

# 터보 제너레이터의 시동 알고리즘 및 시동기 개발

盧民植<sup>†</sup>, 朴勝燁<sup>\*</sup>

## Development of the Starting Algorithm and Starter for Turbo Generator

M.S. Rho and S.Y. Park

### 요 약

터보 제너레이터의 시동기는 터보 샤프트 발전 시스템 시동기의 구성인 기어박스, DC 전동기, 저 전압 축전지를 대신하여 고속 발전기, 인버터 그리고 승압기로 구성된다. 터보 제너레이터는 시동 시 고속 회전이 요구되어 고속 발전기는 수십  $\mu H$ 의 낮은 누설 인덕턴스를 가지며, 인버터는 높은 전압의 DC link 전압이 필요하다. 본 연구에서는 시동기 구현을 위해 축전지 전압을 높은 전압으로 승압하는 대 용량 승압기를 개발하였다. 그리고 낮은 누설 인덕턴스를 갖는 전동기 권선에 높은 주파수의 전류 제어를 위해 정밀 고속 연산을 수행하는 인버터 드라이버의 설계와 안정된 집화를 위한 터보 제너레이터의 시동 알고리즘을 제안하였다. 또한 개발한 시동기로 터보 제너레이터의 시동을 수행하여 성능을 확인하였다.

### ABSTRACT

The starter of the turbo generator is composed of a high speed generator(HSG), an inverter and a boost converter instead of a gearbox, a DC motor and a low-voltage battery in the starter of the turbo shaft generation system. Because turbo generator is needed a high speed motoring at start-up, high speed generator has a low leakage inductance and inverter need a high DC link voltage. In this study, for developing the starter of a turbo generator, a boost converter with a high capacity was developed to convert high voltage from a low battery voltage. And for controlling a high frequency current to be injected to a motor winding with a low leakage inductance, the inverter with a high precision and a high speed operation was designed and for a stable ignition, the starting algorithm of a turbo generator was proposed. Turbo generator was started by the starter developed to verify the performances.

**Key Words** : Turbo generator, High speed generator, starter, Starting algorithm, Turbo shaft

### 1. 서 론

터보 제너레이터(Turbo generator)란 가스터빈 엔진 시스템에 고속 발전기를 장착하여 독립적으로 전력 생산 및 엔진에서 출력되는 동력을 시스템에 공급하는 장

치를 말한다. 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, 유압 동력, 전기력 및 환경 제어 시스템에 필요한 공압을 제공하게 되며 지상 장비의 경우 보조 전력 및 여압용 압축 공기 공급용으로, 그 밖의 민수 산업용으로는 대형건물의 전력 발전용, 낙도, 건설현장 등에서의 비상발전 등에 사용되고 있는 등 그 용도가

<sup>†</sup> 교신저자 : 정희원, 삼성테크윈(주) 파워시스템 연구소 선임연구원  
E-mail : mindori.rho@samsung.com

<sup>\*</sup> 정희원, 창원대 전자공학과 교수

접수일자 : 2003. 7. 23      1차 심사 : 2003. 9. 17  
2차 심사 : 2003. 10. 22      심사완료 : 2003. 11. 3

증가되고 있는 추세이다<sup>[1]</sup>.

가스터빈에 고속 발전기를 직접 장착한 터보 제너레이터는 일반적인 기어박스를 채택하고 있는 터보 샤프트 발전 시스템과 그 구동 특성에서 많은 차이점을 보인다<sup>[1]</sup>.

터보 샤프트 발전시스템은 시동 시 저 전압의 축전지를 이용하여 시동용 DC 전동기를 회전시키고 이 속도를 기어박스를 이용하여 증속한 뒤 시동에 필요한 가스터빈 엔진의 회전 속도를 얻는다. 또한 발전 시 가스터빈 엔진의 고속 회전 속도를 기어박스를 이용하여 저속 교류 발전기의 정격 회전 속도로 감속하여 에너지를 전달한다. 그림 1은 터보 샤프트 발전시스템의 기능별 하드웨어 구성도를 나타낸 것이다.

