

시동기의 정 출력 시동 기법에 의한 마이크로터빈 시동 구간의 운전 시뮬레이터 개발

논문

58-10-30

Simulator for a Micro-Turbine during Start-up by Constant Power Output Motoring Method using Starter

노 민 식*
(Min-Sik Rho)

Abstract - This paper presents the simulator for dynamic modeling of a MT(micro turbine) during start-up period. The simulator is implemented by modeling a dynamic power of main components of a MT including compressor, combustor and turbine. A modeling for a MT under steady state operation can be accurately built from thermodynamics analysis. But dynamic modeling during start-up period is very difficult because efficiency of main components is very low and the designed value has big error and nonlinear characteristics during start-up. In this paper, new method without using thermodynamics analysis during start-up is proposed for the simulator. The power models of main components are derived from analysis of the experimental operation data by test motoring using a electric starter under constant power output. The simulator is developed using MATLAB/Simulink. For constant power output control, sensorless vector inverter is designed and algorithms for starting from stall and method for controlling a output power are proposed. The performance of developed simulator is verified by comparing experimental and simulation start-up results.

Key Words : Micro Turbine, Sensorless, Constant Power, Simulation, Motoring

1. 서 론

최근 마이크로 터빈을 이용한 분산 전원(Distributed Generation system) 시스템이 효율 및 공해 물질의 배출의 최소화로 기존의 파워 시스템에 비해 각광을 받고 있다. 마이크로 터빈은 가스터빈을 이용하여 회전 에너지를 생산하여 발전기를 회전하는 방식을 채택하고 있으며, 이에 따라 내연기관과는 달리, 왕복 운동과 폭발적인 연소에 따르는 진동이 없고, 소형·경량이면서 고효율을 얻을 수 있으며 구조가 간단하고 효율성이 높은 원동기로서 장점을 갖고 있다. 또한 유지 보수를 위한 냉각수가 필요 없고, 윤활유 사용도 매우 적은 장점을 갖는다. 기동이 빠른 것이 특징이며, 부하의 급변에도 신속히 대응할 수 있어서 피크 세이빙, 열병합 발전, 원격 전원 및 고급 품질의 전원 등에 널리 사용된다 [1]. 따라서, 이러한 여러 목적의 다양한 이용에 대한 효과를 분석하기 위해서는 마이크로 터빈의 정확한 모델에 대한 모델링 연구가 필요하다. 지금까지 가스 터빈의 제어와 모델링 그리고 시뮬레이션을 위한 몇몇 연구가 진행되어 왔다 [2]~[7]. 이러한 연구는 주로 가스터빈의 동적 모델에 대하여 많이 이루어졌으며, 마이크로터빈의 정상 운전 상태에서의 전원 공급에 관련하여 국한되어 왔다[3][4][6][7]. 마이크로 터빈의 운전 상태에 대한 분석은 크게 시동 구간에서의 특성과 정상 운전 상태의 특성 분석으로 나눌 수 있다. 정

상 상태 운전 분석은 설계 해석한 마이크로 터빈 주요 구성품 즉 압축기 터빈 그리고 연소기의 파라미터 및 효율 등이 제작 공정상의 큰 결함이 없다면 비교적 일치하여 모델링이 우수한 결과를 가져온다. 그러나 시동 구간에서의 모델링은 주요 구성품의 효율이 매우 낮고 비선형적인 특성이 많아 해석이 매우 까다로우며 모델링이 쉽지 않다. 그래서 이 시동 구간에서의 모델링을 위한 데이터는 직접 시동에 의한 실험적인 방법에 의해 구하는 것이 타당하다. 시동 구간에서의 가장 중요한 해석은 가스 터빈 엔진의 시동 시간과 시동 구간 내에서의 제어에 관련된 입력들이 각 주요 구성품의 파워 생성과 소모에 미치는 영향을 모델로 구하고 이를 이용하여 소모 동력 및 발생 동력의 합수를 도출하는 것이다. 본 연구에서는 해석이 까다로운 마이크로 터빈의 시동 구간에서의 주요 구성품 터빈의 출력 및 시동 시간에 대한 평가를 위한 실험적인 방법에 근거를 둔 새로운 모델링 기법을 제시한다. 본 논문에서 제시한 방식은 복잡한 열역학적 해석을 위한 데이터의 분석을 수행하지 않고, 회전체의 기계적 축 출력 및 부하에 대한 해석을 통해서 제어 입력들에 대한 출력을 각 구성품의 소모 동력 및 생성 동력에 대한 관계 방정식을 구함으로써 이루어진다. 본 논문에서는 마이크로 터빈의 각 주요 구성품의 시동 구간에서의 에너지 전달합수를 구하기 위해 열역학적인 해석을 통하지 않고, 전기 시동기를 일정한 파워 출력을 유지한 상황에서 마이크로 터빈을 시동하는 실험 기법을 제안한다. 이 시동 기법을 통하여 구한 운전 데이터를 분석하여 주요 구성품에서의 발생 에너지 및 소모 에너지를 회전 속도의 함수로써 간략화 하여 유도한다. 본 논문에서는 제안한 주요 구성품의 속도 함수화에 대한 타당성 있는 증명을 위해 마이크로

* 정 회 원 : 신라대학교 전자공학과 교수

E-mail : msrho@silla.ac.kr

접수일자 : 2009년 8월 3일

최종완료 : 2009년 9월 7일

터빈의 열역학적인 특성의 주요한 파라미터를 설명하고, 시동 구간 내에서 이루어진 타당성 있는 가정 및 간략화 과정을 설명한다. 본 논문에서는 제안된 기법에 의해 구해진 각 구성품의 수학적 모델을 조합하여 마이크로 터빈의 시동 구간에서의 동적 특성을 분석할 수 있는 시뮬레이터를 구현하였으며, 타당한 제어 입력에 대해 시뮬레이터의 출력과 실제 실험한 결과를 비교함으로써 제안된 마이크로 터빈의 주요 구성품의 모델링 및 설계된 시뮬레이터의 타당성을 입증하였다.

2. 마이크로 터빈 주요 구성품의 출력 파워 모델링

마이크로터빈은 상용 가스터빈 보다 작은 물리적인 크기를 가진 고속의 가스 터빈에 발전기를 장착하여 전력을 생산하여 공급하는 장치를 말한다. 가스 터빈 엔진의 주요 구성품은 압축기, 연소기 그리고 터빈이다.

마이크로 터빈의 운전 메카니즘을 살펴보면, 시동 모드에서는 가스터빈엔진에 장착된 시동 발전기가 엔진 시동 시에는 전기 시동 장치(인버터)가 발전기를 모터로 운전하여 엔진 축을 회전시킨다. 이에 따라 압축기로 공기가 유입되고 압축된 공기는 연소기로 보내진다. 분사된 연료와 압축된 공기는 연소기에서 혼합되며, 이 혼합공기에 점화가 일어난다. 기계적인 에너지는 터빈을 통과하는 고온의 연소 공기 흐름과 팽창에 의해 발생한다. 터빈은 전기 시동기와 함께 엔진의 속도를 가속하여 자체 유지 속도(self-sustaining speed)를 넘어선다. 이후 가속 중 미리 정해진 속도에서 전기 시동기는 정지하고, 전기 시동기에 의한 시동 구간은 끝나며, 연소에 의한 터빈 출력만으로 정격 속도까지 가속된다. 정격속도로 운전되던 발전모드로 전환되어 터빈에서 발생한 파워의 일부는 공기 압축기를 회전시키며, 나머지는 시동 발전기(3-phase PMSG)를 회전시켜 전기를 생산한다. 따라서 시동 구간은 가스터빈 엔진을 전기 시동기로 모터링하여 자체 유지 속도 이후 연료의 힘이 충분이 발생되어 전기 출력이 필요 없는 속도, 즉 엔진 설계 시 동특성에 의해 미리 정해진 속도 시점까지를 말한다. 그림 1은 전기 시동 장치 및 가스 터빈 엔진을 포함한 마이크로 터빈의 구성도를 나타낸다.

