

# 독립형 DC 마이크로그리드의 최적화 설계와 협조적 제어

한태희<sup>1</sup>, 이지현<sup>1</sup>, 김현준<sup>1</sup>, 한병문<sup>†</sup>

## Optimized Design and Coordinated Control for Stand-alone DC Micro-grid

Tae-Hee Han<sup>1</sup>, Ji-Heon Lee<sup>1</sup>, Hyun-Jun Kim<sup>1</sup>, and Byung-Moon Han<sup>†</sup>

**Abstract** - This paper describes the coordinated droop control method for stand-alone type DC micro-grid to improve reliability and utilization of distributed generations and energy storage. The stand-alone type DC micro-grid consists of several distributed generations such as a wind power generation, solar power and micro-turbine, and energy storage. The proposed method which is based on autonomous control method shows high reliability and stability through coordinated droop control of distributed generations and energy storage and also capability of battery management. The operation of stand-alone type DC micro-grid was analyzed using detail simulation model with PSCAD/EMTDC software. Based on simulation results, a hardware simulator was built and tested with commercially available components and performance of system was verified.

**Keywords:** stand-alone dc micro-grid, droop control, autonomous control, dc distribution, energy management system, distributed generation, energy Storage

### 1. 서 론

최근 스마트그리드의 대두와 함께 국내외적으로 도서 지방이나 오지에서는 풍력, 태양광 등의 분산전원과 에너지저장을 이용하는 기존 전력망과 독립된 형태의 마이크로그리드가 사용되고 있는데 이에 대한 최적설계가 잘 이루어져 있지 못하여 고장이 많고 낮은 공급신뢰성으로 인해 빈번한 유지보수가 이루어지고 있다.

마이크로그리드는 연계방식과 제어 방법에 따라 분류할 수 있다. 연계방식에 따라 구성요소들을 교류로 연결한 AC 마이크로그리드와 직류로 연결한 DC 마이크로그리드로 구분할 수 있으며 AC 마이크로그리드는 기존의 배전망을 그대로 활용하는 장점이 있으나, 동기화, 안정도, 무효전력 문제를 야기한다. 그러나 DC 마이크로그리드는 동기화, 안정도, 무효전력소모에 대한 문제가 없으며 각 전원에서 생산되는 전력을 연계함에 있어 2단계 전력변환이 필요 없어 시스템의 손실과 비용이 낮은 장점을 갖는다. 또한 최근 사용이 급증하고 있는 디

지털 부하는 원래 직류전원을 필요로 하여 DC 마이크로그리드에 대한 관심이 집중되고 있다<sup>[1]-[2]</sup>.

제어 방법에 따른 분류로는 먼저 중앙제어기를 두고 구성요소들의 전력량을 실시간으로 측정하여 알고리즘에 의해 시스템을 운용하는 방식으로, 전력량을 측정하기 위한 센서와 측정된 데이터를 중앙제어기로 전송하는 통신망을 필요로 한다<sup>[3]-[4]</sup>. 고속 통신망을 사용함으로써 중앙에서 각 기기들의 정보를 신속하게 전달받아 원활한 운용이 가능하지만 분산전원을 이용하는 경우 기후 예측 알고리즘이 필요하고 통신에 대한 의존도가 높으며 운용 알고리즘이 전력거래에 의존하게 되고 상위 계통의 전력균형 유지에 집중하므로 계통연계 마이크로그리드에 적합하다.

다른 하나는 각 컨버터가 연계되는 계통 변수의 변동 기준에 대한 Droop 제어를 수행하는 자율제어방식으로, 연계되는 기기가 독립적으로 그리드 제어에 관여한다<sup>[5]-[6]</sup>. 고가의 통신시스템을 요구하지 않으며 가벼운 운영 알고리즘으로 자율적 수요관리가 가능하지만 기기간의 상태전달이 안되므로 에너지 저장장치의 수명이 급격히 떨어질 수 있고 분산전원의 효율적인 운용이 어려우며 순환전류가 흐를 수 있다는 단점이 있다. 그러나 독립형 마이크로그리드는 계통과 분리되어 운영되므로 상위 계통과 전력거래를 하지 않기 때문에 고속 통신망이 필요하지 않으며 기후예측에 크게 의존하지 않는 자

Paper number: TKPE-2013-18-1-8 ISSN: 1229-2214

<sup>†</sup> Corresponding author: erichan@mju.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Myongji University

Tel: +82-31-330-6366 Fax: +82-31-321-0271

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Eng., Myongji University

Manuscript received Oct. 18, 2012; accepted Dec. 12, 2012

— 본 논문은 2012년 전력전자학술대회 외부장학금 수혜논문임

을 제어방식의 적용이 타당하다.

