

극저온 환경에서의 정 출력 제어를 적용한 마이크로터빈의 새로운 시동 로직 개발

New Start-Up Logic for Microturbine by Constant Power Control under an Extremely Low Temperature

노 민 식*
(Min Sik Rho)

Abstract : This paper presents a constant power control logic for perfect starting a microturbine in vehicle. Under extremely low temperature, performance of the start-up system is severely dropped than that of room temperature because of increasing of load of mechanical parts including engine core and drop of the lead-acid battery capacity. Unfortunately, performance drop of lead-acid battery makes severe problems that cause a malfunction of fuel and lubrication system and power fail of digital devices. So we propose the new start-up logic by constant output power control of lead-acid battery using PWM inverter controller for preventing above problems and keeping good performance of start-up system for microturbine. Also, we prove usefulness of new start-up logic through experimental results under -32°C ambient temperature.

Keywords : start-up logic, constant power, microturbine, inverter, sensorless

I. 서론

마이크로터빈(microturbine)이란 소형 가스 터빈 엔진에 고속 발전기를 직접 장착하고 있으며, 발전 용량이 300kW 미만인 발전 시스템을 말한다. 마이크로터빈은 일반적으로 25,000rpm 이상의 고속 운전으로 에너지의 밀도가 높아 전기 부하 추종능력 및 전력 품질이 뛰어나며, 단순한 구조로 유지 보수의 편리성, 그리고 완전 연소에 의한 낮은 배기 가스로서 친환경성 등 다양한 장점을 보유하고 있다[1].

마이크로터빈은 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 압축 공기 공급용으로, 그 밖의 민수 산업용으로는 대형건물의 전력발전용, 낙도, 건설현장 등에서의 비상발전 등에 사용되고 있는 등 그 용도가 증가되고 있다[1].

마이크로터빈의 시동 시스템의 동작을 분석해 보면, 시동 시 필요한 고속의 엔진 회전을 고속 발전기를 전동기로 이용하여 직접 회전 구동에 의해 회전 속도를 얻는다. 특히 차량이나 낙도 등에 독립형 구조로 설치되어 전기에너지 및 엔진의 동력을 공급하는 마이크로터빈은 시동용 고속 발전기를 구동하는 전력을 자체적인 내장 축전지 혹은 차량이 장착하고 있는 한정된 축전지에서 공급 받는다. 그리고 차량 혹은 독립형 마이크로터빈의 운영의 환경 조건은 매우 광범위하여 외부 환경에 따라 극저온 환경에서부터 극 고온 환경까지 이른다.

특히 극저온 환경하의 차량 혹은 독립형 마이크로터빈의 엔진 시동은 상온에서와 달리 극저온으로 인한 환경적인

원인으로 시동 시스템의 파워 부족이 발생하고 많은 시동 실패가 발생한다. 극저온 환경 하에서의 시동 시스템의 파워 부족을 일으키는 대표적인 원인으로서는 다음의 3가지를 들 수 있다.

1) 극저온 환경에서의 축전지의 급격한 성능저하 및 용량 저하이다. 납축전지는 납, 황산간의 반응에 의해 전기출력(방전)하는 전기화학장치이므로 저온 시에는 전기화학반응성이 떨어지게 되어 전기 출력이 저하된다. 극저온 -29°C 상태에서의 납축전지의 출력 특성은 상온에 비해서 45% 이하로 떨어진다고[3]. 마이크로터빈 시동 시에는 축전지의 정격 출력전류 이상의 과도 전류를 이용하는 납축전지의 30초 동안의 급 방전특성을 이용한다. 저온에서는 축전지 내부에서의 화학반응이 저하되므로 축전지의 급 방전 특성은 온도가 -10°C 이하가 되면 급속히 저하된다[3].

2) 마이크로터빈 회전체의 기계적인 부하 증가이다. 베어링에 공급되는 윤활유의 점도는 엔진의 시동 안정성을 결정하는 가장 중요한 요소 중의 하나이다. 극저온 하에서는 오일의 점도가 너무 높아 시동을 위한 모터링 시 저항이 매우 커진다. 사용되는 윤활유의 적절한 유동점과 점도가 확보되지 않는다면 엔진을 시동하기 전에 오일의 예열이 꼭 필요하다[3].

3) 극 저온시의 연료 및 윤활 장치는 동결 현상으로 성능 저하가 발생하며, 이러한 현상은 점화 시간에 지연을 가져와 시동 시간을 지연시켜 시동구간의 소비 전력을 더 크게 하는 요인이 된다.

극저온에서의 시동 시스템의 위의 3가지 한계 상황은 상온에서와는 달리 설계된 시동 시스템의 시동 구간에서의 순간 입력 전력의 부족 현상을 초래한다. 즉 상온에서의 운전 프로파일을 수정 없이 적용할 경우 시동 구간에서 축전지의 전력 공급의 부족으로 시동 시스템의 공급 전압이 급

* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 9. 1., 채택확정 : 2006. 11. 2.

