

고속 발전기 직접 구동 방식의 터보 제너레이터 시스템 개발

노민식, 권정혁, 변지섭
삼성 테크윈 파워시스템 연구소

전화 : 055-260-2930 / 핸드폰 : 016-690-2152

The Development of the Turbo-Generator System with direct driving High Speed Generator.

Min-Sik Rho, Jeong-Hyeck Kwon, Sub-Ji Byun
Samsung Techwin Power System R&D Center
E-mail : mindori.rho@samsung.com

Abstract

This paper presents results of the development of the Turbo-generator system with structure which is HSG(High Speed Generator) installed to high speed gas-turbine engine directly. Turbo-generator with 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 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 gas turbine starting. Also we have to need design of the PCU(Power Conditioning Unit) for converting high speed AC output power to conventional AC power or needed DC power.

1. 서론

터보 제너레이터(Turbo-generator)란 가스터빈엔진 시스템에 고속발전기를 장착하여 독립적으로 전력 생산 및 엔진에서 출력되는 동력을 시스템에 공급하는 장치를 말한다. 그 형태는 왕복엔진에 비해 크기, 무게, 진동, 수명, 사용연료, 운용 고도 등에서 월등한 장점을 지닌 완전한 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 시스

템에 필요한 공압을 제공하게 되며 지상 장비의 경우 보조전력 및 여압용 압축공기공급용으로, 그 밖의 민수 산업용으로는 대형건물의 전력발전용, 낙도, 건설현장 등에서의 비상발전 등에 사용되고 있는 등 그 용도가 증가되고 있는 추세이다.

II. 터보 제너레이터 시스템 구성 및 운전

그림 1은 브러시 DC 모터, 저속 발전기 그리고 기어 박스를 채택하고 있는 터보샤프트 발전 시스템의 구조를 보인다.

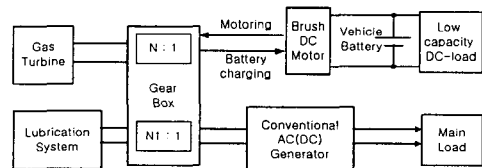


그림 1. 터보 샤프트 발전 시스템의 구성도

그림 2는 본 연구에서 터보 샤프트 발전시스템의 시스템 구조 복잡성, 크기, 무게, 가격 측면 등 여러 단점을 배제한 터보 제너레이터 시스템이다. 본 연구에서는 구성을 최소화 및 최적화하기 위해 Buck-Booster 시스템, Inverter, Rectifier 하드웨어 장치를 양방향으로 구성하고 모드와 로직에 따라 양방향 제어가 되도록 설계하였다.

그림 3는 Motoring Mode시의 장치의 동작 시퀀스를 나타낸다. 배터리로부터 전력을 공급받아 구성된 Booster를 통하여 승압된 인버터의 DC단 전압을 생성한다. 인버터는 엔진시동 알고리즘 및 HSM 구동 알고리즘에 따라 엔진의 가속도 및 설정된 프로파일로 고

주파 교류전류를 생성하여 속도제어를 하게 된다.

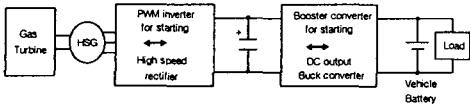


그림 2. 제안된 초고속 모터-제너레이터 이용하는 터보 제너레이터의 구성도

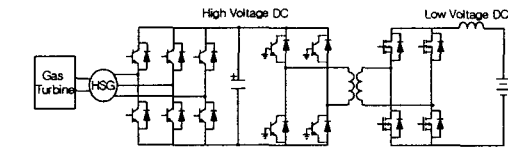


그림 3. 제안된 시스템의 모터링 모드 시 동작 시퀀스

그림 4는 Generating Mode시의 장치의 동작 시퀀스를 나타낸다. 가스터빈 초고속 회전에 의해 HSG는 고주파의 교류전력을 출력하며, 이 고주파의 교류전력은 그림에 나타나듯이 초고속 정류부에 의해 고전압의 직류로 변환된다. 이 정류된 고전압의 DC는 구성된 Buck converter를 통하여 필요한 전압의 직류로 변환되어 배터리 충전과 동시에 차량시스템에 DC 전력을 공급한다.

