

터보 제너레이터의 시동기 제어에 관한 연구

A Study on the Starter Control of the Turbo Generator

노민식*, 박승엽
(Min-Sik Rho and Seung-Yub Park)

Abstract : This paper presents the result of a study on the starter control for a turbo generator. Because a starter in gear box type turbo-generator system is composed of gearbox and brush DC motor, it should be replaced with High Speed Generator(HSG) in HSG type Turbo-generator. Therefore, it is necessary to design a new starting algorithm and starter. In gearbox type system, brush DC motor is rotated to the designed speed using low voltage-high current battery power. After brush DC motor speed is increased to several times by gearbox, gas turbine engine can be rotated to designed starting speed. If we implement a starter with High Speed Generator(HSG), it is necessary to drive high-speed generator to high-speed motor. High-speed generator with permanent magnet on rotor has a low leakage inductance for driving high-speed rotation, and it is necessary high DC link voltage for inverter when High-speed generator is driven to high speed. This paper presents result of development of the boost converter for converting high voltage DC from low battery voltage and design of the inverter for controlling a high frequency current to be injected to motor winding. Also, we show performance of the designed starter by driving the turbo generator.

Keywords : turbo generator, high-speed generator, micro turbine, turbo shaft, starter

I. 서론

터보 제너레이터(Turbo generator)란 가스터빈 엔진 시스템에 발전기를 장착하여 독립적으로 전력 생산 및 엔진에서 출력되는 동력을 시스템에 공급하는 장치를 말한다. 기계적인 구조상 기어박스형과 고속 발전기형으로 나뉘어진다[1, 2]. 그 형태는 왕복 엔진에 비해 크기, 무게, 진동, 수명, 사용연료, 운용 고도 등에서 월등한 장점을 지닌 가스터빈 형식을 택하고 있다. 터보 제너레이터는 군수, 민수 및 산업용 등으로 그 활용분야가 매우 다양하여 항공기의 경우 공중 및 지상에서의 주 엔진 시동, 유압동력, 전기력 및 환경 제어 시스템에 필요한 공압을 제공하게 되며 지상 장비의 경우 보조 전력 및 여압용 압축공기공급용으로, 그 밖의 민수 산업용으로는 대형건물의 전력발전용, 난도, 건설현장 등에서 비상발전 등에 사용되고 있는 등 그 용도가 증가되고 있는 추세이다.

고속 발전기형 터보 제너레이터의 특징을 살펴보면 시동 시 필요한 고속의 엔진 회전을 고속 발전기를 전동기로 이용하여 직접 회전 구동에 의해 회전속도를 얻는다. 또한 발전 시 가스터빈의 초고속 회전 속도가 직접 고속 발전기로 입력되고 고속발전기에서는 고 주파수의 교류전력이 출력되며 이 고주파 교류전력은 디지털 전력 변환 장치를 통하여 필요한 형태의 교류 혹은 직류 전력으로 변환되어 사용자에게 공급된다. 이러한 특징은 기계적인 회전속도 증감용 기어박스, 시동용 브러시 DC 전동기, 발전용 저속 교류 발전기를 채택하고 있는 기어박스형 터보 제너레이터 시스템의 구동 특징과 매우 상이함을 갖는다. 기어박스형 터보 제너

레이터 시스템은 시동 시 시동용 DC 브러시 전동기의 회전 속도를 기어박스를 이용하여 증속한 뒤 시동에 필요한 가스터빈 엔진의 회전 속도를 얻는다. 또한 발전 시 가스터빈 엔진의 고속 회전 속도를 기어박스를 이용하여 저속 교류 발전기에 적합한 회전 속도로 감속하여 에너지를 전달한다.

가스터빈을 이용한 전력 생산 장치로는 주로 기어박스형 터보 제너레이터 시스템이 현재 대부분을 차지하고 있다. 고속 발전기형 시스템은 기어박스형 시스템에 비하여 무게, 크기, 윤활 시스템, 시스템의 복잡성 측면에서 많은 장점을 가지고 있다. 그러나 고속 회전체의 직접 운전에 따른 안정된 고속 발전기의 고속 전동기로의 고속 회전을 위한 인버터 설계, 가스 터빈 엔진의 신뢰성 있는 시동시의 점화를 위해서는 공연비 제어가 필요하며 이를 위한 고속 전동기 구동 알고리즘, 고속 발전기의 설계, 고 주파수의 교류 전력을 상용 교류전력 혹은 필요한 직류 전력을 얻기 위한 전력 변환 장치의 설계를 요구한다.

본 논문에서는 배터리를 이용한 고속 발전기형 터보 제너레이터의 시동 시스템을 연구하였으며, 이를 위해 신뢰성 있는 시동 알고리즘, 시동 알고리즘에 따라 고속 전동기 고속 회전을 위한 인버터 드라이버와 인버터에 높은 전압의 DC 링크 생성을 위해 배터리 전압을 승압하는 대용량 승압기에 대한 연구 결과를 보인다.

II. 터보 제너레이터 시스템의 구성 및 운전 방법

1. 기어박스형 터보 제너레이터 시스템

기어박스형 터보 제너레이터 시스템의 큰 구성을 살펴보면 시동 에너지 저장용 배터리, 시동용 브러시 DC 전동기, 속도 증속(감속)용 기어박스, 기어박스 윤활을 위한 윤활 시스템 그리고 가스터빈 엔진으로 구성된다. 엔진의 전체운용을 살펴보면 10,000 rpm이하의 브러시 DC 전동기를 정

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2003. 8. 25., 채택확정 : 2004. 1. 5.

노민식 : 삼성테크윈 파워시스템연구소(mindori.rho@samsung.com)

박승엽 : 창원대학교 전자공학과(psy@sarim.changwon.ac.kr)

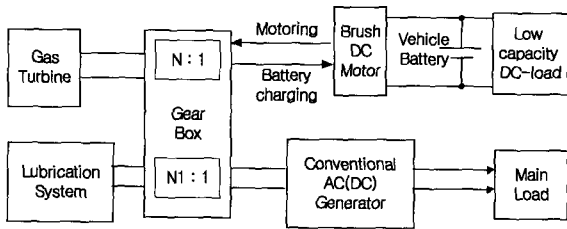


그림 1. 기어박스형 터보 제너레이터 시스템의 구성도.
Fig. 1. The gearbox type turbo generator system configuration.

