論文 12-3-4

단극발전기의 모델링 및 시뮬레이션을 이용한 성능개선

金仁秀†, 成世鎭*

Performance Improvement Using Modeling and Simulation of a Homo-polar Generator

In-Soo Kim and Se-Jin Seong

요 약

고속 부하특성을 갖는 장비들이 일반화되면서 탑재형 발전기는 빠른 응답특성을 만족시켜야 한다. 본 논문은 고속 부하용으로 개발된 단극 발전기의 모델링, 시뮬레이션 및 실험 등을 기술한다. 입력 제한기가 있는 단극 발전기의 시뮬레이션 모델이 만들어졌고, 응답특성을 개선하는 최적 이득이 시뮬레이션 및 분석을 통해 결정된다. 최적 이득값을 적용하여 개발된 발전기의 향상된 대역폭 및 안정성이 시뮬레이션과 실험으로 입증되어졌다.

ABSTRACT

As the equipments with the fast load characteristics become popular, a onboard generator should satisfy the fast response characteristics. This paper describes the modeling, simulation and experiment of the homo-polar generator developed for the fast load. The simulation model of a homo-polar generator with input limiter is developed, and the optimal gain to improve the response characteristics can be determined by simulation and analysis. The improved bandwidth and stability of the developed generator with optimal gain are verified by simulation and experiment.

Key Words : Generator, Homo-polar, Modeling, Simulation, Input limiter, Stability

1. 서 론

1.1 배경

소형 가스터빈에 주로 적용되는 발전기의 한 종류인 단극발전기(Homo-Polar Generator, 이하 HPG)가 그것의 장점인 경량 및 고효율, 그리고 관련 소재인 희토류의 개발에 따라 군용 및 항공산업에서 재조명되고 있다.

이러한 HPG는 계자권선에서 만들어지는 자속을 제어하여 부하 및 RPM 변화에 따른 발전전압 변화를 통제함으로서 부가의 전력모듈 사용을 배제시킬 수 있다. 이러한 자속제어는 소형화 관점에서 장점을 갖지만, 전기적 스위칭 방식의 변환기등과 비교하여 대역폭 관점에서 늦기 때문에 고속 부성부하와의 사용 시에는 주의를 요하게 된다. 이러한 한계를 극복하기 위해, 우선적으로 최적용량의 적용에 따른 계자권선의 인덕턴스를 최소화해야 하며, 제어기 설계시 응답의 빠르기와 안정성이 확보되는 최적이득을 적용해야 한다.

†교신저자 : 정회원, 국방과학연구소 책임연구원
E-mail : kisslamp@chol.com
*정회원, 충남대 정보통신공학부 교수
접수일자 : 2007. 3. 12 1차 심사 : 2007. 4. 6
2차 심사 : 2007. 5. 4 심사완료 : 2007. 5. 14

본 논문은 높은 대역폭과 고 신뢰도 특성을 갖는 HPG의 모델링, 시뮬레이션 및 실험입증 등을 기술한다. 입력제한기가 있는 HPG의 시뮬레이션 모델이 새롭게 제안되어졌고, 모델링 과정에서 필요한 주요 파라메타의 실험적 도출방법을 함께 제시하였다.

시뮬레이션 도구로는 MATLAB의 시뮬링크(Simulink)가 이용되었고, 여기서 만들어진 시뮬레이션 모델로 제어기 이득값에 따른 HPG의 응답 및 안정성을 분석하였고, 입력제한기에 따른 영향도 함께 분석하였다. 이러한 시뮬레이션 결과를 적용하여 만들어진 발전기에 대해 실험을 통해서 시뮬레이션 내용과 일치함을 확인하였다.

결과적으로 개발된 발전기는 상대적으로 높은 대역폭과 안정성을 확보하여 고속 부하에 보다 안정적으로 운용될 수 있게 하였다.

1.2 HPG의 동작원리

1924년에 라푼 (Laffoon)은 HPG의 동작을 가변 리럭턴스 머신 (variable reluctance machine)으로서 설명하였는데, 이 머신내의 회전부인 톱니모양 회전자는 필드코일에 의해 여자된 플럭스 (flux)를 양 (positive)의 방향 내 최소와 최대사이에서 맥동하게 한다[1,2]. 아마추어 도체에 유기되는 전압은 플럭스 쇄교(linkage)의 변화에 의해 발생되게 된다.

