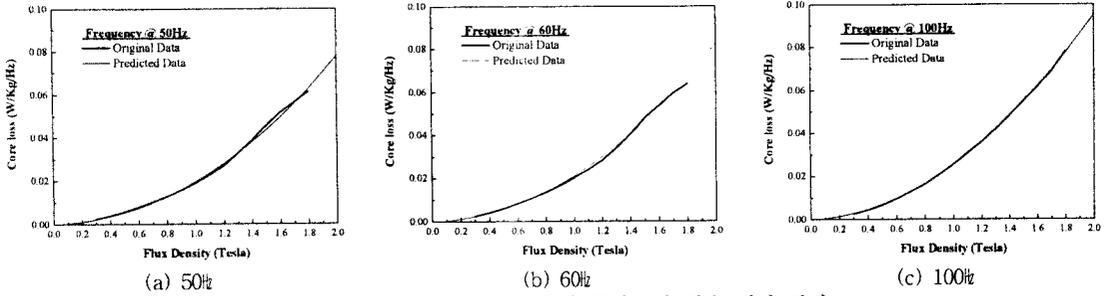


그림 4. 철손 계수 함수에 의한 주파수별 철손 계산 결과

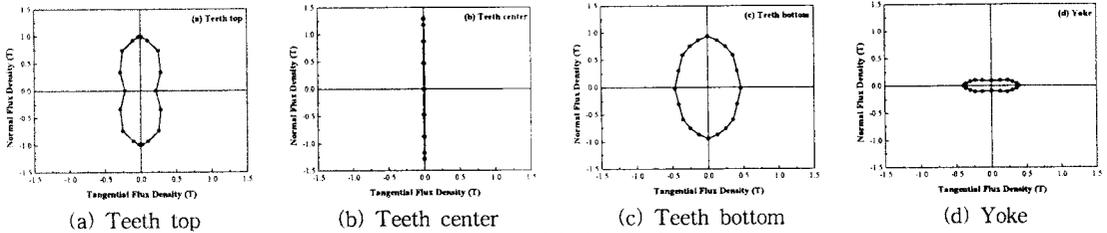


그림 6. 고정자 자속밀도의 제적 커브

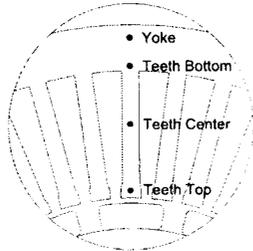
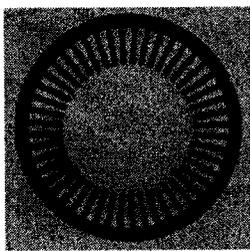


그림 5. (a) 실제 고정자 철심과 (b) 자속밀도 분석 위치

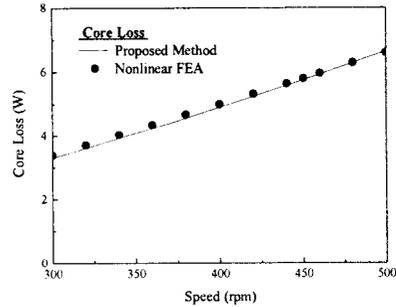


그림 7. 속도에 따른 철손 해석 결과

언어진 해석 결과와 유한요소해석법에 의해 구해진 속도에 따른 철손을 비교한 것이다. 이로부터 본 논문에서 제안된 수정된 Steinmetz 식에 자속밀도의 거동을 고려한 철손의 해석이 타당함을 검증하였으며 이는 발전기의 초기 설계시 비교적 신뢰성 있는 철손을 고려한 해석이 가능할 것으로 사료된다.

3. 결 론

본 논문에서는 영구자석형 풍력발전기의 철손의 해석 방법을 제시하였다. 제조사에 의해 제공되는 철손데이터로부터 curve fitting을 통해 수정된 Steinmetz 철손식의 계수들을 예측하였고 자계 거동을 분석함으로써 이를 고려한 철손 해석결과와 유한요소해석에 의한 결과를 비교하여 그 타당성을 검증하였다. 이는 풍량과 풍속에 따라 회전속도가 지속적으로 변하는 풍력발전기의 속도에 따른 철손을 예측 가능하게 함으로써 발전기의 초기설계시 신뢰성있는 철손의 고려가 가능하다. 향후 제작된 발전기를 통해 무부하 철손 실험을 수행할 것이며 이를 통해 본 논문에서 제안된 철손 해석법의 타당성을 재검증할 것이다.

Acknowledgment

This work was financially supported by KESRI and MOCIE, Korea.

[참 고 문 헌]

- [1] Jianyi Chen, Chemmangot V. Nayar and Longya Xu, "Design and Finite-Element Analysis of an Outer-Rotor Permanent-Magnet Generator for Directly Coupled Wind Turbines," IEEE Trans. Magn., vol. 36, no. 5, pp. 3802-3809, Sept. 2000.
- [2] L. Soderlund, J-T. Eriksson, J. Salonen and R. Perala, "A Permanent-Magnet Generator for Wind Power Applications," IEEE Trans. Magn., vol. 32, no. 4, pp. 2389-2392, July. 1996.
- [3] Y.Chen, and P.Pillay, "An Improved formula for lamination core loss calculations in machines operating with high frequency and high flux density excitation," Ind. Appl. Conf., Vol. 2, pp. 13-18, 2002.
- [4] 하경호, 차상윤, 김재관, 홍정표, "영구자석형 모터의 고정자 철심에서 자계의 거동 및 철손 분석," 대한전기학회 논문지, vol. 55B, no. 2, pp. 76-82, 2006.
- [5] N.Stanges, R.D.Findlay, "Importance of rotational iron loss data for accurate prediction of rotating machine core losses," Proceeding of IEEE-IAS, vol. 1, pp.123-127, 1994
- [6] 철손 해석 및 측정 기술 개발에 관한 최종보고서, 통상산업부, 1997.