

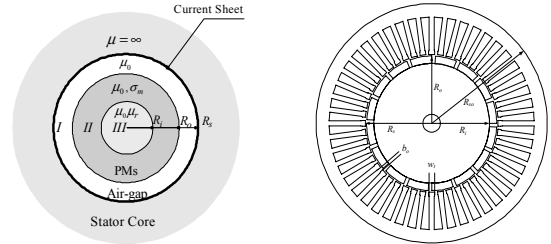
상전류 고조파 분석을 이용한 직교류 부하에 따른 영구자석 동기 발전기의 회전자 손실 특성해석 및 비교

장석영*, 김현규*, 최장영*, 고경진*, 이성호**, 김일중***
 충남대*, 한국생산기술연구원**, 호서대***

Comparison and Analysis for Rotor losses of Permanent Magnet Synchronous Generator using Phase Current Harmonic Analysis according to DC and AC Loads

Seok-Myeong Jang*, Hyun-Kyu Kim*, Jang-Young Choi*, Kyoung-Jin Ko*, Sung-Ho Lee**, Il-Jung Kim***
 Chungnam National University*, Korea Institute of Industrial Technology**, Hoseo University***

Abstract - This paper deals with comparison and analysis for rotor losses of permanent magnet synchronous generator using phase current harmonic analysis according to dc and ac load. On the basis of analytical field analysis, the rotor losses are analysed. Particularly, rated speed and ac load and the rated speed and dc load conditions are considered. This paper compared rotor losses considered dc load with rotor losses considered ac load. Although our analytical modes is low speed, the rotor losses must be considered by results.



〈그림 1〉 회전자 손실 예측을 위한 해석모델

1. 서 론

일반적으로 고속 운전용 영구자석 기기에 비해 중·저속용 영구자석 기기의 경우에는 고속기보다 슬리브의 도전율이 낮고, 주파수가 상대적으로 낮기 때문에 회전자 손실을 고려하지 않는 경우가 많다. 그러나 고정자의 동손 및 철손과 비교하면 회전자 손은 작은 양임에도 불구하고 회전자의 상대적으로 낮은 열소실로 인해 상당한 열을 발생시킨다. 또한 높은 잔류자기의 온도계수, 보자력, 적당한 전기 도전율을 가지고 있는 영구자석의 잔류자속이 감자되는 결과를 발생시켜 영구자석의 성능을 크게 감소시킨다. 영구자석의 성능을 저하시키는 열은 와전류에 의해 발생되며 와전류에 의한 회전자 손실 계산의 방법은 많은 연구자들에 의해 개발되었다.[1]-[3] Zhu[1]-[2]는 자기 스칼라 포텐셜과 2D 원통형 좌표계에서 고안된 해석적 기법을 이용하여 회전자 손실을 계산하였고 온도측정으로 얻어진 실험 결과치를 제시함으로써 타당성을 검증하였다. Irenji[3]는 유한요소법과 해석적 기법을 각각 자속밀도해석과 손실해석에 적절히 보완 적용하였다. 그의 방법은 적당하나 많은 시간이 필요하고 복잡하다.

본 논문에서 Zhu[1]에 의해 제안된 해석적 기법은 회전자 손실 계산을 위해 영구자석 동기 발전기에 적용되었다. 비록 Zhu[1]에서 고정자 슬롯 효과가 무시되었지만 해석모델이 1슬롯 스튜로 적용되었기 때문에 Zhu[1]에 의해 제안된 해석적 기법은 본 논문의 해석모델에 더 적합하다고 할 수 있다. 그리고 슬롯효과가 무시되었기 때문에 슬롯효과에 의해 발생된 무부하 회전자 손실은 없다고 가정하였다. 또한 회전자 손실의 더 정확한 계산을 위해 권선분포와 전류파형에 의해 발생하는 공간 고조파와 시간 고조파만 고려하였다.

결론적으로 본 논문은 발전기에서 발생한 AC 및 DC의 상전류 파형을 통해 FFT 분석을 하였다. 여기서 DC란 정주기 회로를 갖고 있을 경우를 말하며 상전류 파형의 고조파 구성 성분도 확인하였다. 또한 해석 결과와 유한요소해석결과를 비교 제시하고 이를 통해 부하에 따른 회전자 손실 해석기법의 타당성을 검증하였다.

2. 회전자 손실 특성해석

2.1 회전자 자속밀도 해석

그림 1은 회전자 손실 해석에 사용된 영구자석 동기 발전기의 해석적 모델을 보여준다. 해석모델은 슬롯리스 구조를 가지고 있으며 그림 1의 I, II, III는 공극 영역, 영구자석 영역, 회전자축 영역을 보여준다.