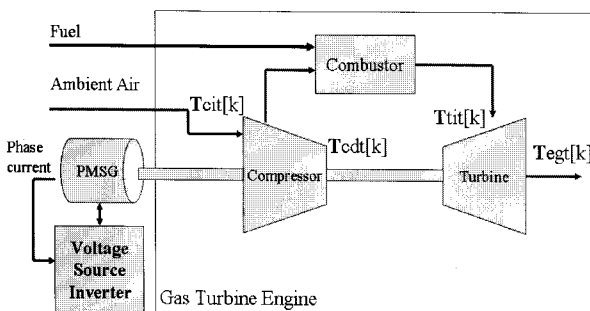


그림 1 마이크로터빈의 구성도
Fig. 1 Configuration of the micro-turbine.

본 논문에서는 시동 구간에서의 마이크로 터빈의 출력 및 동특성 분석을 위해 실험적 방식을 제안하고, 이에 의해 시동 구간에서의 출력 파워의 모델링 및 전체 시스템의 시동 특성을 모델링한다. 또한, 본 논문에서는 복잡한 열 해석적인 방법을 이용하지 않고, 시동 구간에서의 마이크로 터빈의 시동 데이터를 분석하여 회전 운동계의 운동 방정식을 통하여 각 주요 구성품의 제어 입력에 대한 각각의 전달 에너지를 모델링한다.

그림 2는 마이크로터빈의 정상 시동까지 전체적인 속도별 운전 스케줄과 연료 스케줄을 나타낸다, 시동 구간에서 점화속도(W^* , T^*)까지는 전기 시동 장치에 의해 속도 제어가 실시되고, 점화속도에 이르면 정속 운전이 이루어지고, 연료제어에 의해 연료가 공급되어 점화가 이루어진다. 이후 가스터빈에서 발생하는 에너지와 전기 시동 장치의 에너지에 의해 MT는 가속된다, 터빈의 힘이 전기적 입력 없이 회전을 유지할 수 있는 속도지점(Self_sustain speed)를 지나면 안정적인 가속을 위해 전기 시동기의 입력을 계속 유지한 상태에서 정해진 속도 시점(W_0 , t_0)까지 운전한 뒤 전기 시동기 출력을 멈춘다. 이 t_0 시점까지를 시동구간이라 한다. t_0 시점 이후 연료연소에 의한 터빈 힘 만에 의한 가스터빈의 페 루프 속도제어가 실시되어, 정격 속도에 이른다. 그림 2에서 나타나듯 마이크로터빈의 시동 구간(Motoring period)에서 시동에 소모되는 파워는 점화를 기준으로 2 구간(Mode I, Mode II)으로 구분된다. 첫째, 점화 전 전기 시동기만의 파워에 의한 점화 속도까지의 모터링 구간(Mode I)과 둘째 점화 후 전기 시동기와 함께 연료 연소에 의한 터빈 파워가 속도를 가속하는 점화 후 구간(Mode II, 가속 구간)으로 나누어진다.

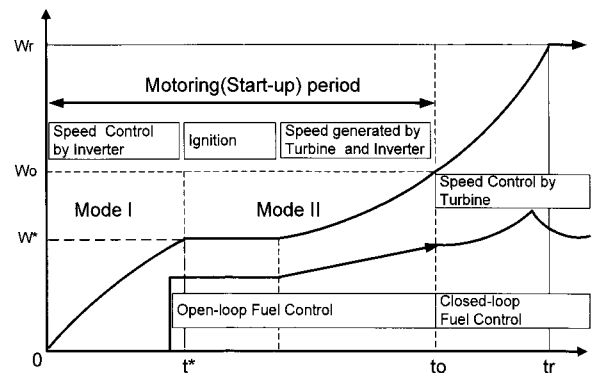


그림 2 마이크로터빈의 운전 스케줄
Fig. 2 Operation schedule of the micro-turbine.

시동구간에서의 소모되는 파워를 회전체의 운동 방정식에 따라 표현하면 아래와 같이 주어진다.

$$\text{Mode I} : P_I = P_{elec} = T_{elec}w = (J\frac{dw}{dt} + Bw + T_{comp})w \quad (1)$$

$$\begin{aligned} \text{Mode II} : P_{II} &= P_{elec} + P_{engine} \\ &= (T_{engine} + T_{elec})w = (J\frac{dw}{dt} + Bw)w \end{aligned} \quad (2)$$

여기서,
 $T_{engine} = T_{turbine} - T_{comp}$: 엔진에서 발생하는 토크
 T_{comp} : 회전시의 압축기에서 소모하는 토크.

$T_{turbine}, T_{elec}$: 점화 후 연료 연소에 의해 터빈에 발생하는 토크, 전기 시동기(인버터+PMSG)에 의해 전기적으로 발생하는 토크.

$w[rad/sec], B$: 회전 속도, 마찰 계수

$J[kgm^2] = J_{engine} + J_{generator}$: J는 관성 모멘트이며, 이 값은 엔진과 고속 발전기의 축 관성의 합.

식 (1), (2)에서 나타나듯이 회전체 방정식을 해석하기 위해서는 압축기, 터빈 그리고 전기 토크 및 파워에 대한 분석과 기계적 파라미터 값의 추출이 필요하다. 본 논문에서는 다음의 절차에 따라 마이크로터빈의 시동 구간에서 필요한 파워에 대한 분석을 수행하였다.

2.1 압축기 소모 파워를 구하기 위한 각 속도별 운전 시험

먼저 수식(1) (2)에서 부하로 나타나는 압축기 부하에 대한 모델링을 위해 전기 시동기를 이용하여 점화 없이 각 속도 대역별 전기적 입력 파워를 실험적으로 구한다. 파워 분석 장비를 통하여 정해진 속도에서의 엔진 회전을 위한 파워를 구하면, 엔진 회전 시에 나타나는 마찰 부하를 포함한 압축기 부하에 의해 소모되는 파워를 정확히 구할 수 있다. 압축기 소모 파워는 속도의 함수, 즉 $P_c = P(w)$ 로 주어진다. 아래 그림은 압축기의 속도별 소모 파워를 나타내며 속도에 따른 방정식을 보간법을 활용하여 유도하면 수식(3)과 같다.

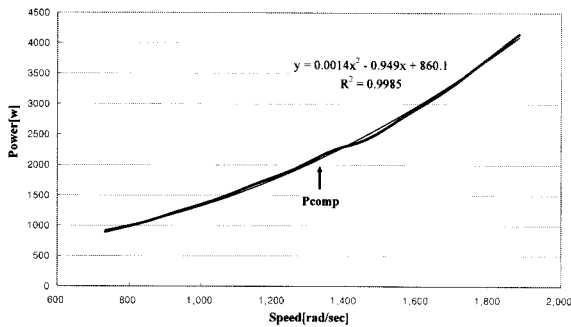


그림 3 속도별 압축기 소모 동력
Fig. 3 Consumed power of the compressor according to the speed.

$$P_{comp}(w) = 0.0014w^2 - 0.949w + 860.1 \quad (3)$$

2.2 터빈의 출력 파워를 구하기 위한 전기 시동기의 정 출력 모터링 시험

수식(2)에서 엔진의 거동을 결정하는 파워는 압축기의 소모 파워를 감당하며 엔진을 모터링하는 전기적 입력 파워와 터빈에서 발생하는 파워의 합이다. 여기서 터빈의 파워를 구하기 위해서는 시스템의 전체 파워에서 압축기 부하 및 전기적 입력 성분을 제거하여야 한다.

$$P_{turbine} = T_{turbine}w = (J \frac{dw}{dt} + Bw + T_{comp} - T_{elec})w \quad (4)$$

본 논문에서는 터빈의 파워 모델을 구하기 위해 시동(모터링) 시 일정한 전기적 출력 파워를 인가하여 엔진을 모터링하는 기법을 제안한다. 시동 실험 후 시간에 따른 엔진

속도 그래프의 분석을 통하여 시동 구간에서의 가속 성분 및 부하 성분을 추출함으로써 엔진의 출력 파워를 구하고, 압축기 소모 파워 및 전기적 입력 파워를 제외하는 기법으로 터빈 파워를 구하고자 한다. 전기 시동기의 정 출력 운전으로 간단히 엔진의 출력 파워에서 전기적 입력 파워는 알고 있으므로 제거될 수 있으며, 실험적 방법에 의해 구한 압축기의 속도별 소모 파워 방정식을 이용하여 이 또한 쉽게 제거할 수 있다.

