

# PSCAD/EMTDC를 이용한 마이크로그리드의 시뮬레이션 모델 개발

論 文

56-3-3

## Development of the Simulation Model of Micro-Grid using PSCAD/EMTDC

孫光明<sup>†</sup> · 李桂秉<sup>\*</sup> · 洪俊憲<sup>\*\*</sup>  
(Kwang M. Son · Kye B. Lee · Junhee Hong)

**Abstract** - Micro-Grid comprising Micro-Sources supplying several kW~MW power to local customers is environmentally friendly and reliable. This paper deals with the development of simulation models of Micro-Grid on the PSCAD/EMTDC platform for analyzing various aspects of the interaction of the Micro-Grid. The developed switching level model adopts the space vector PWM. Both switching level and power frequency Micro-Source models are developed, which shows that power frequency modeling is sufficient for analyzing the phenomena of interest. Control characteristics of the Micro-Sources with the parameter and load power variation are analyzed for power quality enhancement. The simulation results show that the developed models are effective for studying Micro-Grid.

**Key Words** : Micro-Grid, Micro-Source, utility interface, VSI(Voltage Source Inverter)

### 1. 서 론

Micro-Grid는 모듈화된 소형 분산 에너지원(Micro-Source or Distributed Energy Resources : DER)들이 수요지에서 전력 및 잉여 열에너지를 생산하여 공급하는 새로운 개념의 소규모 전력시스템으로 utility-grid에 연계되어 운전이 가능하며 utility-grid와 분리되어 독립적으로도 운전이 가능한 전원시스템이다[1-4].

Micro-Grid는 외부 계통에서 보았을 때는 독립적으로 제어 가능한 하나의 급전점이 되며, 부하에 전력뿐만 아니라 일반적으로 열도 함께 공급할 수 있어 효율을 극대화 할 수 있다. Micro-Grid의 발전원은 연료전지, 태양광발전, 풍력, 마이크로터빈 등의 신·재생에너지를 이용하는 Micro-Source들로 구성되며, 이들은 DC 전력을 생산하고, 인버터를 통해 일정한 주파수, 크기, 위상각을 가지는 AC 전압 혹은 전류 형태로 변환하여 출력하게 된다.

최근의 신재생에너지 발전 등에 의한 기존의 분산전원용 전력변환장치는 일반적으로 전압원형 인버터를 사용한 전류 제어 방식을 채택하여 부하측 전압은 계통측 전압에 의해 종속적으로 제어되는 형태였다. 그러나 최근 수용가들이 컴퓨터 등의 민감한 부하에 의해 고품질 전력을 요구함에 따라 전압문제(voltage sag, swell) 등 전력품질을 유지할 수 있는 제어 방식으로 전압원형 인버터를 이용한 전압제어 방식의 Micro-Source 채택이 검토되고 있다[1-4].

WEMPEC(Wisconsin Electric Machines & Power

Electronics Consortium) 그룹은 Micro-Grid에 관한 중요한 초기 연구 결과를 제시하고 있다[1-4]. 이들은 개념적인 설계부터 전력품질 향상 효과 등에 관한 초기 연구결과를 많이 제시하였다. 이들이 사용하고 있는 인버터 제어 방식은 전압 자속 백터를 이용한 제어 방식인 DTC(Direct Torque Control) 제어방식[5]을 채용한 인버터 제어기 모델에 기초하고 있으며 이들을 발전시켜 Micro-Source의 제어모델로 수립하였다. 최근 이들의 연구결과는 계승되어 발전되고 있다[6]. 일본에서는 PCS와 기존 동기발전기의 병렬 운전을 상정하여 이들의 협조 제어방식을 제안하였다[7-8].

본 논문에서는 Micro-Source의 동특성 해석 모델로서 상세 스위칭 레벨 모델뿐만 아니라 인버터의 기본파 성분을 토대로 한 전력주파수 영역 모델을 이용한 해석도 효과적임을 보였다. 전력주파수 영역 모델은 시뮬레이션 및 해석의 복잡도를 현저히 감소시키면서 근본적인 전력관련 특성을 분석하는데 장점이 있다고 판단된다.

본 논문에서는 Micro-Source의 제어시스템 및 동특성 해석 모델링에 대하여 기술하였고, PSCAD/EMTDC를 이용한 Micro-Grid 시스템 시뮬레이션 모델을 개발하고 시뮬레이션을 통하여 동특성을 해석하였다. 또한 Micro-Source의 파라미터 결정의 절차를 서술하고, Micro-Source의 파라미터 변화에 따른 유효전력 및 무효전력의 응답특성 등을 분석하였다. 개발된 시뮬레이션 모델은 Micro-Grid의 다양한 현상 및 시나리오에 대한 해석도구와 Micro-Source의 제어시스템 파라미터 결정 등에 이용될 수 있다.

### 2. Micro-Grid의 모델링

#### 2.1 Micro-Source의 개요

Micro-Grid에 채택되는 Micro-Source는 유효전력 및 부하전압과 무효전력을 제어함으로써 수용가에게 최선의 전력

<sup>†</sup> 교신저자, 正會員 : 東義大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博  
E-mail : kmson@deu.ac.kr

<sup>\*</sup> 學生會員 : 東義大 工大 電氣工學科 碩士課程

<sup>\*\*</sup> 正會員 : 景園大 工大 電氣工學科 副教授 · 工博

接受日字 : 2006年 10月 18日

最終完了 : 2007年 1月 4日

품질(premium power quality)를 제공하는 것을 목적으로 하고 있기 때문에 전압형 인버터를 기본 전력변환장치로서 채용하고 있다[1,2]. 소형 분산 에너지원의 한 형태인 Micro-Source는 두 가지 특징을 가진다. 첫 번째는 Micro-Source는 발전원으로 직류를 사용한다. 연료전지, 태양전지, 마이크로터빈이 대표적인 Micro-Source의 발전원이며, 마이크로터빈의 경우 고주파의 교류 장치이나 정류기를 이용하여 직류로 변환된다. 또한 각 발전들의 응답속도는 수초~수십초 정도로 느린 응답 특성을 가지는 경우가 많으며, 부하변동에 따른 응답특성을 개선하고 계통의란을 일시적으로 보상하기 위해 에너지 저장장치의 채용이 보편적으로 권장 된다[2-4]. 두 번째로 전력전자시스템을 이용하여 계통에 연계되어 전력시스템과 Micro-Source 사이의 유효전력과 무효전력 흐름을 제어한다. 그림 1은 Micro-Source와 그 제어시스템을 나타낸 것이다.