1942년에 워커 (Walker)는 HPG의 이론을 재검토하였는데, 이 논문에서 취급한 HPG의 도해를 그림 1에 나타냈다. 이 발전기는 공통프레임에 고정된 두 개의 박층 고정자 코어로 구성되는데, 이 박층 모양들은 두 고정자에 공통인 아마추어 권선을 갖기 위하여 가는 홈이 파여지게 된다. 계자 (field) 권선은 동심코일로서, 그 축이 발전기의 축과 일치하게 된다. 플럭스 라인 중 하나를 그림 1에 나타냈다.

과거의 HPG 회전자는 그것이 운용될 고속 회전에 내구성을 갖도록 단단한 철 단조로 만들어지며, 형상을 그림 2에 나타냈다. 회전자 치아로 불리는 왼쪽 및 오른쪽 돌극들은 왼쪽 회전자 치아 축이 오른쪽 치아 사이축과 같은 모점 (generatrix)을 같도록 상쇄되게 되는데, 이는 두 개의 고정자 섹션에 같은 자속변화를 제공하기 위함으로, 이는 다시 두 고정자 코어내의 아마추어 도체에 유도되는 기전력이 더해지기 위해서이다. 가변 에어갭 리럭턴스 및 고정자 홈들을 그림 3에 나타냈다.

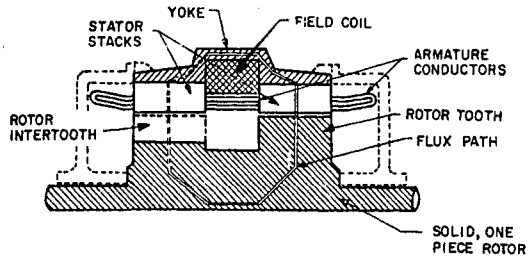


그림 1 단극발전기의 축 단면도
Fig. 1 Axis Cross Section of HPG

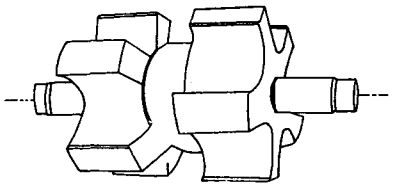


그림 2 고체 회전자 단조 형상
Fig. 2 Shape of Solid Rotor

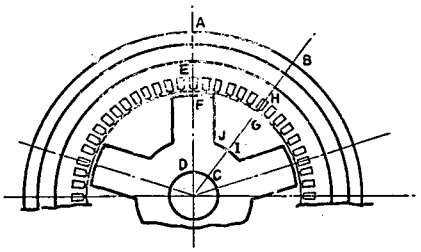


그림 3 단극발전기의 방사상 단면도
Fig. 3 Radial Cross Section of HPG

HPG의 장점은 구조의 단순성과 고속회전에서의 동작을 가능케 하는 강한 구조로서, 어떤 브러쉬나 슬립링, 그리고 회전자 권선의 불필요함이 HPG를 매우 신뢰성 있는 기기로 동작하게 한다. 반면 HPG의 단점은 고정자 조립체의 자기(magnetic)적 최대 동작범위를 활용하지 못하는 점으로, 이는 HPG의 특성상 자속이 양의 최대에서 음의 최소까지 최대 편위(excursion)를 통한 스윙을 하지 않기 때문인데, 이러한 단점은 1㎑ 이상의 고속운용에서 철손의 집중을 피하기 위해 자속의 편위가 줄어들게 됨에 따라 극복되어진다.

2. HPG의 설계 및 규격

2.1 설 계

일반적으로 HPG의 응답속도는 발전용량에 반비례함에 따라 발전용량은 발전기 설계단계에서 신중히 검토되어져야 한다. 본 연구에서의 발전기 용량 선정시 HPG 특성을 고려하여 순간적인 과도부하 용량은 설계에서 배제하였고, 정상상태 용량에 약 130%의 여유를 가지고 발전기 용량을 선정하였다. 그리고 빠른 응답특성의 HPG는 안정성을 위해 시뮬레이션을 통해 얻어진 최적이득을 적용하였다.

본 연구에 적용되어지고 개발된 HPG의 구성도를 그림 4에 나타냈다. 서론에 나타낸 발전기의 구조와는 다소 차이가 있는 구조로서, 그림 1의 구성중 계자권선부의 중심부를 기준으로 좌측단에 해당하는 구성을 갖는다. 이러한 HPG는 자속을 만드는 계자권선, 8개의 폴(pole)을 갖는 회전자, 36 슬롯(slot)을 갖는 고정자, 고정자내의 2개의 Δ권선, 정류기 및 평활용 LC 필터, 그리고 PI제어기를 적용한 전압조정기로 구성된다.

