

계자 전류에 따른 40kVA급 고속 동기발전기의 특성 해석

장석명*, 고경진*, 조한욱*, 오원규**
 충남대학교*, 경주전장 주식회사**

Characteristic Analysis of the 40kVA High Speed Synchronous Generator considering the Field Current

Seok-Myeong Jang*, Kyoung-Jin Ko*, Han-Wook Cho*, Won-Gku Oh**
 Chungnam National University*, KAES Co. LTD**

Abstract - This paper presents the characteristic analysis of the 40-kVA high speed synchronous generator considering the field current. The generator consist of the rotor with the short-circuited field coils connected armature coils of exciter and the stator with three-phase winding. To analyze the characteristics of the generator, the direct finite element method is applied.

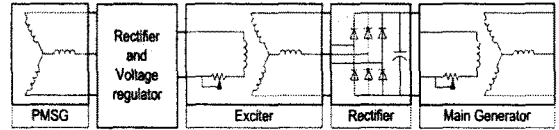
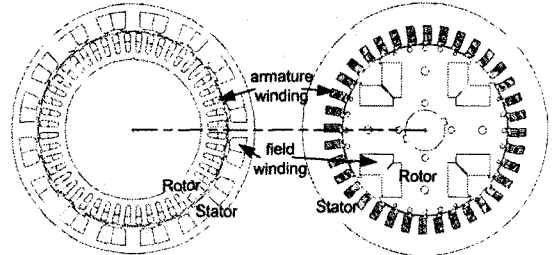


그림 1. 40kVA 동기 발전기의 시스템

1. 서 론

일반적으로 동기 발전기는 전기자 전압이 높고 전류 용량이 크며, 기계적인 용적이 커 대부분 큰 전력의 공급이 필요할 때 사용한다. 동기 발전기는 크게 회전 계자형과 회전 전기자형 두 타입으로 나뉘는데 회전 전기자형은 전기자 권선 및 슬립 링의 절연강도와 기계적 강도의 문제점을 갖기 때문에 현재는 대부분 회전 계자형을 사용한다. [1] 회전 계자형은 매우 소형인 것에는 영구자석을 사용하는 것도 있으나 대부분 계자에 브러시를 사용하여 계자전류를 공급하여 발전하는 방식으로 보통 직류 여자 방식이며, 그 때문에 직류 발전기를 갖는 것이 대부분이다. 본 논문에서 제시된 모델은 그림 1과 같이 영구자석형 동기발전기, 여자기와 주 동기발전기로 발전시스템을 구성하고 있으며 이는 회전축을 동축으로 하여 브러시를 사용하지 않으며 여자기에서의 계자전류의 제어가 가능하다. [2] 그림 2는 해석 모델로 본 논문에서는 그림 2(b)의 주 발전기를 유한요소해석에 의해 특성 해석 할 것이며 발전기의 정격사양과 기계적 사양을 표 1과 2에 나타내었다.



(a) 여자기 (b) 주발전기
 그림 2. 해석 모델

2. 등가회로

그림 3과 4는 지상역률을 갖는 동기 발전기의 등가회로와 벡터도를 도시한 것이다. 등가회로에서의 파라미터는 표 3에 나타내었다.

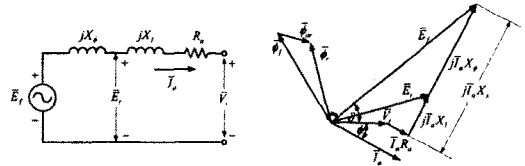


그림 3. 등가회로 그림 4. 벡터도

표 1. 발전기 사양

사양	값	사양	값
정격출력	40 (kVA)	정격전압	115 (V _{rms})
정격전류	116 (A _{rms})	정격속도	12,000 (rpm)
주파수	400 (Hz)	결선	Wye (Y)-Conn.

표 2. 기계적 사양

고정자		회전자	
설계 사양	값	설계 사양	값
슬롯수	36 slots	슬롯수	4 slots
고정자 외경	156 (mm)	회전자 외경	104.8 (mm)
고정자 내경	105.8 (mm)	공극	0.5 (mm)
축방향 길이	92 (mm)	극수	4 poles

표 3. 등가회로 파라미터

R_a	상당 저항	X_f	누설 리액턴스
X_d	유도 리액턴스	X_s	동기 리액턴스
$\bar{\phi}_a$	전기자에 의한 자속	$\bar{\phi}_f$	계자에 의한 자속
$\bar{\phi}$	계자와 전기자에 의한 자속		
\bar{E}_f	$\bar{\phi}_f$ 에 의한 유도 기전력		
\bar{E}_{ar}	$\bar{\phi}_a$ 에 의한 유도 기전력		
\bar{E}_r	$\bar{\phi}$ 에 의한 유도 기전력		

동기발전기에서의 전압관계식은 등가회로로부터 식 (1)과 같다.

$$\vec{E}_f + \vec{E}_r = \vec{E}_f - j\vec{I}_a X_\phi = \vec{E} \quad (1)$$

여기서 출력전압은 V_t 는 식 (2)로부터 도출된다.

$$V_t + I_a R_a + jI_a X_s = E_f \quad (2)$$

3. 특성해석

3.1 유도기전력

동기 발전기의 갭에 있어서 주자계의 자속 밀도 분포는 그림 5와 같이 자극의 중심축에 대하여 식 (3)으로 주어진다.

