

# 마이크로터빈의 새로운 점화 기법과 점화 인식 로직 개발

## New Ignition Method and Ignition Recognition Logic for a Microturbine

노민식\*, 김기래, 최영규  
(Min-Sik Rho, Gi-Rae Kim, and Young-Kyu Choi)

**Abstract :** This paper presents new ignition method and ignition recognition logic for a microturbine. New ignition method is designed by constant speed control of a microturbine with pre-determined time during an ignition period. It makes more accurate air-fuel ratio as well as gives enough time to the ignition system to have full performance under cold temperature. And ignition recognition logic is designed by observing output current change of inverter by generating output torque of a microturbine in the instant of ignition. For filtering an output torque current of inverter with high frequency, we applied a moving average method. So far, ignition recognition is usually implemented by measuring of exhausted gas temperature(EGT) of microturbine. The proposed logic can give more accurate judgement of ignition as well as keep a good working of starting system under out of order a temperature measuring system and biased initial value of EGT sensor. Finally, the two proposed logics are proved by field operating a microturbine under various conditions.

**Keywords :** ignition method, ignition recognition, microturbine, inverter, sensorless

### I. 서론

마이크로터빈은 300kW 이하의 발전 용량을 가진 가스터빈 엔진을 이용한 초소형 발전 시스템을 말한다. 1990년대 미국을 중심으로 분산 전원(DG, Distributed Generation)이라는 전력시장이 도래하며, 대형 중앙 집중식 발전식의 문제개선이 요구되었으며, 이에 마이크로 터빈을 이용한 소형 규모의 분산 발전이 각광을 받아오고 있다. 특히 마이크로터빈을 이용한 열병합발전은 가스터빈에서 배출되는 폐열을 활용하여 열효율을 극대화시킨 시스템으로 전기와 냉난방을 동시에 공급하면서 동시에 높은 효율로 에너지 절약의 효과를 거둘 수 있는 차세대 발전시스템이다. 전기효율은 일반적으로 25~34%, 열에너지를 이용할 경우 종합효율은 70% ~ 최대 94%에 이른다[1,2].

마이크로터빈 발전시스템은 현재 많이 사용되는 왕복동 엔진을 이용한 발전 시스템에 비해 터보 기기의 특성상 초기 설치비는 높지만, 단순한 구조로 유지보수가 거의 필요가 없고, 높은 전기부하 추종능력 및 전력품질, 그리고 청정한 배기가스 배출에서 오는 환경 친화적 특성으로 갈수록 엄격해지는 환경규제에 적극적으로 대응할 수 있으므로, 성장 잠재력이 풍부한 차세대 분산 발전시스템이다[1]. 또한 기존의 중대형 가스터빈과 달리 대량 생산을 통한 저가의 생산이 가능한 품목으로 경제성의 확보가 상대적으로 용이하며, 수송의 편리함과 설치의 단순함 때문에 도심의 아파트, 낙도, 산업시설, 차량 혹은 이동용 시스템 등에 적합하다.

마이크로터빈의 운전 메커니즘을 살펴보면, 가스터빈엔진에 장착된 시동 전동기가 엔진 축을 회전시켜 압축기로 공기가 유입되고 압축된 공기는 연소기로 보내진다. 동시에 연료 제어 시스템에 의해 공연비 형성을 위한 연료가 공급된다. 가스 터빈의 점화 계통은 시동 시에만 점화가 필요하고 점화

시기조절 장치가 필요없기 때문에, 왕복 기관에 비해 그 구조와 작동이 간편하다. 그러나 낮은 증기압을 갖는 연료의 특성과 연소실을 지나는 고속의 공기 흐름 특성 때문에 혼합 가스를 점화시키는 것은 매우 어려워 높은 에너지를 가지는 전기 스파크를 이용하며, 설계된 공연비 형성이 매우 중요하다. 공연비가 너무 크거나, 작게 되면 점화는 일어나지 않으며, 엔진은 정체 시동(hung start)을 하게 된다. 점화 후 배기가스 온도(EGT, Exhausted Gas Temperature) 센서를 이용하여 설정된 점화 판단 기준 온도를 넘어서면 가스터빈 엔진 제어기(ECU, Engine Control Unit)는 점화로 판단하고, 연료 가속 제어 실시 및 시동 전동기 제어기(PCU, Power Conditioning Unit)에 속도 가속 명령을 내린다. 이후 시동기의 일정 구간 모터링이 지속되며, 연소에 의한 출력이 자체 유지 속도(self-sustaining speed)를 넘어서면 시동기는 정지하고 정격 속도까지 운전된다. 마이크로터빈은 구조적인 형태에 따라 기어박스에 시동기와 상용 발전기를 장착하고 있는 스플릿-샤프트(split-shaft) 구조와 고속 발전기를 장착하고 있는 싱글-샤프트(single-shaft unit)구조로 구분된다. 스플릿 샤프트 구조에서는 직입 기동의 직류 전동기가 시동기로 사용되며, 이로 인해 속도 대 토크의 특성이 고정되어 있어 저온 상태의 최대 부하 조건에 맞추어 전동기의 용량이 결정되는 단점이 있다. 또한 가변속 속도 운전이 불가능하며, 점화 시 공연비 형성을 위한 공기량이 개루프 제어에 의해 설계되어 저온과 같이 온도 습도의 변화가 심할 때를 고려한 실험적 연구 및 시행착오가 많이 요구된다.

그러나 싱글 샤프트 구조에서는 전력 변환 장치(PCU)를 이용하여 고속 발전기를 시동기로 활용함에 따라, 직류 전동기의 많은 결함을 극복하였으며, 구조 상 기어박스를 배제하고 발전기의 초고속 구동으로 기계적인 구조의 단순함을 구현하였다. 그리고 시동 시 시동기 제어용 전력 변환 장치(PCU)에 의한 엔진의 가변속 스케줄링이 가능함에 따라 공연비 형성을 위한 실험적인 연구가 매우 효율적으로 구현된다. 싱글 샤프트 구조의 일반적인 점화방식은 엔진의 가속

\* 책임저자(Corresponding Author)

논문접수 : 2006. 9. 18., 채택확정 : 2006. 12. 29.

