

論文2003-40SC-6-11

고속 발전기 직접 구동 방식의 터보 제너레이터 시스템 개발

(The Development of the Turbo Generator System with Direct Driving High Speed Generator)

盧民植*, 朴勝燁**

(Min-Sik Rho and Seung-Yub Park)

요약

본 연구에서는 고속 발전기를 고속의 가스 터빈 엔진에 직결 장착한 터보 제너레이터 시스템의 개발 연구결과를 보인다. 고속 발전기를 직결 장착한 터보 제너레이터 시스템은 터보 샤프트 발전 시스템에 비하여 무게, 크기, 윤활 시스템, 시스템의 복잡성 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 고속 회전체 시스템의 직접 운전에 따른 안정된 고속 제너레이터의 설계, 가스 터빈 엔진의 시동 시의 신뢰성 있는 점화를 위한 고속 모터 구동 알고리즘 구현, 고 주파수의 출력 전력을 상용 교류전력 혹은 필요한 직류 전력을 얻기 위한 전력 변환 장치의 설계를 요구한다.

Abstract

This paper presents results of the development of the turbo generator system with structure which is HSG(High Speed Generator) installed directly to gas-turbine engine. Turbo generator with a high speed motor-generator directly has many advantages aspects of weight, size, lubrication system and complexity of the system compared of conventional turbo generator system with a gear box. But because of direct high speed operation of the high speed generator, we have to need stable high speed motor driving algorithm for perfect engine ignition when engine start. Also we have to need the design of the power conditioning unit(PCU) for converting high speed AC output power to conventional AC power or needed DC power.

Keyword : turbo generator, high speed generator, high speed motor, micro turbine, turbo shaft

I. 서론

터보 제너레이터(turbo generator)는 가스 터빈 엔진 시스템의 축 상에 고속 발전기를 직결 장착한 구조를

가지며, 시스템에서 필요로 하는 전력 및 동력을 공급하는 장치를 말한다. 가스터빈에 고속발전기를 직결 장착한 터보제너레이터는 일반적인 기어박스를 채택하고 있는 터보 샤프트 발전 시스템과 구성 및 운전방법에서 많은 차이를 보인다^{1,2)}.

* 正會員, 三星 테크윈 파워 시스템 研究所
(Samsung Techwin Power System R&D Center)

** 正會員, 昌原 大學校 電子工學科
(Dept. of Electronics Engineering Changwon National University)

接受日字:2003年6月10日, 수정완료일:2003年9月8日

<그림 1>은 터보 샤프트 발전 시스템의 구성도를 나타낸다. Motoring 모드를 살펴보면, 기어박스와 브러시 DC 모터로 점화에 필요한 고속 회전을 만든다.

점화 후 가스터빈 엔진이 자체적으로 회전을 유지할

수 있는 운전 속도(Self-sustain rpm) 이상이 되면 연료의 연소에 의하여 회전 속도를 유지할 수 있으며, 연료량 제어에 의해서 운전점에 도달한다. Generating 모드를 살펴보면, 정상상태 속도에 이르면 브러시 DC모터로 입력되는 전류를 끊고, 엔진의 회전 속도를 기어박스를 통해 감속하여 브러시 DC 모터에 전달해 직류 전력을 만든다. 또한 기어박스를 통해 감속된 주축에 저속의 주 발전기가 부착되어 있어 엔진의 일정 속도 운전과 기어박스의 감속비를 이용하여 일정 주파수를 가진 교류 전력을 만든다. 이 시스템에서 브러시 DC 모터의 운용상의 단점, 저속 주 발전기의 크기 및 중량, 기어박스를 위한 대 규모 유회시스템에 의한 부가적인 시스템의 복잡성이 야기된다.

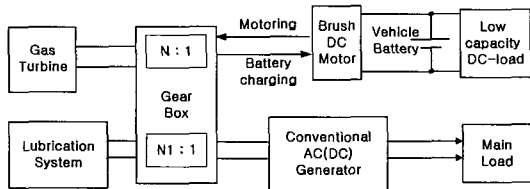


그림 1. 터보 샤프트 발전 시스템의 구성도
Fig. 1. The configuration of the turbo shaft generation system.

