

# 마이크로터빈과 연료전지의 EMTP-RV 모델링을 통한 마이크로그리드 내 동특성 분석

(Dynamic analysis of Microturbine and FuelCell in MicroGrid using EMTP-RV)

서규석\* · 주재현

(Gyu-Seok Seo · Jae-Hyun Ju)

## Abstract

The Microsource has to supply high quality Power that has high reliability and high energy efficiency to Load according to operating type of Microgrid. The energy sources of microsource type have various dynamic characteristic and transient response corresponding to classes and application skill. This paper shows dynamic characteristic of Microgrid according to Energy Source of microsource type. This research has been carried out by detailed modelling of Microturbine system and Fuelcell system. All models are realized by EMTP/RV and simulated change of operating type and load increase within Microgrid of DC constant voltage inverter model and Microturbine, Fuelcell based Microsource.

Key Words : MicroGrid, MicroSource, Fuelcell, Microturbine, EMTP/RV

## 1. 서 론

화석연료의 고갈과 대기오염의 문제성을 극복하기 위한 여러 방법이 대두되고 있는데, 그 중에서 신재생 에너지 기술발전 및 보급과 더불어 소형 분산 신재생 에너지원으로 이루어진 분산전원망인 마이크로그리드(MicroGrid)에 대한 연구가 진행 중이다.

이러한 마이크로소스의 에너지원은 마이크로터빈, 소규모 풍력발전, 태양광 다양한 형태가 있다. 마이크

로그리드는 계통에 연계되어 부하에 전력을 공급하게 되며 필요에 따라 독립운전이 가능하도록 충분한 용량을 가진 2대 이상의 마이크로소스와 에너지저장장치, 그리고 부하가 혼재된 하나의 독립적인 전력망으로 정의한다[1-2].

마이크로 소스는 DC 전력을 생산하고, 이를 전압원형 인버터를 통하여 AC 전력을 생산하여 부하 및 계통에 전력을 공급한다. 마이크로 소스의 에너지원은 종류와 적용 기술에 따라 그 동특성이 달라지고 과도 응답시간 또한 수초에서 수분까지 다양하기 때문에 마이크로소스를 정전압원이나 정전류원으로 모델링하여 마이크로그리드의 운전 특성을 파악하는 것은 제한이 있다. 이에 본 논문에서는 마이크로터빈과 연료전지 발전 시스템을 모델링하여 기존의 이상 전압

\* 주저자 : 거제대학 선박전기과 교수  
Tel : 055-680-1558, Fax : 055-680-1558  
E-mail : gsseo@koje.ac.kr  
접수일자 : 2010년 3월 14일  
1차심사 : 2010년 3월 18일, 2차심사 : 2010년 5월 28일  
심사완료 : 2010년 7월 29일

원 인버터 모델과 비교하여 마이크로그리드의 운전형 태에 따른 마이크로터빈 및 연료전지 발전 시스템의 운전 동특성을 시뮬레이션을 통해 알아보았다. 모델링은 전력계통 과도현상 해석 프로그램인 EMTP/RV 를 이용하여 구현하였다.

## 2. 마이크로터빈 시스템

마이크로터빈(Microturbine)은 약 30~500[kW]에 이르는 소규모 발전용량을 가지는 초소형 발전용 가스터빈엔진으로 천연가스, 디젤, 에탄올, 바이오매스 등 다양한 연료의 사용이 가능하고, 열병합을 통해 약 80[%]에 이르는 높은 에너지 효율을 가지고,  $NO_x$  발생이 7[ppm]보다 낮아 환경 친화적 측면도 우수해 분산 전원으로 광범하게 활용되고 있다.

마이크로터빈은 압축기와 발전기가 같은 축으로 연결되어 100,000[rpm] 이상의 빠른 속도로 작동하기 때문에 높은 주파수([kHz])의 전력이 발생한다.

