

마이크로터빈발전시스템 계통연계운전을 위한 동적 모델링 및 시뮬레이션

(Dynamic model and simulation of microturbine generation system for grid-connected operation)

홍원표*, 조재훈(*한밭대학교, 충북대학교)

(Won-Pyo Hong, Jea-Hoon Cho)

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 grid-connected 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 grid-connected operation mode of a DG system. The control strategies for grid connected operation mode of DG system is also presented.

1. 서 론

마이크로그리드(Microgrid)는 소규모분산에너지원(Microsource or Distributed Energy Resource : DER)들이 수요지에서 하나의 작은 그리드를 형성하여 전력 및 잉여 열 에너지를 생산하여 수요자에게 직접 공급하는 새로운 개념의 소규모 전력시스템으로서 유틸리티 그리드(grid-connected)에 연계 혹은 분리되어 독립운전(islanding operation)이 가능한 시스템이다[1-3].

마이크로그리드를 구성하는 전력원은 기존의 교류발전기 이외에도 태양광, 연료전지, 가스터빈, 마이크로터빈(microturbine : MT), 마يو메스시스템 및 풍력 등이 있으며 이들은 지역을 중심으로 하는 지역냉난방 열병합시스템과 빌딩과 빌딩군을 중심으로 에너지를 공급하는 빌딩 마이크로그리드로 구분되어 새로운 에너지공급 시스템이 구축 되어가고 있다[4]. 그러나 이들의 출력은 DC 또는 고주파교류로 계통연계를 위하여 파워컨디셔닝(power conditioning system : PCS)적용이 불가피하고 전력소자의 빠른 응답특성과 제어방식의 다양성과 함께 기계적관성이 거의 없어 빠른 출력변화를 나타내게 된다. 이를 위하여 여러 마이크로소스의 선정 및 전 기저장장치와 통합하여 제어전략과 운영방식을 결정하는 것이 매우 중요하며 이에 대한 연구는 시작단계에 있다. 마이크로그리드를 구성하는 마이크로소스는 무효전력과 유효전력이 독립적으로 제어가 가능하며 전압제어 등 전력품질 등을 유지할 수 있는 전압형인버터(Voltage source converter : VSC)를 채용하여 마이크로그리드 운전이 광범위하게 이루어 질 것으로 예상된다. 마이크로그리드는 전자적인 인터페이스

(electronically interface)를 가진 분산전원(EI-DG)이라 볼 수 있다. PCS 는 마이크로소스를 계통에 연계시키는 장치로 유효전력과 무효전력의 흐름을 신속하게 제어하게 된다. 또한 각 마이크로소스의 응답속도는 수초-수십초 정도로 느린 응답특성을 가지고 있어 부하변동에 따른 응답특성을 개선하고 계통외란을 일시적으로 보상하기 위하여 에너지 저장 장치의 채용이 보편적으로 권장된다.

평상시에는 전력계통과 연계되어 운전하며 전력계통사고가 발생하였을 때는 계통 스위치를 열고 단독(islanding operation)으로 운전하여 자율적제어를 수행하여 부하가 정전이나 전기품질의 문제가 발생되지 않도록 하여야한다[5,6].

마이크로그리드의 환경친화적 분산전원시스템으로 마이크로터빈발전시스템(Microturbine generation system : MTG)이 크게 주목을 받게 되었다. 최근에 기술개발이 이루어져 광범위한 적용이 이루어지고 있으며 특히 열을 필요로 하는 빌딩단위의 열병합시스템으로 본격적인 보급이 이루어질 것으로 판단된다. 분산전원 시스템 중 MT를 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[7]. 기존의 논문들은 인버터제어 만에 초점을 맞추어 에너지전원을 이상적인 전류원으로 가정하거나 충분한 DC 링크 용량을 가정하여 에너지 전원 발전 특성을 무시하였다.

따라서 본 연구에서는 MT의 제어시스템 및 동특성해석모델링에 대하여 기술하였으며 Matlab/Simulink를 이용한 MTG 시스템 시뮬레이션 모델을 개발하고 시뮬레이션을 통하여 동특성을 해석하였다. 개발된 시뮬레이션모델은 마이크로시스템 계통연계에 따른 다양한 현상해석에 활용할 수 있도록 하였다. 그림 1은 MTG와 제어시스템을 나타낸 것이다. 이 블럭에서 독립운전은 V-f 제어 스킴으로 계통연계운전모드에서는 P-Q제어 스킴을 사용한다.