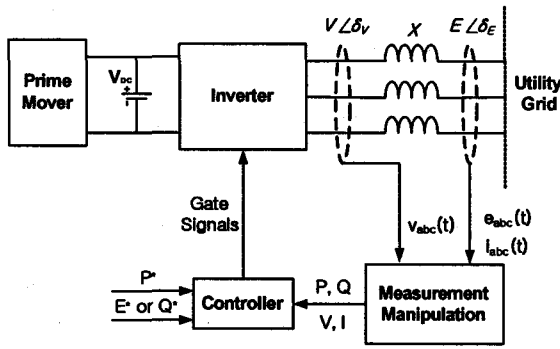


그림 1 Micro-Source의 제어구조  
Fig. 1 Micro-Source control block

2.2 계통 연계된 Micro-Source의 제어 구조

Micro-Source는 전압원으로 작동하므로 utility-grid에 연결되기 위해서는 그림 1에서  $X$  로서 표현된 연계용 인덕터가 필요하다[4,5]. 계통연계용 인덕터는 Micro-Source로부터 utility-grid로 전달되는 유효·무효전력을 적절하게 제어할 수 있도록 해준다. 그림 1에 인버터 제어시스템의 측정 변수와 제어블록도를 나타내었다. Micro-Source 측 단자전압의 크기와 위상은 제어시스템의 PWM 제어를 통해 제어되며, 인버터 제어시스템은 인버터측 전압  $V$ ,  $\delta_v$  및 계통측 전압  $E$ ,  $\delta_e$  를 측정하여 원하고자 하는 유효·무효전력 및 전압을 제어하는 피드백 제어시스템으로 구성되어 있으며 수 ms 의 응답특성을 가진다. 마이크로터빈과 연료전지 등이 채용된 시스템에서는 순간적인 부하의 변화에 효과적으로 응답하고 전압을 유지하기 위해 통상 DC 링크가 배터리와 함께 연결된다. 충전된 배터리에 의해 과도응답을 보상함으로써 DC 링크 전압은 상대적으로 경직된(stiff) 직류전압으로 볼 수 있으므로, 인버터에 배터리가 연결된 시스템은 전력전자 제어시스템을 설계하고 해석하는 것을 용이하게 해준다. 외부에서 주어져야 되는 두 가지 지령치는 다음과 같다.

- 투입 요구 유효전력( $P^*$ )
- 버스 요구 전압( $E^*$ ) 혹은 투입 요구 무효전력( $Q^*$ )

2.3 Micro-Source의 모델

2.3.1 상세스위칭 레벨 모델

Micro-Source의 전력변환은 3상 Half Bridge 인버터를 사용한다. 인버터의 직류단 전압을  $V_{dc}$  로 하면, 인버터의 3상 상전압과 존재함수와와의 관계식은 식 (1)와 같이 나타낼 수 있다.

$$\begin{aligned} V_{as} &= V_{dc}(2S_a - S_b - S_c)/3 \\ V_{bs} &= V_{dc}(2S_b - S_c - S_a)/3 \\ V_{cs} &= V_{dc}(2S_c - S_a - S_b)/3 \end{aligned} \tag{1}$$

여기서,  $S_a, S_b, S_c$  는 각각 3상의 양방향 전력 스위치의 존재함수(existence function)이고,  $V_{as}, V_{bs}, V_{cs}$  는 각각 인버터의 출력 상전압이다.

식 (1)을 이용하면 존재함수에 따라 6개의 유효 전압벡터 ( $V_1 \sim V_6$ )와 2개의 영전압 벡터( $V_0, V_7$ )가 출력 가능하다. 유효 전압벡터를 모서리로, 영전압 벡터를 원점으로 하여 벡터도를 나타내면, 6각형의 벡터도로 나타낼 수 있다. 유효 전압벡터  $V_1 \sim V_6$  는  $60^\circ$  간격의 위상을 가지며 크기는  $2V_{dc}/3$  가 된다. 공간벡터 펄스폭변조 방식의 경우 선형제어 가능한 인버터의 최대 출력 상전압의 크기는 유효 전압 및 영전압 벡터로 나타낸 6각형의 벡터도에서 6각형에 내접하는 원의 반지름으로 직류링크 전압의 약 57.7%( $1/\sqrt{3}=0.577$ ) 정도이다. 이것은 정현파 전압변조 방식에 비해 선형제어 영역이 약 15.5% 증가한 것이다.

Micro-Source의 공간벡터 펄스폭변조 방식 전압형 인버터는 제어시스템으로부터 전압의 크기 및 위상을 입력받고 이를 이용해서 지령전압을 형성한다. 지령전압으로부터 유효 전압벡터 인가시간을 계산하고, 적절한 스위칭패턴을 형성하여 IGBT 게이트 신호를 발생시킴으로써 Micro-Source가 유효·무효전력을 제어하기 위한 전압을 출력할 수 있다.

2.3.2 60Hz 전력주파수 모델

통상의 인버터 동작 해석 및 시뮬레이션 해석 시에는 상세스위칭 레벨 모델이 많이 이용된다. 그러나 다수의 Micro-Source와 utility-grid가 상호 연계되어 상호작용을 하는 Micro-Grid의 경우 상세스위칭 레벨 모델을 이용할 경우 모델링의 복잡도가 너무 증가하여 자칫 효과적인 해석이 어려운 경우가 많다. 따라서 utility-grid와의 상호작용 해석을 용이하게 하기위해서 기본파 성분을 토대로 한 이상적인 인버터 모델을 채용한 Micro-Source를 모델링한다.

Micro-Source의 제어기에 의해 발생하는 제어 신호는 인버터에서 대응되는 게이트 신호로 변환된다. 이 응답 시간은 수 ms 정도로 아주 빠른 특성을 가지기 때문에 전력주파수 영역의 해석에서는 순간적으로 응동한다고 가정하여도 큰 오차가 없다. 그리고 고조파가 통상 수% 이내의 값이므로 고조파를 무시하면 인버터의 출력은 이상 전압원의 형태로 가정할 수 있다.