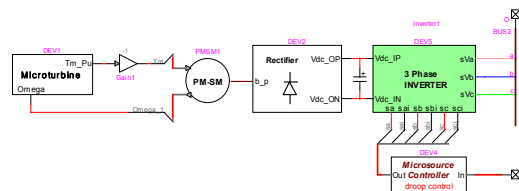


그림 1. 마이크로터빈 시스템 구성  
Fig. 1. Configuration of Microturbine System

이는 마이크로터빈시스템과 AC부하 사이에 전력 변환 장치가 필요하게 된다. 따라서 마이크로터빈은 주로 고속회전에 적합한 영구자석 동기 발전기 (Permanent magnet synchronous generator, PMSG) 를 통해 수 [kHz]의 교류전력을 발생하기 때문에 마이크로그리드에 직접 연결되지 않고 정류기를 통해 DC로 정류되어 다시 전압형인버터를 통하여 60[Hz]의 AC로 변환되어 진다.

DC직류전압 링크단에는 마이크로그리드가 계통과 분리되어 운전 시 부하변동에 따른 에너지원과 부하 사이의 에너지 균형을 위해 충분한 용량의 DC 커패시터나 에너지 저장장치가 필요하다. 그림 1은 모델링된

마이크로터빈 시스템의 구성을 나타낸다[4].

### 2.1 마이크로터빈 모델링

그림 2는 그림 1의 마이크로터빈 블록의 서브모델로 마이크로터빈의 제어기와 연료시스템이 포함된 모델이다. 여기서는 스타트업, 기동정지, 내부 고장, 손실 등의 마이크로터빈의 급격한 동적상태를 무시하고 부하변화, 단독운전 등의 시스템변화에 따른 전력유지에 적합한 마이크로터빈의 느린 동적상태를 모델링하는데 초점을 두어 정상적인 운전조건을 가정하였다 [3-4].

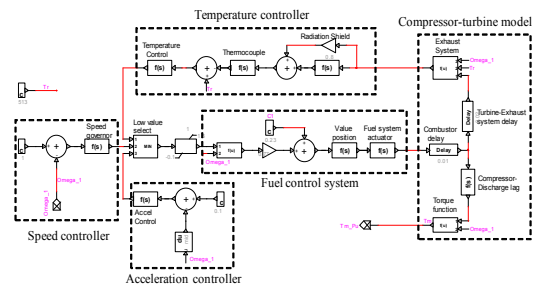


그림 2. 마이크로터빈 EMTP/RV 모델  
Fig. 2. Microturbine Model in EMTP/RV

제어기는 속도제어, 가속도제어, 온도제어로 구성된다. 그림 3은 각 제어기의 출력을 나타낸다.

속도제어는 기준속도(1 p.u)와 PMSG의 회전자속도의 차이에 따라 동작하여 현재 부하 상태에 따라 터빈의 출력을 제어한다.

가속도제어는 터빈이 기동하는 동안 정상속도에 도달하기에 앞서 가속율을 제어하여 터빈의 과열 현상과 오버스피드를 제한하며 정상속도범위 내에 도달하면 가속도 제어는 모델링에서 제외할 수 있다.

온도제어는 주위 온도 변화나 연료 특성에 관계없이 미리 정해진 기준 온도보다 높을 경우 동작하여 터빈의 출력을 제한한다.

속도제어, 온도제어, 가속도제어의 3가지 제어출력은 LVS(Low value select)를 통해 가장 작은 입력값을 선택해 연료시스템의 밸브를 조절함으로써 결과적으로 가장 적은 연료를 사용하게 제어된다.