노민식 : 신라대학교 전자공학파(msrho@silla.ac.kr)

격히 떨어져 저 전압으로 운전 정지되는 사태가 발생한다. 이러한 저전압 정전 사태는 다음과 같은 심각한 시스템의 결함을 가져온다.

1. 디지털 제어 전원의 정전으로 제어보드의 리셋
2. 축전지 전압을 직입해서 구동되는 연료 장치의 제어 불능으로 점화 실패
3. 축전지 전압을 직입하는 유탄유 공급용 구동 장치의 성능 저하로 초고속 회전체에 유탄유의 불충분 공급에 의해 기계적 마모 현상 발생.

따라서 극저온 하의 마이크로 터빈 운전 시에는 상온 운전 시와는 달리 시동 구간에서의 소비 전력을 제어하여 저전압 현상 혹은 전력 부족 현상을 배제하며 시동을 성공할 수 있는 시동 로직이 요구된다. 시동구간에서의 소비전력의 양은 시동 운전 프로파일에 따라 결정되며, 대표적인 주요 요인은 점화시점(점화속도), 시동에 걸리는 시간, 운전 가속 기울기이다.

본 논문에서는 극 저온환경에서 소비 전력 제어가 가능한 시동 로직의 설계를 위해 마이크로터빈의 시동 메카니즘과 기존의 상온에서의 점화로직을 분석한다. 이 분석결과를 바탕으로 극저온의 한정된 공급 전력의 한계에서 정 출력 제어를 적용한 시동 로직을 제안한다. 그리고 상온에서의 마이크로터빈 엔진 모델을 기준으로 시뮬레이션을 통해 제안된 로직에 의한 엔진 모델에서 소비 전력 제어 운전이 가능함을 검증한다. 마지막으로 실제 극저온 환경(-32°C)에서 최적의 정 출력 제어 값을 결정하고 마이크로터빈의 시동 실험을 수행하여 결과를 분석하며 제안된 로직의 타당성 및 실용성을 입증한다.

II. 마이크로터빈의 시동 메카니즘 분석

본 논문에서 설계한 마이크로터빈의 시동기의 구성도를 보면 그림 1과 같다. 차량형 마이크로터빈의 시동을 위한 motoring mode시의 동작을 살펴보면 축전지(lead-acid battery)에서 전력을 공급받아 구성된 승압기(boost)를 통하여 인버터에 공급될 높은 DC 링크 전압을 생성한다.

인버터(VSI)는 엔진 시동 알고리즘 및 고속전동기(PMSG) 구동 알고리즘에 따라 엔진의 가속도 및 설정된 프로파일

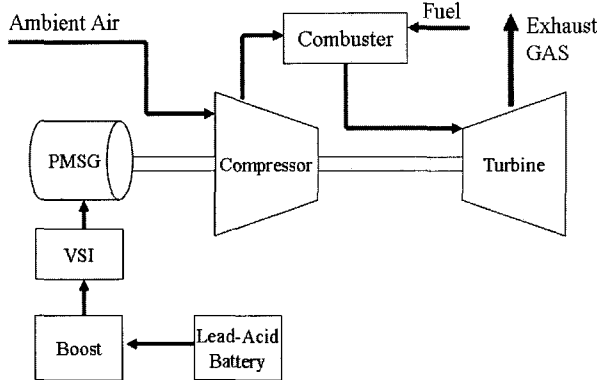


그림 1. 단축 마이크로터빈.
Fig. 1. Single-shaft microturbine.

로 고주파 교류 전류를 생성하여 고속 전동기의 속도제어를 하게 된다. 고속 회전 중에 점화가 이루어지며 점화 후 시동 프로파일에 따라 가스터빈은 운용 속도에 이른다.

마이크로터빈의 시동 구간에서의 시동에 소모되는 파워는 2가지 모드로 구분된다. 첫째, 점화 전 축전지의 전기에너지를 이용한 점화 속도까지의 운전 구간(mode I)과 둘째, 점화 후 축전지 에너지에 의한 전동기 구동력과 더불어 연료 연소에 의한 터빈에서의 회전력이 더해지는 점화 후 구간(mode II, 가속 구간)으로 나누어진다. 이에 대한 수학적 모델링은 아래와 같다.

Mode I:

$$P_I = T_{elec}w = J \frac{dw}{dt} + Bw + T_{comp} \tag{1}$$

Mode II:

$$P_{II} = P_{elec} + P_{engine} = (T_{engine} + T_{elec})w \tag{2}$$

여기서,

$$T_{engine} = T_{turbine} - T_{comp}$$

T_{comp} : 회전시의 압축기 부하 토크

$T_{turbine}$: 점화 후 터빈의 연소에 의해 터빈 토크

T_{elec} : 인버터에 의해 전기적으로 발생하는 토크

w [rad/sec]: 회전속도

B : 마찰 계수

J [Kgm²]: 관성 모멘트

J [Kgm²] = $J_{engine} + J_{generator} = 0.013$ [Kgm²]: 엔진과 발전기가 한 축에 연결되어 있어 관성 모멘트 J는 엔진 관성과 고속 발전기의 축 관성을 합한 값.