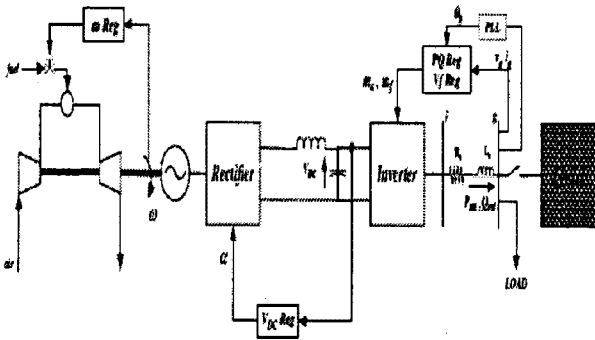


Fig. 1 MTG and control system schemes

2. DER의 PCS 인터페이스 구조

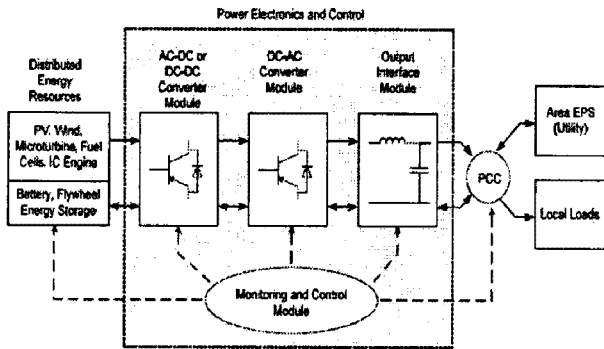


Fig. 2 Diagram of DE power electronics interface

그림 2는 DE시스템과 연계된 전력전자(power electronics: PE)인터페이스 기반의 통합 블럭 다이어그램이다. PE인터페이스는 DE시스템에서 전력을 받아서 요구되는 전압과 주파수를 가진 교류 전력으로 변환시킨다. 저장시스템은 계통과 에너지시스템과의 양방향 전력흐름이 가능하도록 하는 제어스킴을 설계해야한다. PE인터페이스모듈은 그림 2에서와 같이 크게 4종류의 모듈로 구성되어 있다. 즉, DE입력컨버터, 인버터모듈, 출력인터페이스 모듈 및 제어모듈이다. 파란 단방향 표시는 DE소오스의 에너지 흐름을 표시한 것이고 빨간 화살표는 DE저장장치 양방향에너지 흐름을 표시한 것이다. AC출력을 발생시키는 DE시스템인 풍력터빈, 마이크로터빈(microturbine : MT), IC엔진, 프라이휠 저장장치는 AC-DC 컨버터를 필요로 한다. DC출력을 발생시키는 연료전지, PV, 배터리시스템은 DC-DC컨버터를 필요로 하며 DC전

압을 제어할 수 있게 된다. DC-AC컨버터는 모듈에서 가장 중요하며 DC소오스를 계통과 연계된 AC전력을 발생시킬 수 있는 능력을 가져야한다. 출력인터페이스모듈인 필터와 제어모듈은 DE의 보호 및 계통과의 연계점(point-of-common-coupling :PCC)에서의 인터페이스로 동작하게 된다. 이 제어모듈은 DE시스템의 보호 및 계통으로부터의 분리 및 연계운전을 지령을 포함한다.

3. 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 AC로 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 3은 싱글샤프트 MTG시스템을 나타낸 것이다[8].

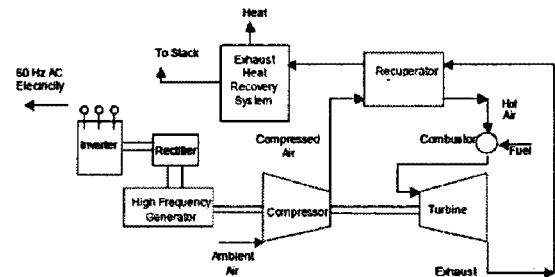


Fig.3 Microturbine Generation System

3.1 Microturbine

제어시스템을 포함한 싱글샤프트 MT를 Matlab의 Simulink로 구현하였으며 [9] 상세히 나타내었다. 이 모델은 온도제어, 속도가버너, 연료제어, 터빈동특성 및 가속도제어블럭으로 구성되어 있다. 본 연구에서는 MTG의 느린동특성(slow dynamics)을 모델링하는 데 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 4에 포함되어 있다. 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 다이내믹스에 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.

