

마이크로터빈발전시스템 독립운전을 위한 동적 모델링 및 시뮬레이션

(Dynamic model and simulation of microturbine generation system for islanding mode operation)

홍원표*, 조재훈

(Won-Pyo Hong, Jea-Hoon Cho)

*한밭대학교, 충북대학교

Abstract

Distributed Generation (DG) is predicted to play a important role in electric power system in the near future. insertion of DG system into existing distribution network has great impact on real-time system operation and planning. It is widely accepted that micro turbine generation (MTG) systems are currently attracting lot of attention to meet customers need in the distributed power generation market. In order to investigate the performance of MT generation systems, their efficient modeling is required. This paper presents the modeling and simulation of a MT generation system suitable for isolated operation. The system comprises of a permanent magnet synchronous generator driven by a MT. A brief description of the overall system is given, and mathematical models for the MT and permanent magnet synchronous generator are presented. Also, the use of power electronics in conditioning the power output of the generating system is demonstrated. Simulation studies with MATLAB/Simulink have been carried out in islanding operation mode of a DG system.

1. 서론

전력에너지 공급 체계는 거대한 에너지 공급 계통에서 부하에 일반적으로 전력에너지를 공급하는 형태에서 경제성 향상을 위하여 부하 중심 지역과 빌딩단위로 분산형 에너지 공급시스템의 도입과 아울러 최근에는 계통에 태양광이나 풍력 등 분산형전원으로 마이크로소스가 도입되기 시작하고 있다. 이러한 분산형 전원의 보급을 위해서는 기존의 대규모 발전설비와는 달리 소형이면서 높은 열효율을 가지고 있고, 환경 친화적인 발전원의 도입이 고려되어야 하는데, 기존의 대형 발전설비인 수력, 화력, 원자력 발전은 이러한 소규모 친환경적인 시스템으로는 적합하지 않으며, 현재 가장 환경 친화적 분산발전을 위한 시스템으로 마이크로 터빈(MT: Microturbine)을 이용한 열병합 발전, 연료전지 발전 등이 선진국을 중심으로 활발히 연구되고 있고, 가까운 장래에 본격적인 보급이 진행될 것으로 예상된다. 분산발전 시스템 중 마이크로 터빈을 이용한 발전시스템의 경우, 1) 디젤엔진 등 기타 발전원에 비해 공해배출 특성이 우수하고(특히 NOx 발생량이 매우 적음), 2) LNG 등의 청정연료를 사용하여 환경문제에 적극 대응할 수 있으며, 3) 열병합 발전시스템을 운용할 경우 높은 열효율을 실현할 수 있어서 디젤엔진 등 기타 동력원에 비해 에너지 사용 측면에서 매우 유리하며, 4) 단위면적당 출력이 우수하여 입지 선정 등의 문제에 유리하여, 전력수급 문제에 유연하게 대처할 수 있는 장점이 있어 분산형 발전 시스템의 유력한 후보로 전망되고 있다[1].

MT란 소형 가스터빈엔진으로 발전기를 장착하여 연소 연료에 의해 전력생산 및 배열을 이용하여 열을 생산하

는 열병합시스템까지 활용할 수 있는 분산에너지시스템으로 최근에 개발되었지만 건물 및 구역 열병합시스템으로 크게 주목을 받고 있다[2]. MT는 기계적구조로 볼때 기어를 통하여 가스터빈에 연결되는 스플릿 샤프트(split shaft) 구조와 샤프트에 직접 연결되는 싱글샤프트(single shaft) 구조로 나누어진다. 최근 가스터빈에서 마이크로터빈으로의 기술진전은 빌딩소형열병합 시스템 뿐 만아니라 자동차, 이동용비상전원 등으로 사용범위가 확대되고 있으며 이는 싱글샤프트 방식에 사용하는 전력전자기술의 발달로 제어성능을 크게 향상시킬 수 있고, 신뢰성 있는 시스템 구성이 가능해졌다[3]. 또한 분산전원으로서의 MT는 높은 에너지 효율과 환경 친화적 측면에서 실제적인 솔루션이 되고 있으며 피크셰이빙, 열병합, 벽지 및 원격전력원 그리고 마이크로그리드 전원으로 광범위하게 활용되고 있다[3]. 이 때문에 MT 속도는 30000에서 120,000[rpm]달하는 초고속운전을 하게된다. 기계적구조의 단순화로 고속발전기 적용이 필수적이며 이 발전기에서 고주파 교류전력이 직접 출력되어 이를 상용전원주파수로 변환하기 위한 전력변환장치가 사용된다[4,5]. 이 전력변환장치는 고주파 교류를 직류로 바꾸어 다시 인버터를 통하여 계통연계되는 형태를 취하며 다양한 전력변환토폴로지를 적용할 수 있다. 현재국내의 MT 기술은 전무한 실정이며 마이크로 터빈의 출력규모는 일반적으로 수십 kW에서 수백 kW에 이르며, 이 정도의 출력 규모에서 기술적 경쟁력을 확보하기 위해서는 열효율 상승과 관련된 터빈입구 온도를 높이기 위한 내열재 부품개발기술, 열효율 향상

