

소형 가스터빈 엔진용 발전기 성능개선 및 모델링 연구

A Study on the Performance Improvement and Modeling of Generator for Small Gas Turbine Engine

김인수* 윤현로*
Insoo Kim Hyunro Yoon

ABSTRACT

In this paper, the performance improvement and modeling of small onboard generator were described. As the characteristics of the field coil which are a major parameters of generator were improved, the system bandwidth could be increased, therefore the generator could also be satisfied with fast characteristic loads. Established the brief control model of the generator, it could be possible to do the analysis of generator performance, and improve the operational stability of the generator system using the control model.

주요기술용어(주제어) : Generator(발전기), Alternator(발전부), PCU(제어부), Homopolar(단극), Modeling(모델링), Bandwidth(대역폭), Phase Margin(위상여유), Filter(필터), Negative Load(부성부하)

1. 서론

가. 배경

최근 국내에도 항공 및 유도무기 관련 산업의 비중이 커지면서 관련 전장품의 개발 수요가 발생하게 되었다. 소형 항공기 엔진 관련 전장품의 중요 부품중 하나인 발전기의 개발 필요성이 제기되어, 경량 및 고효율의 요구조건을 만족하는 호모폴라(homopolar, 이하 HP) 발전기의 개발이 도입기술을 기반으로 90년대 말에 1차로 이루어 졌고, 이의 운용 과정에서 고승압 및 고속 부성(negative) 부하 시스템에 부합하는 제어 대역폭을 만족하고, 출력 필터특성도 보강

된 새로운 발전기의 개발 수요가 제기되어, 최근에 2차 수정 개발이 이루어 졌다^[1].

본 논문에서는 이 HP 발전기의 2차 개발품에 대한 성능개선 내용을 기술하였고, 발전기의 컴퓨터 시뮬레이션 모델을 제안하였으며, 그 모델에 필요한 주요 파라메타값을 제시하였다. 그리고 제안된 발전기 모델의 분석을 통해 전체 시스템 안정성을 살펴보았다. 본 발전기의 수정개발 자료와 시험평가 결과를 바탕으로, 향후 개발될 소형 항공기용 탑재 발전기의 전기적 규격 정립에 기초가 되기를 바라며, 나아가 유사체계의 관련 전원규격 정립에도 기여할 수 있기를 기대한다.

나. 호모폴라 발전기의 동작원리^[2]

소형 항공기에 주로 적용되는 발전기의 한 종류인 호모폴라 인덕터(Homopolar Inductor) 발전기가 경

† 2004년 5월 12일 접수~2004년 9월 17일 심사완료
* 국방과학연구소(Agency for Defense Development)
주저자 이메일 : kisslamp@chol.com

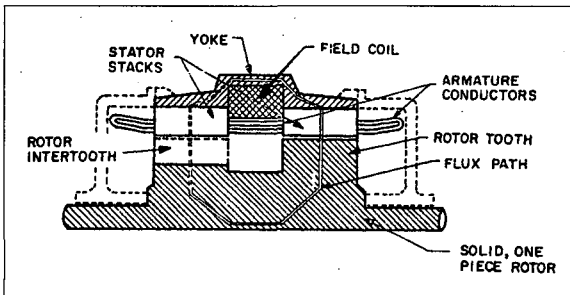
량 및 고효율의 특징과 관련소재 확보의 어려움으로 군용 및 항공 산업에서 제한적으로 사용되어졌으나, 최근 관련 소재인 희토류 물질의 개발이 활성화되면서 다양한 분야에서 그것의 활용이 재조명되고 있다.

1924년 라퐁(Laffoon)은 HP 발전기의 동작을 가변 리럭턴스 머신(variable reluctance machine)으로서 설명하였는데, 이 머신내의 회전부인 톱니모양 로타는 필드코일에 의해 여자된 플럭스(flux)를 양(positive)의 방향 내에서 최소와 최대사이에서 맥동하게 한다. 아마추어 도체에 유기되는 전압은 플럭스 쇄교(linkage)의 변화에 의해 발생 된다.

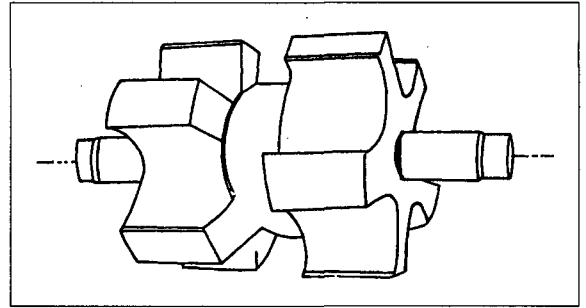
1942년 워커(Walker)는 HP 발전기의 이론을 재검토하였는데, 그의 논문에서 취급한 HP 발전기의 도해를 그림 1에 나타냈다. 이 발전기는 공통프레임에 고정된 두 개의 박층 고정자 코어로 구성되는데, 이 박층 모양들에는 두 고정자에 공통인 아마추어 권선을 갖기 위하여 가는 홈이 파여지게 된다. 계자(field) 권선은 동심코일로서, 그 축이 발전기의 축과 일치하게 된다. 플럭스 라인중 하나를 그림 1에 나타냈다.

