

Analysis on Performance Characteristic of Wound Rotor Synchronous Generator by Finite Element Analysis

Duk-Jin Chang*

Agency for Defense Development, Tae-an P.O. Box 1, Chungnam, Korea

(Received 24 March 2019, Received in final form 16 June 2019, Accepted 19 June 2019)

The paper presents the characteristic analysis on the high speed synchronous generator of guided weapon considering load conditions and loss. The generator consists of the rotor with the short-circuited field coil connected to armature coils of an exciter and a stator with three-phase winding. To analyze the generator characteristics considering load conditions and loss, First, the equivalent circuit method considering the effect of saliency and Finite Element Method (FEM) are applied. Second, an accurate loss calculation, magnetic field analyses in stator core considering, magnetic field analyses in stator core considering the time harmonics are performed. And using the nonlinear finite element analysis (FEM), we applied separated rotating and alternating magnetic field to core loss calculation. Finally, using electrical parameter such as resistance, we are applied to calculate the copper loss of synchronous generator.

Keywords : synchronous generator, equivalent circuit, core loss, finite element method

유한요소해석을 이용한 권선형 동기발전기의 특성 해석

장덕진*

국방과학연구소 제5기술연구본부, 충남 태안우체국 사서함 1호

(2019년 3월 24일 받음, 2019년 6월 16일 최종수정본 받음, 2019년 6월 19일 게재확정)

본 논문에서는 유도무기의 동력부에 사용되는 권선형 동기발전기의 특성해석에 대해 다룬다. 발전기 특성해석은 집중정수 회로법과 유한요소 해석법으로 나뉘는데 본 논문에서는 유한요소 해석법을 이용하여 발전기의 발전특성과 손실에 관한 해석을 수행하였다. 발전특성 해석을 위해서 먼저 동기발전기 등가회로와 벡터 도를 구성하여 출력을 유도하고 정격부하, 정격속도 특성을 예측하였다. 그리고 제조사에서 제공하는 철손 데이터를 기반으로 철손 계수함수를 도출하고 유한요소 해석법을 통해 얻어낸 자속밀도의 FFT 분석을 통해 각 영역에서의 교번자계와 회전자계를 구분하여 이를 철손 계산식에 이용하였다. 마지막으로 본 모델의 동손을 구하여 최종적으로 효율을 예측하였다.

주제어 : 동기발전기, 등가회로, 철손, 유한요소 해석법

I. 서 론

동기발전기는 전기자 전압이 높고 전류 용량이 큰 특징을 가지고 있어 대부분 큰 전력 공급이 필요할 때 사용된다. 동기발전기는 크게 회전 계자형과 회전 전기자형의 두 타입으로 나뉘는데 회전 전기자형은 전기자 권선 및 슬립 링의 절연강도와 기계적 강도의 문제점을 갖기 때문에 현재는 대부분 회전 계자형을 사용 한다[1]. 회자 계자형은 소형일 경우 영구자석을 사용하기도 하지만 대부분 계자에 브러시를 사용

하여 계자 전류를 공급하여 발전하는 직류 여자방식이기 때문에 주로 직류 발전기를 갖는 것이 대부분이다. 그리고 회전 축을 동 축으로 하여 브러시를 사용하지 않지만 여자기에서 계자 전류의 제어가 가능하기 때문에 가변부하 조건에서도 일정한 전압을 출력하는 것이 가능하도록 설계되어 있다 [2]. 특히 권선형 동기발전기는 영구자석과는 달리 계자 전류를 사용자 인터페이스에 맞게 조절하여 원하는 자속을 얻을 수 있는 장점으로 Fig. 1과 같은 유도기기 시스템의 동력부(engine part)에서 사용되는 빈도가 높아지고 있다. 일반적으로 유도기기 시스템은 크게 탐색기, 항법장치, 신관, 연료, 동력, 구동, 추진 부로 나뉘는데 항법장치에서 목표물과의 거리를 예측하게 되면 구동부에서 전기에너지를 인버터 컨버터에

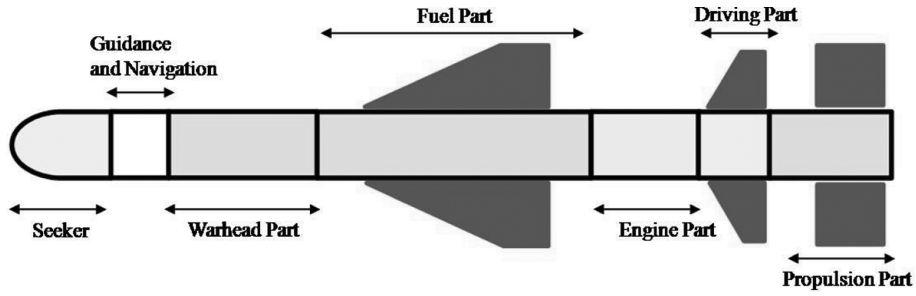


Fig. 1. Components of guided weapon.

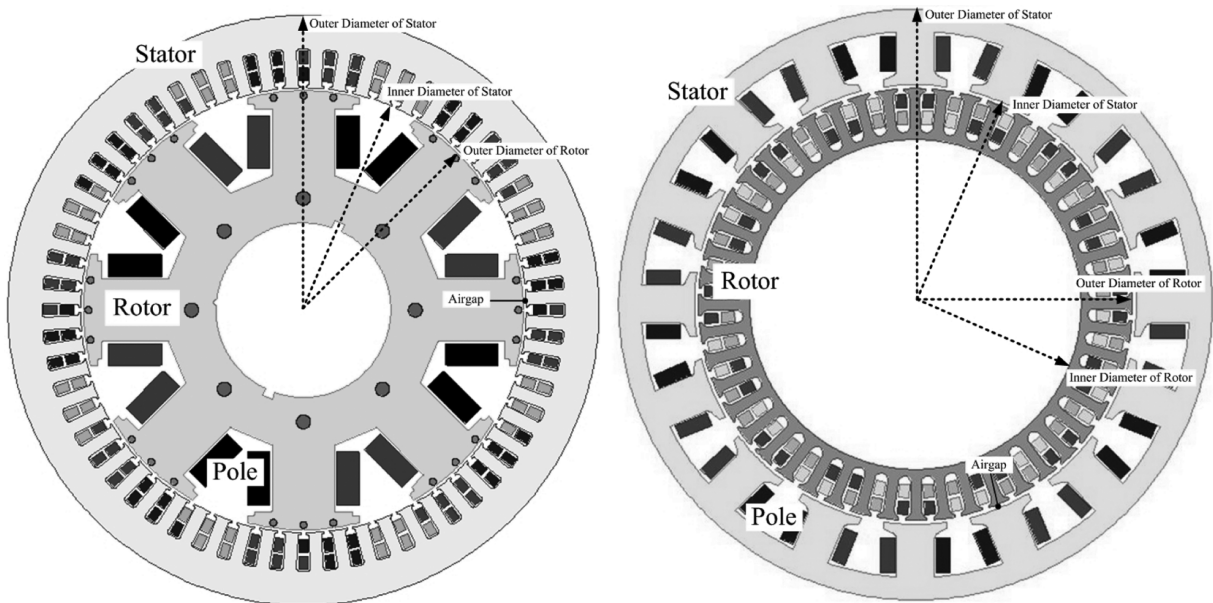


Fig. 2. FEM 2D model of synchronous generator: main generator/exciter.

전력을 공급하게 되고 동력부에선 유도무기가 비행하기 위한 출력에너지를 공급하는 구조로 되어있다. 특히 유도무기 시험은 일반적인 시험과는 달리 일회성인 특징을 가지고 있으므로 단 한발의 시험으로 성공과 실패가 판기를 나기도 한다. 그렇기에 실제 유도무기 시험을 수행하기 전에 각 체계 별로 담당하고 있는 시스템에 대한 성능평가 시험이 중요하게 작용 된다. 따라서 본 논문에서는 유한요소 해석법을 이용하여 일반적으로 유도무기 동력부에서 사용되고 있는 권선형 동기발전기의 발전특성과 손실해석에 관한 연구를 해석하였다. Fig. 2는 유한요소 해석 상용프로그램으로 설계된 돌극형 동기발전기와 여자기의 2D 모델을 나타내고 설계 사양은 Table I, II에 나타내었다. 먼저 동기발전기의 등가회로와 벡터 도를

구성하여 본 모델의 발전특성을 예측하여 정격속도, 정격부하 상태에서 모델의 발전특성을 해석하였다. 그리고 손실해석을 위해 철손과 동손에 대한 해석을 수행하였는데 먼저 제조사에서 제공하는 철손 데이터를 기반으로 철손 계수함수를 도

Table I. Specification of main generator.

Parameter	Value	Parameter	Value
Rated voltage	28 [V]	Rated current	400 [A]
Rated speed	4000 [rpm]	Connection	Y-connect

Table II. Mechanical specification of main generator.