격 속도로 기동시켜 기어박스(5:1 이상의 기어 비)를 통해 속도를 증속하여 가스터빈 엔진의 시동을 위한 속도를 얻는다. 가스터빈 엔진의 특징상 엔진이 자체적으로 회전을 유지할 수 있는 운전 속도(Self-sustain speed) 이상이 되면 연료의 연소에 의하여 회전 속도를 유지할 수 있으며, 연료량 제어에 의해서 운전 점 속도에 도달하여 정상 상태에 이르게 된다. 정상 상태 속도에 이르면 브러시 DC 전동기로 입력되는 전류는 끊어지며, 엔진의 회전 속도는 엔진 시동 시 이용한 증속기어를 감속기어로 운용하여 브러시 DC 전동기에 감속된 회전력을 가한다. 따라서 브러시 DC 전동기는 발전기로 동작하며 사용자는 직류전력을 얻을 수 있다. 또한 기어박스를 통해 감속된 주축에 저속의 주 발전기가 부착되어 있어 엔진의 일정 속도 운전과 기어박스의 감속비를 이용하여 일정 회전 속도를 얻어 필요한 교류전력을 생산한다. 이 시스템에서 브러시 DC 전동기의 운용상의 단점, 저속 주 발전기의 크기 및 중량, 기어박스를 위한 대 규모 윤활시스템에 의한 부가적인 시스템의 복잡성이 야기된다. 기어박스형 터보 제너레이터 시스템의 개략적인 구조를 살펴보면 다음과 같다.

2. 고속 발전기를 장착한 터보 제너레이터 시스템

본 논문에서 독립전원(배터리) 및 고속 발전기를 이용하는 터보 제너레이터는 그림 2와 같이 구성된다. 그림 2에서 보는 바와 같이 전체시스템은 Motoring mode와 Generating Mode로 구분되어 동작된다.

그림 2에서 Motoring Mode시 배터리에서 전력을 공급받아 구성된 승압기를 통하여 인버터의 DC 링크 전압을 생성한다. 인버터는 엔진 시동 알고리즘 및 고속 전동기 구동 알고리즘에 따라 엔진의 가속도 및 설정된 프로파일로 고주파 교류 전류를 생성하여 고속 전동기의 속도제어를 하게 된다. 고속 회전 중에 점화가 이루어지며 점화 후 시동 프로파일에 따라 가스터빈은 운용 속도에 이른다.

Generating Mode시 가스터빈 엔진의 정상 운용에 의해 고속 발전기는 고주파의 교류전력을 출력하며, 이 고주파의 교류 전력은 그림에 나타나듯이 고속 정류부에 의해 고 전압의 직류로 변환된다. 이 정류된 높은 전압의 직류는 구성된 직류-교류(DC-AC) 그리고 직류-직류(DC-DC) 변환기에 의해 필요한 형태의 전력으로 변환되어 배터리 충전과 동시에 사용자에게 전력을 공급한다.

본 논문에서는 터보 제너레이터의 Motoring Mode를 위한 시동 시스템과 시동 알고리즘을 설계하였으며 다음의 시스템 및 장치에 관한 연구결과를 보인다.

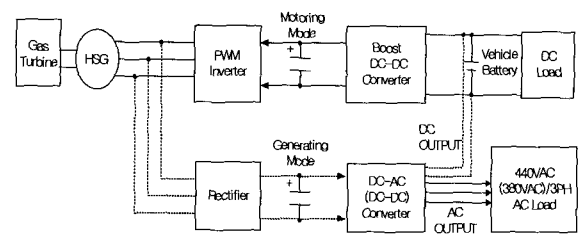


그림 2. 고속 발전기형 터보 제너레이터의 구성도.
Fig. 2. HSG type turbo generator configuration.

- 가) 배터리 전압 승압용 대용량 승압기(Boost converter)
- 나) 고속 발전기 구동용 인버터(Inverter).
- 다) 가스터빈 엔진 시동 알고리즘.

III. 가스터빈 엔진 시동기 개발

1. 승압기 용량 결정을 위한 파라미터 측정

가스터빈 엔진은 안정된 점화와 시동을 위해 공연비 제어가 이루어져야 하며 이를 위해 인버터를 통한 시동 구간 동안 회전 속도 제어가 필요하다. 또한 시동 구간 중 점화 구간이 설정되어 점화 구간까지는 인버터 자체 전기 출력으로 엔진의 회전 속도를 유지하여야 한다. 이후 점화가 되면 엔진 점화에 따른 엔진 회전 토크가 발생하여 엔진 회전을 위한 인버터의 전기 토크를 감소시킨다. 본 논문에서는 인버터를 적용하기 전 고압의 공기로 엔진 회전을 시켜 점화에 대한 특성을 파악하였다.

이에 따라 점화 구간을 최적 공연비에 따라 엔진 회전 속도 10,000 ~ 15,000 rpm 사이로 결정하였으며, 인버터의 최대 전력 출력 점을 15,000rpm으로 정하고 점화 이후 가속률에 의해 소모되는 파워를 최대 전력 이하가 되도록 가속률을 설정하였다. 따라서, 승압기의 최대 출력 용량도 이 시점으로 선정하였다. 따라서 승압기의 출력 용량은 엔진의 정속 회전 소모 전력과 시동 스케줄에 의한 가속 회전 소모 전력의 합과 같다. 시동 파워를 최적화를 위해 엔진 시스템의 회전 및 가속에 따른 소모 전력을 측정하고자 설계된 드라이버를 이용하여 정 속별 소모 전력을 장비로 측정하고 시동 스케줄의 가속도를 적용하여 가속시의 소모 전력을 계산하였다.