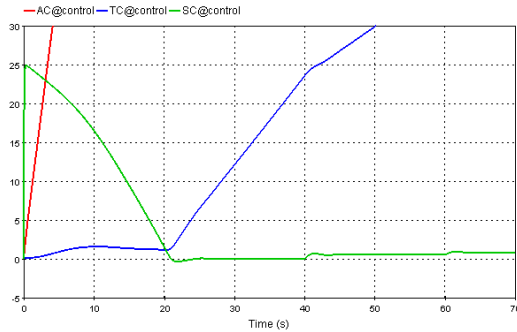


그림 3. 마이크로터빈 제어기 출력  
Fig. 3. Output of Microturbine controller

연료시스템은 연료밸브와 액츄레이터로 구성되어 있고, 무부하시 정격 속도를 내는 최소 연료량을 기준으로 연소 챔버의 지속적인 연소과정 확보를 위해 옵셋값을 설정한다. 연료 흐름의 다이내믹스는 밸브위치 조정장치와 액츄레이터의 관성에 영향을 받고 전달함수는 식 (1)~(2)와 같다.

· 밸브 위치 조절장치의 전달함수

$$F_f = \frac{1}{0.05s + 1} F_d \quad (1)$$

· 연료시스템 액츄레이터 전달함수

$$W_f = \frac{1}{0.04s + 1} F_f \quad (2)$$

여기서  $F_d, F_f$ : 밸브 위치 조절장치의 입출력  
 $W_f$ : 연료수요신호(p.u)

연소기 반작용과 연관된 시간지연과 배기가스의 전송과 관련된 시간지연이 있고, 압축기는 입력의 변화에 출력이 순간적으로 변화할 수 없기 때문에 압축기 디스차지 볼륨의 시간지연을 가진고 연소기에서 연소된 연료는 마이크로터빈의 토크와 온도센서로 측정되는 배기가스를 발생시킨다. 토크와 배기온도는 앞의 연료흐름과 터빈의 속도에 의해서 선형적으로 식 (3)~(4)와 같이 나타낼 수 있다.

· 터빈토크

$$T_m = 1.3(W_{f2} - 0.23) + 0.5(1 - \omega) \quad (3)$$

· 배기온도

$$T_x = T_R - 700(1 - W_{f1}) + 550(1 - \omega) \quad (4)$$

여기서  $W_{f1}, W_{f2}$ : 압축기 터빈의 시간지연 출력  
 $\omega$ : 회전자속도  $T_R$ : 기준연소온도

위의 마이크로터빈의 동특성 파라미터는 Rowen의 Model series 5&6을 사용하였고, 속도제어기 전달함수는 lead-lag 전달함수와 droop 타입을 사용하였다. 각 제어기의 전달함수 및 파라미터는 표 1과 같다 [3-4].

표 1. 마이크로터빈 제어기 전달함수  
Table 1. Transfer function for microturbine controller

speed governor	$\frac{25}{0.05s + 1}$	thermocouple	$\frac{1}{2.5s + 1}$
accel control	$\frac{100}{s}$	radiation shield	$0.8 + \frac{0.2}{15s + 1}$
temperature control	$\frac{3.3s + 1}{250s}$	compressor discharge	$\frac{1}{0.1s + 1}$

## 2.2 영구자석 동기발전기

발전기 모델은 EMTP/RV 라이브러리의 PMSM 모델을 이용하여 정격 및 파라미터를 설계하였다. PMSG의 계자 자속은 영구자석에 의해 일정하게 생성되어 정현파로 가정하고 d-q 좌표변환을 통해 전압 방정식과 운동방정식은 식 (5)~(8)과 같이 나타낼 수 있다.

$$V_d = R_s i_d - \omega_e L_q i_q + L_d \frac{di_d}{dt} \quad (5)$$

$$V_q = R_s i_q + \omega_e L_d i_d + L_q \frac{di_q}{dt} + \psi_f \omega_e \quad (6)$$

$$T_e = \frac{3P}{4} [\psi_f i_q + (L_d - L_q) i_d i_q] \quad (7)$$

$$\frac{d\omega_r}{dt} = \frac{1}{J}(T_e - T_{shaft}) \quad (8)$$

여기서  $V_d, V_q(i_d, i_q)$ : d,q축 전압 (전류)  
 $L_d, L_q$ : 고정자 d, q 축 인덕턴스  
 $R_s$ : 고정자 저항,  $\omega_e, \omega_r$ : 회전자 각속도  
 $\psi_f$ : 누설자속,  $J$ : 회전자 관성,  $P$ : 극수  
 $T_e$ : PMSG에 의해 생성되는 전기적 토크  
 $T_{shaft}$ : 마이크로터빈에 의한 회전축 토크

터빈회전축 토크의 부호가 양수이면 동전기로 동작하고, 음수이면 발전기로 동작한다.