Exciter			
Stator		Rotor	
Number of slots	16 slots	Number of slots	48 slots
Outer diameter	172 [mm]	Outer diameter	125.8 [mm]
Inner diameter	128 [mm]	Inner diameter	96 [mm]
Stack length	25 [mm]	Air-gap	1.1 [mm]
Main generator			
Stator		Rotor	
Number of slots	60 slots	Number of slots	16 slots
Outer diameter	169 [mm]	Outer diameter	125.8 [mm]
Inner diameter	127.4 [mm]	Air-gap	0.8 [mm]
Stack length	80 [mm]	Number of poles	8 poles

출하였다. 그리고 유한요소해석법을 통해 얻어낸 자속밀도를 FFT 분석을 통해 각 영역에서 회전자계와 교번자계를 구분하여 철손 계산에 적용하였다. 마지막으로 저항 값을 도출하여 본 모델의 동손을 구하고 효율을 예측하였다.

II. 본 론

1. 등가회로 모델링

일반적으로 발전기의 발전특성을 측정하기 위해서는 발전기 구동용 전동기와 발전기를 체결하여 발전특성을 시험한다. 그러나 이 경우 추가적인 시험 장비의 제작 등의 시간적 경제적인 제약과 어려움이 발생한다. 따라서 본 논문에서는 Fig. 3과 같은 동기발전기 등가회로를 구성하여 발전량을 실제와 가까운 방식으로 예측하였다[3]. Fig. 3과 4는 각각 동기발전기의 벡터 도를 나타내며 이때 사용되는 심볼을 Table III에 보여주었다. 여기서 E_a 는 상에 유기되는 기전력, I_a 는 상전류, R_a 는 상당 저항을 그리고 X_s 는 동기 리액턴스를 나타낸다. X_a 는 전기자 반작용 리액턴스라 하며 전기자 전류에 의해 생기는 자속 중 공극을 통해 자극으로 들어가고 계자자속에 직접 영향을 미치는 것을 전기자 반작용이라 한다. 이때 전기자 권선에 쇄고 하면서 계자 자속에 영향을 주지 않는 자속을 누설자속이라 하며 이 작용을 X_l 라 표기하고 누설 리액턴스라 한다. 여기서 전기자 반작용 리액턴스와 누설 리액턴스의 합을 X_s 라 하고 동기 리액턴스라 한다. 또한 동기 리액턴스 X_s 와 상당 저항 R_a 의 합을 동기 임피던스 Z_s 라 하며 이때 식

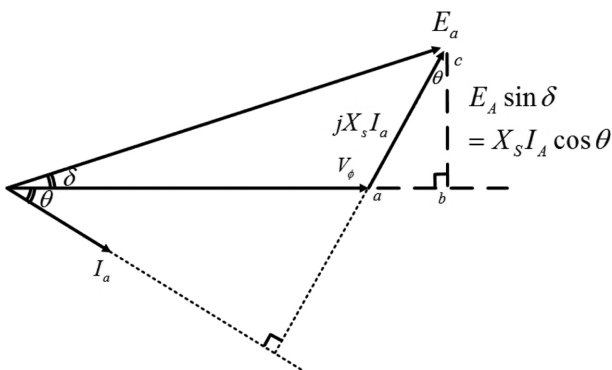
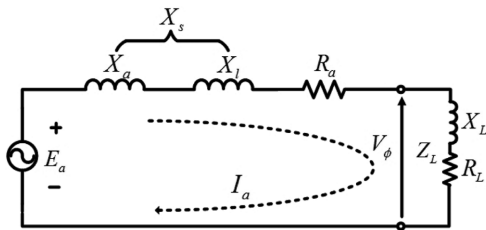


Fig. 3. Synchronous generator: per-phase equivalent circuit/phase diagram.

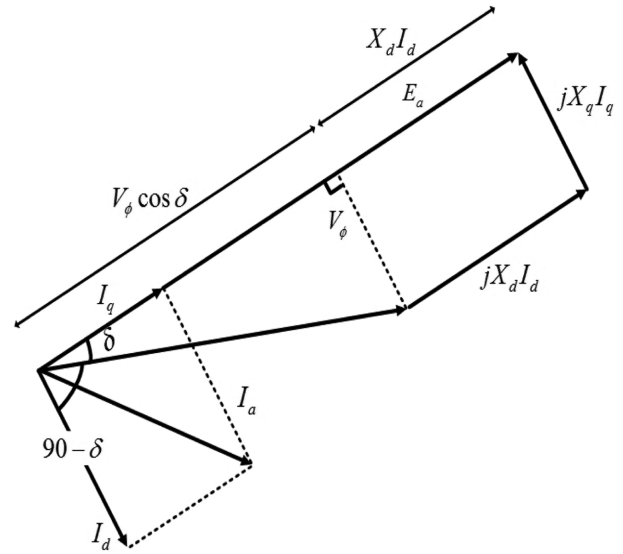


Fig. 4. The phase diagram of a salient-pole synchronous generator.

Table III. Definition of symbols used in Fig. 3 and 4.

E_a	Excitation voltage	V_F	Per-phase voltage
X_a	Armature reactance	I_a	Per-phase current
X_l	Leakage reactance	X_L	Load reactance
X_s	Synchronous reactance	R_L	Load resistance
R_a	Effective resistance	Z_L	Load impedance
δ	Load angle	θ	Power factor angle

은 다음 (1), (2)와 같다.

$$X_s = X_a + X_l \tag{1}$$

$$Z_s = X_s + R_a \tag{2}$$

위에 식에서 상 전압 V_ϕ 를 다음과 같이 도출할 수 있다.

$$V_\phi = E_a - jI_a X_s - jI_a R_a \tag{3}$$

일반적으로 동기발전기의 실제 전기적 출력은 다음과 같이 나타난다.

$$P_{out} = \sqrt{3} V_\phi I_a \cos \theta \tag{4}$$

V_ϕ 와 I_a 는 각각 단자전압, 단자전류를 나타내며 Y 결선 발전기에서 단자전압과 상전압의 차이는 $\sqrt{3}$ 배, 그리고 단자전류와 상전류는 동일하기 때문에 다음과 같은 상의 값으로 표현할 수 있다.

$$P_{out} = 3 V_\phi I_a \cos \theta \tag{5}$$

실제 동기발전기를 운전하는 경우 전기자 저항은 동기 리액턴스와 비교하여 매우 작은 값을 가지게 된다. 이를 고려하여 전기자 저항 R_a 를 무시한 동기발전기의 벡터 도를 Fig. 3과 같이 나타내었다. 여기서 발전기의 출력을 유도하기 위해

수직 성분 b-c를 다음과 같이 나타낸다.

$$I_d \cos \theta = \frac{E_a \sin \delta}{X_s} \quad (6)$$

위의 식을 (5)의 식에 대입하면 최종적으로 발전기의 출력을 표현할 수 있다.

$$P_{out} = \frac{3V \phi E_a \sin \delta}{X_s} \quad (7)$$

그러나 회전자계의 형상이 돌극형일 경우 돌극형 발전기의 출력은 d축의 출력과 q축의 출력의 합으로 나타낸다. Fig. 4는 돌극형 동기발전기의 벡터 도를 나타내며 여기서 출력을 다음과 같이 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_{out} &= P_d + P_q \quad (8) \\ &= 3V \phi I_d \cos(90 - \delta) + 3V \phi I_q \cos \delta \\ &= 3V \phi I_d \sin \delta + 3V \phi I_q \cos \delta \end{aligned}$$

이때 d축 전류와 q축 전류는 다음과 같이 나타낸다.

$$I_d = \frac{E_a - V \phi \cos \delta}{X_d} \quad (9a)$$

$$I_q = \frac{V \phi \sin \delta}{X_q} \quad (9b)$$

최종적으로 식(9)를 식(8)에 대입하여 돌극형 동기발전기의 출력 식이 도출된다[4].

$$P = \frac{3V_t E_f \sin \phi}{X_d} + \frac{3V_t^2}{2} \left(\frac{1}{X_q} - \frac{1}{X_d} \right) \sin 2\phi \quad (10)$$

2. 발전특성 해석

동기발전기의 발전특성을 다루기에 앞서 먼저 발전기의 특성과 직접 관련이 있는 여자기에 대해 고려하였다. Fig. 5는 여자기를 포함한 일반적인 동기발전기 발전 시스템을 보여주며 여자기는 크게 주 여자기와 정류기, 전압조정기로 구성된

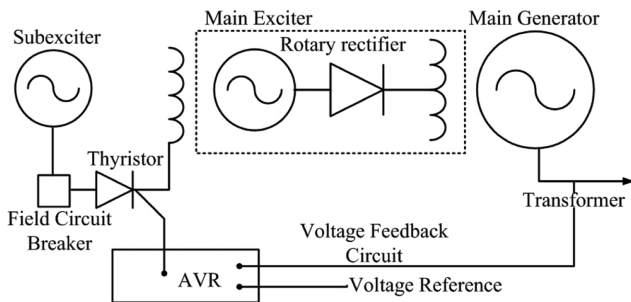


Fig. 5. Synchronous generating system including exciter.

