

## 소형 항공엔진용 발전기 개발동향 및 특성고찰

김인수\*

### A Development Tendency and Feature Study of Generator for Small Aircraft Engine

Insoo Kim\*

#### ABSTRACT

This paper describes the characteristics of Permanent Magnet Generator(PMG) and Homo-Polar Generator(HPG) applied in small aircraft engine. PMG has a advantage of miniaturization and fast bandwidth if it is using the DC/DC converter for power conversion which increases a volume and cost although. On the other hand, HPG has a advantage of simple voltage control accomplished by flux control of field coil. Recently, it is recommended the PMG without DC/DC converter module by reason of the wide range of input voltage of electronic loads and system efficiency.

#### 초 록

본 논문은 소형 항공용 엔진에 적용되는 영구자석 발전기와 단극 발전기의 특성을 기술한다. 영구자석 발전기는 소형화와 빠른 동특성을 장점으로 갖는데, 빠른 동특성은 전적으로 DC/DC 컨버터의 특성에 따르며, 이러한 컨버터는 부피 및 비용의 증가를 가져온다. 반면, 단극 발전기는 계자권선의 자속 제어를 통한 단순한 전압제어가 장점이다. 최근, 전자부하들의 넓은 입력전압 범위와 시스템 효율성 등을 고려해 DC/DC 컨버터 없는 영구자석 발전기가 추천된다.

Key Words: Permanent Magnet Generator(영구자석발전기), Hybrid Homopolar Generator(혼합형 단극발전기), Power Conversion Unit(전력변환기), Power Conditioning Unit(전력조정기)

#### 1. 서 론

국내에도 항공 관련 산업의 비중이 커지면서, 항공분야의 제트엔진용 발전기를 포함한 전원시

스템의 개발 필요성이 제기되어, 소형화 및 고신뢰성의 요구를 만족할 수 있는 단극발전기(Homopolar Generator, 이하 HPG)와 영구자석발전기(Permanent Magnet Generator, 이하 PMG)가 결합된 혼합형 단극발전기(Hybrid HPG, 이하 H-HPG)나 PMG와 전력변환장치(Power Conversion Unit, 이하 PCU)가 결합된 전원시스

\* 국방과학연구소 1본부 5부

† 교신저자, E-mail: kisscamp@naver.com

템의 개발이 진행되었다.

항공용 전원시스템은 급격한 부하변동에서도 안정적으로 전원을 공급하여야하는 운용 요구조건을 갖고 있다. 이러한 요구조건을 만족시키기 위해 구조적으로 강건하면서 출력전압 제어가 용이한 H-HPG가 개발 초기에 적용되었다. H-HPG는 자속을 제어함에 따른 상대적으로 느린 동특성(bandwidth)을 갖는데, 이러한 특성은 고 승압 능동부하와의 운용 시 임피던스 부조화에 따른 제어 불안정성을 야기할 가능성을 갖게 된다. 따라서 HPG의 제어기 설계 시 부하특성을 고려한 제어 이득 설정 등이 요구된다.

반면 PMG의 경우 자체에는 제어기가 없으나, 부가의 PCU가 필요로 하게 되며, 이 경우 PCU가 전원시스템의 동특성을 주로 좌우하게 된다. 이러한 PCU는 주로 DC/DC 컨버터 모듈들을 적용함에 따라 상대적으로 빠른 동특성을 보이며, 임피던스 부조화에 따른 안정성 문제 등에서 유리한 장점을 갖는다. 반면 별도의 PCU 소요에 따른 비용 및 부품 수 증대에 따른 신뢰도 문제 등이 제기된다.

이러한 단점을 고려하여 최근 PCU 비적용 PMG 개발에 집중하고 있으며, 부하단 컨버터들의 넓은 전압범위를 고려할 때 이러한 방법이 충분히 적용가능하며, 좁은 전압범위를 갖는 부하장비들에 대해서는 각자의 특성에 맞는 전압조정기 적용을 통해 시스템의 효율성을 높일 수 있을 것으로 기대된다.

본 논문에서는 이러한 발전기의 특징과 개발 내용을 살펴보고 향후 개발될 발전기의 개발 방향을 제시하고자 한다.

## 2. 발전기 특성 비교

### 2.1 혼합형 단극 발전기

이 방식은 다극과 단극의 결합된 형태로서, 주 출력은 영구자석 다극 발전부에서 얻는다. 조절 계자(controlling field)는 영구자석 발전부 끝단에 위치한 단극발전부에서 발생되어지는데, 영구자석부의 부족한 부분을 만족시키기 위하여 고정자단의 끝단에 위치한 고정계자권선에서 발생된

자속이 단극 발전부를 경유하여 완성된다.

고정 계자권선은 영구자석의 N 또는 S극을 보충하는 단극 계자를 만들며, 고정자 권선 출력단의 발생전압을 조정하는 역할을 수행한다.