HP 발전기의 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(generator)을 같도록 상쇄되게 되는데, 이는 두 개의 고정자 섹션에 같은 자속 변화를 제공하기 위함으로, 이는 다시 두 고정자 코어내의 아마추어 도체에 유도되는 기전력이 더해지기 위해서이다. 가변 에어갭 리럭턴스 및 고정자 홈들을 그림 3에 나타냈다.

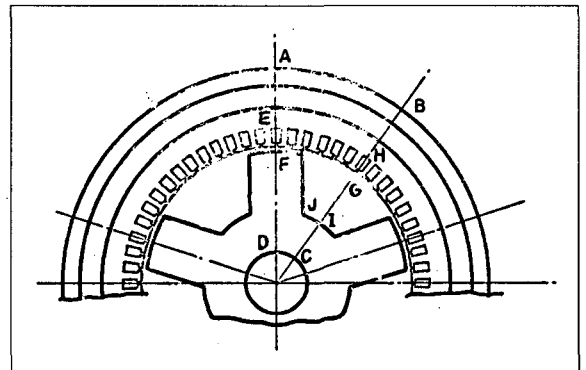
아마추어 도체에 유도되는 기전력의 주기는 플럭스



[그림 1] Axis Cross Section of HPA



[그림 2] Shape of Solid Rotor



[그림 3] Radial Cross Section of HPA

변조의 완성주기에 일치하게 된다. 두 개의 연속된 톱니 중앙간의 거리는 보통의 동기발전기의 더블-폴 피치에 대응된다. 고정 권선내에 유도되는 주파수는 회전자 돌극의 수와 회전자가 운용되는 속도에 의해 결정된다. 만일 회전자에 p 개의 돌극이 있으면, 회전자의 1회전에 의해 각 고정자 도체에 p 사이클의 기전력이 유도되게 된다. 만일 회전자가 초당 n회전으로 회전하면, 유도전압의 주파수는 다음 식 (1)과 같이 된다.

$$f = pn \text{ [Hz]} \quad (1)$$

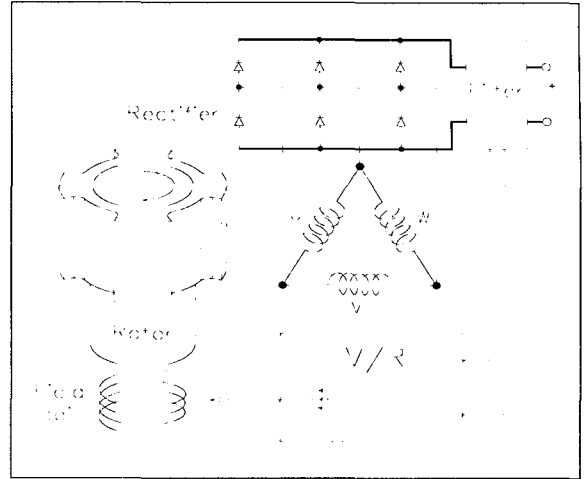
HP 발전기의 장점은 그것의 단순성과 고속회전에서의 동작을 가능케 하는 강인한 구조이다. 그리고 어떤 브러쉬나 슬립링 그리고 회전자 권선이 필요 없기 때문에 HP 발전기는 매우 신뢰성 있는 기기가 되게 된다. 반면 HP 발전기의 단점은 고정자 조립체의 철이 그것의 최대 능력으로의 동작을 방해하게

되는데, 이는 자속이 양의 최대에서 음의 최대까지의 최대 편위(excursion)를 통한 스윙을 하지 않기 때문이다.

2. 발전기 설계 및 성능개선

가. 시스템 설계 및 규격

HP 발전기의 2차 개발품에 대한 수정설계 제작은 발전기의 성능향상 및 운용신뢰성 향상을 목표로 이루어졌다. 수정개발 발전기의 블록도를 그림 4에 나타냈으며, 수정개발 발전기의 주요 제작 요구규격을 표 1에 나타냈다.



[그림 4] Block Diagram of HP Generator

나. 성능개선

수정개발 발전기의 성능 및 신뢰성 향상을 위한 성능개선 주요항목을 표 2에 나타냈다.