노민식, 김기래, 최영규 : 신라대학교 자동차기계전자공학부 전자공학과(mrsrho@silla.ac.kr/grkim@silla.ac.kr/ykchoi@silla.ac.kr)

구간에서 일정 구간을 점화 영역으로 두고 속도의 변화에 따른 연료량을 결정하여 공연비 형성 후 점화하는 가속 중 점화 방식이다[3]. 이러한 방식은 직류전동기의 개루프 제어보다는 매우 좋은 성능을 발휘하나, 여전히 점화 영역에서 속도의 변화로 공연비 형성이 까다로우며, 온도 습도 환경에 의한 변화가 크다. 그리고 점화 인식 방법에서도 대부분 EGT 센서에 의존하여 점화 영역에서의 감지된 온도가 점화 판단 기준 온도를 초과하는 것을 이용한다. 이러한 온도 판별 방식은 EGT 센서의 초기 값이 바이어스 되어있거나 혹은 EGT 센서 계측 시스템의 오동작 시 점화 판단에 오류가 발생할 수 있다. 따라서 본 논문에서는 가속 중 점화 방식과 점화 온도 판별 방식의 단점을 분석하고 새로운 점화 방식 및 강건한 점화 판별 방식을 제안한다. 그리고 본 논문에서 제안하는 로직은 시동기 제어용 전력 변환 장치(PCU) 로직에 실제 적용하여 그 유용성을 입증하였다.

**II. 제안된 마이크로터빈의 점화 로직**

일반적인 마이크로터빈의 점화로직을 살펴보면 그림 1과 같다[2]. W 축은 엔진의 회전 속도를 의미하며, t 축은 엔진의 가속 운전 중 점화를 위한 로직이 발생하는 시점을 나타낸다.

일반적인 점화는  $t^*_{st}$  구간 이전에 점화기를 동작하며,  $t^*_{st}$ 에서부터 미리 설계된 가속으로 엔진을 가속하여 공기를 유입하고 설계된 연료량을 분사하여 공연비를 맞춘다.

이러한 가속 중 점화 방식의 단점은 엔진이 점화영역에서 계속적으로 속도가 바뀔에 따라 공기량의 변화가 가속 중 일어나며 연료량 설계 시 실험적인 시행착오 및 반복 실험이 많이 동반된다. 또한 저온과 같은 온도, 습도 환경의 변화로 점화 공연비가 영향을 받거나 연료시스템의 성능의 시간 지연(저온에서의 연료의 특성변화, 배관의 냉각)에 따라 설계된 연료량 제어가 지연을 가질 때,  $t^*_{st}$  시점에서 점화지연이 되면 엔진은 점화 없이 계속 가속되고 시동기의 공급 가능한 최대 전력 시점인  $tp_{max}$ 까지 운전된 후 점화 실패가 발생된다. 여기서 시동기에 공급되는 전력은 점화 구간의 영역과 비례하여 커짐으로 점화 구간의 영역이 늘어나면 비 정상적으로 시동기의 소모 전력이 늘어나 시동 시스템의 최적화가 불가능하다.

이러한 단점을 극복하기 위해 본 논문에서는 그림 2와 같은 점화 구간에서 정속도 유지로직을 제안한다.  $t^*_{st}$  이전에 점화를 위한 점화기를 작동시키며, 점화가 이루어지는 시점  $t^*_{end}$ 까지 점화 유도 영역에서 정속도 운전을 한다. 점화 시점인  $t^*_{end}$  시점이 나타나지 않으면 일정시간 운전 후 시동기를 정지시킨다.

제안된 운전의 장점은 점화 영역에서 엔진의 정속도 운전을 실시함으로써 점화 구간에서의 공기량을 일정하게 할 수 있으며, 이것은 점화 구간에서의 공연비를 위한 연료량 결정에 하나의 변수를 줄임으로써 연료량 설계를 위한 반복 실험의 시행착오가 적어 많은 장점을 가져온다. 그리고 저온이나 습도가 많은 환경에서 연료 시스템의 성능의 시간 지연을 회복될 수 있도록 충분한 시간을 제공하며, 가속을 하지 않고 정속도 운전을 일정시간 유지함으로써, 시동기의 소모 전력을 최소화 할 수 있다. 그리고 점화가 이루어지면 점화를 인

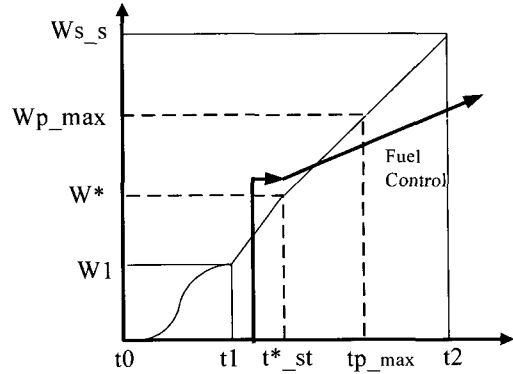


그림 1. 기존의 마이크로터빈 점화 로직.  
Fig. 1. Conventional ignition logic for a microturbine.

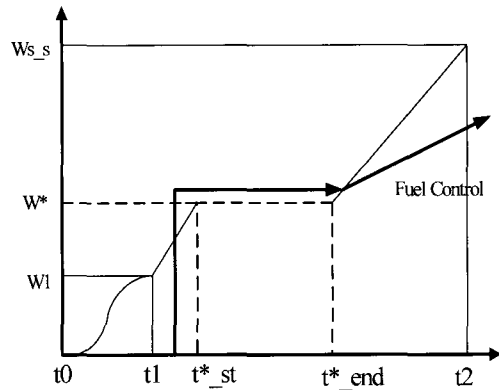


그림 2. 제안하는 마이크로터빈 점화 로직.  
Fig. 2. Proposed ignition logic for a microturbine.