먼저, 터빈 출력 분석을 위해 본 논문에서 제안하는 실험적 방법 및 분석 절차는 다음과 같다.

첫째, 전기 시동기를 이용하여 출력을 3가지의 일정 전기적 출력(1.5kW, 2.0 kW, 2.5 kW)으로 유지하며 3번의 엔진의 시험 시동을 실시한다. 단, 유사한 주변 공기 온도에서 실시하고, 적절한 공연비를 유지하며, 동일한 연료량 제어 스케줄(유사한 점화 유량, 유사한 속도별 연료 가속량 및 기울기)에 의해 시동한다.

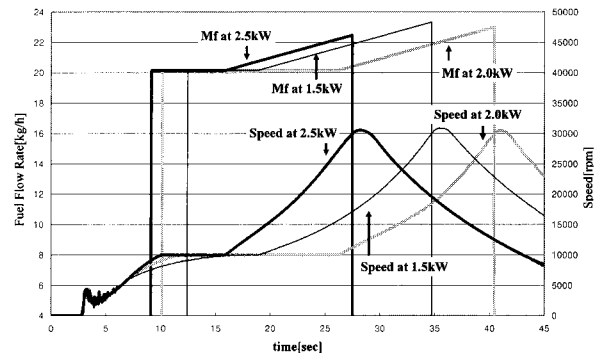


그림 4 3가지 다른 전기적 출력에 의한 시동 데이터 I
Fig. 4 Motoring data I by 3- different electrical power output.

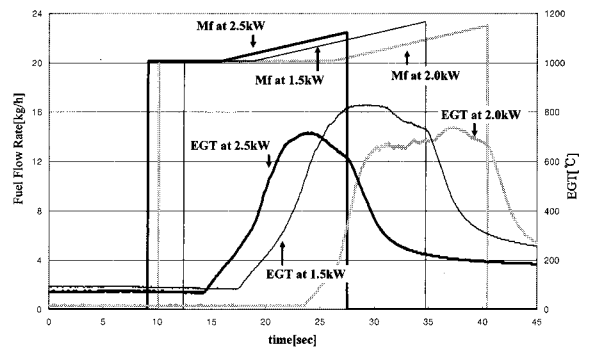


그림 5 3가지 다른 전기적 출력에 의한 시동 데이터 II
Fig. 5 Motoring data II by 3-different electrical power output.

그림 4와 그림 5는 3가지 다른 전기적 출력에 의해 가스 터빈 엔진을 시동한 결과를 시간 축에 나타낸 그래프이다. 그림 4에서는 시간 축 상에서 각각 시동에 걸리는 시간이 다르며, 같은 연료 가속 스케줄이지만 시동에 걸리는 시간이 다르므로 같은 속도(Speed, 단위는 rpm)시점에서의 연료량(Mf는 단위 시간당 연료량(kg/sec))이 각기 다를 수 있다. 그림 5에서는 시간 축 상에서 연료량의 변화 및 이에 따른 배기가스(EGT[°C], Exhausted Gas Temperature)의 온도를 나타내고 있다. 그림 4에서 점화 이후 가속 구간을 살펴보면 연료량은 점화 유량 이후 같은 기울기로 시동구간

의 끝까지 증가함을 알 수 있다. 그리고 전체적인 가속 시간은 전기적 입력의 크기에 따라 시동 구간 중 가속 기간이 짧아짐을 알 수 있다. 터빈 파워에 관계된 그래프는 점화 이후의 구간임으로 그림 4와 그림 5의 시간 축의 데이터의 점화 이후 가속 부분만 획득하여 연료 축으로 나타내면 그림 6과 같다. 그림 6에서는 연료량의 매우 작은 변화 축에 전기적 입력 크기가 달라짐에 따라 터빈 파워 및 속도가 매우 큰 폭으로 변화가 있음을 알 수 있다.

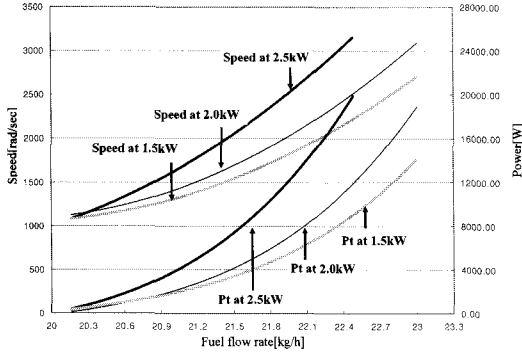


그림 6 연료 가속량에 따른 시동 데이터

Fig. 6 Motoring data according to the acceleration of the fuel mass flow

터빈 파워에 대한 그래프를 구하기 위해서는

첫째, 시간 축 상에서의 가속 그래프를 추출하여, 시간에 따른 속도 방정식을 만들고, 이 방정식을 이용하여 샘플링 시간 차이의 속도 변화량을 계산한 뒤, 관성력을 입력하여 속도별로 가속 파워량 ($Jw \frac{dw}{dt}$)을 계산한다.

둘째, 수식(3)에서 속도별 압축기 소모 파워(P_{comp})를 계산한다.

셋째, 전기적 입력(P_{elec})은 일정 출력 값으로 속도에 따라 일정한 값으로 알고 있는 값이다.

넷째, 수식(2)에서 터빈 파워($P_{turbine}$)를 제외한 나머지 값을 속도별로 계산하여 알고 있음으로 터빈 파워의 속도별 그래프를 얻을 수 있다. 이 절차에 따라 구해진 속도에 따른 터빈 파워와 연료량의 그래프는 그림 7과 같다

그림 7을 분석해 보면, 속도별 터빈 파워의 값이 3가지 다른 전기 출력의 실험의 결과 모두가 동일함을 알 수 있다. 이때 연료량의 그래프를 보면 연료량이 3가지 경우 각기 같은 속도에서 다른 양이 공급됨을 알 수 있다.

이 내용은 본 논문에서 연료량에 영향을 배제하고 터빈 파워를 속도만의 함수로 간략화 할 수 있는 근거가 된다. 3가지 경우의 그래프를 분석하여 터빈 파워를 속도의 함수로 나타낼 수 있다.

$$P_{turbine} = 0.0019w^2 + 1.3853w - 3393.1 \quad (5)$$

그림 7의 터빈 파워 그래프에서 나타나는 특이한 현상은 정상 시동 구간에서 3가지 경우의 연료 제어 스케줄 차이에 따른 터빈 파워의 변화량이 크게 없이 3가지 경우의 출력 파워가 거의 동일함을 알 수 있다. 이러한 현상은 시동 구간에서 나타나는 현상으로 시동 구간에서는 안정된 엔진의 시

동을 위해 점화 시에 충분한 점화 유량을 공급하며, 시동 구간에서 매우 작은 가속량을 가지고 운전이 이루어진다. 이러한 제어기법은 시동 구간에서의 연료 부족에 의한 엔진 소화 현상 방지 및 엔진 가속 상승을 매우 부드럽게 운전하여 엔진의 속도 가속의 안정성을 유지하기 위해서이다. 즉 시동구간에서의 터빈 파워는 특이하게 점화 유량에 의한 점화 이후 연료량의 변화량이 크지 않기 때문에 연료에 의한 파워 생산은 거의 동일하며, 속도에 따른 공기량에 매우 밀접한 관련이 있음을 나타낸다.