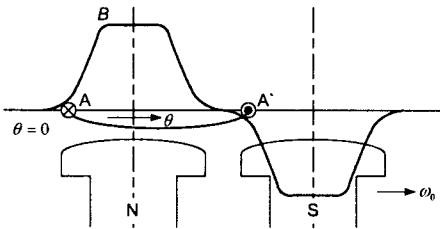


그림 5. 계자에 의한 자속밀도 분포

$$B = B_1 \sin \theta + B_3 \sin 3\theta + \dots + B_\nu \sin \nu\theta + \dots \quad [\text{Wb/m}^2] \quad (3)$$

여기서, θ 는 전기각, ν 는 홀수이다.

계자극이 전기자에 대하여 $\omega_0 = 2\pi f / p$ [rad/s]인 동기 속도로 회전할 때의 전기자 권선 AA'에 유도되는 기전력 e 는 식 (4)와 같다.

$$e = \sqrt{2}E_1 \sin \omega_0 t + \sqrt{2}E_3 \sin 3\omega_0 t + \dots + \sqrt{2}E_\nu \sin \nu\omega_0 t + \dots \quad [\text{V}] \quad (4)$$

여기서 E_ν 는 식 (5)와 같다.

$$E_\nu = \sqrt{2}\pi\nu f \omega \phi_\nu \quad [\text{V}] \quad \phi_\nu = B_\nu \tau_\nu l \quad [\text{Wb}] \quad (5)$$

여기서, ω 는 권수, ϕ_ν 는 제 ν 차 고조파의 매극 자속, l 은 코일변의 실효 길이이고 τ_ν 는 제 ν 차 고조파에 대한 극 피치이다. 그림 6과 7은 각각 계자에 의한 자속과 무부하 유도기전력의 유한요소 해석 결과이다.

3.2 전압 변동률

동기발전기의 정격부하시의 출력전압과 무부하시의 출력전압의 변동 비율을 전압 변동률(voltage regulation)이라 하는데 이는 식 (6)과 같고 유한요소해석법에 의한 해석을 통해 표 4와 같이 예측하였다.

$$\text{Voltage regulation} = \frac{E_f - V_t}{V_t} \times 100 \quad [\%] \quad (6)$$

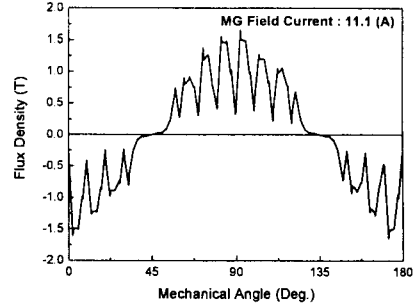


그림 6. 공극자속밀도(@계자전류:11.1(A))

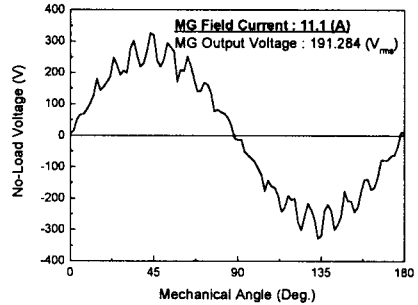


그림 7. 무부하 유도기전력(@계자전류:11.1(A), 회전속도:12,000(rpm))

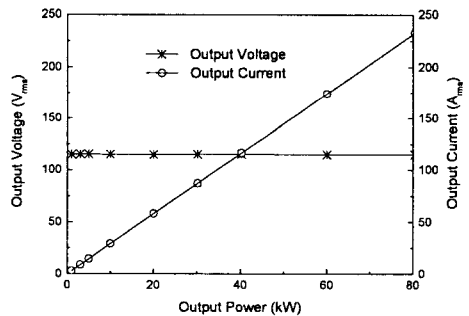


그림 8. 출력에 따른 출력전압 전류 특성곡선

표 4. 전압 변동률(constant field current)

무부하 출력전압 (V_{rms})	정격부하시 출력전압 (V_{rms})	전압 변동률 (%)
191.28	115.33	39.71

그러나 본 논문에서 제시된 발전기는 부하에 따라 전압 조정기로 계자전류를 제어함으로써 그림 8과 같이 출력 전압의 제어가 가능하다. 계자 전류 제어시의 전압 변동률의 해석결과는 표 5와 같다.[3]

표 5. 전압 변동률(variable field current)