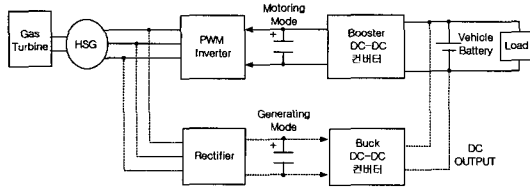


그림 2. 고속 모터-제너레이터 이용하는 터보 제너레이터의 구성도
Fig. 2. The configuration of the turbo generator with high speed motor-generator.

고속 모터-제너레이터를 이용하는 터보 제너레이터는 <그림 2>와 같이 구성된다.

Motoring 모드를 살펴보면, 배터리로부터 전력을 공급받아 구성된 Boost converter를 통하여 인버터의 DC 단 전압을 생성한다. 인버터는 엔진시동 알고리즘 및 HSG(HSM) 구동 알고리즘에 따라 엔진의 가속도 및 설정된 프로파일로 고주파 교류 전류를 생성하여 HSG를 속도제어를 하게 된다.

Generating Mode를 살펴보면, 가스터빈의 고속 회전에 의해 HSG는 고주파의 교류전력을 출력하며, 이 고

주파의 교류전력은 그림에 나타나듯이 고속 정류부에 의해 고전압의 직류로 변환된다. 이 정류된 고전압의 DC는 구성된 Buck converter를 통하여 필요한 전압의 직류로 변환되어 배터리 충전과 동시에 부하 시스템에 DC 전력을 공급한다.

본 연구에서는 직류 전력 8kW를 공급하는 차량형 터보제너레이터의 개발 결과를 보이며 효율적인 전력 시스템 구성을 위해 시스템을 디지털화하였으며, 시동 및 발전시 하드웨어의 양방향 사용이 가능토록 구현하였다.

II. 제안하는 터보 제너레이터 시스템

제안하는 시스템은 구성을 최소화 및 최적화하기 위해 Buck-Boost converter, Inverter, Rectifier의 하드웨어 장치를 양방향으로 구성하고 모드와 로직에 따라 하드웨어적인 회로 결선이 제어되도록 <그림 3>과 같이 설계하였다.

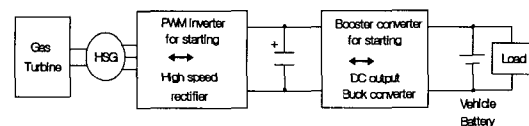


그림 3. 제안된 터보 제너레이터 시스템 구성도
Fig. 3. The proposed system configuration of the turbo generator.

본 연구에서의 제안된 시스템의 설계를 위해 다음의 시스템 및 장치들을 개발하였다.

- 가) 가스터빈 엔진시동 및 발전에 관한 알고리즘 연구.
- 나) 모터-제너레이터용 고속 발전기(HSG,HSM) 개발
- 다) HSG의 고속 Motoring을 위한 Inverter.
- 라) 양방향 Buck-Boost converter

III. 엔진 시동 및 발전 알고리즘의 구현

1. 가스터빈엔진 시동 스케줄

본 연구에서는 터보 샤프트 시스템의 시동 프로파일을 분석하여 <그림 4>와 같이 고속 발전기를 이용한 가스터빈 엔진 시스템의 시동을 위한 모터링 프로파일을 구현하였다.

- 가) 본 연구에서는 HSG(HSM) 구동을 위하여 센서리

스 벡터제어[본 논문 V절 참조]를 제안한다. 초기의 가속 추정이 이루어질 수 있는 속도(<그림 4>에서 W1[t1] 구간)까지는 제안하는 Open loop 프로파일에 따라 모터링을 시도한다. 이후 가속 패턴에 맞추어 목표 속도(W2 구간)까지 전류제어를 통하여 가속 패턴을 유지한다.

나) 가스터빈엔진의 점화는 W1[t1] 구간과 W2[t2] 구간에서 이루어지며 W*[t*] 시점에서 연료 분사를 시작하며 흡입되는 공기유량과 연료의 혼합가스에 점화를 수행한다. 점화가 되면 안정적인 점화유지를 위해 정해진 가속패턴에 따라 정해진 속도인 W2[t2]까지 계속적으로 고속 모터의 운전을 한다. 가스터빈엔진이 점화가 되면 가스 터빈의 연료연소에 의해 자체에서 출력되는 동력이 가속을 위한 고속 모터 구동 인버터가 회전을 위해 출력하는 소비 전력을 감소시키게 된다.