위의 (1), (2)에서 나타나듯이 마이크로터빈의 시동 구간에서 필요한 파워는 점화 전 구간에서는 마이크로터빈 회전체의 기계적인 파라미터에 의해 전기적인 소모 전력이 결정되나, 점화 이후의 소모 전력은 전기적 파워 및 기계적 파워의 합성에 의해서 발생함을 알 수 있다. 그리고 시동 구간의 대부분의 소모 전력은 속도에 비례하여 고속 회전이 이루어지는 점화 후 구간에서 발생한다.

일반적인 마이크로터빈의 상온에서의 시동 로직을 살펴보면 점화시점, 시동 구간에서의 속도 및 가속 시간은 엔진의 공연비 제어 특성과 운전 온도 제한 조건하에 사용자가 시간 및 기울기를 선정하고 미리 정해진(pre-defined) 시동 프로파일로 운전한다[2]. 이러한 운전 방식에서는 상온의 시동 프로파일로 고정되어 있어 점화 후에도 프로파일 가변이 불가해 환경적인 요인의 변화로 부하의 증가 시 운전 프로파일 유지를 위해 과도한 전력 소모가 발생한다. 특히 본 논문에서 연구한 극저온에서의 부하의 급격한 증가나 시동 시스템의 성능 저하에 대해서도 동일한 상온 운전 프로파일이 적용되어 시동 시스템의 운전에 과부하가 발생한다. 이에 본 논문에서는 소모 전력의 가변 제어가 가능한 점화 후 구간에서 축전지의 소비전력 특성을 파악하여 전기적 출력을 일정량으로 제어하고, 연료량의 변화로 연소에 의한 기계적 에너지를 제어하여 시동 구간의 프로파일을 변경하는 엔진 운전을 하고자한다. 정 출력 제어는 터빈의 운전 프로파일의 변경을 가져오며 여러 가지 시동 관련된

제한 조건을 만족하도록 설계되어야 한다.

따라서 속도에 따른 공연비 및 연료량 제어에 대한 분석이 요구되며 연료량의 제어 크기는 설계된 엔진의 시동 구간에서의 운전 온도 한계 영역에 따라 결정되어야 한다. 즉 연료의 과도한 투입에 의한 기계적 에너지를 상승은 한계가 있으며 이것은 엔진의 수명에 치명적인 영향을 준다. 엔진 수명에 영향을 미치지 않는 연료의 성능적인 분석에 따라 시동을 위한 연료량 제어가 이루어져야 한다.

본 논문에서 제안하는 정 출력 제어에 따라 시동 구간에서의 시동시간 및 마이크로터빈의 가속도의 크기는 미리 정해진 상온 로직에 따른 운전 거동과 달리 엔진 시스템의 부하 변동에 따라 자동적으로 결정된다.

III. 마이크로터빈 정 출력 시동 알고리즘 설계

본 논문에서 제안하는 정 출력 제어 로직은 점화 후 엔진 가속 구간에서의 축전지 소모 전력을 일정하게 제어하는 것이다. 이는 시동 구간에서 고속 발전기를 인버터로 회전 구동 시 소비되는 전력을 일정 값으로 제어하는 것이다.

인버터의 고속 발전기 회전을 위한 전류 제어 시 엔진 축에 전달되는 기계적인 파워는

$$P_m = V_{batt} I_{batt} \eta_{boost} \eta_{inv} \eta_g \tag{3}$$

여기서,

- P_m : Rotational output power
- V_{batt} : Battery output voltage
- I_{batt} : Battery output current
- η_{boost} : Boost efficiency
- η_{inv} : Inverter efficiency
- T_m : Rotational Torque
- n_g : generator efficiency

이다. 그리고

$$P_m = V_{batt} I_{batt} \eta_{boost} \eta_{inv} \eta_g = T_m w_m \tag{4}$$

여기서,

- T_m : Rotational Torque
- w_m : Rotational Speed 이다.

시동 중 가속 구간에서 출력을 일정하게 하기 위해서는 수식(4)에서 나타나듯 w_m 에 따른 T_m 를 제어함을 의미한다. 이때 제어기 구성의 단순화를 위해 부하에 따른 소비 전력이 변동할 때 전력 공급기의 효율은 일정하다고 가정한다.

본 논문에서는 고속 회전체의 운전 특성 상 속도 센서를 배제하고, 속도 추정기를 갖는 센서리스 벡터제어기[5]를 구성하였으며, 3상 동기 전동기의 속도에 따른 회전 토크를 제안된 로직에 따라 제어함으로써 정 출력 제어를 구현하였다. 3상 영구 자석 동기 전동기의 등가회로는 그림 2와 같고, 전압 방정식은 다음과 같이 표현되어진다.

$$\begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j\omega L_s & 0 & 0 \\ 0 & R_s + j\omega L_s & 0 \\ 0 & 0 & R_s + j\omega L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} e_a \\ e_b \\ e_c \end{bmatrix} \tag{5}$$

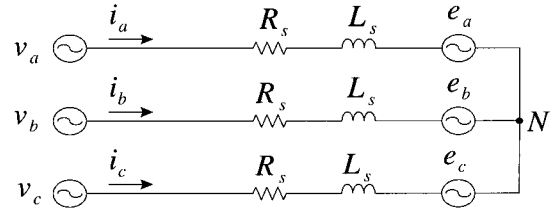


그림 2. 3상 동기전동기 등가회로. Fig. 2. Equivalent circuit of 3 phase synchronous motor.