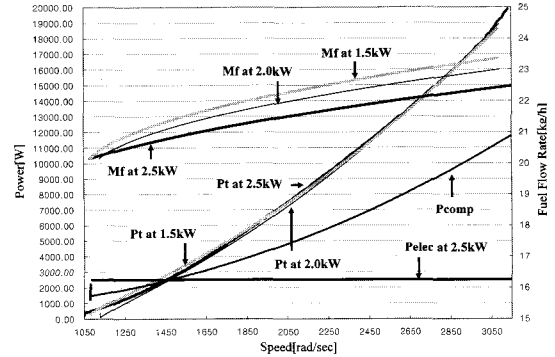


그림 7 속도에 따른 터빈 파워 및 연료량

Fig. 7 Turbine power and fuel mass flow according to the speed

2.3 터빈 출력 파워의 속도 함수로의 간략화에 대한 열역학적 타당성 분석

수식 (5)에서 나타난 터빈의 파워는 속도에 따른 함수로 표현되어 있으나, 실제 터빈 파워를 변화하는 열역학적인 제어 파라미터는 연료 입력량, 공기 입력량, 주변온도 및 터빈 내에서의 각 부의 온도 등에 따라 결정된다[7][8]. 그런데 이 열역학적 제어들의 변화량을 만드는 가장 주요 인자는 가스 터빈의 엔진 속도이므로, 이 제어 입력들의 변화량은 속도의 함수로 표현 가능하다. 시험 출력에 의해 구한 속도에 따른 터빈 출력 파워 함수와 제어 입력이 터빈에 미치는 영향을 비교 분석하기 위해 본 논문에서는 열역학적인 분석을 실시한다. 그림 1의 마이크로 터빈의 구성도에는 열역학적인 해석을 위한 가스터빈의 주요 온도에 대한 약어가 기록되어 있다.

그림 1에서 Tcit : 압축기 입구 온도, Tcdt는 압축기 출구 온도, Ttit는 터빈 입구온도 그리고 Tegt는 터빈 출구 배기 가스 온도를 나타낸다.

가스터빈 내에서 열역학적인 해석에 의한 전체적인 발생 파워는 다음과 같다.

$$P_{engine} = P_{turbine} - P_{comp} = \dot{M}C_p(T_{tit} - T_{egt}) - \dot{M}C_p(T_{cdt} - T_{cit}) \quad (6)$$

$$P_{turbine} = \dot{M}C_p(T_{tit} - T_{egt}) \quad (7)$$

여기서,

P_{engine} : 엔진에서 발생하는 파워

P_{comp} : 회전시의 압축기에서 소모하는 토크.

$P_{turbine}$: 점화 후 연료 연소에 의해 터빈에 발생하는 토크.

M : 연소 가스의 유량.

C_p : 평균 정압 비열

T_{tit} : 터빈 입구 온도, T_{egt} : 터빈 출구 온도, T_{cst} : 압축기 출구 온도, T_{cit} : 압축기 입구 온도 이다.

수식 (7) 보이듯 즉 터빈에서 발생하는 에너지는 연소 가스의 유량, 평균 정압 비열 그리고 터빈 입구와 출구의 온도 차의 곱이다. 이 파라미터들에서 정상적인 운전 하에서의 C_p 는 공기의 종류에 관련되어 변화함으로 일정 값으로 가정할 수 있다. 그리고 시동 구간에서는 실제 시동의 안정성을 위해 충분한 점화 연료 유량 및 작은 유량 가속률을 적용함으로 충분한 공연비를 갖는 Reach-burn 형태로 운전된다. 따라서 연료량은 시동 구간 전체에서 점화시의 유량이 결정되면 큰 변화량이 발생하지 않음으로 터빈 입출력의 온도차($T_{tit} - T_{egt}$)는 시동 구간에서 항상 거의 동일한 값을 보인다. 따라서 연소 가스의 유량이 터빈 파워를 결정하는 파라미터가 된다. 그리고 이 연소가스의 유량(연료의 유량과 공기의 유량)은 압축기의 회전 속도에 따라 결정된다.

본 논문에서 터빈 파워 모델을 속도의 함수로 간략화 하기 위한 열역학적인 분석에서 실제적인 마이크로터빈 운전을 고려한 시동 구간에서 주어지는 가정은 다음과 같다.

첫째, 압축기에서 방출하는 공기의 양은 손실 없이 터빈으로 흘러들어가고 그 공기량은 동일하다.

둘째, 연료를 연소하기 위한 연료 대 공기의 이론 혼합비는 1:15(0.067)가 되나 이 경우 Turbine 입구의 온도가 지나치게 높아져 사용재료의 내열성 및 고온 부식 등의 제한을 받기 때문에 실제의 경우에는 공연비를 1:40(0.025)에서 1:80(0.0125) 정도의 혼합비가 사용된다. 즉, 연료량은 공기량에 비해 매우 작음으로, 연소 가스의 총량은 연료량을 무시하고 압축기로 통과하는 공기량으로 등가화 할 수 있다.

셋째, 시동구간에서의 완벽한 점화 및 소화 방지를 위해 점화 시 충분한 점화 유량으로 점화하며, 엔진의 안정적인 가속을 위해 작은 연료량의 변화는 매우 작은 가속률을 갖는다. 점화 유량이 충분하고 시동 구간에서의 압축기 방출 공기 유량이 정상 상태에 비해 상대적으로 작음으로 시동 구간에서는 공연비가 크게 형성됨(Reach-burn)으로 가속시의 작은 연료 가속률 변화에 의해 공연비에는 큰 변화가 없다. 또 다른 형태의 연료 가속률을 갖는 시동이라도 시동 구간에서는 그 변화가 적음으로 점화 유량만 유사하다면 가속 중에 형성되는 터빈 입구 온도 및 출구 온도의 차이는 거의 동일하다.

넷째, 주변 온도는 가스터빈의 성능에 상당한 영향을 미치기 때문에 공기 밀도의 변화를 고려한다.

마이크로 터빈의 엔진 시스템 모델링을 위해 위에서 제시한 가정에서 보이듯이 공기의 양에 비해 연료의 양은 매우 적어 손실이 없다면 터빈에서 방출하는 연소 가스의 양은 압축기에서 방출한 공기의 양이다.

$$\dot{M}_{air} \approx \dot{M}_{air} + \dot{M}_{fuel} \quad (8)$$

여기서, $\dot{M}_{air}[kg/s]$, $\dot{M}_{fuel}[kg/s]$ 는 단위시간당의 공기유량과 연료유량을 나타낸다

압축기에서 단위 시간 당 토출하는 유량은 다음의 식에 따른다

$$\dot{M} = \rho A (2\pi R_t N) \quad (9)$$

수식 (9)에서 ρ = 입구공기의 밀도, A= 입구의 공기 흐름의 면적, U= 압축기의 Tip 속도이며, R_t = 압축기 블레이

드 팁의 반지름, N= 회전속도이다.

즉, 공기밀도와 회전속도를 제외한 다른 파라미터는 운전 상 바뀌지 않는 기계적 파라미터로 공기유량은 엔진의 회전 속도(N[rad/sec])에 비례하는 관계식을 갖는다.

따라서 식(9)를 (7)식에 대입하여 터빈파워는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{turbine} = \rho A (2\pi R_t N) C_p (T_{tit} - T_{egt}) \quad (10)$$

식 (10)에서 터빈 파워는 정상적인 시동 구간에서는 속도의 함수로 터빈 파워를 나타낼 수 있음을 알 수 있다. 여기에서 고려하여야 할 사항은 주변 온도에 따른 공기의 밀도, ρ , 값의 변화이다.

주변 온도에 따른 공기의 밀도 증감으로 압축기의 토출 공기 유량 및 토출 온도가 달라지며 변화는 다음의 수식과 같다

$$\rho' = \rho_s \left(\frac{273}{273 + T_a} \right) \quad (11)$$

여기서, ρ_s 는 0 °C의 공기 밀도이며 T_a 는 섭씨온도[°C]이다.

따라서, 주변 온도에 따른 밀도를 고려한 터빈파워는 다음과 같이 구할 수 있다.

$$P_{turbine} = \rho' NA (2\pi R_t) C_p (T_{tit} - T_{egt}) = \rho' NK_{eng} \quad (12)$$

여기서 K_{eng} 는 엔진의 연소 가스량과 온도에 관련된 기계적 상수 값으로 둘 수 있다.