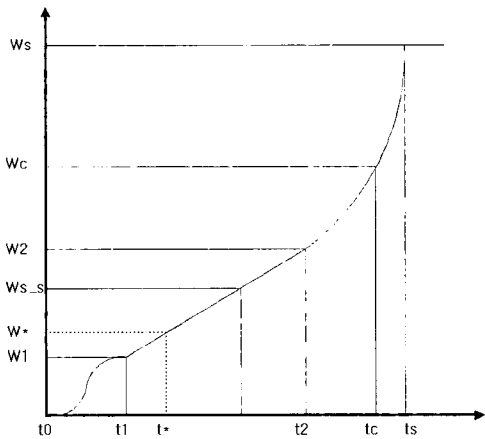


그림 4. 가스터빈 엔진 시스템의 제안된 시동 스케줄
Fig. 4. The proposed starting schedule of the gas turbine engine system.

다) 가스터빈 엔진이 공급되는 연료의 연소에 의해 자체적인 회전력으로 고속회전을 유지할 수 있는 속도 Ws_s(self-sustain speed : 공력 및 기계적 회전체 특성에 의해 결정) 이상의 목표한 속도에 이르면 고속 모터의 구동을 종료하고 고속 모터는 발전기 모드로 동작한다.

라) 가스터빈 엔진의 기계적인 출력이 전기적인 출력을 공급할 수 있는 운전 점 속도 즉 W2이상의 임의의 속도 Wc[tc](HSG의 출력전압이 설계한 전력변환장치 입력을 만족하는 시점)부터 정격 운전 점 속

도인 Ws 구간까지 전력변환장치(Buck converter)를 통해 배터리 충전과 부하 측에 필요한 전력을 공급한다.

2. 시동 시스템 설계를 위한 엔진 회전 부하 측정
시동 스케줄에 따른 시동 시스템을 설계하기 위해서는 엔진 회전 구간에서 소모되는 소모 파워 계산과 엔진 가속 구간에서의 엔진 가속 기울기 선정이 필요하다. 본 연구에서는 고속 모터 드라이버로 실제 모터링에 필요한 속도 구간에서 정밀 파워 측정 장비로 모터링 구간내의 주요 포인트에서 정 속도 운전으로 가스터빈에서의 소모 전력을 측정하였다.

엔진 회전체에 대한 Torque 방정식은 식 (1)과 같다.

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_{Load} \quad (1)$$

정속도 운전 시는 각 가속도가 없으므로 정속도 운전시의 인버터 Power를 구하면 식 (2)와 같으며, 다음 <그림 5>의 Fan Load 그래프 패턴을 나타낸다.

$$P_e = T_e W = B\omega^2 + T_{Load}\omega \quad (2)$$

엔진이 일정 가속도를 가지고 회전시에 인버터의 출력파워를 계산하면 식 (3)과 같으며 다음 <그림 5>의 가속 그래프 패턴을 나타낸다.

$$P_e = T_e \omega = J\omega \frac{d\omega}{dt} + B\omega^2 + T_{Load}\omega \quad (3)$$

여기서, $J = Inertia$, $\omega = Speed$, $B = Friction Coefficient$ 이다.

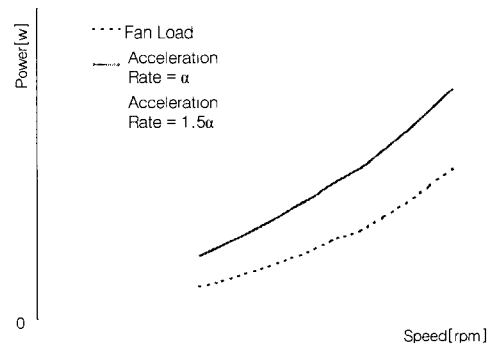


그림 5. 인버터 출력 파워 그래프 패턴
Fig. 5. The inverter output power graph pattern.

앞의 소모 시동파워는 엔진 점화 없이 순수 인버터

단독으로 속도프로파일에 따라 모터링 할 때 필요한 파워를 의미한다. 그러나 엔진점화가 이루어지면 인버터에서 출력되는 Torque 및 Power는 식 (4), (5)와 같다.