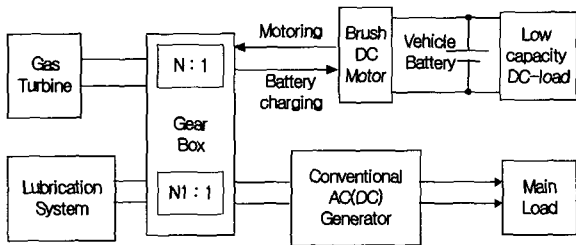


그림 1 터보 샤프트 발전 시스템의 구성도  
Fig. 1 Configuration of the turbo shaft generation system with gear box

터보 제너레이터는 시동시(Motoring Mode) 필요한 고속의 엔진 회전을 고속 발전기를 직접 회전 구동에 의해 회전 속도를 얻는다. 또한 발전시(Generating Mode) 가스터빈의 초고속 회전속도가 직접 고속 발전기로 입력되고 고속 발전기에서는 고 주파수의 교류전력이 출력되며 이 고주파 교류전력은 디지털 전력 변환 장치를 통하여 필요한 형태의 교류 혹은 직류전력으로 변환되어 사용자에게 공급된다. 그림 2는 터보제너레이터의 기능별 하드웨어 구성도를 나타낸 것이다.

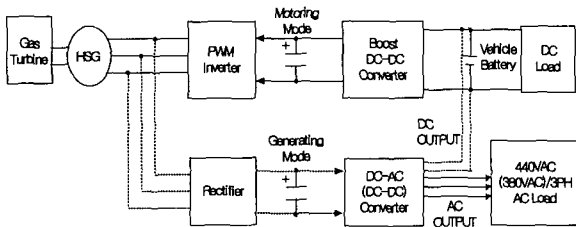


그림 2 고속 발전기를 이용하는 터보 제너레이터의 구성도  
Fig. 2 Configuration of the turbo generator with high speed generator

두 시스템 특징에서 살펴보았듯이 터보 제너레이터는 기계적인 회전 속도 증감용 기어박스, 시동용 DC 전동기, 발전용 저속 교류 발전기를 채택하고 있는 터보 샤프트 발전 시스템에 비하여 무게, 크기, 운할 시스템 등 시스템의 복잡도 측면에서 많은 장점을 가지고 있다<sup>[1][7]</sup>.

본 연구에서는 그림 2의 시동시(Motoring Mode) 터보 제너레이터의 시동기 및 시동 알고리즘에 연구 결과를 보인다. 이를 위해 초 고속 회전체의 직접 운전에만 따른 안정된 초 고속 발전기의 고속 회전을 위한 인버터 설계, 높은 전압의 DC 링크를 인버터에 공급하기 위해 낮은 축전지 전압을 높은 전압으로 승압하는 대용량 승압기, 가스 터빈 엔진의 신뢰성 있는 점화를 위한 시동 알고리즘의 개발에 대한 연구 결과를 보인다.

## 2. 터보 제너레이터의 시동기 개발

### 2.1 승압기 용량 설계를 위한 가스터빈 엔진 파라미터 측정

터보 제너레이터는 안정된 점화와 시동을 위해 공연비의 제어가 필요하며 이는 시동 구간에서 인버터의 엔진 회전 속도 제어로 이루어진다. 따라서 시동기를 설계 시 가스터빈 엔진의 회전 속도 제어를 위해 필요한 속도별 요구 전력은 매우 중요한 파라미터이다. 이는 인버터에 공급되어야 할 전력의 기준이 되며 최대 전력 출력량에 따라 승압기(Boost converter)의 최대 출력 용량이 결정된다. 본 연구에서는 승압기(Boost Converter) 설계를 위해 다음과 같이 엔진의 파라미터를 고려하였다.

- 가. 엔진의 정속 회전시의 인버터 출력 전력 계산.
- 나. 시동기 시스템 제한 조건(기구적인 크기, 축전지 전력)하에서의 최소 시동 시간에 따른 회전 속도 가속 구간에서의 가속 기울기 선정과 소모 전력 계산.

엔진의 시동 부하는 비 선형적인 팬 부하로서 정확한 계산이 까다롭다. 따라서 본 연구에서는 설계된 초 고속 전동기 드라이버를 이용하여 실제 회전(모터링)이 필요한 회전 속도 구간에서 회전 속도 별 소모 전력을 전력 측정 장비로 실측함으로써 시동기 시스템 제한 조건(기구적인 크기, 축전지 전력)의 하에서 시동 전력과 시동 시간의 최적화를 이룰 수 있었다. 실험은 각 모터링 구간내의 주요 포인트에서 정속도 운전을 하여 엔진에서의 소모전력을 인버터 전원 입력 단에서 측정

하였다. 엔진 회전체에 대한 인버터의 출력 토크 방정식은 식 (1)과 같다.