무부하 출력전압 (V_{rms})	정격부하시 출력전압 (V_{rms})	전압 변동률 (%)
115.4	115.33	0.1

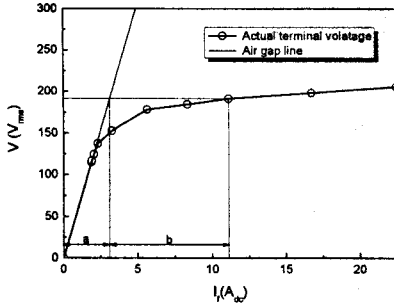


그림 9. 무부하 포화 곡선

3.3 무부하 특성

그림 9는 정격속도 회전시 계자 전류에 따른 단자 전압 즉 무부하 유도기전력을 해석한 것이다. 공기선은 실제 포화를 고려하지 않은 겹에 요하는 기자력과 유도기전력과의 관계를 보이는데 이로부터 실제 정격 계자전류에서의 포화계수(saturation factor)를 식 (7)로부터 구할 수 있다. 표 6은 해석 모델의 정격출력 계자전류에서의 포화 계수의 해석 결과이다.

$$\text{Saturation factor} = \frac{b}{a} \quad (7)$$

표 6. 포화 계수

포화 계수	a (A _{dc})	a+b (A _{dc})
2.58	3.1	11.1

3.4 부하 특성 해석

부하 특성은 정격 계자전류에서의 정부하 특성 및 정속도 특성을 도출 하였다. 또한 실제 가변부하에 따른 계자전류를 유한요소해석에 의해 예측하였다.

그림 10과 11은 정격 계자전류 11.1(A), 정격속도 12,000 (rpm)에서의 부하에 따른 특성과 정격부하 40 (kVA)에서의 속도에 따른 특성의 해석 결과이다. 또한 그림 12는 실제 발전시 부하의 변동에 따라 전압 조정기로부터 여자기 계자전류의 조정으로 해석 모델인 주발전기로 인가되는 계자전류를 해석한 결과이다. 이는 그림 8에서 보여지는 바와 같이 부하의 변동에도 항상 출력전압을 115 (V)로 일정하게 유지시키기 위함이다.

4. 결 론

본 논문에서는 외전형 영구자석형 동기 발전기, 여자기와 동기발전기로 구성된 브러시리스 동기 발전시스템을 제시하였고 유한요소해석법을 통하여 무부하 및 부하 특성 결과를 제시하였다. 특히 본 논문에서 제시된 동기발전기는 부하의 변화에도 일정한 출력전압을 위한 계자전류를 예측 해석하였으며 정격 계자전류에서의 정속도 특성 및 정부하 특성을 해석하였다. 이 해석은 동기발전기 설계의 타당성 및 적용분야에의 적합여부를 결정하는데 매우 중요하다. 본 논문에서는 제시된 발전시스템에서의 주 동기 발전기만 해석하였다. 차후 해석의 범위

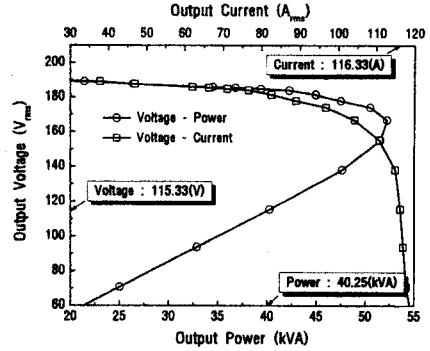


그림 10. 정속도 특성

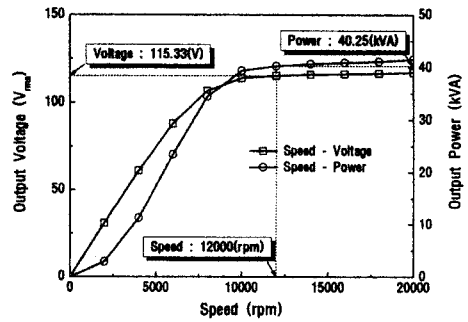


그림 11. 정부하 특성

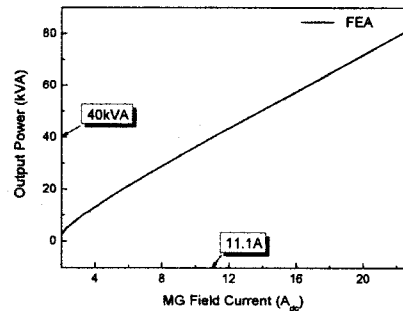


그림 12. 계자전류에 따른 출력특성 (constant output voltage)

를 전 시스템으로 확장시켜 정확한 발전특성의 예측 및 부하의 역할에 따른 발전특성의 해석이 필요할 것이다.

[참고 문헌]

- [1] Mulukatla S. Sarma, "Electric Machines", 1994
- [2] Sakutaro Nonaka, Katsumi Kesamaru, and Kazuo Horita "Analysis of Brushless Four-Pole Three-Phase Synchronous Generator without Exciter by the Finite Element Method", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 30, No. 3, pp.615-620, 1994
- [3] Sakutaro Nonaka, Katsumi Kesamaru, "Analysis of Voltage-Adjustable Brushless Synchronous Generator Without Exciter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 1, pp.126-132, 1989