2.2 영구자석동기발전기

발전기모델은 2극 비돌극형 영구자석동기발전기(permanent magnet synchronous machine :PMSM)를 사용하였다[8]. 96,000rpm(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. 전기방전식과 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 유기되는 자속
- P : 극수의 1/2
- T_e : 전기적 토크
- J : 부하와 회전자의 관성
- F : 부하와 회전자의 마찰
- θ : 회전자 각 위치
- T_M : 축 토크

2.3 PCS(power conditioning system)

싱글사프트 MT는 전력변환시스템을 디지털제어를 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 컨버터를 대상으로 하였다. PCS는 싱글사프트 MT설계에서 매우 중요한 설비로 계통측의 컨버터제어는 계통연계모드와 단독운전모드를 선택할 수 있다. 우선 PCS의 토폴로지는 컨버터와 계통사이에 양방향 전력조류가 흐를 수 있도록 back-to-back VSC를 사용하였으며 이 장치는 별도의 터빈기동장치를 필요 없도록 한다. 즉, 기동시 그리드에서 전력을 공급받아 계통측 컨버터는 정류기역할을 하고 기기측 정류기는 인버터역할을 하여 어느 일정속도까지 전력을 공급받아 PMSM은 모타로 작용하게 된다. 터빈이 일정속도를 초과하면 PMSM은 발전모드로 전환하여 컨버터의 역할이 정상적으로 변경되어 계통측 컨버터는 인버터로 동작하여 계통에 전력을 공급하게 된다. 두 운전모드에서 계통측 컨버터는 DC링크전압을 조정하며 반면 기기측 컨버터는 PMSM의 속도를 제어하게 된다. 이 제어 구조는 두 개의 컨버터를 효과적으로 분리 제어할 수 있도록 할 수 있다. 단독운전 시 부하의 단자전압 및 주파수를 정격범위내에서 제어하도록 하는 핵심요소이다[9]. 또한 계통연계 운전시에는 다양한 P-Q제어이 유닛은 3상정류기, 전압원인버터 및 LC 필터로 구성되어 있다.

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 벡터이다. LC필터는 2 kHz 배수를 가진 인버터에 의하여 발생하는 고조파를 필터링 한다.

(1) 기기측 컨버터제어

그림 4는 MTG를 위한 고효율 운전제어시스템을 보여준다. 지령로타스피드는 타빈 출력에 따라 미리 계산한 것이다. i_{qref} 는 기준속도와 차이를 입력으로하여 스피드제어기에 의하여 결정된다.

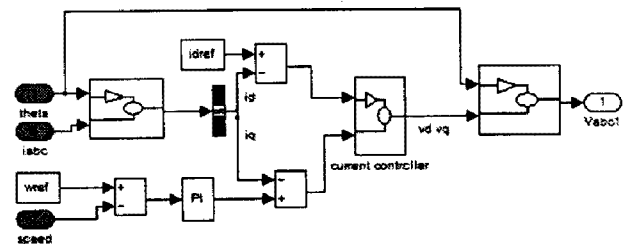


Fig. 4 Machine side converter control.

(2) 계통측 컨버터 제어

MTG시스템의 계통측 컨버터는 계통연계제어 및 독립 제어모드를 선택할 수 있도록 구성하였다. 우선 계통연

계모드의 제어구조는 그림 5에 나타내었다. 이 제어기는 두 개의 루프로 구성되었으며 그 하나는 내부루프로서 그리드전류를 제어하기 위하여 dq회전자좌표상에서 이용한다. 외부루프는 DC링크부스전압 V_{dc} 를 제어하도록 구성된다. 여기서 사용한 PLL은 컨버터를 계통과 연계시키기 위하여 사용한다. 유효전력제어만을 제어하기 위하여 i_q 기준 전류를 '0'로 설정하여 제어하였다.

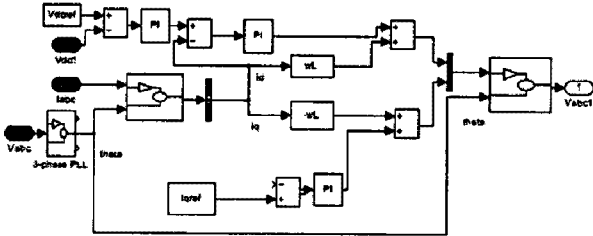


Fig. 5 Line side converter control for grid connected mode

독립운전모드를 모의하기 위하여 그림 6과 같이 모델링하였다. 이 제어기는 출력전압제어모드와 dc링크제어모드로 구성하였다. 출력전압제어기는 부하전류와 부하의 과도상태로부터 그 영향을 최소화하도록 제어한다. 표준 PI제어기는 v_q 를 영으로 설정하여 제어하였다. 주파수제어는 가상 PLL을 가상 PLL을 이용하였으며 이것은 SimPowerSystem에서 제공하는 것을 활용했다.