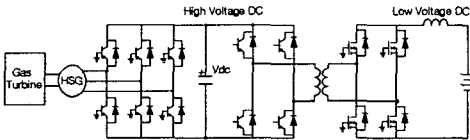


그림 4. 제안된 시스템의 발전 모드시 동작 시퀀스

III. 터보제너레이터 시스템 구현

3.1 가스터빈 엔진 시동 알고리즘의 구현

다음 그림5 은 위에서 설계한 가스터빈 엔진 시스템의 시동에 따른 모터링 프로파일을 나타낸다. 본 연구에서의 가스터빈엔진 시동 스케줄은 다음과 같다.

가) 본 연구에서는 HSM 구동을 위하여 센서리스 벡터제어를 이용하여 초기의 가속 추정이 이루어질 수 있는 속도(그림5에서 W1[t1] 구간)까지는 제안하는 Open loop 프로파일에 따라 모터링을 시도한다. 이 후 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 점화기 통하여 점화를 수행한다. 점화가 되면 안정적인 점화 유지를 위해 정해진 가속패턴에 따라 정해진 속도인 W2[t2]까지 계속적으로 초고속 모터의 운전을 한다. 가스터빈엔진이 점화가 되면 가스 터빈의 연료연소에 의해 자체에서 출력되는 동력이 가속을 위한 초고속 모터 구동 인버터가 회전을 위해 출력하는 소비전력을

감소시키게 된다

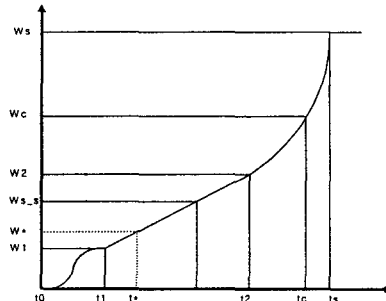


그림 5. 제안된 엔진 시스템의 시동 스케줄링

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 결정된다.) 이상의 목표한 속도에 이르면 초고속 모터의 구동을 종료하고 초고속 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 속도인 Ws 구간까지 전력변환장치(Buck converter)를 통해 배터리 충전과 동시 부하 측에 필요한 전력을 공급한다.

3.2 가스터빈 엔진 시동 시스템 설계를 위한 파라미터 측정

시동 스케줄에 따른 가스터빈 엔진 시스템의 최적 시동 시스템 설계를 위하여 실험적인 데이터를 해석하여 소모되는 예상 시동 파워 계산과 가속구간에서의 운전 속도 기울기 선정하였다.

다음 그림 6은 실험데이터를 해석하여 엔진 정속 부하를 고려한 가속시의 인버터에서의 출력 파워 및 그래프를 나타낸다.

$$P_e = T_e \omega = J \omega \frac{d\omega}{dt} + B \omega^2 + T_{Load} \omega \quad (1)$$

여기서,

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

$$T_e = J \frac{d\omega}{dt} + B \omega + T_{Load} - T_{engine} \quad (2)$$

$$P_e = (J \frac{d\omega}{dt} + B \omega + T_{Load} - T_{engine}) \omega \quad (3)$$

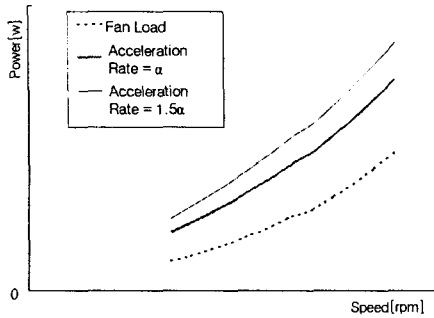


그림 6. 가속도를 가지고 인버터 출력파워 그래프

가속도에 따라 소모되는 파워는 인버터 파워 입력 단의 Booster 용량 설계의 기준이 된다. 본 연구에서는 접화 특성 및 모터링 속도 해석, Battery 전압의 변동, Booster 와 인버터의 효율 등을 고려하여 Booster 공급 출력파워를 6 kW 이상으로 선정하였다.

3.3 High Speed Generator의 설계

본 연구에서 설계 개발한 HSG(High Speed Generator)의 사양은 아래와 같다.

