한국추진공학회 2003년도 추계학술대회 논문집 pp.219~222 2003 KSPE Fall Conference

터보 발전기 시스템을 위한 정 출력 제어 방식 시동기 구현

권 정 혁* · 양 현 섭* · 노 민 식* · 차 영 범*

Implementation of Constant Power Controlled Starter for A Turbo Generator System

Jeong-hyeck Kwon, Hyun-sup Yang, Min-sik Rho and Young-bum Cha

ABSTRACT

Turbo generator system need starter for gas turbine engine. Turbo generator has high rate gearbox for reduce rotating speed. Because a conventional generator could not operate same speed of gas turbine engine. But Recently turbo generator system is directly connected a gas turbine engine with a super high-speed generator. In this paper, starter driver are implemented direct coupled turbo generator system, Which is directly connected 100kW, 60,000rpm gas turbine engine and 25kW 60,000rpm super high speed generator.

1. 서 론

터보 발전기 시스템은 터보 엔진을 위한 시동기를 필요로 한다. 기존 터보 발전기는 높은 기어비를 가진 기어박스를 이용하여 터보 엔진과 발전기를 연결 하였다. 범용 발전기의 회전속도가 터빈 엔진과 같은 회전 속도를 가지고 운전할 수 없기 때문이었다. 이러한 구조는 관성 모멘트, 마찰손 및 발전기 시스템의 크기를 증가시켰다. 본 연구에서는 100kW 60,000rpm 의 터보 엔진과 25kW 60,000rpm의 초고속 발전기를 직결로 연결한 터보 발전 시스템에 발전기를 시동기용보 발전기 시스템은 가스 터빈 엔진을 위한 시동기를 필요로 한다. 본 연구에 사용된 엔진은 100kW 60,000rpm의 정격 출력을 지닌 삼성 테크윈에서 개발된 가스 터빈엔진을사용 하였다. 직결 방식의 터보발전기는 초고속 발전기를 전동기로 사용하여 시동기를 구현하였으며 이를 위한 인버터 시스템의 적용으로 운전 조건에 따라 전동기 출력을 자유롭게 조절 할 수 있다[1-3].

본 논문에서는 2장에서는 개발된 터보 발전기 시스템의 구성을 서술하고, 기존 전동기 센서리스 알고

* 삼성테크윈 파워시스템연구소 요소기술UNIT 전자그룹 (Samsung Techwin Power System R&D Center)

리즘, 새로운 터보 발전기 시스템 기동 알고리즘과 실제 구현에 대해서 논하고, 3장에서는 실험파형을 나타내었다. 마지막으로 4장에서는 이에 관한 결론을 내리고자 한다.

2. 본 론

시험에 사용된 직결 구동방식 터보 발전기의 전체 하드웨어 구성을 간략히 표현하면 <그림 1>과 같다. 그림<1>에서 보는 바와 같이 터보 엔진과 발전기가 기어 박스 없이 직결 연결되어 있음을 알 수 있다. 이는 터보 엔진과 동일한 회전속도(60,000rpm)를 지닌 초고속 발전기를 장착하여 가능하였다. 또한 서론에서 언급한바와 같이 발전기를 가동 시에는 기동용 전동기로 사용함으로 인해 별도의 시동기 또한 장착되어 있지 않다. 본 장에서는 2.1절에서 엔진 시동 시스템의 구성을 2.2절에서는 시스템에 적용된 초고속 전동기 센서리스 알고리즘을 2.3절에서는 제안된 시동 알고리즘과 시험에 사용된 시스템을 소개한다.

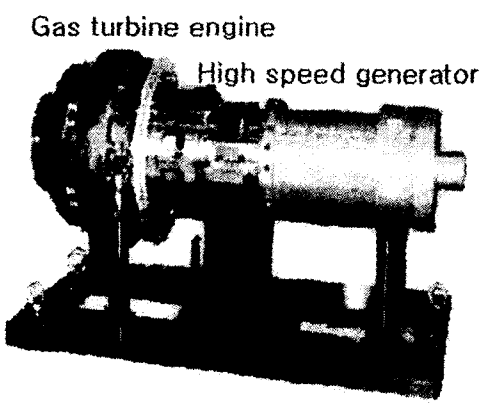

그림 1. 직결 구조의 터보 발전기 시스템
Fig. 1. Directly coupled turbo genertor system.