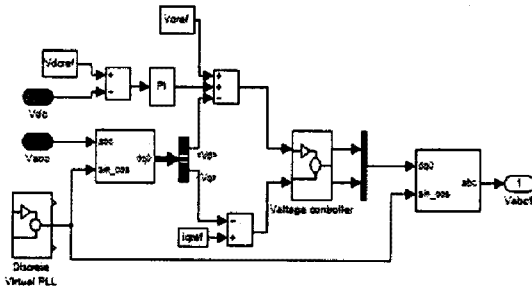


Fig. 6 Line side converter control for islanding mode

4. 모의 결과 (Simulation Results)

본 연구에 사용된 MTG시스템의 계통연계와 독립운전모드를 위한 전체모델은 그림 6과 같다. 표 1은 모의에 사용된 중요 파라메타이다.

기동시는 PMSM은 모타모드로 운전하여 터빈을 30000 rpm으로 속도를 높인다. 그림 7은 0.35초에 터빈이 설정속도에 도달한 것을 보여주고 있다. 0.35초 이후에 발전기모드로 동작하여 55,854rpm에 도달하여 정상적인 발전기로 동작되는 것을 알 수 있다. 그림 8은 발전기모드로 운전된 경우 선 전류를 나타낸 것이다. 이때 그리드에 보내는 전력은 14kW이다. 이때 발전기의 선간전압은 330V이고 주파수는 931Hz이다. 그림 9는 그리드에 공급하는 무효전력을 성분을 나타낸 것으로 i_q 전류는 거의 영인 것을 알 수 있다. 부하의 단자

전압은 그림 10에 표시하였다. 비교적 일정하게 유지되는 것을 알 수 있고 제어기의 모델링이 적절하게 설계된 것을 확인할 수 있다. 그림 11는 DC버스 760V의 전압으로 부하가 운전하는 경우에도 일정하게 유지되는 것을 확인하였다. 계통운전중에 1초 후에 계통의 차단기를 개방하는 독립운전모드로의 운전시 발전기시스템의 운동특성을 모의하였다. 그림 12에서 보는 바와 같이 부하의 선전류도 매우 안정하게 유지되는 것을 알 수 있다.