본 논문에서는 기존 자율제어방식을 기반으로 하는 독립형 DC 마이크로그리드의 신뢰도 및 분산전원과 에너지 저장의 활용도를 향상시키기 위한 협조적 Droop 제어기법을 제안하고 그 성능과 동작을 분석한 내용에 대해 기술하였다. 제안하는 시스템의 동작 타당성을 체계적으로 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 모델을 개발하였으며 이를 기반으로 하드웨어 시뮬레이터를 제작하여 시스템의 성능을 검증하였다.

## 2. 독립형 DC 마이크로그리드 설계

### 2.1 시스템 개념 설계

독립형 마이크로그리드는 기존 전력망과 단절되어 있기 때문에 운영 시에 전력균형을 유지하는 것이 가장 중요한 요소이자 신뢰도를 결정짓는 기술이다<sup>[7]</sup>.

본 논문에서는 분산전원들과 에너지 저장장치가 연계 단의 전압에 따라 자율적으로 제어를 수행하면서 전력균형을 유지하는 협조적 Droop 제어기법을 제안한다. 분산전원과의 협조적 제어를 통하여 운영 신뢰도와 안정성을 높였으며, 배터리의 SOC에 따른 운전 영역을 설정하여 배터리 수명과 보호도 고려하였다.

그림 1에 신뢰도 향상을 위한 협조 제어 개념을 나타내었으며 기존의 자율제어 방식의 장점을 취하고 단점을 보완하는 방식이다. 분산전원과 배터리의 협조적인 자율제어를 통하여 효율적인 분산전원 운용 및 배터리의 관리가 가능한 방식으로 전력균형을 위한 자율적인 분산전원의 협조제어를 수행하면서 배터리의 상태를 지속적으로 파악하여 SOC에 따른 배터리 보호제어를 병행한다.

그림 2에 분산전원과 에너지 저장장치의 역할분담에 대하여 나타내었다. 분산전원과 에너지 저장장치는 DC 그리드 전압 상태를 각각 관측하고 정해진 전압 범위에 대해 협조적 Droop제어를 통하여 Energy Balancing Control을 수행함으로써 자율제어를 수행하며 전압제어를 수행하는 장치에는 순환전류를 억제하는 기법이 적용

되고 DC 그리드 전압에 대한 분산전원과 에너지 저장 장치의 협조 운용 영역을 정의한다. 이와 병행하여 에너지 저장장치에서는 배터리의 보호와 안정적인 운용을 위하여 SOC에 따른 limit Control을 수행하게 되는데 여기에 에너지 저장장치의 운용 영역과 SOC 영역 별 분산전원 운용 시퀀스를 정의한다.

### 2.2 시스템 용량 설계

독립형 마이크로그리드에 있어서 시스템의 전체적인 용량설계가 체계화 되지 않으면 분산전원이나 배터리의 용량이 필요이상으로 크게 설계되거나 반대로 너무 작게 설계되어 동작이 불안정해질 수 있으며 가격적인 면과 설치지역의 기후조건을 고려하여 설계되어야 하며 본 논문에서 사용하는 시스템 설계 절차를 그림 3에 나타내었다<sup>[8]</sup>. 마이크로그리드에는 여러 종류의 분산전원이 포함될 수 있기 때문에 태양광발전, 풍력발전, 엔진발전과 에너지 저장의 용량산정을 모두 고려하였다.

먼저 설치 지역의 부하특성을 분석하고 부조일수와 폭풍일수를 고려한다. 부하의 종류에 대해 적용 타입을 선정하고 지역의 일사량과 풍속에 대한 발전 특성 등을 모의 실험하여 적용방식의 적합성을 파악하고 용량산정에 필요한 데이터를 수집한다. 결과적으로 태양광 어레이, 풍력발전기, 엔진발전기, 에너지 저장의 용량은 시스템의 특성과 적용방식 및 발전특성을 고려하여 산정한다.