식하고 가속하는 페 루프 제어를 함으로써 점화의 신뢰성을 매우 크게 높일 수 있다.

그리고 기존의 점화 방식에서의 점화 판단 로직은 EGT센서에만 의한 방식으로 마이크로터빈의 응용에 따른 배기덕트의 형상에 따라 EGT의 초기 값이 바이어스 될 수 있으며, 이로 인해 점화 전의 감지온도가 점화 판단 기준 온도를 넘어서 오류가 발생한다. 이러한 현상은 복잡한 형상의 배기덕트를 가진 마이크로터빈의 빈번한 시동/정지 시 배기가스의 적체로 점화 인식에 오류를 발생한다. 본 논문에서는 이러한 EGT 센서의 초기 값의 바이어스 시 혹은 EGT 센서의 오동작 시에도 정확한 점화 판단이 되도록 부가적으로 점화 후 발생하는 엔진 축의 발생 토크를 관측하여 이를 점화 판단 로직에 추가하였다. 이는 온도에만 의존하지 않고 실제 회전에 소모되는 시동기의 출력 토크를 관측함으로써 정확한 점화 판별과 시동 성공률을 매우 높일 수 있다. 즉 점화 전 후의 회전에 필요한 시동기 출력 토크는 점화 후 엔진에서 발생하는 회전 토크에 의해 점화 순간(ignition) 그림 3과 같이 정속 운전 중 변화함을 예상할 수 있다. 그림 3에서 시동기의 출력 토크는 시동 제어기의 출력 전류( $I_{qse}^*$ )에 비례하여 발생함으로 출력토크의 궤적을 출력 전류( $I_{qse}^*$ )로 나타낸다. 그림 3에서 정속 운전 점  $W^*$  전의 정 전류 구동은 정속 운전 점  $W^*$ 까지의 가속을 위한 시동기에서 출력하는 토크, 즉 출력 전류( $I_{qse}^*$ )이다.

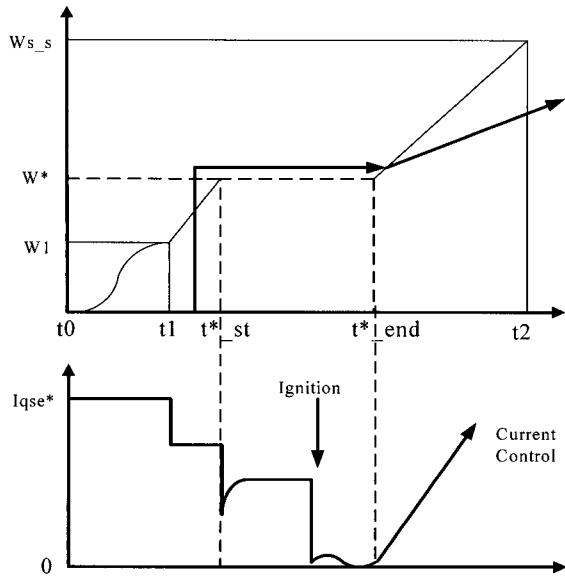


그림 3. 점화 시 예상되는 구동 전류의 거동.  
Fig. 3. Expected current profile at ignition.

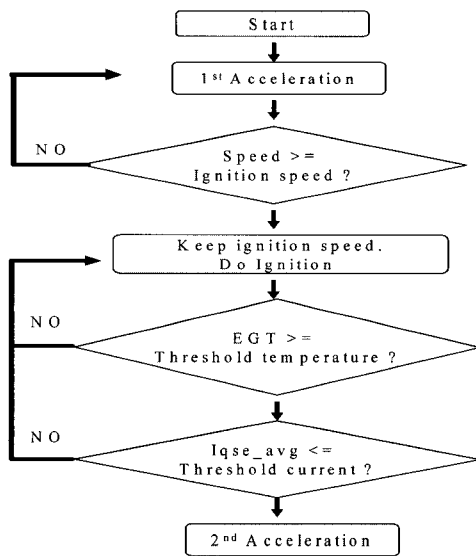


그림 4. 제안된 점화 순서도.  
Fig. 4. The proposed flow-chart of ignition.

그림 3에서 감소된 출력 전류 값(Iqse\*)을 관측함으로써 실제 연소에 의해 엔진 축에 회전 토크가 발생하고 있음을 알 수 있다. 본 논문에서는 점화 후 감소된 구동 전류 값을 계측하여 점화 판단 기준 전류(threshold current)를 설정하고 이와 비교하여 점화 판단을 결정하는 알고리즘을 구현한다. 위에서 언급하였듯이 1. 점화 시 정속도 알고리즘 2. 점화 인식 알고리즘을 포함하여 본 논문에서 제안하는 마이크로터빈의 안정적인 점화를 위한 순서도는 그림 4와 같다. 점화 인식 시 실제 EGT센서로 통해서 판단하여 보내온 온도에 의한 점화신호와 시동제어기용 전력변환장치(PCU)에서 판단한 전류에 의한 점화 신호를 AND 조건으로 하여 엔진의 가속이 이루어진다. 본 논문에서는 정확한 구동 전류를 노이즈 없이 계측하기 위해서 Low-pass filter 및 구동 전류를 MA(Moving

Average method) 기법을 취하여 출력 토크 분 전류인 Iqse의 평균값을 계산한다. 본 논문에서의 속도 제어 루프는 1ms로 설정되어있으며, MA는 (1)의 수식으로 계산된다.

$$y[i] = \frac{1}{M} \sum_{j=0}^{M-1} Iqse[i+j] \quad (1)$$

y[i]: Output signal

M: Number of points used in the MA

Iqse[i+j]: q-axis current

### III. 시동기 제어를 위한 알고리즘 설계

본 논문과 같이 싱글 샤프트 마이크로터빈은 전력 변환 장치(PCU)를 채택하여 고속 발전기를 시동 시 동기 전동기로 운전한다. 본 논문에 활용된 고속 발전기는 3상의 영구자성형 동기 발전기의 구조로 가스터빈엔진과 같은 동축에 장착되어 있다. 제안된 알고리즘에 따라 시동기를 이용하여 마이크로터빈을 운전 할 때, 회전체의 회전에 필요한 토크를 수학적으로 모델링하면 4구간, 즉 아래 수식(2)-(5)으로 나타난다. 회전 시 가스터빈엔진의 압축기는 회전체의 부하로 소모 토크, 시동기는 전기적 입력 토크 그리고 터빈은 연료 연소에 의해 기계적 출력 토크로 나타낼 수 있다.

