

전기자 저항의 영향을 고려한 소형 영구자석 매입형 동기발전기 정상상태 특성 해석 연구

논 문
61-3-5

A Study of Analysis for Small Buried Type Permanent Magnet Synchronous Generator Considering Armature Resistance Effect

홍 선 기*
(Sun-Ki Hong)

Abstract - Small permanent magnet generator can be used not only as an emergency power source but also an exciting power source of generator for small generating systems because it does not need the external exciting power source. Especially the air-gap flux density of the buried PM synchronous generator can be increased more than that of the permanent magnet. In this study, the analysis of the small buried type PM synchronous generator is performed. From the phasor diagram considering armature resistance for exact analysis, analytic equations are induced and the efficiency, developed voltage, load current are calculated. The experimental results are compared with the calculated results for the appropriateness.

Key Words : Buried type permanent magnet, Small Synchronous generator, Armature resistance

1. 서 론

1 kW급 소형 영구자석형 발전기는 외부의 여자 전원이 필요 없어서, 비상 전원으로 뿐 아니라, 소형 발전설비 발전기의 여자 전원으로 이용될 수 있다. 국외에서는 비상 전원용 및 PMG 여자를 이용한 고효율 발전기에 사용되어, 그 기술은 우리나라보다는 더 오랜 경험을 바탕으로 좀 더 앞서 있다고 판단된다. 이미, 동기발전기는 크기는 발전소에서 작게는 소형 자가 발전에 이르기까지 널리 사용되고 있다고 할 수 있다. 최근 들어 중, 소규모의 열병합 발전 등에 이르기까지 수요는 급격히 증가하고 있지만, 이에 대응할 수 있는 기술은 적절히 대응하지 못하고 있는 듯하다. 즉, 수요가 증가함에 따라, 발전 시스템의 고효율화, 콤팩트화는 당연한 요구사항이나, 현재 동기발전기는 기존의 기술에 큰 진전이 없이 고전적인 방법에 의해 생산되고 있으며, 생산 규모도 크지 않다. 앞에서 언급한 바와 같이, 1 kW급 소형 영구자석형 발전기는 자체로 비상전원으로 사용될 수 있을 뿐 아니라, 소형 발전설비에서의 여자 전원 공급장치로도 사용될 수 있다. 그러나, 대부분의 동기기 해석 모델들은 중대형에 치중하고 있고, 이러한 모델들은 실제로 전기자 저항의 효과가 매우 미미하기 때문에 보통 그 값을 무시하여 수식화하고, 근사화하여 해석해 왔다[1][2]. 그러나 소형의 경우 전기자 저항에 전압강하를 무시할 수 없고, 더욱이 발전기 경우는 부하에 따라 출력 단자 전압이 변동하기 때문에, 기존의 모델로는 1 kW급의 소형 발전기 해석에 적용하기는 곤란하다.

본 연구에서는 정상상태의 엄밀한 해석을 하기 위해, 영

구자석 매입형 동기발전기의 등가회로에 대한 위상도로부터 전기자 저항을 고려한 영구자석 발전기를 해석할 수 있는 수식을 유도한다. 발전기는 부하 변동에 따라 전기자 전류가 달라지기 때문에 전동기와는 달리 출력 전압이 변동하게 되어 단자전압 일정이란 가정 하에 정리되었던, 부하각에 따른 토크 특성은 더 이상 성립하지 않는다 [5]. 따라서 발전기 회전수가 일정한 조건에 대해서만, 부하 변동에 따라 전류변동, 출력 전압의 변동을 계산해야 한다. 따라서, 이들 수식으로부터 발전기의 효율, 전압 변동을 등을 계산하고, 부하 변동에 따른 발전기의 출력, 출력 전압, 부하 전류와의 관계를 계산한다. 이러한 해석 결과는 실험을 통하여 얻어진 결과와 비교하여 그 타당성을 확인한다.