회전자인 영구자석에서 유기된 회전자 손실을 예측하기 위해서 시변 자체 분포는 다음의 가정으로부터 나타난 그림 1의 해석모델을 사용하여 계산할 수 있다.

- 1) 고정자 권선은 $r = R_s$ 에서 분포되고 면전류 등가모델로 표현된다.
- 2) 고정자가 스튜로 설계되었을 경우에는 퍼미언스가 변하지 않기 때문에 슬롯팅에 의한 퍼미언스의 변화는 없다고 가정한다.
- 3) 해석 모델에서 영구자석과 회전자 축의 비유전율은 1과 3이라고 가정한다.
- 4) 전기적 도전성을 가지고 있는 것은 영구자석뿐이고 영구자석의 도전율은 σ_m 이다.

그림 1에서 보여준 각 영역의 지배 방정식은 식(1)로 나타난다.

$$\nabla^2 A^I = 0 \tag{1.a}$$

$$\nabla^2 A^{II} = -\mu_0 J_{II} \tag{1.b}$$

$$\nabla^2 A^{III} = 0 \tag{1.c}$$

여기서 A 는 자기 벡터 포텐셜을 나타내고 회전기의 기하학적 구조에 의해 z -방향만 존재한다고 가정한다.

식(1)에 대한 각 영역의 지배방정식은 식(2)로 다시 나타난다.

$$\frac{d^2 A_{zn}^I}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{zn}^I}{dr} - \frac{(np)^2}{r^2} A_{zn}^I = 0$$

$$\frac{d^2 A_{zn}^{II}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{zn}^{II}}{dr} - \left(\frac{(np)^2}{r^2} + \beta_n^2 \right) A_{zn}^{II} = 0 \tag{2}$$

$$\frac{d^2 A_{zn}^{III}}{dr^2} + \frac{1}{r} \frac{dA_{zn}^{III}}{dr} - \frac{(np)^2}{r^2} A_{zn}^{III} = 0$$

여기서 β_n 은 식(3)로 주어진다.

$$\beta_n = \sqrt{-j\mu_0(n+k)w_r\sigma_m} \tag{3}$$

자기 벡터 포텐셜의 정의에 식(2)의 일반해를 대입하면 우리는 각 영역의 반경 방향 성분 및 원주 방향 성분의 자속 밀도를 계산할 수 있다. 그리고 식(4)의 경계조건을 각 영역의 반경 방향 성분 및 원주 방향 성분의 자속 밀도에 대입하면 일반해의 미정계수 $A_n^I \sim B_n^{III}$ 를 구할 수 있다.

$$B_{rn}^I(R_o, \theta, t) = B_{rn}^{II}(R_o, \theta, t) \tag{4.a}$$

$$B_{rn}^{II}(R_i, \theta, t) = B_{rn}^{III}(R_i, \theta, t) \tag{4.b}$$

$$H_{\theta n}^I(R_s, \theta, t) = -J_e \tag{4.c}$$

$$H_{\theta n}^I(R_o, \theta, t) = H_{\theta n}^{II}(R_o, \theta, t) \tag{4.d}$$

$$H_{\theta n}^{II}(R_i, \theta, t) = H_{\theta n}^{III}(R_i, \theta, t) \tag{4.e}$$

$$A_{zn}^{III}(R_i, \theta, t) = 0 \tag{4.f}$$

2.2 포인팅 정리를 이용한 회전자 손실 계산

그림 1의 해석모델에서 정현적 특성을 갖는 자계에 대한 손실 분포는 영역에서 에너지 전달 관계를 관계 짓는 포인팅 벡터 P 에 의해 나타낼 수 있다. 포인팅 벡터에 의한 손실 관계식은 식(5)로 나타난다.

$$P_e = \frac{1}{2} \oint_s^1 Re(E \times H^*) dS \tag{5}$$

여기서 S 는 도전체 면적을 나타내고 회전자 손실은 식(6)으로 다시 나타난다.

$$P_s = \frac{\pi \alpha_p R_o l w_r}{\sigma_m \mu_0} \sum_{k=1}^{\infty} \sum_{n=-\infty}^{\infty} (k+n) Re(K_1 K_2^*) \tag{6}$$

여기서 K_1 과 K_2 는 식(7)과 같이 주어진다.