Mode I: 점화 없이 점화 속도까지의 1차 가속 구간

$$T_{elec} = J \frac{dw}{dt} + Bw + T_{comp} \quad (2)$$

Mode II: 점화 전 정속도 유지 구간

$$T_{elec} = Bw + T_{comp} \quad (3)$$

Mode III: 점화 후 정속 유지 구간

$$T_{elec} = Bw + T_{comp} - T_{turbine} \quad (4)$$

Mode IV: 점화 후 가속 구간

$$T_{elec} = J \frac{dw}{dt} + Bw + T_{comp} - T_{turbine} \quad (5)$$

여기서,

T<sub>elec</sub>: 시동기에서 출력하는 전기 토크

J [Kgm<sup>2</sup>]: 엔진과 시동기 관성 모멘트

w: 회전속도

B: 엔진과 발전기 베어링 마찰 계수

T<sub>comp</sub>: 회전 시의 압축기에 의한 부하 소모 토크

T<sub>turbine</sub>: 점화 후 연소에 의한 터빈 발생 토크

이다.

(3)과 (4)에서 보듯이 마이크로터빈의 점화구간에서 점화 후 T<sub>turbine</sub>의 힘이 회전 토크에 더해져 정속 운전 시의 전기적 출력 토크 T<sub>elec</sub>은 점화 전 보다 감소된다. 이 토크의 변화를 본 논문에서는 점화 인식의 조건으로 알고리즘을 구현하였다. 시동기의 출력 토크의 변화 관측을 위해 본 논문에서는 3상 동기 전동기 인버터를 설계하고, 출력 토크를 결

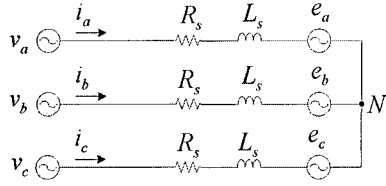


그림 5. 3상 동기 전동기 등가회로.  
Fig. 5. The equivalent circuit of 3 phase synchronous motor.

정하는 제어기 출력 전류를 분석한다.

3상 영구자석 동기전동기의 등가회로는 그림 5와 같고, 3상 전압 방정식은 (6)와 같이 표현된다[3].

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

3상 영구자석 동기 전동기의 동기 좌표계에서의 d-q 전압 방정식은 (7)같이 표현된다.

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

그리고 영구자석 동기 전동기의 출력 토크는 (8)로 표현된다.

$$T_{elec} = \frac{3P}{2} \lambda_f I_{qse}^* \quad (8)$$

여기서,

$T_{elec}$ : 전기적 회전 토크

$P$ : 전동기 극수

$\lambda_f$ : 역기전력 상수

$I_{qse}^* (i_{qs}^e)$ : 회전자 좌표계의 동기 전동기 q축(토크)전류

이다.

따라서, 전동기(시동기)의 출력 토크는 회전자 좌표계에서의 q축 전류와 정 비례 관계를 나타냄을 알 수 있고, 본 논문에서 제안한 점화 인식 알고리즘을 구현을 위해 q축 전류의 점화 후 점화 판단 기준 전류(threshold current) 값 설정 및 운전 중 변화 판측이 필요함을 알 수 있다.

그림 6는 본 논문에서 설계한 d축 전류제어기의 오차를 이용한 간단한 센서리스 벡터제어기[4]의 블록다이어그램이다.

그림 6에서  $i_{qs}^e$  가 q축 토크 전류를 나타낸다.

그림 6에서 센서리스 벡터 제어기의 전향 보상은 아래와 같이 구성하였다.

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

$$V_{qs\_ff}^e = R_s i_{qs}^{e*} + L_s \hat{\omega}_r i_{ds}^{e*} + \hat{\omega}_r \lambda_f \quad (10)$$

여기서,

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

$\hat{\omega}_r$ : 추정된 회전자의 속도

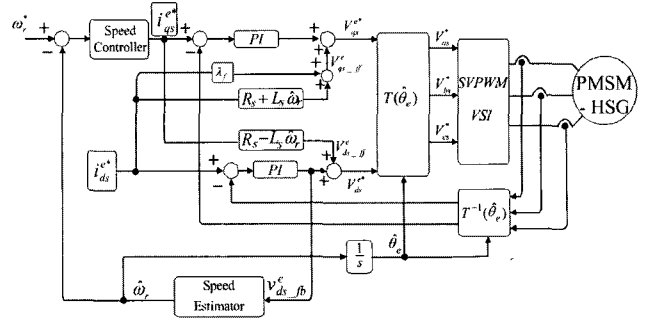


그림 6. 영구 자석형 동기 전동기의 센서리스 벡터제어기.  
Fig. 6. Sensorless vector controller for PMSM.

#### IV. 시스템 구성

본 논문에서 개발한 마이크로터빈의 구성도를 보면 그림 7의 블록다이어그램 같다. 개발된 마이크로터빈은 차량에 장착되어 전력 및 공기를 공급하는 목적으로 설계되었으며, 독자 개발된 ECU와 PCU로 제어된다.