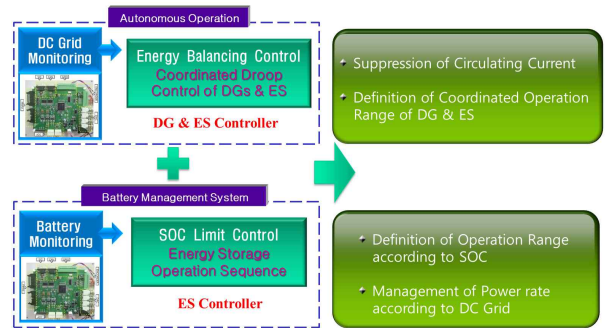


Fig. 2 Dividing role of distributed generation and energy storage

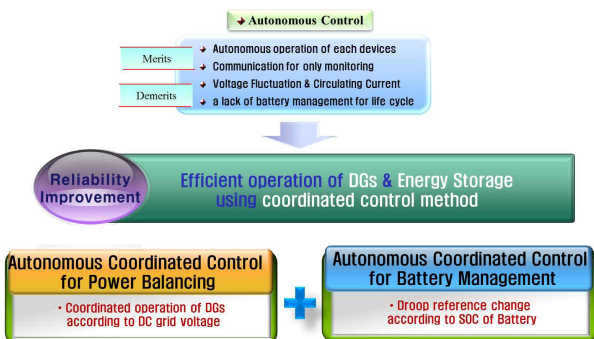


Fig. 1 Operation concept for improvement of reliability

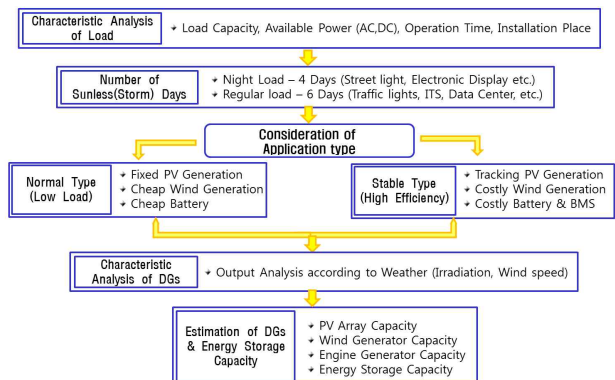


Fig. 3 Design flow of the system

### 2.3 독립형 DC 마이크로그리드의 구성

제안하는 독립형 DC 마이크로그리드는 그림 4에 보인 것처럼 분산전원으로는 출력조절이 불가능한 풍력발전과 태양광발전, 출력조절이 가능한 엔진발전을 사용하며 에너지 저장장치로는 배터리로 구성하였다.

풍력발전과 엔진발전은 회전기를 기반으로 하는 발전장치로 출력이 교류이므로 3상 AC/DC 컨버터에 의해 직류전력으로 변환된다. 특히 풍력은 풍속에 따라 출력이 가변하고 최대출력점 추적이 필요하여 제어기에서 이를 고려하여야 한다.

태양광 어레이는 일반적으로 개방상태의 전압레벨이 계통에 공급하기 위한 레벨보다 낮기 때문에 DC-DC 컨버터는 승압을 위한 부스트 컨버터를 사용한다. 태양전지로 부터의 출력은 MPPT 제어를 통해 나오므로 항상 일정한 주파수의 리플을 포함하게 되며, 이 전류 리플을 고려하여 3-phase Interleaved Boost DC-DC 컨버터를 적용하였다.

에너지 저장장치는 DC 그리드의 Droop제어 수행을 통해 충전과 방전 시 강압과 승압 동작을 하여 독립형 DC 마이크로그리드의 전력을 조율한다. 특히 배터리는 유입되는 전류에 고조파함몰이 낮을 것이 요구되고

충·방전시의 전류리플이 수명에 영향을 주므로 전류리플 저감을 위해 Bidirectional 3-phase Interleaved DC-DC 컨버터를 사용하였다.