을 위한 레큐퍼레이터(recuperator) 개발기술, 환경 친화성을 높이기 위한 저공해 연소기술, 고속 발전기 설계/제작 기술, 그리고 비운할 구동을 위한 공기 베어링 기술 등 필요로 한다. 특히 공기 베어링의 구현이 간과할 수 없는 기술적인 문제는 고속회전으로 인해 점성유체에서 발생하는 발열과 고속발전기에서의 발열을 적절한 냉각 시스템을 구성하여 해소시켜 주어야 한다는 것이다. MT의 매력적인 기술은 크게 세 가지로 나누어볼 수 있다.

(1) 분당 약 10만회전하는 2~4극 영구자석발전기에서 발생하는 고주파의 교류전력을 정류기를 통해 일단 직류로 변환하고 인버터를 통해 최종적으로 50~60Hz의 교류를 발생시키기 때문에 발전기를 주파수에 맞춘 특정회전수를 실현하기 위한 감속기가 불필요하여 설비가 매우 간단해지고 소형화 할 수 있다.

(2) 단일축으로 된 압축기와 터빈사이에 공기베어링이 채용되어 Rotor 자체회전으로 공기막이 형성, 浮上되어 96,000RPM의 초고속 회전한다. 따라서 기존의 Oil Lubrication 계통이 생략되기 때문에 설비가 간단해지고 주기적인 정비 불필요하며 운전의 신뢰성도 함께 높아지는 것이다.

(3) 재생사이클을 채택하여 터빈 배기가스와 연소기에 들어가기전 압축공기를 열교환시켜 기존의 100kW급 소형 가스터빈의 열효율 15%(저위발열량 기준)를 획기적으로 증가시켜 약 30%에 육박하는 고효율 가스터빈 발전이 가능하다.

MT 개발을 선도하고 있는 업체는 미국의 Capstone Turbine사로서 1998년도 후반에 30kW 급의 제품의 상용화를 시작으로 후속으로 나온 60kW 급 제품을 합쳐서 2003년 10월 기준으로 약 3,000기 이상의 제품을 전 세계에 판매할 정도로 기술수준과 영업적인 측면 모두에서 가장 앞서 나가고 있는 실정이다. Capstone Turbine사 이외에도 Honeywell, Elliott Energy System, Ingersoll-Rand, Turbec(ABB) 등의 회사들이 속속 MT를 상용화시키고 있으며 이는 향후 급속히 성장할 분산발전 시장에서 큰 부분을 차지할 것으로 예측된다. 기존의 논문들에는 인버터제어에만 초점을 맞추어 에너지 전원을 이상적인 직류전원으로 가정하거나 충분한 DC링크 용량을 가정하여 에너지 전원의 발전특성을 무시하였다. 따라서 본 연구는 마이크로그리드와 빌딩의 열병합시스템에 중요한 MT발전시스템의 Matlab/Simulink 동적 상세모델 개발하고 이 모델을 기반으로 독립운전에 제일 중요한 전압과 주파수를 효과적으로 제어할 수 있도록 V-f 제어기를 사용하여 모의를 수행하였다. 특히 독립운전시 부하변동에 따라 자율적으로 부하 단자전압과 주파수를 효과적으로 제어할 수 있음을 모의를 통하여 입증하였다.