차량의 운전 중 진동조건을 고려하여 고속발전기는 오일 윤활형으로 채택하였다. 등기출력이 약 80kW이며, 발전기 출

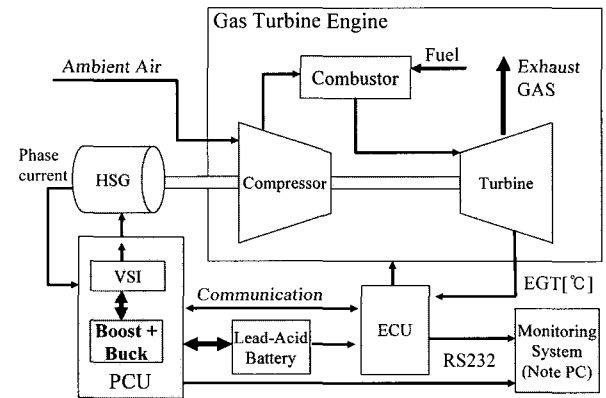


그림 7. 마이크로 터빈 시스템 구성.  
Fig. 7. Configuration of the microturbine.

표 1. 마이크로터빈의 기계적 구성품 사양.

Table 1. Mechanical component specification of the microturbine.

System	Item	Detail
Gas Turbine Engine	Type	Single-shaft
	Rated Speed	60,000 rpm
	J	0.0108[Kg <sup>m</sup> ²]
	Compressor	1_stage centrifugal Type
	Combustor	Annular Reverse type
HSG	Turbine	1_stage radial inflow type
	Type	PMSG, Oil-lubricated
	Rated Power	25kW@generator mode
	Pole	2
	Ls	68uH
	$\lambda_f$	0.0305[volt/rad/sec]
	J	0.0022[Kg <sup>m</sup> ²]

표 2. 마이크로터빈의 전기적 구성품 사양.

Table 2. Electrical component specification of the microturbine.

System	Item	Detail	
ECU	CPU	TI SMJ320F240 Flash memory type	
	Analog In/Out	8ch/1ch	
	Discrete In/Out	10ch/16ch	
	Communication	RS 232C, JTAG Port	
P C U	Inverter	Type(PWM)	VSI(SVPWM)
		Efficiency	93%
		Rated Power	10kW
	Boost	Type	Current Fed
		Rated Power	6 kW
		Output Voltage	235VDC
Buck	Type	Voltage Fed, ZVZCS	
	Rated Power	8kW	
	Output Voltage	28Vdc	
Battery	Type	Lead-acid	
	Normal Votage	24Vdc	

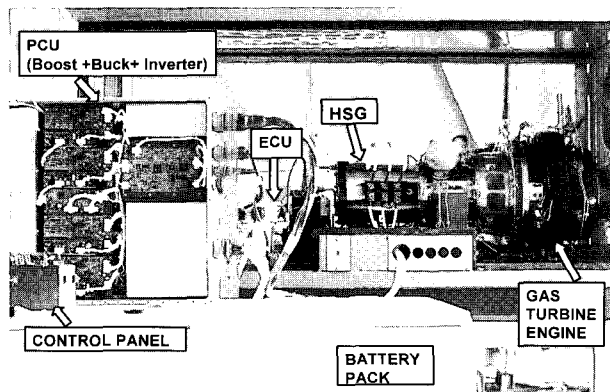


그림 8. 마이크로 터빈 시험 사진.  
Fig. 8. Test picture of the microturbine.

력은 25kW로 설계되었으며 차량에 공급하는 전력은 직류 28VDC, 8kW로 설계되었다. 개발된 마이크로터빈의 상세한 기계적, 전기적 구성품 사양은 표 1, 표 2와 같다.

마이크로터빈 제어기는 고속 발전기 구동을 담당하는 전력변환장치(PCU)와 엔진의 연료 제어를 통한 엔진의 운용을 관장하는 엔진 제어기(ECU)로 나누어진다. 그리고 ECU와 PCU는 통신을 통하여 시동 시 설계된 가속 프로파일에 따라 각각의 운전 스케줄에 따라 동작시킨다. 점화에 대한 판단은 ECU가 EGT 센서로부터 온도 데이터를 확인하고 PCU에게 점화 인식을 알린다. 이에 따라 PCU는 점화 에너지를 상 전류를 통해서 검증하고 엔진의 속도 가속을 시작하여 압축 공기의 양을 증가시킨다. 이와 동시에 ECU에서는 설계된 연료 스케줄에 따라 연료량 증가시킨다.

위의 그림 8은 실제 개발한 시스템의 시험 전경이다.

V. 실험 결과

본 논문에서는 제안된 2가지 알고리즘의 타당성을 입증하

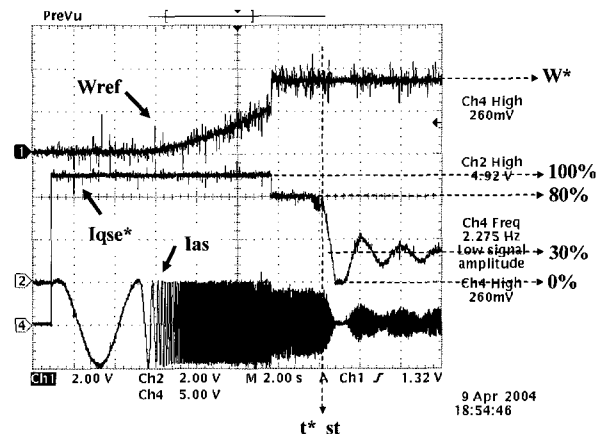


그림 9. 상온 비 점화 시의 정속도 운전을 위한 출력 토크 전류.

Fig. 9. Output torque current for driving a constant speed at non-ignition under room temperature.

기 위해 첫째 점화 판단 전류 설정을 위한 실험을 실시하였으며, 둘째 실제 운전 시험을 온도 조건이 다른 저온(-32도), 상온(20도), 고온(50도)에서 실험을 실시하였다. 온도 조건에 따라 엔진의 부하 상태는 매우 다르며 회전을 위한 시동기의 출력 토크도 이에 따라 급격히 변화한다. 특히 온도에 따른 터빈 파워, 압축기 소모 토크, 베어링 점성 등은 시동기 토크를 결정하는 주요 변수이다. 이 중 III장의 수식(2)~(5)에 나타난 베어링 마찰계수(B)는 온도에 따른 오일의 점성변화로 매우 비선형적으로 크게 변화함으로 계산적으로 구하기 매우 까다로워 본 논문에서는 실험적으로 온도에 따른 출력 토크(출력 전류 Iqse\*)의 크기를 결정하였다. 즉 신뢰성 있는 점화 판단의 기준을 세우기 위해서는 3가지 조건에서의 고온(+50도), 상온(20도), 저온(-32도)에서의 부하의 크기 및 터빈의 에너지 출력을 실험에 의해서 구하여, 점화 시의 부하 변동을 구하였다. 결정된 점화 판단 기준 전류는 -10도 이상 ~ 고온(+50도)은 10A, -10도 이하는 기준 전류를 20A로 설정하였다.