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_{Load} - T_{engine} \quad (4)$$

$$P_e = (J \frac{d\omega}{dt} + B\omega + T_{Load} - T_{engine})\omega \quad (5)$$

가속도에 따라 소모되는 파워는 인버터 파워 입력단의 Boost converter 설계의 기준이 된다. 본 연구에서는 점화 특성 및 모터링 속도 해석, Battery 전압의 변동, 및 Booster/인버터의 효율 등을 고려하여 Boost converter 최대 출력률 6 kW 이상으로 설계하였다.

3. High Speed Generator의 발전 mode

가스터빈 엔진이 정상 점화를 이루어 정상 운용 속도에 이르면 HSG는 950 Hz 이상의 고주파 교류 전력을 출력하며, 이 발전된 전압은 초고속 다이오드에 의해 정류되어 고 전압의 직류 전력으로 변환된다. 본 연구에서는 생성된 고 전압의 직류를 8kW 출력의 Buck converter를 통해 직류 28V 로 변환 하였다.

IV. HSG 설계 및 개발

본 연구에서 설계 개발한 HSG의 사양은 <표 1>과 같다.

표 1. HSG 설계 사양
Table 1. The specification of the HSG/HSM.

정격속도	60,000 rpm
정격출력	25 kW
출력파형	정현파
선간 정격전압	235 Vac(Line to Line)
극 수	2 극
결선 방식	3상 Y 결선
상 저항, R_s	10.5 mΩ
상 인덕턴스, L_s	68 μH
냉각방식	공냉식
손실	1,440 W
효율	94.6%

HSG 로터의 구조는 SmCo의 원통 자석을 CAN으로 고속 회전시의 안정성을 고려하여 Retaining ring을 가

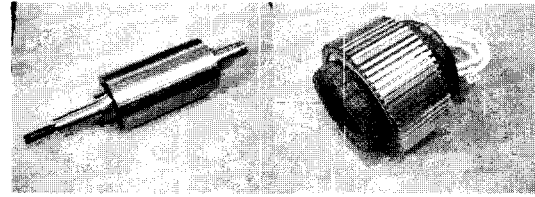


그림 6. 고속발전기의 로터와 스테이터
Fig. 6. The rotor and stator of the HSG.

지고 있으며 냉각 공기 유입을 위해서 블로워가 장착되어 있다. 고정자는 자체 냉각팬(Cooling jacket)을 가지고 있으며, 하우징에 장착되어 있다. 발전기 내부로 유입된 냉각공기는 하우징 내부와 고정자 냉각팬(Cooling jacket) 사이와 회전자와 고정자 내부 사이로 열 해석에 따라 나누어져 공기가 흐르도록 설계하였다.

V. 고속 발전기(HSG/HSM) 구동용 Inverter의 설계

본 연구에서는 HSG 고속 구동용 인버터 설계 시 아래의 사항을 고려하였다.

- ① HSG(HSM)는 상간 저항 및 누설 인덕턴스가 범용적인 저속 모터에 비해 그 값이 매우 적어 회전을 위한 고주파 전류 제어에 많은 어려움이 있다.
- ② HSG는 고속 회전에 따라 속도 센서의 기계적 취부가 상당히 어렵다.

따라서 본 연구에서는 정밀 고속 연산을 수행하는 DSP(TMS320VC33)를 이용하여 벡터 연산 및 전류 제어를 실시하였으며, 센서리스 알고리즘으로 인버터를 구동하였다.

3상 영구자석 동기전동기의 등가회로는 고정자 좌표계에서의, 전압방정식은 식(6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + pL_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \quad (6)$$

3상 영구자석 동기전동기 동기좌표 d-q 전압방정식은 식 (7)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_e L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_f \end{bmatrix} \quad (7)$$

본 연구에서 벡터 제어 기법을 이용하여 전동기 제어를 구현하였으며, 공간벡터 PWM 기법을 이용하여

구동하였다^[5]. 이로써 고속 구동시스템에서의 센서의 신뢰성 문제 및 장작 공간 확보의 어려움을 해결할 수 있었다. 정해진 속도 패턴을 생성하기 위하여 <그림 8>과 같은 프로파일로 설정 속도를 인가하였다.

