역률에 따른 40kVA급 고속 동기발전기의 특성해석

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

Characteristic Analysis of the 40KVA High Speed Synchronous Generator considering the Power Factor

Seok-Myeong Jang*, Kyoung-Jin Ko*, Han-Wook Cho*, Won-Gyu Oh** and Young-Tae Park***
Chungnam National University*, KAES Co. LTD**, Korea Research Institute of Standard and Science***

Abstract - This paper presents the characteristic analysis of the 40 kVA high speed synchronous generator considering the power factor. 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.

1. 서 론

일반적으로 동기 발전기는 전기자 전압이 높고 전류 용량이 크며, 기계적인 융적이 커 대부분 큰 전력의 공급이 필요할 때 사용한다. 동기발전기는 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 브러쉬를 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 계자형 동기발전기로 발전시스템을 구성하고 있으며 이는 회전축을 동축으로 하여 브러쉬를 사용하지 않지만 여자기에서의 계자전류의 제어가 가능하여 가변부하 조건에서도 일정한 전압을 출력하는 것이 가능하다.[2][3] 본 논문에서는 그림 2(b)의 해석모델을 실제 발전기의 운전영역에서 역률에 따라 일정 출력전압을 위한 계자전류를 예측하고 정부하 특성 및 정속도 특성을 해석하였으며 과부하시 계자전류 및 출력 특성을 해석하였다. 해석 대상인 발전기의 정격사양 및 기계적 사양은 표1과 2에 나타내었다.

〈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

설계 사양	값	설계 사양	값
고정자 슬롯수	36 slots	회전자 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

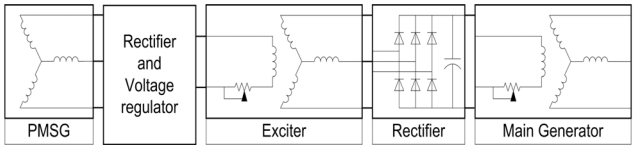
2. 출력 특성 해석

2.1 등가회로 및 벡터도

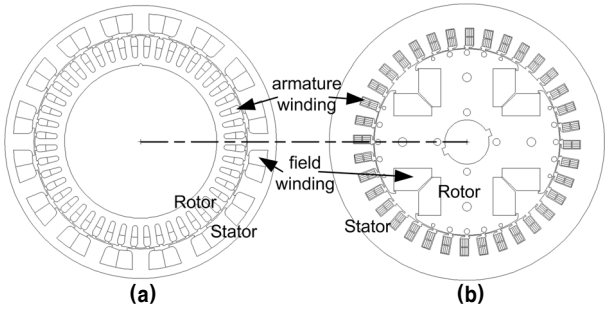
그림 3 (a)는 동기발전기 1상의 전기자 권선에 대해 기전력 E_0, 전류 I, 기자력 F의 벡터도를 도시한 것이다. 전기자 권선의 누설 자속에 의한 누설 리액턴스 x_l, 전기자 권선 저항을 r_a이라 한다. 단자 전압을 V, 역률을 $\cos\phi$라 하면 이것에 저항 강하 Ir_a, 누설 리액턴스 강하 Ix_l를 더한 E가 유도 기전력이 된다. E에 전기자 반작용에 의한 전압 강하 Ix_a를 더한 E_0가 무부하 유도 기전력이다. 여기서 E를 내부 기전력, E_0를 공칭 유도 기전력이라 한다.

E_0와 V와의 위상차 δ를 내부 상차각 또는 부하각이라고 하며 전압 관계식은 식 (1)과 같다.

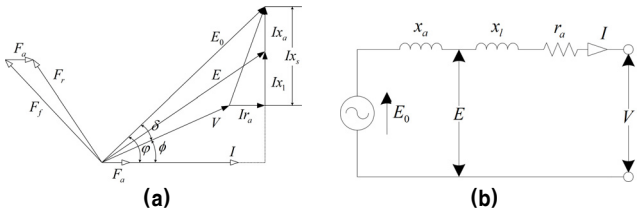
$$V = E_0 - I(r_a + j(x_l + x_a)) \tag{1}$$



〈그림 1〉 해석 모델의 발전시스템



〈그림 2〉 해석모델 (a)여자기, (b)동기발전기



〈그림 3〉 동기발전기의 (a)벡터도, (b)등가회로

x_a를 전기자 반작용 리액턴스, x_s를 동기 리액턴스, Z_s를 동기 임피던스라고 하며 전기자 반작용에 의한 동기 발전기의 등가회로는 그림 3(b)과 같다. 여기서 E_0와 V의 차이를 야기시키는 요인은 그림 3의 벡터도에서 보여지는 바와같이 전기자 반작용, 전기자 코일의 자기 인덕턴스, 전기자 코일의 저항 그리고 돌극형 회전자 구조에 의한 영향이다.