다. 주 여자기는 동기발전기의 계자권선에 발전기의 출력 전압을 유지하기 위한 전압 또는 전류를 공급하는 장치이고, 정류기와 전압조정기는 발전기의 출력 전압 및 전류로부터 단자전압을 일정하게 제어하기 위해 주 여자기를 제어하는 장치이다. DC 전류는 정류기와 전압 조정기를 거쳐 여자기 계자에 전류를 공급하고 여자기의 출력 전류는 동기발전기의 계자에 인가되어 발전기의 계자를 제어한다[5]. 본 논문에서는 모델의 정격 사양인 28[V], 400[A] 값을 도출하기 위해 여자기의 회전속도와 계자 전류에 따른 발전기 출력을 예측하였다. Fig. 6과 7은 각각 여자기의 회전속도와 계자 전류변화에 따른 여자기 출력 전압, 전류를 나타내며 Fig. 8은 주발전기의 계자 전류변화에 따른 발전기 출력 전압, 전류를 예측한 그래프이다. 해석 결과 여자기의 회전속도가 4000[rpm], 계자 전류가 5[A]일 때 여자기의 출력 전압과 전류가 각각

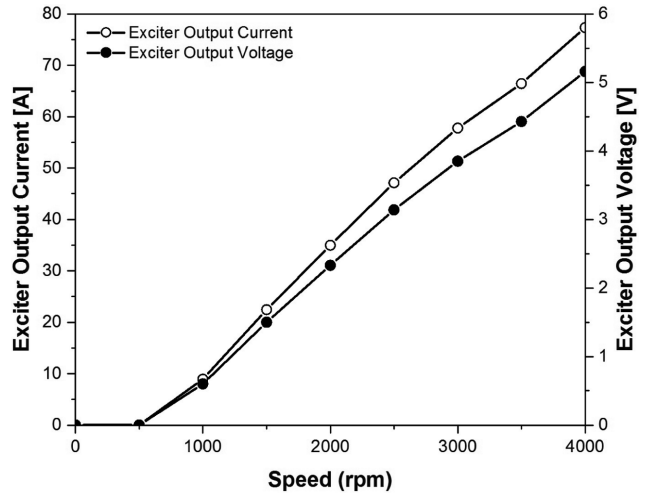


Fig. 6. Exciter speed versus variation of the exciter output current and output voltage.

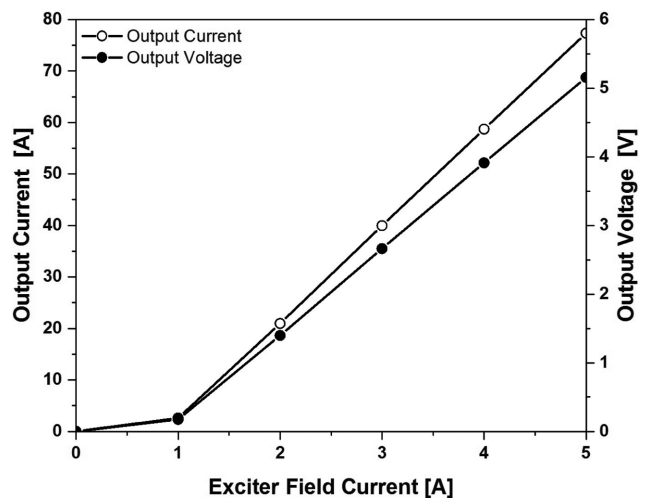


Fig. 7. Exciter field current versus output current and output voltage.

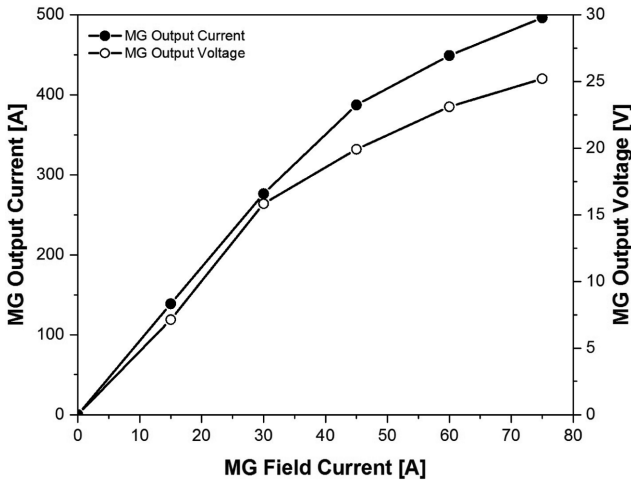


Fig. 8. MG field current versus output current and output voltage.

5.16[V], 77.35[A]가 예측되었다. 이때 여자기에서 발생한 전류는 동기발전기 계자로 인가되어 계자회로를 제어하고 기기의 자속을 발생시키게 되는데 본 논문에서는 여자기 출력 전류인 77.35[A]가 발전기 계자에 인가될 때 Fig. 8과 같이 발전기 정격이 28[V], 400[A]임을 확인하였다. 따라서 본 논문에서는 여자기의 조건을 발전기 계자 전류가 77.35[A]로 일정하게 유지한 조건에서 발전특성 해석을 수행하였다. 먼저 해석에 앞서 발전특성 해석을 위해 세 가지 조건을 가정하였다. 첫째, 전기자 반작용에 의한 감자 현상을 고려하지 않았다. 두 번째는 발전기의 역률을 단위 역률이라 가정하였고 마지막, 발전기 부하를 리액턴스가 없는 순 저항 부하라 가정하였다. 즉 Fig. 3에 나타난 등가회로에서 $X_L = 0$ 이라 가정하였으며 위의 조건을 고려하여 본 논문에서는 발전기의 정격속도 특성 해석과 정격부하 특성 해석을 수행하였다. 정격속도 특성해석을 위해선 발전기의 속도를 일정한 속도로 고정하고 발전기 외부의 부하저항 값을 변화시켜 발전기 운전시 특성 곡선을 도출하는데 본 논문에서는 발전기 운전속도를 4000[rpm]으로 일정하게 운전되고 있으며 계자 전류 또한 일정하다고 가정하였다. 이 조건 하에서 부하 축을 일정하게 변화시켜 발전기의 출력 전압, 출력 전류와 출력을 유한요소 해석법을 이용하여 도출하였다. 정격속도 특성 해석에서 출력 전압과 전류를 유도하기 위해선 Fig. 3에서 다음과 같은 식을 유도할 수 있다.

$$E_a^2 = (V_\phi + X_s I_a \sin\theta)^2 + (X_s I_a \cos\theta)^2 \quad (11)$$

위의 식은 전기자 저항을 무시한 벡터 도에서 유도한 식이기 때문에 전기자 저항을 포함하여 다음과 같은 식으로 나타낸다.

$$E_a^2 = (V_\phi + R_a I_a)^2 + (X_s I_a)^2 \quad (12)$$

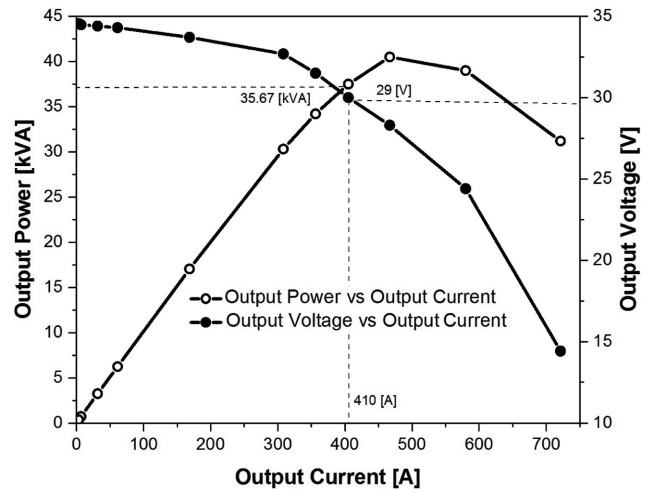


Fig. 9. Generator characteristic according to rated speed conditions output voltage, current and power.

위의 식에서 우변을 I_a 에 대해 정리하면 정격속도 특성해석시 출력 전압과 전류를 다음과 같이 유도할 수 있다.

$$V_\phi = I_a R_L, I_a = \frac{E_a}{\sqrt{(R_a + R_L)^2 + X_s^2}}, R_L = \frac{V_\phi}{I_a} \quad (13)$$

이때 I_a 를 x축으로 정리하면 출력 전류와 전압, 출력과의 관계는 Fig. 9와 같은 특성을 가지게 된다.