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

여기서,  $J$  = 관성,  $\omega$  = 속도,  $B$  = 마찰 계수 이다.

정속도 운전 시는 각 가속도가 거의 없으므로 정속도 운전시의 인버터의 출력 전력을 구하면 식(2)와 같으며 그림 3의 팬 부하 그래프에 결과를 보인다.

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

익진회전이 일정 기울기를 갖고 가속시의 인버터에서의 출력 전력을 구하면 식(3)과 같으며, 그림 3에 가속 그래프에 결과를 보인다.

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

그림 3은 본 연구의 가스터빈 엔진 시스템의 정속도의 소모 전력을 실측하고, 가속시의 소모전력을 계산하여 그래프로 나타낸 것이다.

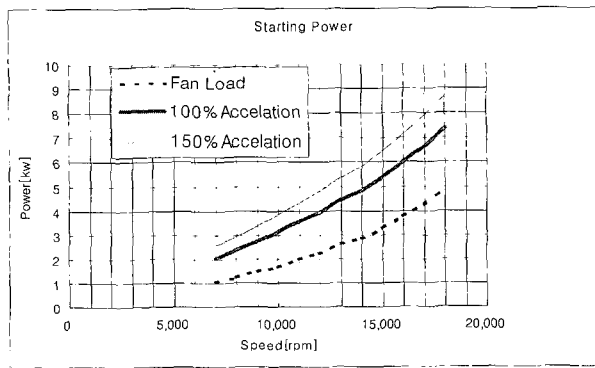


그림 3 엔진 회전 속도에 따른 인버터 출력 전력 그래프  
Fig. 3 The output power of inverter according to engine motoring speed

그림 3의 소모 시동 전력은 엔진 점화가 이루어지지 않을 때 인버터가 속도 프로파일에 따라 모터링 할 때 필요한 출력 전력을 나타낸 것이다. 그러나 엔진 점화가 이루어지면 인버터에서 출력되어야 할 토크 및 전력은 식 (4), 식 (5)와 같이 감소하게 된다.

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

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

해석 결과 본 연구에서는 엔진 점화 특성 및 모터링 가속도 해석, Battery 전압의 변동 그리고 승압기와 인버터의 효율 등을 고려하여 승압기의 최대 공급 출력 전력을 6kW로 선정하였다.

### 2.2 승압기 하드웨어 설계 및 개발

본 연구에서는 6kW이상의 대용량 승압기(Boost converter)의 설계가 필요하다. 따라서 단일 모듈로 시스템을 구성하는 것은 단일 소자의 제한, 효율 감소 등 설계의 난점이 존재하여 다중 모듈로 시스템을 구성하였다. 특히 본 승압기와 같이 입력 전압(축전지)이 낮고 입력 전류가 높은 경우 변압기의 누설 인덕턴스에 의해 전류의 변화 속도(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 2kW, 스위칭 주파수는 60kHz로 선정하였으며 전체 시스템을 4 병렬로 구성하였다. 설계된 승압기의 전체 블록 다이어그램은 그림 4와 같다.

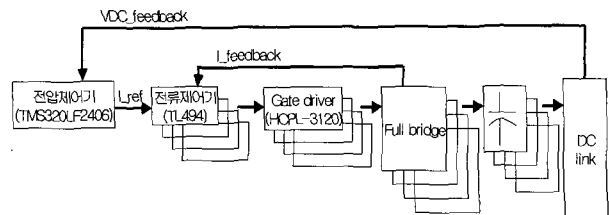


그림 4 승압기의 블록 다이어그램.  
Fig. 4 Block diagram of the boost converter

그림 5는 설계된 승압기(Boost converter) 전력단의 Full-bridge 단위 모듈의 회로도이다. 그림 5의 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 전압제

한 회로는 과도전압의 오버슈트를 막을 뿐 아니라 스위치들의 (S1-S4) 영 전압 턴온(turn on) 스위칭을 가능하게 해주므로 시스템의 효율이 증대된다<sup>[2]</sup>.

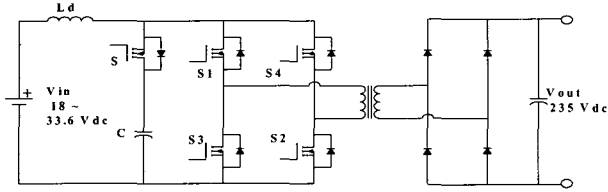


그림 5 승압기의 풀-브릿지 회로도.  
Fig. 5 Full-bridge circuit of the boost converter

본 연구에서 개발한 Boost converter의 설계 사양은 표 1과 같다.