2.2 출력방정식

일반적으로 돌극형 동기발전기의 출력은 직축 전류와 횡축 전류에 의한 출력의 합이다. 이는 식 (2)와 같이 나타낼 수 있다.

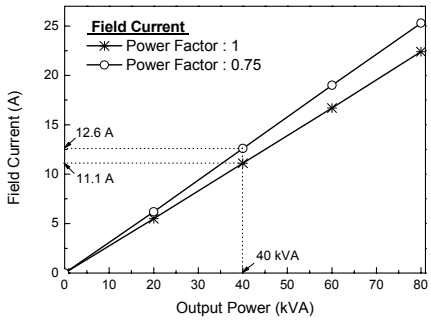
$$\begin{aligned} P &= P_d + P_q \\ &= 3VI_d\cos(90-\phi) + 3VI_q\cos\phi \\ &= 3VI_d\sin\phi + 3VI_q\cos\phi \end{aligned} \tag{2}$$

식 (2)에서의 직축전류와 횡축전류는 식 (3)와 같다.

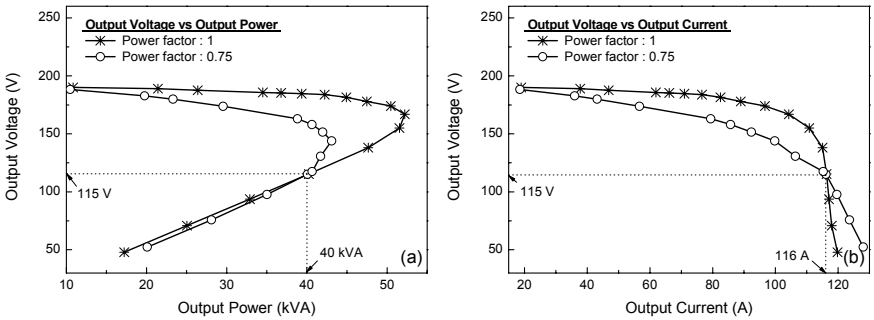
$$I_d = \frac{E_0 - V\cos\phi}{X_d},\quad I_q = \frac{V\sin\phi}{X_q} \tag{3}$$

여기서 X_d와 X_q는 각각 직축, 횡축 동기리액턴스이다.
이 식으로부터 출력 특성식 식 (4)가 도출된다.

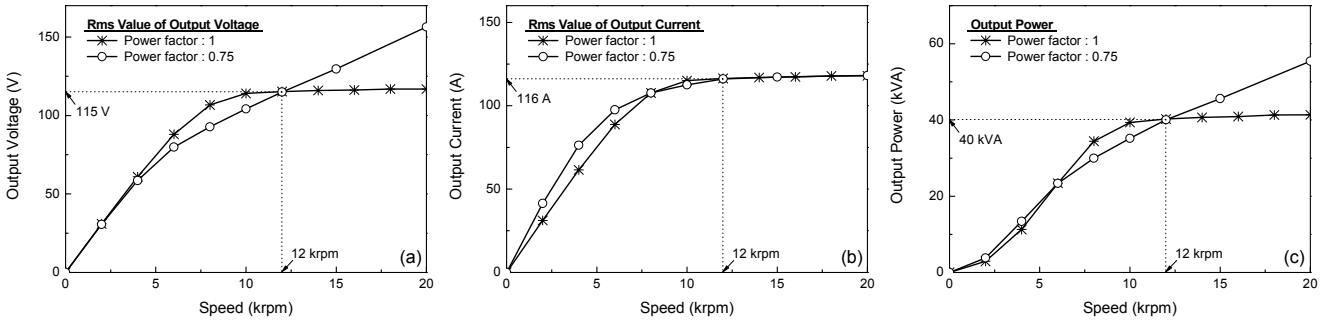
$$P = \frac{3VE_0}{X_d}\sin\phi + \frac{3V^2}{2}\left(\frac{X_d - X_q}{X_dX_q}\right)\sin 2\phi \tag{4}$$



〈그림 4〉 역률에 따른 계자전류



〈그림 5〉 역률에 따른 정속도 특성 (a)출력에 따른 전압, (b)출력전류에 따른 전압.



〈그림 6〉 역률에 따른 정부하 특성 (a)출력전압, (b)출력전류, (c)출력

2.3 정부하 특성

정부하 특성은 단위 역률의 부하와 지상 역률(0.75)의 부하 두 조건에서 여자 전류 I_f를 정격 계자전류의 일정한 값으로 유지하고, 부하 전류 즉 부하를 변화시킨 경우에 그림 4(a)와 같은 출력과 전압의 관계 및 출력전압과 전류의 관계를 나타내는 그림 4(b)의 외부 특성 곡선(external characteristic curve)을 도출함으로써 해석하였다. 그림 4(a)에 보여지는 바와 같이 지상 역률의 부하에서 최대출력이 감소함을 볼 수 있는데 이는 역률과 전압과의 관계로 다음과 같이 설명된다. 그림 3(a)의 지상역률의 경우는 $V < E < E_0$, ϕ를 역률각으로 전기자 반작용은 출력전압을 저하시키고 진상역률의 경우는 $V > E > E_0$ 전기자 반작용은 출력전압을 상승시키는 작용을 한다.