3상평형인 운전을 가정할 때 인버터의 출력 값은 식 (2)와 같다. 식 (2)에서  $V_a, V_b, V_c$  는 인버터 출력단의 상전

압 기본파 성분을 나타내며, 여기서 영상전류는 존재하지 않는다.

$$\begin{aligned} V_a(t) &= |V| \cos(\omega t + \delta_v) \\ V_b(t) &= |V| \cos(\omega t + \delta_v - 2\pi/3) \\ V_c(t) &= |V| \cos(\omega t + \delta_v + 2\pi/3) \end{aligned} \quad (2)$$

### 3. Micro-Grid의 시뮬레이션 모델

#### 3.1 샘플 Micro-Grid 시스템

Micro-Source들 간의 상호작용을 분석하기 위한 샘플 Micro-Grid 시스템은 그림 2와 같다. 그림 2는 2개의 Micro-Source로 구성된 Micro-Grid 시스템으로서, 최소의 시스템을 이루면서 Micro-Grid 내 Micro-Source의 특성 및 상호작용 등을 효과적으로 분석할 수 있을 것으로 사료된다.

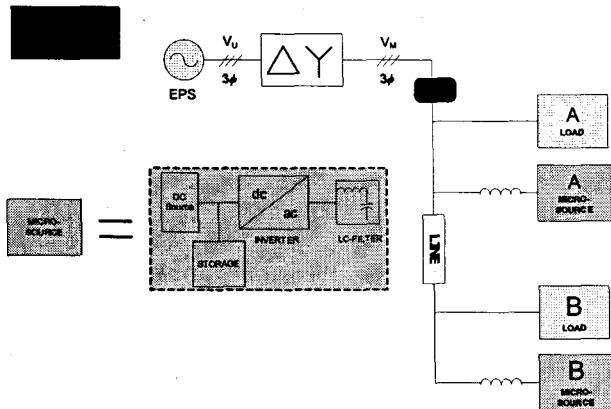


그림 2 샘플 Micro-Grid 시스템  
Fig. 2 Sample Micro-Grid system

그림 2에서 EPS(Electric Power System)는 utility-grid를 의미하며, PCC(Point of Common Coupling)는 solid state breaker가 위치하여 EPS로부터 분리 가능하다. 2개의

표 1 샘플 Micro-Grid 시스템의 파라미터

Table 1 Parameter of sample Micro-Grid system

Line Voltage	$V_U$	13.8[kV]
	$V_M$	0.48[kV]
System Base	$S_B^{3\phi}$	720[kVA]
	$E_B$	480[V]
TR	rating	1.5[MVA]
	leakage reactance	0.1[p.u.]
Line	$R$	$5.9 \times 10^{-6} [\Omega]$
	$X$	$12.7 \times 10^{-3} [\Omega]$
Micro-Source (switching level model)	DC-link voltage	1000[V]
	switching Freq.	10[kHz]
	filter inductance	0.05[mH]
	filter capacitance	100[ $\mu$ F]

Micro-Source는 선로로 연결되고, 부하 A, B에 전력을 공급하면서 선로와 변압기를 통하여 EPS와 연계되어 있다.

그림 2에서  $V_U$ 는 utility-grid 측 선간전압이고,  $V_M$ 은 Micro-Grid 측의 선간전압이다. Micro-Grid 시스템의 파라미터는 표 1과 같다.

샘플 Micro-Grid 시스템의 각 부하는 표 2와 같다. B 부하에서 소모되는 무효전력은 병렬로 보상용 커패시터가 연결되어 감소된 것이다.

표 2 부하 특성

Table 2 Load Characteristics

Parameter	A Load	B Load
$R[\Omega]$	0.85	0.382
$L[\text{mH}]$	0.812	0.685
$C[\mu\text{F}]$	-	2442.97
$P[\text{p.u.}]$	0.9999	1.7248
$Q[\text{p.u.}]$	0.36	0.2818
P.F.	0.94	0.987

#### 3.3 계통연계 인덕터

Micro-Source는 전압원 인버터를 채용하고 있으므로 계통연계를 위해서는 계통연계 인덕터가 필요하다. 이때, 계통연계 인덕터의 크기에 따라 유효 및 무효전력의 전송 민감도가 달라진다[5]. 유효전력의 경우 utility-grid와 Micro-Source 사이에서 각 전압의 위상차인 전력각에 따라 주입 유효전력이 결정되고, 무효전력의 경우 utility-grid와 Micro-Source 사이에서 각 전압의 크기 차에 따라 주입 무효전력이 결정된다. 이에 따라 샘플 Micro-Grid 시스템에서 사용될 계통연계 인덕터  $L$ 을 Micro-Source의 전압크기가 0.8 p.u.에서 전력각을  $15^\circ$ , 전압크기가 1.2 p.u.에서 전력각을  $10^\circ$ 로 하여 Micro-Source가 Micro-Grid로 1 p.u. 정도의 유효전력을 주입할 수 있게  $L=0.183[\text{mH}]$  ( $X=0.21[\text{p.u.}]$ )로 결정하였다.

그림 3은 Micro-Source의 출력 전압에 따른 유효 및 무효 전력 전송량을 나타낸 것으로 계통연계용 인덕터가

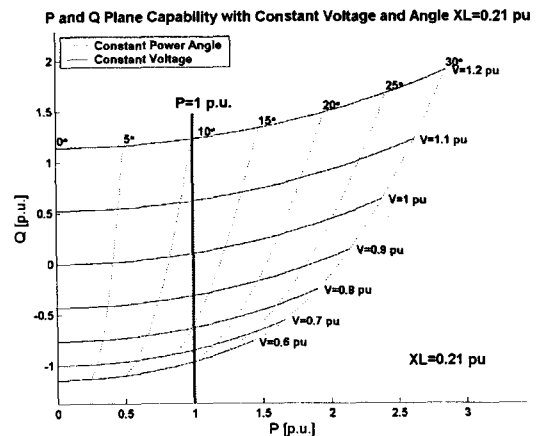


그림 3  $X=0.21[\text{p.u.}]$  일 때의  $P$  와  $Q$  전송량  
Fig. 3 Real and reactive power capability for  $X=0.21[\text{p.u.}]$

0.21 p.u., utility-grid 전압이 1 p.u. 일 때 Micro-Source의 전압크기와 위상에 따라 유효 및 무효전력 전송량 변화를 나타낸 것이다. 그림 3에서 가로축은 유효전력 전송량, 세로축은 무효전력 전송량이고, 세로 점선은 전력각이 일정할 때 Micro-Source의 전압크기 변화에 따른 유효 및 무효전력 전송량이며 가로 실선은 Micro-Source의 전압크기가 일정할 때 전력각 변화에 따른 유효 및 무효전력 전송량이다.