수식 (9) ~ (12)의 수식을 분석 요약하면, 시동 구간에서 터빈에서 팽창하여 출력을 내는 연소 가스량은 엔진의 회전 속도에 비례한 함수로 표현할 수 있음을 의미한다. 그리고 시동 구간에서의 엔진에서의 연소 가스량에 의한 터빈의 출력 파워는 회전 속도에 따른 방출 공기량의 변화량에 비례하는 함수로 나타낼 수 있다. 즉 속도에 따라 공기량이 결정되고, 정상적인 연료 스케줄에 의한 시동이라면 이 결정된 공기량에 의해 터빈 출력 파워가 결정됨을 알 수 있다. 따라서 속도에 대해 압축기와 터빈의 출력 파워의 관계를 모델링 하면 가스터빈의 주요 구성품의 시동 구간에서 출력 파워의 방정식을 결정할 수 있다. 시동 구간에서는 터빈의 기계적 출력과 시동기의 전기적 출력이 압축기 공력 부하를 감당하고 엔진의 가속의 형태(시동 시간 및 가속 기울기)를 결정하는데 모두 사용됨으로, 전기적 출력을 제거한다면 가스터빈의 각 주요 구성품의 열역학적인 특성을 속도 함수로의 간략화가 가능함을 의미한다. 또한 이는 본 논문에서 제안한 운동 방정식을 이용한 압축기 소모 동력 및 터빈 출력 파워의 분석이 시동구간 해석에 있어 간단하지만 정확한 분석 방식이 될 수 있음을 나타낸다.

3. 전기 시동기의 일정 출력 시동 알고리즘

본 논문의 마이크로터빈용 전기 시동 장치는 전압형 인버터와 3상 영구 자석형 동기 발전기(3 phase PMSG)로 구성된다. 가스터빈 엔진의 운전 특성상 점화 영역과 시동 구간이 수만 rpm 에 이른다. 따라서 시동 구간에서 인버터 시스템의 초고속 속도 제어가 요구되고, 모터로 이용되는 영구 자석형 동기 발전기는 고속 운전을 위해 전기적 시정수가

매우 작게 설계되어져 있다. 이러한 이유로 초고속 전동기 시스템의 특성으로 인해 구동용 인버터를 설계 시에는 몇 가지 난점이 발생한다.

첫째, 초고속 전동기는 고속 회전이 이루어질 수 있도록 상간 저항 및 누설 인덕턴스가 범용적인 저속 전동기에 비해 그 값이 매우 적어 매우 큰 전류리플과 모터에 큰 전력 손실이 발생한다. 특히 고속 회전을 위해서는 입력되는 3상 전류의 주파수가 수백 Hz에서 수 kHz에 이른다. 이로 인해 강건한 전류 제어를 위해서는 모터 파라미터의 신호 처리와 계산이 매우 짧은 샘플링 사이클에 고정도를 갖고 수행되어야 한다. 더욱이, 디지털 이산 제어기 및 센서들의 제한된 대역폭에서 발생하는 시간 지연은 제어 샘플링 주기와 비교해 보면 결코 무시될 수 없다[9][10][11].

둘째, 초고속 전동기 시스템은 초고속 회전에 따라 위치 센서 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. 따라서 초고속 전동기 시스템에서는 센서리스 알고리즘을 사용한 제어가 요구되어진다. 이러한 설계상의 난점을 고려하여 본 논문에서는 속도 추정기를 갖는 센서리스 벡터 인버터를 구현 적용하였다. 그러나 저속 구간에서는 센서리스 운전이 작은 역기전력의 값으로 매우 불안정하여, 초기 기동을 위해서는 AC 정렬 기법과 충분히 역기전력이 나타나는 시점까지 정해진 속도 운전 곡선을 이용한 개 루프 속도 제어 기법을 실시하였다[10][11]. AC 정렬 기법은 15Hz의 정격 전류를 q축 인가하여 60rpm까지 4초간 회전시켜 초기 기동을 실시하고, 이후 정해진 속도 프로파일에 따라 6,000 rpm까지 가속하며, 이후 센서리스 모드로 전환하여 속도 제어를 구현하였다.

본 논문에서는 제안한 전기 시동기의 정 파워 출력 운전 알고리즘은 설계한 인버터의 q축 전류제어에 의해 구현된다. 3상 영구 자석형 동기 전동기의 파워, 속도, 토크의 관계는 수식 (13)으로 주어진다.

$$T_e = \frac{P_e}{\omega_e} = \frac{3}{2} \frac{P}{\lambda_f I_{qsc}^*} \quad (13)$$

여기서, T_e 는 전동기 발생 토크, P_e 는 전동기 출력 파워, ω_e 전동기 회전 속도, λ_f 는 역기전력 상수, P 는 극수 그리고 I_{qsc}^* 는 q축 전류이다.

수식 (13)에서 전기적 일정 출력 제어 알고리즘을 위해 추정된 회전 속도를 이용하며 토크 분(q축) 전류 제어를 다음과 같이 나타낼 수 있다.

$$I_{qsc}^* = \frac{4P_e}{3P\omega_e \lambda_f} \quad (14)$$

수식 (14)에서 역기전력을 고정 값으로 하면 정 출력 운전 제어는 회전 속도에 따른 q축 전류에 의해 간단히 구현될 수 있다. 따라서 전기 시동기의 정 출력 운전을 위해서는 점화 이후 가속 구간의 운전에서 가속 시작 시점에서 속도 지령치(w^*) 명령을 시동 구간의 최종 목표속도(30,000 rpm)로 설정하고 수식 (14)에 의해 회전 속도에 따라 산출되는 전류 제어 값으로 가속 운전을 실시하면 된다.

4. 마이크로터빈 시동을 위한 전기 시동기의 시동 스케줄

그림 8은 마이크로터빈 시동을 위한 센서리스 인버터 드라이브에 의한 시동 스케줄을 나타낸다. 총 6 단계의 운전 스케줄에 의해 가스터빈엔진은 정상상태까지 운전된다. 1단계 ~4단계까지는 점화 전 전기 시동기(인버터)의 기동에 의한 엔진 운전 스케줄이며, 5단계 ~6단계는 점화 후 터빈의 파워와 인버터 파워에 의해 엔진의 속도가 형성되는 운전 스케줄이다. 본 논문의 3장에서 제안한 센서리스 알고리즘에 의한 영구 자석형 모터를 구동에 따라 MT의 운전 스케줄이 결정된다.

1단계는 초기 기동을 위한 초기 정지 상태를 해제하기 위해 최대 전류를 가하고 모터의 영구자석을 AC 정렬을 위해 기동 시키는 구간이다.

2단계는 센서리스 정보를 얻을 수 있는 속도까지 가속하기 위한 미리 정해진 속도 패턴에 따라 가속하는 구간이다.

3단계는 센서리스 전환 후 점화 속도까지 최단 운전 시간을 가지고 가속하는 구간이다.

4단계는 점화 구간이며, 정해진 연료 스케줄에 따라 점화 유량이 분사된다.

5단계는 엔진 점화에 의해 연료량 제어가 이루어지며 이에 따라 터빈이 파워를 출력하며, 인버터는 정 출력으로 운전되는 구간이다. 엔진의 속도는 터빈 파워와 전기 파워에 의해 결정된다.

6단계는 인버터 기동이 정지되고 연소의 힘에 의해서 엔진이 정상속도 까지 운전되는 구간이다.

그림 8에서 위쪽의 그래프는 설계된 시동 스케줄에 따라 운전할 때 예상되는 인버터 벡터 드라이버의 q축 전류를 나타내었으며, 아래의 그래프는 단계별 MT의 속도 거동 및 연료 스케줄의 형태를 나타낸 것이다.

