

# 부성부하와의 발진을 고려한 단극발전기 시스템 설계

김인수, 성세진\*

국방과학연구소, \*충남대학교

## A Design of Homopolar Generator System Considering Instability with Negative Characteristics Load

In-Soo Kim, Se-Jin Seong\*

Agency for Defense Development, \*Chungnam National University

### ABSTRACT

This paper studies the instability between homopolar generator and constant power load with negative impedance characteristics, provides the design method of homopolar generator system which overcomes the instability. In case of magnitude and phase of impedance of source and load mismatch, control instability of source can occur. For the safety of phase of load impedance, the gain of P, I controller with sufficient phase margin is applied through analysis on the simulation model of generator system, and the gain limit of load impedance is ensured by limitation of the gain margin of generator system. The stability of power system can be increased by considering and analyzing the impedance of source and load.

Keyword : Instability, Negative Impedance, Homopolar Generator, Impedance

### 1. 서론

단극발전기(homopolar generator, HPG)는 고속회전 시 요구되는 회전자 구조적 강인성과 단순성, 그리고 용이한 출력전압 조정 능력 등의 장점과 관련 소재인 희토류(rare earth material)의 개발에 따라 최근 군용 및 항공 산업에서 그것의 활용성이 재조명되고 있다<sup>[1]</sup>. 단극발전기는 계자권선에서 만들어지는 자속을 제어하여 부하 및 회전속도 변화에 따라 변동하는 발전기 출력전압을 제어함으로써, 출력전압을 일정하게 유지하기 위한 별도의 전력변환장치가 요구되지 않는다는 점에서 장점을 갖는다. 이러한 자속제어는 소형, 경량화 관점에서는 유리하지만, 전력용 반도체 소자를 활용한 스위칭 방식 변환기에 비해 동특성이 느린 특성을 보임에 따라, 동특성이 빠른 최근의 컨버터를 포함하는 부하들과의 사용 시 제어 및 임피던스 관점에서의 안정성에 관심을 가져야 한다.

항공용 전원시스템은 급격한 부하변동에서도 안정적으로 전원을 공급하여야 하는 운용 요구조건을 갖고 있다. 그러나 초기 개발된 단극발전기를 적용한 전원시스템의 시험 과정에서 발전기의 출력전류 요동 및 급격한 출력전압 상승현상이 나타났다. 이러한 현상의 원인으로 전압이 내려가면 더 많은 전류를 요구함에 따라 동적 임피던스가 부성 특성을 갖는 일정전력 부하

와, 자속을 제어함에 따라 응답성능이 부하에 비해 느린 단극발전기 사이에서, 발진현상이 발생한 결과라는 분석을 얻었다<sup>[2]</sup>. 이에 따라 단극발전기 적용 전원시스템에 대해 부성 특성 부하와의 발진을 고려한 설계 연구의 필요성이 제기되었다.

본 논문은 이러한 배경에서 단극발전기를 채택한 항공용 전원시스템에서 부성 특성을 갖는 능동형 부하와의 안정성을 고려한 설계 연구를 수행한 결과를 기술한다.

### 2. 전원시스템 발진

#### 2.1 발진조건

발전기를 포함한 전원시스템이 능동부하, 특히 고압 부하와 만날 경우 시스템을 불안정하게 한 결과는 몇몇 논문에서 언급되고 있다<sup>[3,4]</sup>.

부하단의 컨버터가 특정 주파수에서 부성저항 입력특성을 갖고, 그리고 필터를 포함한 전원시스템이 양성 임피던스 특성을 갖는다면, 부성저항 발진의 조건이 성립되게 된다. 컨버터의 부성 입력 임피던스 특성을 갖는 것은 쉽게 설명이 되는데, 이는 컨버터의 입력전압이 내려가게 되면, 동일 전력을 유지하기 위해 더 많은 전류를 요구하게 되는 점에서 확인할 수 있다. Middlebrook은 불안정성의 일반적 기준을 다음 식 (1)을 통해 제시하고 있다. 이 식으로부터 전원의 임피던스는 작아야 하며, 부하의 임피던스는 커야 됨을 알 수 있다. 그리고 부하단 컨버터의 높은 증압비( $1/\mu$ )는 전체 시스템의 안정성에 부정적 영향을 미침을 또한 보여주고 있다.