[표 2] Main Items of Performance Improvement

[표 1] Specification of Modified Generator

항 목		규 격
정상상태 전압		29 ±0.5VDC
정격용량		80A@정상상태전압
운용 RPM		20,300~29,500
과부하용량		105A@정상상태전압, 2분 운용(130% 부하)
레귤레이션	2A 부하 이내	34VDC max
	10%~100% 부하	±1.5V 이내
리플 전압		0.5V _{RMS}
과도상태 전압 (50%↔100% 부하*)		정상상태전압 ± 9V, 회복시간 50ms 이내
냉각방식		엔진흡입공기의 자연냉각
크기 및 무게	길이	242.5mm 이내
	지름	116.7mm 이내
	무게	5kg 이내

항 목	세 부 내 용
제어 성능향상	<ul style="list-style-type: none"> 필드코일 권선수 감소(감쇄율 감소)를 통한 상승 응답성능 향상 회전자와 고정자 사이 공극(air gap) 증대를 통한 하강 응답성능 향상
출력필터 성능 향상	<ul style="list-style-type: none"> 출력 필터소자로 인덕터를 추가하여 필터성능(Quality Factor) 향상
발전용량 현실화를 통한 응답 성능 향상	<ul style="list-style-type: none"> 발전용량 현실화를 통한 제어 대역폭 증대(170A급에서 80A급으로) 잉여공간을 활용한 최적 필터 적용

3. 출력 필터 특성과 시스템 안정성

가. 출력 필터 특성에 따른 시스템 안정성^[3]

전원소스는 라인필터(line filter)를 달게 됨으로서, 실제로 불안정상태(unstable and oscillate)가 될 수 있다. 군사 분야의 많은 EMI 엔지니어들은 CS101 시험을 통해 이 현상을 경험할 수 있다. 이 시험에서 오디오 변압기(audio transformer)가 시험대상 장비의 전원 입력선(power input lead)에 직렬로 연결되

* : 미국의 Cruise Missile Power System^[5]에서는 10%↔85%의 부하변동 적용

는데, 이는 시험대상 장비의 전원 입력단에 낮은 주파수의 신호를 결합(coupling)시키기 위함이다. 초기 셋업(setup) 단계에서, 오디오 변압기의 1차 측을 종종 미종단(underminated) 상태로 두게 되는데, 이때 변압기는 전원소스에 매우 큰 인덕턴스로 나타나게 된다. 이와 같은 높은 인덕턴스는 전원소스를 발진시키기에 충분한 요인이 된다.

C'uk과 Middlebrook이 이 분야에 대한 많은 해석적 분석을 수행해 왔다. 이 현상을 설명하는데, 두개의 직관적 접근이 있는데, 하나는 부성저항 발진(negative resistance oscillator)이며, 다른 하나는 낮아지는 루프게인(loop gain)이다.

부하단의 DC/DC 컨버터가 전원선 해당 주파수에서 부성저항 입력특성을 갖고, 그리고 전원 소스의 필터가 양성(positive) 임피던스 특성을 갖는다면, 부성저항 발진의 조건이 성립되게 된다. DC/DC 컨버터가 부성 입력 임피던스 특성을 갖는 것은 쉽게 설명이 되는데, 이는 컨버터의 입력전압이 내려가게 되면, 동일 전력을 유지하기 위해 더 많은 전류를 요구한다는 점에서 확인할 수 있다.

발진이 존재할 조건으로서, 컨버터는 부성 입력저항 특성을 가져야 하며, 필터는 반드시 큰 양성 저항을 가져야 한다. Middlebrook은 안정성의 일반적 기준을 다음 식 (2)를 통해 제시하고 있다. 이 식으로부터 소스의 임피던스는 작아야 하며, 부하의 임피던스는 커야 됨을 알 수 있다. 그리고 부하단 컨버터의 높은 승압비는 전체 시스템의 안정성에 부정적 영향을 미침을 또한 보여주고 있다.

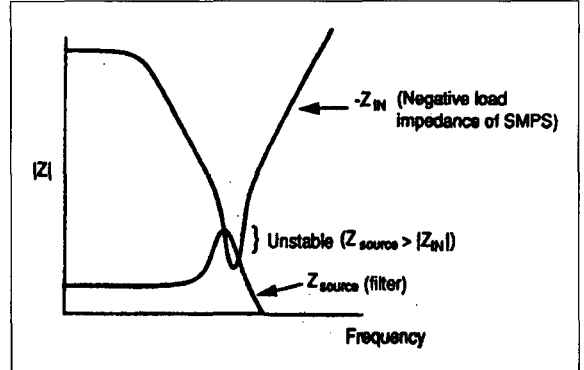
$$\frac{|Z_S|}{|\mu^2 \cdot Z_O|} \ll 1 \tag{2}$$

Z_S : Source impedance(with filter)

$$\mu = \frac{V_{in}}{V_{out}} \text{ (converter)}$$

Z_O : 부하단의 open loop impedance

안정성 문제는 높은 Q(Quality Factor)값을 갖는 필터의 공진주파수에서 일반적으로 증명되는데, 이



[그림 5] Instability caused by High-Q Filters with close resonances

때 필터의 임피던스는 필터의 특성 임피던스의 약 10~100배까지 나타나고, 따라서 비감쇠(Undamped) 필터는 전원소스 발진에 필요한 조건을 만족하게 된다.

안정성 개념의 핵심은 부하단 DC/DC 컨버터의 입력 임피던스와 전원소스(필터포함)의 출력 임피던스를 비교하는 것이다.