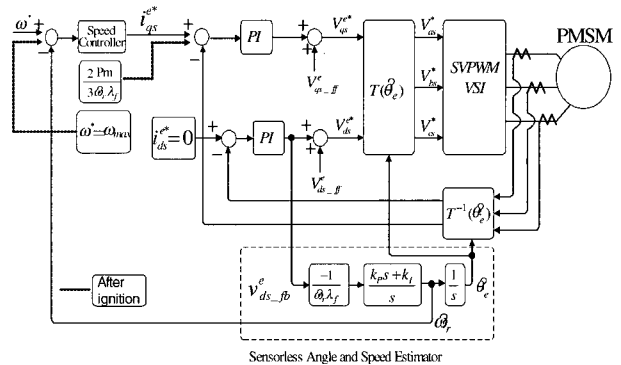


그림 3. 정 출력 제어를 위한 센서리스 벡터 제어기. Fig. 3. Sensorless vector controller for constant power control.

$$\begin{bmatrix} V_{ds}^e \\ V_{qs}^e \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s + j\omega L_s & -\omega L_s \\ \omega L_s & R_s + j\omega L_s \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds}^e \\ i_{qs}^e \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} 0 \\ \omega \lambda_f \end{bmatrix} \tag{6}$$

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

본 논문에서 3상 동기전동기의 벡터 제어를 적용하였으며, SVPWM기법을 이용하여 전류제어를 위한 인버터를 구성하였다. 그리고 제안된 정 출력 제어를 위해 속도 제어를 위한 토크 전류(i_{qs}^e , i_{ds}^e)를 그림 3과 같이 조건에 따라 가변 입력될 수 있는 제어기를 수정 설계하였다. 그림 3은 본 논문에서 제안하는 정 출력 제어를 적용하기 위한 시동 시스템의 인버터에 적용된 센서리스 벡터 제어기의 블록 다이어그램이다.

센서리스 벡터 제어기의 전향 보상은 아래와 같이 구성된다[5].

$$V_{ds-f}^e = R_s i_{ds}^{e*} - L_s \widehat{\omega}_r i_{qs}^{e*} \tag{7}$$

$$V_{qs-f}^e = R_s i_{qs}^{e*} + L_s \widehat{\omega}_r i_{ds}^{e*} + \widehat{\omega}_r \lambda_f \tag{8}$$

여기서,

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

그림 3에 나타나듯 정 출력 제어를 위해 추정된 속도를 이용하며 토크 분 전류 제어기를 다음과 같이 수정하였다.

$$T_m = \frac{P_m}{w_m} = \frac{3}{2} \frac{P}{2} \lambda_f I_{qse}^* \tag{9}$$

로 표현된다.

λ_f : 역기전력 상수

P : 극수

I_{qse}^* : q -axis current 이다.

수식 (9)에서 역기전력을 고정 값으로 하면 토크 제어는 q 축 전류에 의해 간단히 구현될 수 있다.

즉,

$$I_{qse}^* = \frac{4P_m}{3P\hat{\omega}\lambda_f} \quad (10)$$

로 주어진다. 여기서 $\hat{\omega}$ 은 추정 회전 속도이다. 그리고 점화 후 가속 구간에서는 가속 시작 시 기준 속도 w^* 명령을 가속 구간의 최종 목표 값을 적용하여 토크 전류 제어에 의한 가속 기울기가 자동적으로 결정되도록 설계하였다.

IV. 시뮬레이션

제안된 정 출력제어 알고리즘에 따라 시뮬레이션을 실시하였다. 시뮬레이션 모델은 제안된 센서리스 벡터 제어를 matlab simulink로 구성하였으며, II장의 마이크로터빈 회전체의 부하모델의 수식에 따라 구성되었다. 시뮬레이션을 위한 simulink model은 아래 그림과 같다.

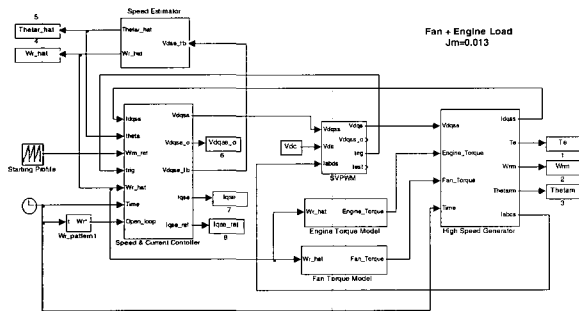


그림 4. 마이크로터빈의 시뮬레이션 모델.

Fig. 4. Simulation model of microturbine.