### 2.3 정류기

PMSG의 고주파 전력을 사용가능한 60[Hz]의 전력으로 변환해야한다. 수 [kHz]의 고주파 AC전력은 정류기를 통하여 DC로 변환되어 다시 전압형인버터를 통해 60[Hz]의 AC로 변환된다. 본 논문에서는 3상 정류기를 사용해 DC로 변환하였다.

## 3. 연료전지 시스템

연료전지는 전기화학적 반응에 의해 직접 전기를 생산하므로 기존 에너지원보다 효율이 10~20[%]정도 높으며 전기를 생산하는 과정에서 열도 발생하므로 총 효율이 80[%] 이상으로 높이는 고효율 발전이 가능하다. 이중 고체산화물 연료전지(Solid Oxide Fuel Cell, SOFC)는 고체상의 세라믹을 전해질로 사용하여 500~1,000[°C]의 고온에서 운전되는 연료전지로 고온에서 운전되므로 발전효율이 높고, 고온의 배기가스를 이용하여 열병합 발전이 용이하다[6].

연료전지의 단위 셀 당의 출력전압은 1.15[V] 정도의 낮은 전압을 출력하기 때문에 필요한 전력을 얻기 위해서는 셀을 적층하여 출력을 얻는 구조로 되어 있으며, 전류가 증가하면 전압이 낮아지는 저전압·대전류의 출력 특성을 갖는다. 또한 연료전지는 화석연료를 개질하여 수소를 생산하여 사용하므로 기존의 DC전원과는 달리 부하 변화에 따른 출력전압의 최대·최

소의 변화가 크고 느린 동특성을 가진다. 이러한 연료전지의 출력특성 때문에 그림 4과 같이 승압용 컨버터와 인버터의 전력변환장치의 사용이 필수적인 구성요소이다.

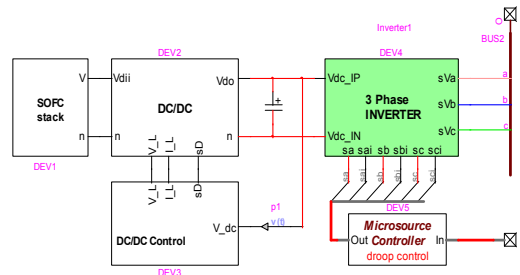


그림 4. 연료전지 시스템의 구성  
 Fig. 4. Configuration of FuelCell System

### 3.1 고체산화물 연료전지 모델링

그림 5는 SOFC의 EMTP 모델을 나타낸다. 연료전지 출력특성은 에너지 전환 과정에서 활성화 과전압, 저항 손실, 농도 손실을 발생하여 운전 전류가 높아질수록 전압이 낮아지게 된다. 이러한 특성은 연료를 비롯한 기체들은 이상기체이고 연료공급의 안정적인 유지, 연료전지 온도 및 채널내부의 압력은 안정적이고 일정하게 유지되고 있다는 조건들을 전제로 수학적으로 모델링이 가능하다[5].