연계되는 부하에는 교류부하와 직류부하가 있는데, 교류부하는 단상 AC/DC 인버터를 통해 직접 전력의 사용이 가능한 단상 220V를 출력한다. 직류부하의 경우는 대부분 디지털부하로 직류그리드에 DC/DC 컨버터를 통하여 연결되며 디지털부하는 직류전원을 요하여 독립형 DC 마이크로그리드의 경우 이를 직접 공급하므로 손실, 비용, 크기의 절감이 가능하다. 본 논문에서는 교류부하를 통해 통합적으로 부하를 모의하였다.

## 3. 신뢰도 향상을 위한 운용기법

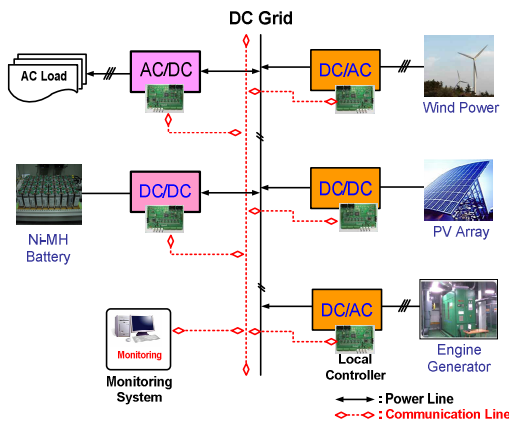
### 3.1 순환전류의 발생과 억제기법

제안하는 독립형 마이크로그리드에서는 각 기기 간에 정보를 송수신 하지 않는 자율제어 방식을 사용하기에 통신시스템은 모니터링의 목적으로만 사용된다. 자율제어 방식을 사용하면 2대 이상의 전력변환기에서 직류배전망의 직류전압 제어가 가능하게 되며 각 구성요소가 전압제어를 하는데 있어서 센서의 오차, 제어기의 오차, 선로 임피던스에 의해서 제어하는 전압에 차이가 발생하게 되고 이에 따라 직류배전망에 순환전류가 필연적으로 발생하게 된다.

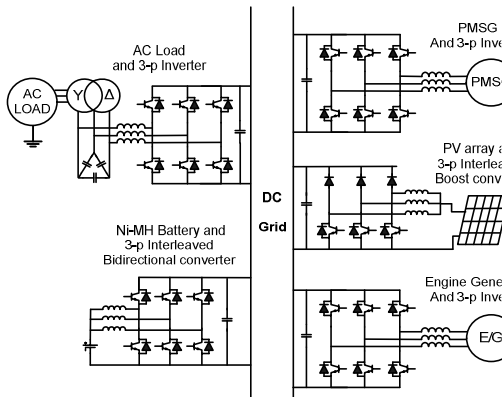
순환전류는 교류의 무효전력과 유사하여 시스템 전체의 손실과 직결되는 부분이며, 연계되는 기기에 여러 가지 악영향을 줄 수 있기 때문에 순환전류를 억제하기 위한 제어 기법이 반드시 필요하다.

에너지 저장장치는 DC 전압제어기를 가지고 있으며, 각 장치의 출력특성은 전압원으로 취급된다. 만일 전압제어에 오차가 존재하면 순환전류가 흐르는데, 이 전류를 쉽게 저감하는 방법은 각 장치의 출력과 DC 그리드 사이에 저항성분을 삽입하는 것이다. 그러나 이 방법은 손실, 비용, 크기 측면에서 비현실적이다. 따라서 본 연구에서는 그림 5와 같이 DC 전압제어기에 피드백루프를 추가하였다.

출력 DC 전류  $I_{dc}$ 를 검출하여 게인 K를 곱한 다음 그 결과를 기준 DC 출력전압  $V_{DROOP}^*$ 를 감하는 방향으로 입력한다.