VI. Buck-Boost converter 설계

본 연구에서는 시스템의 효율적인 이용과 크기 무게를 고려하여 양방향 컨버터 방식을 채택하였다. 양방향 컨버터로 시스템을 구성하는 경우 개별적인 컨버터를 각각 사용하여 시스템을 구성하는 경우에 비해 시스템의 가격 및 크기를 절반으로 줄일 수 있다. 본 연구에서는 구성한 Buck - Boost converter의 단위 모듈은 <그림 9>와 같이 구성하였다.

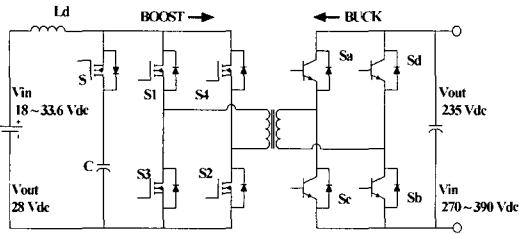


그림 9. 양방향 풀 브릿지 컨버터의 구성.
Fig. 9. The configuration of the Bi-directional full-bridge converter.

표 2. Buck-Boost converter 설계 사양
Table 2. The specification of the Buck-Boost converter.

시스템 기능	Booster	Buck
정격출력용량	6 kW이상	8 kW
정격입력전압	18-33.6 Vdc	270-390 Vdc
정격출력전압	235 Vdc	28 Vdc
스위칭 주파수	60 kHz	60 kHz
필터인덕터(Ld)	6.7 μH	6.7 μH
트랜스포머권선비	1 : 7.5	7.5 : 1
스위칭 방식	ZVS	ZVS
효율	88 % 이상	85 % 이상
Topology	Current-fed	Voltage-fed
입출력 $\frac{V_0}{V_1}$	$\frac{N_2}{N_1} \frac{1}{2(1-D)}$ $0.5 < D < 1$	$2 \frac{N_2}{N_1} D$ $0 < D < 0.5$

본 연구에서는 8kW 대용량 시스템의 Buck Converter의 설계가 필요하였으며, 단일 모듈로 시스템을 구성하는 것은 단일 소자의 제한 등으로 인해 현실적

으로 어려움이 있어 다중 모듈로 구성하였으며 설계 사양은 <표 2>와 같다^[7].

특히 Boost converter 모드로 동작 시 본 시스템과 같이 입력 전압이 낮고 입력 전류가 높은 경우 변압기의 누설 인덕턴스에 의해 전류의 변화속도(di/dt)가 제한되어 과도 시간이 증가되어 스위칭 주파수가 제한된다. 이 누설 인덕턴스로 인한 스위칭 주파수 제한은 단위 모듈의 용량이 커질수록 크게 나타나 다시 변압기 크기의 증가로 유발하여 전체 시스템의 크기를 과도하게 증가시킨다. 따라서 전체 시스템의 복잡도, 크기, 효율, 스위칭 주파수와 변압기의 크기, 그리고 스위칭 소자들의 용량 등을 종합적으로 고려하여 단위 모듈을 2kW로 하고 스위칭 주파수를 60kHz로 선정하였으며 전체 시스템을 4 병렬로 구성하도록 하였다.

VII. 실험결과 및 분석

본 연구에서는 시스템의 상태 측정을 위하여 Tektronix 전류 프로브[A6042XL, AM503B], 전류센서(LEM)와 전압센서(Differential Voltage probe)를 개별 부분에 설치하였다.

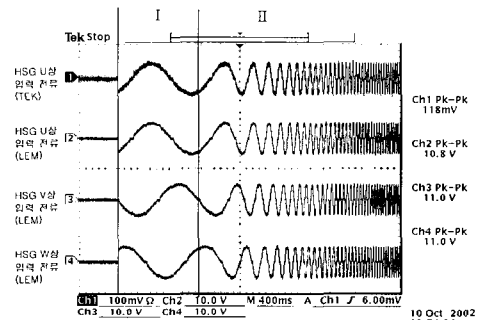


그림 10. 모터링 시작 시 3상 정 전류 파형.
Fig. 10. The 3-phase constant current waveform when motoring is started.