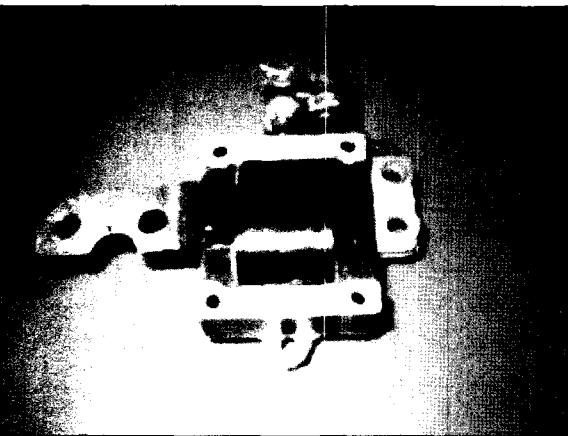
다음의 그림 5에 전원소스의 출력임피던스와 부하단 DC/DC 컨버터의 입력임피던스 사이의 상호작용에 따른 시스템 안정성 문제를 제시하였다. 그림에 의하면 시스템 안정성 확보를 위해서는 전원소스와 부하단 컨버터의 임피던스가 겹치지 않기 위한 설계가 필수적 요소이다.

나. 출력 필터 특성 개선에 따른 시스템 안정성 고찰

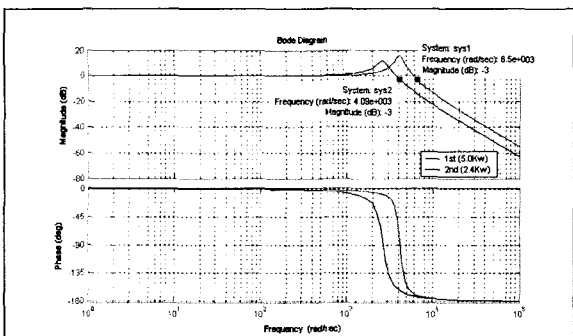
발전기 용량 현실화를 통해 확보된 공간에 출력 필터소자로 노말모드(normal mode) 인덕터를 추가 적용하여 시스템 안정성 향상을 추구하였다. 표 3에 발전기 내부 고정자 단 인덕턴스를 포함한 1, 2차 발전기의 필터특성을 나타냈으며, 그림 6에 설계 제작된 필터형상(2.4kW급) 및 그것의 이득 응답특성을 5kW급 발전기의 특성과 함께 나타냈다. 필터 회로의 Q값(권장값 : 2~4)은 6.4에서 3.75로 변경되어 권장값 범위를 만족하고 있으며, 공진주파수는 666Hz에서 424Hz로 낮아져 부하단 부성부하특성 사이에서 야기될 수 있는 시스템의 불안정성을 줄였다.

[표 3] Filter Characteristics of 1st and 2nd Alternator

항목	1차 발전기 (5kW 급)	2차 발전기 (2.4kW 급)
L_g (발전기 L)	28 μ H	50 μ H
L_f (필터 L)	-	25 μ H
C_f (필터 C)	2040 μ F	1880 μ F
$Z_C (= \sqrt{\frac{L}{C}})$	117m Ω	200m Ω
$Q (= \frac{R}{Z_C}, R=0.75\Omega)$	6.4	3.75
f_o (공진주파수)	666Hz	424Hz
f_c (Corner frequency)	1035Hz	651Hz



[그림 6] Filter Assembly(Inductor and Capacitor)



[그림 7] Filter Gain and Phase of 1st and 2nd Alternator

4. 시스템 모델링 및 시뮬레이션

가. 모델링

HP 발전기의 등가모델을 제어기 회로와 함께 그림 8에 나타냈다.

발전기의 고정자(stator) 권선에 유기된 전압 e_g 는 회전속도 n 과 계자 (field)에 의해 형성된 자속 Φ 의 함수이다.

$$e_g = K_1 n \Phi \tag{3}$$

e_g : 발전기 유기전압

K_1 : 상수

n : 회전수 (RPM)

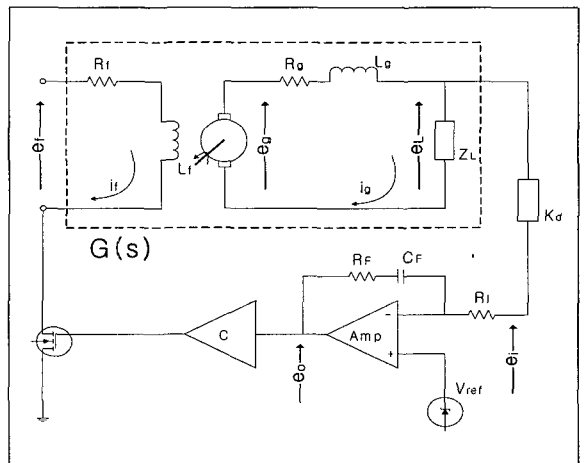
Φ : 자속

자속(Flux)은 계자전류(Field Current)와 계자코일의 권선(turn)수, 그리고 자속 경로(path)상에 재료 및 구조에 따른 자기저항 R 에 관계된다. 이 관계는 자속 path 상 사용재료의 포화점에 도달할 때 까지는 선형관계로 볼 수 있으므로 다음과 같이 표시할 수 있다.

