

# RTDS를 이용한 신재생에너지 기반 마이크로그리드 시뮬레이션 해석

논 문
60-12-2

## Simulation Analysis of a Renewable Energy Based Microgrid using RTDS

허 세 림\* · 김 경 훈\*\* · 이 효 근\* · 황 철 상\* · 박 민 원† · 유 인 근\*\*\* · 박 정 도§ · 이 동 영§ · 이 상 진§  
(Serim Heo · Gyeong-Hun Kim · Hyo-Guen Lee · ChulSang Hwang · In-Keun Yu ·  
Jung-Do Park · Dong-Young · Yi Sangjin Lee · Minwon Park)

**Abstract** - Due to enhanced demands on quality, security and reliability of the electric power energy system, a microgrid has become a subject of special interest. In this paper, output characteristics of energy storage system (ESS) with an electric double layer capacitor (EDLC) and battery energy storage system (BESS) of a renewable energy based microgrid were analyzed under grid-connected and islanded operation modes. The microgrid which consists of photovoltaic and wind power turbine generators, diesel generator, ESS with an EDLC, BESS and loads was modeled using real time digital simulator. The results present the effective control patterns of the microgrid system.

**Key Words** : Energy storage system, Grid-connected operation mode, Islanded operation mode, Microgrid

### 1. 서 론

최근 높은 안정도와 신뢰도를 가지는 고품질 전력에 대한 소비자의 요구가 증가하고 있는 가운데 마이크로그리드는 이러한 소비자들의 요구를 충족시킬 대안으로 주목받고 있다 [1]. 마이크로그리드는 전력 변환 장치를 가지는 태양광, 풍력, 연료전지 발전과 같은 분산전원과 배터리, 슈퍼 커패시터와 같은 에너지 저장장치 그리고 부하로 이루어진 소규모 배전망으로 정의 된다 [2-3]. 마이크로그리드는 기존의 전력망과 연계 (계통 연계 운전 모드, grid-connected operation mode) 혹은 분리되어 독립적으로 운전 (독립운전 모드, islanded operation mode)할 수 있다. 독립 운전 모드에서는 마이크로그리드 내의 분산 전원에 의해 전력이 계속 공급되기 때문에 마이크로그리드가 연계된 상위 계통에 고장이 발생해도 마이크로그리드 내의 소비자는 항상 고품질의 전력을 공급받을 수 있다.

반면, 마이크로그리드 내의 분산전원 중 특히 풍력, 태양광 발전은 시간과 기상 조건에 따라 출력 변동이 심하다. 이러한 신재생에너지원 발전의 출력 변동은 전력 품질을 결정하는 주요 요인인 주파수 변동을 일으켜 전력 품질 저하의 원인이 된다 [4]. 특히, 독립 운전 모드에서는 신재생에너지원 발전의 출력 변동이 주파수 변동에 큰 영향을 미치게

된다. 반면 계통 연계 운전 모드 일 때에는 상위 계통의 영향으로 신재생에너지원 발전의 출력 변동이 전력 품질에 크게 영향을 미치지 못하지만, 최근 정부의 '저탄소 녹색성장'의 일환으로 신재생 에너지 발전 비율이 점점 증가하고 있는 추세이기 때문에 계통 연계 운전 모드에서도 신재생 에너지원의 발전 출력 변동이 전력 품질에 미치는 영향이 커질 것이라 판단된다. 따라서 에너지 저장 장치를 사용함으로써 신재생에너지원의 발전 전력 출력 변동으로 인해 전력 품질이 저하되는 문제를 해결한다 [5].

본 논문에서는 PMSG (Permanent magnetic synchronous generator, 영구 자석 동기발전기)형 풍력 터빈 발전 시스템, 태양광 발전 시스템, 디젤 발전 시스템, Li-ion 배터리 에너지 저장장치(Battery energy storage system, BESS), EDLC (Electric double layer capacitor)를 가지는 에너지 저장장치 그리고 부하로 이루어진 마이크로그리드를 RTDS (Real Time Digital Simulator)를 이용하여 모델링 하고 동작 특성을 알아보기 위해 시뮬레이션 해보았다. 모델링 된 마이크로그리드는 계통 연계 운전모드와 독립 운전모드 2가지 모드에서 시뮬레이션 되었고, 계통 연계 시 풍력과 태양광 발전의 출력 변동은 EDLC를 가지는 에너지 저장장치에 의해서 평활화 된다. 그리고 독립운전 모드에서는 Li-ion 배터리 에너지 저장장치에 의해 마이크로그리드 주파수를 60 Hz로 일정하게 유지시킨다.