그리고 정격부하 특성해석을 위해 본 모델의 계자 전류가 일정하다고 가정하고 발전기 운전속도를 정격 속도까지 증가시켜 모델의 특성 곡선을 도출하였다. 정격부하 특성 곡선을 도출하기 위한 출력 전압과 전류의 식은 식(12)에서 유도할 수 있다. 먼저 식(12)는 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$E_a^2 = V_\phi^2 + 2I_a^2 R_a R_L + (R_a I_a)^2 + (X_s I_a)^2 \quad (14)$$

여기서 식(13)의 I_a 를 정리한 식을 대입하면 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_\phi^2 = E_a^2 - \frac{2E_a^2 R_a R_L}{(R_a + R_L)^2 + X_s^2} + \frac{E_a^2 R_a^2}{(R_a + R_L)^2 + X_s^2} + \frac{E_a^2 X_s^2}{(R_a + R_L)^2 + X_s^2} \quad (15)$$

위의 식을 정리하면 최종적으로 정격부하 상태에서 회전속도에 따른 출력 전압과 출력 전류 특성은 식(16)으로 도출된다.

$$V_\phi = E_a \sqrt{\frac{R_L^2}{(R_a + R_L)^2 + X_s^2}}, I_a = \frac{E_a}{\sqrt{(R_a + R_L)^2 + X_s^2}} \quad (16)$$

여기서 V_ϕ 와 X_s 는 다음과 같이 정의된다.

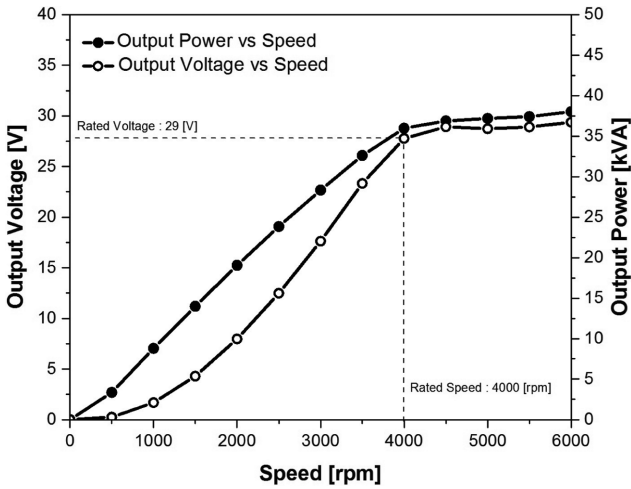


Fig. 10. Generator characteristic according to rated load conditions output voltage and power.

$$V_{\phi} = K_v \omega, X_s = K_x \omega \quad (17)$$

K_v 와 K_x 는 각각 유도기전력 상수와 리액턴스 상수이며 ω 는 기계적 속도를 나타낸다[6]. 이 식을 토대로 정격부하 상태에서 속도에 따른 특성 곡선은 Fig. 10에서 확인할 수 있다.

3. 손실 방정식

3.1. 철손

일반적으로 동기발전기는 기계적 에너지를 전기적 에너지로 변환하는데 이 과정에서 모든 에너지를 필요한 에너지로 변환하지 못하고 항상 손실을 수반한다. 이러한 손실은 기기의 효율 저하뿐만 아니라 설계 자유도 저해요소로 작용될 수 있기 때문에 저 손실 소재 및 손실 저감에 대한 연구가 요구되고 있다[8]. Fig. 11은 발전기에서 발생하는 손실종류를 나타내며 특히 동기발전기에서 회전자에서는 회전자의 와전류 손과 기계손이 발생하는데 회전속도가 일반 발전기의 속도아 비교하여 저속이기 때문에 실제 회전자의 손실은 철손과 동손에 비해 매우 낮게 된다. 그렇기에 동기발전기에서 발생하는 손실은 고정자에서 발생하는 철손과 동손이 대부분을 차지하게 된다[8]. 따라서 본 논문에서는 기계손, 즉 마찰 손과 풍손 그리고 포유부하 손을 제외하고 전기적인 손실인 철손과 동손에 대한 특성만을 다루기로 한다. 먼저 철손을 예측

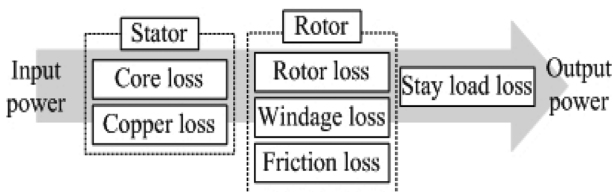


Fig. 11. Losses of synchronous generator.

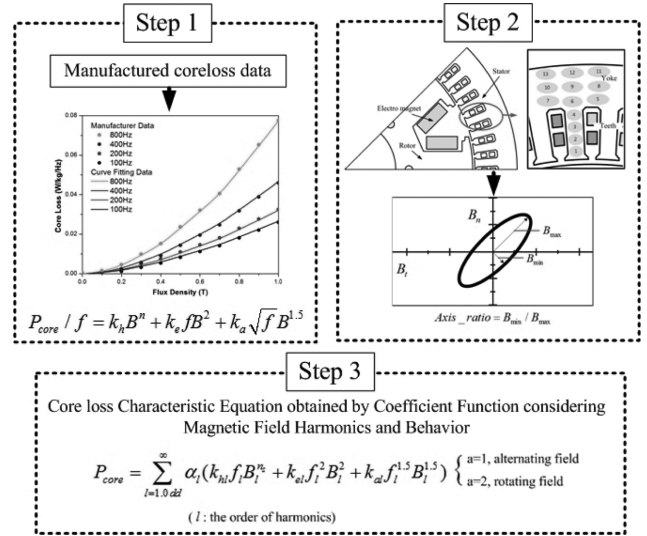


Fig. 12. Analysis procedure for magnetic field and core loss.

하기 위해 제조사에서 제공하는 철심 데이터를 Steinmetz 방정식을 이용하여 curve fitting하여 각각의 주파수 영역에서 철손 계수를 도출하였다. 그리고 유한요소 해석법을 이용하여 세분화 된 고정자 영역에서 원주 및 반경방향 자속밀도를 계산하였으며 FFT를 이용하여 고조파 차수별로 자속밀도를 계산하여 최종적으로 자계거동 및 고조파가 고려된 철손 특성식을 도출하였다. Fig. 12는 본 논문에서 수행하는 철손 특성을 해석하기 위한 과정을 나타내며 그 방법은 다음과 같다.

- 1) 제작사로부터 제공되는 철손 데이터를 재정렬하여 P_{core}/f 와 B 의 함수로 도시
- 2) P_{core}/f 와 B 의 함수를 Steinmetz 철손 특성 식으로 curve fitting하여 철손 계수 도출
- 3) 다시 주파수 함수로 curve fitting하여 철손 계수함수 도출
- 4) 고정자 영역에서의 고조파 분석 및 자계거동 분석
- 5) 철손 특성식 도출과 철손 특성도출

일반적으로 철손은 시변 하는 자계에 의해 철심 내 자구의 변화에 따른 에너지 손실에 기인하는 히스테리시스 손실 P_h 과 철심의 도전율에 의해 발생하는 와전류 손실 P_e 로 구분된다. 즉, 히스테리시스 손실은 자성 재료가 단위 시간당 히스테리시스 루프를 몇 회 주회하였는지 의해 결정되고, 이는 주파수 f 와 자속밀도 B 에 비례한다. 그리고 와전류 손실은 주파수 증가에 따른 매질의 도전성에 의해 발생하는 기전력 변화에 의해 발생되어, f^2 와 B^2 에 비례한다. 그러므로 이상적인 정현파 자계의 크기와 주파수의 변화에 따른 철손식인 Steinmetz 방정식을 식(18)과 같이 표현할 수 있다[8].

$$P_c = P_h + P_e = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 \quad (18)$$

그러나 앞서 언급된 히스테리시스 손실이나 와전류 손실 성

본 외에 재료 내부의 자구 폭이나 판에 미치는 장력에 의해 발생하는 이상 와전류 손실성분이 존재하는 것으로 알려졌다. 이를 고려하여 식(18)에 이상 와전류 손실분, P_a 를 더하여 식(19)를 도출할 수 있다. 여기서, k_a 는 이상 와전류 손실 계수이다.

$$P_c = P_h + P_e + P_a = k_h f B^n + k_e f^2 B^2 + k_a f^{1.5} B^{1.5} \quad (19)$$

여기서 k_h , k_e , k_a 와 같은 철손 계수는 재질과 주파수에 따라 비선형적으로 변하기 때문에 철손특성을 예측하기 위해서 정확한 계수값 도출이 필요하다. 따라서 정확한 철손 계수를 도출하기 위해 제조사에서 주어진 철손 데이터와 식(20)을 적용 후 curve fitting하여 각각의 주파수에 대한 철손 계수를 도출하였다.

$$P_{core}/f = k_h B^n + k_e f B^2 + k_a \sqrt{f} B^{1.5} \quad (20)$$

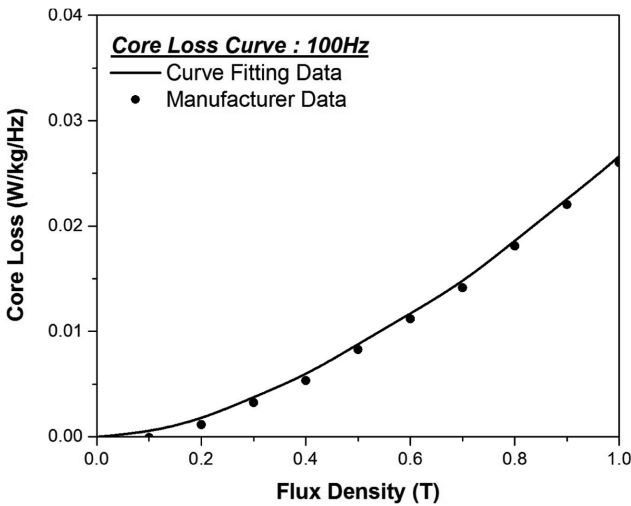


Fig. 13. Curve fitting plot of coreloss/f (100 Hz).