실험 파형 9는 상온에서 정속도 운전 시 순수하게 소모되는 부하 토크(출력 토크)를 구하기 위한 시험 결과이며, 정속 운전 시 소비되는 q축 토크 전류(Iqse\*)와 A상 전류(Ias)는 정격 전류[100%, 71A]의 약 30%로 20A로 나타난다(실험에 사용된 OSC는 Tektronix 3034 모델이며, 전류 프로브는 Tektronix AP504CX/AM503B이다). 실험 파형에서 t\*\_st는 정속 운전 시작 구간이며, 정속 운전 초기에 엔진의 관성력으로 인해 언더슈트(Under-shoot)가 발생하는 것을 알 수 있으며, 오버슈트(Over\_shoot) 이후 30% 전류로 수렴됨을 알 수 있다. 토크 전류 실측 값인 20A의 출력 전류를 바탕으로 상온에서는 본 논문에서 연구한 엔진의 점화 후 판단 기준 전류는 실 부하의 1/2인 10A 이하로 실험적으로 결정한다.

즉, 상온에서는 점화 되지 않았을 때 20A의 토크 전류를 소비하다 점화 후 전기적 토크 전류가 10A이하로 되면 이 시점을 점화가 이루어진 것으로 인식하고, 가스터빈 엔진의 연소에 의한 축 동력이 발생한 것으로 판단한다.

실험 파형 10는 상온에서 제안하는 정속도 운전 및 점화 인식 로직을 적용하여 엔진을 운전한 실험 결과이다. 점화

판단 기준 전류는 10A(정격 71A(100%)의 14%) 이하이다.

그림 10의 실험 데이터는 상온에서 첫 점화를 실시한 결과이며, PCU의 내부 데이터를 DA컨버터를 이용하여 오실로스코프로 변수의 값을 확인한 결과이다. 상온 환경의 냉간 점화장시간의 운전 정지 후 엔진이 냉간 상태에서의 첫 점화 시에는 연료 시스템의 지연 및 저온 공기로 인해 점화가 잘 일어나지 않아 점화까지 다소 시간이 소비된다. 실험 과정에서 나타나듯  $t^*_st$ 시점에 점화속도  $W^*$ 에 도달하며 점화가 되지 않은 상태에서 정속 유지를 위해 토크 기준 전류( $I_{qse}^*$ ) 및 상 전류( $I_{as}$ )가 레귤레이션을 하고 있다. 이후 점화가 시작되어 엔진의 에너지가 회전 토크로 나타남에 따라 EGT온도는 상승하고 ECU에서는 EGT에 의한 점화 판단에 의해 PCU에 점화에 따른 가속 운전을 요청한다. PCU는  $t^*_end$  시점에서 엔진 회전 토크의 상승으로  $I_{qse}^*$ (전기적 토크 전류)와  $I_{as}$ (A상 전류)가 "0%"으로 감소됨(10A이하)을 확인하고, 2차 가속 모드로 진행한다.

실험 과정 11은 상온에서의 온간 점화(엔진 정지 후 내부 온도가 상승된 상태에서 재 점화) 시의 전류 파형이다.

온간 점화는 엔진 내부의 공기 온도가 따뜻하여, 시동 시 점화 조건 형성이 매우 잘 이루어진다. 파형에 나타나듯이  $t^*_st$ 에 점화 속도  $W^*$ 에 도달하며, 관성력에 의한 속도 레귤레이션 중에 쉽게 점화가 일어나 ECU의 EGT온도에 의한 점

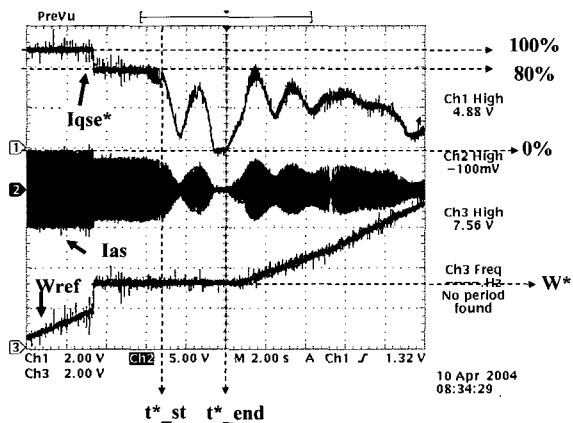


그림 10. 상온 냉간 엔진 상태에서의 첫 점화 데이터.  
Fig. 10. First ignition data of cold engine under room temperature.

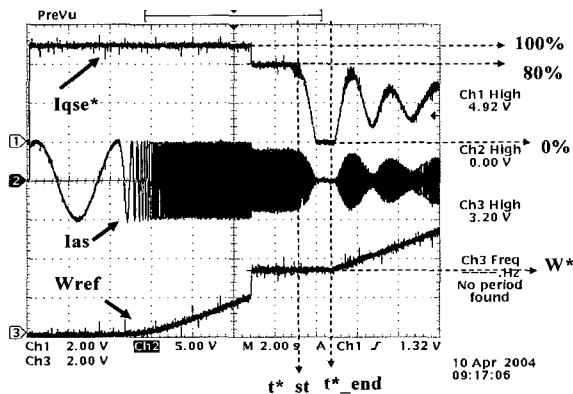


그림 11. 상온 온간 엔진 상태에서의 점화 데이터.  
Fig. 11. Ignition data of warm engine under room temperature.