시뮬레이션을 통해서 에너지 저장장치가 전력을 충전 또는 방전함으로써 마이크로그리드 시스템이 안정적으로 운전될 수 있음을 확인하였다. 그리고 본 연구를 통해 개발된 RTDS 마이크로그리드 모델을 이용하면 실제 마이크로그리드 구축에 앞서 고장 발생 등 여러 가지 과도현상에 대해 마이크로그리드의 동작 특성을 분석 하여 실제 마이크로그리드 운전 시 발생할 수 있는 문제점들을 미리 파악하고 이에 대비할 수 있다.

\* 준 회원 : 창원대 공대 전기공학과 석사과정  
\*\* 정 회원 : 창원대 공대 전기공학과 박사과정  
\*\*\* 시니어회원 : 창원대 공대 전기공학과 교수  
§ 정 회원 : 위덕대 공대 에너지전기공학부 교수  
† 교신저자, 정회원 : 창원대 공대 전기공학과 교수  
E-mail : paku@changwon.ac.kr  
접수일자 : 2011년 9월 13일  
최종완료 : 2011년 10월 19일

## 2. 마이크로그리드 모델링

본 논문에서는 PMSG형 풍력 터빈 발전시스템, 태양광 발전 시스템, 디젤 발전 시스템, Li-ion 배터리 에너지 저장장치, EDLC를 가지는 에너지 저장장치 그리고 부하로 이루어진 마이크로그리드가 내에 모델링 되었다.

### 2.1 풍력 발전 시스템 모델링

바람이 가지는 에너지는 식 (1)과 같이 나타낼 수 있고, 풍력 터빈이 바람의 에너지 100% 회수하려면, 풍력 터빈 통과 후 바람의 속도는 0이 되어야한다. 하지만 연속적인 공기 흐름을 볼 때 이것은 불가능한 일이기 때문에 식 (2)와 같이 효율의 개념인  $C_p$ (Power coefficient)값이 고려되어야 한다. 이 때 효율  $C_p$ 는 주속비 (Tip ratio,  $\lambda$ )와 피치각 (Pitch angle,  $\beta$ )의 함수로 나타낼 수 있고, 식 (4)에 그 관계식을 나타내었다.

$$P_{wind} = \frac{1}{2} v^2 \rho A \frac{ds}{dt} = \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (1)$$

$$P_{turbine} = C_p \cdot P_{wind} = C_p \cdot \frac{1}{2} \rho A v^3 \quad (2)$$

$$\lambda = \frac{R_{blade} \omega_{blade}}{v_{wind}} \quad (3)$$

$$C_p = \frac{1}{2} (\lambda - 0.022\beta^2 - 5.6) * e^{-0.17\lambda} \quad (4)$$

여기서  $v$ 는 풍속,  $\rho$ 는 공기 밀도,  $A$ 는 풍력 터빈 위치에서 가상 유선의 흐름 단면적,  $R_{blade}$ 는 날개의 길이,  $\omega_{blade}$ 는 날개의 회전속도를 의미한다.

본 논문에서 모델링된 PMSG형 풍력 발전 시스템은 정격 풍속 이하에서는 MPPT(Maximum Power Point Tracking, 최대 전력 추종) 제어를 통해 최대 전력점에서 동작할 수 있도록 제어하였다. 반면 정격 풍속 이상에서는 정격 출력 이상의 출력을 내기 때문에 풍력 발전시스템의 전력변환 장치의 용량이 커져야 한다. 하지만 우리나라의 경우 실제로 정격 풍속 이상의 바람이 부는 일은 거의 없기 때문에 정격 풍속이상에서의 출력을 고려하여 전력변환 장치의 용량을 높이는 것은 경제적이지 못하다. 따라서 정격 풍속 보다 빠른 바람에서는 피치각을 조절함으로써 발전기가 일정 속도 이상 회전하지 않도록 제한하였다.