2. 발전기의 정상상태 해석

2.1 발전기 구조

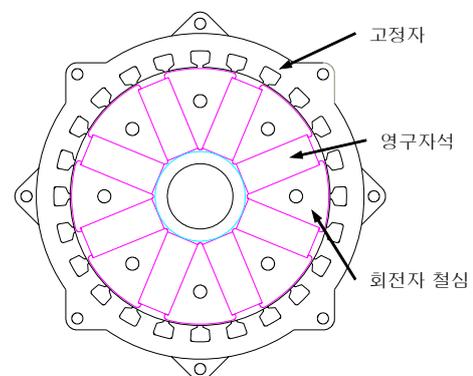


그림 1 영구자석 매입형 동기기 구조

Fig. 1 Structure of buried type PM synchronous generator

* 정 회 원 : 호서대 시스템제어공학과 교수

E-mail : skhong@hoseo.edu

접수일자 : 2011년 9월 2일

최종완료 : 2012년 2월 6일

그림 1은 해석대상이 되는 24슬롯 단층권 영구자석 매입형 동기기의 구조이다. 자석이 회전자 내부에 있어 기구적으로도 견고하고, 자석에서의 자속이 회전자 코어에서 집중되어 공극으로 나오므로, 공극자속밀도를 증가시키는 효과가 있다 [3][4]. 이러한 구조는, 사용하는 자석이 페라이트와 같이 잔류자속밀도가 낮은 경우, 공극자속밀도를 증가시킬 수 있는 장점이 있다.

2.2 전동기 위상도 및 해석

위상도를 이용하면 동기기를 해석하는데 편리한 점이 있다. 위상도는 전압, 전류 등의 관계를 위상도를 이용하여 서로의 관계를 쉽게 이해할 수 있다. 본 연구 대상인 동기발전기는 여자 역할을 수행하는 부분이 영구자석이 되고 있으며, 특히 공극 자속밀도를 증가시키기 위하여 매입형 구조를 갖는다. 이러한 이유로 이 동기발전기는 공극에서의 고정자와 회전자 간의 자기 저항 분포가 일정하지 않은 돌극기 특성을 갖게 된다. 이를 해석하기 위해서는 자속축(d축)과 이의 횡축(q축)으로 구분하여 해석하는 것이 편리하다. 그림 2는 돌극형 동기발전기에서의 위상도를 나타내고 있다.

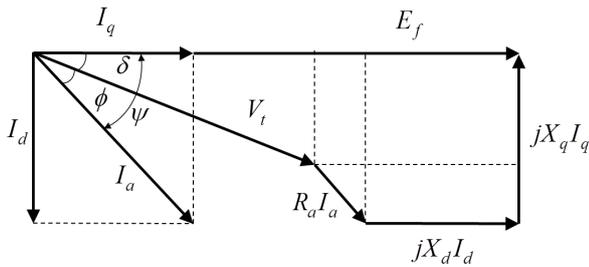


그림 2 돌극형 동기발전기 위상도
Fig. 2 Phasor diagram of salient type synchronous generator

그림에서 E_f 는 자석에 의해 만들어지는 내부 기전력이고, I_d , I_q 는 각각 d축, q축 전류, I_a 는 전기자 전류, R_a 는 전기자 저항, X_d , X_q 는 각각 d, q축 리액턴스를 나타낸다. 또한, δ 는 부하각, ϕ 는 역률각, V_t 는 단자 전압이 된다. 보통의 발전기들은 대부분 대형이기 때문에 전기자 저항이 매우 작고, 따라서 R_a 를 근사적으로 무시한 해석을 수행한다. 그러나 본 연구에서는 정격 출력이 1kW 정도의 소형 발전기이므로 전기자 저항이 동기 리액턴스에 비해 크게 작지 않아 전기자 저항을 무시하면 안된다. 따라서 그림 2와 같이 전기자 저항을 고려한 위상도를 이용하여 부하에 따른 단자전압 식을 유도하여야 한다. 우선, 부하각 δ 의 관계식은 그림 2의 위상도로부터, 다음과 같이 유도될 수 있다.

$$\tan\delta = \frac{X_q I_q - R_a I_d}{E_f - X_d I_d - R_a I_q} \quad (1)$$

식(1)의 I_d , I_q 를 전기자 전류 I_a 에 관하여 표시하고, 다시 전기자 전류를 부하저항과 단자전압으로 나타내면 다음과 같다.

$$\tan\delta = \frac{X_q \cdot \frac{V_t}{Z_q} \cos\psi - R_a \frac{V_t}{Z_q} \sin\psi}{E_f - X_d \cdot \frac{V_t}{Z_q} \sin\psi - R_a \frac{V_t}{Z_q} \cos\psi} \quad (2)$$

여기서, $Z_q = \sqrt{R_a^2 + X_q^2}$ 로 부하임피던스를 나타낸다. 식 (2)로부터, 부하저항과 부하각의 관계식이 유도된다.

$$Z_q = \frac{(X_q V_t \cos\psi + X_d V_t \sin\psi \tan\delta - R_a V_t (\sin\psi + \cos\psi \tan\delta))}{E_f \tan\delta} \quad (3)$$