(a) Configuration



(b) Circuit Diagram

Fig. 4 Configuration and circuit of stand-alone type DC micro-grid

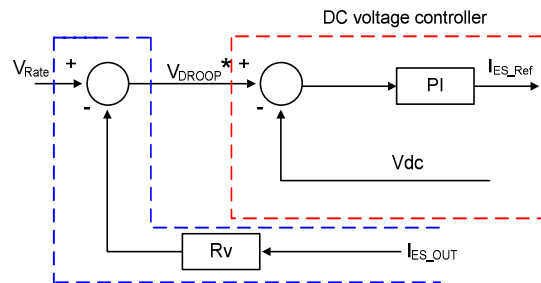


Fig. 5 Droop control block of energy storage

만일 측정된 DC 전압  $V_{dc}$ 가  $V_{DROOP}^*$ 를 추종하면 출력 전압은 식 (1)과 같이 표현된다.

$$V_{DROOP}^* = V_{Rate} - R_V \times I_{ES\_OUT} \quad (1)$$

여기서,  $R_V$ 는 등가저항의 역할을 하여 실제로는 저항이 존재하지 않아도 순환전류는  $R_V \times I_{ES\_OUT}$  경로가 추가되므로 제어가능 함을 알 수 있다.

등가저항은 실수 값을 가지므로 DC 그리드의 정격전압은 400V로서 변동률은 5%이며 에너지 저장장치에서 충·방전하는 최대 용량은 최대 분산전원의 용량과 부하의 용량을 고려하여서 3kW로 설정하였다. 따라서 에너지 저장장치의 정격영역에서의 등가저항은 다음과 같이 구해진다.

$$R_{Batt} = \frac{\Delta V_{dc}}{I_{MAX}} \quad (2)$$

$$R_{Batt} = \frac{\Delta V_{dc} \times V_{dcmin}}{P_{Rate}} \quad (3)$$

여기서  $\Delta V_{dc}$ 는 전압의 변동분,  $V_{dcmin}$ 은 DC 그리드의 최저전압 380V,  $P_{Rate}$ 는 에너지 저장장치의 정격용량이다.

### 3.2 분산전원과 에너지 저장장치의 협조제어

앞서 설명했듯이 마이크로그리드에서는 전력균형을 유지하는 것이 가장 중요한 요소이다. 본 논문에서는 이를 위해 DC 그리드의 전압과 전류에 대한 Droop 곡선을 형성하여 정해진 전압의 범위에 대해 분산전원과 에너지 저장장치에서의 협조제어를 통해 전력 균형을 유지하며, 배터리의 SOC에 따른 운전 영역도 설정해두어 배터리 수명관리와 보호도 고려하였다.

그림 6에 DC 그리드 전압과 전류의 Droop곡선과 에너지 저장장치와 분산전원들의 협조제어에 대한 개념도를 나타내었다. Droop곡선은 DC 그리드의 전압과 배터리 SOC에 따라 그림에서 보는바와 같이 3영역으로 분류된다. A 영역은 DC 그리드 전압  $\pm(3\sim 5)\%$  구간으로서 배터리의 충·방전율을 100%로 사용하고 최대 1C rate로 운영하며 이 때 등가저항은 식 (4)와 같다. +3% 이상 영역에서는 잉여전력이 많이 유입되므로 분산전원의 출력을 감소시키며 -3% 이하의 DC 그리드에 전력이 부족한 영역이므로 출력 조절이 가능한 엔진 발전의 출력을 증가시켜 전력균형을 유지하도록 한다. B 영역은 DC 그리드 전압 3%~ -3% 구간으로서 배터리의 충·방전율을 70%로 사용하는 구간으로서 평상시 운전되는 영역이 된다. 평상시 배터리 C Rate를 70%만 사용하도록 배터리를 관리하며 등가저항은 식(5)와 같다. C 영역은 배터리의 과충전·과방전 보호 영역으로서 SOC가 정

해진 운용범위를 초과하게 되면 충·방전 하는 전력량을 급격히 줄여주어 배터리를 보호하도록 하였다. 이때 감당전력은 용량의 10%이며 계산되는 등가저항은 식 (6)과 같다. 그림에서 보듯이 각 영역마다 Droop곡선의 기울기가 변하게 되는데 이는 배터리 감당 전력이 달라지면서 Droop곡선을 형성하는 등가저항이 자율적으로 변하기 때문이며 계산된 등가저항을 식 (1)에 대입하여 에너지 저장장치의 전압 레퍼런스  $V_{DROOP}^*$ 를 생성해 낸다.