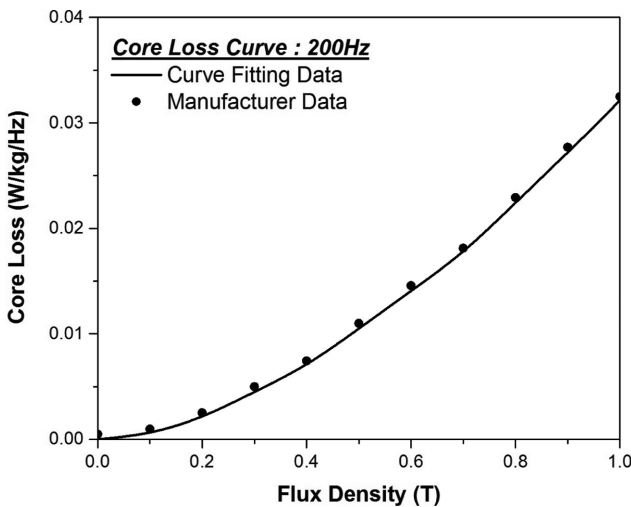


Fig. 14. Curve fitting plot of coreloss/f (200 Hz).

Fig. 13부터 16까지는 제조사에서 주어진 철손 데이터를 이용하여 주파수와 P_{core}/f 에 대한 함수 그래프를 나타내며 각각의 주파수 별로 철손 계수를 구한 값을 Table IV에 나타내었다. 여기서 주파수에 대한 각 계수를 Fig. 17, 18, 19와 같이 도시하고 다시 curve fitting하여 최종적으로 Table V와 같은 Steinmetz 식을 만족하는 철손 계수함수를 도출할 수 있다. 이와 같은 철손 계수들의 비선형 함수는 식(20)과 적용

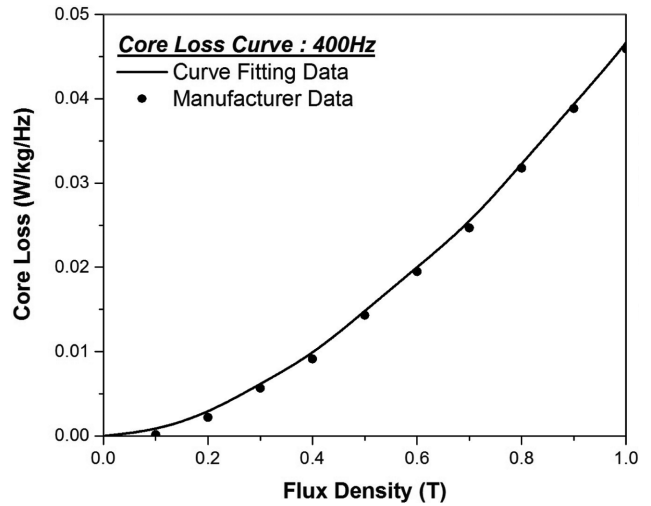


Fig. 15. Curve fitting plot of coreloss/f (400 Hz).

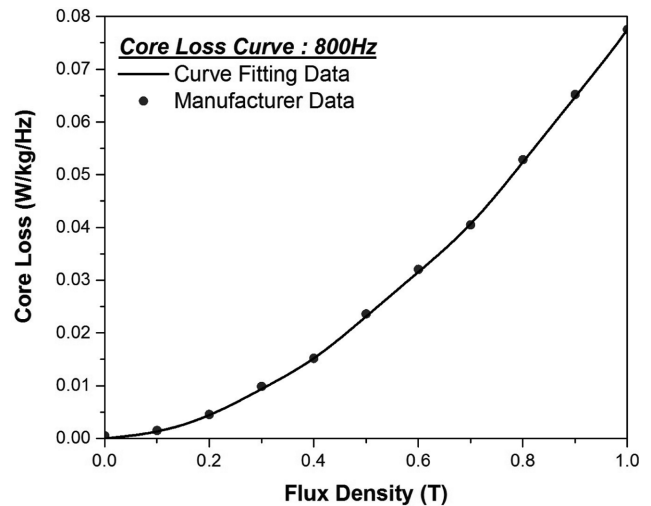


Fig. 16. Curve fitting plot of coreloss/f (800 Hz).

Table IV. Core loss coefficient according to frequency by curve fitting.

Frequency	k_h	k_e	k_a
100 [Hz]	0.03130916	0.00507576	0.00015993
200 [Hz]	0.03165261	0.00501604	0.00015930
400 [Hz]	0.03299984	0.00487681	0.00015786
800 [Hz]	0.03435087	0.00482807	0.00014833

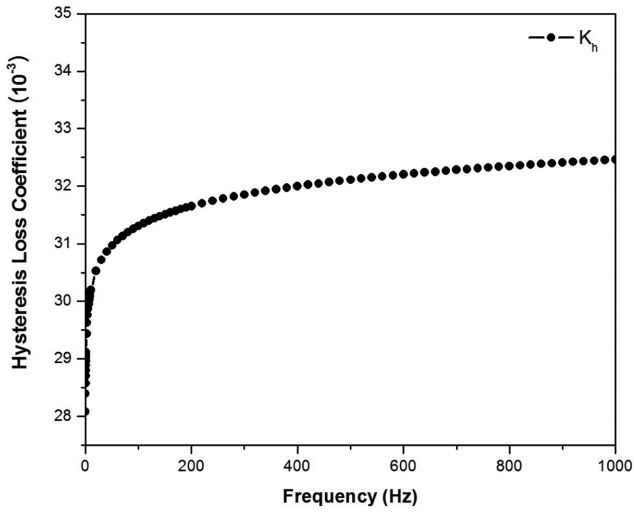


Fig. 17. Graph of hysteresis loss coefficient according to frequency.

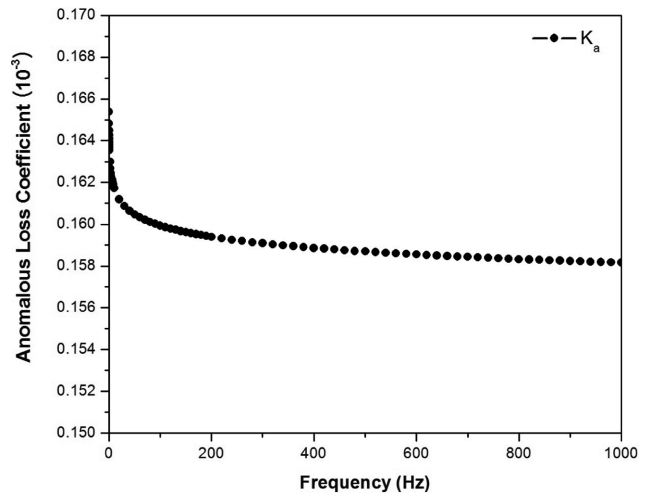


Fig. 19. Graph of anomalous loss coefficient according to frequency.

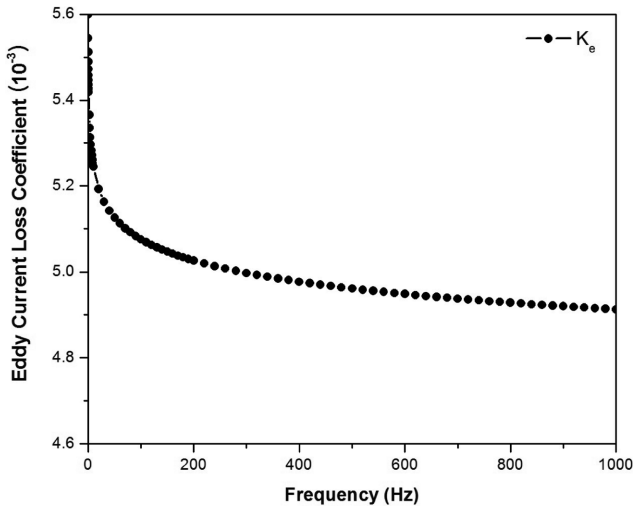


Fig. 18. Graph of eddy current loss coefficient according to frequency.

Table V. Core loss coefficient function according to frequency by curve fitting.