소모 전력 계측은 3상 220AC를 정류한 DC_link 전원을 인버터에 공급하고, 이 DC_link 단에서 인버터 정속 제어시의 전압과 전류로 소모 전력을 측정하였다.

엔진 회전시 인버터의 출력 Torque 방정식은 아래와 같다.

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

정속도 운전 시는 각 가속도가 거의 없음으로 정속도 운전시의 인버터 Power를 구하면 다음과 같다.

$$P_e = T_e W = B\omega^2 + T_{Load}\omega \tag{2}$$

여기서, $J = Inertia$, $\omega = Speed$, $B = Friction Coefficient$ 이다. 그림 3은 정속도 운전시 소모되는 인버터의 소모 전력 그래프이다.

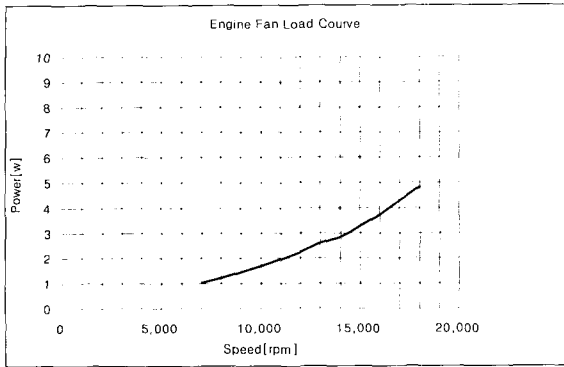


그림 3. 정속도 인버터 출력 파워 그래프
Fig. 3. Inverter output power graph at constant speed

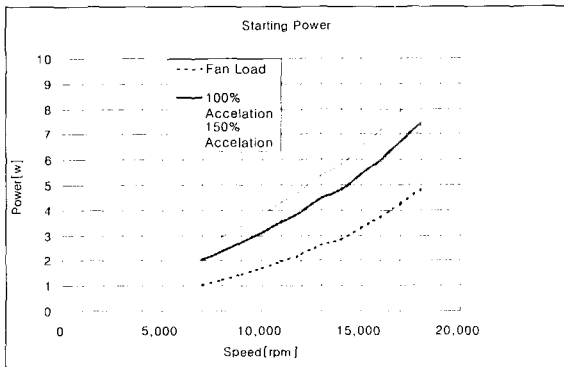


그림 4. 가속도를 가질 때 인버터 출력 파워 그래프
Fig. 4. Output power graph of the inverter with acceleration rate

엔진의 가속시의 인버터에서의 소모 전력은 (3)과 같고 그림 4는 그래프를 나타낸다.

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

앞의 소모 시동 파워는 엔진 점화가 이루어지지 않을 때 인버터가 속도 프로파일에 따라 모터링 할 때 필요한 소모 전력을 의미한다. 그러나 엔진 점화가 이루어지면 인버터에서 출력되어야 할 Torque 및 Power는 아래와 같이 감소하게 된다.

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

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

승압기 최대 출력 용량은 15,000 rpm에서 정해지며, 본 논문에서는 100%(1000rpm/sec) 가속도를 고려하였으므로 그림 4에서 인버터 소모전력은 5.42 kW로 나타난다. Battery 전압의 변동, 승압기와 인버터의 효율 등을 고려하여 여유를 10%를 두어 승압기의 출력 전력을 6 kW 이상으로 선정하였다.

2. 승압기 설계 및 개발

본 논문에서는 6 kW이상의 대용량 승압기(Boost converter)의 설계가 필요하다. 따라서 단일 모듈로 시스템을 구성하는 것은

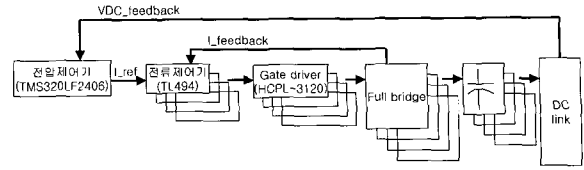


그림 5. 승압기의 블록 다이어그램.
Fig. 5. Block diagram of the boost converter

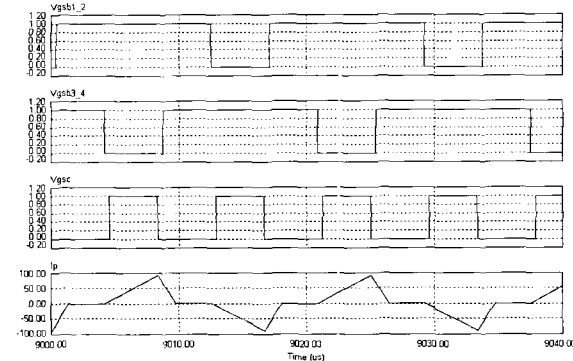
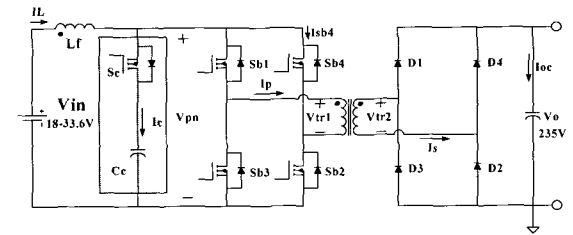


그림 6. 승압기 단위 모듈의 풀 브리지 및 게이트 스위칭.
Fig. 6. Boost converter full-bridge circuit and gate switching of the unit module

단일 소자의 제한, 효율 감소 등 설계의 난점이 존재하여 다중 모듈로 시스템을 구성하였다. 특히 본 시스템과 같이 입력 전압(축전지)이 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 증가시킨다. 본 논문에서는 독립형 시스템에서의 공간과 냉각을 고려하여 트랜스포머를 2kW로 선정하고 4개의 모듈을 구성하여 8kW 출력이 가능토록 제작하였다. 출력 용량은 출력 측 전류를 모니터링 하여 6 kW로 제한할 수 있도록 설정하였다. 스위칭 주파수는 시스템 효율을 86%와 부하측 전압 레귤레이션을 고려하고 실험을 통하여 60kHz로 선정하였다. 설계된 승압기의 전체 블록 다이어그램은 다음과 같다. 전압제어기는 1개이며 전류제어기는 단위 모듈마다 모두 장착되어있다.