$$\Delta V_{dc} = 20[V](5\%), V_{dcmin} = 380[V] \quad (4)$$

$$P_{Batt} = 3.0[kW], R_{Batt} = \frac{\Delta V_{dc} \times V_{dcmin}}{P_{Batt}} = 2.53[\Omega]$$

$$\Delta V_{dc} = 20[V](5\%), V_{dcmin} = 380[V] \quad (5)$$

$$P_{Batt} = 2.1[kW], R_{Batt} = \frac{\Delta V_{dc} \times V_{dcmin}}{P_{Batt}} = 3.62[\Omega]$$

$$\Delta V_{dc} = 20[V](5\%), V_{dcmin} = 380[V] \quad (6)$$

$$P_{Batt} = 0.3[kW], R_{Batt} = \frac{\Delta V_{dc} \times V_{dcmin}}{P_{Batt}} = 25.3[\Omega]$$

그림 7에 분산전원과 에너지 저장장치의 협조제어에 대한 운용범위에 대하여 나타내었다. 풍력발전과 태양광 발전은 출력조절이 불가능한 분산전원으로, 평상시에 최대출력제한운전을 수행하며 DC 그리드에 잉여전력이 많이 생산되어 DC 그리드 전압이 정해진 5%를 초과하는

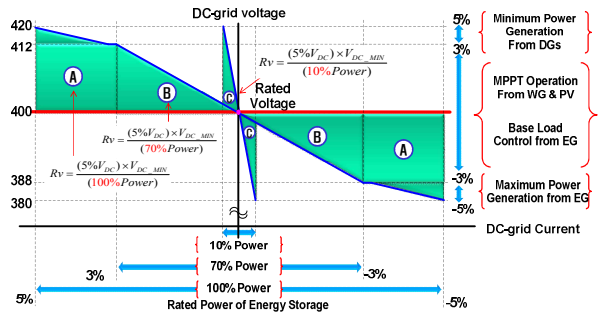


Fig. 6 Coordinated droop control of distributed generations and energy storage

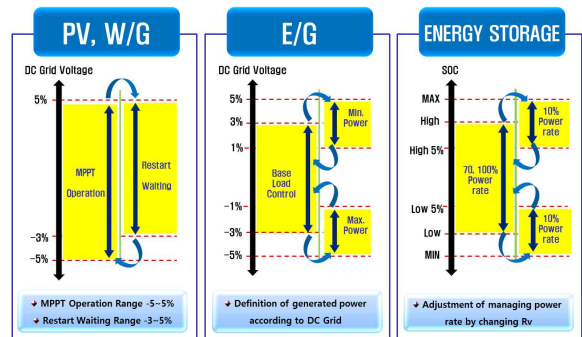


Fig. 7 Operation range of distributed generations and energy storage

경우에는 최대출력 운전을 포기하고 재운전 대기 영역으로 들어가게 된다. 후에 DC 그리드에 전력이 부족할 경우인 DC 그리드 전압 -3% 미만이면 다시 최대출력 운전영역으로 돌아가게 된다.

엔진발전은 출력을 조절할 수 있는 분산전원으로서, DC 그리드의 전력 상황에 따라 3 state로 전력제어를 수행한다. 이는 DC 그리드 전압 상태를 보고 3%~3% 영역에서는 기저부하 담당운전을 수행하며, -3%~-5% 영역에서는 DC 그리드에 전력이 매우 부족한 상태이므로 정격출력 운전을 하게 되며 3%~5% 영역에서는 DC 그리드에 전력이 여유로운 상태이므로 출력저감운전을 통해 연료소비를 최대한 줄이도록 한다. 에너지 저장장치의 SOC 최대 영역인 MAX, MIN에 마진을 두어 HIGH~LOW 영역에서 운전하도록 하며 이 영역에서는 DC 그리드 전압에 따라 70%, 100% 전력 제어를 수행한다. 정해진 HIGH를 초과하거나 LOW보다 내려가게 되면 등가저항을 조절하여 배터리 감당 용량을 10%로 변환시켜 준다.