### 2.2 태양광 발전 시스템 모델링

태양광 전지의 전압-전류 특성을 살펴보면 전압원과 전류원으로 구분되는 일반적인 전원과 달리 출력 단자에 연결된 부하의 크기에 따라 전류 값이 0 A인 개방전압과 전압의 값이 0 V인 단락전류사이에서 전압과 전류가 변화하는 특이한 특성을 가진다. 태양광 전지의 전압, 전류특성을 식 (5)와 (6)으로 나타낼 수 있다.

$$I = I_{sc} - I_{os} \exp\left[\frac{q(V + IR_s)}{nkT}\right] - 1 - \frac{V + IR_s}{R_{sh}} \quad (5)$$

$$I_{os} = AT^n \exp\left(\frac{-E_g}{n \cdot k \cdot T}\right) \quad (6)$$

여기서  $I_{sc}$ 는 단락 전류,  $R_s$ 와  $R_{sh}$ 는 태양광 전지 제작시 생기는 기생저항,  $T$ 는 태양 전지의 표면 온도,  $A$ 는 태양 전지의 면적을 의미한다.

### 2.3 EDLC를 가지는 에너지 저장장치 모델링

EDLC는 최대 전압 36.9 V, 66 F의 커패시터를 직렬로 10개 연결하여 최대 전압 369 V일 때 최대 4.5 MJ의 에너지를 저장할 수 있는 6.6 F의 EDLC bank로 등가화해서 모델링 하였다. EDLC를 가지는 에너지 저장장치는 양방향 DC/DC 컨버터를 통해서 계통과 EDLC간에 전력을 주고 받으며, 3상 인버터를 통해 DC에서 AC로 변환되어 계통과 연결된다. EDLC를 가지는 에너지 저장장치 시스템의 구성도를 그림 1에서 볼 수 있다.

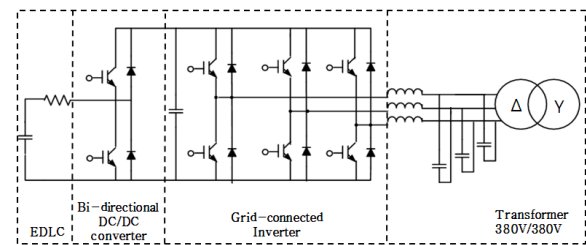


그림 1 EDLC를 가지는 에너지 저장장치 구성도

Fig. 1 Configuration of ESS with EDLC

EDLC를 가지는 에너지 저장장치는 풍력과 태양광 발전 시스템의 출력 변동을 평활화 하기 위해 동작한다. 그림 2는 EDLC를 가지는 에너지 저장장치의 신재생 에너지원의 출력 변동 평활화 제어 알고리즘이다. 풍력과 태양광 발전 시스템의 출력의 합과 그 합을 LPF (Low Pass Filter, 저역 통과 필터)에 통과시켜 얻은 값의 차이를 고려하여 EDLC가 전력을 충전하거나 방전하면서 마이크로그리드 내의 신재생 에너지원 출력 변동을 평활화 한다.

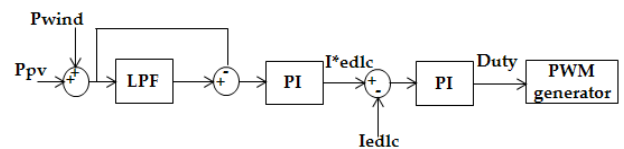


그림 2 EDLC를 가지는 에너지 저장장치 시스템의 DC/DC 컨버터 제어 블록도

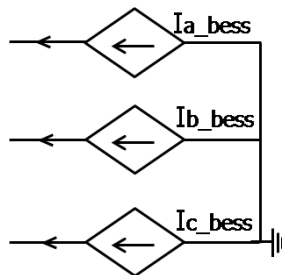
Fig. 2 Control block diagram of ESS with an EDLC