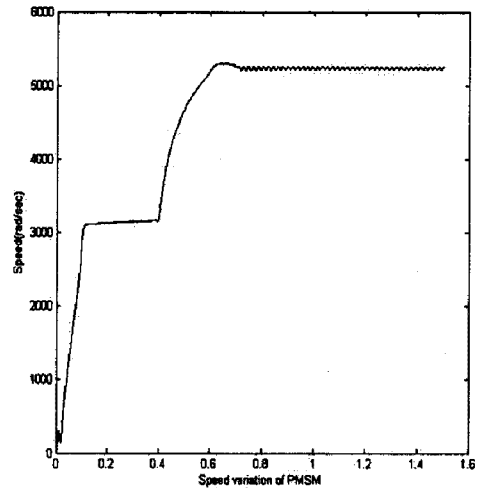


Fig. 7 Speed variation of PMSM

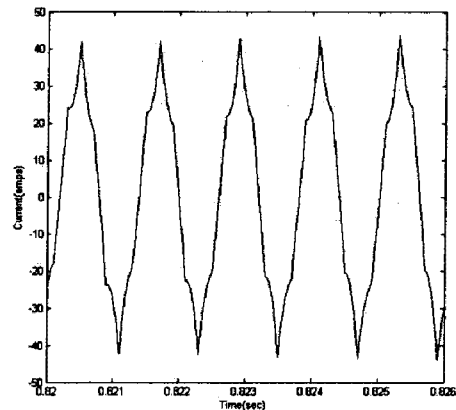


Fig. 8 Line current of PMSM in generating mode at 14kW

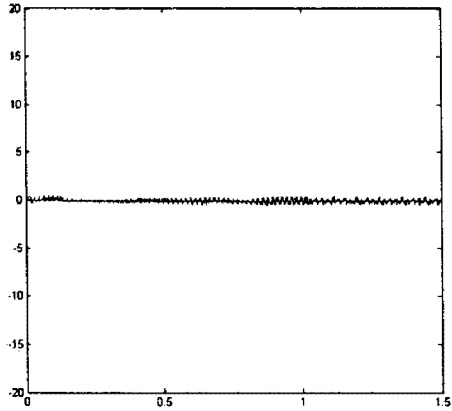


Fig. 9 Current i_q injected the grid

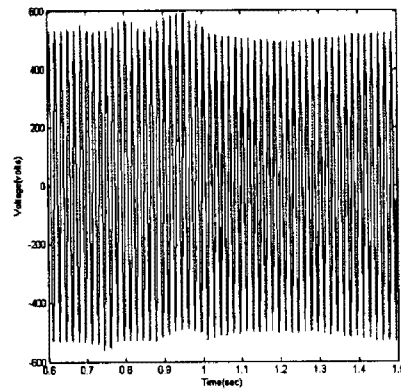


Fig. 10 Voltage across the load terminal

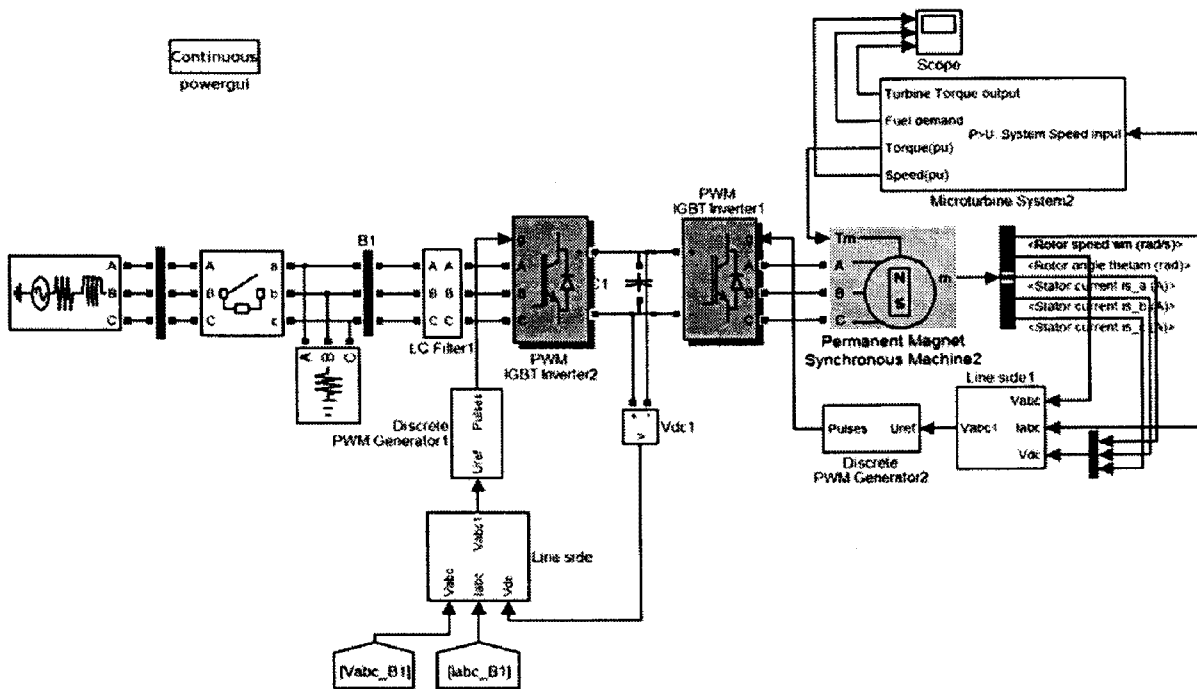


Fig. 6 MT generator system implemented in SimPowerSystem

Table 1 Grid connected microturbine simulation parameters

Permanent magnet synchronous machine(PMSM)	480 V, $I = 36A$, $f = 1600Hz$
Number of poles	$P = 2$
Direct and quadrature inductances	$L_d = L_q = 6.875 \times 10^{-4}$
Stator resistance	$R_s = 0.25 \Omega$
Flux induced by the permanent magnet	$\Phi_m = 0.0534 \text{wb}$
DC bus capacitor	$C = 5000 \mu F$
PI controller sampling period	$100 \mu s$
Speed governor parameters	Gain(K) = 25, $X = 0.4$, $Y = 0.05$, $Z = 1$
Load parameters	25kW, 480V, 60Hz

