

구동 속도를 고려한 고속 영구자석형 동기발전기의 특성 해석

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

Characteristic Analysis of a High Speed Permanent Magnet Synchronous Generator considering the Operating Speed

Seok-Myeong Jang*, Kyoung-Jin Ko*, Han-Wook Cho*, Yeon-Ho Jeong**, Won-Gku Oh***
 Chungnam National University*, Korea Electrotechnology Research Institute**, KAES Co., LTD***

Abstract - Recently more attention is paid to the development of high-speed permanent magnet (PM) synchronous generators driven by gas-turbine, since they are conductive to high efficiency, high power density, small size, low weight, simple mechanical construction, easy maintenance and good reliability. In this paper, the performance analysis of a high-speed permanent magnet synchronous generator for military power application considering the min-max operating speed is presented. The output current and power versus DC-link voltage loci can be obtained by solving the PM machine's steady-state equations for variable resistive load.

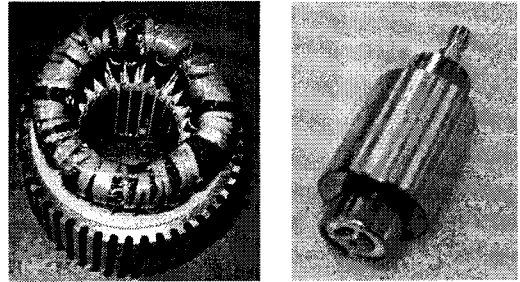


그림 1. 영구자석형 동기발전기의 제작사진

1. 서 론

최근 가스터빈에 의해 구동되는 영구자석형 고속 동기발전기는 고효율, 고휘력, 소형 그리고 간단한 기계구조를 가지며, 보수가 용이하고 탁월한 신뢰성에 의해 그 연구가 활발히 진행되고 있다. 이 영구자석형 동기발전기는 주로 비상 전력 공급장치와 신재생에너지를 사용하는 발전기, 그리고 최근 연구가 활발히 진행되고 있는 전기자동차 등 그 응용분야가 매우 넓다.[1],[2] 본 논문에서는 등가회로법을 이용하여 2-kW급 영구자석형 동기발전기의 구동속도에 따른 발전 특성의 해석기법을 제시하고 있다. 발전기의 단상 등가회로를 모델링하여 이의 수학적 해로부터 발전기의 정속도 특성 즉 가변부하에 따른 부하특성을 도출함과 동시에 발전기의 출력 요구조건에 부합되는 정격부하에서의 정부하특성을 도출하였다. 이 수학적 해로부터 도출된 발전특성은 유한요소 해석에 의한 해와 실험에 의한 결과와 비교되어 그 해의 타당성을 입증하였다. 그림 1은 해석 대상인 영구자석형 동기발전기의 고정자와 회전자의 제작 사진이다. 표 1은 해석모델의 설계 파라미터를 나타낸다.

<표 1> 해석모델의 설계 파라미터

파라미터 (기호)	값
영구자석 외반경	16.19 [mm]
축 반경	11 [mm]
고정자 내반경	17.65 [mm]
극수	4
슬롯수	24
영구자석 재질 (잔류자속밀도)	Sm ₂ Co ₁₇ (1.06[T])
영구자석 자화패턴	평행
상당 권선수	52 [turns]
축방향 길이	35 [mm]

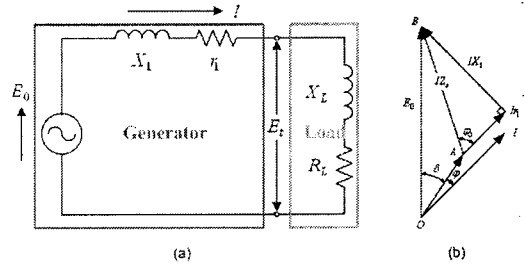


그림 2. (a)단상 등가회로와 (b)벡터도

2. 등가회로법에 의한 발전특성도출

2.1 등가회로 모델링

평형 다상기기의 1상에 대한 등가회로는 그림 2(a)와 같다. 정현파 기전력원과 동기 임피던스로 구성되는 직렬회로가 발전기이며, 그 상단자에 평행부하가 접속된 회로로 모델링하였다. 유도기전력원이 정현파라 가정하면, 이 등가회로의 벡터도는 그림 2(b)와 같다. 벡터도에 나타난 기호의 의미는 표 2와 같으며 표에 나타난 파라미터들은 단상분의 값을 나타내며, 전압과 전류는 실효값이다.[3]