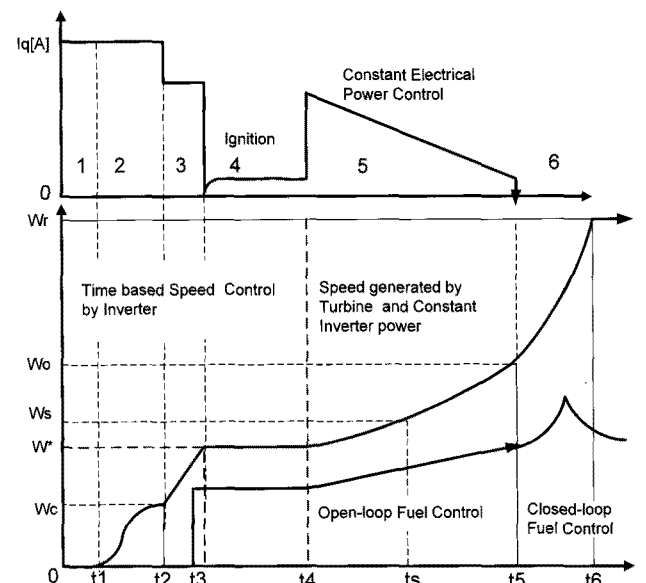


그림 8 마이크로 터빈 운전 스케줄
Fig. 8 Operation Schedule of the MT

5. 시뮬레이터 설계와 시뮬레이션 및 실험 결과의 비교

5.1 시뮬레이터 튜닝

설계된 시뮬레이터의 성능 튜닝은 제안된 알고리즘에 의해 2장에서 구한 MT의 주요 구성품의 파워 방정식을 실제 실험 결과와 동일한 결과를 갖도록 비교하면서 튜닝하였다. 열역학적으로 볼 때 MT는 터빈에 힘이 의해 회전을 유지할 수 있는 시점(W_s , Self sustain speed)에서 파워의 큰 변화가 발생한다. 따라서 본 논문에서는 2장에서 구해진 수식 (3), 수식(5)에서 공기 역학적인 변화가 크게 발생하는 Self_sustain Speed(W_s , 1884 rad/sec)를 기준으로 이전 구간과 이후 구간을 나누어 구간별 계인을 따로 설정하여 따로 보상을 실시하여 최종 튜닝을 완료하였다. 최종 적용된 터빈과 압축기의 모델은 아래와 같다.

$$P_{turbine}'(w) = \begin{cases} K_{t1} P_{turbine}(w), & w < 1884 \text{ rad/sec} \\ K_{t2} P_{turbine}(w), & w \geq 1884 \text{ rad/sec} \end{cases} \quad (15)$$

$$P_{comp}'(w) = \begin{cases} K_{c1} P_{comp}(w), & w < 1884 \text{ rad/sec} \\ K_{c2} P_{comp}(w), & w \geq 1884 \text{ rad/sec} \end{cases} \quad (16)$$

여기서 K_{t1} 과 K_{t2} 는 터빈의 구간별 튜닝 계인이며, K_{c1} 과 K_{c2} 는 압축기를 위한 구간별 계인이다. 수정된 모델을 적용하여 시뮬레이터로 1500W와 2500W 정 파워 운전을 실시하여, 실험 결과와 비교 분석하였다. 아래 표는 가장 주요한 구간별 시동 시간에 대한 분석 결과이며 W_s 를 기준으로 점화에서 W_s 도달 시간 그리고 W_s 에서 모터링 종료 시점 (27,000 rpm) 까지의 소요 시간이 분석되어져 있다.

표 1 계인 튜닝 후 시뮬레이션과 실험 결과 비교

Table 1 Comparison of Experimental results and simulation results after gain tuning

	전기 입력 파워 [w] [10,000 ~ 27,000 rpm]	점화 시점 [sec]	W_s 도달 시간 [sec]	모터링 종료 시점 [sec]	점화에서 W_s 까지 운전 시간 [sec]	W_s 이후 종료 시점까지 운전 시간 [sec]	전체 모터링 운전 시간 [sec]
실험 1	1500	18.83	28.23	34.73	9.4	6.5	15.90
시뮬레이션 1	1500	17.11	26.653	33.475	9.54	6.82	16.36
실험 2	2500	15.87	21.72	27.47	5.85	5.75	11.60
시뮬레이션 2	2500	17.11	22.93	28.56	5.82	5.63	11.45

표 1에 나타난 결과와 같이 구간별 소요 시간에 거의 일치함에 따라 전체적으로 시뮬레이터의 튜닝이 잘 이루어졌음을 알 수 있다.

5.2 시뮬레이터 구현

시뮬레이터는 크게 VSI 인버터, Constant Power controller, 엔진 구성품 파워 모델 그리고 Speed Controller

로 나눌 수 있다. VSI 인버터는 3상 전동기 벡터 제어 모델 및 SVPWM 모델로 구현하였다. Constant Power 모델은 본 논문의 3장의 센서리스 알고리즘의 수식에 따라 구현되었다. Speed Controller는 본 논문의 4장에 기술된 6단계의 속도 제어를 위한 구간을 설정하고 구간마다의 목표 속도 및 운전 시간을 설정하여 속도 레퍼런스를 입력할 수 있도록 구현하였다. 엔진 주요 구성품 파워 모델은 최종 튜닝된 수식을 활용하여 Matlab/Simulink로 구현하였다.

그림 9는 시뮬레이터의 모델의 전체 구성을 나타낸 것이다.

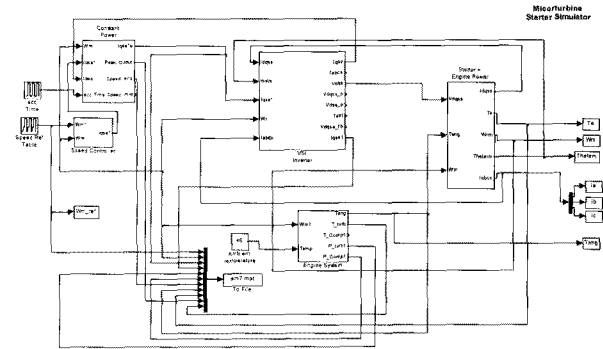


그림 9 시뮬레이터 전체 구성

Fig. 9 Overall configuration of the designed simulator

그림 10은 엔진의 주요 구성품인 터빈 모델과 압축기 모델을 나타낸 것이다. 본 모델에 보이는 것처럼 Self sustain speed 를 기준으로 터빈과 압축기에 튜닝 할당된 구간별 계인 조정 모델 및 주변 공기 온도에 따른 온도 보상 모델이 포함되어 있다.

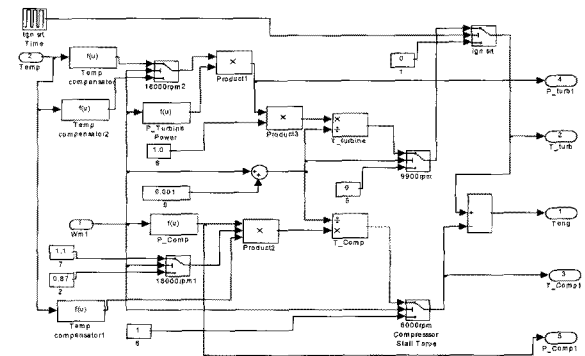


그림 10 마이크로 터빈 주요 구성품의 파워 및 토크 모델

Fig. 10 Power and torque model of the main components of the MT

그림 11은 정 출력 운전을 위해 VSI 인버터의 q축 전류를 생성하는 모델이다. 본 논문 4장에 제시된 초기 정렬, 초기 기동 및 속도별 운전 알고리즘에 따른 인버터 출력 전류를 결정하는 모델이 포함되어 있다.

그림 12는 VSI 인버터 모델이다. 벡터제어를 위한 d,q 좌표 변환을 위한 모델 및 SVPWM 모델이 설계되어 있다.