화 인식이 일어난다. PCU는 ECU의 요청을 받고  $t^*_end$  시점에서  $I_{qse}^*$ (전기적 토크 입력)와  $I_{as}$ (A상 전류)가 "0%"로 운전을 확인하고 엔진의 가속을 실시한다.

다음의 실험 과정 12, 13, 14, 15는 PCU에서 PC 모니터링 시스템으로 전송된 내부 변수 데이터로, RS232 통신을 이용하여 초당 20개(샘플링 시간은 0.05초) 획득하였다. 제안된 알고리즘의 타당성을 입증하기 위해 점화 시와 비 점화시의 속도 및 전류 데이터를 비교하여 나타낸 것이다.

실험 과정 12는 상온에서의 제안된 알고리즘에 따라 점화 운전 및 비 점화 운전한 결과를 나타낸다. 비 점화 시 부하 전류는 약 20A로 나타나며, 점화 시 토크 전류는 "0"으로 급격히 감소하고, 이에 따라 점화 인식이 이루어짐을 알 수 있다.

실험 과정 13은 -32°C에서 제안된 알고리즘으로 점화 및 비 점화 운전한 결과이다. 점화 판단 기준 전류는  $I_{qse}^*$ 가 20A 이하로 설정하였으며, 저온에서의 점화 전 부하 전류는 30A 이상으로 나타난다. 이 부하 전류는 저온으로 인해 오일 점성 변화로 엔진 및 시동기의 베어링 마찰계수의 변화에 기인한 것이다. 제안된 알고리즘에 따라 저온에서의 정속도 운전 및 점화 인식(20A 이하)이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

실험 과정 14는 고온 50°C에서 제안된 알고리즘으로 운전한 결과이다. 점화 판단 기준 전류는  $I_{qse}^*$ 가 10A 이하로 설정하였으며, 이에 따라 고온에서의 점화 인식이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

실험 과정 15는 ECU에서 계측된 EGT 데이터(speed from ECU, 회색)와 속도데이터 그리고 PCU에서 계측된 점화 시의 전류 데이터와 추정 속도(speed from PCU, 검정)를 나타낸 것이다.

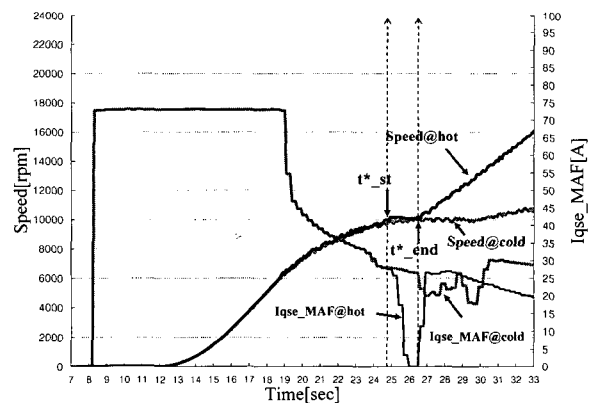


그림 12. 상온에서의 점화와 비 점화 운전 데이터 비교.  
Fig. 12. Comparison data of ignition and non-ignition under room temperature.

여기서, 왼쪽 축 : 속도[rpm]  
오른쪽 축 : 토크 전류,  $I_{qse\_MAF}$ [A].  
 $I_{qse\_MAF@hot}$  : 상온에서의 점화시의 토크 전류.  
 $I_{qse\_MAF@cold}$  : 상온에서의 비 점화시의 토크 전류.  
Speed@hot : 상온에서의 점화 시의 속도 데이터.  
Speed@Cold : 상온에서의 비 점화 시의 속도 데이터.  
 $t^*_st$  : 점화 시작 시점.  
 $t^*_end$  : 점화 인식 완료 시점.

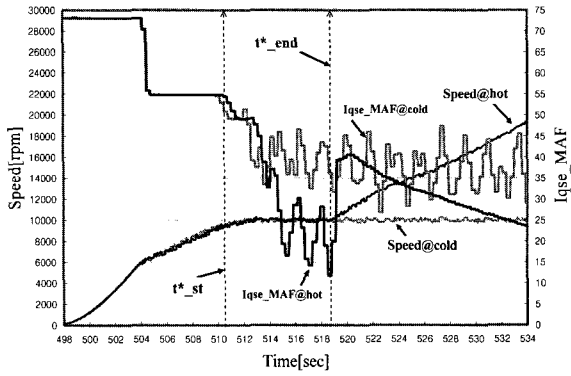


그림 13. -32°C에서의 점화와 비 점화 운전 데이터 비교.  
Fig. 13. Comparison data of ignition and non-ignition at -32°C.

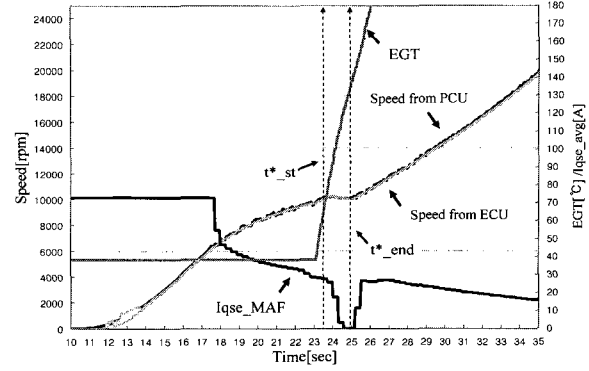


그림 15. 점화 시의 ECU 데이터와 PCU 데이터 비교.  
Fig. 15. Comparison of ECU and PCU data at ignition.

여기서, 왼쪽 축 : 속도[rpm]

오른쪽 축 : 토크 전류, Iqse\_MAF[A].

Iqse\_MAF@hot: -32°C에서의 점화시의 토크 전류.

Iqse\_MAF@cold: -32°C에서의 비 점화시의 토크 전류.

Speed@hot: -32°C에서의 점화 시의 속도 데이터.