$$\Phi = K_2 i_f \tag{4}$$

K_2 : 상수 (N(권선수)/R(자기저항))

i_f : 계자전류 (A)



[그림 8] Equivalent Model of HPA

식 (1)과 (2)에서 다음 식 5를 얻는다.

$$e_g = \ddot{K}_g i_f \tag{5}$$

$$K_g = K_1 K_2 n [V/A] \text{ (발전기상수)}$$

그림 6에서 계자전압 e_f 와 계자전류 i_f 의 관계식은 다음과 같다.

$$e_f = R_f i_f + L_f \frac{di_f}{dt} \tag{6}$$

식 (5)과 식 (6)에서 계자전류 항을 소거하여 다음 식 (7)을 얻는다.

$$\frac{e_g}{e_f} = \frac{K_g/L_f}{s + R_f/L_f} \tag{7}$$

제어대상 플랜트 전체의 전달함수 $\frac{e_L}{e_f}$ 를 구하려면 발전기 출력단에 연결된 실제부하특성을 알아야 하나 여기서는 단순화를 위해 저항부하 1Ω으로 하여, 전달함수 $\frac{e_L(s)}{e_f(s)}$ 를 구하면 식 (8)과 같게 된다.

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

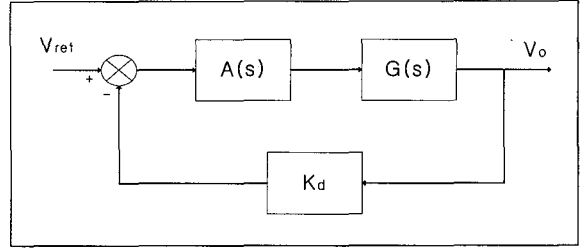
$$= \frac{K_g/L_f}{s + R_f/L_f} \cdot \frac{z_L}{sL_g + z_L + R_g} \tag{8}$$

발전기 전압을 피드백(feedback)하여 일정전압을 얻는 전압제어회로는 PI 제어기로서, 제어기의 전달함수는 다음 식 (9)로 나타낼 수 있으며^[4], 발전기의 제어 블록도를 그림 9에 나타냈다.

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

$$= \frac{K(\tau s + 1)}{s} \tag{9}$$

with $K = 1/(R_I C_F)$, $\tau = R_F C_F$



[그림 9] Control Block Diagram of HPA

비교기 이득은 필드코일 인가전압을 비교기 입력단의 삼각파 최대값으로 나눈값으로 식 (10)과 같이 표현된다.

$$K_{comp} = \frac{V_{Field}}{V_{Sw}} \tag{10}$$

그림 8에서 A(s)는 HP 발전기의 PI 제어기(비교기 포함) 전달함수이며, G(s)는 발전기 전달함수이다. 그리고 K_d는 출력전압과 기준전압 사이의 순방향 이득값이다.

나. 시스템 파라메타 획득

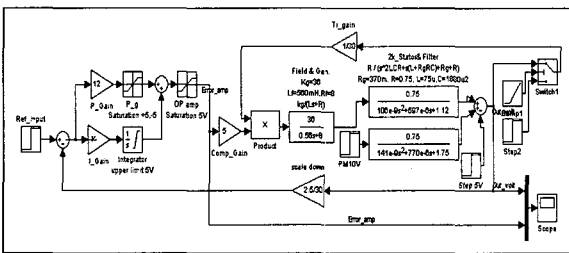
발전기의 모델 매개변수를 표 4에 나타냈다. 발전기 상수(K_g)는 RPM 최대 영역(29,500), 필드전류 1A에서의 출력전압을 기준으로 하였다. 필드 인덕턴스값(L_f)은 계측기 적용시 주파수 및 직류 바이어스 값에 따른 계측값의 변화로 인해, 발전기 개루프 실험값에서 도출하였으며, 발전기 저항값(R_g) 또한 개루프 상태에서 부하변동에 따른 출력전압 특성으로부터 획득하여, 부하전류 투입시 고정자 권선에서 발생하는 역방향 자속을 포함시켜 반영하였다. 그리고 발전기 고정자 권선의 인덕턴스는 과도상태 하강응답에서 전류변화에 대한 출력단 커패시터의 전압상승 특성에서 획득하였다^[5].