### 2.4 Li-ion 배터리 에너지 저장 장치 모델링

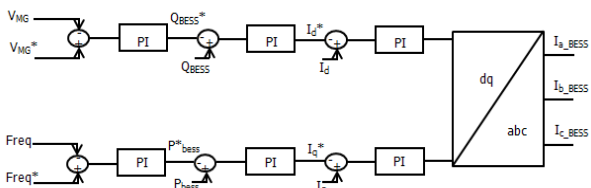
본 논문에서는 3.7 V, 56 Wh의 Li-ion 배터리 병렬, 직렬  $20(P) \times 125(S)$  개를 연결하여 정격 전압 462.5 V의 140 kWh의 Li-ion 배터리 에너지 저장장치를 전류원으로 등가화하여 모델링 하였다. Li-ion 배터리 에너지 저장장치는 마

이크로그리드가 독립 운전 모드에서 동작할 때, 마이크로그리드의 주파수를 60 Hz로 일정하게 유지시키기 위해서 동작한다.

본 논문에서 모델링 된 전류원 모델로 간략화 된 Li-ion 배터리 에너지 저장장치는 마이크로그리드 전압을 일정하게 유지하도록 하는 d축 전류와 마이크로그리드 주파수를 일정하게 유지하도록 하는 q축 전류를 제어한다. 제어된 d축, q축 전류를 dq 역변환하여 얻은 3상 전류 값 만큼 전류원이 출력하게 되면서 마이크로그리드의 전압과 주파수를 일정하게 제어하면서 마이크로그리드가 안정하게 운전할 수 있도록 한다. 그림 3에서 전류원으로 등가화한 Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 구성도(a)와 제어 블록도(b)를 나타냈다.



(a)



(b)

그림 3 (a) 전류원으로 등가화한 Li-ion 배터리 에너지 저장 장치 구성도, (b) 주파수, 전압 제어 블록도

Fig. 3 (a) Configuration simplified Li-ion BESS, (b) Control block diagram of frequency and voltage

### 2.4 디젤 발전 시스템 모델링

디젤 발전 시스템은 RSCAD/RTDS 내의 디젤 발전기 컴포넌트와 여자기, 조속기 모델을 사용하여 모델링 하였다. 표 1에 모델링된 마이크로그리드를 구성하는 각 시스템 용량을 표기 하였다.

표 1 모델링 된 마이크로그리드 내의 각 시스템 용량  
Table 1 Capacity of each system in the modeled microgrid

System	Capacity
Photovoltaic array	20 kW
PMSG type WPGS	30 kW
Diesel generator	50 kW
ESS with EDLC	30 kW/0.9 MJ
Li-ion BESS	70 kW/140 kWh

### 3. 시뮬레이션 결과

시뮬레이션은 계통 연계 운전모드와 독립 운전 모드에서 실시되었다. 계통 연계 운전모드에서는 EDLC를 가지는 에너지 저장장치에 의해서 풍력과 태양광 발전의 출력 변동이 평활화 되고, 그림 4는 그 결과를 보여준다.

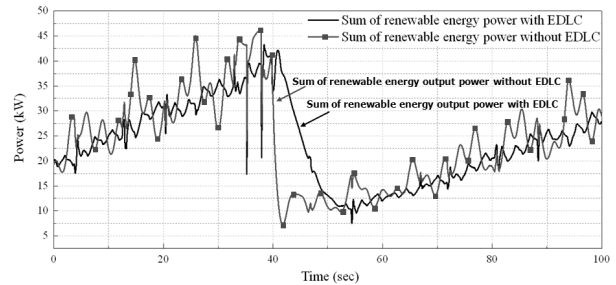


그림 4 EDLC를 가지는 에너지 저장장치에 의한 신재생 에너지원 발전 출력 변동의 평활화

Fig. 4 Smoothing of renewable energy source output power fluctuation by ESS with EDLC

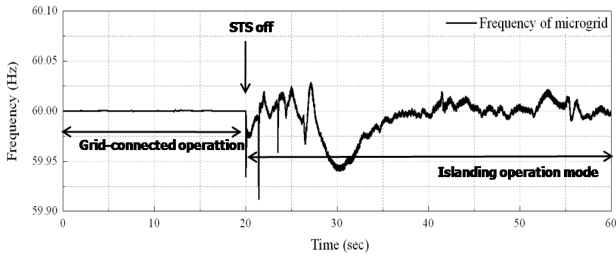
독립 운전 모드에서는 마이크로그리드내의 부하 급변이나 마이크로그리드를 구성하는 장치의 탈락 등 과도현상이 발생했을 때 에너지 저장장치의 동작과 마이크로그리드의 운전 특성을 확인하기 위해 시뮬레이션 하였다. 총 4가지 상황을 가정하여 시뮬레이션을 진행하였고, 각 상황에서의 조건과 각 시스템의 출력을 표 2에 상세히 기술 하였다.