다음은 설계된 승압기(Boost converter) 단위 모듈 파워단의 Full-bridge 회로도와 게이트의 스위칭 시퀀스를 나타낸다. 설계된 회로는 승압 동작 시 Isolated Current fed 방식의 가장 큰 문제인 스위치 턴-오프 시 스위치의 전압 오버슈트를 보조 스위치 S와 캐패시터 C로 구성된 전압 제한 보조회로를 통해 효과적으로 막을 수 있다. 이 전압제한 회로는 전압의 오버슈트를 막을 뿐 아니라 주 스위치들의 (S1-S4) 영 전압

표 1. 승압기 설계 사양.

Table 1. Boost converter specification.

시스템 기능	승압기
정격출력용량	≥ 6 kW
정격입력전압	18-33.6 Vdc
정격출력전압	235 Vdc
스위칭 주파수	60 khz
부스트 인덕터(Ld)	6.7 μH
트랜스포머권선비	1 : 7.5
단위모듈용량	2 kW / 4 병렬
효율	86 % 이상
Topology	Current-fed
입출력 $\frac{V_{OUT}}{V_{IN}}$	$\frac{N_2}{N_1} \frac{1}{2(1-D)}$ $0.5 < D < 1$

표 2. 고속 발전기 사양.

Table 2. Specification of the HSG.

전동기구조	영구자석 형(IPMSM)
정격속도	60,000 rpm
정격출력	25 kW
출력파형	정현파
선간 정격전압	235 Vac @60,000 rpm
극 수	2 극
결선 방식	3상 Y 결선
상간 저항	21 mΩ
상간 인덕턴스	137 μH

스위칭을 가능하게 해주므로 시스템의 효율이 증대된다[3].

본 논문에서 설계한 승압기(Boost converter)의 설계 사양은 다음과 같다.

3. 초고속 전동기 구동용 Inverter 설계 및 개발

본 논문에서는 엔진의 시동을 위해 정해진 프로파일의 HSG의 초고속 속도 제어가 필요하며, 초고속 전동기 구동용 인버터 설계시의 고려사항은 다음과 같다.

1) HSG는 고속 회전이 이루어질 수 있도록 상간 저항 및 누설 인덕턴스가 범용적인 저속 전동기에 비해 그 값이 매우 적어 회전을 위한 고주파 전류 제어에 많은 어려움이 있다[4,5]. 본 논문에서는 엔진의 안정적인 시동을 위하여 정상 상태 속도(60,000 rpm)의 50% 까지 프로파일에 따른 속도 제어 설정하였다. 이 값은 2극 전동기에 약 500 Hz의 고주파 전류를 HSG의 3 상 권선에 주입함을 의미한다.

2) HSG는 영구 자석 형 동기 전동기의 구조로 속도제어를 위해 회전자 자속을 판별하기 위한 홀 센서 및 엔코더를 부착하면 센서를 이용한 벡터 제어 기법에 의해 속도 제어가 가능하다. 그러나 초고속 회전에 따른 기계적 취부 문제, 고온 환경하의 센서 운용 특성 변화 문제 및 고속 회전시의 센서 출력 값의 지연에 의한 회전자 자속 판별 오차 등이 나타날 수 있다. 따라서 본 논문에서는 회전자 자속을 판별할 수 있는 별도의 센서 없이 고속 전동기의 속도를 제어할 수 있는 알고리즘을 사용하여 인버터 드라이버를 설계하였다.

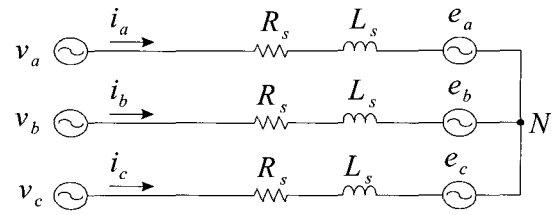


그림 7. 3 상 동기전동기 등가회로.

Fig. 7. 3 Phase synchronous motor equivalent circuit.

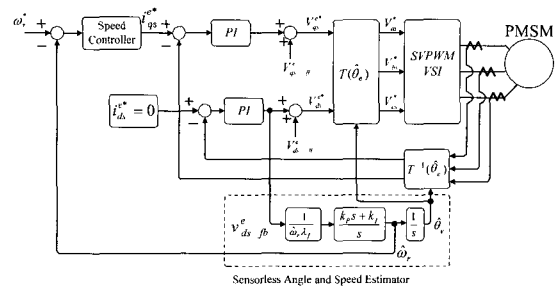


그림 8. 제안된 동기전동기 센서리스 벡터제어기.

Fig. 8. Proposed sensorless vector controller for PMSM.

본 논문에서의 초고속 발전기 사양은 다음과 같다.

3상 영구자석 동기전동기의 등가회로는 그림9와 같고, 전압방정식은 다음과 같이 표현되어진다.

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

3상 영구자석 동기전동기 동기좌표 d-q 전압방정식은 다음과 같이 표현되어진다.

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

본 논문에서 벡터 제어 기법을 이용하여 전동기 제어를 구현하였으며, 공간벡터 PWM 기법을 이용하여 인버터를 구성하였다. 그림 8은 가스터빈 엔진 속 모터링에 적용된 센서리스 벡터제어기[5]의 블록다이어그램이다.