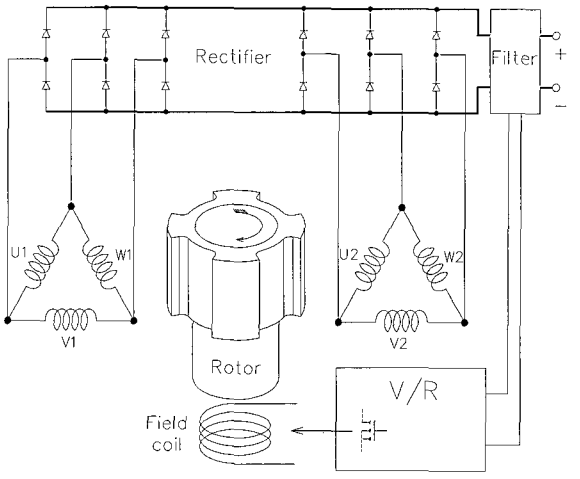


그림 4 개발된 HPG의 구성도
Fig. 4 Diagram of the developed HPG

2.2 규 격

개발 HPG의 주요 규격을 표 1에 나타냈다. 정상상태 전압값은 라인드롭(line drop)을 고려해 30V를 적용하였고, 과도전압중 하한값은 mil-std-704규격에 3V의 여유를 두어 적용하였고, 상한값은 설계에 크게 문제는 되지 않아 하한값과 동일한 범위에서 적용하였다.

표 1 HPG의 주요규격
Table 1 The main specification of the HPG

항목		규격	비고
정상상태 전압		30±0.5V	부하단 28V
정격출력		1.8kW	60A @ 30V
전압변동률 (regulation)		$\pm 1.5V_{rms}$ 이내	
과도전압	허용전압	±9V 이내	부하변동: 10%↔85%
	허용시간	50ms 이내	
운용 RPM		25,000~35,000	Idle~Max

3. 시스템 모델링 및 시뮬레이션

3.1 모델링

HPG의 등가모델을 제어기와 함께 그림5에 나타냈다.

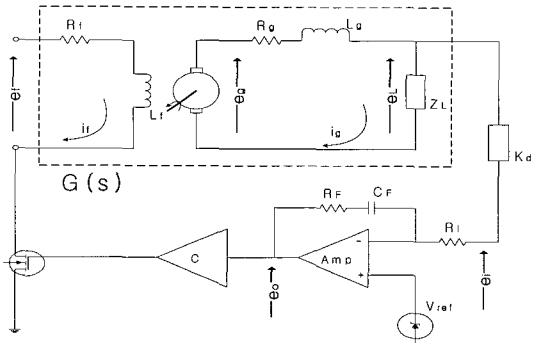


그림 5 HPG의 제어 등가모델
Fig. 5 Control equivalent model of HPG

발전기의 고정자 (stator) 권선에 유기된 전압 e_g 는 회전속도 n과 계자 (field)에 의해 형성된 자속 Φ의 함수이다.

$$e_g = K_1 n \Phi \tag{1}$$

여기서, e_g : 발전기 내부전압
K_1 : 상수
n : 회전수
Φ : 자속

자속 (Flux)은 계자전류 (Field Current)와 계자코일의 권선 (turn)수, 그리고 자속 경로 (path)상에 재료 및 구조에 따른 자기저항에 관계된다. 이 관계는 자

속경로 상 사용재료의 포화점에 도달할 때 까지는 선형관계로 볼 수 있으므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\Phi = K_2 j_f \tag{2}$$

여기서, $K_2 \propto \frac{N}{R_m}$

K_2(상수), N(권선수), R_m(자기저항)

i_f : 계자전류

식 (1)과 (2)에서 다음 식 (3)를 얻는다.

$$e_g = K_g i_f \tag{3}$$

여기서, $K_g = K_1 K_2 n \ [V/A]$ (발전기상수)

그림 5에서 계자전압 e_f와 계자전류 i_f의 관계식은 다음과 같다.

$$e_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \tag{4}$$

여기서, e_f : 필드 전압

R_f : 필드 저항

L_f : 필드 인덕턴스

식 (3)과 식 (4)에서 계자전류 항을 소거하여 다음 식 (5)를 얻는다.