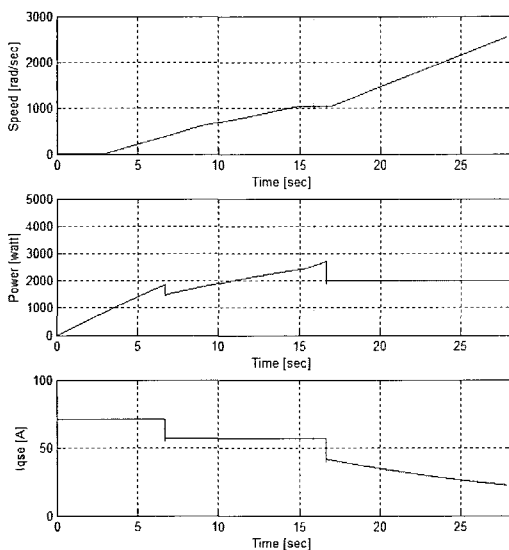


그림 5. 2.0kW 정 출력 제어 시뮬레이션 결과.

Fig. 5. Simulation data by 2.0kW constant power output.

(1)와 (2)을 이용하여 압축기 모델 및 엔진 모델을 테스트 입력에 의해 데이터를 획득하고, 보간법으로 수학적인 토크 모델을 구성 적용하였다. 시뮬레이션은 제안된 정 출력 로직에 따라 점화 이후 전동기 토크 전류 제어에 의해 소모 전력이 일정하게 제어되는가를 확인하고자 실시하였다. 다음 그림 5는 점화 속도인 1047rad/sec에서 점화가 발생한다고 가정하고 점화 후 2000W의 정 출력 제어로 마이크로터빈의 시동을 실시한 결과이다.

그림 5의 시뮬레이션 결과는 위쪽부터 속도그래프[speed], 출력 파워[power], 인버터에서 출력되는 토크 전류[iqse]를 나타낸다. 그래프에서 보이듯 점화 후 토크 전류인 iqse는 정 파워 출력 제어를 위해 속도가 증가함에 따라 비례적으로 감소함을 알 수 있고, 이에 따라 점화 이후 파워는 2000w의 일정한 값으로 제어됨을 알 수 있다.

V. 실험 결과

본 논문에서와 같이 극저온(-32°C) 환경에서는 축전지의 성능 저하에 따른 용량의 정량적인 변화량 및 터빈엔진의 부하 증가의 정량적인 평가는 비선형 특성이 많이 내포되어 시동 시스템에 미치는 영향을 정량적인 값으로 예측하기는 매우 까다롭다. 따라서 본 논문에서는 극저온(-32°C) 상태에서의 엔진 부하 평가 및 축전지 전력 상태를 실험적인 고찰에 의해 평가한다. 이를 위해 제안된 로직의 실제 적용을 위해서는 2가지의 실험을 실시한다. 첫째, 정 출력 제어 값을 선정하기 위한 실험을 실시한다. 둘째, 선정된 정 출력 제어 값을 마이크로터빈의 운전에 적용하여 엔진의 운전을 실시한다.

먼저, 정 출력 제어 값 선정을 위한 실험은 아래의 조건에 하에서 결정된다.

Condition 1: 정 출력 제어로 공연비의 제한과 운전 특성(가속기울기, 시동 시간)이 바뀌며 시동 구간에서 온도 운전 특성이 바뀐다. 정 출력 제어 값은 엔진의 시동 구간에서 설계된 온도 운전 한계를 넘어서지 않도록 필요한 최소한의 시동 공기를 공급할 수 있는 값으로 결정되어야 한다. 본 논문에서 적용된 엔진은 시동 구간에 배기가스의 온도(EGT, Exhausted Gas Temperature)가 750°C이하로 운전되도록 공연비가 형성되어야 한다.

Condition 2: 점화 속도까지 이르는 소모 전력은 순수 축전지 전력임으로 점화 후 가속을 위해서는 비 점화 상태에서 정속도 운전 시 소모되는 전력(정속도 압축기 소모전력)보다는 공급 전력이 커야한다.

Condition 3: 시동 구간에서 시동기 외 소모되는 전력(윤활 모터, 연료 모터, 제어전원)을 포함하여 급 방전(30초 방전률)할 소모전류를 계산하며, 급 방전 시 축전지의 전압은 시동 시스템의 저전압이 발생치 않도록 18Vdc 이상을 유지하여야 한다.

Condition 4: 정 출력 제어 미리 정해진 상온 로직 적용 시에 비해 시동 시간이 길어진다. 위의 condition 1, 2, 3을 만족하면서 최대도 공급할 수 있는 파워를 정 출력 제어 값으로 선정하여야 한다. 이로 인해 최대한 지연된 시동 시간을 보살할 수 있다.

다음은 실험에 적용된 마이크로 터빈의 구성 및 시동 시스템에 대한 상세한 사양은 아래 표 1과 같다.

다음 그림 6의 실험데이터는 마이크로터빈의 온도에 따른 부하변화를 보고자 상온과 -32°C저온에서 상온상태의 축전지로 각각 시동 한 결과이다. 그래프에서

왼쪽 축 : 속도[rad/sec]와 소모 전력[w]

오른쪽 축 : 축전지 전압[Vdc].