2.1 터보 발전기 시스템 구성

터보 발전기 시스템의 출력을 열역학적인 측면을 무시하여 근사화 하면 <그림 2>와 같이 근사화 하여 표시 할 수 있다. 그림에서 보는 바와 같이 시스템의 에너지 출력원은 전동기 출력과 가스 터빈 엔진의 출력이 있으며 에너지 출력은 마찰손실, 가스터빈 엔진의 압축기 출력과 발전기 출력 등으로 식 (1)과 같이 회전체 방정식으로 표현할 수 있다.

$$J\frac{dw}{dt} + Bw + T_f + T_c + T_g = T_m + T_e \quad (1)$$

J : 회전체 총 이너셔, B : 점성 마찰 계수
T_c : 엔진 압축기 부하 토크 T_f : 마찰력
T_g : 발전기 부하 토크 T_m : 전동기 출력 토크
T_e : 엔진 출력 토크

2.2 초고속 전동기용 센서리스 벡터제어기 구현

본 개발에 사용된 초고속 발전기는 영구자석 동기발전기로 전동기 모드에서 구동 시 그 특성이 초고속 영구자석 동기전동기와 그 특성이 동일함으로 동기전동기 벡터제어기법을 적용하였다. 표면 부착 영구자석 동기전동기를 벡터제어 적용 시 식(2)와 같이 제어전류와 출력토크가 선형적인 특성을 지니게 된다. [3]

$$T_m = \frac{3}{2} \times \frac{P}{2} \times \lambda_f \times i^r_{qs} \quad (3)$$

2.3 정 출력 제어 방식을 적용한 새로운 터보 발전기 구동 알고리즘

시동기 입장에서는 가스 터빈 엔진 기동은 표 1과 같이 크게 3가지 영역으로 구분 할 수 있다.

표 1. 가스 터빈 엔진 기동 모드

	상 태
rpm < N1	엔진 점화 전, $T_e = 0$
N1 < rpm < N2	엔진 점화 후, $T_e < T_c$
N2 < rpm	엔진 점화 후, $T_e > T_c$

첫째의 경우는 엔진 점화전의 상태로 엔진의 출력 파워는 없으나 엔진의 공기 압축기가 회전함으로 인한 부하는 발생하게 된다. 기동모드에서는 발전기 출력이 없고 점성 마찰력을 무시하고 (3)을 적용하면 첫 번째 모드에서의 회전체 방정식은 식 (4)과 같이 근사 할 수 있다.

$$T_f + T_c = T_L \quad (3)$$

$$J\frac{dw}{dt} + T_L = T_m \quad (4)$$

두 번째와 세 번째의 경우는 엔진 점화후의 상태로 둘째의 경우는 엔진의 출력 파워는 있으나 엔진의 공기 압축기가 회전함으로 인한 부하가 출력 파워보다 더 큼으로 인해 전동기 출력 도움 없이는 자체적으로 가속 혹은 현 회전속도를 유지 할 수 없는 상태이다. 이 경우에는 엔진의 기동을 위해서는 전동기의 출력이 필 수 적이다. 셋째의 경우는 엔진의 출력 파워가 엔진의 공기 압축기가 회전함으로 인한 부하가 출력 파워보다 더 커서 전동기의 추력 도움 없이도 자체적으로 가속 혹은 현 회전속도를 유지 할 수 있는 상태이다. 일반적으로 터보 엔진은 안정적인 점화를 위해 모드 3에서도 전동기의 도움을 받아 일정 회전속도까지 가속 후 전동기 기동 모드를 해제한다. 이때의 회전체 방정식은 식 (5) 와 같다.