라. 시뮬레이션 결과

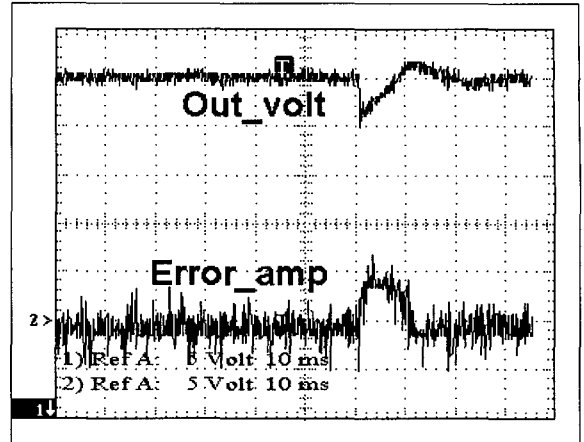
표 3의 발전기 모델 매개변수를 적용한 모의분석 모델을 그림 10에, 과도응답에 따른 발전기 응답특성 결과를 그림 11에 각각 나타냈다. 모의분석에서 과도응답 (40A→80A)에 대한 특성을 얻기 위해 40A 부

[표 4] Model Parameters of Generator

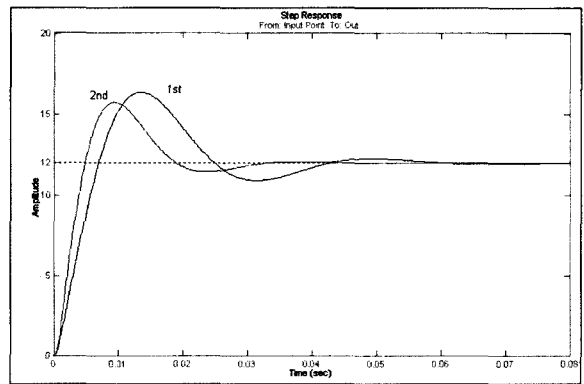
항목	Symbol	2차 발전기 (80A정격)	1차 발전기 (160A정격)
발전기 상수	K_g	38V/A	33V/A
필드인덕턴스	L_f	560mH	960mH
필드저항	R_f	8Ω	12Ω
발전기인덕턴스	L_g	50uH	28uH
발전기 저항	R_g	0.37Ω	0.28Ω



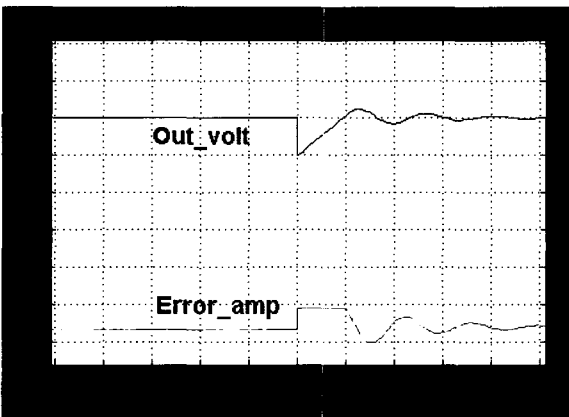
[그림 10] Simulation Model of Generator



[그림 12] Test Results of Transient R.



[그림 13] Step Response of 1st and 2nd Gen.



[그림 11] Simulation Results of Transient R.

하 출력단에 스텝입력 (-5V)을 적용하여 수행하였으며, 자체 여자용 PM(Permanent Magnet) 발전부는 별도 블록으로 출력단에 더하여 처리했다. 그리고 RPM은 최대 조건에서 분석했는데, 이는 기동시 엔진 RPM이 최대가 되는 특성을 반영하였으며, 기동순간 구동기 동작에 따라 발전기는 과도상태에서의 운용특성을 갖게 된다.

본 발전기 모델에서 시스템 특성의 주 파라메타는 필드코일의 저항값(R_f) 및 인덕턴스값(L_f)으로서, 발전기 특성은 이 값들에 크게 좌우되며, 고정자 단 및 필터 특성은 상대적으로 적은 영향을 미치는 것으로 분석되었다.

모의분석 결과를 입증하기 위해 발전기 출력전압과 내부 제어기의 에러 앰프 출력전압을 계측한 결과를 그림 12에 나타냈다.

라. 발전기 1, 2차 모델 검토

발전기 1, 2차 모델에 대한 응답특성 검토를 PM 발전부 및 비선형 요소들을 배제한 상태에서 수행하였다. 스텝응답 특성을 그림 13에 나타냈으며, 이 결과 2차 발전기가 1차 발전기에 비해 빠른 응답특성을

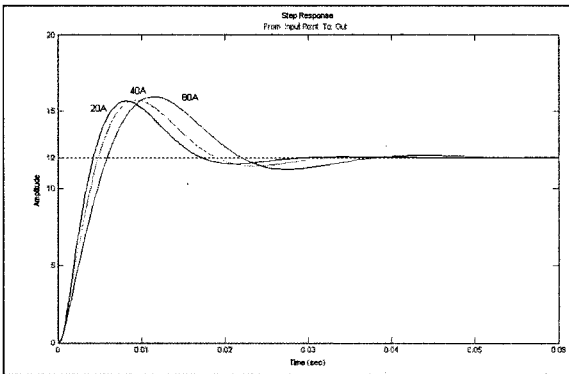
확인할 수 있었다.