### 3.4 제어시스템 모델링

#### 3.4.1 전력 계산

그림 1의 제어방식에서 측정량은 utility-grid 측의 전압, 전류( $e_{abc}(t)$ ,  $i_{abc}(t)$ )와 인버터 단자전압( $v_{abc}(t)$ )이다. 이들은 식 (3), (4)와 같은 Park's 변환을 통하여 회전형 좌표로 변환된다.

$$P_r = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \cos\theta & \cos(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \cos(\theta + \frac{2}{3}\pi) \\ \sin\theta & \sin(\theta - \frac{2}{3}\pi) & \sin(\theta + \frac{2}{3}\pi) \end{bmatrix} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} v_{rd} \\ v_{rq} \end{bmatrix} = P_r \begin{bmatrix} v_a \\ v_b \\ v_c \end{bmatrix}, \quad \begin{bmatrix} i_{rd} \\ i_{rq} \end{bmatrix} = P_r \begin{bmatrix} i_a \\ i_b \\ i_c \end{bmatrix} \quad (4)$$

변환된 전압과 전류는  $v = v_{rd} - jv_{rq}$ ,  $i = i_{rd} - ji_{rq}$  이고, 이를 이용한 유효 및 무효전력은 식 (5)와 같다.

$$P = (v_{rd}i_{rd} + v_{rq}i_{rq}), \quad Q = (v_{rd}i_{rq} - v_{rq}i_{rd}) \quad (5)$$

#### 3.4.2 PQ-제어

Micro-Source는 요구되는 유효 및 무효전력을 출력하기 위해서 PI-제어를 이용하여 Micro-Source 전압의 크기 ( $V_{mag}$ )와 위상( $\delta_v$ )을 결정한다. 이 두 값은 Micro-Source의 지령치에 따라 PQ-제어모듈에서 출력된다. 전압의 크기  $V_{mag}$ 는 Micro-Source의 출력전압 크기이며, 위상  $\delta_v$ 는 Micro-Source 전압의 위상과 utility-grid 전압의 위상차이다.

Micro-Source의  $P$ 와  $Q$  제어기는 그림 4와 같은 제어기 구조를 가진다. 유효 및 무효전력 제어부분은 서로 독립되어 있으며 각각 PI-block을 가지고 있다. 요구되는 지령치는 의부에서 주어진다.

그림 4의 제어기에서 전압크기 제어부분은 무효전력 지령치와 측정된 무효전력을 비교하여 그 차가 PI-block에 입력되는 구조를 가진다. 제어기의 출력은 요구되는 무효전력을 발생할 수 있는 적당한 인버터 단자전압 크기  $V_{mag}$ 를 발생한다.

유효전력 제어부분에서는 지령치  $P^*$ 가 원동기 블록을 통해 새로운 유효전력 지령치  $P_0$ 로 된다. 이는 음수가 될 수 없으며  $P_{max}$ 보다 작아야 한다. 왜냐하면, 이 값이 음수가 되면 Micro-Source가 부하로 동작하는 것을 의미하고, 출력한계를 벗어날 수 없기 때문이다.  $P_0$ 와 측정치 전력  $P$ 를

비교하여 그 차가 PI-block으로 입력된다. PI-block의 출력은  $\delta_v$ 이며,  $\delta_v$ 와 이웃 모션전압 위상  $\delta_E$ 의 차이  $\delta_p$  ( $= \delta_v - \delta_E$ )가 유효전력을 결정하게 된다.  $\delta_E$ 를 편의상  $0^\circ$ 로 설정하면  $\delta_p$ 는  $\delta_v$ 가 된다.  $\delta_v$ 값의 최소 한계는 Micro-Source가 부하로 운전되지 않는 범위에서 과도적으로 음수가 될 수도 있다. 음수가 될 수 있는 경우는 무효전력량을 높이기 위해서 무효전력 지령치가 증가하게 되면 Micro-Source에 대한 전압의 크기가 과도적으로 상승하게 되는데 이때 전압의 크기에 비례하게 유효전력도 증가하게 된다. 유효전력은 지령치를 유지하기 위하여 전압의 위상은 작아지게 되며, 필요하다면 음수가 될 수도 있다. 즉,  $\delta_v$ 의 최소값은 무효전력에 대응되는 전압의 크기에 따라 달라진다.  $\delta_v$ 값의 최대 한계는 통상  $30^\circ$ 로 설정한다. 각각의 PI 제어기는 다음과 같은 형태로 표현된다.

$$\delta_v = (K_p + \frac{1}{sT_p})(P^* - P) \quad (6)$$

$$V_{mag} = (K_Q + \frac{1}{sT_Q})(Q^* - Q)$$

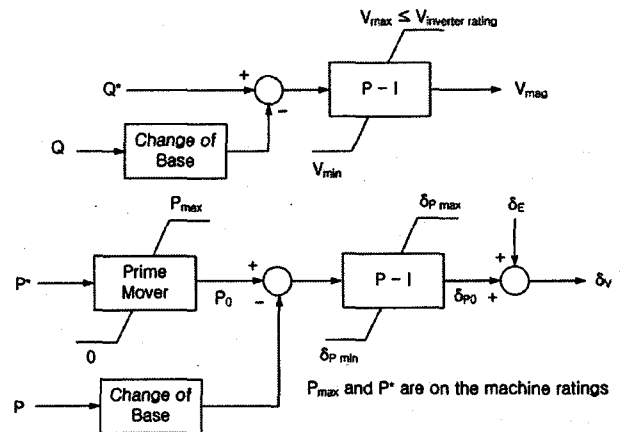


그림 4 P와 Q 제어기 구성  
Fig. 4 Control block for P and Q regulator

각 PI-block의 한계치 설정은 Micro-Source 운전영역의 한계를 고려하여 설정한다. 유효전력 제어에서 출력의 한계 설정은 선형적인 제어범위인  $-30^\circ \sim +30^\circ$ 이며, 무효전력 제어에서는  $0 \sim 0.576$  [kV]이다. 여기서  $-30^\circ$ 는 과도적으로 전압이 상승되었을 때 유효전력 제어를 위한 것이며  $0.576$  [kV]는  $0.48$  [kV]의 120%로서 공간벡터 PWM 방식의 상세스위칭 레벨 모델이 출력할 수 있는 선형제어 가능 전압이다.

### 3.5 상세스위칭 레벨 및 60Hz 전력주파수 모델

Micro-Source의 상세스위칭 레벨 모델은 PSCAD/EMTDC에서 공간벡터 PWM 방식으로 구현되었다. 제어시스템으로부터 전압의 크기와 위상을 입력받아서 인버터의 3상 상전압 지령치를 만들고, 이를 공간벡터 PWM 방식으로 IGBT의 게이트 신호를 만든다. 게이트 신호는 DC 링크 전압 즉, Micro-Source의 전력원으로부터 지령 받은 전압의 크기와 위상으로 half bridge 인버터를 통해 AC 전압을 형성하게

된다. 인버터의 출력전압은 계통연계용 인덕터를 통해 utility-grid와 연계되거나 부하에 전력을 공급할 수 있다.