$$\frac{e_g}{e_f} = \frac{K_g/L_f}{s + R_f/L_f} \tag{5}$$

제어대상 플랜트 전체의 전달함수 e_L/e_f를 구하려면 발전기 출력단에 연결된 실제부하특성을 알아야 하나 여기서는 단순화를 위해 저항부하 1Ω으로 하여, 전달함수 e_L/e_f를 구하면 식 (6)과 같게 된다.

$$\frac{e_L(s)}{e_f(s)} = \frac{e_g(s)}{e_f(s)} \cdot \frac{e_L(s)}{e_g(s)} = \frac{K_g/L_f}{s + R_f/L_f} \cdot \frac{z_L}{sL_g + z_L + R_g} \tag{6}$$

여기서, e_L : 부하 전압

z_L : 부하 임피던스

R_g : 발전기 내부저항

L_g : 발전기 내부인덕턴스

발전기 전압을 피드백 (feedback)하여 일정전압을 얻는 전압제어회로는 PI 제어기로서, 제어기의 전달함수는 다음 식 (7)로 나타낼 수 있으며[3], 발전기의 제어 블록도를 그림 6에 나타냈다.

$$\frac{e_o}{e_i} = \left[\frac{R_F}{R_I} + \frac{1/(R_I C_F)}{s}\right] = \frac{K(\tau s + 1)}{s} \tag{7}$$

여기서, e_i : 제어기 입력전압

e_o : 제어기 출력전압

R_I : 제어기 입력저항

R_g : 제어기 궤환저항

C_F : 제어기 궤환커패시턴스

$K = 1/(R_I C_F)$

$\tau = R_I C_F$

출력단 구동용 FET를 포함한 비교기 이득은 필드 코일 인가전압을 비교기 입력단의 삼각파 최대값으로 나눈값으로 식 (8)과 같이 표현된다.

$$K_c = \frac{V_f}{V_s} \tag{8}$$

여기서, K_c : 비교기 이득

V_f : 필드 인가 최대전압

V_s : 삼각파 최대전압

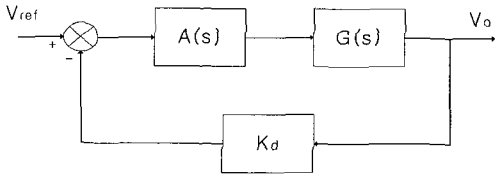


그림 6 HPG의 제어 블럭도

Fig. 6 Control Block Diagram of HPG

그림 6에서 A(s)는 HPG의 PI 제어기 (비교기 포함) 전달함수이며, G(s)는 발전기 전달함수이다. 그리고 K_d는 출력전압과 기준전압 사이의 순방향 이득값이다.

3.2 시스템 파라메타 획득

발전기상수(K_g)는 그림7의 시험값인 계자전류 1A와 각 RPM에서의 개루프 출력전압값으로부터 획득하였다. 그림 7에서 바이어스 전압은 HPG에 함께 포함된 영구자석 발전기 출력전압값으로, 이는 HPG내 계자권선의 여자(excitation)용 전원역할을 한다.

계자권선 인덕턴스(L_f)는 그림8에 나타낸 발전기 개루프(open loop) 실험값의 시정수($\tau = L/R$)로부터 도출하였다. 발전기저항값(R_g) 또한 발전기의 개루프상태에서의 실험결과를 그림 8에 나타낸 부하변동에 따른 출력전압값 변화로부터 획득하였으며, 관계식을 식 (9)에 나타냈다. 이 저항값에는 고정자 권선을 흐르는 전류에 의해 발생되는 역방향 자속에 따른 자기저항 변화를 포함시켜 반영하였다.

발전기 고정자 권선의 인덕턴스는 과도상태 하강응답에서 전류변화에 대한 출력단 캐패시터의 전압상승 특성에서 획득하였다[4]. 이 특성의 적용식을 식 (10)에 나타냈고, 실험값을 그림 9에 나타냈다. 이상에서 얻어진 발전기 주요 파라메타값을 표 2에 나타냈다.