표 1 승압기 개발 사양  
Table 1 Specification of the Boost converter

시스템 기능	승압기
정격 출력 용량	≥ 6 kW
정격 입력 전압	DC 18 ~ 33.6 V
정격 출력 전압	DC 235 V
스위칭 주파수	60 kHz
부스터 인덕터(L <sub>d</sub> )	6.7 μH
트랜스포머 권선비	1 : 7.5
단위모듈용량	2 kW / 4 병렬
효율	86 %
Topology	Current-fed
입 출력 전압 $\frac{V_o}{V_i}$	$\frac{N_2}{N_1} \frac{1}{2(1-D)}$ (0.5 < D < 1)

### 2.3 고속 전동기(발전기) 구동용 Inverter 설계 및 개발

본 연구에서는 엔진의 시동을 위해 정해진 프로파일의 고속 발전기의 초고속 속도 제어가 필요하며, 초고속 전동기(발전기) 구동용 인버터 설계시의 고려 사항은 다음과 같다.

가. 고속 발전기(HSG)는 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. 본 연구에서는 엔진의 안정적인 시동을 위하여 정상 상태 속도(60,000 rpm)의 50%(500 Hz 의 3상 교류 전류 주입)까지 프로

파일에 따른 속도 제어 설정하였다.

나. 고속 발전기(HSG)는 초고속 회전에 따라 속도센서 부착 시 기계적 취부 문제, 고온 환경하의 센서 운용 특성 변화 문제 및 고속 회전시의 센서 출력 값의 지연에 의한 오차 등이 나타날 수 있어 센서 부착에 어려움이 있다. 이에 본 연구에서는 센서리스 알고리즘을 사용하여 인버터 드라이버를 설계하였다.

본 연구에서의 구동한 고속 발전기 사양은 표 2 와은 다음과 같다.

표 2 고속 발전기 사양  
Table 2 Specification of the high speed generator(HSG)

전동기 구조	영구자석형(PMSM)
정격 속도	60,000 rpm
정격 출력	25 kW
출력 파형	Sine wave
선간 정격 전압	AC 235V
극 수	2 극
결선 방식	3상 Y 결선
상간 저항	21 mΩ
상간 인덕턴스	137 μH

본 연구에서 벡터 제어 기법을 이용하여 전동기 제어를 구현하였으며, 공간벡터 PWM 기법을 이용하여 전류 제어를 하였다. 3상 영구자석 동기전동기 동기 좌표계에서의 d-q 전압방정식은 식 (6)과 같다.

$$\begin{bmatrix} v_{ds}^e \\ v_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + pL_s & -\omega_e L_s \\ \omega_r L_s & R_s + pL_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega_r \lambda_f \end{bmatrix} \quad (6)$$

그림 6은 가스터빈 엔진 모터링에 적용된 센서리스 벡터 제어기<sup>[5]</sup>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 독립제어할 수 있도록 식 (6)에서 상호 간섭 부분과 비 선형분을 전향 보상기에서 상쇄시켜 비 간섭제어기로 구현하였다. 센서리스 벡터 제어기의 전향 보상기는 식 (7)과 식 (8)로 구성하였다.

$$V_{ds-ff}^e = R_s i_{ds}^{e*} - L_s \hat{\omega}_r i_{qs}^{e*} \quad (7)$$

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

여기서,  $i_{qs}^{e*}$ ,  $i_{ds}^{e*}$  : 동기 좌표계 dq 전류 지령치  
 $\hat{\omega}_r$  : 추정된 회전자의 속도

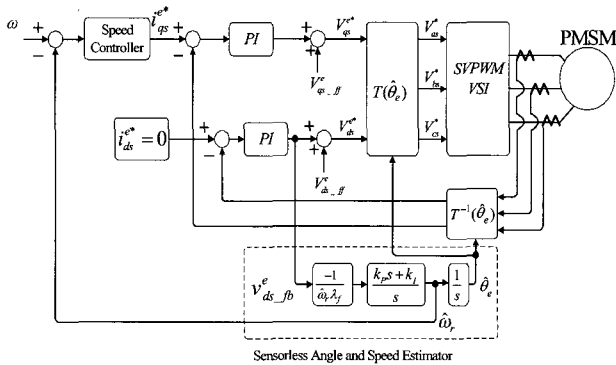


그림 6 제안된 동기전동기 센서리스 벡터 제어기<sup>[5]</sup>  
 Fig. 6 The proposed sensorless vector controller for PMSM

전기적인 과도상태를 무시하면 영구자석 동기전동기의 추정된 좌표계에서의 전압방정식은 식 (9)와 식 (10)과 같다.