2. 마이크로터빈 발전시스템 모델링

MT는 스플릿 샤프트(split shaft) 구조와 샤프트에 직접 연결되는 싱글샤프트(single shaft) 구조로 나뉘어진다. 현재 MT로의 적용 및 활용성이 뛰어난 것으로 싱글샤프트 MT로 발전기로 영구자석형동기발전기를 사용하며 이 발전기는 1,500~4,000[Hz]의 교류전력을 발생하기 때문에 이 고주파전압은 정류기로 DC로 정류되어 다시 VSC(Voltage source Converter)를 통하여 60Hz AC

로 변환되어 진다. 변환된 교류전압은 고조파를 제거하기 위하여 LC필터를 사용한다. MT시스템의 제어블럭은 속도, 가속도, 연료 및 온도제어 블럭으로 크게 나누어지며 MT의 범주는 일반적으로 30kW에서 500kW 용량 범위로 보고 있다. 그림 1은 싱글샤프트 MT시스템을 나타낸것이다[6].

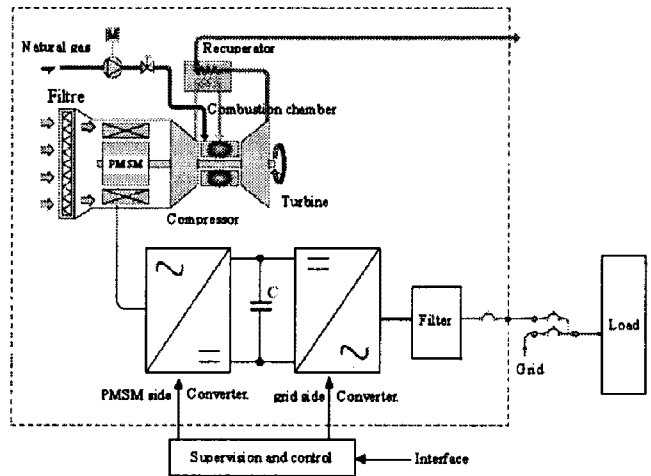


Fig.1 Microturbine Generation System

2.1 Microturbine

제어시스템을 포함한 싱글샤프트 MT를 Matlab의 Simulink로 구현하였으며 이를 그림 2에 나타내었다. 이 모델은 온도제어, 속도가버너, 연료제어, 터빈다이나믹스 및 가속도제어블럭으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 MTG의 느린동적(slow dynamics)상태를 모델링하는데 초점을 두었으며 정상적인 운전조건을 가정하였다. 속도제어는 기준속도와 회전자 속도의 차이에 따라 동작하며 이 제어기는 lead-lag전달함수나 PID제어기에 의하여 일반적으로 모델링된다. 본 연구에서 lead-lag전달함수를 사용하였으며 그림 2에 나타내었다. 조속기파라메타인 X, Y, Z와 이득 K는 드롭(droop)형태와 isochronous형태를 모델링할 수 있도록 하였다. 가속도 제어는 정상속도에 도달기전 MT의 기동시에 가속도비율을 제한하기 위하여 사용되며 시스템의 정상속도범위 내에 도달하면 이 가속도제어는 모델링에서 제외하도록 하였다. 조속기의 출력은 연료수요(fuel demand)신호인 Vce를 도출하기 위하여 작은 값을 선택하도록 하였다. Vce 선택에 필요한 다른 신호는 온도제어기로부터도 나오게 된다. Vce가 단위(per unit)로 선택되면 MT의 기계적출력도 정격출력을 발생된다. Vce의 함수로서 연료 제어신호는 밸브위치와 연료흐름 다이나믹스에 입력되게 된다. Vce의 값은 이득이 0.77값을 가지며 무부하에 연료를 공급하기 위하여 0.23의 오프셋(offset)값을 설정하게 된다. 연소기에서 연소된 연료는 MT토크와 온도 센서로 계측되는 배기가스를 발생시킨다. 기준온도와 비교되어 온도제어시그널을 만들어내며 기준온도보다 높은 경우에는 온도제어기가 동작되도록 하였다. 부분부하 상태가 제어의 기본 수단이 된다. 모델파라메타는 [7]을 참조하였다.