<그림 10>의 파형은 모터링 시의 초기 분석 파형으로 TeK Current Probe는 20A/10mV 설정(정 전류계산은 118*20/10으로 236A(Peak_Peak)이다.)되었으며, Scale 비교결과 실제 사용할 센서(LEM)은 21.5A/1V의 scale을 갖는다.

<그림 11>의 파형은 정속도 20,000 rpm(330 Hz 전류)에서의 HSG U상 입력 전류 및 2개의 다른 상간 전압을 나타낸 것이다.

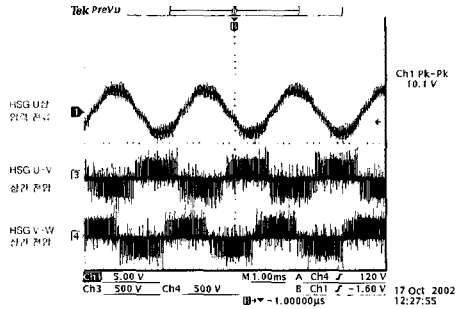


그림 11. 정속도시 모터링 전류
Fig. 11. The motoring current of the HSM at constant speed.

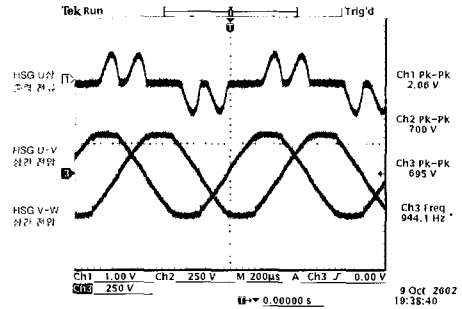


그림 14. 발전 모드시 시스템 전류
Fig. 14. The system current of the HSG at generating mode.

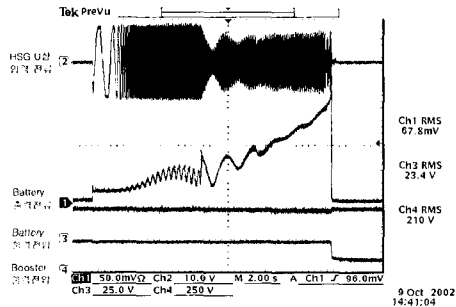


그림 12. 비 점화시 시스템 모터링 전류
Fig. 12. The system motoring current of the HSM at no ignition.

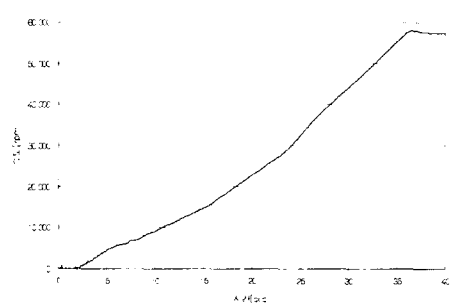


그림 15. 실제 운용 시 가스터빈 엔진 속도
Fig. 15. Gas turbine engine speed during operation.

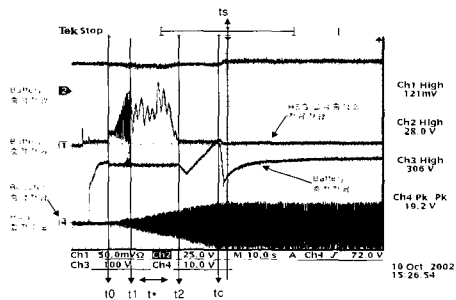


그림 13. 점화 시 시스템 전류 및 전압
Fig. 13. The system current and voltage of the HSM at ignition.

<그림 12>의 파형은 점화 없이 설계한 Boost converter 용량까지 인버터로 모터링 한 결과 파형으로 측정된 입력 단(배터리) 전류는 Boost converter 용량 한계점에서 약 350A로 출력되며, 입력 전압은 20Vdc 로 측정되며 Boost converter 의 효율 88%를 고려할 때 설계 값인 6 kW 이상 전력이 출력됨을 알 수 있다.

<그림 13>의 파형은 점화시의 시스템 각부 전류 형태와 HSG의 상 전류를 나타내었다. 비 점화시의 입력

모터링 상 전류 보다 점화에 따라 입력전류가 대폭 감소함을 알 수 있다. Channel 4는 F-V Converter의 출력력으로 HSG 축 상에 설치된 Magnetic pickup 센서에 의해 실제 회전 시 비례적으로 출력되는 주파수와 전압을 측정할 값이다. t_s 시간 이후 발전 모드로 동작되어 Buck converter에 의해 배터리가 충전됨을 알 수 있다.