동기 전동기 전압 방정식을 이용하여 회전자의 각도 정보 및 회전속도를 검출하는 알고리즘을 사용하였다. 전류제어기는 토크 발생 전류인 토크 축 전류(i_{qs}^e)와 자속 축 전류($i_{ds}^e=0$)를 분리하여 각각을 독립제어 할 수 있도록 식 7에서 상호 간섭 부분과 비 선형분을 전항 보상기에서 상쇄시켜 비 간섭제어기로 구현하였다. 센서리스 벡터 제어기의 전항 보상은 아래와 같이 구성하였다.

$$V_{ds-ff}^e = R_s i_{ds}^{e*} - L_s \hat{\omega}_r i_{qs}^{e*} \quad (8)$$

$$V_{qs-ff}^e = R_s i_{qs}^{e*} + L_s \hat{\omega}_r i_{ds}^{e*} + \hat{\omega}_r \lambda_f \quad (9)$$

여기서,

i_{qs}^{e*}, i_{ds}^{e*} : 동기 좌표계 dq 전류 지령치

\hat{w}_r : 추정된 회전자의 속도,

전기적인 과도상태를 무시하면 영구자석 동기전동기의 추정된 좌표계에서의 전압방정식은 아래와 같다.

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e - w_r L_s i_{qs}^e + w_r \lambda_f \sin \theta_{err} \quad (10)$$

$$V_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + w_r L_s i_{ds}^e + w_r \lambda_f \cos \theta_{err} \quad (11)$$

$$\theta_{err} = \theta - \theta_r \quad (12)$$

여기서, θ : 추정 회전자 각도, θ_r : 실제 회전자 각도 회전자의 각도오차 θ_{err} 는 전동기 회전자의 실제 각도와 추정된 각도와의 오차이다. 8과 10의 관계에서 d축 전압 오차는 d 축 PI 제어기에서 보상되어지며 아래와 같다.

$$V_{ds}^e error = R_s (i_{ds}^e - i_{ds}^{e*}) - w_r L_s (i_{qs}^e - i_{qs}^{e*}) + w_r \lambda_f \sin \theta_{err} \quad (13)$$

전류제어기에서 전류제어가 심각한 오차 없이 실행되고 각도 오차가 작다면 d축 PI 보상기 출력 전압은 아래와 같다.

$$V_{ds}^e fb \approx V_{ds}^e error \approx w_r \lambda_f \sin \theta_{err} \approx w_r \lambda_f \theta_{err} \quad (14)$$

그림 8의 제안된 추정기를 살펴보면, PI 보상기에서 회전자의 속도 계산을 위한 14의 오차 값이 생성되고, 추정된 속도의 적분에 의해 회전자의 각도가 계산되어진다. 그림 8에 제안된 센서리스 알고리즘을 실제에 적용하려면 전동기의 역기전력이 충분히 커야 가능하다. 정지 시 및 저속에서는 전동기의 역기전력이 충분히 크지 못하므로 제안된 알고리즘의 적용에 어려움이 있다. 초기의 안정적인 회전을 위해서 초기 구동부터 저속 영역 및 제안된 센서리스 알고리즘을 적용하기에 알맞은 속도까지는 일정 크기의 전류(HSG 정격전류)를 설정된 주파수 패턴에 따라 회전시킨다. 이때 회전자 위치 정보는 설정된 주파수를 적분하여 벡터 제어기에 인가하였다. 그림 9와 같이 영역 I에서는 회전자의 정렬을 위하여 주파수를 1 Hz로 설정하였다. 회전자 정렬 후 영역 II에서는 속도 패턴에 따라 가속하며 영역 III에서는 제안된 센서리스 알고리즘으로 구동하였다. 이로써 초고속 구동시스템에서의 센서의 신뢰성 문제 및 장착 공간 확보의 어려움을 해결할 수 있었다. 정해진 속도 패턴을 생성하기 위하여 아래의 프로파일로 설정 속도를 인가하였다. 제안한 인버터 알고리즘을 적용하기 위해서는 정밀 고속 연

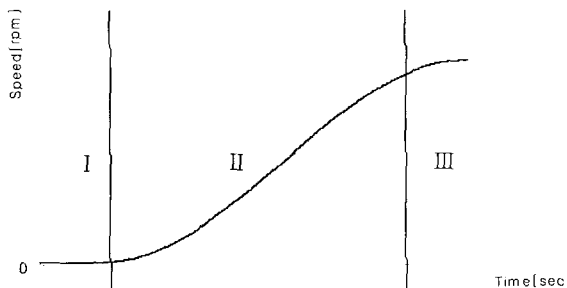


그림 9. 설정된 속도 패턴.
Fig. 9. Pre-patterned frequency pattern.

산 수행이 이루어져야 한다. 본 논문에서는 초고속 전동기 제어 시 전동기 구동 알고리즘 및 벡터 제어에 필요한 연산 제어는 TI사의 DSP TMS320VC33에서 수행시키고, 이로부터 벡터 제어의 연산을 받아서 파워 드라이버 제어를 위하여 수행하는 공간 벡터 PWM은 다 채널 제어용 IO를 내장하고 있는 모토롤러 DSP 56F805를 이용하였다.

다음은 실제 구현한 인버터 제어 보드의 블록 다이어그램을 나타낸다.

다음은 실제 개발한 인버터 제어 보드의 사진 그림이다.

IV. 가스터빈 엔진 시동 알고리즘 개발

기어박스형 터보 제너레이터의 시동용 DC 모터는 부하에 따라 속도가 Open loop 제어됨으로 점화 구간에서 공연비가 환경에 따라 바뀔 수 있다. 본 논문에서는 전동기를 Closed loop 제어를 함으로 시동 스케줄을 항상 동일하게 만들 수 있으며 제시한 시동 프로파일은 승압기와 인버터의 출력 전력을 고려하여 제안한 것이다. 본 논문에서는 초고속 전동기 구동으로 가스터빈 엔진의 모터링 스케줄을 제안하고 결정하였다. 본 논문에서 제안하는 터보 제너레이터의 시동 스케줄은 다음과 같다.