$$J\frac{dw}{dt} + T_L = T_m + T_e \qquad (5)$$

기존의 가스 터빈 엔진의 시동기는 전동기 발전기 일체형 혹은 전용 시동용 전동기를 기어를 이용하여 기동하였는데, 이 경우 전동기 기동전류로 인해 시스템 전압이 급감하여 전체 전원 계통의 안정적 운전을 방해하는 요소로 발생하였다. 또한 엔진 기동용 전동기 드라이버가 적용된 뒤에는 주어진 속도 패턴에 따라 기동하였는데 이 경우 엔진 점화 시에 엔진 부하와 터빈 출력 및 기동에 필요한 정확한 파워를 명확히 산출 할 수 없다는 단점을 지니고 있었다.[1-2] 이를 보완하기 위하여 다음과 같은 정, 출력 제어모드를 제안하고 이를 시스템에 적용하였다.

$$i^{r}_{qs-ref\max} = P_m/(\frac{3}{2}\times\frac{P}{2}\times\lambda_f\times w_m) \qquad (6)$$

속도 지령은 점화 도달하고자 하는 최고속도를 지령하고 인버터 출력최대전류를 식(6)와 같이 제한함으로 전동기 출력을 Pm으로 일정하게 유지하고자 하였다.

3. 시 험 결 과

제안된 알고리즘을 적용하여 서로 다른 전동기 출력 상황에서 가스 터빈 엔진점화 시험을 실시하였다. <그림 2>는 기준 출력(P)과 이를 기준으로 25 % 출력 변화 시의 엔진 기동 시험 시 엔진 모니터링 시스템에서 계측된 엔진 가속 특성을 도식 하였다. <그림 2>에서 보는 바와 같이 엔진 점화 전 후에 전동기 출력에 따라 가속 기울기가 다름을 확인 할 수 있다. <그림 3>은 전동기 출력을 1.25P로 제한하였을 경우에 엔진 실험데이터를 각 요소별 파워 측면에서 분석한 것이다. Pm은 전동기 출력 파워로 본 연구에서는 정출력 제어를 제한 하였으므로 전동기구동 모드가 종료되는 50%rpm까지 상수로 도식하였다.

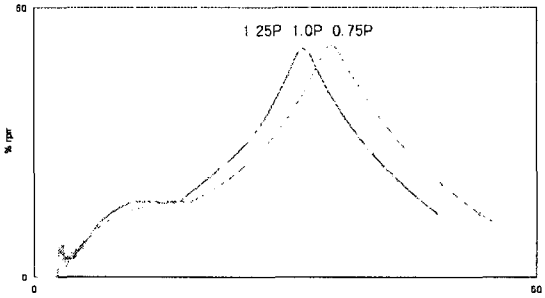

그림 2. 정, 출력에 따른 초기 기동 속도 데이터
Fig. 3. Starting speed data of constant power control.

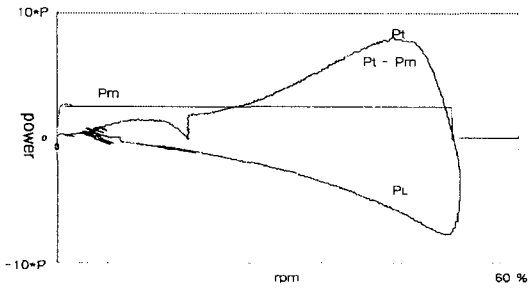

그림 3. Pm = 1.25P 시스템 출력 분석
Fig. 3. System power analysis data of Pm = 1.25P starting Case.

기계 출력(Pt)는 가스 터빈 엔진 시스템의 운동에너지 변화량을 단위시간으로 나누어 이를 가스 터빈 엔진 시스템의 출력으로 도식하였다. 기계 출력에 전동기 출력을 뺀 [Pt-Pm]은 가스터빈 엔진의 기계적인 출력을 의미한다. 가스 터빈 엔진은 점화 후에도 터빈에서 발생한 출력보다 압축기 부하 출력이 더 큰 구간이 존재하는데 그 경계점은 [Pt-Pm=0] 이 되는 시점이다. PL은 50% rpm 도달 후 엔진 및 전동기 출력이 없는 상태에서 free run하는 상태에서의 운동

출력이 없는 상태에서 free run하는 상태에서의 운동 에너지 변화량을 속도별 출력으로 표시한 것으로 각 속도별 부하 등가 할 수 있다. 각 속도별 엔진 터빈은 점화 이후에 Pt-Pm와 PL과의 차이로 근사할 수 있다. <그림 4>은 정 출력제어 모드 시 연소기 온도 데이터로 1.25P 정 출력 제어 시 연소기 온도상승이 가장 작음을 알 수 있다. 이 경우의 인버터 입력 측에서 전력계로 관측된 입력 파워는 정 출력제어 모드 시 1.5P로 효율이 80% 정도에 도달하였다. 이 경우 기동 특성이 양호하고 필요 입력 파워 또한 적절하여 이를 기동 출력으로 설정하였다.