<그림 14>의 파형은 엔진이 정상속도에 도달하여 HSG가 발전 모드로 동작할 때의 상 전류의 형태 및 상간 전압의 형태를 나타내는 데이터이다. 고속 다이오드 정류에 의한 HSG에 출력되는 상 전류 및 상간 전압을 보인다.

<그림 15>의 파형은 가스터빈 엔진의 엔진 제어기에서 측정된 실제 운용 시 가스터빈 시동부터 정상 점화까지의 엔진 회전 속도를 측정된 결과이다.

VIII. 결론

본 연구에서는 차량형 터보제너레이터에 대한 개발 결과를 보이며, 제안하는 시스템의 장점을 살펴보면 다

음과 같다.

첫째, 기어박스형 터보소프트 시스템에서의 대규모 오일 시스템 및 부가장치 또한 제거하여 시스템의 구조를 간단히 하였다.

둘째, 직결 구동된 HSG를 고속 회전 시킴으로써 에너지 대비 크기(부피)를 대폭적으로 크게 하였다.

셋째, HSG는 자체 공냉식 냉각구조 채택함으로써 발전기 냉각을 위한 부가적인 시스템을 제거하였다.

넷째, 디지털 전력 변환 장치(PCU)에 의해 광대역의 엔진 운용 속도를 허용하였으며, 가스터빈 엔진의 부분 부하특성의 효율 문제를 개선하였다.

앞으로의 전력 수요 급증의 예상으로 해외의 선진업체를 중심으로 터보 제너레이터에 대한 연구가 수년전부터 진행되어왔으며, 초 고속 운전 구동부 설계의 난점으로 가스터빈 엔진 제작사에서 주로 개발되어왔다. 본 연구는 국내에서는 최초의 연구에 따른 개발품으로써 가격 측면, 기술 측면, 실용화 측면에서 최적화하여야 할 부분이 많이 존재하리라 판단한다. 앞으로 에너지의 소형화, 경량화, 독립화의 추세에 따라 고속운전을 통한 전력에너지 생산에 대한 많은 관심과 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참 고 문 헌

[1] Hamilton, S.L., "Micro turbine generator program", Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences,

2000., Volume : Abstracts, pp103-103, 2000.

[2] O. Aglen, "A High-Speed Generator for Microturbine", Electrical Machines and Power Electronics Department of Electrical Engineering KTH, Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm. 2001.

[3] James L. Kirtley Mary Tolikas and Movhoub Mekhiche, "High Speed Motor Driver for Industrial Applications", IEMD '99, pp244-248, 1999.

[4] Edward Ognibene and Jerome Kiley, Evgeeny Holmansky, and Francis Nimlett, "High Speed Motor Drive Development for Industrial Applications", IEEE, 1999.

[5] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, Jeong-Hyeck Kwon and Jong-Sub Shin, "Implementation of Sensorless Vector Control for Super-High Speed PMSM of Turbo-Compressor", IEEE/ISA Cicago Annual Meeting, 2001.

[6] Longya Xu and Chagjiang Wang, "Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Control schemes for PMSM in Super High Variable Speed Operation", IEEE/ISA, 1998.

[7] H.S.Choi, J.W.Kim, J.H.Lee and B.H. Cho, "Modeling analysis and Design of 10kw Parallel module ZVZCS Full Bridge PWM Converter", IEEE APEC, pp.321-326, 2000.

저 자 소 개



盧民植(正會員)
 1996년~1996년 : 창원대학교 전자공학과 학사. 1998년 : 창원대학교 전자공학과 석사. 1999년~현재 : 삼성 테크윈 파워시스템 연구소 선임 연구원. <주관심분야 : 디지털 드라이버 설계, 전력 변환 장치

설계>



朴勝燁(正會員)
 1981년 : 고려대학교 전기공학과 학사. 1984년 : 고려대학교 전기공학과 석사. 1988년 : 고려대학교 전자공학과 학과 박사. 1988년~현재 : 창원대학교 전자공학과 교수. <주관심분야 : 플랜트 제어 및 고

장진단, 모델링>