<표 2> 벡터도의 파라미터

E_0	무부하 유도기전력	ϕ_0	내부 상차각
E_f	단자전압	δ	부하각
I	전기자전류	ϕ	역률각
r_1	전기자 저항	R_L	부하저항
X_1	동기 리액턴스	X_L	부하 리액턴스
Z_s	동기 임피던스	-	

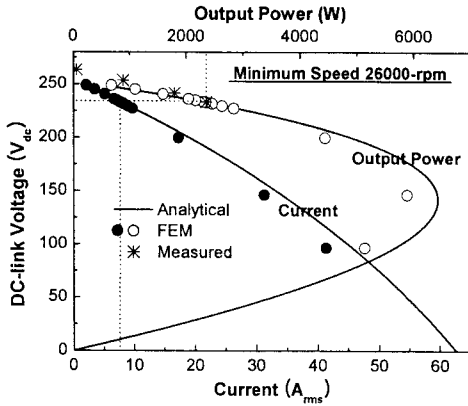


그림 3. Vdc-전류 및 Vdc-출력 특성곡선(@26000rpm)

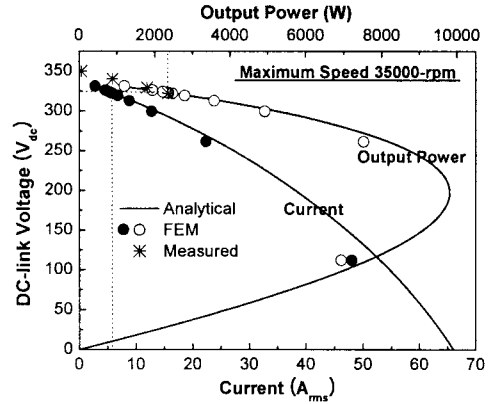


그림 4. Vdc-전류 및 Vdc-출력 특성곡선(@35000rpm)

그림 2(b)의 벡터도에서 삼각형 OAB에 정현법칙을 적용하면 식 (1)이 성립한다.

$$\frac{IZ_s}{\sin \delta} = \frac{E_0}{\sin(\varphi_0 - \varphi)} = \frac{E_t}{\sin(\varphi_0 - \varphi - \delta)} \quad (1)$$

식 (1)은 발전기 특성해석에 가장 기본적인 식이며, 출력전압과 출력전류의 특성계산식이 이 식으로부터 도출된다.

2.2 발전기 출력특성식의 파라미터 도출

전기자 전류와 단자전압과의 관계는 부하각을 파라미터로 하여 식 (2)와 같은 부하특성방정식이 도출된다.

$$I = I_s \frac{\sin \delta}{\sin(\varphi_0 - \varphi)}, E_t = E_0 \frac{\sin(\varphi_0 - \varphi - \delta)}{\sin(\varphi_0 - \varphi)} \quad (2)$$

여기서,

$$I_s = \frac{E_0}{Z_s} = \frac{E_0}{\sqrt{r_1^2 + X_1^2}} \quad (3)$$

이며, 부하회로를 단락했을 때의 단락전류이다.

식 (3)으로부터 구해진 단락전류와 유한요소해석결과에 의한 단락전류는 표 3과 같이 나타난다.

<표 3> 단락전류(I_s)

유한요소법	등가회로법
56.427(Arms)	53.484 (Arms)

그리고, 전기자저항을 무시하였을 때의 단락전류를 완전 단락전류라 하며, 이는

$$I_0 = \frac{E_0}{X_1} \quad (4)$$

이다. 유도기전력과 동기 리액턴스는 둘 다 주파수에 비례하므로, 완전단락전류는 주파수, 즉 발전기의 회전속도와는 관계가 없는 일정한 값을 갖는다. [3]

내부 상차각은

$$\tan \varphi_0 = \frac{X_1}{r_1} \quad \text{또는} \quad \varphi_0 = \tan^{-1}(X_1/r_1) \quad (5)$$

으로 주어지므로

$$\sin \varphi_0 = \frac{X_1}{Z_s}, \quad \cos \varphi_0 = \frac{r_1}{Z_s} \quad (6)$$