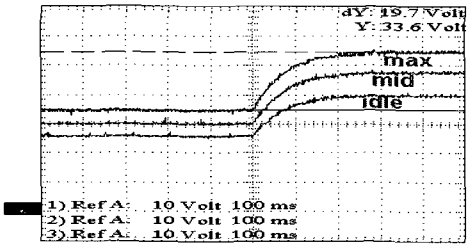


그림 7 개루프상태에서 계자전류 1A투입시 출력전압특성

Fig. 7 Output voltages to the field step current 1A with open loop

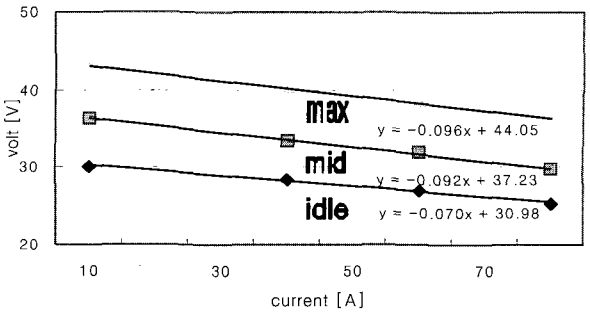


그림 8 개루프상태에서 부하변화에 따른 출력전압 강하특성

Fig. 8 Output voltage drop to load variation with open loop

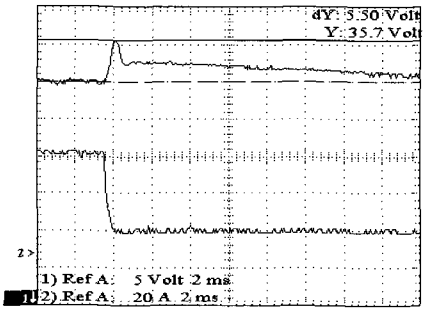


그림 9 부하감소시 과도응답 [위: 전압, 아래: 전류]

Fig. 9 Transient response at load decrease [upper: voltage, lower: current]

$$R = -\frac{dV}{dI} \tag{9}$$

$$\frac{L(\Delta I)^2}{2} = \frac{C(\Delta V)^2}{2} \tag{10}$$

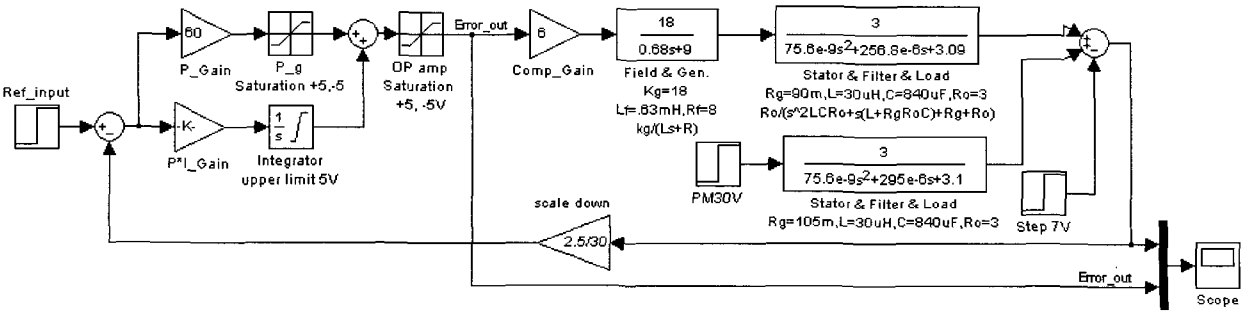


그림 10 HPG의 시뮬레이션 모델

Fig. 10 The simulation model of HPG

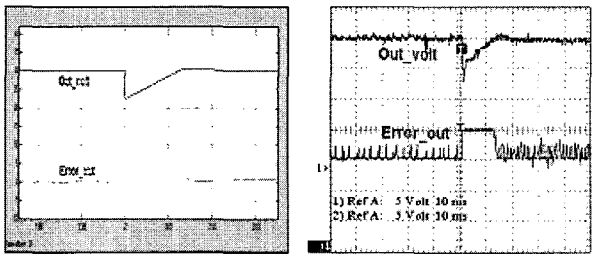
표 2 HPG의 파라메타 값
Table 2 The parameter values of the HPG

파라메타	기호	HPG	비고
발전기상수	K_g	20/ 18/ 15 [V/A]	Max/Mid/Idle
계자인덕턴스	L_f	680[mH]	
계자저항	R_f	9[Ω]	Measured
발전기저항	R_g	96/ 92/ 70 [mΩ]	Max/Mid/Idle
발전기 인덕턴스	L_g	16[uH]	

3.3 HPG 모델 입증

표 2의 발전기 모델 파라메타를 적용한 시뮬레이션 모델을 그림 10에 나타냈다. 시뮬레이션에서 과도응답(10A→80A)에 대한 특성을 얻기 위해 10A 부하 출력단에 스텝입력 (-7V)을 적용하여 수행하였으며, 자체 여자용 영구자석 발전부는 별도 블록으로 출력단에 더하여 처리했다.