$$K_1 = j(n+k)w_r\sigma_m \{A_n^{II} I_{np}(\beta_n R_o) + B_n^{II} K_{np}(\beta_n R_o)\}$$

$$K_2 = \begin{bmatrix} A_n^{\text{II}} \left(\frac{np}{R_o} I_{np}(\beta_n R_o) - \beta_n I_{np-1}(\beta_n R_o) \right) \\ + B_n^{\text{II}} \left(\frac{np}{R_o} K_{np}(\beta_n R_o) + \beta_n K_{np-1}(\beta_n R_o) \right) \end{bmatrix} \quad (7)$$

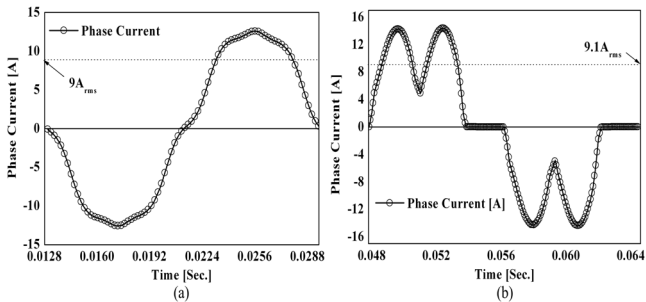
3. 상전류 파형을 이용한 회전자 손실 해석의 결과 비교

본 장에서는 2장에서 유도된 회전자 손실의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석을 통해 영구자석 동기 발전기에서 발생한 상전류 파형을 이용하여 회전자 손실을 해석하였다. AC와 DC 상전류파형일 때의 해석 결과를 서로 비교하여 제시하였으며 마지막으로 유한요소해석결과로부터 얻어진 와전류 분포를 제시하였다.

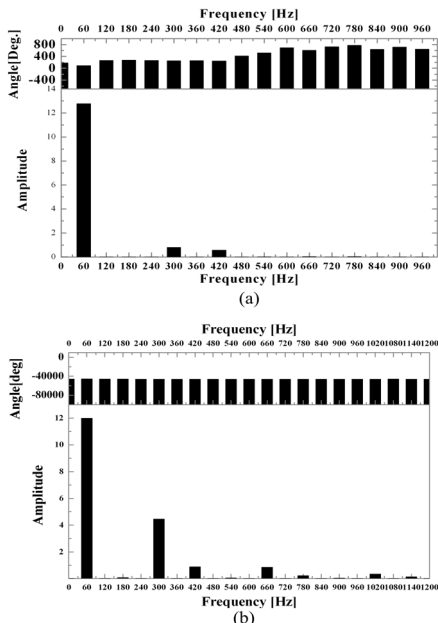
3.1 상전류 파형과 FFT 분석

그림 2(a),(b)는 같은 정격속도(450rpm)의 조건하에 영구자석 동기 발전기에서 발생한 AC와 DC 상전류 파형이다. 여기서 DC 상전류 파형은 정류기 회로를 갖고 있기 때문에 시간 고조파를 포함한 파형이다. 그림 2에서 보듯이 AC 상전류 파형의 RMS값은 9A, DC 상전류 파형의 RMS값은 9.1A이므로 거의 비슷한 값을 가지고 있음을 알 수 있다.

그림 3은 영구자석 동기 발전기에서 발생한 AC와 DC 상전류 파형의 FFT 분석 결과이다. 그림 3(a)에서 AC 상전류 파형의 고조파 성분은 1,5,7고조파이며 주 고조파는 1고조파임을 알 수 있다. 그림 3(b)에서도 DC 상전류 파형의 고조파 성분은 1,5,7,11,13,17이며 주 고조파는 1,5고조파임을 알 수 있다.



<그림 2> 영구자석 동기 발전기에서 발생한 (a)AC와 (b)DC 상전류 파형



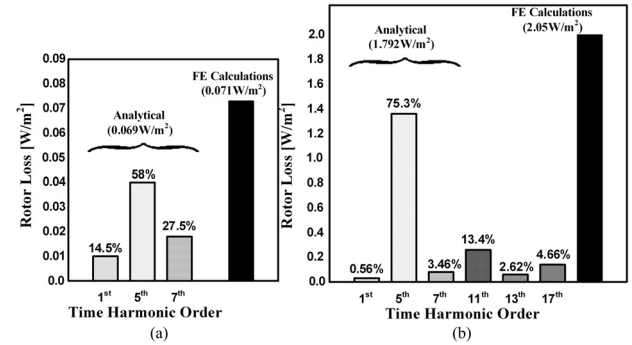
<그림 3> (a)AC 상전류 파형과 (b)DC 상전류 파형일 때의 FFT분석