Battery_c : -32°C에서의 축전지 전압.

Power_c : -32°C에서의 소모 전력.

Speed_c : -32°C에서의 운전 속도

Battery : 상온에서의 축전지 전압.

Power : 상온에서의 소모 전력.

Speed : 상온에서의 운전 속도

를 나타낸다.

표 1. 마이크로터빈 사양.

Table 1. Specification of the microturbine.

System	Item	Detail
Engine	Operation Speed	60,000 rpm
	type	Single-shaft
	J	0.0108 kgm^2
Generator	Type	PMSG
	Rated Power	25kW @ generator mode
	Pole	2
	Ls	68uH
	λ_f	0.0305 [volt/rad/sec]
Inverter	J	0.0022 kgm^2
	type	VSI
	efficiency	93%
Boost	Rated Power	10kW
	Type	Full Bridge
	Rated Voltage	6 kW
Battery	Output Voltage	235 VDC
	Rated output	12VDC / 100A X 2EA
	CCA	580A (7.2 Vdc, 30sec @-18°C)
	Product name	PT-100D (Maker: Solite battery)
	Normal Voltage	24Vdc

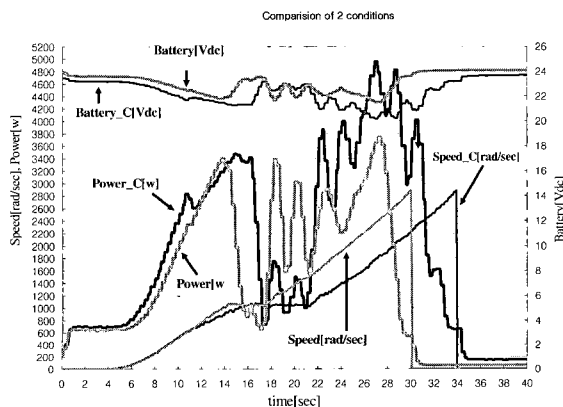


그림 6. 상온 시동과 저온 시동시의 비교데이터.

Fig. 6. Comparison of start-up data at -32°C and room temperature.

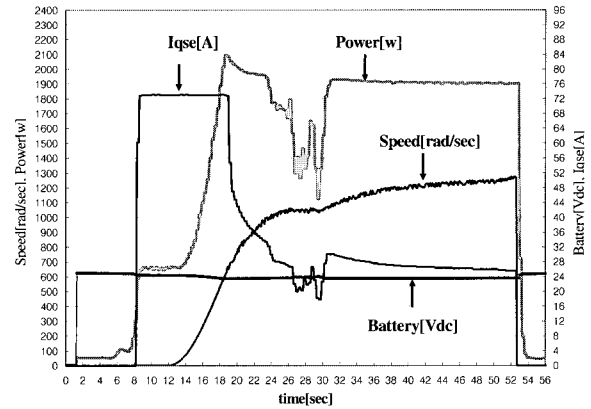


그림 7. 1.9kW의 소모 전력에 의한 속도 그래프.

Fig. 7. Speed by 1.9kW constant power output at room temperature.

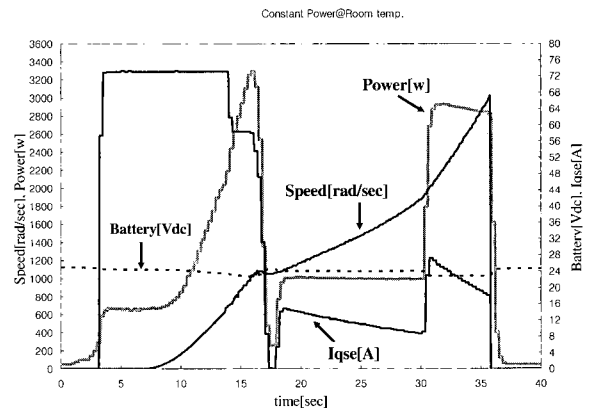


그림 8. 1kW와 2.9kW 소모 전력에 의한 시동 데이터.

Fig. 8. Start-up data by constant power output of 1kW and 2.9kW at room temperature.

그림 6에서 점화 후의 평균전력으로 부하 증가를 예상할 수 있다. 점화 후 소모 평균전력은 다음과 같이 계산된다. 저온시의 평균 소모 전력=3200W이며, 상온시의 평균 소모 전력=2423W로 계산되어져 저온 시의 부하 증가가 1.33배로 나타난다. 여기서 극저온 운전시의 정 출력 제어 최대 값을 3200[w] 으로 설정할 수 있다.