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e - \omega_r L_s i_{qs}^e + \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \quad (9)$$

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

$$\theta_{err} = \hat{\theta} - \theta_r \quad (11)$$

여기서,  $\hat{\theta}$  : 추정 회전자 각도,  $\theta_r$ : 실제 회전자 각도

회전자의 각도오차  $\theta_{err}$  는 전동기 회전자의 실제 각도와 추정된 각도와의 오차이다. 식 (7)과 식 (9)의 관계에서 d축 전압 오차는 d 축 PI 제어기에서 보상되어지며 식(12)와 같다.

$$V_{ds\_error}^e = R_s(i_{ds}^e - i_{ds}^{e*}) + \omega_r L_s(i_{qs}^e - i_{qs}^{e*}) + \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \quad (12)$$

전류제어기에서 전류제어가 심각한 오차 없이 실행되고 각도 오차가 작다면 d축 PI 제어기 출력 전압은 식(13)와 같다.

$$V_{ds\_fb}^e \approx V_{ds\_error}^e \approx \omega_r \lambda_f \sin \theta_{err} \approx \omega_r \lambda_f \theta_{err} \quad (13)$$

그림 6의 제안된 추정기를 살펴보면, PI 제어기에서 회전자의 속도 계산을 위한 식 13의 오차 값이 생성되고, 추정된 속도의 적분에 의해 회전자의 각도가 계산되어진다. 그림 6에 제안된 센서리스 알고리즘을 실제에 적용하려면 전동기의 역기전력이 충분히 커야 가능하나 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 정격 전류)를 설정된 주파수 패턴에 따라 회전시킨다. 이때 회전자 위치 정보는 미리 설정된 주파수를 적분하여 벡터 제어기에 인가하였다. 그림 7과 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<sup>[5]</sup>.

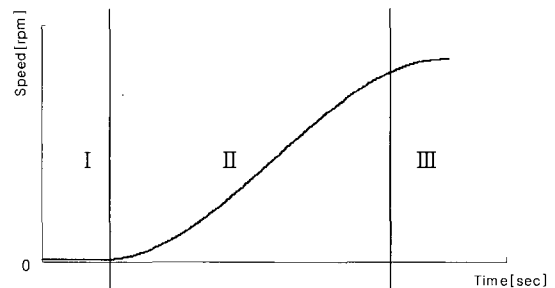


그림 7 설정된 속도 패턴<sup>[5]</sup>  
 Fig. 7 Pre-patterned frequency pattern

### 3. 터보 제너레이터의 시동 알고리즘 개발

터보 제너레이터의 성능에 있어 최적 시동은 비상시 항공기 자체와 안전과 직결되고, 특히 시동 시간에 대한 고찰은 매우 중요하다. 최적의 시동 스케줄은 시험을 통해서 이루어질 수 있으나, 시동기에 대한 선정 및 초기설계를 위해서는 시동 스케줄에 대한 정의가 필요하다. 특히 2장에서 분석한 시동기의 토크와 가스터빈 엔진에서 소모하는 전력의 예측은 시동 알고리즘 개발에 중요한 자료가 될 수 있다.

본 연구에서는 초고속 전동기 구동으로 가스터빈 엔진의 모터링 스케줄을 그림 8과 같이 제안한다.

가. 본 연구에서는 고속발전기(HSG) 구동을 위하여 2장에서 제안한 센서리스 벡터 제어를 적용하였다. 신뢰성 있는 고속 발전기 회전자 자속 추정이 이루어질 수 있는 속도( $W1[t1]$  구간)까지는 제안된 Open loop 프로파일에 따라 일정 전류 제어를 통하여 모터링을 실시한다. 이후 가속 패턴에 맞추어 목표 속도( $W2[t2]$  구간)까지 센서리스 벡터 제어를 통한 전류 제어로 가속 패턴을 추종한다.