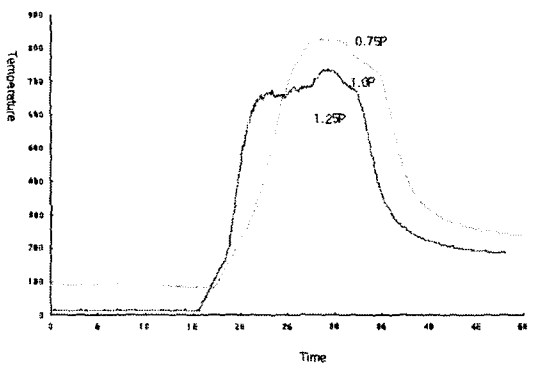

그림 4. 정, 출력 시동 시 연소기 온도

Fig. 4. EGT Temperature of Constant power output condition.

4. 결 론

초고속 발전기를 가스터빈 엔진의 시동 전동기로 이용하기 위하여 초고속 동기전동기 벡터제어 알고리즘을 시동기에 적용하였다. 엔진 제어기와의 제어의 편이성 확보하고 입력 소모 전력을 제한하기 위하여 엔진 시동용 전동기 정, 출력 제어 모드를 기동 알고리즘을 제안하고 이를 실제 시스템에 적용하여 실험을 실시하였다. 엔진 적용 시험을 통하여 출력 파워에 따른 엔진 가속특성을 확인하였으며 해당 데이터의 분석으로 각 속도별 엔진 출력, 터빈 출력 및 부하를 파악 할 수 있었다. 가스터빈 엔진에 직결로 초고속 발전기를 장착하여 기계 출력과 전기 출력을 획득하는 시스템은 최근에 연구되고 있는 분야로 선행연구로서의 가치를 지닌다. <그림 5>와 표2는 실제 시험에 적용된 전력변환모듈의 사진과 발전기 및 인버터 시스템의 상세 사양이다. 추후 과제로는 다양한 실험을 통한 엔진 시스템을 비롯한 전체 시스템의 모델링과 보다 정교한 시험을 통한 출력 및 부하 분석이 필요하다.

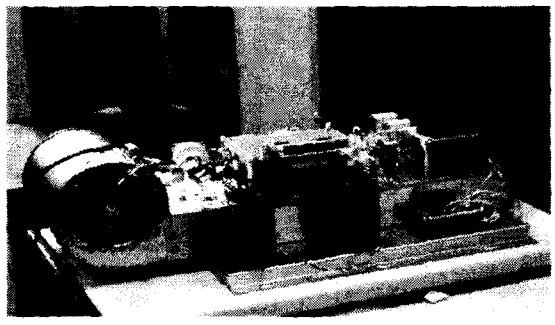

그림 5. 시험용 전력변환장치

Fig. 5. Power Stack for Starting Test.

표 1. 발전기 및 인버터 사양

Table1. Generator and Inverter Specification.

	전동기형식		제어기형식
역기전력 형태	정형파	제어방식	벡터제어
상인덕턴스	50uH	정격출력주파수	500Hz
상역기전력 Vp-n	3.2V/krpm	PWM 주파수	15000Hz
정격 회전속도	60,000rpm	적용 CPU	TMS320VC33

참 고 문 헌

[1] Cristian Anghel, "A Novel Start System For An Aircraft Auxiliary Power Unit", IECEC, 35th Meeting, 2000.

[2] Min-sik Rho, Jeong-hyeck Kwon, Ji-seob Byeon, "The Development of Turbo-Generator System with Direct Driving High Speed Generator", IEEK, Summer Conference, 2003.

[3] 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.