한편, 그림 2에서 d, q축 전류식을 유도하면,

$$I_d = \frac{1}{Z_{dq}^2} (X_q E_f - V_t (R_a \sin\delta + X_q \cos\delta)) \quad (4)$$

$$I_q = \frac{1}{Z_{dq}^2} (R_a E_f - V_t (R_a \cos\delta - X_d \sin\delta)) \quad (5)$$

여기서, $Z_{dq}^2 = R_a^2 + X_d X_q$ 이다. d, q축 전류가 구해졌기 때문에 출력식을 유도할 수 있다. 동기기에서 출력 식은 단자 전압과 전기자 전류의 썩(conjugate)의 곱으로 표현된다. 여기에, 식 (4), (5)를 대입하면 식(6)으로 표현된다.

$$\begin{aligned} \dot{S} &= \dot{V}_t \dot{I}_a^* = \dot{V}_t (I_q + jI_d) \\ &= \dot{V}_t \frac{1}{Z_{dq}^2} [(R_a E_f - V_t R_a \cos\delta + V_t X_d \sin\delta) \\ &\quad + j(X_q E_f - V_t R_a \sin\delta + V_t X_q \cos\delta)] \end{aligned} \quad (6)$$

그림 2로부터 식(6)에 $\dot{V}_t = V_t \angle -\delta$ 를 대입하면 피상전력 \dot{S} 는 실수성분의 유효전력과 허수성분의 무효전력으로 나눌 수 있다. 이 식을 정리하고 $\dot{S} = P + jQ$ 이라 하면 다음과 같이 표현된다.

$$P = \frac{V_t}{Z_{dq}^2} \left(R_a E_f \cos\delta + X_q E_f \sin\delta - R_a V_t + \frac{\sin 2\delta}{2} V_t (X_d - X_q) \right) \quad (7)$$

$$Q = \frac{V_t}{Z_{dq}^2} \left(-R_a E_f \sin\delta + X_d E_f \cos\delta - V_t (X_d \sin^2\delta + X_q \cos^2\delta) \right) \quad (8)$$

또한, 발전기 출력 식은 피상전력의 유효성분이 되므로,

$$P = \frac{V_t^2}{Z_q} \cos\Phi \quad (9)$$

식(7), (9)로부터

$$\begin{aligned} &\frac{V_t}{Z_q} \cos\Phi \\ &= \frac{(R_a E_f \cos\delta + X_q E_f \sin\delta - R_a V_t + \frac{\sin 2\delta}{2} V_t (X_d - X_q))}{Z_{dq}^2} \end{aligned} \quad (10)$$

이 된다. 식(10)으로부터, 단자전압 V_t 와 부하각 간의 관계를 얻기 위해, V_t 에 대하여 정리하면, 다음과 같다.

$$V_t = \frac{Z_f E_f (R_a \cos\delta + X_q \sin\delta)}{Z_{adq}^2 \cos\Phi + Z_f \left(R_a - \frac{\sin 2\delta}{2} (X_d - X_q) \right)} \quad (11)$$

동기기 대부분 해석은 전동기를 기준으로 하여, 단자전압이 일정하다는 가정[5]하에 이루어지지만, 여기서 알 수 있듯이 발전기 경우 단자전압은 부하 크기에 의존하게 되며, 발전기 출력도 이에 크게 영향을 받게 된다. 위상도에 구한 식(3)에 출력식으로부터 구해진 식(11)을 대입하면, 다음과 같이 부하와 부하각의 관계식 (12)를 유도할 수 있다.

$$Z_f = \frac{1}{E_q E} \left\{ \frac{E_q D \times E_q F}{\tan\delta} - Z_{adq}^2 \cos\Phi \right\} \quad (12)$$

여기서, $E_q D = (X_q \cos\psi + X_q \sin\psi \tan\delta + R_a (\cos\psi \tan\delta - \sin\psi))$, $E_q E = R_a - \frac{\sin 2\delta}{2} (X_d - X_q)$, $E_q F = R_a \cos\delta + X_q \sin\delta$, $\cos\Phi = \frac{X_f}{Z_f}$ 이다. 발전기 기전력 E_f 는 다음 식으로 표현된다.

$$E_f = \sqrt{2} \pi f k_w N_{ph} \Phi_g \quad (13)$$

여기서, 주파수 f , 공극 극당 자속 Φ_g , 유효 상권선수 $k_w N_{ph}$ 이다.

3. 시뮬레이션 및 실험

유도된 수식의 타당성을 확인하기 위하여 시뮬레이션과 실험을 수행하고 비교하였다. 표 1은 해석하고자 하는 발전기 사양이다. 동기 리액턴스는 발전기의 형상, 재료와 권선이 주어지면 계산될 수 있다 [6].