그림 3의 벡터도와 등가회로로부터 식 (5)가 도출된다.

$$E_0^2 = (V\cos\varphi + Ir_a)^2 + (V\sin\varphi + Ix_s)^2 = V^2 + I^2Z_s^2 + 2VIZ_s\cos(\varphi-\alpha), \quad \alpha = \tan^{-1}(\frac{x_s}{R_s}) \qquad (5)$$

식 (3)는 V, I에 관한 2차 방정식으로 이것을 I를 x축으로 도시하면 단위 역률과 지상 역률 0.75에서 그림 4(b)와 같은 특성을 보인다.

2.4 정속도 특성

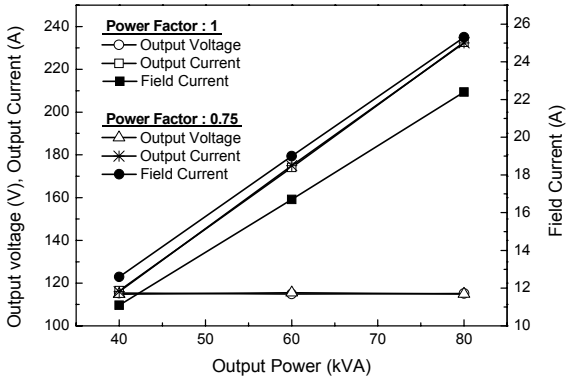
정속도 특성은 단위 역률과 정격시 지상 역률(0.75)의 일정 부하 두 조건에서 여자 전류 I_f를 정격 계자전류의 일정한 값으로 유지하고, 발전기의 속도를 변화시키면 그림 5의 속도에 따른 전압(a), 전류(b), 출력(c)의 특성 커브가 도출된다. 그림 3의 벡터도와 식 (2)의 관계식에서 지상 역률에 의해 전기자 반작용에 의한 자계는 출력 전압을 감소시키나 정격속도 이상에서는 속도의 증가에 따라 동기 리액턴스의 증가로 실제 정격 속도 외의 운전영역에서는 그 역률이 변하게 되어 그림 5와 같은 특성을 보인다.

2.5 과부하 특성

운전영역을 고려한 발전기의 해석에서 정격이상의 과부하에서의 출력 특성과 계자 전류의 예측은 매우 중요하다. 이는 과부하시에 발전기가 수 초이상 안정적으로 구동될 수 있는가에 대한 중요한 지표이며 또한 과부하 출력에 대한 부하 시스템에 대한 일시적 중지가 발생하지 않도록 하기 위한 필요 계자 전류의 예측시 그 중요성이 매우 크다. 그림 7은 정격부하 이상 출력에서의 계자 전류를 예측하고 그 때의 출력전압 및 전류 등을 해석하여 도시한 것이다.

3. 결 론

본 논문에서는 40 kVA 동기발전기의 운전영역에서의 역률에 따른 계자전류를 예측하였고 정격계자전류에서 정속도 및 정부하 특성뿐만아니라 과부하시의 계자전류 및 출력특성을 유한요소해석법에 의해 해석하였다. 본 논문에서 제시된 발전기는 정격출력 40 kVA에서 실제 과부하시 80 kVA까지 그 부하가 증가되고 역률 또한 지상 0.75까지 그 운전



〈그림 7〉 동기발전기의 과부하 특성 곡선

〈표 3〉 과부하 특성 데이터

역률	계자전류(A)	출력(kVA)	전압(V)	전류(A)
1	11.1	40	115.33	116.49
	16.7	60	114.93	174.14
	22.4	80	115.17	232.64
0.75	12.6	40	114.86	115.99
	19	60	115.5	174.94
	25.3	80	114.9	232.42

영역에서 안전성이 보장되어야 한다. 그리하여 본 논문의 해석은 동기발전기의 운전영역에서의 역률에 따른 안전성 문제와 결부되어 매우 중요한 의미를 갖는다. 차후 돌극 회전자 구조 및 제동권선에 의한 역률에 따른 출력 특성 해석이 필요할 것으로 사료된다.

[참 고 문 헌]

[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, "Analysis of Voltage-Adjustable Brushless Synchronous Generator Without Exciter", IEEE Transactions on Industry Applications, Vol. 25, No. 1, pp.126-132, 1989