마. 부하 및 RPM 변화에 대한 응답 변화

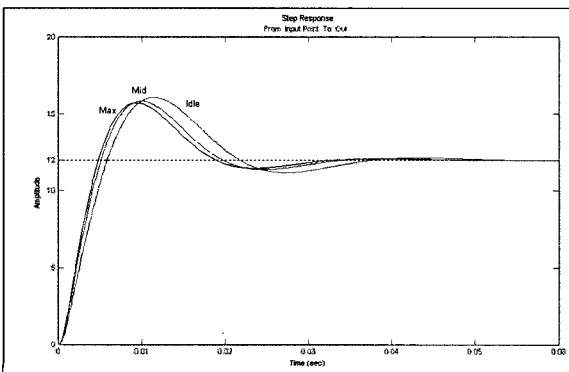
발전기의 부하에 따른 응답변화를 살펴보기 위해 앞의 50%부하를 기준으로, 100% 및 20% 부하에서의 적용 응답특성을 그림 14에 나타냈다. 부하증가에 따라 응답이 늦어짐을 확인할 수 있었으며, 위상마진 및 대역폭도 부하 증가와 함께 감소함을 확인할 수 있었다.

엔진의 RPM에 따른 발전기의 응답변화를 살펴보기 위해 앞의 50%부하를 기준으로, idle, mid, max RPM에서의 응답특성을 그림 15에 나타냈다. RPM 감소에 따라 응답이 늦어지고, 위상마진도 다소 감소함을 확인하였다.

이상의 분석결과 종합을 표 5에 함께 나타냈다. 시스템 안정성 관련 주파수 응답해석에서 최소위상계의



[그림 14] Step Response to Load Change



[그림 15] Step Response to RPM Change

[표 5] Results of Simulation

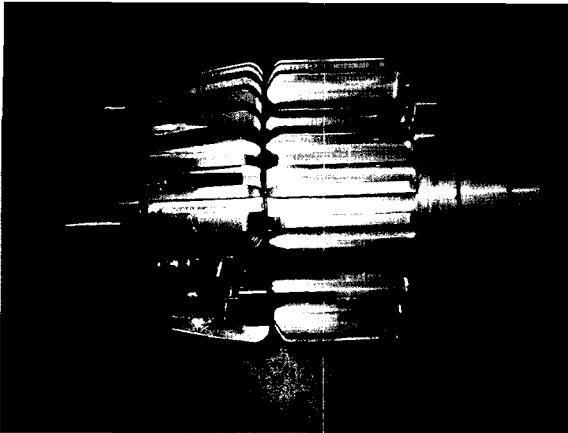
모 드		항 목	대역폭	위상 여유	이득 여유	비고
			[rad/sec]	[°]	[dB]	
성능 개선 (2.4kW)	RPM 변화	idle	403	43.7	28.2	부하 40A
		mid	470	46.0	26.4	
		max	500	47.0	25.7	
	부하 변화	20A	592	47.5	23.5	Max RPM
		40A	500	47.0	25.7	
		80A	399	44.9	29.4	
기존 (5kW)			333	41.3	36.1	40A, Max

안정성 조건으로 위상여유 및 이득여유 모두 양의 값을 가져야 하고, 음의 값을 가지면 불안정하게 된다. 적절한 위상여유 및 이득여유는 시스템 파라메타의 다양한 조건으로부터의 변화에 대한 시스템의 안정성을 보장하게 되는데, 일반적으로 추천되는 위상여유는 30°~60° 사이의 값을, 이득여유는 6dB보다 큰 값을 각각 권장하고 있다. 이 범위의 값들에서는 개루프(open loop) 이득과 시상수가 특정 범위까지 변할 지라도 최소위상계의 안정이 보장된다.

표 5에 나타난 수정개발 발전기 모델 분석결과를 분석해보면, 위상여유 및 이득여유 모두 양의 값이므로 발전기 시스템은 일단 안정한 시스템으로 분석된다. 그리고 시스템 파라메타의 변화에 따른 안정성 보장 권장값 항목에서, 위상여유 및 이득여유 모든 항목에서 만족하고 있으며, 동일조건에서 2차 발전기가 1차 발전기에 비해 대역폭의 증대 및 위상마진의 증대를 기한 것으로 나타났다.