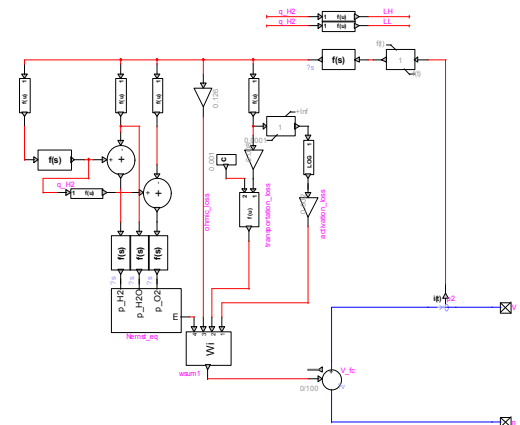


그림 5. 고체산화물 연료전지의 EMTP/RV 모델  
 Fig. 5. SOFC Model in EMTP/RV

SOFC는 식 (9)와 같이 내부저항 손실과 활성화분극에 의한 손실, 유량이동에 의한 손실들을 고려한 Nernst 전압 방정식으로 스택의 기전력을 나타낼 수 있다.

$$V_{fc} = N_0 [E_0 + \frac{RT}{2F} (\ln \frac{p_{H_2} p_{O_2}^{0.5}}{p_{H_2O}})] - rI - Blni - me^{ni} \quad (9)$$

· 초크흐름 방정식

$$\frac{m_f}{P_{us}} = k \sqrt{M} \quad (10)$$

· 이상기체법칙

$$p_{H_2} V_{an} = n_{H_2} RT \quad (11)$$

· 밸브를 통과하는 유량비

$$\frac{q_{H_2}}{p_{H_2}} = \frac{K_{an}}{\sqrt{M_{H_2}}} = K_{H_2} \quad (12)$$

· Faraday 법칙

$$q_{H_2} = \frac{N_0 I}{2F} = 2K_r I \quad (13)$$

식 (9)는 식 (10)~(13)을 통해 구해진 기체의 부분 압력으로부터 유도할 수 있다[5].

### 3.2 DC/DC 컨버터

DC/DC 컨버터는 부하에 따라 변동되는 연료전지의 낮은 전압을 인버터에서 요구되는 출력전압을 발생시킬 수 있도록 약 500V<sub>dc</sub>까지 승압시켜야 한다. 일반적으로 Full-Bridge, Half-Bridge, Push-Pull 방식 등 연료전지 발전 시스템에 효율적인 DC/DC 컨버터들이 고려되고 있다. 본 논문에서는 단일 스위치를 사용하여 컨버터의 손실이 비교적 낮고 구현이 용이한 단일 Boost 컨버터 방식을 채택하여 승압하였다.

### 4. 전압원형 인버터

정류기와 컨버터를 거친 DC 전압은 인버터를 통해

AC로 변환된다. 인버터 제어는 마이크로그리드의 운전 형태나 시스템의 변동에 대해 신속하고 효과적으로 응답할 수 있어야 하며, 유효전력의 독립적인 제어가 가능하여야 한다.

부하 측 전압 및 인버터 전류를 제어 입력으로 d-q 좌표 변환을 통하여 계산된 P,Q 와 E는 유효전력 및 전압제어를 거쳐 인버터 각 상의 스위치를 조작하는 게이트 신호를 발생시킨다. 마이크로그리드가 계통으로부터 분리되면 분리되기 전 운전형태(부하의 일부를 마이크로소스가 담당하는 경우, 잉여 전력을 계통으로 역송하는 경우)에 따라 마이크로소스는 전압위상 및 국지적인 주파수가 변하게 된다. 이와 관련된 주파수 변화는 독립운전 시 유효전력에 대한 주파수 droop 특성곡선의 기울기에 따라 출력의 재증정량을 결정해 부하를 비례적으로 분담하게 해준다. PWM방식으로 유효전력은 부하각 $\delta_p$ 에 의해, 무효전력은 인버터의 출력전압 V의 크기에 의해 인버터 출력전압의 크기와 위상을 제어한다[1-2].