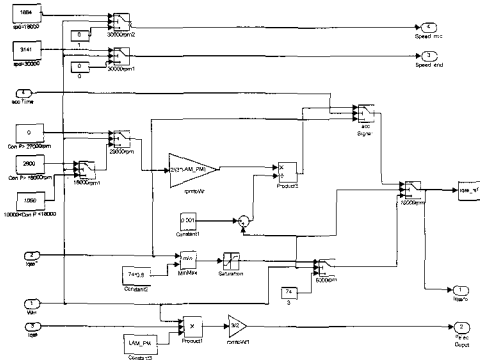


그림 11 정 출력 운전을 위한 모델
 Fig. 11 The model for constant power output operation

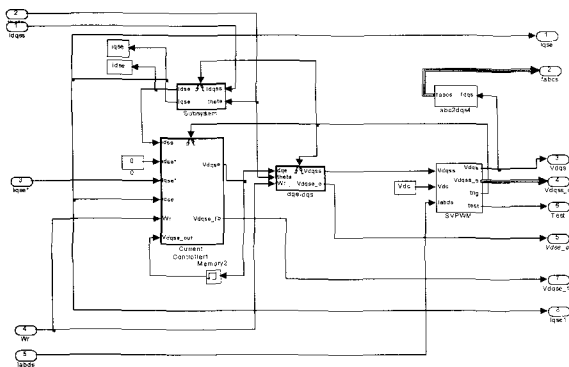


그림 12 VSI 인터버 모델
 Fig. 12 Voltage Source inverter model

5.3 실험 및 시뮬레이션 결과

그림 13의 위쪽의 그래프는 주변온도 30도에서 3200w 정 출력 전기 파워를 입력하여 점화하지 않고 모터링 한 실험 결과이며 아래쪽의 그래프는 같은 조건으로 설계한 시뮬레이터로 운전한 결과이다. 본 논문의 4장에 제안된 시동 스케줄을 단계로 실험 그래프 위쪽에 표시하였다. 1단계는 초기 기동 운전이며 2단계는 센서리스 모드 전환 전 속도 개루프 운전 구간이다. 그리고 3단계는 정 전류 구동에 의한 점화 속도까지의 폐 루프 운전 구간이다. 4단계는 점화를 위한 정 속도 운전 구간이다. 엔진의 큰 관성력 때문에 속도의 수렴이 시간이 지연됨을 볼 수 있다. 그리고 5단계는 점화 후 실제 가속이 이루어지는 부분이나, 본 실험은 터빈의 힘이 사용되지 않음으로 모델링된 압축기의 소모 파워를 전기 에너지의 힘으로 운전한 실험 결과이다. 그림 13에서 T0시점은 가속을 시작하는 시점을 나타내며 그래프의 X, Y 축의 간격을 동일하며, 가속 시점을 맞추기 위해 아래쪽 그림을 오른쪽으로 배치하였다. 그래프에서 Power[w]는 인버터에서 출력된 파워, Iq[A]는 인버터에서 출력된 q축 전류 그리고 Speed[rad/sec]는 마이크로 터빈의 시간에 따른 속도 거동을 나타낸 것이다. 실험 결과 및 시뮬레이션 결과를 분석해 보면, 거의 동일한 형태의 속도 거동 및 속도 포화 시점의 값이 1780 [rad/sec]으로 일치함을 알 수 있어 압축기의 부하 모델링이 매우 정확함을 알 수 있다.

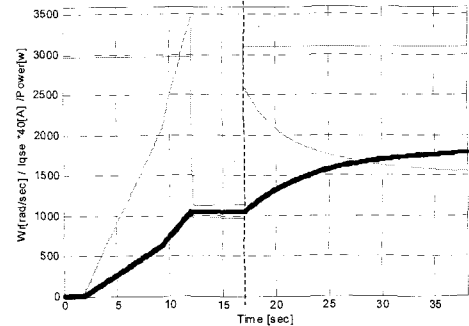
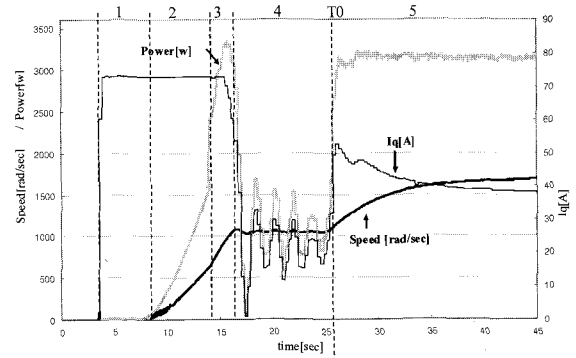


그림 13 점화 없이 3.15 kW 정 파워 출력 모터링 시의 실험과 시뮬레이션 결과
 Fig. 13 Experimental and simulation data by motoring with 3.2kW constant power output under no ignition.

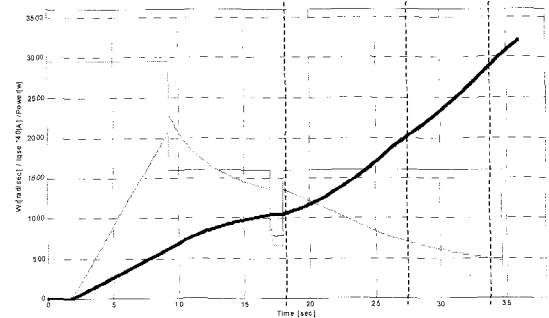
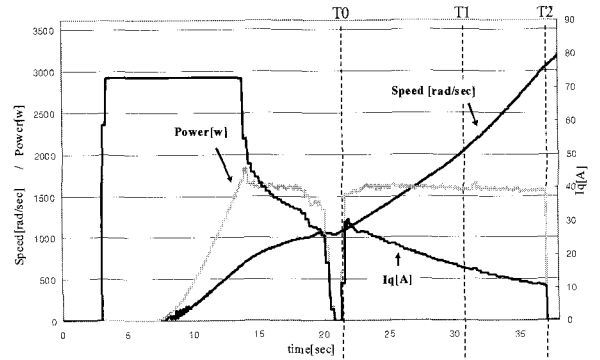


그림 14 38°C에서 1600w 정출력에 의한 모터링 실험 및 시뮬레이션 결과
 Fig. 14 Experimental and simulation data by motoring with 1600w constant power output under 38°C

그림 14의 위쪽의 그래프는 Self_sustain 속도 이전 구간과 이후 구간 모두 같은 1600w 정 출력 파워를 입력하여 주변 온도 38도에서 시동한 실험 데이터이며, 아래 그래프는 같은 조건으로 설계한 시뮬레이터로 운전한 결과이다. 그림 16에서 T0시점은 가속을 시작하는 시점을 나타내며 그래프의 X, Y 축의 간격은 동일하며, 가속 시점을 맞추기 위해 아래 그림을 오른쪽으로 배치하였다. 그래프에서 Power[w]는 인버터에서 출력된 파워, Iq[A]는 인버터에서 출력된 q축 전류 그리고 Speed[rad/sec]는 마이크로 터빈의 시간에 따른 거동을 나타낸 것이다. X축 좌표는 시간 축[sec]를 나타내고 Y축의 왼쪽 좌표는 Power[w]와 Speed[rad/sec], Y축의 오른쪽 좌표는 Iq[A]를 위한 좌표이다. 실험 결과 및 시뮬레이션 결과를 분석해 보면, T1 시점에서의 중간 속도가 거의 일치하며, 모터링 최종 속도인 T2 시점에서 시뮬레이션 결과가 시간 지연이 약간 발생한다. 본 그래프로 볼 때 설계된 터빈 및 압축기의 점화 모델링이 정확함을 알 수 있고 공기 밀도의 변화에 근거한 주변 공기에 대한 보상도 잘 이루어졌음을 알 수 있다.

그림 15의 위쪽의 그래프는 Self_sustain 속도 이전 구간에서 1000w 정 출력 파워와 이후 구간에서는 2700w 정 출력 파워를 입력하여 주변온도 48도에서 시동한 실험 데이터이며 아래쪽의 그래프는 같은 조건으로 설계한 시뮬레이터로 운전한 결과이다. 그림 15에서 T0시점은 가속을 시작하는 시점을 나타내며 두 그래프의 X, Y 축의 간격을 동일하게 표시하였으며, 가속 시점을 맞추기 위해 아래쪽 그림을 오른쪽으로 배치하였다.