그림 5는 마이크로그리드가 계통 연계 모드로 운전 중 독립 운전모드로 변환될 때 마이크로그리드의 주파수와 Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 출력 변동을 나타낸 것이다. 그림 5를 보면 계통과 연계되어 주파수 60 Hz로 유지하며 안정적으로 운전하던 마이크로그리드가 20초에 계통과 분리되는 순간 풍력과 태양광 발전시스템의 출력 변동으로 인해 주파수가 흔들린다. 하지만 Li-ion 배터리 저장장치가 신재생에너지원의 출력 변동을 평활화하기 위해 전력을 충전하거나 방전 하므로 35초 이후 마이크로그리드의 주파수가 60 Hz로 유지되면서 안정적으로 운전하는 모습을 확인할 수 있다.

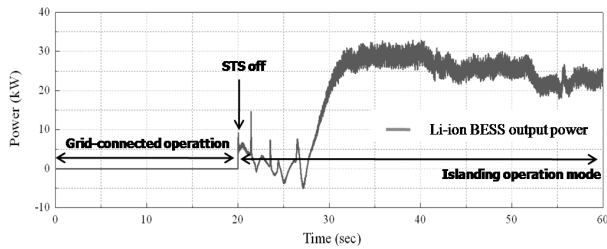
표 2 독립 운전 모드 시뮬레이션 조건

Table 2 Simulation conditions of islanded operation mode

조건	case1	case2	case3	case4
풍속 (m/s)	6~6	10	10	10
일사량 (W/m <sup>2</sup> )	300~1000	600	300~700	600
디젤발전기 출력 (kW)	35	35	0.1	35
부하 (kW)	50	50 → 20	53	50
운전 모드	계통연계 → 독립	독립	독립	독립
EDLC 연결여부	연결	연결	탈락	연결
Li-ion BESS 연결여부	연결	연결	연결	탈락



(a)

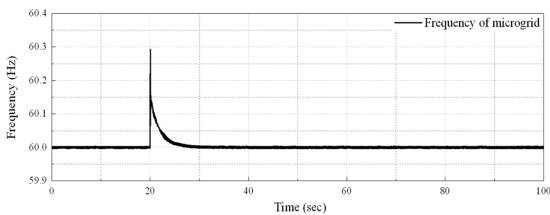


(b)

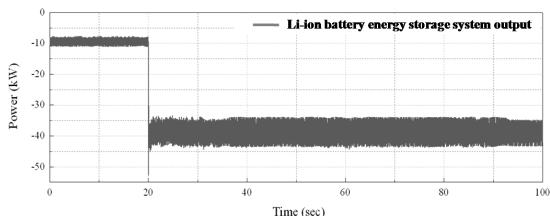
그림 5 Case 1: (a) 마이크로그리드 주파수, (b) Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 출력(20초에 운전 연계 운전 모드에서 독립 운전 모드로 운전모드 변경)

Fig. 5 Case 1: (a) Frequency of microgrid, (b) Output of Li-ion BESS

그림 6은 독립 운전 모드에서 부하가 급변할 때의 마이크로그리드의 주파수와 Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 출력 특성을 나타낸 것이다. 20초에 부하가 50 kW에서 20 kW로 60% 감소하면서 순간적으로 마이크로그리드의 주파수와 60.3 Hz까지 상승하게 된다. 하지만 Li-ion 배터리 에너지 저장장치가 전력을 충전하면서 25초 이후로는 마이크로그리드의 주파수가 60 Hz로 일정하게 유지되는 모습을 관찰할 수 있다.