Micro-Grid를 시뮬레이션 함에 있어 상세스위칭 레벨 모델을 이용할 경우 시뮬레이션 타임스텝을 최소  $5[\mu s]$  이하로 하여야만 정확도를 유지할 수 있다. Micro-Source의 수가 증가하여 Micro-Grid의 규모가 커질수록 시뮬레이션 모델의 복잡도가 증가하며, 시뮬레이션 수행시간이 대폭 증가하므로 자칫 효과적인 해석이 어려워질 수 있다. 따라서 인버터 출력단 전압의 기본파 성분만을 고려하는 60Hz 전력주파수 모델을 사용하여 해석하였다.

#### 4. 사례 연구

##### 4.1 60Hz 전력주파수 모델과 상세스위칭 레벨 모델의 비교

상세스위칭 레벨 모델의 유효 및 무효전력 스텝응답을 그림 5와 6에 나타내었다. 그림 5와 6의 스텝응답은 2가지 Micro-Source 모델, 전력주파수 영역 모델과 상세스위칭 레

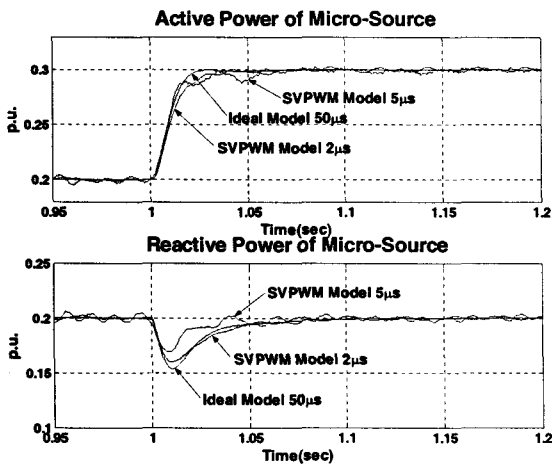


그림 5 유효전력 스텝응답  
Fig. 5 Step response of active power

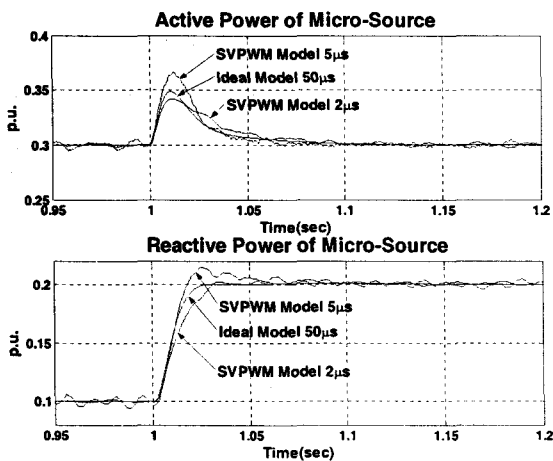


그림 6 무효전력 스텝응답  
Fig. 6 Step response of reactive power

벨 모델의 시뮬레이션 결과이다. 전력주파수 영역 모델은 타임스텝을  $50[\mu s]$ 로 하였고, 상세스위칭 레벨 모델의 경우는  $5[\mu s]$ 와  $2[\mu s]$ 로 하여 각각 시뮬레이션 하였다. 시뮬레이션 결과에서 알 수 있듯이 Micro-Source의 모델별 스텝응답을 비교해보면, 상세스위칭 레벨 모델의 시뮬레이션 타임스텝을  $2[\mu s]$ 로 줄인 경우 전력주파수 영역의 모델과 매우 유사한 결과를 가지게 된다. 시뮬레이션 타임스텝을  $2[\mu s]$  이하로 줄일수록 전력주파수 영역 모델에 가까워진다. 이것은 Micro-Source 모델을  $50[\mu s]$  시뮬레이션 타임스텝의 전력주파수 영역 모델로 하여 Micro-Grid 내의 Micro-Source 간의 상호작용 해석을 하여도 오차가 무시할 수 있을 정도임을 의미하는 것이며, 이는 전력주파수 영역 모델을 사용하면 시뮬레이션 타임스텝을  $50[\mu s]$  정도로 크게 하여도 해석의 정확도를 크게 희생하지 않으므로, 여러 가지 조건에서 다양한 사례연구를 함에 있어서 전력 주파수 영역 모델을 사용하는 것이 효율적임을 알 수 있다.

##### 4.2 부하변동시 상세스위칭 레벨 모델의 응답

그림 7은 부하 변동 시 각 Micro-Source의 제어시스템 응답 특성을 보기 위한 시뮬레이션이다. 여기에서 사용된 Micro-Source의 모델은 상세스위칭 레벨 모델이다. 부하 변동이 발생한 경우 각 Micro-Source의 제어 출력 변화와 그로 인한 Micro-Grid 시스템 응답 특성을 시뮬레이션 하였다. 정상상태에서 두 대의 Micro-Source가 유효전력은 0.2 p.u., 무효전력은 0.1 p.u.의 출력을 내고 있을 때 Micro-

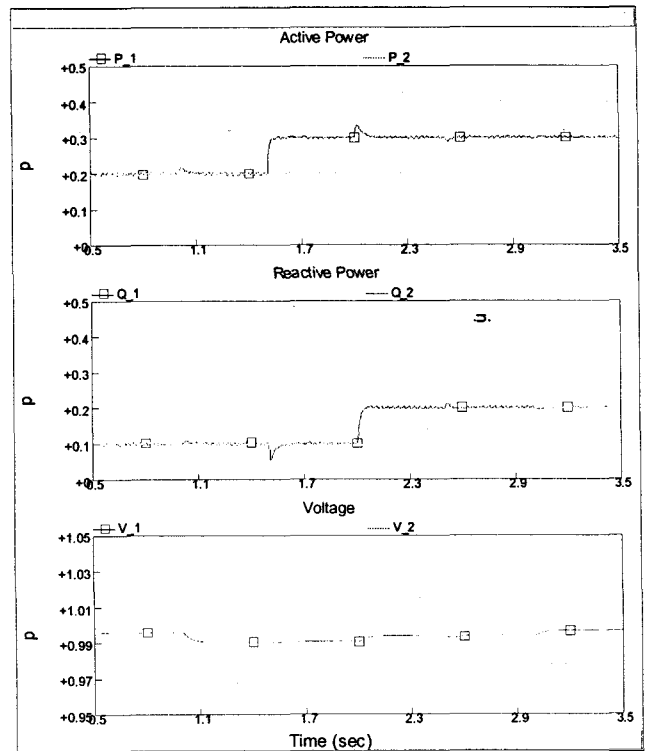


그림 7 부하 변동 시 Micro-Source의 응답 및 부하 측 전압 변화  
Fig. 7 Response of Micro-Source and the variation of the load side voltage with load variation

Source 2와 같이 연결되어 있는 부하의 부하량이 50% 증가하고 각 Micro-Source가 이에 대응하여 각각의 출력을 증가시키는 것을 상정하였다.