1) 본 논문에서는 HSG 구동을 위하여 센서리스 벡터제어를 적용하였다. 초기의 자속 추정이 이루어질 수 있는 속도

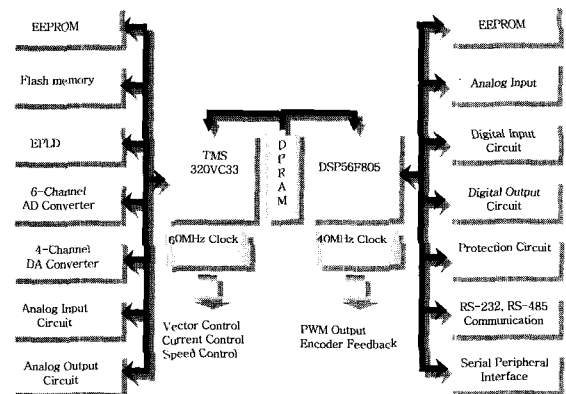


그림 10. 인버터 제어보드 블록 다이어그램.
Fig. 10. Block diagram of the inverter control board.

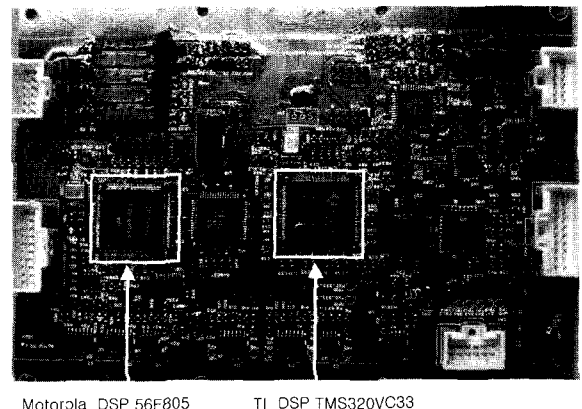


그림 11. 인버터 제어보드.
Fig. 11. Inverter control board.

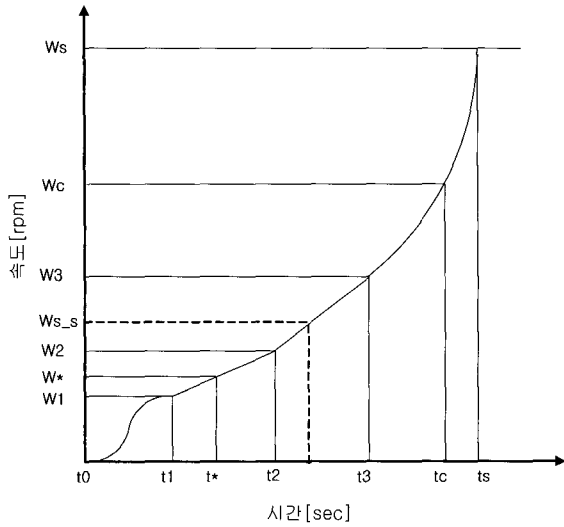


그림 12. 제안된 엔진 시스템의 시동 스케줄링줄.
Fig. 12. Proposed starting scheduling of the engine system.

(W1[t1 구간]까지는 제안하는 Open loop 프로파일에 따라 모터링을 시도한다. 이 후 가속 패턴에 맞추어 목표 속도 (W2[t2 구간]까지 전류제어를 통하여 가속 패턴을 유지한다.

2) 가스터빈엔진의 점화 구간은 W1[t1 구간과 W2[t2 구간에서 이루어지며 W*[t*] 시점에서 연료 분사를 시작하며 흡입되는 공기유량과 연료의 혼합가스에 점화기 통하여 점화를 수행한다. 점화가 되면 안정적인 점화유지를 위해 정해진 가속패턴에 따라 정해진 속도인 W3[t3]까지 계속적으로 초고속 전동기의 운전을 한다. 가스터빈엔진이 점화가 되면 가스 터빈의 연료연소에 의해 자체에서 출력되는 동력이 가속을 위한 고속 전동기 구동 인버터가 회전을 위해 출력하는 소비전력을 감소시키게 된다.

3) 가스터빈 엔진이 공급되는 연료의 연소에 의해 자체적인 회전력으로 고속 회전을 유지할 수 있는 속도 Ws_s(Self-sustain speed : 공력 및 기계적 회전체 특성에 의해 결정된다.)이상의 목표한 W3[t3]의 속도에 이르면 인버터를 정지시켜 고속 전동기의 구동을 종료하고 발전기 모드로 동작한다.

4) 가스터빈 엔진의 기계적인 출력 파워가 공급할 전기적인 출력 파워를 넘어서는 운전속도, 즉 W3[t3]이상의 임의의 속도 Wc[tc](초고속 발전기의 출력전압이 설계한 발전용 전력변환장치 입력으로 적용될 수 있는 시점)부터 가스터빈 엔진의 정상 운전 속도 Ws 구간까지 터보 제너레이터는 사용자에게 전력 공급을 한다.

V. 실험결과 및 분석

다음은 시스템 설계를 검증할 수 있는 실제 실험결과와 분석 결과를 보인다. 실험을 위하여 사용한 장비는 LeCroy 오실로스코프, Tektronics 오실로스코프, 전류 프로브 A6042XL/ AM503B, LEM 전류센서, 전압센서로 차동전압프로브를 사용하였다.

다음은 승압기 기동시의 DC link 전압 형성을 보여주는

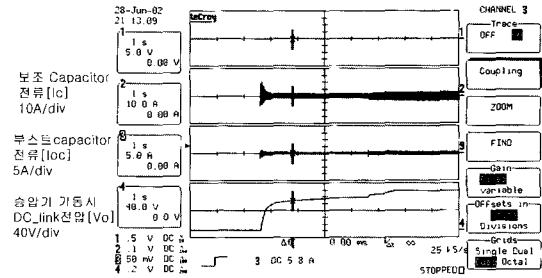


그림 13. 승압 초기의 DC link 전압 충전.
Fig. 13. DC link voltage charging at boost converter starting.

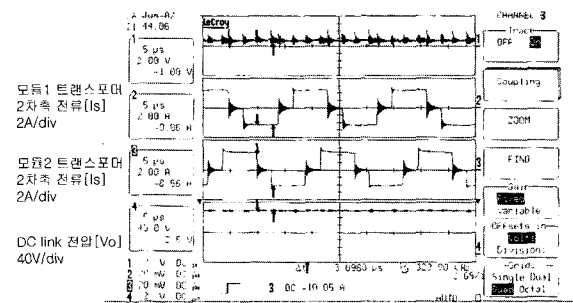


그림 14. 승압기 정상 운전 시 전압과 전류
Fig. 14. Voltage and current of the boost converter as boost converter is in steady state.