(a)



(b)

그림 6 Case 2: (a) 마이크로그리드 주파수, (b) Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 출력 (20초에 부하량 60% 감소)

Fig. 6 Case 2: (a) Frequency of microgrid, (b) Output power of Li-ion BESS

그림 7은 독립 운전 모드 중에 EDLC를 가지는 에너지 저장장치를 탈락 시켰을 때 신재생 에너지원 출력의 합과 Li-ion 배터리 저장장치와 신재생 에너지원 출력의 합을 보여준다. 그림 7을 통해서 신재생 에너지원의 출력 변동을 평활화 시키는 EDLC를 가지는 에너지 저장장치를 탈락 시켰음에도 불구하고, 마이크로그리드의 주파수를 안정화 시키는 Li-ion배터리 에너지 저장장치가 동작하기 때문에 마이크로그리드 내의 주파수 변동을 일으키는 주요 요인인 신재생 에너지 출력 변동이 Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 동작만으로 평활화 되면서 마이크로그리드가 안정하게 운전하는 모습을 관찰할 수 있다.

마지막으로 그림 8은 마이크로그리드가 독립 운전 모드로 동작 중에, Li-ion 배터리 에너지 저장장치를 탈락 시켰을 시의 마이크로그리드의 주파수와 Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 출력을 보여준다. 15초에 이후부터 Li-ion 배터리 에너지 저장장치가 동작을 하지 않게 되면서, 마이크로그리드의 주파수는 60 Hz를 유지하지 못하고 계속해서 흔들린다. 즉, Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 탈락으로 마이크로그리드는 불안정하게 운전되고 있음을 확인할 수 있었다.

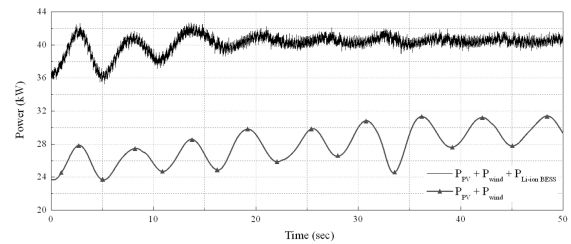


그림 7 Case 3: 신재생에너지원 발전 출력 합과 신재생 에너지원 발전과 Li-ion 배터리 저장장치의 출력 합(15초에 EDLC를 가지는 에너지 저장장치 탈락)

Fig. 7 Case 3: Sum of renewable energy sources output power and sum of renewable energy sources output power and output power of Li-ion BESS

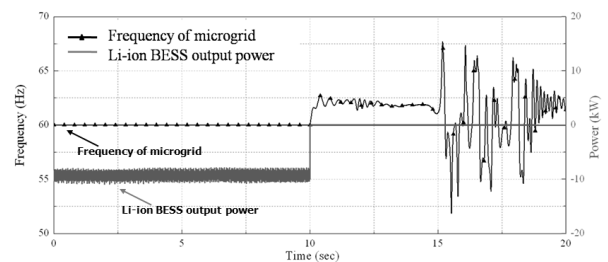


그림 8 Case 4: 마이크로그리드 주파수와 Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 출력 (10초에 Li-ion 배터리 에너지 저장장치 탈락)

Fig. 8 Case 4: Frequency of microgrid and output power of Li-ion BESS

#### 4. 결 론

본 논문에서는 신재생에너지 기반 마이크로그리드를 RTDS를 이용해 모델링하고 시뮬레이션 해보았다. 전력 품

질 저하의 요인이 되는 신재생에너지원의 출력 변동은 EDLC를 가지는 에너지 저장장치에 의해서 평활화 되었고, 특히 독립 운전 모드에서는 Li-ion 배터리 에너지 저장장치의 전력 충·방전 운전으로 부하 급변 등의 과도현상이 발생하여도 마이크로그리드 주파수를 60 Hz로 유지하면서 안정정적으로 운전하는 모습을 보였다. 그리고 Case4의 시뮬레이션을 통하여 신재생에너지 기반 마이크로그리드 내에서 에너지 저장장치의 역할을 중요성을 확실하게 확인할 수 있었다.

본 연구를 통해 개발된 마이크로그리드 RSCAD/RTDS모델은 마이크로그리드의 실제 계통에 적용에 앞서 고장발생 등 과도현상에 대한 동작 특성과 그 결과를 미리 예측하여 문제점을 파악하고, 이를 대비하기 위한 보호 시스템 개발 등에 쓰일 수 있는 장점을 가지고 있다.