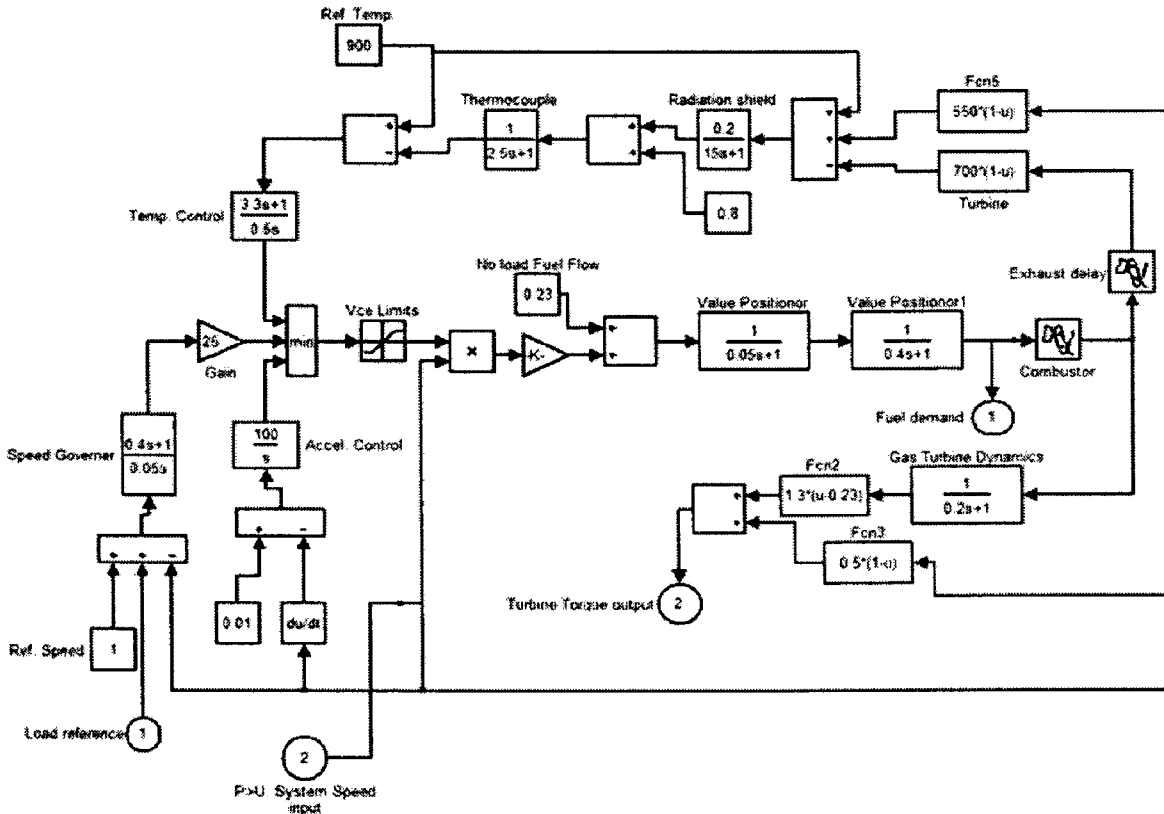


Fig. 2 Simulink implementation of microturbine generation system

2.2 영구자석동기발전기

발전기모델은 2극 비돌극형 영구자석동기발전기(permanent magnet synchronous machine : PMSM)를 사용하였다[8]. 96,000 rpm(1600Hz)기기출력은 30kW, 출력전압은 480V이다. 전기와 기계적 각각의 부분은 2차 상태스페이스모델로 표시하였다. 여기서 영구자석에 의하여 생성되는 고정자 자속은 정현파로 기전력도 정현파로 가정한다. 영구자석동기발전기는 회전자계형(dq frame)으로 역시 나타내었다. 전기방정식과 운동(swing)방정식은 아래와 같다.

전기방정식 :

$$\frac{d}{dt} i_d = \frac{1}{L_d} v_d - \frac{R}{L_d} i_d + \frac{L_q}{L_d} p w_r i_q$$

$$\frac{d}{dt} i_q = \frac{1}{L_q} v_q - \frac{R}{L_q} i_q - \frac{L_d}{L_q} p w_r i_d - \frac{\lambda p w_r}{L_q}$$

$$T_e = 1.5p(\lambda i_q + (L_d - L_q) i_d i_q)$$

운동방정식 :

$$\frac{d}{dt} w_r = \frac{1}{J} (T_e - F w_r - T_M)$$

$$\frac{d\theta}{dt} = w_r$$

여기서,

- L_q, L_d : q와 d축 인덕턴스
- R : 고정자 저항
- i_q, i_d : q와 d축 전류

v_q, v_d : q와 d축 전압

w_r : 회전자 각속도

λ : 영구자석에 의하여 고정자에 유기되는자속

P : 극수의 1/2

T_e : 전기적 토오크

J : 부하와 회전자의 관성

F : 부하와 회전자의 마찰

θ : 회전자 각 위치

T_M : 축 토오크

2.3 파워컨디셔닝시스템 (power conditioning system)