높은 Q 값을 갖는 필터는 공진주파수 대역에서의 전원 출력단 임피던스를 높인다. 이로 인해 제어루프 이득을 줄이게 되며, 심한 경우 해당 주파수에서 이득값이 1로 줄어들어 더 이상 제어를 할 수 없게 되며, 여기에 전체 위상지연이  $360^\circ$ 가 되면 시스템은 발진하게 된다. 루프이득에 대한 필터의 영향은 일반적인 루프 분석기로 예측될 수 있으며, 전원시스템의 제어루프 설계 시 필터는 반드시 포함되어져야 하고, 필터의 Q값은 최소화하여야 한다.

$$\frac{|Z_s|}{|\mu^2 \cdot Z_d|} \ll 1 \quad (1)$$

#### 2.2 시스템 안정도

발전기 전원시스템이 부성부하 특성을 갖는 일정전력 부하와 동작시, 전원단 출력 임피던스의 크기가 부하단 입력 임피

던스의 절대값 보다 적게 되면, 부하전류 증가에 따른 전원단의 전압강하에 의한 전압 강하율이 부하단의 전압 강하율보다 낮게 되어 새로운 안정적 동작점을 갖게 된다. 반면, 전원단 출력 임피던스의 크기가 부하단 입력 임피던스 절대값 보다 크게 되면, 부하전류 증가에 따른 전원단의 전압강하에 의한 전압 강하율이 부하단의 전압 강하율보다 크게 되어 시스템은 불안정하게 되며, 여기서 부하단 전압은 감소하여 이론적으로 0V 전압에 이르게 된다.

이러한 전원의 불안정성을 피하기 위하여 전원단 임피던스는 부하단 임피던스보다 작아야 한다. 이러한 결과로 평활필터를 포함한 전원단의 임피던스를 낮추기 위해 전원의 내부 임피던스 및 평활필터 Q값은 낮게 관리되어야 한다. 그림 1에 전원단의 임피던스대 부하단의 임피던스에 따른 시스템의 안정성을 판단할 수 있는 도해를 나타냈다. 이 그림에서 전원단과 부하단의 공진주파수들이 매우 근접하여 불안정성을 유발할 수 있는 좋지 않은 상황을 보여주고 있으며, 부하단과 전원단의 임피던스가 겹치지 않게 하는 것이 안정성을 확보한다는 예를 보여주고 있다<sup>[5]</sup>.

Wildrick은 이러한 임피던스 중첩 발생 시, 불안정성을 피하는 방법을 제시하고 있다<sup>[6]</sup>. 부하단의 입력 임피던스가 전원단 출력 임피던스 이하인 중첩 대역에 대해 전원단 출력 임피던스 위상각에 위상여유  $\pm 60^\circ$ 를 두어 부하단의 임피던스 위상 허용 대역을 정의한다. 이 허용대역에 부하단의 입력 임피던스 위상을 두게 하여 시스템의 불안정성을 극복할 수 있음을 보이고 있다. 따라서 비선형 부하단을 고려하여 전원 시스템 설계 시  $60^\circ$  이상의 위상여유 확보를 제안하고 있다. 그리고 이득여유는 제어 안정성을 보장하는 6dB를 만족하면서, 부하단의 임피던스 허용 한계 확보를 위해 과도하게 크지 않아야 한다.

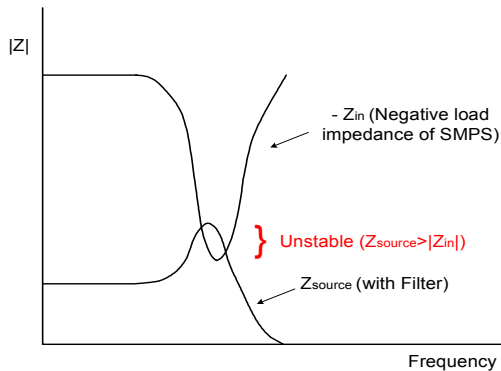


그림 1 높은 전원단 임피던스와 높은 부하단 임피던스의 중첩에 따른 불안정성

Fig. 1 Instability by the overlap between high source impedance and low load impedance

### 3. 발전기 시스템 설계 및 부성부하 해석

#### 3.1 단극 발전기 모델링

본 연구에 적용된 단극발전기의 등가모델을 직류발전기 모델에 대입하여 제어기와 함께 그림2에 나타냈으며, 관련 매개변수를 표 1에 나타냈다. 직류발전기 모델을 적용하여 분석한 결과 시뮬레이션과 실험내용에 큰 차이가 없었으며, 개략적 특성을 파악하는데 있어서 단순화한 직류발전기 등가모델이 적절함을 볼 수 있었다.