이때 그림 7에서 알 수 있듯이 Micro-Source 1의 전압보다 Micro-Source 2의 전압 강하가 많은 것을 알 수 있는데, 이것은 Micro-Source 2 측의 부하 증가로 인해 EPS와 Micro-Source 1 측으로부터의 유효전력 전달이 많아짐으로써 선로를 통한 전압강하가 확대된 것에 기인한다. 이때 Micro-Source 1, 2의 유효전력 및 무효전력은 지령치에 의하여 고정이기 때문에 부하 측의 전압은 강하될 수밖에 없다.

통상 배전회사의 요구사항으로서 부하 말단 측에서 전압 제어를 할 수 없도록 하는 규정을 반영하면 Micro-Source는 유효전력과 무효전력량만을 제어할 수 있으므로 P 및 Q 제어를 통하여 부하 전압을 보상하는 시나리오를 생각한다. 그림 7에서 보듯이 먼저 부하가 증가하여 각 부하측 전압이 강하되는 것을 볼 수 있고, Micro-Source 1의 유효전력 및 무효전력 출력량을 0.3 p.u.와 0.2 p.u.로 증가시키고 나서 Micro-Source 2의 유효 및 무효전력량을 0.4 p.u.와 0.2 p.u.로 증가시켰을 경우 부하전압을 유지할 수 있음을 알 수 있다. 이때 과도현상을 최소화하기 위하여 먼저 Micro-Source 1의 유효전력 출력을 증가시키고 나서 무효전력 출력을 증가시키며, 이어 Micro-Source 2의 유효전력 출력을 변화시키고 나서 무효전력 출력을 증가시킨다. 이때 각각의 시퀀스의 시간 간격은 과도현상이 충분히 사라지고 나서 이루어지도록 하였다.

각 Micro-Source의 유효전력과 무효전력이 상호 결합되어 있어서 유효전력의 출력 증가가 무효전력 출력에 과도적으로 영향을 주는 것을 발견할 수 있다. Micro-Source 2의 경우 이 현상이 더욱더 두드러지는데, 그것은 2번 모션이 utility-grid에서 전기적으로 멀리 위치하여 이로 인한 전압 강하 현상이 두드러지는 데에 기인한다.

### 4.3 파라미터에 따른 Micro-Source의 특성 분석

Micro-Source의 유효전력과 무효전력 출력은 상호 결합되어 있어서 유효전력 스텝응답 시 무효전력 출력이 과도적으로 영향을 받고, 그 반대의 경우도 발생한다. Micro-Source의 유효전력 응답 특성만 개선하기 위하여 제어기 파라미터를 조정하면 그 Micro-Source의 무효전력 응답 특성은 나빠지므로 절충점을 찾을 필요가 있다.

조정해야 할 Micro-Source의 파라미터는 유효전력 비례제어 이득( $K_p$ ), 무효전력 비례제어 이득( $K_Q$ ), 유효전력 적분제어기의 시정수( $\tau_p$ ), 무효전력 적분제어기의 시정수( $\tau_Q$ )이다. 파라미터 결정의 첫 번째 절차는 PQ-제어 모듈의  $K_p$ 를 '0'으로 설정하여 비례적분제어기를 적분제어 모드로 한다. 두 번째로 적분제어기의  $\tau_p$ 는 시스템 응답의 시정수를 결정하므로 적분제어기의 파라미터인  $\tau_p$ 만을 조정하여 적절한 오버슈트, 상승시간, 정착시간을 갖게 설정한다. 마지막 절차로  $\tau_p$  설정 후  $K_p$ 로 오버슈트를 억제시키면서 상승시간이 최대가 되는  $K_p$ 를 설정한다. 이와 같은 절차에서 얻은 적절한 제어기 파라미터를 다음과 같이 결정하였다. 여기서 첨자 1, 2는 Micro-Source 번호를 의미한다.

No.1 Micro-Source PI-controller gain :  
 $K_{P1} = 0.479$  ,  $\tau_{P1} = 0.052$  ,  $K_{Q1} = 0.178$  ,  $\tau_{Q1} = 0.13$

No.2 Micro-Source PI-controller gain :  
 $K_{P2} = 0.479$  ,  $\tau_{P2} = 0.052$  ,  $K_{Q2} = 0.178$  ,  $\tau_{Q2} = 0.13$

#### 4.3.1 비례제어 파라미터 특성

그림 8은  $K_p$ 를 50% 증가 또는 감소하여 유효전력 스텝 응답을 동시에 시뮬레이션한 결과이다. 시뮬레이션에 사용된 Micro-Source의 모델은 전력주파수 영역 모델이다. 이는 그림 5와 6의 결과와 같이 충분히 신뢰할 수 있는 시뮬레이션 결과를 가져주며, 상세스위칭 레벨 모델에 비해 시뮬레이션 시간을 단축 시켜줄 수 있다. 그림 8에서 P\_11은 50%, P\_21은 100%, P\_31은 150%의  $K_p$ 로 설정했을 때의 유효전력 스텝응답을 나타낸다.  $K_p$ 를 감소시킨 경우 상승시간 및 오버슈트가 증가된다.  $K_p$ 를 증가시킨 경우 상승시간 및 오버슈트가 감소되면서 진동이 생긴다.