시뮬레이션 결과를 입증하기 위해 발전기 출력전압과 내부 제어기의 에러 앰프 출력전압을 계측한 결과를 그림 11에 시뮬레이션 결과와 함께 나타냈으며, 여기서 시뮬레이션 결과값이 실험 획득 값과 일치함을 확인할 수 있으며, 이로서 시뮬레이션 모델의 정확성을 입증할 수 있다.

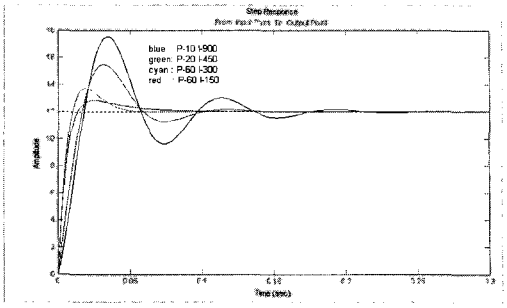


(a) 시뮬레이션 (Simulation) (b) 실험 (Experiment)

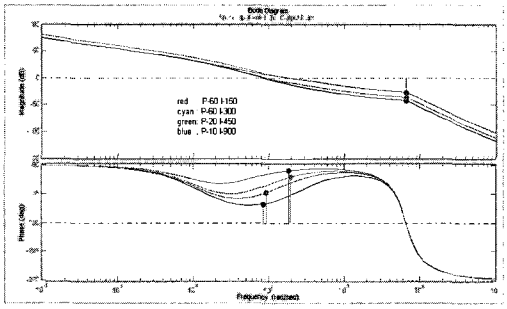
그림 11 모델 입증을 위한 시뮬레이션과 실험 결과
Fig. 11 The results of the simulation and experiment for verifying the model

3.4 제어이득 설정

발전기 제어기의 최적이득값을 찾기 위해 회로적으로 선택가능한 몇 개의 이득 조합에 대해 시뮬레이션 모델에 적용하여 분석을 수행하였다. 그림 12에 각 이득조합에 따른 폐루프 계단응답 및 개루프 보데 선도(Bode plot)을 나타냈다. 응답속도는 뒤에 설명될 입력제한기 특성에 따라 제한되기 때문에 응답의 과응답(overshoot)이 적고 위상마진이 상대적으로 큰 비례이득 60, 적분이득 150의 조합을 선택해 적용하였다.



(a) 계단응답 (Step response)



(b) 보데선도 (Bode plot)

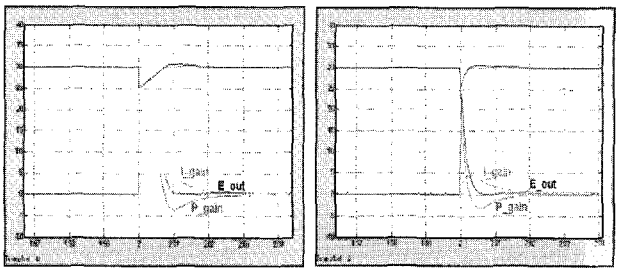
그림 12 제어기 이득변화에 따른 시뮬레이션 결과
Fig. 12 The results of simulation with control gain change

3.5 입력제한기의 영향

입력제한기에 따른 제어기의 시뮬레이션 모델에서의 출력파형을 그림 13에 나타냈다. 입력제한기에 따라 제어기의 오차 출력값이 25에서 5로 줄어들고, 응답속도도 늦어진다. 입력제한기의 비선형성을 나타내는 구간적 선형 함수를 그림 14(a)에 나타냈고, 이에 상응하는 기술함수(describing function)를 그림 14(b)에 나타냈으며, 그 기술함수의 관계식을 식 (11)에 나타냈다[5].