Function: $Y = \exp(A \times \ln(X) + B)$			
Y	A	B	X
k_h	0.02912	0.01574	Frequency
k_e	0.00541877	-0.0142	
k_a	0.00016354	-0.004845	

하여 동기발전기의 운전속도나 재질 등에 따른 손실의 계산을 빠르게 수행할 수 있도록 해준다. 즉 주파수-자속밀도 관

계에서 제조사에서 주어진 주파수 대역 외 주파수에서도 철손 데이터도 획득할 수 있게 되어 철손특성 결과를 도출할 수 있다. 그러나 본 철손 방정식은 대부분 교번자계만을 갖는 변압기 등과 같은 기기에서 정확성이 높으나 복잡한 자계 분포를 갖는 기기에서 도출된 철손 해석결과는 타당성이 떨어진다. 그 이유는 철심 영역의 자계 거동 특성에 따라 철손의 발생률이 달라지며 고조파 자계에서 발생하는 자속밀도 왜형이 철손을 증가시키기 때문이다[9]. 또한 하경호는 반경방향 자속밀도와 원주방향 자속밀도에 대한 축비를 정의하고 이 축비에 의해 교번자계와 화전자계를 정의하였으며 실제 실험

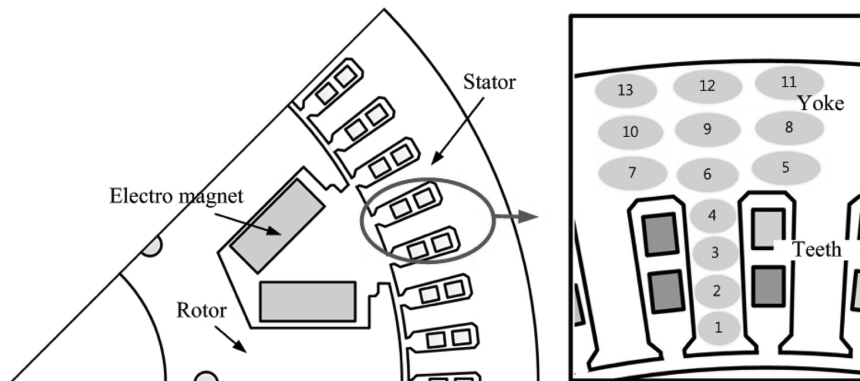


Fig. 20. Analysis positions of stator for magnetic and harmonic.

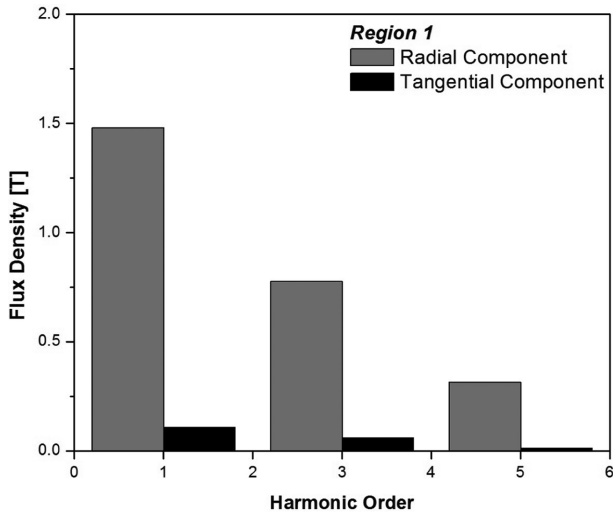


Fig. 21. Harmonic results in region 1 of stator.

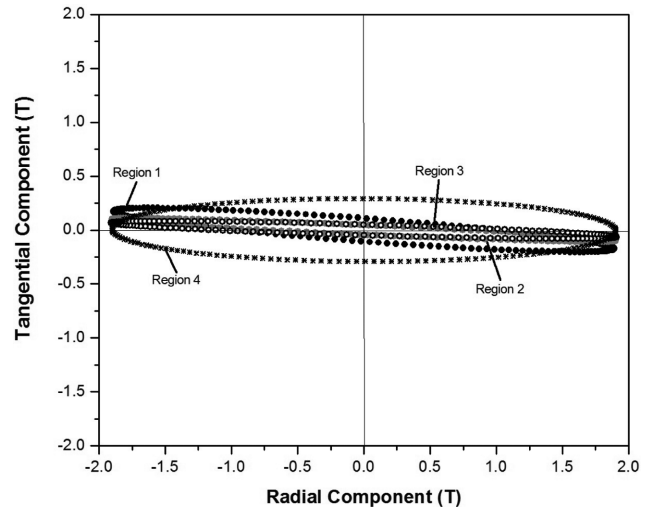


Fig. 24. Magnetic field behavior results in stator (region 1, 2, 3, 4).

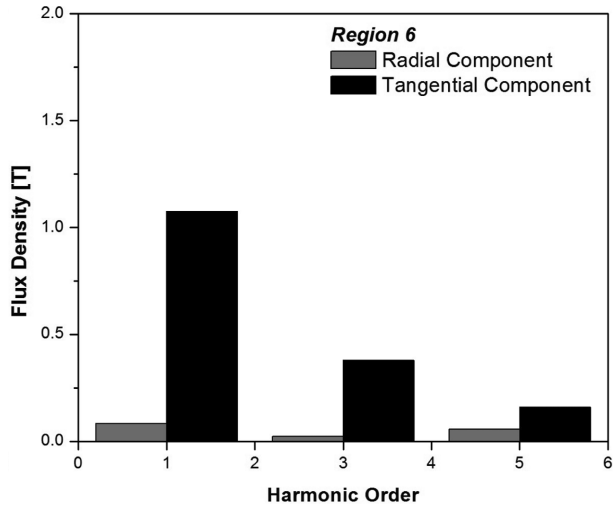


Fig. 22. Harmonic results in region 6 of stator.

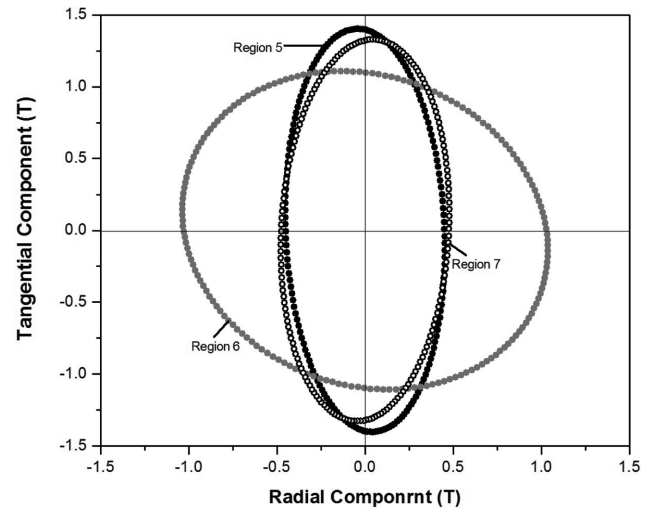


Fig. 25. Magnetic field behavior results in stator (region 5, 6, 7).

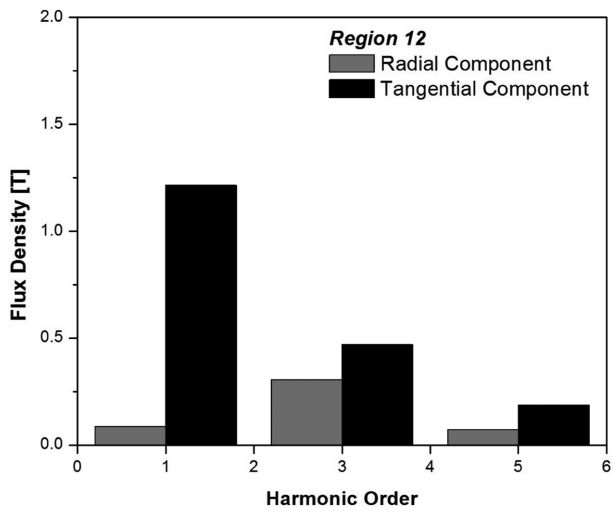


Fig. 23. Harmonic results in region 1 of stator.

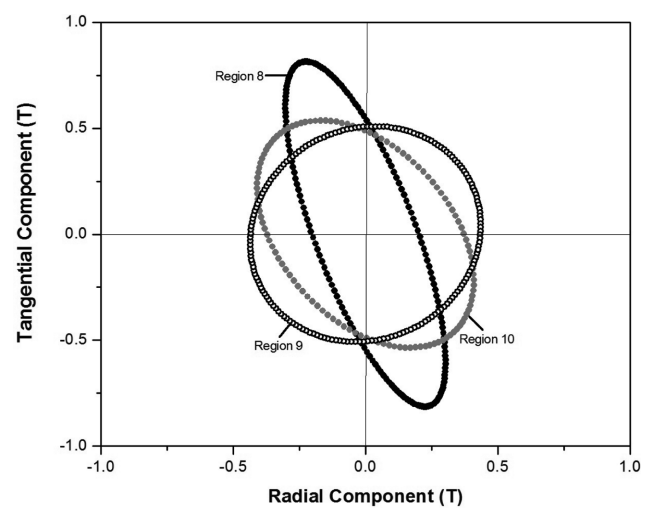


Fig. 26. Magnetic field behavior results in stator (region 8, 9, 10).

