

소형 내삽형 영구자석 동기발전기의 특성해석에 관한 연구

홍선기\*, 김범훈\*\*

호서대학교 서보기기 및 제어 연구실

A Study of Characteristic Analysis for Small Buried type Permanent Magnet Synchronous Generator

Sun-Ki Hong\*, Bum-Hoon Kim\*\*

Hoseo University\*, Servo machine and Control Lab

**Abstract** - 영구자석형 발전기는 외부의 여자 전원이 필요 없어서, 비상 전원으로 뿐 아니라, 소형 발전설비에서의 발전기의 여자 전원으로도 사용될 수 있다. 특히, 내삽형 영구자석형 동기발전기는 자석보다 극의 자속밀도를 더 높일 수 있어, 저가, 고성능 발전기 제작이 가능하다. 본 연구에서는 이러한 발전기에 필요한 발전기 해석기술을 개발한다. 정밀 해석을 위한 등가회로를 모델링하고, 이로부터 해석적인 결과를 얻는다. 전기자 저항을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우를 비교하여 해석의 타당성을 검증한다.

1. 서 론

1 kw급 소형 영구자석형 발전기는 외부의 여자 전원이 필요 없어서, 비상 전원으로 뿐 아니라, 소형 발전설비에서의 발전기의 여자 전원으로도 외국에서는 사용되고 있다. 이러한 발전기에 필요한 기술은 크게 발전기 해석기술, 발전기 설계 기술 및 제작 기술을 들 수 있다. 이제까지의 해석 기술은 간단한 등가 모델에 의한 해석, 유한요소 해석 등이 있으며, 설계 기술은 주로 경험적 실험식으로 구성된 설계를 주로 해 왔다. 즉, 발전기 제작은 기존의 생산 경험에 따른 자료를 바탕으로 설계 생산해 왔기 때문에, 효율을 극대화하기 어렵고, 설계 사양의 변동에 대한 요구에 능동적을 대처할 만한 기술을 갖추고 있지도 못하다.

국외에서는 비상 전원용 및 PMG 여자기를 이용한, 고효율 발전기에 기술은 우리나라보다는 더 오랜 경험을 바탕으로 상당히 앞서 있다고 판단된다. 특히 발달한 미국, 독일, 일본의 제품의 경우 효율 및 크기 등에서 우수한 성능을 발휘하고 있으며, 최근 비약적인 컴퓨터 기술을 바탕으로 설계 최적화가 시도되어지고 있다. 따라서 소형 발전기 정밀 해석은 매우 중요한 문제이다. 그러나 대부분 해석기법은 중대형에 치중되고, 여기서 저항의 크기는 전체 임피던스에 비해 미미하여 무시하고 해석하지만, 이러한 소형 발전기에서 전기자 저항을 무시하는 경우는 많은 오차를 유발한다. 따라서 본 연구에서는 전기자 저항을 고려하고, 일반부하에서도 적용할 수 있는 방법을 해석적으로 유도하고, 전가자 저항을 무시한 경우와 무시하지 않을 경우를 비교하여 해석의 타당성을 확인한다.

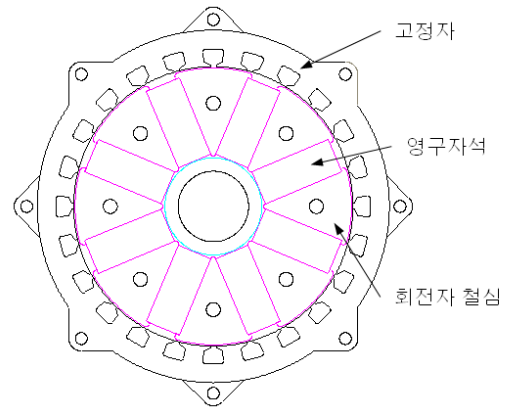
2. 본 론

2.1 전동기 구조

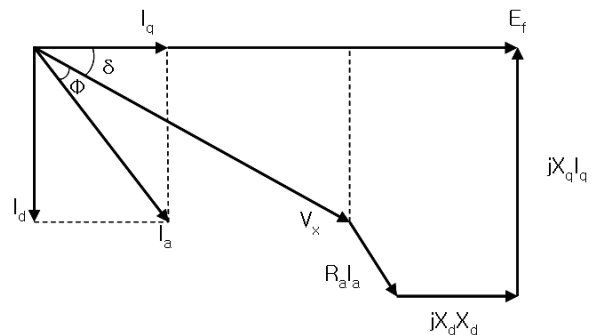
그림 1은 해석대상이 되는 24슬롯 단층권 영구자석 매입형 동기기의 구조이다. 자석이 회전자 내부에 있어 기구적으로도 견고하고, 자석에서의 자속이 회전자 코어에서 모여 공극으로 나오므로, 공극자속밀도를 증가시키는 효과[3,4]가 있다.

2.2 전동기 페이서도 및 해석

페이서도를 이용하면 동기기를 해석하는데 편리한 점이 있다. 페이서도는 전압, 전류 등의 관계를 페이서도를 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 돌극기 특성을 갖게 된다. 이를 해석하기 위해서는 자속축(d축)과 이의 횡축(q축)으로 구분하여 해석하는 것이 편리하다. 그림 2는 돌극형 동기발전기에서의 페이서도를 나타내고 있다.