이 되며, 완전단락전류와 단락전류와는 식 (7)과 같은 관계식을 갖는다.

$$I_s = I_0 \sin \varphi_0 \quad (7)$$

2.3 부하에 따른 출력 특성식 도출

발전기의 회전속도는 일정, 부하는 역률 일정조건으로 가정하면 식 (2)에서 부하각을 소거하기 위해 식 (8)과 식 (9)로 다시 쓸 수 있다.

$$\sin \delta = \frac{I \cdot \sin(\varphi_0 - \varphi)}{I_s} \quad (8)$$

$$\frac{E_t}{E_0} \sin(\varphi_0 - \varphi) = \sin(\varphi_0 - \varphi - \delta) \quad (9)$$

식 (8)과 식 (9)를 정리하면 식 (10)의 무부하 특성곡선의 방정식 도출되며, 일반적으로 영구자석형 발전기에서는 부하가 대부분 순저항 부하이므로 $X_L=0$ 에서 식 (11)의 타원방정식이 도출된다.

$$\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 + \left(\frac{E_t}{E_0}\right)^2 + 2\left(\frac{I}{I_s}\right)\left(\frac{E_t}{E_0}\right)\cos(\varphi_0 - \varphi) = 1 \quad (10)$$

$$\left(\frac{I}{I_s}\right)^2 + \left(\frac{E_t}{E_0}\right)^2 + 2\left(\frac{I}{I_s}\right)\left(\frac{E_t}{E_0}\right)\cos \varphi_0 = 1 \quad (11)$$

앞의 관계식을 고려하면 발전기의 출력 및 입력 방정식은 각각 식 (12)와 식 (13)으로 표현할 수 있다.

$$\begin{aligned} P_0 &= mE_t I \cos \varphi \\ &= mE_0 I_s \frac{\sin(\varphi_0 - \varphi - \delta)}{\sin^2(\varphi_0 - \varphi)} \sin \delta \cos \varphi \end{aligned} \quad (12)$$

$$\begin{aligned} P_{in} &= m(E_t I \cos \varphi + I^2 r_1) + P_{loss} \\ &= mE_0 I_s \frac{\sin \delta \cos(\varphi + \delta)}{\sin^2(\varphi_0 - \varphi)} + P_{loss} \end{aligned} \quad (13)$$

여기서, m 은 상수, P_{loss} 는 동손 이외의 손실이다.

발전기의 최대 출력은 식 (14)로 표현되며, 이때의 전압과 전류는 각각 식 (15)과 식 (16)로 표현할 수 있다.

$$P_{\max} = \frac{mE_0 I_s}{2} \frac{\cos \varphi}{1 + \cos(\varphi_0 - \varphi)} \quad (14)$$

$$E_{tm} = \frac{E_0}{2 \cos[(\varphi_0 - \varphi)/2]} \quad (15)$$

$$I_m = \frac{I_s}{2 \cos[(\varphi_0 - \varphi)/2]} \quad (16)$$

이 특성계산식을 벡터식으로 주면 식 (17)이 성립한다.

$$E_t = IZ_L, \quad I = \frac{E_0}{Z_s + Z_L} \quad (17)$$

여기서

$$Z_s = r_1 + jX_1, \quad Z_L = R_L + jX_L \quad (18)$$

이고, 식 (18)을 식 (17)에 대입하여 정리하면 부하에 따른 출력전압 및 출력전류의 특성방정식이 식 (19), (20)와 같이 도출된다.

$$E_t = E_0 \sqrt{\frac{R_L^2 + X_L^2}{(r_1 + R_L)^2 + (X_1 + X_L)^2}} \quad (19)$$

$$I = \frac{E_0}{\sqrt{(r_1 + R_L)^2 + (X_1 + X_L)^2}} \quad (20)$$

본 논문에서는 부하를 순저항부하로 가정하였으므로 $X_L=0$ 으로 해서 식 (21)이 성립한다.

$$E_t = IR_L, \quad I = \frac{E_0}{\sqrt{(r_1 + R_L)^2 + X_1^2}}; \quad \frac{E_t}{I} = R_L \quad (21)$$