Condition 2의 점화 속도 부근에서의 압축기 소모파워를 알아보기 위해 상온 상태에서 점화를 시키지 않고 순수 전기적 정 출력 파워에 의한 회전 속도를 살펴본다. 그림 7의 그래프는 1.9kW 정 출력 제어를 통해 상온 시 동작시킨 마이크로터빈의 운전 속도 그래프이다. 속도가 12,000rpm에 포화됨을 알 수 있다. 실제 적용된 점화 속도는 여유를 고려하여 10,000rpm에 소모파워로 1.9kw로 결정하였다. 상온시의 부하가 1.9kW로 소모됨으로 저온 시에는 부하 증가가 앞서 계산한 결과 133%로 증가한다. 따라서 저온 시로 환산하면 2.527kW의 소모 전력 이상이 필요하다. 그래프에서

왼쪽 축 : 속도[rad/sec]와 소모 전력[w]

오른쪽 축 : 축전지 전압[Vdc]과 토크전류[A]

Battery : 축전지 전압.

Power : 소모 전력.

Speed : 운전 속도

Iqse : 축전지 전압.

를 나타낸다.

앞의 그림 8은 설계된 정 출력 로직의 제어 성능을 파악하기 위해 상온에서 구간 별로 1kW, 2.9kW의 2단계의 정 출력 제한 값을 가지고 실험한 결과이다. 그래프에서

왼쪽 축 : 속도[rad/sec]와 소모 전력[w]

오른쪽 축 : 축전지 전압[Vdc]과 토크 전류[A]

Battery : 축전지 전압.

Power : 소모 전력.

Speed : 운전 속도

Iqse : 축전지 전압.

를 나타낸다.

그림 8에서 설정된 정 출력 제어 값을 1kW에서 2.9kW로 변경함에 따라 제어기가 잘 추종함을 알 수 있다.

Condition 3과 같이 마이크로터빈의 시동 구간에는 시동기 외에 윤활용 펌프 모터, 연료용 펌프 모터, 각종 제어기 전력 등 또 다른 소비 전력이 발생한다. 축전지의 급방전 데이터는 일반적으로 -18°C를 기준으로 제시됨으로 본 논문에서는 -32°C의 성능 데이터를 실제 시험을 통해 축전지의 특성을 파악하였다. 적용된 마이크로 터빈의 시동 구간에서의 소모 전력을 모두 포함하여 급 방전 시험을 실시하고 이에 따른 축전지 18Vdc를 유지하는 소비 전류를 산정하였다. 결과적으로 최적화된 축전지 소비전류는 20Vdc, 140A로 예상되었으며 이때의 소비전력은 2.8kW이다. 따라서 본 논문 -32°C 극저온 시동의 정 출력 제어 값을 2.8kW로 설정하였다. 그리고 결정된 제어 값은 위의 condition 2,3,4를 만족한다.

다음 그림 9는 설정된 정 출력 제어 값인 2.8kW를 적용하여 -32°C 극저온 환경에서 엔진을 시동한 실험 결과이다. 점화 이후 가속 구간에서 토크 전류 Iqse*가 속도가 선형적으로 감소함을 알 수 있고, 이에 따른 축전지 소비 전력이 2.8kW로 나타남을 알 수 있다. 그래프에서

왼쪽 축 : 속도[rad/sec]와 소모 전력[w]

오른쪽 축 : 축전지 전압[Vdc]과 토크 전류[A]

Battery : 축전지 전압.

Power : 소모 전력.

Speed : 운전 속도

Iqse : 축전지 전압.

다음 그림 10의 비교 그래프는 상온과 저온 시의 엔진의 시동 구간에서의 온도를 변화를 나타내었다. 그래프에서

왼쪽 축 : 속도[rad/sec]

오른쪽 축 : 가스터빈 배기가스온도[°C]

Speed_C : -32°C의 시동시 운전 속도

Speed : 상온의 운전 속도

EGT_C : -32°C에서의 시동 시의 배기가스온도

EGT : 상온에서의 시동 시의 배기가스온도

를 나타낸다.

앞에서 언급한 것과 같이 정 출력 운전의 한계 값 선정 시에는 condition 1의 조건 만족이 엔진의 수명에 미치는

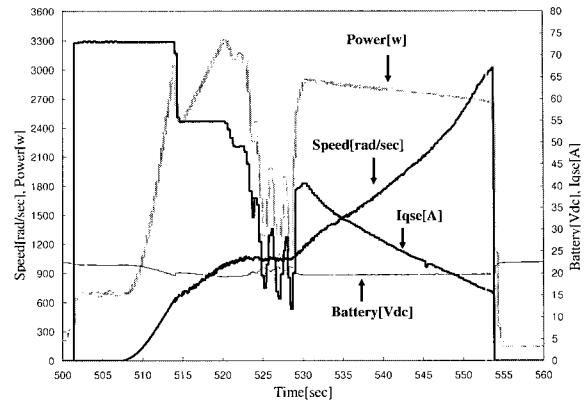


그림 9. 2.8kW 정 출력에 의한 저온 시동데이터.

Fig. 9. Start-up data by 2.8kW constant power at -32°C.