표 1. HSM/HSG 설계 사양

정격속도	60,000 rpm
정격출력	25kW
출력파형	Sine wave
선간 정격전압	235Vac @60000rpm
극 수	2 극
결선 방식	3상 Y 결선
상간 저항	21 milliohms
상간 인덕턴스	137 uH
냉각방식(고정자, 회전자)	공냉식
손실 @ 25kW, 60000rpm	1,440 W
영구자석 채질	SMCo 원통자석
효율	94.6%

3.4 초고속 모터 구동용 Inverter 설계

다음은 본 연구에서의 초고속 모터 구동용 인버터 설계시의 고려사항은 다음과 같다.

- HSG는 고속 회전이 이루어질 수 있도록 상간 저항 및 누설 인덕턴스가 범용적인 저속 모터에 비해 그 값이 매우 적어 회전을 위한 고주파 전류 제어(500 Hz의 고주파 전류를 HSG의 3 상 권선에 주입)에 많은 어려움이 있다.
- HSG의 초고속 회전에 따른 기계적 취부 문제, 고온 환경하의 센서 운용 특성변화 문제 및 고속 회전시의 센서 출력 값의 지연에 의한 오차 등이 나타날 수 있다. 따라서 본 연구에서는 회전자 자속을 판별할 수 있는 별도의 센서 없이 고속 모터의 속도를 제어할 수 있는 알고리즘을 사용하여 인버터 드라이버를 설계하였다.

그림 7은 가스터빈 엔진 고속 모터링에 적용된 센서

리스 벡터제어의 블록 다이어그램이다[5].

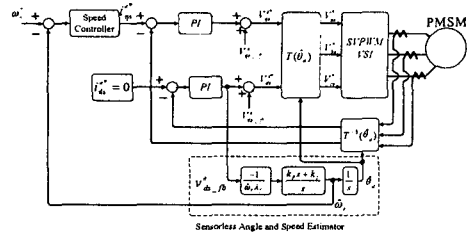


그림 7. 제안된 고속 영구자석 동기전동기 센서리스 벡터제어기[1]

동기 전동기 전압방정식을 이용하여 회전자의 각도 정보 및 회전속도를 검출하는 알고리즘을 사용하였다. 전기적인 과도상태를 무시하면 영구자석 동기전동기의 추정된 좌표계에서의 전압방정식은 아래와 같다.

$$V_{ds}^e = R_s i_{ds}^e - \omega_r L_s i_{qs}^e + \omega_r \lambda_r \sin \theta_{err} \quad (4)$$

$$V_{qs}^e = R_s i_{qs}^e + \omega_r L_s i_{ds}^e + \omega_r \lambda_r \cos \theta_{err} \quad (5)$$

$$\theta_{err} = \theta - \theta_r \quad (6)$$

여기서, θ : 추정 회전자 각도, θ_r : 실제 회전자 각도

그림 7에 제안된 센서리스 알고리즘을 저속영역의 불안정 배제와 실제에 안정적으로 적용하기 위해 일정 크기의 전류(HSG 정격전류)를 설정된 주파수 패턴에 따라 회전시키는 프로파일을 설정하였다. 그림 8과 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[1].

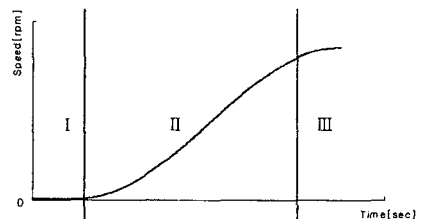


그림 8. 설정된 초기 모터링 속도 패턴[1]

3.5 Booster - Buck module 설계

본 연구에서는 구성한 Buck - Booster(양방향 컨버터)의 사양 및 특징은 다음과 같다.

표 2. Booster-Buck 컨버터 설계 사양

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 uH	6.7 uH
트랜스포머권선비	1 : 7.5	7.5 : 1
단위모듈용량	2 kW(4병렬)	2 kW(4병렬)
스위칭 방식	ZVS	ZVS
효율	88 % 이상	85 % 이상
Topology	Current-fed	Voltage-fed
입출력 $\frac{V_{out}}{V_{in}}$	$\frac{N_2}{N_1} \frac{1}{2(1-D)}$ 0.5 < D < 1	$2 \frac{N_2}{N_1} D$ 0 < D < 0.5

IV. 실험결과 및 분석

다음은 시스템 설계를 검증할 수 있는 실제 실험결과와 분석 결과를 보인다. 시스템 Parameter의 상태 계측을 위하여 Tektronix 전류 프로브[A6042XL, AM503B]와 전류센서(LEM), 전압센서(Differential Voltage probe)를 이용하였다.