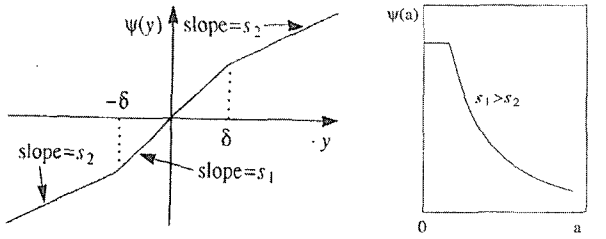
본 연구에서 그림 14와 식 (11)에 관계된 파라메타 값들은 $s_1 = 1,\ s_2 = 0,\ \delta = 5$ 이다. 식 (11)을 이용해 오차출력(a)의 크기가 25일때의 기술함수 출력값($\Psi(a)$)은 0.25에 해당하며, 이 값을 시뮬레이션 모델 내 제어기 출력단에 적용하여 응답 해석에 활용하였다. 그림 15에 연산증폭기 포화시 입력제한기 유무에 따른 계단응답 및 보데 선도를 나타냈다. 입력제한기 존재에 따라 이득여유는 증가하였고, 위상마진은 감소함을 확인하였으며, 대역폭은 줄어듬을 또한 확인하였

다. 이러한 입력제한기 존재 유무에 따른 특성변화를 표3에 나타냈다.



(a) 제한기 유 (with limiter) (b) 제한기 무 (w/o limiter)

그림 13 제한기에 따른 시뮬레이션 결과
Fig. 13 The results of simulation depend on limiter

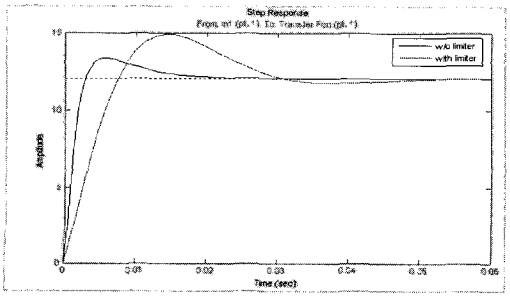


(a) 구간적 선형 함수 (Piecewise-linear function)
(b) 기술함수 (describing function)

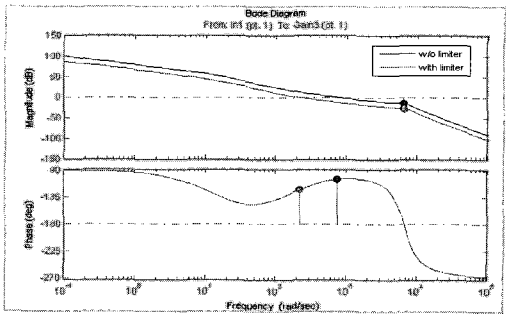
그림 14 구간적 선형 함수와 기술함수
Fig. 14 Piecewise-linear function and its describing function

$$\Psi(a)=\frac{2(s_1-s_2)}{\pi}\left[\sin^{-1}\left(\frac{\delta}{a}\right)+\frac{\delta}{a}\sqrt{1-\left(\frac{\delta}{a}\right)^2}\right]+s_2 \qquad (11)$$

여기서, $\Psi(a)$: 기술함수 출력
a : 오차출력



(a) 계단응답 (Step response)



(b) 보데선도 (Bode plot)

그림 15 제한기 존재 유무에 따른 응답 비교
Fig. 15 The response compare with/without limiter

표 3 제한기에 따른 시스템 특성
Table 3 The system characteristics depend on the limiter

	대역폭 [rad/sec]	위상여유 [°]	이득여유 [dB]	비고
제한기 유	303	57.9	27.2	P-60, I-150
제한기 무	946	75.5	15.1	

4. 실험 및 평가

제어기 및 필터부를 제외한 제작된 발전기 형상을 그림 16에 나타냈다. 우측에 정류부가 위치하며, 우측 상부에 출력용 단자가 위치한다. 그리고 좌측 라인은 계자권선 인출라인으로 제어기에 연결된다. 몸체내부에 회전자가 위치하며, 이 회전자에는 계자 여자용 영구자석도 함께 포함된다. 그리고 몸체 외부에는 고정자 및 고정자권선이 위치하며, 계자권선은 후방부에 동심원 형태로 배치된다.