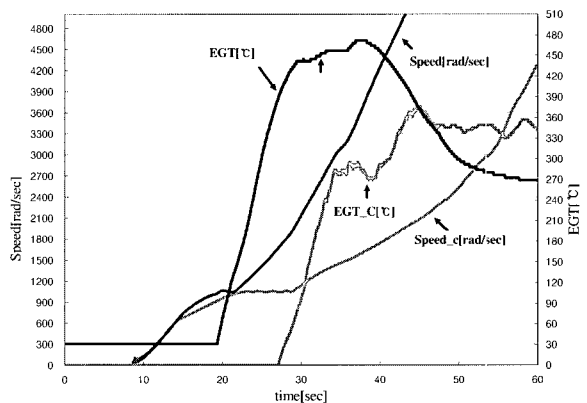


그림 10. 상온 시동 및 저온 시동의 EGT 비교.

Fig. 10. EGT data of room and -32°C temperature.

영향이 매우 크다. 제안된 로직에 의한 실험 결과 적용된 엔진의 초기 설계 시 고려된 시동 시의 온도 한계(750°C)에 충분한 여유를 가짐으로써 엔진의 수명 성능에 영향을 주지 않음이 평가되었다.

이상의 실험 결과와 같이 제안된 정 출력 제어에 의해 극저온에서의 마이크로터빈의 시동이 완벽하게 이루어져 제안한 로직의 타당성과 유용함이 입증되었다. 또한 정 출력 제어 운전은 엔진의 부하의 상태에 따라 가변적인 시동 프로파일이 결정됨을 알 수 있다. 본 연구에서는 적용한 상온과 극저온에서의 시동 로직에 따른 시동 시간 및 평균 소모 전력을 정리하면 표 2와 같다.

표 2. 주변온도와 로직에 따른 시동 결과.

Table2. Start-up results according to the ambient temperature and adopted logic.

주변 온도	축전지 전해액 상태	시동 로직	점화 후 모터링 시간(sec)	점화 후 평균 소비 전력(watt)
상온	상온	pre-defined	12.5	2423
-32°C	상온	pre-defined	12.5	3200
상온	상온	정 출력	18.1	1750
-32°C	-32°C	정 출력	24.6	2800

VI. 결론

본 논문에서는 극저온(-32도)하에서의 마이크로터빈의 안정적인 시동을 위한 정 출력 제어 로직을 설계하고 마이크로 터빈의 실제 시동을 통하여 제안된 로직의 타당성을 입증하였다. 정 출력 제어 로직 설계를 위해 마이크로 터빈의 시동 메카니즘을 분석하여 시동 구간에서 점화 후 전기적인 출력을 일정하게 제어하며 엔진의 연소에 의한 출력을 제어하여 안정적인 시동이 가능한 로직을 설계하였다. 그리고 최적의 정 출력 제어 값 선정을 위해 극 저온하의 축전지의 특성 변화, 마이크로 터빈의 부하 분석, 마이크로터빈 안정적 운전의 제한 조건을 고려하고, 정량적인 값의 해석이 까다로운 극저온하의 비선형적인 특성에서도 최적 값을 선정하기 위해 해석 시험을 수행하였다. 그리고 결정된 정 출력 제어 값으로 극저온 운전을 실시하였으며, 이에 따라 마이크로터빈의 운전 프로파일, 시동 시간 및 속도의 거동이 엔진의 부하 상태에 따라 자동적으로 결정됨을 보였다.

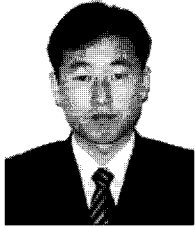
나아가 본 논문에서 제안하는 정 출력 로직은 상온 및 저온의 다양한 환경에서도 적용이 가능하며, 최적의 소비 전력으로 마이크로터빈의 시동 시스템을 설계하는데 매우 유용할 것이라 판단된다. 마이크로터빈 시동 시스템의 설계 시 전력 공급기의 공급 용량 제한이나 최적화 설계가 요구

시 정 출력 제어를 적용한 시동기를 설계하고, 시동 구간에서의 온도 제어를 추가한 연료 제어기를 구성하면 우수한 성능의 시동 시스템이 설계될 수 있다고 판단된다.

참고문헌

- [1] W. G. Scott, "Micro-turbine generators for distribution systems," *IEEE, Industry Applications Magazine*, pp. 57-62, 1998.
- [2] 노민식, 박승엽, "터보 제너레이터의 시동기 제어에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제10권, 제3호, pp. 286-293, 3. 2004.
- [3] 최강모 "디젤 엔진의 냉시동(Cold Start)의 특허 동향 보고서," 한국특허정보원, 12. 2004.
- [4] L. Xu and C. Wang, "Implementation and experimental investigation of sensorless control schemes for PMSM in super high variable speed operation," *IEEE/ISA*, 1998.
- [5] B.-H. Bae, S.-K. Sul, J.-H. Kwon, and J.-S. Shin, "Implementation of sensorless vector control for super-high speed PMSM of turbo-compressor," *IEEE/ISA Chicago Annual Meeting*, 2001.

노 민 식



1971년 9월 10일생. 1996년 창원대 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전자공학과 졸업(박사). 1999년~2006년 삼성 테크윈(주) 파워 시스템 연구소 선임연구원. 2006년~현재 신라

대학교 자동차기계전자공학부 전자공학과 교수. 관심분야는 임베디드 시스템, 디지털 제어, 전력 변환 장치 설계.