Speed@Cold: -32°C에서의 비 점화 시의 속도 데이터.

t\*\_st: 점화 시작 시점.

t\*\_end: 점화 인식 완료 시점.

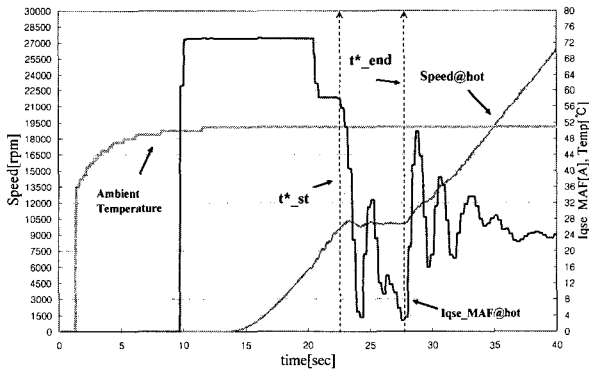


그림 14. 고온에서의 점화 인식이 적용된 운전 데이터.  
Fig. 14. Operation data by ignition recognition at 50°C

여기서, 왼쪽 축 : 속도[rpm]

오른쪽 축 : 토크 전류, Iqse\_MAF[A].

Iqse\_MAF@hot: 고온(50°C)에서의 점화시의 토크 전류.

Speed@hot: 고온(50°C)에서의 점화 시의 속도 데이터.

Ambient Temperature: 주변온도(50°C)

t\*\_st: 점화 시작 시점.

t\*\_end: 점화 인식 완료 시점.

ECU에서의 속도 계측은 하드웨어로 제작된 마그네틱 픽업 센서로 이루어진다. 실제 ECU에서 계측된 속도와 PCU에서 추정한 속도가 정확히 일치하여 설계된 인버터 속도제어의 우수성을 입증한다. 그리고 실제 ECU에서 계측된 EGT 온도의 변화에 따라 MA를 처리한 전류(Iqse\_MAF)가 급격히 감소함을 알 수 있고, 판단 기준으로 정한 기준 온도(145°C) 및 상온 점화 판단 기준 전류(10A)에 따라 인식이 잘 이루어짐을 알 수 있다.

### VI. 결론

본 논문에서는 마이크로터빈 엔진의 새로운 점화 기법 및 점화 인식 로직을 제안하고 제안된 로직을 실제 마이크로터빈 운전에 적용하여 그 유용성을 입증하였다. 본 논문에서는 공연비 최적 제어를 위해 점화 영역에서 정 속도 운전이 제안되었다. 정속도 운전은 공연비 최적 제어를 위한 유용함 외에도 시동시스템의 최적 전력 용량 선정에 매우 유용하리라 판단된다. 즉 점화 속도에서 점화 후 엔진을 가속함으로써 기존의 가속 점화 방식에 비해 시동 제어기의 전력 용량을 최소화 할 수 있는 장점이 있다. 또한 기존의 EGT 센서에 의한 점화 판단 로직에 점화 시 시동기의 구동 전류의 관측에 의한 판단 로직을 추가함으로써 점화 판단 로직의 신뢰성을 극대화하고 마이크로터빈의 다양한 응용에서 설치 조건이 매우 까다롭더라도 정확한 점화 판단을 할 수 있는 장점을 제공한다. 본 논문에서 제안한 전류에 의한 점화 판단 로직은 점화 판단 기준 전류의 정확한 값을 구하기 위해 점화 속도에서의 실 부하에 대한 실험적인 값을 계측하였다. 본 논문에서 제안하는 점화 판단 로직이 더욱더 신뢰성 있고, 다양한 엔진에 유용하게 적용되기 위해서는 엔진의 환경적인 부하 상태 변화, 용량별 엔진의 부하 상태 등에 따른 점화 판단 기준 전류 선정이 운전 중 온라인 데이터 분석에 의해 계산되는 설계가 필요하다고 판단된다. 향후 점화 전 가속 구간에서의 데이터를 분석 및 활용하여 점화 영역에서의 점화 판단 기준 전류를 결정하는 로직에 대한 연구가 진행될 계획이다.

### 참고문헌

- [1] 박병식 "분산형 마이크로터빈 열병합발전 시스템 개발," ESCOS, 제 31 권, 제 3 호, pp. 38-43, 2004. 3.
- [2] W. G Scott, "Micro-turbine generators for distribution systems," Industry Applications Magazine, pp. 57-62, IEEE, 1998.
- [3] 노민식, 박승엽, "터보 체너레이터의 시동기 제어에 관한 연구," 제어·자동화·시스템공학 논문지, 제 10 권, 제 3 호, pp. 286-293, 2004. 3.
- [4] 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.
- [5] L. Xu and C. Wang, "Implementation and experimental

investigation of sensorless control schemes for PMSM in super high variable speed operation," *IEEE/ISA*, 1998.

[6] O. Aglen, "A high-speed generator for microturbine," *Electrical Machines and Power Electronics Department of Electrical Engineering KTH, Royal Institute of Technology SE-*

100 44 Stockholm, 2001.

[7] S. L. Hamilton, "Micro-turbine generator program," *Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences*, 2000.



노민식

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

과 전임강사. 관심분야는 임베디드 제어 시스템, 디지털 제어, 전력 변환 장치 설계.



김기래

1986년 2월 서강대학교 전자공학과(학사). 1988년 2월 서강대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1998년 2월 경남대학교 대학원 전자공학과(공학박사). 1988년~1993년 삼성전자(주) 정보통신 연구소 선임연구원. 1993년 3월~1999년 2월

마산대학 정보통신과 조교수. 1999년 3월 현재 신라대학교 전자공학과 부교수. 2002년 7월~2003년 7월 미국 UCLA, 해외 방문 연구교수(한국과학재단 지원).



최영규

중앙대학교 전자공학과(학사). 1989년 (일)교토대학교 대학원 전자공학과(공학석사). 1992년 (일)교토대학교 대학원 전자공학과(공학박). (일)후쿠이 대학교 전자공학과 조교수. 현재 신라대학교 전자공학과 부교수.