표 1 발전기 기본사양

Table 1 Generator specification.

전기자저항	2.7[Ω]	극수	8
d축동기리액턴스	12.9[Ω]	상당턴수	240
q축동기리액턴스	16.0[Ω]	코일수	12
회전자외경	76.6[mm]	동기속도	1,800[rpm]
잔류자속밀도	0.4 [T]	공극길이	0.8 [mm]
정격출력	1 [kW]		

이로부터 부하각에 따른 출력, 전압 변동율을 계산하였다. 그림 3은 샘플 발전기의 회전자 및 고정자 사진이다. 이 발전기 회전자가 증공형인 이유는 디젤엔진을 이용한 열병합 발전기의 여자 전원용 발전기이기 때문이다. 회전자는 열병합 발전기 다른 한쪽 축에 연결되어 회전하고, 고정자 역시 열병합발전기에 고정된다.



그림 3 영구자석 발전기 회전자 및 고정자.
Fig. 3 Rotor and stator of the PM generator.

그림 4는 부하각에 따른 출력에 대한 시뮬레이션한 결과이다. 이상적으로 동기전동기의 최대 출력은 원통형 경우 90도, 돌극형은 이보다 좀 더 작은 각을 갖게 된다. 그러나 여기서는 발전기이기 때문에 출력전압은 부하 증가에 따라 감소하게 되고, 최대 출력 시의 부하각은 더욱 감소한다.

더욱이 전기자 전압강하가 크게 작용하는 본 연구에서와 같은 소형 발전기의 최대출력시의 부하각은 이보다 더 감소하게 된다. 그림 4에서 볼 수 있듯이 부하각이 22도 정도에서 동기발전기의 정격 출력이 나오고 있고 최대 출력 시 부하각도 45도 정도이다. 이러한 해석결과는 전기자 저항을 무시하는 대형 동기전동기 뿐 아니라 동기 발전기와 크게 다른 것을 보이고 있다.

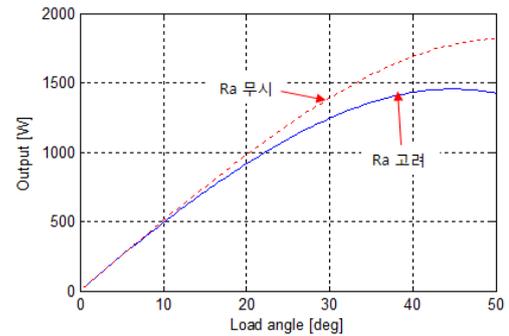


그림 4 부하각에 따른 발전기 출력
Fig. 4 Output of the generator according to the load angle.

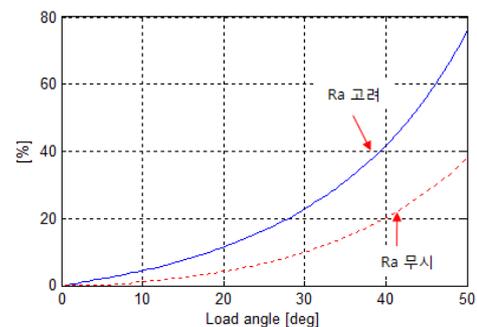


그림 5 부하각에 따른 발전기 전압변동율
Fig. 5 Voltage regulation ratio of the generator according to the load angle.

그림 5는 부하각에 따른 발전기 출력전압 변동률이며, 정격시 약 12%임을 보인다. 일반적인 대형 동기기 해석에서는 전기자 저항 전압강하가 무시할 만 하지만, 소형 발전기에서는 이 값이 커서, 그림 5와 같이 전압 변동률이 매우 커진다. 이것은 그림 4처럼 최대 출력시의 부하각이 90도보다 상당히 작게 되는 이유를 설명해 준다. 실험에서는 부하각을 측정하기 어렵지만 대신 부하에 흐르는 전류, 부하에 걸리는 출력전압, 부하저항을 측정하여 타당성을 검토할 수 있다. 그림 6은 출력전압과 부하전류와의 관계, 그림 7은 출력전압과 부하저항 간의 관계를 실험치와 계산치와 비교하였으며, 전기자 저항을 고려한 경우, 계산치와 실험치가 비교적 서로 잘 일치함을 볼 수 있다. 또한, 이로부터 소형 발전기 경우, 전기자 저항을 고려하지 않으면 제반 특성 계산에 매우 큰 오차를 발생하게 됨을 알 수 있다.