변하는 속도와 부하조건을 만족시키기 위하여 전력조정기(Power Conditioning Unit for HPG, 이하 PCU\_H)가 직류 출력 단에 연결되게 되는데, 속도감소 또는 부하증가에 따라 출력전압이 기준전압 값보다 떨어지게 되면 전력조정기는 이러한 전압강하를 감지하여, 필드코일에 전압을 가하여 출력단의 전압강하분배에 해당하는 만큼을 보충시키는 단극계자를 유도하게 된다. 이렇게 하여 발생하는 역기전력 방정식은 다음 Eq. 1으로 표현된다[1]. Figure 1에 PMG와 HPG가 결합된 H-HPG 개략도를 나타냈다.

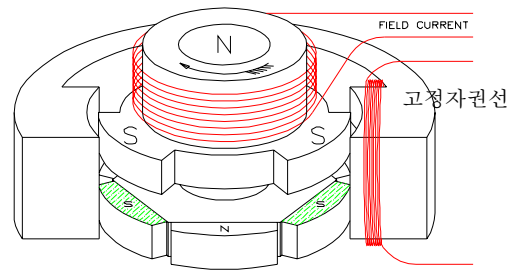


Fig. 1 Simple diagram of H-HPG

$$E = K \cdot N \cdot Z \cdot (\Phi + \delta\Phi) \quad (1)$$

여기서  $E$ : 발생 역기전력 전압

$K$ : 발전기 상수

$N$ : rpm

$Z$ : 유효도선

$\Phi$ : 공극 PM 자속

$\delta\Phi$ : 공극 HP 자속

### 2.2 영구자석 발전기

다양한 형태의 영구자석 발전기들이 있으나, 가장 일반적 형태인 표면부착형 영구자석 발전기가 주로 적용되며, 자석들은 자성을 갖는 연철 허브(hub)상에 붙여지며, 비 자성체의 링에 의해 원심력으로부터 고정되어 진다. 발전기 전력은 회전속도에 직접 비례하며 Eq. 2에 따른다[2].

PMG들의 적용상 주요문제 중 하나는 계자 제어에 의한 전압조정이 불가능하다는 점으로, 부하 및 속도변화에 따른 전압조정이 필요로 하는 분야에서는 발전기 출력단에 전압변환모듈을 적용하는 방식이 채택되어 진다.

$$Power = kD^2lBAf_m \quad (2)$$

여기서

$D$  : air gap diameter

$l$  : active length

$B$  : magnetic loading (air gap flux density)

$A$  : electric loading (line current density)

$f_m$  : mechanical frequency

$k$  : proportionality constant

### 3. 발전기 개발 및 적용

#### 3.1 혼합형 단극 발전기

개발된 H-HPG의 세부 구성도를 발전기 내부 자속의 경로와 함께 Fig. 2에, H-HPG용 PCU-H의 제어 블록도를 Fig. 3에 각각 나타냈다. H-HPG는 회전자, 계자권선, 정류기, 고정자권선 등을 포함하며, 부하 및 rpm 변화에 대해 일정 출력전압을 유지하는 PCU-H와 결합된 H-HPG의 개발 적용 규격을 table 1에 나타냈다.

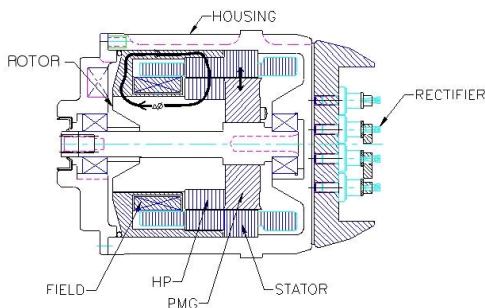


Fig. 2 Configuration and flux path of H-HPG

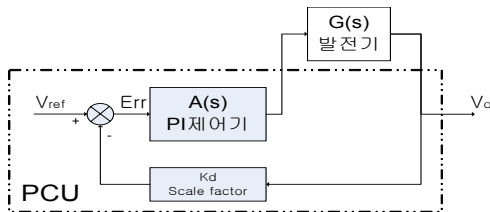


Fig. 3 Control block diagram of PCU-H

Table 1. Specification of H-HPG with PCU-H

구분	규격	비고
출력전압	29.5~30.5V	30V 기준전압
정격출력	1.8kW	
과부하용량	2.34kW	정격의 130%, 2분
정격속도	25.0~35.0krpm	정격의 65~100%
과도상태 전압	변위 +15V, -9V, 회복시간 50ms 이내	10%↔85% 부하변동

#### 3.2 영구자석 발전기

Figure 4에 개발 적용된 PMG를 나타냈다. PMG의 앞부분엔 정류단과 평활단이 각각 위치하며, 뒷부분엔 엔진 축으로 부터의 회전력을 전달받는 기어 치(teeth)가 위치한다. 그리고 table 2에는 개발된 PMG의 규격을 제시하였다. 이러한 고전압 PMG는 DC/DC 변환기 등을 적용한 PCU가 적용되어야 안정적 직류전원을 확보할 수 있으며 개발 적용된 PCU 블록도를 Fig. 5에 나타냈다.