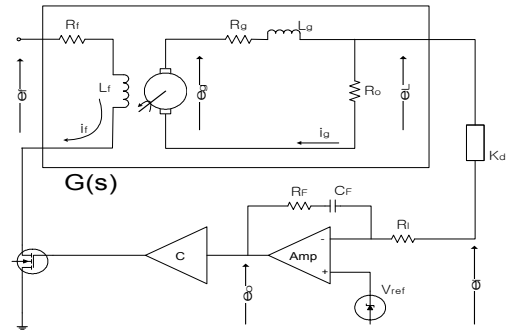


그림 2 단극발전기 제어 등가모델  
Fig. 2 Control equivalent model of HPG

표 1 단극발전기 매개변수  
Table 1 The parameter values of HPG

매개변수	기호	단극발전기	비고(rpm)
발전기 상수	$K_g$	20/ 18/ 15 [V/A]	Max/Mid/Idle
계자 인덕턴스	$L_f$	0.4[H]	
계자 저항	$R_f$	8[Ω]	
발전기 저항	$R_g$	96/ 92/ 70 [mΩ]	Max/Mid/Idle
발전기 인덕턴스	$L_g$	16[uH]	

제어대상 플랜트 전체의 전달함수  $e_L/e_f$ 를 구하려면 발전기 출력단에 연결된 실제부하특성을 알아야 하나 여기서는 단순화를 위해 저항부하  $R_o$ 로 하여, 전달함수  $e_L/e_f$ 를 구하면 식 (2)과 같다. 발전기 전압을 피드백 (feedback)하여 일정전압을 얻는 전압제어회로는 PI 제어기로서, 제어기의 전달함수는 다음 식 (3)로 나타낼 수 있다. 출력단 구동용 FET를 포함한 비교기 이득은 계자권선 인가전압을 비교기 입력단의 삼각파 최대값으로 나눈 값으로 식 (4)와 같이 표현된다.

$$\frac{e_L(s)}{e_f(s)} = \frac{e_g(s)}{e_f(s)} \cdot \frac{e_L(s)}{e_g(s)} \quad (2)$$

$$= \frac{K_g/L_f}{s + R_f/L_f} \cdot \frac{R_o}{L_g s + (R_g + R_o)}$$

여기서  $K_g$ : 발전기 상수 [V/A]

$$\frac{e_o}{e_i} = \left[ \frac{R_f}{R_i} + \frac{1/(R_i C_f)}{s} \right] \quad (3)$$

$$= \frac{K(\tau s + 1)}{s}$$

여기서  $K = 1/(R_i C_f)$ ,  $\tau = R_f C_f$

$$K_c = \frac{V_f}{V_{saw}} \quad (4)$$

#### 3.2 발전기 시스템 안정성 해석

시뮬레이션 모델을 활용한 모의분석을 통해 본 연구에 적용된 발전기의 제어 안정성을 확인하였다. 제어기 적용 이득 값은 기존 제어기의 이득값을 기준으로, 제어기 관련 귀환회로의 선택가능한 한 조합 중 4가지 이득 조합에 대해 그림 3 모델을 적용한 시뮬레이션을 수행하였으며, 그 결과를 표2에 나타냈다.

발전기 제어기의 이득값은 60° 이상의 위상여유를 가지며, 이득여유는 6dB 이상을 만족하면서 지나치게 높지 않은 이득조합을 선정하여 적용하였다. 위상여유 60° 이상은 비선형 부하에 의해 전체 시스템의 위상값이 감소되는 점을 고려하여 결정된 값이며, 그리고 이득여유에서의 권장값 이상의 큰 값은 부하단의 임피던스 한계값을 제한해 시스템에 부정적 영향을 미친다 [6]. 분석 결과 과응답(overshoot)이 적고 위상마진이 상대적으로 큰 비례이득 60, 적분이득 150의 조합이 가장 우수하였다.

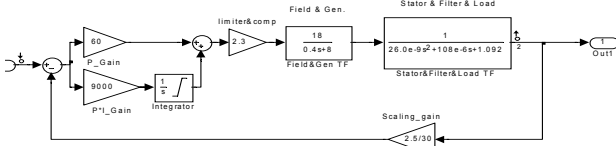


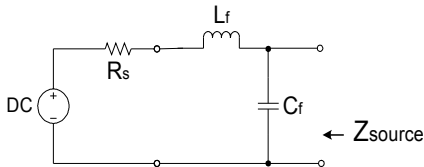
그림 3 P, I 이득 설정을 위한 시뮬레이션 모델  
Fig. 3 Simulation model for acquisition of PI gain

표 2 P, I 이득에 따른 위상 및 이득 여유  
Table 2 Phase and gain margin at different P, I gain

이득 (P, I)	위상여유 [°]	이득여유 [dB]	비고
60, 150	72.7	18.7	선정
60, 300	60.1	18.6	
20, 450	35.2	28.0	
10, 900	19.5	33.6	기준