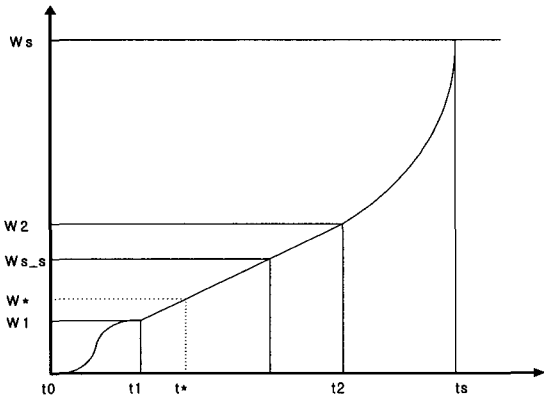


그림 8 제안된 엔진 시스템의 시동 스케줄  
Fig. 8 The proposed starting schedule of the engine system

나. 엔진의 점화는  $W1[t1]$  구간과  $W2[t2]$  구간에서 이루어지고,  $W*[t*]$  시점에서 연료 분사를 시작하며 흡입되는 공기유량과 연료의 혼합가스에 점화가 통하여 점화를 수행한다. 점화가 되면 안정적인 점화유지를 위해 정해진 가속 패턴에 따라 정해진 속도인  $W2[t2]$ 까지 인버터에 의한 초 고속 전동기의 운전이 이루어진다. 엔진이 점화가 되면 연료연소에 의해 자체에서 출력되는 동력이 가속을 위한 초고속 전동기 구동 인버터의 출력 전력을 감소시키게 된다.

다. 엔진이 공급되는 연료 연소에 의해 자체적인 회전력으로 고속 회전을 유지할 수 있는 속도  $Ws_s$ (Self-sustain speed : 공력 및 기계적 회전체 특성에 의해 결정된다.)까지 인버터는 계속적으로 정해진 프로파일에 대한 속도 오차를 센서리스 벡터 제어기에서 계산하여 속도 오차를 "0" 하는 전류를 고속 발전기에 입력한다. 본 연구에서는 인버터 가속구간에서 엔진의 출력만으로 정해진 시동 가속 프로파일을 충분히 추종할 시 인버터의 출력 전류를 "0"으로 만들어 엔진의 가속에 부하로 작용하지 않도록 전류 제어를 실시하였다.

라.  $Ws_s$ (Self-sustain speed)의 목표한 속도에 이르면 인버터를 정지시키고, 엔진 제어기(Engine Control Unit)가 가속 연료 스케줄을 결정하여 정상상태 속도  $Ws[ts]$  까지 엔진을 가속시킨다.

#### 4. 실험결과 및 분석

개발된 시스템의 성능을 검증하기 위하여 실제 실험을 통한 결과와 분석 결과를 보인다. 실험을 위하여 사용한 장비는 LeCroy oscilloscope, Tektronics oscilloscope, 전류 프로브 A6042XL/AM503B, LEM 전류센서, 전압 센서로 Differential Voltage probe를 사용하였다.

그림 9의 파형은 승압기 기동시의 DC link 전압 형성을 보여주는 파형이다. 설정된 승압 전압(235 VDC)으로 5초 이내에 제어됨을 알 수 있다.

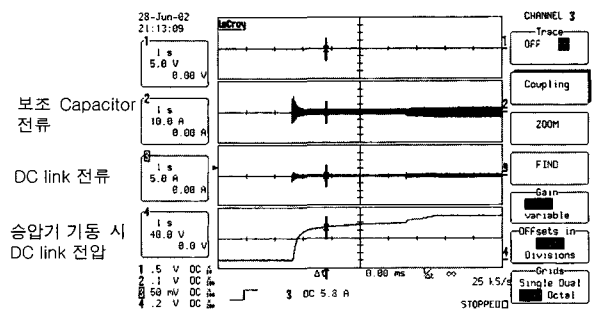


그림 9 승압 초기의 DC link 전압 충전  
Fig. 9 DC link voltage charging at boost converter starting

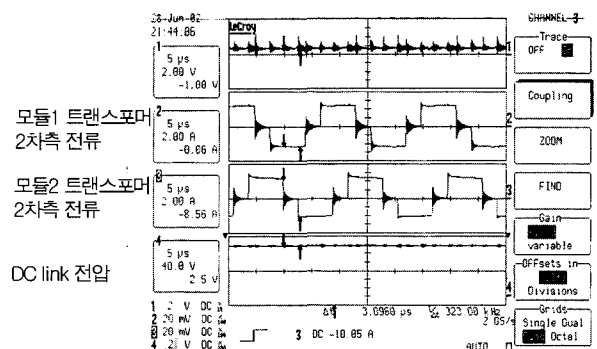


그림 10 승압기 정상 운전 시 전압과 전류  
Fig. 10 Voltage and current of the boost converter in steady state.