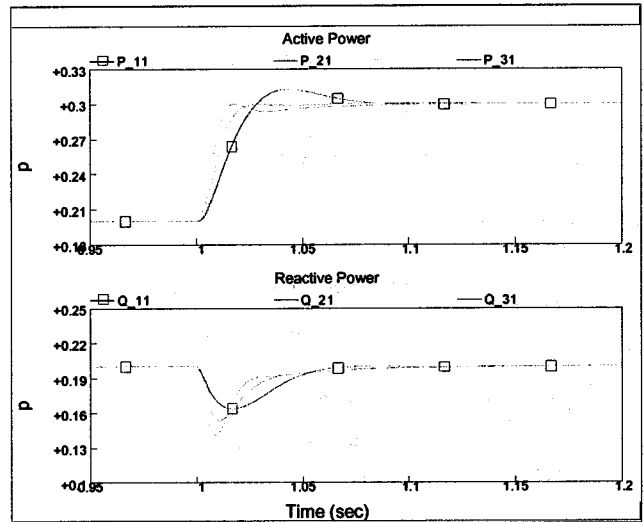


그림 8  $K_p$  변화시 유효전력 지령치의 스텝 증가에 대한 유효 및 무효전력 응답

Fig. 8 Active power step response with the variation of  $K_p$

그림 8에서 무효전력은 유효전력에 대한 영향을 받게 된다. 이는 유효전력의 증가로 인해 선로 전압강하가 발생되어 무효전력이 과도적으로 강하게 되는 것이다. 그림 8에서는  $K_p$  변화시 유효전력의 상승시간이 빨라짐에 따라 무효전력의 강하 폭도 증가하게 된 것이다. 이것은 유효전력의 빠른 응답 특성을 위해 파라미터 설정시 무효전력의 응답 특성이 고려되어야 하는 것을 의미한다.

그림 9는  $K_Q$ 를 50% 증가 또는 감소하여 무효전력 스텝 응답을 동시에 시뮬레이션한 결과이다. 그림 9에서 Q\_11은 50%, Q\_21은 100%, Q\_31은 150%의  $K_Q$ 로 설정했을 때의 무효전력 스텝응답을 나타낸다.  $K_Q$ 를 감소시킨 경우 상승시간 및 오버슈트가 증가된다.  $K_Q$ 를 증가시킨 경우 상승시간 및 오버슈트가 감소되면서 진동이 생긴다. 이것은 그림 8에서의  $K_p$  변화시 유효전력의 스텝응답과 동일한 결과이다.

그림 9에서 유효전력은 무효전력에 대한 영향을 받게 된다. 이는 무효전력의 증가로 인해 선로 전압상승이 발생되어 유효전력이 과도적으로 상승하게 되는 것이다. 그림 9에서는  $K_Q$  변화시 무효전력의 상승시간이 빨라짐에 따라 유효전력의 상승 폭도 증가하게 된 것이다. 이것 또한 무효전력의 빠른 응답 특성을 위해 파라미터 설정시 유효전력의 응답 특성이 고려되어야 하는 것을 의미한다.

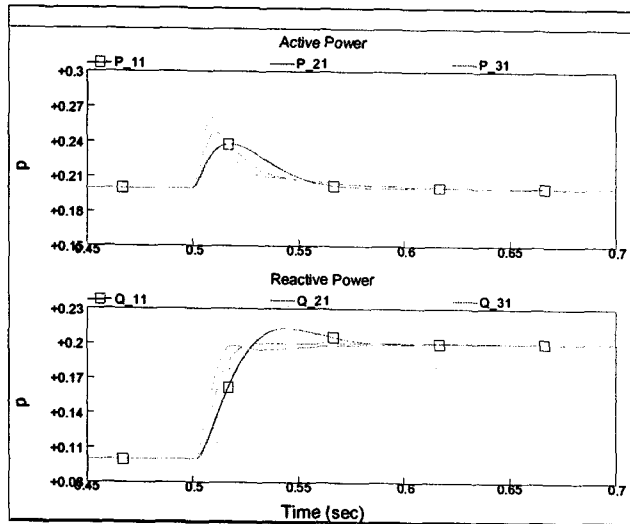


그림 9  $K_Q$  변화시 무효전력 지령치의 스텝 증가에 대한 유효 및 무효전력 응답  
 Fig. 9 Reactive power step response with the variation of  $K_Q$

위와 같은 시뮬레이션 결과로부터 Micro-Grid 내에서 Micro-Source의 유효 및 무효전력의 출력은  $K_P, K_Q$  에 따라 오버슈트 및 상승시간 특성이 결정된다는 것을 알 수 있다. 특히  $K_P, K_Q$  를 증가시킨 경우 진동이 발생되고, 더 증가시킬 경우 상승 특성이 나빠진다.

### 4.3.2 적분제어 파라미터 특성

그림 10은  $\tau_P$  를 50% 증가 또는 감소하여 유효전력 스텝 응답을 동시에 시뮬레이션한 결과이다. 그림 10에서 P\_11은 50%, P\_21은 100%, P\_31은 150%의  $\tau_P$  로 설정했을 때의 유효전력 스텝응답을 나타낸다.  $\tau_P$  를 감소시킨 경우 오버슈트가 증가되면서 정착시간이 감소된다.  $\tau_P$  를 증가시킨 경우 오버슈트가 감소되면서 정착시간이 증가된다. 그림 10에서 유효전력의 스텝응답에 따른 무효전력의 상호작용은 그림 8의 경우와 동일하며 해당 파라미터 설정시 유효 및 무효전력 상호작용이 고려되어야 한다.

그림 11은  $\tau_Q$  를 50% 증가 또는 감소하여 무효전력 스텝 응답을 동시에 시뮬레이션한 결과이다. 그림 11에서 Q\_11은 50%, Q\_21은 100%, Q\_31은 150%의  $\tau_Q$  로 설정했을 때의 무효전력 스텝응답을 나타낸다.  $\tau_Q$  를 감소시킨 경우 오버슈트가 증가되면서 정착시간이 감소된다.  $\tau_Q$  를 증가시킨 경우 오버슈트가 감소되면서 정착시간이 증가된다. 그림 11에서 무효전력의 스텝응답에 따른 유효전력의 상호작용은

그림 9의 경우와 동일하며 해당 파라미터 설정시 유효 및 무효전력 상호작용이 고려되어야 한다.