3.2 회전자 손실 해석 및 와전류 분포

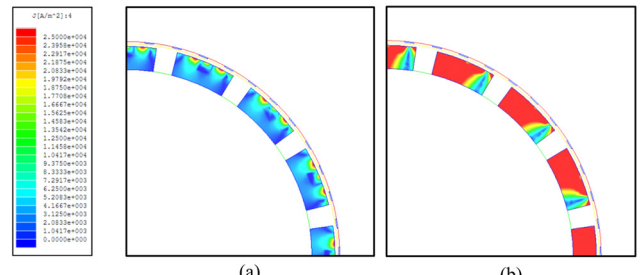
그림 4는 영구자석 동기 발전기에서 각 고조파에 의해 발생된 회전자 손실 밀도를 보여준다. 그리고 비선형 유한요소해석결과로부터 얻어진 총 회전자 손실 밀도와의 비교를 보여준다. 비록 그림 2에서 AC 상전류 파형과 DC 상전류 파형의 RMS값이 거의 비슷하지만 그림 3에서 보듯이 DC 상전류의 5고조파 성분이 AC 상전류의 5고조파 성분보다 더 많이 포함되어 있기 때문에 그림 4에서 DC 상전류의 회전자 손실 밀도는

AC 상전류의 회전자 손실 밀도보다 대략 30배 이상 많은 것을 알 수 있다. 그러므로 영구자석 동기 발전기가 정류기 회로를 갖고 있을 경우에는 회전자 손실이 크기 때문에 회전자 손실을 예측해야만 한다는 것을 알 수 있다.

그림 5는 회전자 손실 해석기법의 타당성을 검증하기 위하여 유한요소해석을 이용한 와전류 밀도 분포를 보여준다. 그림 5에서 보듯이 DC 상전류 파형일 때의 전류 밀도가 AC 상전류 파형일 때보다 더 높은 것을 알 수 있다. 이것은 그림 4에서 제시된 DC 상전류 파형에서의 회전자 손실이 큰 것과 마찬가지로 회전자 손실을 일으키는 와전류 분포도 더 높게 분포됨을 알 수 있다.



<그림 4> (a)AC 상전류 파형과 (b)DC 상전류 파형일 때의 고조파 성분에 따른 회전자 손실 및 유한요소해석결과 비교



<그림 5> (a)AC 상전류 파형과 (b)DC 상전류 파형일 때의 와전류 밀도 분포

4. 결론

본 논문에서는 영구자석 직,교류 부하에 따른 동기 발전기의 회전자 손실 특성해석 및 비교를 다루었다. 자기 벡터 포텐셜과 2차원 극 좌표계를 이용하여 자계분포 특성식을 도출하고 도출된 특성식을 이용하여 회전자 손실 계산을 하였다. 또한 해석 결과로 직,교류 상전류 파형의 회전자 손실을 제시하였다. 영구자석 동기 발전기에서 부하에 따른 회전자 손실의 결과는 유한요소해석결과와 비교하여 잘 일치함을 확인하였다. 해석 결과에서 AC 상전류 파형보다 DC 상전류 파형의 회전자 손실이 30배 이상 많기 때문에 부하에 따른 회전자 손실을 최소화하기 위한 중요한 자료가 되며 초기 설계시에 활용 될 것이다. 향후 영구자석 동기 발전기를 제작할 것이며, 부하에 따른 열특성 해석도 수행할 것이다. 이를 통해 본 논문에서 제안한 회전자 손실 해석기법의 타당성을 재검증할 것이다.

[참고 문헌]

[1] Z. Q. Zhu, K. Ng, N. Schofield, and D. Howe, "Analytical prediction of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface-mounted permanent magnets, Part I: magnetostatic field model," *fifth international conference on electrical machines and systems*, vol. 2, pp. 806-809, Aug. 2001.

[2] Z. Q. Zhu, K. Ng, N. Schofield, and D. Howe, "Analytical prediction of rotor eddy current loss in brushless machines equipped with surface-mounted permanent magnets, Part II: accounting for eddy current reaction field," *fifth international conference on electrical machines and systems*, vol. 2, pp. 810-813, Aug. 2001.

[3] Neamat Taghizaden Irenji, "Calculation of electromagnetic rotor losses in high-speed permanent magnet machines," Ph.D. Dissertation, The university of Southampton, Southampton, U.K., 1998.