그림 10의 파형은 승압기의 정상 상태에서의 승압기 각부의 전압과 전류 파형을 나타낸 것이다.

그림 11의 파형은 모터링 시의 초기 분석 파형으로 인버터에서 120도의 위상차가 나는 3상 전류가 고속 발전기의 3상 권선에 정확히 인가함을 알 수 있다. T&K Current Probe는 20A/10mV 설정 되었으며 전류 센서(LEM)은 21.5A/1V 의 scale을 갖는다.

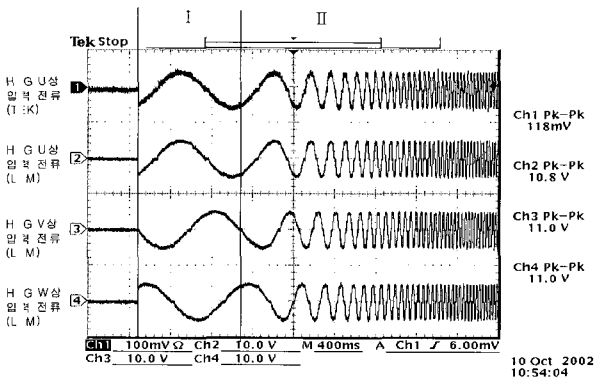


그림 11 모터링 시작 시 3상 정 전류 파형.  
Fig. 11 Constant three phase current waveform at a starting of the motoring

그림 12의 파형은 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 7kW로 계산되고, 승압기의 효율 86%를 고려할 때 설계 값인 6kW이상 전력이 출력됨을 알 수 있다.

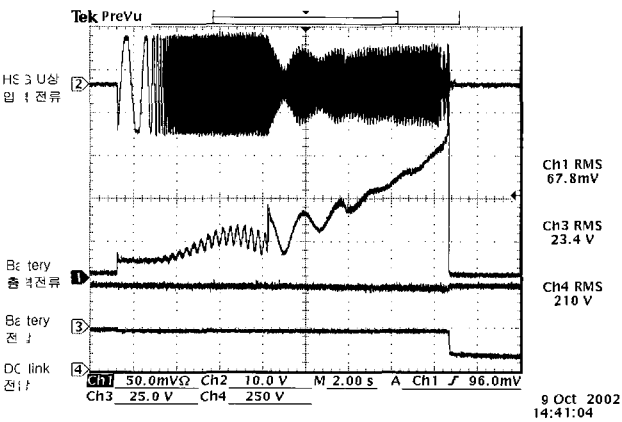


그림 12 비 점화시 시스템 모터링 전류  
Fig. 12 Motoring current of the system at no ignition

그림 13의 파형은 점화 없이 승압기 용량까지 인버터가 모터링 한 결과 파형이다. 초기 정 전류 모드에서는 HSG의 3상에 정격전류인 약 107.5A(peak) 즉 76A (rms)의 3상 전류가 균형적으로 공급됨을 알 수 있다. 승압기 용량하의 센서리스 모드에서 엔진 부하 및 속도에 따라 모터링 전류는 약 46[A](rms)로 측정되었다.

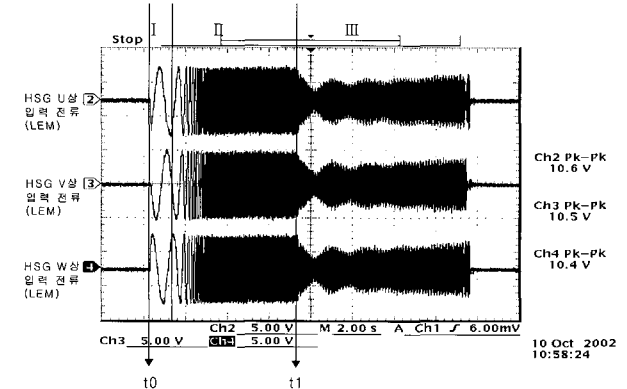


그림 13 비 점화 시 HSM 3상[U,V,W] 모터링 전류  
Fig. 13 Three phase motoring current of the HSM at noignition

그림 14의 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 입력됨을 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 값이다.