식 (21)에 의해 구해진 단자전압과 전류로부터 부하에 따른 정속도 특성곡선을 도출할 수 있다. 제시된 발전기의 출력요구조건에 부합되는 최대속도 35000-rpm, 최저속도 26000-rpm에서의 정속도 특성곡선은 각각 그림 3, 4와 같다. 그림에서 보여지는 바와 같이 등가회로법에 의해 구해진 해석 해는 정격출력시 유한요소법, 그리고 실험에 의한 결과와 일치하나 전류의 증가에 따라 유한요소해석결과와 차이를 보인다. 이는 본 논문에서 제시된 등가회로법에서 전기자 반작용에 의한 감자력의 영향을 고려하지 않기 때문이다. [3][4]

2.4 정격부하에서의 속도에 따른 출력 특성

앞에서 제시된 정속도에서의 부하특성식으로부터 정격부하에서의 회전 속도에 따른 출력전압과 출력전류의 특성식은 각각 식 (22), (23)으로 도출된다.

$$E_t = E_n \sqrt{\frac{R_L^2}{(r_1 + R_L)^2 + X_1^2}} \quad (22)$$

$$I_t = \frac{E_n}{\sqrt{(r_1 + R_L)^2 + X_1^2}} \quad (23)$$

여기서,

$$E_n = K_e \cdot \omega, \quad X_1 = K_x \cdot \omega \quad (24)$$

K_e 와 K_x 는 각각 유도기전력 상수와 리액턴스 상수를 나타낸다. 이로부터 도출된 정격부하에서의 정부하 특성곡

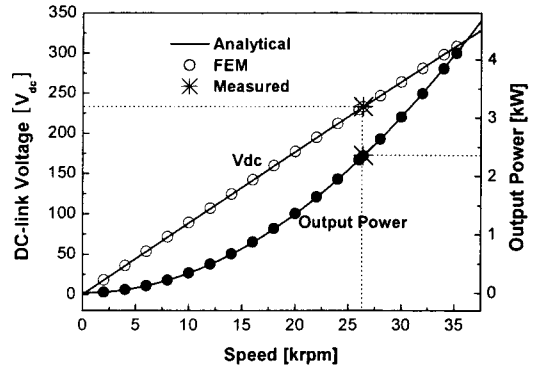


그림 5. 정격부하시 속도에 따른 출력과 출력전압의 특성곡선

선은 그림 5에서 보여지는 바와같이 유한요소해석결과와 일치함을 확인할 수 있다.

3. 결 론

본 논문에서는 등가회로법에 의한 영구자석형 동기발전기의 정속도특성 및 정부하특성의 해를 제시하였다. 이는 발전기 해석에는 물론 발전기 초기설계시에도 그 접근이 매우 유용하다. 또한 그 신뢰성에 있어서도 유한요소법에 의한 결과와 실험에 의한 결과와 비교되어 그 해의 타당성을 입증하였다. 그러나 부하특성 해석시 전기자 반작용에 의한 감자력에 의해 해석결과의 차이를 보이고 또한 본 논문에서는 유도기전력을 정현파라 가정하였으나 실제의 영구자석형 발전기에서는 반드시 정현파 유도기전력이 아니며 이 또한 발전기 특성해석에 오차를 발생하게 된다. 향후 유도기전력의 형상 및 전기자 반작용에 의한 감자력을 고려한 영구자석형 동기발전기의 특성해석에 대한 연구를 진행하고자 한다.

이 연구(논문)는 산업자원부의 지원에 의해 수행된 논문입니다.

[참 고 문 헌]

- [1] N. Bianchi and A.Lorenzoni, "Permanent Magnet Generators for Wind Power Industry : An Overall Comparison with Traditional Generators", *Opportunities and Advances in International Power Generator*, No.319, pp.49~54, 1996
- [2] Mihai Comanescu, Ali Keyhani, Min Dai, "Design and Analysis of 42-V Permanent-Magnet Generator for Automotive Applications", *IEEE Transaction on Energy Conversion*, Vol.18, No.1, pp.107~112, 2003
- [3] 大川光吉, "페라이트 磁石回轉機의 設計", 1995
- [4] Zhenhong Guo, Liuchen Chang, "FEM study on permanent magnet synchronous generators for small wind turbines", *Electrical and Computer Engineering, Canadian Conference on*, pp.641~644, 2005