그림 9의 파형은 모터링 시의 초기 분석 파형으로 인버터에서 120도의 위상차가 나는 3상 전류를 HSG의 3상 권선으로 정확히 인가함을 알 수 있다.

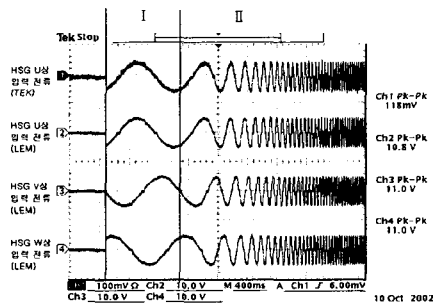


그림 9. 모터링 시작 시 3상 정 전류 파형.

그림 10의 파형은 정속도 20,000 rpm(330 Hz 전류)에서의 HSG U상 입력 전류 및 2개의 다른 상간 전압을 나타낸 것이다.

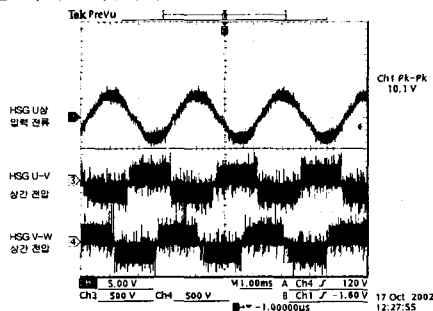


그림 10. 정속도시 모터링 전류

그림 11의 파형은 점화시의 시스템 각부 전류 형태와

HSG의 상 전류를 나타내었다. Channel 4는 F-V Converter의 출력으로 HSG 축 상에 설치된 Magnetic pickup 센서에서 출력되는 주파수와 전압을 측정한 값이다. ts 시간 이후 배터리가 충전됨을 알 수 있다.

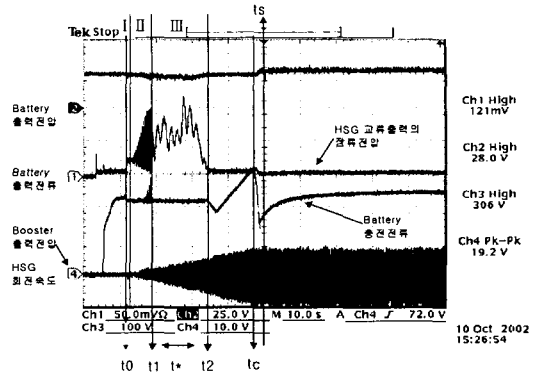


그림 11. 점화 시 시스템 전류 및 전압

V. 결론

본 연구에서는 터보 샤프트 발전시스템과 비교하여 시스템의 구조 단순화를 위해 HSG 직결 구동(기어박스 제거), HSG 고속운전(발전용량 대 체적비의 최대화), 공랭식 HSG 구조를 구현하였으며, PCU(Power Conditioning Unit)를 이용하여 광 대역 범위에서의 엔진 속도 제어의 오차를 허용하며 필요한 형태의 교류 혹은 직류 전력을 출력할 수 있도록 설계되었으며, 일정 영역에서 엔진 가변운전이 가능하게 하여 공압 혹은 배기가스의 이용 분야에 보다 높은 융통성을 제공하였다.

본 연구는 국내에서는 최초의 연구에 따른 개발용으로써 가격 측면, 기술 측면, 실용화 측면에서 최적화하여야 할 부분이 많이 존재하리라 판단한다. 앞으로 에너지의 소형화, 경량화, 독립화의 추세에 따라 초고속운전을 통한 전력에너지 생산에 대한 많은 관심과 연구가 진행되어야 할 것으로 판단된다.

참고 문헌

- [1] 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 Cicago Annual Meeting, 2001
- [2] Longya Xu, Chagjiang Wang, "Implementation and Experimental Investigation of Sensorless Control schemes for PMSM in Super High Variable Speed Operation", IEEE/ISA 1998
- [3] 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