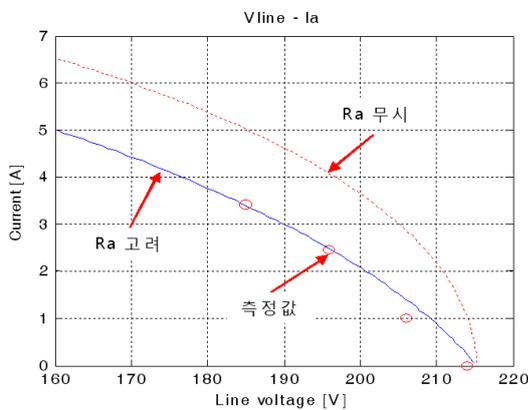


그림 6 발전전압에 대한 부하 전류 계산 및 실험치.
Fig. 6 Calculation and experiments of load currents according to developed voltage.

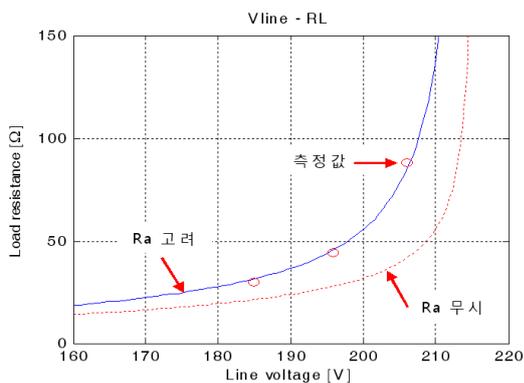


그림 7 발전전압에 대한 부하 저항 계산 및 실험치.
Fig. 7 Calculation and experiments of load resistance according to developed voltage.

4. 결 론

본 논문에서는 소형 영구자석 매입형 동기발전기의 정상상태 해석에 있어서 전기자 저항이 미치는 영향에 대해 연구를 수행하였다. 우선, 영구자석형 발전기의 해석을 위하여 페이서도를 이용하여 관련 수식을 유도 하였다. 일반적으로

동기기를 해석할 때 대형기 경우 전기자 저항을 무시하고, 단자전압이 일정함을 가정하지만, 본 연구에서와 같이 소형이며 발전기의 경우는 전기자 저항에 의해 출력전압(단자전압)이 부하에 따라 크게 감소하게 된다. 따라서 전기자 저항을 무시한 경우와 고려한 경우에 대한, 부하각에 대한 출력이나 전압 변동률이 크게 차이가 남을 시뮬레이션으로부터 확인하였다. 뿐만 아니라, 실험에서 발전되는 전압과 부하전류 및 부하저항을 측정하고, 발전전압과 부하전류, 발전 전압과 부하저항 간의 관계를 시뮬레이션과 실험과의 비교를 통해 그 타당성을 확인하였다. 이로부터 소형 영구자석 발전기 경우 전기자 저항을 무시할 경우, 제반 특성 계산에 큰 오차를 발생하게 되며, 전기자 저항을 반드시 고려하여 계산하여야 함을 확인하였다.

감사의 글

이 논문은 2010년도 호서대학교 재원으로 학술연구비 지원을 받아 수행된 연구임.(2010-0121)

참 고 문 헌

- [1] 大川光吉, “페라이트 磁石回轉機의 設計”, pp.183~268, 総合出版社, 1984.
- [2] S. A. Nasar, I. Boldea and L.E. Unnewehr, Permanent magnet, Reluctance, and Self-synchronous Motors, CRC Press, 1993.
- [3] N Bianchi, S Bolognari, "Performance Analysis of An IPM Motor with Segmented Rotor for Flux-Weakening Application", IEE. no. 468, pp. 49-53, 1999.
- [4] Byoung-yull Yang, Hyun-kag Park, Byung-il Kwon, "Design of Flux Barrier for Reducing Torque Ripple and Cogging Torque in IPM type BLDC motor", Electromagnetic Field Computation, 2006 12th Biennial IEEE Conference on 2006, pp.241 - 241, May 2006
- [5] P. C. Sen, Principles of electric machines and power electronics, John Wiley & Sons, 1997.
- [6] J. F. Gieras, M. Wing, Permanent magnet motor technology, Marcel Dekker Inc., 2002.

저 자 소 개



홍 선 기 (洪 璠 基)

1965년 1월 24일생, 1987년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1989년 서울대학교 대학원 전기공학과(석사), 1993년 서울대학교 대학원 전기공학과(박사), 1993~1995 ㈜렉스산전 선임연구원, 1995~현재 호서대학교 시스템제어공학과 교수