싱글샤프트 MT는 전력변환기시스템을 디지털제어기를 통하여 고주파 전력을 60 Hz 사용가능한 전기로 변환시키는 것을 특징으로 하고 있다. 전력변환시스템은 여러방식이 적용[2]되고 있으며 본 연구에서는 고주파 AC전력은 정류기를 통하여 DC로 변환되며 다시 인버터를 통하여 60Hz AC로 변환되는 DC 링크 파워 컨버터 방식을 대상으로 하였다. 파워컨디셔닝시스템은 싱글 샤프트 MT설계에서 매우 중요한 실비로 단독운전 시 부하의 단자전압 및 주파수를 정격범위내에서 제어하도록 하는 핵심요소이다. 이 유닛은 3상정류기, 전압원 인버터 및 LC 필터로 구성되어 있다. 그림 3은 독립운전시의 전압제어불력을 나타낸 것이다.

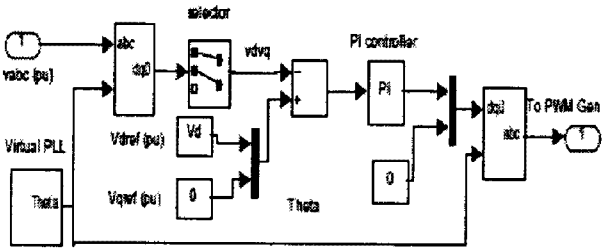


Fig. 3 Voltage-frequency control block

IGBT 인버터는 2kHz의 캐리어 주파수와 2 μ sec 샘플링시간을 가진 PWM인버터를 사용하였다. 부하전압은 PI 제어기에 의하여 480V rms로 조정되어진다. 전압조정기의 출력은 게이트펄스를 발생시키기 위하여 PWM 발생기에 의하여 사용되는 세 조정신호를 가진 백터이다. LC필터는 2 kHz 배수를 가진 인버터에 의하여 발생하는 고조파를 필터링 한다.

3. 독립운전시의 Simulation Results

처음에는 무부하로 운전한다. 시간 $t = 10$ 초에서 부하 15kW를 MTG시스템에 인가하고, $t = 20$ 초에 부하를 다시 24kW로 올려서 인가한다. 그림 5는 부하를 MTG에 인가한 경우에 MT에서 소모되는 연료를 나타낸다.

연료 요구량은 부하가 10초에서 인가할 때 까지 23%의 값을 나타내며 이는 무부하운전 정격운전을 위한 최소 연료량이다. 연료요구신호는 15kW에서 0.6P.U이고 24kW에서는 0.8 p.u로 증가함을 알 수 있다. 그림 6은 MT의하여 발생되는 PMSG를 구동하기 위한 기계적 토오크를 나타낸다. 비교적 안정하게 부하에 잘응동하는 것을 나타내고 있다.