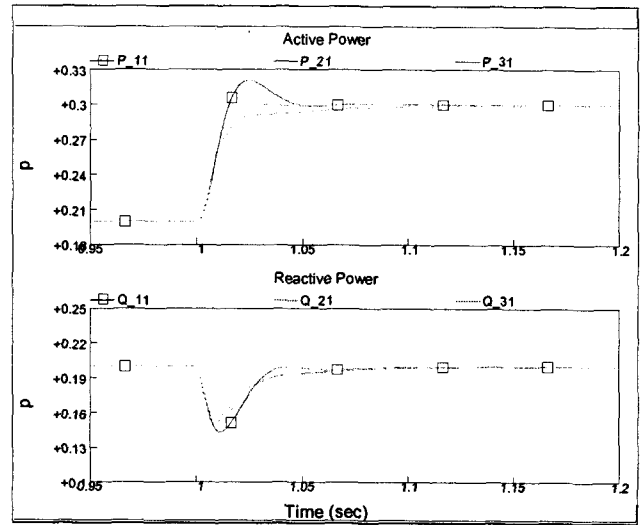


그림 10  $\tau_P$  변화시 유효전력 지령치의 스텝 증가에 대한 유효 및 무효전력 응답  
 Fig. 10 Active power step response with the variation of  $\tau_P$

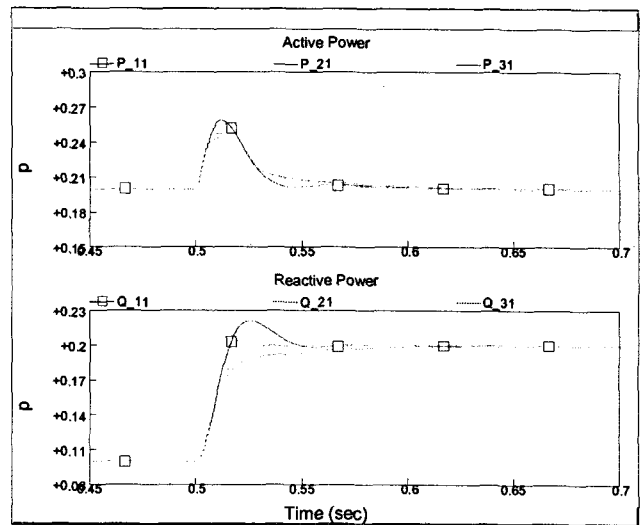


그림 11  $\tau_Q$  변화시 무효전력 지령치의 스텝 증가에 대한 유효 및 무효전력 응답  
 Fig. 11 Reactive power step response with the variation of  $\tau_Q$

위와 같은 시뮬레이션 결과로부터 Micro-Grid 내 Micro-Source의 유효 및 무효전력의 출력은  $\tau_P, \tau_Q$  에 따라 오버슈트 및 정착시간 특성이 결정된다는 것을 알 수 있다.

Micro-Source의 파라미터 별 응답 특성을 요약하면 다음과 같다.

- $K$  감소 : 상승시간 및 오버슈트 증가
- $K$  증가 : 상승시간 및 오버슈트 감소(진동 발생)
- $\tau$  감소 : 오버슈트 증가 및 정착시간 감소
- $\tau$  증가 : 오버슈트 감소 및 정착시간 증가

#### 4. 결 론

본 논문에서는 Micro-Grid가 도입되는 것을 상정하고 Micro-Grid 내의 상호작용과 다양한 현상 등을 해석할 수 있는 Micro-Grid의 시뮬레이션 모델을 PSCAD/EMTDC 상에서 개발하였다. 개발된 모델 중 Micro-Source 모델은 공간벡터 PWM 방식을 채용한 상세스위칭 레벨 모델과 용이한 해석을 위한 60Hz 전력주파수 모델로 개발하였다.

Micro-Grid를 구성하는 각 Micro-Source 모델의 시뮬레이션 타임스텝에 따른 스텝응답을 비교함으로써 Micro-Grid를 해석하기 위한 Micro-Source 모델로 전력주파수 영역 모델을 사용할 경우 상세스위칭 레벨 모델만큼 신뢰할 수 있음을 보이고, 전력주파수 영역 모델을 이용하여 제어시스템 파라미터에 따른 유효·무효전력 제어특성을 분석하였다. 부하변동에 대한 영향을 Micro-Source의 전력제어로 보상하는 사례연구를 통하여 제어효과를 검증함으로써 개발된 모델의 효용성을 확인하였다.

#### 감사의 글

본 논문은 동의대학교의 지원에 의해 수행되었으며 이에 감사드립니다. (과제번호 : 2005AA154)

#### 참 고 문 헌

- [1] R.H. Lasseter, P. Piagi, "Providing Premium Power through Distributed Resources", Proceedings of the 33rd Annual Hawaii International Conference on System Sciences, pp. 1437-1445, Jan 4-7 2000.
- [2] R.H. Lasseter, et al., "White Paper on Integration of Distributed Energy Resources. The CERTS MicroGrid Concept," in Consortium for Electric Reliability Technology Solutions, pp. 1-27, April 2002.
- [3] R.H. Lasseter, "MicroGrids", Power Engineering Society Winter Meeting, 2002. IEEE, vol. 1, pp. 305-308 vol.1, Jan. 27-31 2002.
- [4] R.H. Lasseter, P. Piagi, "MicroGrid: A Conceptual Solution", Power Electronics Specialist Conference(PESC) '04, Aachen, Germany, pp. 4285-4290, June 20-25 2004.
- [5] M. C. Chandorkar, D. M. Divan, and R. Adapa, "Control of parallel connected inverters in standalone AC supply systems," IEEE Trans. on Ind. Applications, vol. 29, No.1, pp. 136-143, Jan./Feb. 1993.
- [6] Y. W. Li, D. M. Vilathgamuwa, P. C. Loh, "Design, Analysis, and Real-Time Testing of a Controller for

Multibus Microgrid System", IEEE Trans. on Power Electronics, Vol. 19, No.5, pp. 1195-1204, Sep. 2004.

- [7] J. Baba, S. Suzuki, S. Numata, T. Yonezu, S. Kusagawa, A. Denda, T. Nitta, E. Masada, "Combined power supply method for micro grid by use of several types of distributed power generation systems", Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on, Page(s):10 pp., 11-14 Sept. 2005.
- [8] S. Kusagawa, J. Baba, M. Ohshima, E. Masada, "Supply power quality of a micro grid based on distributed generations in relation with power converter control", Power Electronics and Applications, 2005 European Conference on, Page(s):10 pp., 11-14 Sept. 2005.

#### 저 자 소 개



#### 손 광 명 (孫 光 明)

1966년 9월 6일생. 1989년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1991년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1996년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1997년~현재 동의대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 051-890-1671

E-mail : kmson@deu.ac.kr



#### 이 계 병 (李 桂 乘)

1979년 12월 8일생. 2006년 동의대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 2006년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.

E-mail : kb\_@naver.com



#### 홍 준 희 (洪 俊 蕙)

1963년 3월 1일생. 1987년 서울대학교 공과대학 전기공학과 졸업. 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학). 1995년~현재 경원대학교 전기공학과 부교수.

Tel : 031-750-5350

E-mail : hongpa@kyungwon.ac.kr