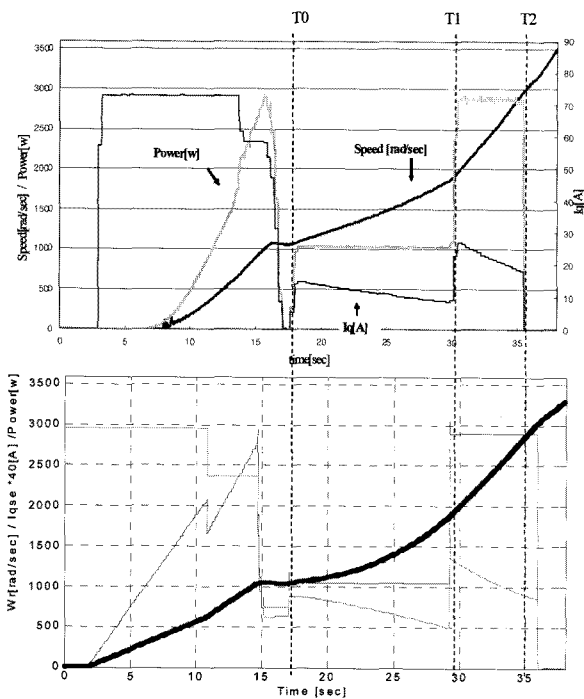


그림 15 48℃에서 1000w와 2700W 정 출력에 의한 모터링 실험 및 시뮬레이션 결과

Fig. 15 Experimental and simulation data by motoring with 1000w and 2700w constant power output under 48℃

그래프에서 Power[w]는 인버터에서 출력된 파워, Iq[A]는 인버터에서 출력된 q축 전류 그리고 Speed[rad/sec]는 마이크로 터빈의 시간에 따른 거동을 나타낸 것이다. X축 좌표는 시간 축[sec]를 나타내고 Y축의 왼쪽 좌표는 Power[w]와 Speed[rad/sec], Y축의 오른쪽 좌표는 Iq[A]를 위한 좌표이다. 실험 결과 및 시뮬레이션 결과를 분석해 보면, T1 시점에서의 중간 속도는 거의 일치하나 도달까지의 마이크로 터빈의 거동이 실험은 1차적인 형태이나 시뮬레이션 결과는 2차적인 형태로 운전된다. 그리고 Self_sustain 이후 모터링 종료 시점까지의 속도의 기울기가 실험의 경우가 더 급격함을 알 수 있다. 이러한 오차는 급격한 온도의 상승 즉, 48도 고온 특성에 대한 터빈 및 압축기 부하의 보상이 공기 밀도에 대한 선형적인 값으로 이루어짐에 따라 발생한 오차로 판단된다. 이러한 오차 개선을 위해서는 가변 온도에 따른 실험을 추가하여 온도 변화에 대한 주요 부품의 토크 특성의 변화를 수식화하여 시뮬레이터에 반영하여야 할 것으로 판단된다. 또한 이러한 약간의 오차는 시뮬레이터 설계를 위한 모델링 시의 연료 스케줄의 가정이 미치는 영향으로 판단된다. 따라서 좀 더 정확한 시뮬레이터의 설계를 위해서는 연료량과 터빈 파워와의 정확한 함수의 선정을 위한 추가적인 시험이 필요하다고 판단된다. 그러나 전체적인 시뮬레이터의 MT 운전에 대한 도달 시간 측면의 특성에서 중요 시점까지의 운전 시간에 작은 오차가 발생함을 알 수 있다. 이러한 관점에서 볼 때 고온에서의 공력의 변화에 대한 추가 실험을 실시하여 모델에 반영한다면 보다 정확한 속도 패턴의 결과를 얻을 수 있다고 판단한다.

6. 결 론

본 논문에서는 마이크로 터빈의 시동 구간에서의 출력 파워 및 속도 거동 특성을 평가할 수 있는 시뮬레이터 설계 결과를 보였다. 설계된 시뮬레이터의 성능 입증 위해 다양한 실험 결과와 비교함으로써 마이크로 터빈의 파워 모델 유도, 모델링 그리고 시뮬레이터의 설계의 타당성을 입증하였다. 설계된 시뮬레이터는 가스터빈 엔진의 주요 구성품의 파워 및 토크 모델링을 위해 복잡한 열역학적 해석을 통한 데이터의 분석을 수행하지 않고, 전기 시동기를 정 출력 하에 시험 운전한 모터링 데이터를 분석하여 이루어졌다. 본 논문에서 제안된 시뮬레이터 설계 방식은 마이크로 터빈의 구성품의 파워 특성 분석을 위해 복잡한 온도 센서 및 압력 센서의 설치가 필요 없으며, 단지 전기 시동기의 정 출력 운전에 의한 모터링 결과에서 도출함으로 매우 간단하며 신뢰성이 높다. 실험 결과에 의하면 상온에서의 시뮬레이터의 성능은 실험 결과와 매우 일치하나, 고온 하에서는 공기 밀도 변화에 대한 엔진 주요 구성품의 파워 변화를 반영하였음에도 불구하고 설계된 모델이 속도 및 시동 시간에 약간의 오차를 보인다. 이는 시험 모터링을 상온에서 실시하고 분석함에 따라 기인되었으며 공기 온도 변화에 대한 주요 구성품의 토크 변화가 공기 밀도에 따른 선형적인 보상에 비해 선형적인 부분에 대한 보상이 필요함을 의미한다. 이에 따라 향후 더욱더 정확한 시뮬레이터 설계를 위해 주변 온도 변화에 따르는 시험 모터링 결과를 분석함으로써 공기 밀도에 대한 보상을 정밀하게 보완할 계획이다.

참 고 문 헌

- [1] W. G. Scott, "Micro-Turbine Generators for Distribution Systems," IEEE Industry Applications Magazine, May/June 1998.
- [2] W. I. Rowen, "Simplified Mathematical Representations of Heavy Duty Gas Turbines," Journal of Engineering for Power, Trans. ASME, vol. 105, no. 4, pp. 865-869, Oct, 1983.
- [3] Gaonkar, D.N. and Patel, R.N."Modeling and simulation of microturbine based distributed generation system," Power India Conference, 2006 IEEE.
- [4] Kariniotakis, G.N., Soultanis, N.L., Tsouchnikas, A.I., Papathanasiou, S.A. and Hatziargyriou, N.D., "Dynamic modeling of microgrids," Future Power Systems, 2005 International Conference on 18-18 Nov. 2005
- [5] Lalor, G. and O'Malley, M., "Frequency control on an island power system with increasing proportions of combined cycle gas turbines," Power Tech Conference Proceedings, 2003 IEEE Bologna Volume 4, 23-26 June 2003.
- [6] H. Nikkhajoei and M.R. Iravani, "Modeling and analysis of a microturbine generation system," IEEE Power Engineering Society Summer Meeting, vol. 1, pp. 167 -169, 2002.
- [7] Naoto Kakimoto and Kazuhiro baba, "Performance of Gas Turbine-based Plants During Frequency Drops," IEEE Trans. Power System, vol. 18, no. 3, Aug.2003.
- [8] Wei Jiang, Jamil Khan and Roger A. Dougal "Dynamic centrifugal compressor model for system simulation," Journal of Power sources, vol. xx, pp. xx-xx, 2006.
- [9] L. Xu and C. Wang, "Implementation and experimental investigation of sensorless control schemes for PMSM in super-high variable speed operation," in Conf. Rec. IEEE-IAS Annu. Meeting, vol. 1, 1998, pp. 483-489.
- [10] B. Bae, S. Sul, J. Kwon and J. Byeon, "Implementation of sensorless vector control for super-high-speed PMSM of turbo-compressor," IEEE Trans. Ind. Applicat., vol. 39, pp. 811-818, May/June. 2003
- [11] 노민식, 박승엽, "고속 발전기 직접 구동방식의 터보 제너레이터 시스템 개발", 대한 전자 공학회 논문지 제40권 SC편 제6호, pp. 87-94, 2003. 11

저 자 소 개



노 민 식 (盧 民 植)

1971년 9월 10일생. 1996년 창원대 공대 전자공학과 졸업. 1998년 동 대학원 전자공학과 졸업(석사). 2004년 동 대학원 전자공학과 졸업(공학박). 1999년-2006년 삼성 테크윈 파워시스템 연구소 선임연구원. 2006년~현재 신라대 전자공학과 전임강사.

Tel : 051-999-6244

Fax : 051-999-5652

E-mail : msrho@silla.ac.kr