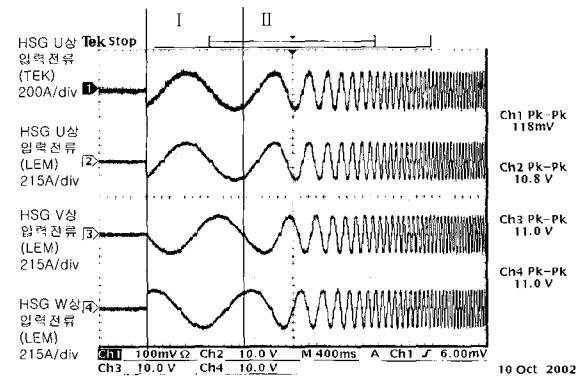


그림 15. 모터링 시작 시 3상 정 전류 파형.
Fig. 15. Constant three phase current waveform at a starting of the motoring.

파형이다. DSP 전압 제어기의 빠른 연산 및 전류 분배 오차의 극소화로 설정된 승압 전압(235 Vdc)으로 5초 이내에 제어됨을 알 수 있다.

다음은 승압기 정상 상태에서의 승압기 각부의 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다.

4개의 병렬 회로 중 2개 모듈의 2 차측 전류를 나타낸 것으로 2개 모듈의 전류의 실효치가 동일하게 나타나고, 부하에 대한 전류 분배가 잘 이루어지고 있음을 알 수 있다.

다음은 모터링 시의 초기 분석 파형으로 인버터에서 120도의 위상 차가 나는 3상 전류를 HSG의 3상 권선으로 정확

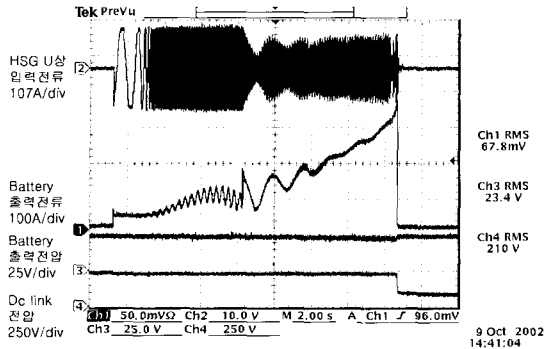


그림 16. 비 점화시 시스템 모터링 전류.
Fig. 16. Motoring current of the system at no ignition.

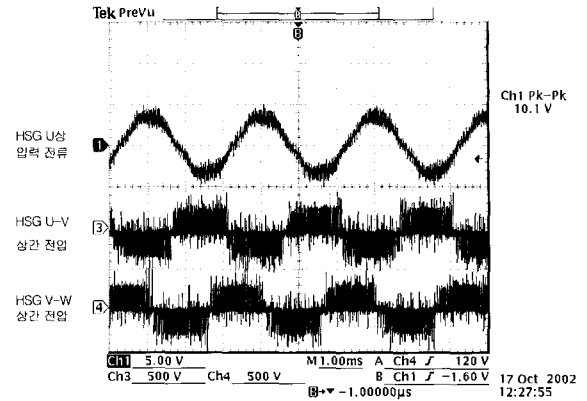


그림 18. 20,000 rpm에서의 초고속 전동기 모터링 전류.
Fig. 18. Motoring current of the HSM at 20,000 rpm.

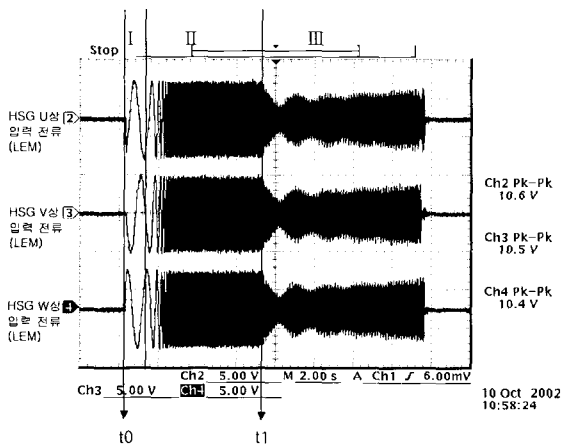


그림 17. 비 점화 시 HSM 3상[U,V,W] 모터링 전류.
Fig. 17. Three phase motoring current of the HSM at no ignition.

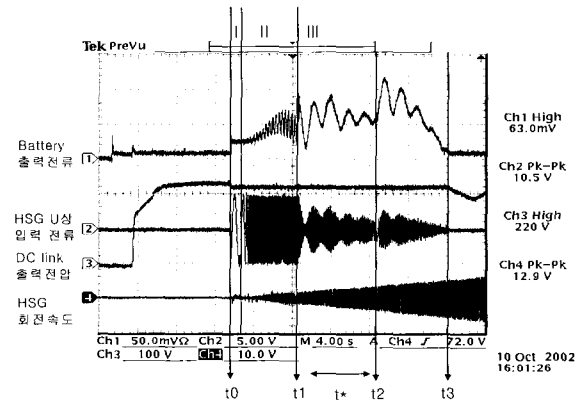


그림 19. 점화 시 시스템 전류 및 전압.
Fig. 19. System current and voltage at ignition.

히 인가함을 알 수 있다.

TeK Current Probe는 20A/10mV 설정 되었으며 전류 센서 (LEM)은 21.5A/1V 의 scale을 갖는다.

다음 파형은 초기 시동 시의 파워 측정과 설계된 부스트의 출력 특성을 알아보기 위해서 엔진 점화 없이 설계한 승압기 용량까지 인버터로 초고속 전동기를 구동한 결과 파형이다. 파형에서 측정된 입력 단(배터리) 전류는 승압기 용량 한계점에서 350A로 출력되며, 입력 전압은 20Vdc로 측정되었다. 계측 결과 배터리 입력파워는 7 kW로 계산되고, 승압기의 효율 86%를 고려할 때 설계 값인 6 kW이상 전력이 출력됨을 알 수 있다.