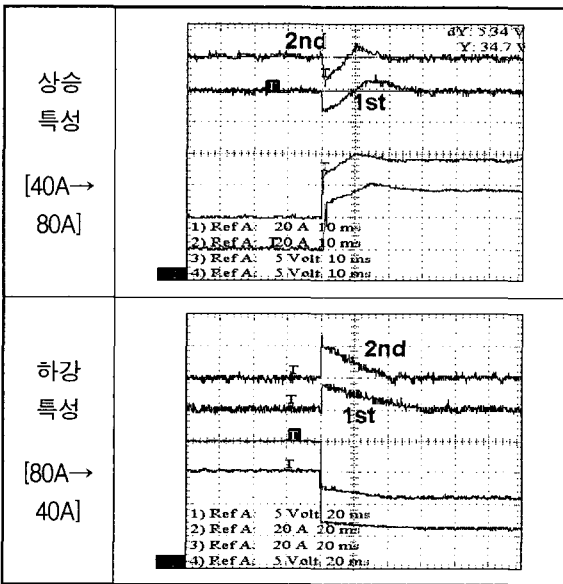
5. 시험평가

개발된 2차 발전기 형상을 그림 16에 나타냈으며, 성능시험 결과 중 과도특성 결과를 표 6에 1차 발전기와 함께 나타냈다. 모의분석 결과에서 나타났듯이, 신규발전기의 응답특성이 빠름을 확인할 수 있었다.



[그림 16] Figure of Improved Generator

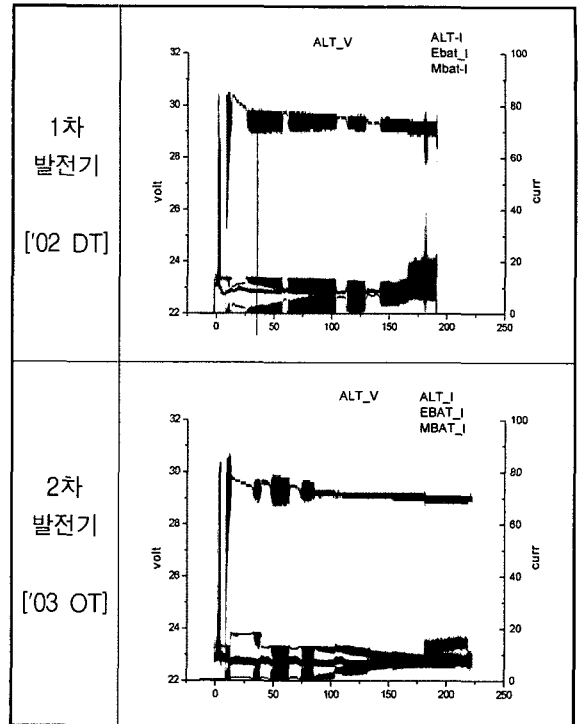
[표 6] Compare of Transient Response



개발된 발전기의 적용시험 결과를 동일 모드의 1차 발전기 개발시험 결과와 함께 표 7에 나타냈다. 2차 발전기 운용시험에서는 1차 발전기 개발시험에서 나타났던 회피동시의 전류요동 및 전압상승은 더 이상 나타나지 않았으며, 이는 빨라진 응답특성 및 필터성능 개선 등의 요인으로 판단된다.

배터리와의 전류 교변에 따른 발전기 리플전압 값도 다소 줄어든 결과를 확인할 수 있었다. 초기구간 상대적으로 적은 리플전압 값은 최대 RPM 구간에서

[표 7] Results of Applied Test



발전기 부하가 적을 때 발전기의 PM 발전부에 의한 출력만이 작용할 때의 현상으로 분석됐으며, 1차 발전기의 PM부 용량이 크에 따라 이 현상이 연장됨을 볼 수 있다.

6. 결론

본 논문에서는 소형 가스터빈 엔진용 탑재 발전기의 성능개선 내용을 기술하였다. 개선 내용으로는 출력필터 성능을 개선하여 시스템 안정성을 높였으며, 발전기 용량 감소를 통해 발전기 제어 특성의 주요 변수인 필드코일 특성을 개선하여, 발전기 시스템 대역폭을 증가시킴으로써 빠른 부하들에 대한 응답특성을 향상시켰다. 또한 발전기의 제어모델을 완성하여, 적용시스템과의 연계 해석을 가능케 하여 전체시스템의 운용 안정성을 향상시킬 것으로 기대된다.

본 연구의 부수적 결과로 개발시험 과정에서 나타난 전류요동 및 전압상승 현상을 함께 설명할 수 있

는 단초를 제시하였으며, 추가 연구내용으로는 고속 부성부하특성 모델을 수립하여, 발전기 모델과 함께 분석함으로써 시스템 모델링 및 시뮬레이션 기반을 확립할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] 김인수, 윤현로, “함대함 유도탄용 엔진발전기 성능개선 연구”, 연구보고서 MADC-410-040092, 국방과학연구소, 2004.
- [2] Edward A. Erdelyi, “Synthesis of high speed homopolar alternators and theory of solid rotor electrical machines”, dec. 1970.
- [3] Mark I. Nave, “Power Line Filter Design for Switched-Mode Power Supply”, Van Nostrand Reinhold, 1991.
- [4] John Van de Vegte, “Feedback Control Systems”, third edition, Prentice Hall International Editions, 1994.
- [5] William G. Dunber, Sideney W. Silverman, “Cruise Missile Power System”, AFWAL-TR-85-2113, Boeing Aerospace Company, Mar. 1986.