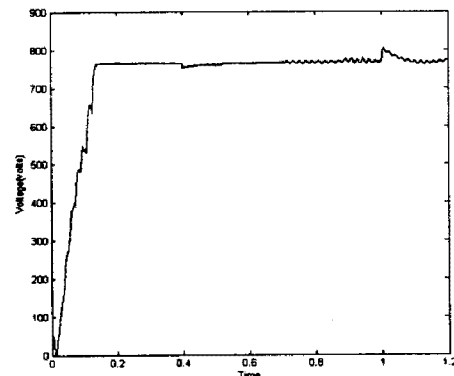


Fig. 11 DC bus voltage

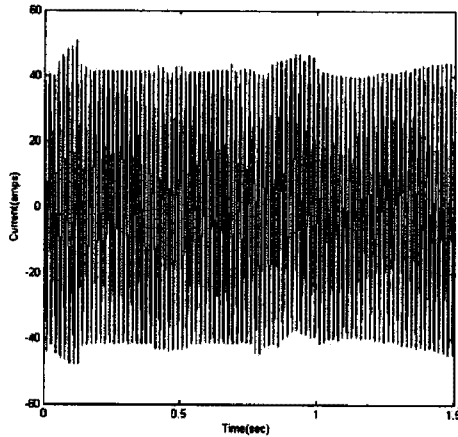


Fig. 12 Line current variation of the load

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] N. Hatziargyriu, "Microgrids", IEEE Power & energy magazine, pp78-94, Jul/Aug. 2007..
- [2] R.H. Lasseter, "Control and Design of Microgrid Components, " PSERC Final report, Jan. 2007.
- [3] F. Katiraei, "Power Management Strategies for a Microgrid with Multiple Distributed Generation Units", IEEE transaction on power system, Vol., 21, No. 4, Nov., 2006.
- [4] 홍원표, "Multi-agent system 기반 소형분산전원운영기초연구", 지식경제부(기초전력연구원) 보고서(1), 2007. 6.
- [5] F. Katiraei, "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process", IEEE Tran. on Power delivery, Vol.,20, No. 1, pp. 248-257, Jan. 2005.
- [6] 정일엽, "다중 분산전원으로 구성된 마이크로그리드의 유효전력 제어원리 연구", KIEE Journal, Vol. 57, No. 4, pp. 582-588, April 2008.
- [7] 임상규, "분산형 Micro Gas Turbine 계통연계 발전기술 개발, 한전전력연구원 보고서, 2006.
- [8] O. Feth, "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.
- [9] W. Kramer, S. Chakraborty, B. Kroposki, and H. Thomas, "Advanced Power Electronic Interfaces for Distributed Energy Systems (Part 1: Systems and Topologies)," *Technical Report* NREL/TP-581-42672, March 2008.
- [10] 홍원표, "마이크로터빈발전시스템 독립운전을 위한 동적 모델링 및 시뮬레이션," 2009 춘계 조명전기설비학회논문집, 5월 2009.

4. 결 론

빌딩마이크로그리드에서 매우 중요한 역할을 하고 있는 마이크로터빈 상세 동적모델을 개발하고 모의를 통하여 다양한 부하에서 계통운전모드와 독립운전모드의 특성을 모의 통하여 분석하였다. 연구결과를 요약하면 아래와 같다.

- (1) Matlab/Simulink 기반 마이크로터빈 동적 상세 모델을 개발하였다.
- (2) 이를 제어하기 위한 제어기 모델을 독립운전모드와 계통연계모드로 나누어 개발하였다.
- (3) 계통연계운전모드시 P-Q제어모드를 기반으로 전류제어기를 모델링하여 사용하였다.

앞으로 다양한 전원의 독립운전 및 계통연계운전을 위한 전력변환기의 제어모델에 활용이 가능함에 따라 다양한 마이크로소오스로 구성된 하이브리드 GE시스템의 운전 및 보호시스템에 대하여 연구할 예정이다.

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 usrd for simulation are :

R=0.25[Ω], number of poles p=2,

$L_d = L_q = 6.875 \times 10^{-04}$ Henry, $\lambda = 0.0534$ wb,

load parameters : 50kW, 480 V, 50Hz

power condition system :

Acknowledgment