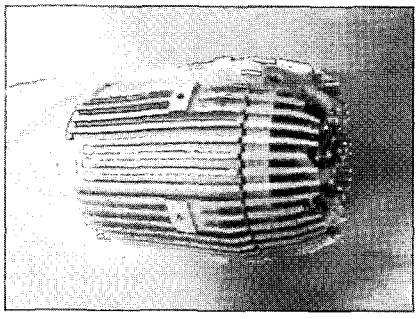


그림 16 HPG 사진 (제어기 별도)
Fig. 16 Photograph of the HPG without its controller

그림 17에 앞에서 언급한 제어이득 조합값들을 적용한 과도응답 (부하변화 10A→50A) 특성을 나타냈다. 입력제한기 특성으로 인해 시뮬레이션 결과 대비 특성 차이가 크게는 나타나지 않지만, 비례이득 60, 적분이득 150의 특성이 대역폭 및 안정성 관점에서 근소한 차이지만 우수함을 확인할 수 있다.

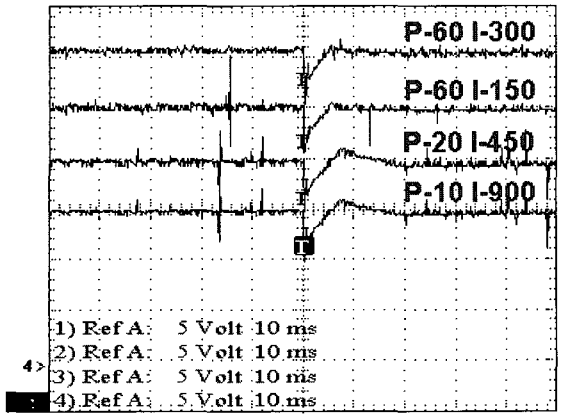


그림 17 제어이득 변화에 따른 과도응답 특성
Fig. 17 Transient response with control gain change

5. 결 론

본 연구를 통해 HPG의 시뮬레이션 모델이 만들어졌고, 이 모델링 과정에 필요로 하는 발전기 파라메타 값들을 결정하는 방법이 함께 제안되어졌다. 모델링 및 시뮬레이션을 통해 위상마진 및 대역폭 특성을 증대시키는 최적이득값들을 찾아 적용시켰으며, 이 값들이 적용된 HPG의 성능이 실험을 통해 확인되었다.

HPG의 성능 분석을 통해, 대역폭 특성은 발전기의 계자권선 특성에 주로 의존되며, 과도특성은 고정자단 특성에 따르고, 응답특성중 과응답 및 안정성은 제어이득에 의해 결정되게 되나 입력제한기 특성으로 인해 그 차이가 크게는 반영되지 않음을 확인할 수 있었다. 따라서 계자권선과 고정자단 설계가 발전기 특성을 크게 좌우하며, 부하의 용량 및 특성에 따른 계자권선과 고정자단에 대한 설계 최적점을 찾는 절충(trade-off) 연구가 발전기 성능향상에 중요함을 확인하였다.

본 연구를 통해 개발된 HPG는 대역폭 및 안정성 관점에서 우수한 특성을 보임을 확인하였고, 따라서 빠른 특성의 부하들에 대한 요구조건을 잘 만족할 수 있을 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Edward A. Erdelyi, "Synthesis of high speed homopolar alternators and theory of solid rotor electrical machines", Depart of Electrical Engineering Boulder, University of Colorado, 1970

[2] I. Boldea, Z.X. Fu, S.A. Nasar, "High- Performance Reluctance Generator," *Proceedings of the IEE*, Vol. 140, No. 2, pp. 124-130, 1993, March.

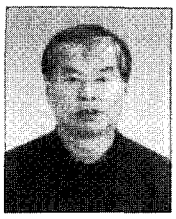
[3] John Van de Vegte, "Feedback Control Systems," third edition, Prentice Hall International Editions, 1994.

[4] William G. Dunbar, Sidney W. Silverman, "Cruise Missile Power System", Electrical Power System Technology, Boeing Aerospace Company, March. 1986

[5] Hassan K. Khalil, "Nonlinear Systems", Macmillan Publishing Company, March. 1992.

저 자 소 개

김인수(金仁秀)
1962년 1월 30일생. 1984년 경북대 전자공학과 졸업. 1996년 충남대 전기공학과 졸업(석사). 2002년~현재 충남대 정보통신공학부 박사과정. 1984년~현재 국방과학연구소 책임연구원.



성세진(成世鎭)
1948년 7월 15일생. 1973년 서울대 공업교육과 졸업. 1975년 동 대학원 졸업(석사). 1988년 일본 동경공업대 대학원 졸업(공박). 현재 충남대 정보통신공학부 교수. 2001년 당 학회 회장 역임.