다음 파형은 초고속 전동기 제어 성능을 알아보기 위해 점화 없이 승압기 용량까지 인버터가 모터링 한 결과 파형이다. 초기 정 전류 모드에서는 HSG의 3상에 약 107.5A (peak) 즉 76A(rms)의 3상 전류가 균형적으로 공급됨을 알 수 있다. 이 크기는 HSG의 정격속도에서의 정격 전류에 해당된다. Open loop mode를 벗어나 센서리스 모드로 들어가면서 자속 추정이 이루어져 회전자의 자극 판별이 가능함에 따라 엔진 부하 및 속도에 따라 모터링 전류가 증가함을 알 수 있다. 승압기 용량하의 최대 속도에서의 입력전류는 약 46A(ms)로 측정되었다.

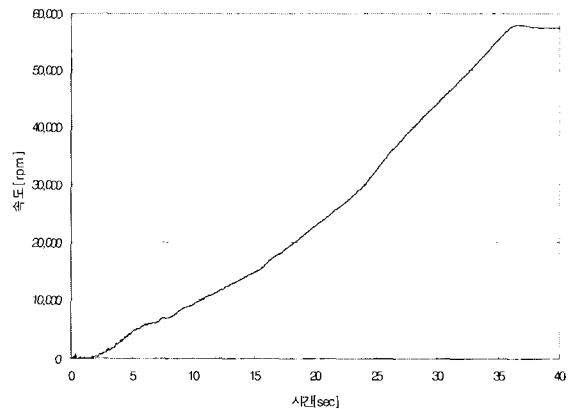


그림 20. 실제 운용 시 가스터빈 엔진 속도.
Fig. 20. Gas turbine engine speed at real operation.

다음 파형은 정 속도 20,000 rpm(330 Hz 전류) 에서의 HSG U상 입력 전류 및 2개의 다른 상간 전압을 나타낸 것이다. 고속 회전 시에도 정현파의 전류가 상에 인가되고 있음을 알 수 있다.

다음 파형은 점화 시의 시스템 전류와 HSG의 상 전류를 나타내었다. 비 점화 시에 HSG로 입력되는 모터링 전류 보다 t* 구간에서 점화가 됨에 따라 상 전류가 감소하여 입력

됨을 볼 수 있다. Channel 4는 F-V Converter의 출력으로 HSG 축 상에 설치된 Magnetic pickup 센서에 의해 실제 회전 시 비례적으로 출력되는 주파수와 전압을 측정할 수 있다. t3 시간 이후 모터링 모드가 종료되어 인버터에서의 출력전류 및 배터리에서의 공급전류가 없어짐을 알 수 있다.

다음은 가스터빈 엔진의 엔진 제어기(Engine Control Unit)에서 측정된 본 논문에서 제안한 시동기에 의한 실제 운용시의 시동부터 정상 점화까지의 엔진 회전 속도를 측정할 결과이다. 제안된 시동 스케줄에 의해 시동기의 성능이 나타남을 알 수 있다.

VI. 결론

본 논문에서는 터보 제너레이터의 시동기와 시동 알고리즘에 관한 연구 결과를 보였다.

가스터빈 엔진의 점화는 일반적인 디젤 엔진에 비하여 점화 시 연료와 공기가 밀폐되지 않는 구조이므로 점화가 까다로우며 점화를 위한 공연비 제어가 필요하다. 이는 가스터빈 엔진을 인버터로 고속 구동하면서 점화를 시도하여 안정적인 점화 점 속도 및 공기 유량을 많은 실험에 의존한다. 점화 영역 실험은 가스터빈 엔진의 고속 운전 속에서 이루어지므로 고속 전동기 구동 드라이버 설계 시 정밀함을 요구한다. 특히 가속 구간에서의 엔진 점화가 이루어질 시 갑작스러운 부하 급감으로 부하 변동이 심하게 발생하여 인버터 고속 구동에 외란이 인가되어 회전 속도 스케줄에 어려움이 발생한다. 따라서 설계한 인버터는 전체 응답특성이

매우 빨라야 함으로 본 논문에서는 고속의 DSP 연산기와 센서리스 알고리즘으로 응답 특성을 최대한으로 하여 고속 전동기의 전류제어를 실시하였다. 전류 제어 주기는 33us로 선정하였으며, 실험 결과 안정적인 점화 특성을 보임으로써 설계된 시동기의 성능을 입증하였다.

참고 문헌

- [1] S. Turri, A. Lacaze, "De-synchronized generator using a synchronous turbo-generator and matrix converter", *IEEE*, 2003
- [2] Amer Al-Hinai, Karl Schoder, Ali Feliachi, "Control of Grid-Connected Split-Shaft Microturbine Distributed Generator", *IEEE*, 2003
- [3] Lizhi Zhu, Kunrong Wang, Fred C. Lee and Jih-Sheng Lai, "New Start-up Schemes for Isolated Full-Bridge Boost Converters", *IEEE*, 2000
- [4] Longya Xu, Chagiang Wang, "Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Control schemes for PMSM in Super High Variable Speed Operation", *IEEE/ISA*, 1998
- [5] Bon-Ho Bae, Seung-Ki Sul, Jeong-Hyeck Kwon, Jong-Sub Shin, "Implementation of Sensorless Vector Control for Super-High Speed PMSM of Turbo-Compressor", *IEEE/ISA Chicago Annual Meeting*, 2001



노민식

1971년 9월 10일생. 1996년 창원대 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년~현재 삼성 테크윈(주)파워시스템 연구소 선임 연구원. 관심분야는 디지털 제어, 전력 변환 장치 설계.



박승엽

1958년생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). 1988년~현재 창원대학교 전자공학과 교수. 관심 분야는 플랜트 제어 및 고장진단, 모델링.