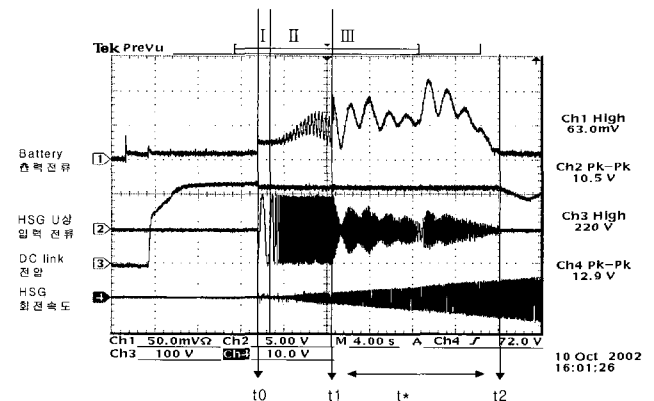


그림 14 점화 시 시스템 전류 및 전압  
Fig. 14 System current and voltage at ignition

그림 15의 파형은 가스터빈 엔진의 엔진 제어기 (Engine Control Unit)에서 측정된 본 연구에서 제안한

시동기에 의한 실제 운용 시의 시동부터 정상 점화까지의 엔진 회전 속도를 측정된 결과이다.

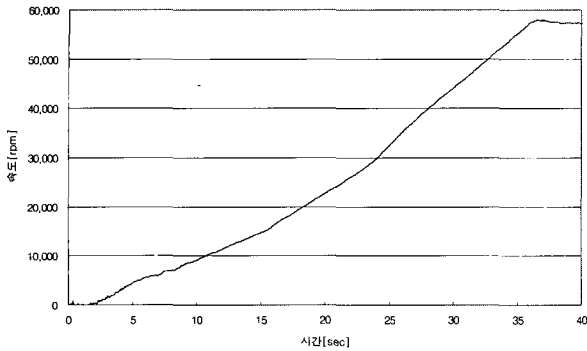


그림 15 정상 운용 시 가스터빈 엔진 속도  
Fig. 15 Gas turbine engine speed at normal operation

### 5. 결 론

본 연구에서는 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 점화점 속도 및 공기 유량을 많은 실험에 의존하여 구한다. 점화 영역 실험은 가스터빈 엔진의 고속 운전 속에서 이루어지며 특히 가속 구간에서 엔진 점화에 의한 부하 급감의 변동이 발생하여 인버터 고속 구동에 외란이 인가되어 회전 속도 스케줄에 어려움이 발생한다. 따라서 설계한 인버터는 전류와 속도 응답성이 빨라야 함에 따라 본 연구에서는 고속의 DSP 연산기와 센서리스 알고리즘으로 응답 특성을 최대화 하여 고속 전동기의 전류 제어를 실시하였다. 실험 결과 안정적인 점화 특성을 보임으로써 설계된 시동기의 성능을 입증하였다.

본 논문의 일부는 2001학년도 창원대학교 연구 교수 연구비에 의하여 연구되었음.

### 참 고 문 헌

[1] O. Aglen, "A High-Speed Generator for Microroturbine", Electrical Machines and Power Electronics Department

of Electrical Engineering KTH, Royal Institute of Technology SE-100 44 Stockholm. 2001.  
 [2] 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.  
 [3] M. Mekhiche, J. L. Kirtley, M. Tolikas, "High Speed Motor Driver for Industrial Applications", *IEMD '99*, pp. 244~248, 1999.  
 [4] E. Ognibene, J. Kiley, E. Holmansky and F. Nimlett, "High Speed Motor Drive Development for Industrial Applications", *IEEE*, 1999.  
 [5] B. H. Bae, S. K. Sul, J. H. Kwon, J. S. Shin, "Implementation of Sensorless Vector Control for Super-High Speed PMSM of Turbo-Compressor", *IEEE/ISA Chicago Annual Meeting*, 2001.  
 [6] L. Xu, C. Wang, "Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Control schemes for PMSM in Super High Variable Speed Operation", *IEEE/ISA*, 1998.  
 [7] R. Nims, "Armor-plated auxiliary power", *MECHANICAL ENGINEERING*, 1997.

### 저 자 소 개



**노민식(盧民植)**  
 1971년 9월 10일생. 1996년 창원대 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 1999년~현재 삼성테크윈(주) 파워시스템연구소 선임연구원.



**박승엽(朴勝樺)**  
 1958년생. 1981년 고려대 전기공학과 졸업. 1984년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1988년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박). 1988년~현재 창원대학교 전자공학과 교수.