〈그림 1〉 영구자석 매입형 동기기 구조



〈그림 2〉 돌극형 동기발전기 페이서도

그림에서  $E_f$  는 자석에 의해 만들어지는 내부 기전력이고,  $I_d$ ,  $I_q$  는 각각 d, q축 전류,  $I_a$  는 전기자 전류,  $R_a$  는 전기자 저항,  $X_d$ ,  $X_q$  는 각각 d, q축 리액턴스를 나타낸다. 또한,  $\delta$  는 부하각,  $\phi$  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 저항을 무시하면 적지 않은 오차가 발생하게 된다. 따라서 이 페이서도를 이용하여 발전기의 구조가 주어졌을 때, 부하에 따른 단자전압 식을 유도하여야 한다. 페이서도에서 부하각 관계식은 다음과 같다.

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

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

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

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

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

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. 동기에서 출력 식은 단자전압과 전기자 전류의 곱(conjugate)의 곱으로 표현된다.

$$\dot{S} = \dot{V}_t I_a^* = \dot{V}_t (I_q + jI_d) \quad (6)$$

여기에, 식 (4), (5)를 대입하고, 실수성분을 취하면 출력을 구할 수 있다.

$$P = \frac{V_t}{Z_i} \cos\phi = \frac{(R_a E_f \cos\delta + X_q E_f \sin\delta - R_a V_t + \frac{\sin 2\delta}{2} V_t (X_d - X_q))}{Z_{udq}} \quad (7)$$

식(7)을 단자전압  $V_t$  에 대해 정리하면 다음과 같다.

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

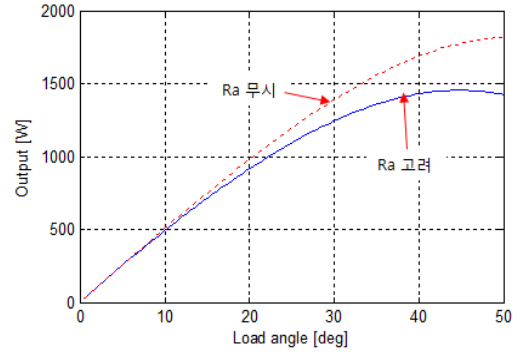
식(7)에서 부하각 변화에 따른 발전기의 발전 전압을 계산할 수 있다.

### 3. 시뮬레이션 및 실험

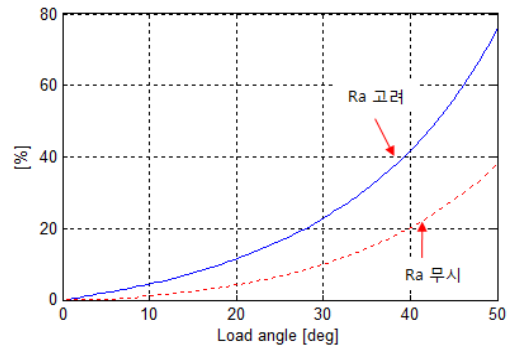
표 1은 해석하고자 하는 발전기 사양이다. 고정자는 3상 24슬롯이고, 8극 구조이다. 이로부터 부하각에 따른 출력과, 전압 변동률을 계산하였다. 그림 3, 그림 4는 전기자 저항을 무시한 경우와 고려한 경우의 비교를 나타내고 있다. 그림 3에서 부하각이 22도 정도에서 동기발전기의 정격 출력이 나오고 있고, 이 때 전압 변동률은 약 13%임을 보인다. 전기자 저항을 고려하지 않은 경우와는 같은 부하각에서 10% 정도의 오차를 갖을 수 있음을 알 수 있다. 또한, 그림 4는 부하각에 따른 전압 변동률이다. 발전기의 전압 변동률은 매우 중요한 요소이다. 그림에서 알 수 있듯이 전기자 저항을 고려하면, 여기서 전압강하가 크기 때문에 큰 전압 변동률 가져오고, 약 13% 정도의 전압변동이 있지만, 전기자 저항을 고려하지 않으면 7% 정도로 계산되어 실제 현상과 큰 오차를 가져올 수 있음을 알 수 있다.

<표 1> 발전기 기본사양

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



<그림 3> 부하각에 따른 발전기 출력



<그림 4> 부하각에 따른 발전기 전압변동률

## 4. 결 론

본 논문에서는 영구자석 매입형 동기발전기의 해석을 위하여 다음과 같은 연구를 수행하였다. 우선, 영구자석형 발전기의 등가회로에 의한 해석을 위하여 자기회로 모델링 방법 및 페이서도를 이용하여 해석할 수 있도록 하였다. 페이서도로부터 전기자 저항을 고려한 발전기의 일반화된 해석 수식을 유도하여 해석을 수행하였다. 이로부터 영구자석 발전기의 부하각과 출력 및 전압변동률에 대하여 계산하였고, 전기자 저항을 고려한 경우와 고려하지 않은 경우와를 비교하여, 소형 발전기에서 전기자 저항을 고려하지 않으면 제반 값들은 큰 오차를 유발할 수 있음을 보여 전기자 저항을 무시할 수 없음의 타당성을 확인하였다.

### [참 고 문 헌]

- [1] 大川光吉, “페라이트 磁石回轉機의 設計”, pp.183~268, 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