**감사의 글**

본 연구는 교육과학기술부에서 시행한 「경남 창원 과학연구단지육성사업」 기초·원천 R&D 과제 지원사업으로 수행되었음

**참 고 문 헌**

[1] R. H. Lasseter, "Microgrid", *IEEE PES Winter meeting*, January, 2002.  
 [2] R. H. Lasseter and P.Piagi, "Control and Design of Microgrid Components", *PSERC Publication*, 2006.  
 [3] J. A. Peças Lopes, C. L. Moreira, and A. G.Madureira, "Defining control strategies for microgrids islanded operation," *IEEE Transactions on Power Systems*, vol. 21, pp. 916 - 924, 2006.  
 [4] Tan K. T, So P. L and Chu Y. C, "Control of Parallel Inverter - interfaced distributed generation systems in microgrid for islanded operation," *International Conference on Probabilistic Methods Applied to Power Systems (PMAPS)*, pp. 1-5, 2010.  
 [5] H. Wei, W. Xin, G. Jiahuan, Z. Jianhua and Y. Jingyan, "Discussion on Application of Super Capacitor Energy Storage System in Microgrid," *SUPERGEN '09. International Conference on*, pp. 1-4, 2009.

**저 자 소 개**



**허 세 림 (許世林)**

1989년 2월 6일생. 2011년 창원대학교 전기공학과 졸업. 현재 동 대학원 전기공학과 석사과정



**김 경 훈 (金慶勳)**

1982년 10월 1일생. 2006년 창원대학교 전기공학과 졸업, 2006년 8월 ~ 2007년 2월 한국전기연구원 신재생 에너지그룹 위촉연구원, 2009년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학석사), 현재 동대학원 전기공학과 박사과정



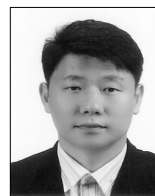
**이 호 근 (李孝根)**

1984년 10월 25일생. 2010년 창원대학교 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기공학과 석사과정



**황 철 상 (黃喆相)**

1984년 10월 7일생. 2010년 창원대학교 전기공학과 졸업, 현재 동대학원 전기공학과 석사과정



**박 민 원 (朴敏遠)**

1970년 2월 12일생, 1995년 창원대 전기공학과 졸업, 2002년 일본 오사카대학 대학원 전기공학과 졸업(공학석사, 공학박사), 2001년 10월 ~ 2004년 8월 한국 전기연구원 차세대 초전도 응용기술 개발사업단 기술팀장, 2004년 9월~현 창원대학교 전기공학과 부교수



**유 인 근 (劉仁根)**

1954년 2월 18일생, 1981년 동국대학교 졸업, 1983년 한양대학교 전기공학과 대학원 졸업(공학석사), 1986년 동대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년 6월 ~ 1988년 2월 한국 전기연구원 선임연구원(지중송전연구실장), 1988년 3월~현 창원대학교 전기공학과 교수



**이 상 진 (李相鎭)**

1962년 3월 3일생, 1988년 연세대학교 졸업, 1991년 동대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 동 대학원 전기공학과 졸업 (공학박사), 1996년 4월 ~ 1997년 12월 한국 고속철도건설공단 차량연구실 선임연구원, 1996년 5월~1997년 4월 프랑스 Ecole Centrale de Lille-1,2EP 객원연구원, 2008년 7월 ~ 2009년 6월 MIT Francis Bitter Magnet Laboratory 객원연구원, 1998년 3월 ~ 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수



**박 정 도 (朴 正 道)**

1969년 10월 6일생. 1992년 연세대학교 전기공학과 졸업. 1994년 동 대학원 전기전자공학과 졸업(공학석사). 2000년 동 대학원 전기 및 컴퓨터공학과 졸업(공학박사). 현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수



**이 동 영 (李 東 映)**

1962년 7월 19일생. 1985년 서울대학교 전기공학과 졸업, 1990년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학석사), 1995년 서울대학교 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사), 1985년~1986년 삼성반도체통신(주) 사원, 1995년~1996년 기초전력공학공동연구소 선임연구원, 1996년~1997년 한전 전력연구원 선임연구원, 1997년~현재 위덕대학교 에너지전기공학부 부교수