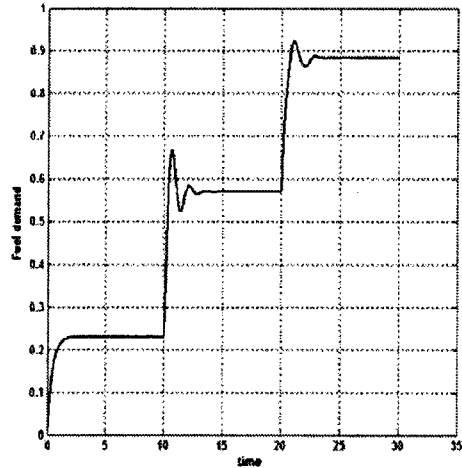


Fig. 5 Fuel demand signal of the microturbine

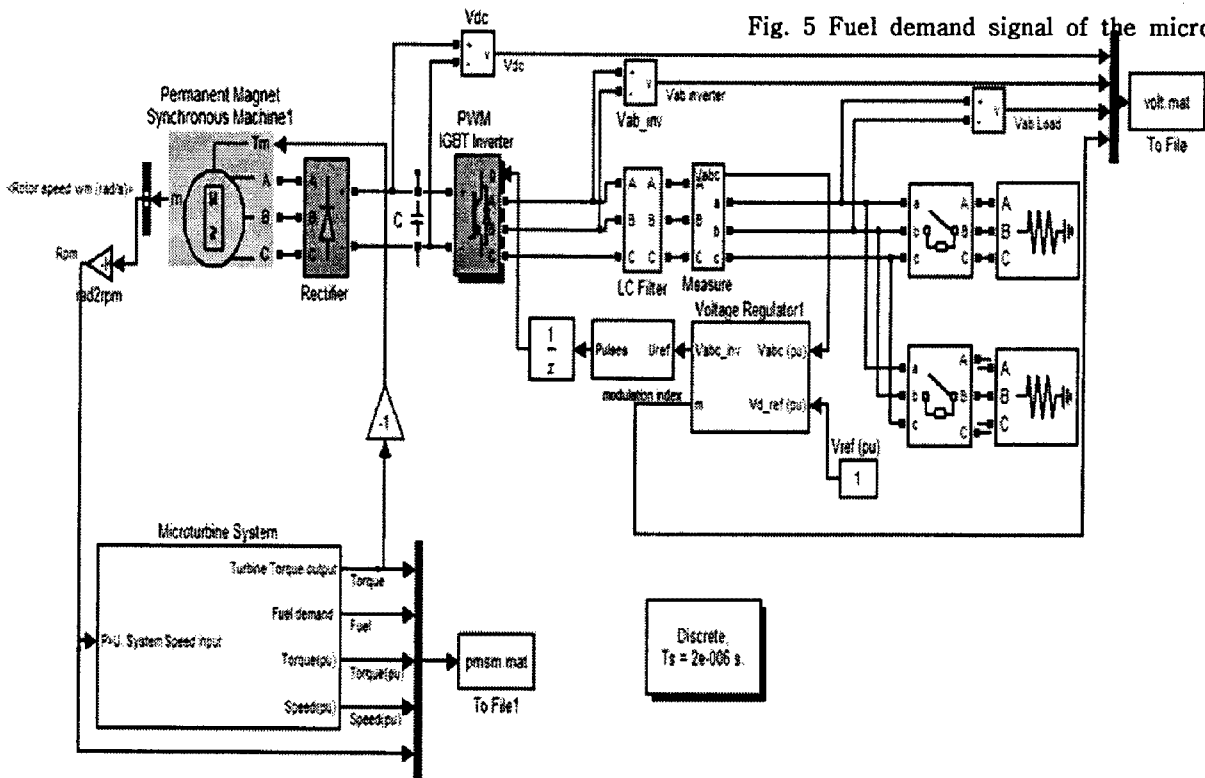


Fig. 4 MT generator system implemented in SimPowerSystem

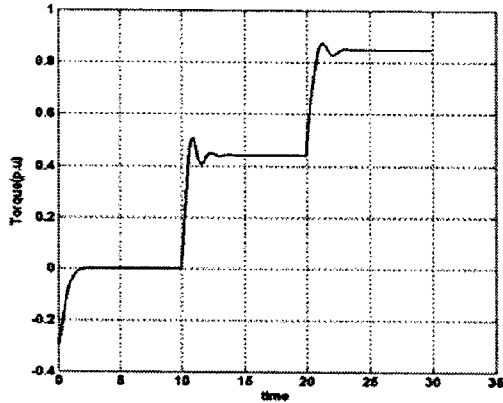


Fig. 5 Variation of shaft torque

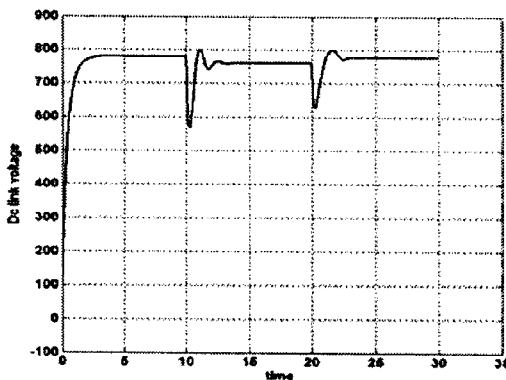


Fig. 6 DC link Voltage

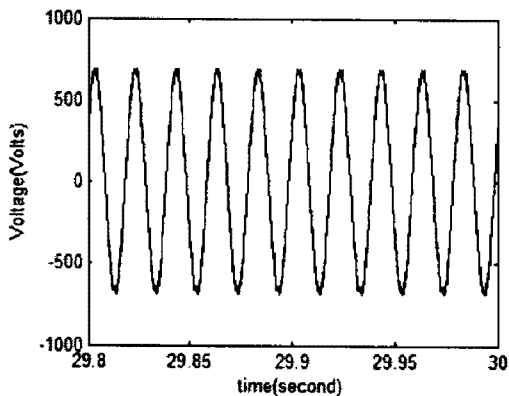


Fig. 7 Voltage at the load terminals

4. 결론 및 토의

빌딩단위의 열병합시스템 및 신재생에너지가 현재 기후 변화의 문제 해결 및 녹색성장의 새로운 패러다임의 한 가 운데 있다. 그리고 빌딩의 에너지시스템도 일방적인 공급 수혜자에서 프로슈머의 역할을 요구하고 있다. 그러나 다 양한 마이크로소오스의 도입하여 운전하는 것은 제어 및 운영기술적인 측면에서 해결해야할 문제를 안고 있다. 본 연구에는 Matlab/Simulink 기반 마이크로터빈 동적 상세 모델개발하고 시뮬레이션을 통하여 그 타당성을 제시하였 다. 이 모델은 앞으로 분산전원의 하이브리드 시스템도입

에 유효한 자료로 활용될 것으로 판단된다. 앞으로 개발된 상세모델을 바탕으로 소규모 마이크로그리드 해석에 활용 하고 이 시스템 도입의 신뢰성 향상분석이 이용하고자한 다.

Appendix

Speed governor parameters :

Gain= 25, X=0.4, Y= 0.05, Z=0

Combustor delay = 0.01, Turbine and exhaust delay = 0.04.

Parameters of PMSG used for simulation are :

$R=0.25[\Omega]$, number of poles $p=2$,

$L_d = L_q = 6.875 \times 10^{-4}$ Henry, $\lambda = 0.0534$ wb,

Load parameters : 50kW, 480 V, 50Hz

Acknowledgment

The authors would like to gratefully acknowledge the financial support of KESRI (Korea Electrical Engineering & Science Research Institute) under project R-2007-1-015-02

참 고 문 헌