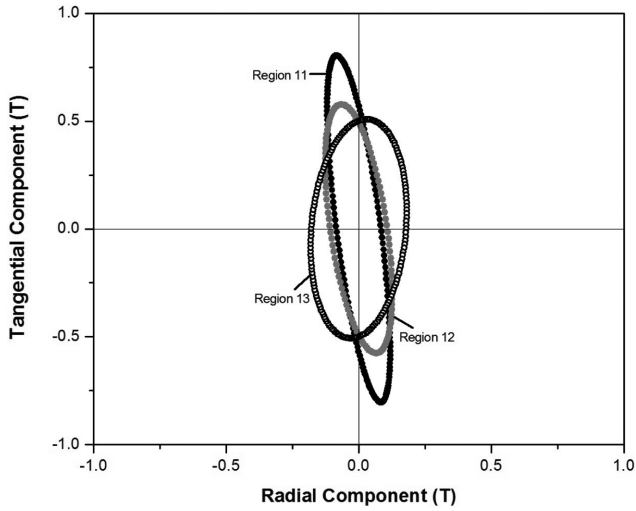


Fig. 27. Magnetic field behavior results in stator (region 11, 12, 13).

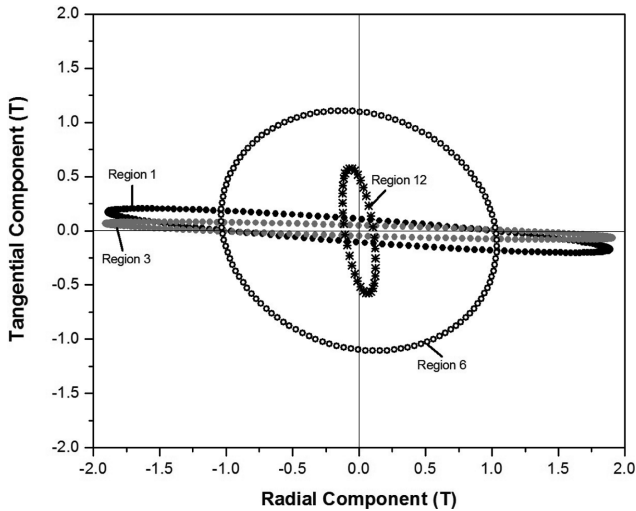


Fig. 28. Magnetic field behavior results in stator (region 1, 3, 6, 12).

을 통해 회전자계에서 발생하는 철손이 교번자계에서 발생하는 철손에 비해 매우 크다는 결과를 규명하였다[7]. 그렇기 때문에 본 연구에 앞서 신뢰성 있는 철손 예측을 위해 고조파와 차수와 회전기에서 발생하는 회전자계를 고려하여 정확한 철손 방정식을 도출하는 것이 요구된다. 따라서 Fig. 20과 같이 고정자를 13개의 영역으로 나누어 각각의 영역에 대해서 자계 분포 해석을 수행하였다. 각 영역에 대한 반경 방향과 원주 방향 성분의 지속밀도를 FFT 분석을 통해 나타낸 결과를 Fig. 21에서 23까지는 나타내며 Fig. 24에서 27까지는 자계 거동 분석을 통해 해석된 각 영역의 교번자계와 회전자계 영역을 보여준다. Fig. 28은 고정자의 치와 요크에 해당되는 영역의 자계거동 분포비교를 나타낸다. 영역 1과 3은 고정자의 치, 영역 6은 치와 요크의 중간지점, 그리고 영역 12는 요크 지점을 나타내는데 본 해석을 통해 고정자의 치

영역에서는 교번자계가 발생하고 치와 요크의 중간지점에서는 회전자계 분포가 발생함을 확인 할 수 있다. 최종적으로 앞서 수행한 고조파 차수별 분석과 자계거동 분석을 고려하여 식(21)과 같은 철손 식을 도출할 수 있다.

$$P_{core} = \sum_{l=1, odd}^{INF} a_l (k_{hl} f_l B_l^n + k_{el} f_l^2 B_l^2 + k_{al} f_l^{1.5} B_l^{1.5}); \begin{cases} a = 1, alt. field \\ a = 2, rot. field \end{cases} \quad (21)$$

(*l*: harmonics order)

여기서 *l*은 고조파 차수 상수를 나타내고 *a*는 교번자계일 때 1, 회전자계일 때 2를 나타내는 상수이다. 본 논문에서는 식(21)을 기반으로 철손 값을 도출하여 유한요소해석법을 이용해 도출된 철손 결과와 비교하였다.

3.2. 동손

동손은 권선의 저항에 의해 발생하는 열 손실로서 상권선 저항에 비례하며 상전류의 제곱에 비례한다. 상전류의 크기가 발전기의 부하에 따라 바뀌며 줄열로서 발생하기 때문에 발전기 내부온도를 증가시켜 전기 시스템에 악영향을 미칠 수 있다[10]. 일반적인 3상 동기발전기의 동손은 다음과 같이 나타낸다.

$$P_{copper} = 3I_a^2 R_a \quad (22)$$

여기서 *I_a*는 상전류 *R_a*는 상저항을 나타낸다. 상저항은 다음과 같은 식으로 나타낼 수 있다.

$$R = \rho \frac{l}{A} \quad (23)$$

ρ 는 권선의 저항률, *l*은 권선의 한 가닥 길이, *A*는 권선의

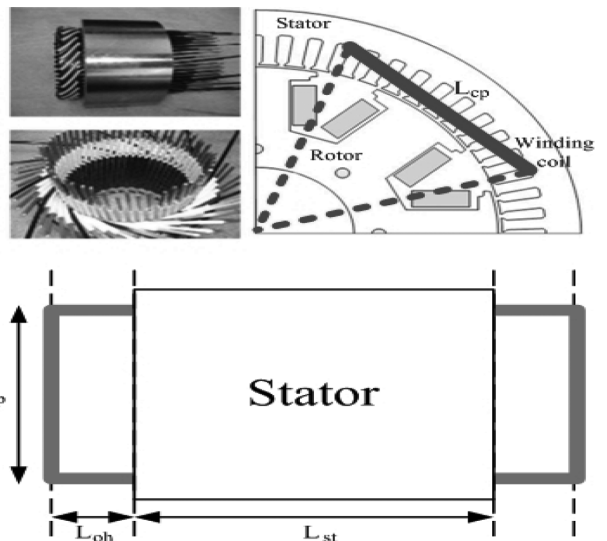


Fig. 29. Generator winding modeling for resistance calculation.

한 가닥 단면적을 나타내며 Fig. 29는 본 모델의 권선 길이를 구하기 위한 해석 모델이다. 여기서 권선의 한 가닥 길이는 다음과 같다.

$$l = 2(C_{cp} + C_{oh} + C_{st}) \quad (24)$$

여기서 C_{cp} , C_{oh} , C_{st} 는 각각 코일피치, 권선 종말의 오버행, 발전기의 축 방향 길이를 나타내며 여기서 도출한 길이에 코일 턴 수를 곱하여 본 모델 권선의 총 길이를 도출할 수 있다. 또한 본 모델의 권선 재질은 구리이므로 구리의 고유 저항률은 $\rho_0 = 1.724 \times 10^{-8} \Omega m$, 온도계수는 $a = 4.3 \times 10^{-3} \text{ }^\circ\text{C}^{-1}$ 로 정의된다. 저항률과 온도계수와의 관계는 다음 식에서 나타난다.

$$\rho = \rho_0[1 + a(t - t_0)] \quad (25)$$

ρ 는 온도 t 에서의 저항률, ρ_0 는 상온 t_0 에서의 저항률, a 는 저항의 온도계수를 나타내며 식(24)와 (25)를 통해 권선의 저항을 구하여 최종적으로 동손 값을 도출할 수 있다.

4. 손실특성 해석

Fig. 30은 유한요소해석법과 식(21)을 이용하여 도출된 철손 결과를 비교한 그림이다. 유한요소해석법과 철손 방정식으로 예측된 철손은 발전기의 회전속도가 증가함에 따라 점차 증가하는 패턴을 보이지만 일치하지 않고 약간의 오차가 발생한다. 이러한 오차는 철손 방정식을 적용하는 과정에서 회전자계의 영역을 고려할 때 고정자 전 영역에서의 자계 거동 해석이 이루어지지 않았기 때문이라 추정된다[10]. 그러나 유한요소 해석법과 철손 방정식에서 나온 철손 증가패턴이 비슷하며 정격속도로 갈수록 오차율이 줄어들기 때문에 본 논문의 철손 예측은 비교적 정확하게 해석되었다고 판단된다.