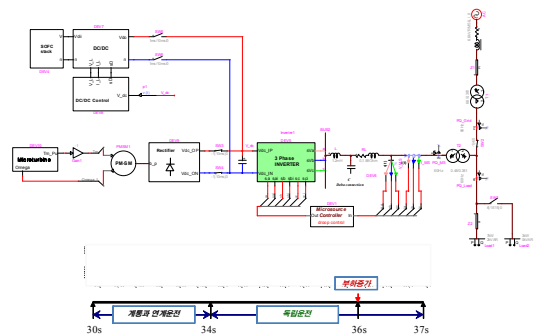


그림 6. 마이크로그리드의 구성  
Fig. 6. Configuration of MicroGrid

### 5. 마이크로그리드 구성 및 모의실험

마이크로소스는 계통과 연계운전 시 일정한 출력을 유지하여야 하며, 독립운전으로 전환 시 그리드 내부하의 전력 수요에 따라 전력품질을 유지하며 전력이 공급되어야 한다.

그림 6와 같이 마이크로그리드를 모델링하였고, 시스템은 초기 계통과 마이크로소스가 연계운전을 하다가 34초에 독립운전으로 전환되고 36초에 부하가

7[kW]에서 10[kW]로 증가하도록 구성하였다. 이는 마이크로터빈과 연료전지 기반 마이크로소스의 초기 스타트업 타임으로 인해 30초 이후의 상황을 모의하였다. 결과는 EMTP/RV의 데이터처리 및 시각화 소프트웨어인 ScopeView를 사용하였다. 마이크로소스와 계통측, 부하측에 각각 PQ메타를 사용하여 운전 형태와 부하변동에 따른 유효전력흐름을 모의하였고, 이는 각각 그래프 상단의 PQ\_MS/P@control, PQ\_Grid/P@control, PQ\_Load/P@control을 통해 나타난다.

그림 7~9는 각각 정전압 DC 전원과 마이크로터빈, 연료전지를 이용한 마이크로그리드 내 마이크로소스, 계통측, 부하측 유효전력 흐름을 나타낸다. 이는 마이크로소스의 종류에 따른 마이크로그리드의 운전 형태와 부하변동에 의한 동특성을 보여준다.

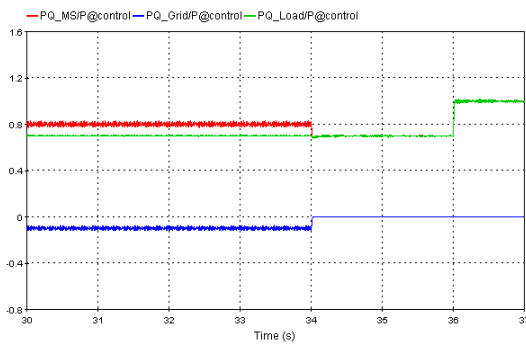


그림 7. DC전원 기반 마이크로그리드의 유효전력  
Fig. 7. MicroGrid's Power based on DC Source

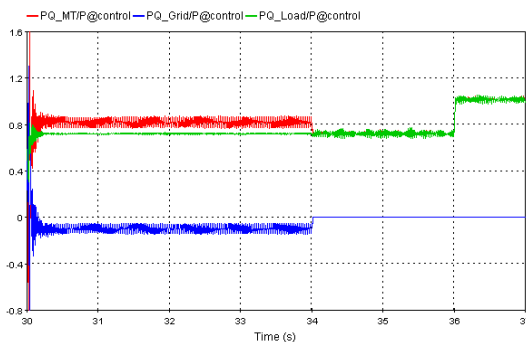


그림 8. 마이크로터빈 기반 마이크로그리드의 유효전력  
Fig. 8. MicroGrid's Power based on Microturbine

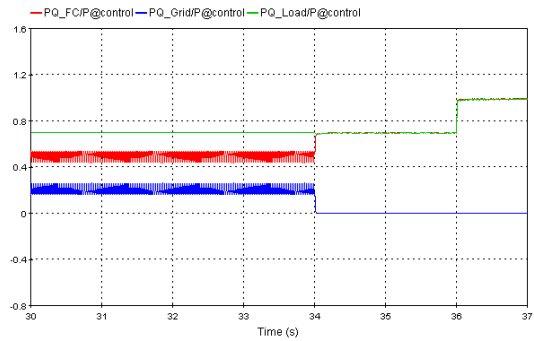


그림 9. 연료전지 기반 마이크로그리드의 유효전력  
Fig. 9. MicroGrid's Power based on FuelCell

그림 10은 연료전지 기반 마이크로그리드의 인버터 출력단의 전압, 전류, 주파수 파형을 나타낸다. 마이크로소스 컨트롤을 통해 연계운전 시 유효전력출력량을 정해줄 수 있으며, 독립운전으로 전환 시 마이크로소스의 용량 하에 부하를 분담할 수 있다.