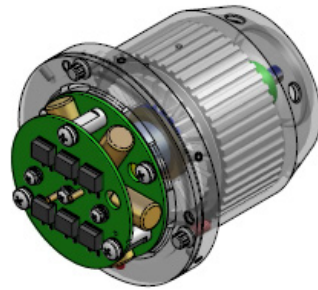


Fig. 4 Configuration of PMG with rectifier

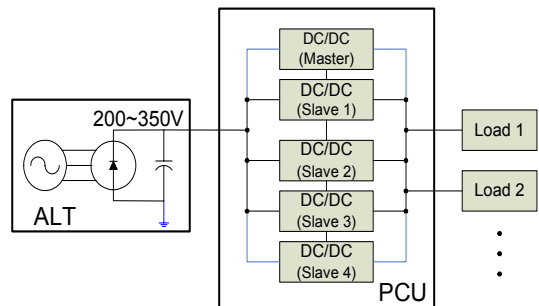


Fig. 5 Block diagram of PCU

Table 2 Specification of PMG

구분	규격	비고
출력전압	200~350V	직류링크 전압
정격출력	1.8kW	
과부하용량	2.34kW	정격의 130%, 2분
정격속도	22.9~35.2krpm	정격의 65~100%
외형	φ88.0x115.0 이하	2kg 이내

### 3.3 전압조정기 배제한 영구자석 발전기

Figure 6에 PCU 배제된 PMG 발전기 형상을 나타냈으며, Fig. 7에는 이 발전기의 권선 형태에 따른 I-V 특성을 나타냈다. Figure 7로부터 Δ형 권선의 특성이 우수함을 확인하여 이 방식을 채택하였으며, 소형화 관점에서도 권선의 집중화를 피할 수 있어 유리함을 확인하였다. Table 3에는 PCU 배제된 PMG 발전기의 개발 규격을 나타냈다.

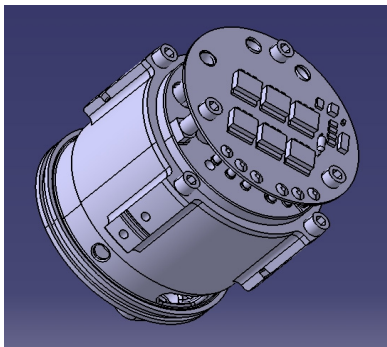


Fig. 6 Configuration of PMG without PCU

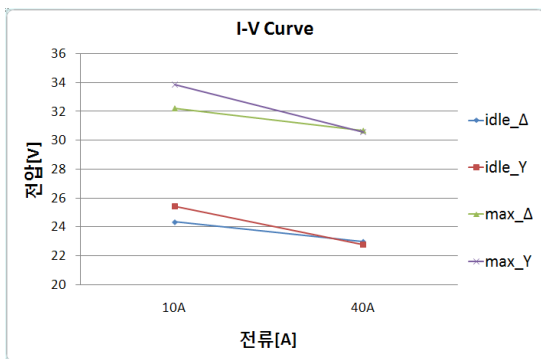


Fig. 7 I-V Curve of PMG without PCU

Table 3 Specification of PMG without PCU

구분	규격	비고
정상상태 출력전압	22~32Vdc	기본부하 2Ω
정격용량	1,200Watt	30±1V@40A, 100%RPM
과부하 용량	20V이상@40A, 75%RPM	
운용속도	56.3~75krpm	75%~100%
과속도	34V 이내, 2분운용	최대 RPM의 105%
과도특성	18~50V@5↔35A	Mil-std-704 보완적용
외형	φ85.6x100.0 이하	1.2kg 이내

## 4. 결 론

본 연구에서는 소형 항공용 엔진에 적용되는 H-HPG와 PMG의 특성 및 적용 결과에 대해 기술하였다. HPG는 전압제어의 용이성이 장점이나, 상대적으로 느린 동특성을 보이며, PCU 적용 PMG는 발전부 소형화, 빠른 동특성을 보이는 장점을 갖는 반면, PCU의 설계 및 비용 부담 등의 단점이 대두된다.

최근에는 PMG의 내부저항을 최소화하여 PCU를 배제시키는 방법이 연구 개발되고 있다. 이러한 배경에는 전자부하의 DC/DC 컨버터의 입력 단 전압 범위가 상대적으로 큰 점을 들 수 있다. 그리고 정전압이 필요로 하는 부하에 대해서는 그 부하특성에 맞는 컨버터를 각각 적용하는 것이 전체 시스템 관점에서 더 효율적이라는 관점이 또 하나의 배경이다. 그리고 기계부하들의 운용 효율성을 위해 별도의 고전압 출력력을 갖춘 이중 출력 발전기 등도 제시되고 있다.

## 참 고 문 헌

1. H. Lazer, "Brushless Generators-A Review of Rotating Electrical-Generating Machinery, as Used Today to Satisfy Modern Industrial, Aerospace and Military Applications," Analysis Note, Sept. 2004
2. H. R. Niekerk, "Permanent Magnet Alternators for Stand Alone Electricity Generation," AFRICON, 1996, IEEE AFRICON 4th Volume 1, pp. 451~455, Sept. 1996