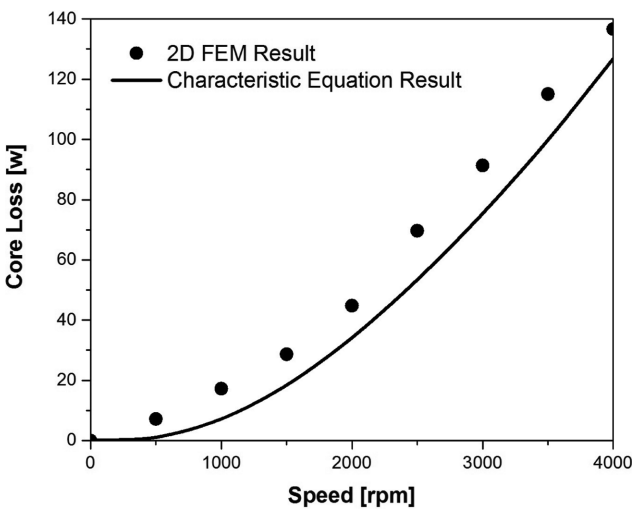


Fig. 30. Core loss characteristic graph according to generator speed.

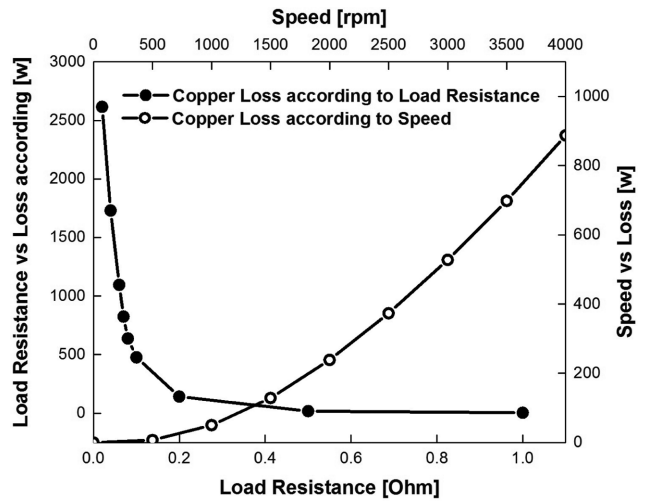


Fig. 31. Copper loss graph according to generator speed and load resistance.

일반적으로 발전기가 운전 시 내부 상저항에 의하여 열이 발생하여 발전기 내부온도를 증가시키게 된다. 그러나 식(22)에 의하여 동손과 상저항은 비례 관계이지만 상전류와는 제곱에 비례하기 때문에 실제 동손 값은 상전류에 의해 크게 영향을 미치게 된다. 따라서 본 논문에서는 부하저항과 발전기 운전 속도에 따른 동손의 변화량을 예측하였고 그 결과는 Fig. 31에 나타난다. 부하저항과 발전기 운전속도에 따른 상전류 값은 식(13)과 (16)에서 도출할 수 있으며 상전류는 부하저항에 반비례하고 속도에 비례하기 때문에 두 변수에 의한 동손 변화량은 Fig. 31과 같은 양상을 보인다. 그리고 도출된 철손과 동손 해석결과로 모델의 효율을 예측할 수 있다.

$$\eta = \frac{P_o}{P_i} \times 100, P_i = \frac{P_o}{P_o + P_{core} + P_{copper}} \quad (26)$$

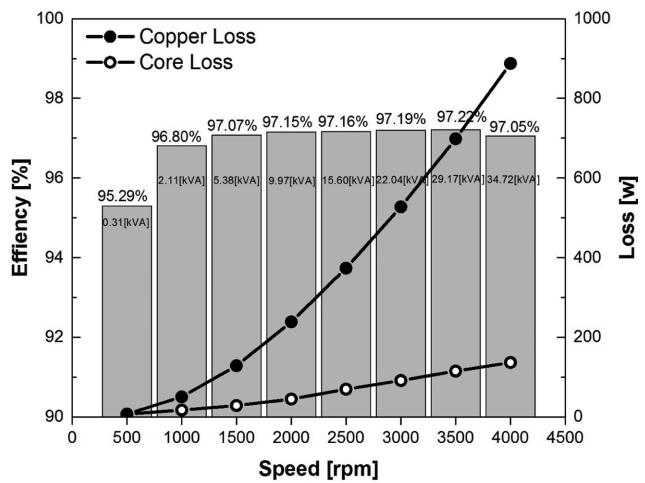


Fig. 32. Efficiency graph according to generator speed.

발전기 효율과 동손, 철손의 관계식은 식(26)에 나타나며 여기서 η 는 효율, P_o 와 P_i 는 각각 모델의 출력과 입력용량 그리고 P_{core} 와 P_{copper} 는 철손과 동손을 나타낸다. 본 논문에서는 발전특성에서 구한 출력 전압과 전류를 이용하여 모델의 출력을 구하였고 유한요소해석법을 이용하여 구한 철손과 동손을 이용하여 입력 값을 구해 모델의 효율을 도출하였다. Fig. 32는 발전기 운전속도에 따라 유한요소해석법을 이용하여 도출된 철손과 동손, 출력의 변화량, 그리고 모델의 효율 특성을 나타낸 그래프이다. 발전기 운전속도에 따른 출력 전압과 전류는 식(16)에서 도출되며 속도가 증가하면서 결과가 증가함에 따라 기기의 출력도 증가하게 된다. 그리고 Fig. 30과 31에 나타나 있듯이 운전속도에 비례하여 철손과 동손이 증가하게 되고 식(26)을 적용하여 최종적으로 속도에 따른 효율은 Fig. 32처럼 나타나게 된다.

III. 결 론

본 논문에서는 유도무기에 사용되는 권선형 동기발전기를 유한요소 해석법을 사용하여 특성해석을 수행하였다. 먼저 동기발전기의 등가회로와 벡터 도를 구성하여 모델의 출력을 유도하고 이 식을 기반으로 발전특성을 예측하여 정격속도, 정격부하 상태에서 모델의 발전특성을 해석하였다. 그리고 제조사에서 제공하는 철손 데이터를 기반으로 철손 계수함수를 도출하였다. 그리고 세분화 한 고정자 영역의 지속밀도를 FFT 분석을 통해 각 영역의 회전자계와 교번자계를 구분하여 최종적으로 철손 방정식을 도출하였으며 저항 값을 도출하여 본 모델의 동손을 예측하였다. 본 논문은 보안상의 이유로 유한요소해석법을 이용하여 예측한 결과를 첨부하였다. 그러나 실제 유도무기 체계 개발에서는 개발시험을 통해 결과 데이터를 분석하는 비중이 더 크다. 즉 이론상으로 예측된 결과 데이터와 실제 시험을 통해 획득한 결과 데이터가 같은 값을

나타낼 때 체계 개발이 진행되는데 그 이유는 앞서 말했듯이 유도무기 시험은 단발성인 특징을 가지고 있기 때문이다. 일반적으로 유도무기 시험은 날씨가 발사장과 통제소와의 통신, 시험 통제원 간의 통신 그리고 해수면 반사파와 같은 외부적인 요인도 시험 결과에 영향을 주지만 결정적으로 시험 성공에 가장 큰 영향을 미치는 것은 시스템 내부의 성능이기 때문에 각 부 체계가 담당하고 있는 시스템에 대한 높은 신뢰성 있는 데이터가 필요하다. 따라서 추후 본 논문에 서술한 결과의 타당성을 검증하기 위해 모델의 실제 성능시험 결과와 비교하여 신뢰성 있는 데이터를 확보함과 동시에 모델 효율증가를 위한 손실 감소에 관한 연구를 수행하여 유도무기 시험 평가 분야에 기반을 확보하는 것이 필요하다 사료된다.

References

- [1] S. M. Jang, K. J. Ko, H. W. Cho, Y. H. Jeong, and W. G. Oh, KIEE Fall Conference (2007).
- [2] S. Nonaka, K. Kesamaru, and K. Horita, IEEE Trans. Magn. **30**, 615 (1994).
- [3] I. J. Kim and J. Y. Choi, J. KIIEE **28**, 39 (2014).
- [4] S. J. Chapman, Electric Machinery Fundamental, McGraw-Hill (2004), p. 707.
- [5] D. H. Lee, H. Wang, T. H. Kim, and J. W. Ahn, J. KIIEE **21**, 82 (2007).
- [6] S. M. Jang, K. J. Ko, H. W. Cho, Y. H. Jeong, and W. G. Oh, EMECS of KIEE Fall Conference (2006).
- [7] K. H. Ha, S. Y. Cha, J. K. Kim, and J. P. Hong, KIEE Trans. **55**, 76 (2006).
- [8] S. M. Jang, K. J. Ko, and J. Y. Choi, KIEE **60**, 52 (2011).
- [9] M. Enokizono, T. Suzuki, J. Sievert, and J. Xu, IEEE Trans. **26**, 2563 (1990).
- [10] S. M. Jang, J. H. Choi, K. H. Kim, D. J. Yu, S. C. Han, and J. P. Lee, KIEE Conference (2010).