- [1] 임상규, "분산형 Micro Gas Turbine 계통연계 발전기술 개발, 한전전력연구원 보고서, 2006.
- [2] W. Kramer, 'Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems Part 1: Systems and Topologies, NREL Technical report NREL/TP-581-42672, March 2008.
- [3] 노민식, "고속발전기를 장착한 마이크로터빈 전력변환시스템에 관한 연구", 창원대학교 공학박사논문, 2003. 2.
- [4] S. R. Guda, "A Simulink-Based Microturbine Model for Distributed Generation Studies", 0-7803-9255-8/05 2005.
- [5] O. Fethi, "Modeling and Simulation of the Electric Part of a Grid Connected Micro Turbine", HANBAT UNIVERSITY. Downloaded on February 2, 2009 at 23:32 from IEEE Xplore.
- [6] O. Fethi, "Modeling and Simulation of the Electric Part of a Grid Connected Micro Turbine", HANBAT UNIVERSITY. Downloaded on February 2, 2009 at 23:32 from IEEE Xplore.
- [7] N. Hannet, " Combustion Turbine Dynamic Model Validation from Tests", IEEE Transactions on Power Systems, Vol. 8, No. 1, February 1993
- [8] C.M Ong, "Dynamic Simulation of electric machinery using Matlab/Simulink", Prentice-Hall, 1988.
- [9] Lasseter Robert, "Dynamic Models For Micro-Turbines And FuelCells," *Proceedings ,IEEE PES Summer Meeting*, vol. 2, pp. 761-766, Jul. 2001, Vancouver, Canada
- [10] MATLAB/Simulink Documentation Available: <http://www.mathworks.com>
- [11] Capstone Turbine Corporation, "Electrical performance specification" software version X.XX, revised December 21, 2001.