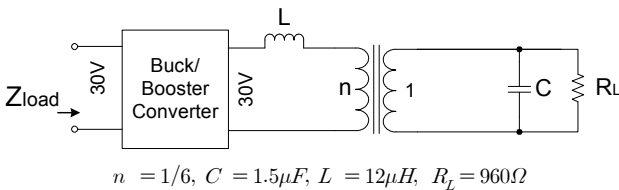
### 3.2 발전기 및 부하 시스템 임피던스 해석

발전기 전원시스템 및 부성저항 특성을 갖는 고승압 부하시스템에 대한 회로적 등가 모델을 그림 4 및 5에 각각 나타냈다. 부하시스템에서 전원 전압이 떨어지게 되면 고승압 부하내의 벅/부스터 컨버터의 듀티비가 증대되고, 이는 부하단 공진 주파수를 낮추어 저주파수 대역의 임피던스 감소를 가져온다. 이로 인해 전원 임피던스와 부하단 임피던스가 만나게 되어 앞에서 기술한 발진 가능영역을 형성하게 하여 시스템의 발진 현상을 초래할 수 있게 된다. 그림 6의 해석결과 부하단 컨버터 듀티비가 70% 대에서 임피던스 중첩을 가져와 필터의 커패시턴스를 키워 개선하였다.



$R_s = 90m\Omega$ ,  $L_f = 31\mu H$  ( $L_g$  포함),  $C_f = 840\mu F \rightarrow 1260\mu F$  (개선)

그림 4 전원 시스템 등가회로  
Fig. 4 Equivalent circuit of source of system



$n = 1/6$ ,  $C = 1.5\mu F$ ,  $L = 12\mu H$ ,  $R_L = 960\Omega$

그림 5 부성부하 시스템 등가회로  
Fig. 5 Equivalent circuit of negative load of system

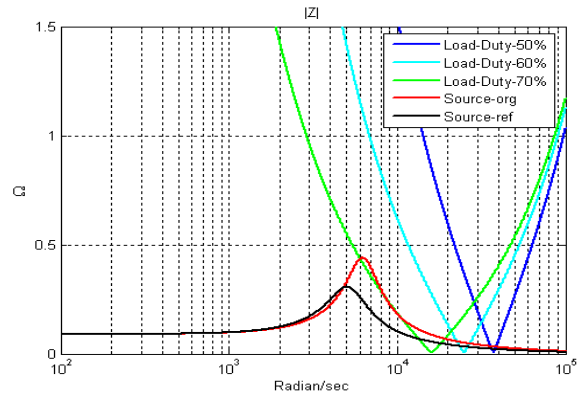


그림 6 전원 및 부하의 임피던스 곡선  
Fig. 6 Impedance curve of source and load of system

## 4. 결론

본 연구에서는 부성 특성을 갖는 능동 부하들과의 발진문제에 따른 불안정성을 극복할 수 있는 단극발전기를 적용한 전원시스템에 대한 설계방법을 제시하였다.

첫째, 고승압 능동부하 등과의 운용 안정성을 위해 발전기 출력단 임피던스의 최소화가 필요로 하며, 공진주파수 값은 최대한 낮게 적용함으로써, 일반적 부하단의 높은 공진주파수와 겹치는 현상을 피해 시스템 운용 안정성을 확보할 수 있다.

둘째, 전원단과 부하단의 임피던스 중첩에 의해 발생될 수 있는 불안정을 극복하기 위한 60° 이상의 안정적 위상여유 및 6dB를 크게 초과하지 않는 이득 여유값을 확보하여야 한다. 이를 위해 시뮬레이션 모델을 통한 시스템의 안정성을 검증하여야 하며, 과도응답 규격범위에서의 해석 및 다양한 과도시험 등을 통해 검증하여야 한다.

이상의 연구결과로 발진을 고려한 안정적 단극발전기 전원시스템에 대한 설계 방법이 제시되었으며, 부하 장비들과의 임피던스 분석을 통해 전원시스템의 신뢰성을 증대시켰다.

## 참고 문헌

- [1] E. A. Erdelyi, "Synthesis of High Speed Homopolar Alternators and Theory of Solid Rotor Electrical Machines", Department of Electrical Engineering Boulder, University of Colorado, 1970
- [2] 김인수, 윤현로, "소형 가스터빈 엔진용 발전기 성능개선 및 모델링 연구," 군사과학 기술학회지 제7권 제3호, 2004.
- [3] I. Jadric, "Modeling and Control of a Synchronous Generator with an Active DC Load," IEEE Trans. on Power Electronics, vol. 15, no. 2, Mar. 2000
- [4] A. Emadi, "Constant Power Loads and Negative Impedance Instability in Automotive System: Definition, Modeling, Stability, and Control of Power Electronic Converters and Motor Drivers," IEEE Trans. on Vehicular Technology, vol. 55, no. 4, Jul. 2006
- [5] M. I. Nave, "Power Line Filter Design for Switched Mode Power Supply," Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [6] C. M. Wildrick, F. C. Lee, B. H. Cho, B. Choi, "A Method of Defining the Load Impedance Specification for a Stable Distributed Power System," PESC, 1993