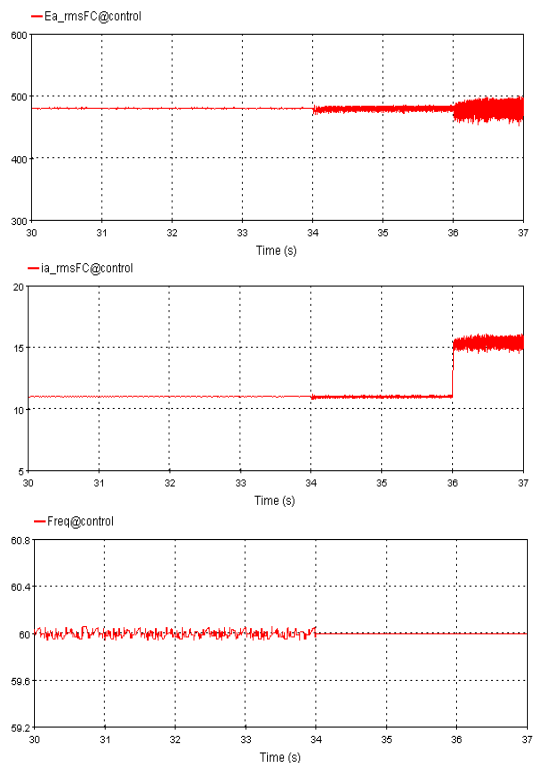


그림 10. 실효치 전압,전류 및 주파수 파형  
Fig. 10. RMS voltage, current and frequency waveform

## 6. 결 론

마이크로그리드 시스템 해석을 위해 이상정전압원형 인버터를 대신해 마이크로터빈시스템과 연료전지시스템의 동특성 모델링을 통해 특정 마이크로소스의 운전형태와 부하증감에 따른 응답특성을 확인하였다. 개발된 마이크로터빈과 연료전지 기반 전압원형 인버터 모델은 마이크로그리드의 급작스런 연계운전에서 독립운전으로의 전환과 부하증감에 의한 과도현상들이 유효전력 및 전압제어의 운전범위 안에서 정상적으로 동작하였다. 이 결과는 마이크로그리드의 실증단지 구축을 위한 기반이 될 것으로 기대된다.

## References

- [1] R. H. Lasseter, "Microgrid", IEEE PES Winter Meeting, January, 2002.
- [2] Northern Power System Inc., Waltsfield, VT.
- [3] W. I. Rowen, "Simplified mathematical representations of heavy duty gas turbines", Journal of Engineering for Power, Transactions ASME, vol.105, no.4, pp.865-869, Oct 1983.
- [4] S. R. Guda, C. Wang, "Modeling of microturbine power generation system", Electric Power Components and Systems, 2006.
- [5] Padulles J., Ault G. W., and McDonald R., "An integrated SOFC plant dynamic model for power systems simulation", J. Power Sources, 2000, pp. 495-500.
- [6] 산업자원부, "1kw급 중온형 고체산화물 연료전지(SOFC) 모듈 및 시스템 개발", 산업자원부, 2007.

## ◇ 저자소개 ◇



### 서규석(徐圭錫)

1975년 11월 4일생. 2003년 경북대학교 공대 전기공학과 졸업. 2005년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 거제대학 선박전기과 전임강사.



### 주재현(朱宰賢)

1968년 5월 28일생. 1992년 영남대학교 공대 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1997년 동 대학원 전기공학과 졸업(박사). 현재 거제대학 선박전기과 부교수.