그림 8은 에너지 저장장치의 과충전·과방전 보호를 위한 운용 개념이다. 다양한 배터리들이 개발 되고 있으며 이에 대해 서로 다른 SOC 운용 범위가 있으므로, 이를 고려하여 운용 범위를 정해주도록 한다. SOC의 상하한 운용영역에 도달하게 되면 충방전 용량을 줄여줌으로 인해 배터리를 보호한다. 또한 분산전원들은 협조제어를 통해 이를 간접적으로 도와주게 된다.

### 3.3 에너지 저장장치 운영기법

배터리 보호를 위한 에너지저장 동작 시퀀스를 그림 9에

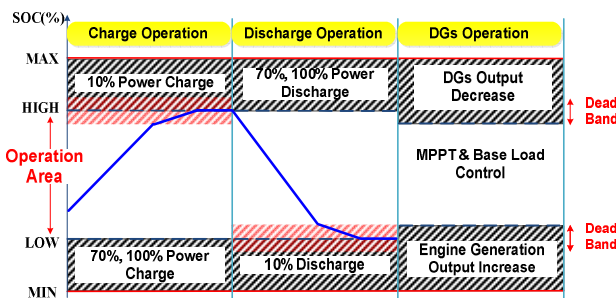


Fig. 8 SOC limit control

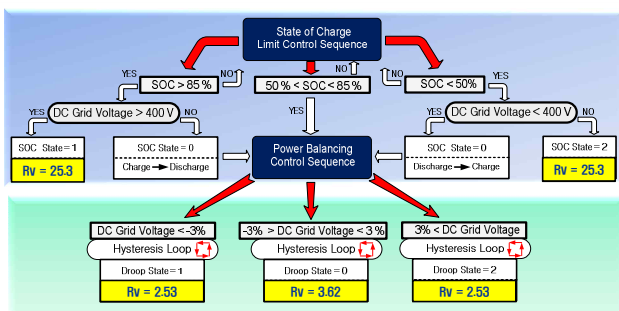


Fig. 9 Operation sequence of energy storage

나타내었으며 본 논문에서는 배터리 SOC를 50%~85% 까지 사용하도록 설정하였다. 상위 SOC 제한 제어 시퀀스에서는 배터리 SOC에 대한 운용영역을 설정하고 SOC 영역별로 등가저항을 조정한다. SOC가 운용범위 내에 있을 경우에는 하위 전력 균형 제어 시퀀스로 들어가게 되고 DC 그리드 전압에 따라 등가저항을 조정한다. 이로 인해 Droop 곡선은 DC 그리드에 유입되는 전력과 배터리 SOC에 의해 자동적으로 변경된다. SOC가 85%까지 증가하게 되면 등가저항은 25.3으로 변경되고, DC 그리드 전압이 400V보다 내려갈 때까지 그 값을 유지한다. DC 그리드 전압이 400V보다 내려가게 되면 충전에서 방전으로 천이되는 시점이므로 전력 관리로 들어가게 된다. SOC가 50%까지 감소하게 되면 등가저항은 25.3으로 변경되고, DC 그리드 전압이 400V를 초과할 때까지 그 값을 유지한다. 400V를 초과하게 되면 방전에서 충전으로 천이되는 시점이므로 전력관리 시퀀스로 들어가게 된다. SOC가 50~85%사이 일 때는 바로 전력관리 시퀀스로 들어간다.

전력관리 시퀀스에서는 DC 그리드 전압을 기준으로 70% 또는 100% 전력 감당을 하게 된다. DC 그리드 전압 -3%~3%사이에서는 70% 전력을 감당하게 되고 이때 등가저항은 3.62로 유지된다. DC 그리드 전압이 -3%보다 낮거나 3%보다 높아지게 되면 100% 전력 감당을 하게 되며 이 때 등가저항은 2.53으로 유지된다. 이로 인해 Droop 곡선은 DC 그리드에 유입되는 전력과 배터리 SOC에 의해 자동적으로 변경된다.

### 3.4 구성요소들의 제어

제안하는 독립형 DC 마이크로그리드 시스템에 포함된 구성요소들의 제어블럭도를 그림 10에 나타내었으며 앞서 설명했던 내용들을 상세하게 정리하고자 한다.

태양광 발전 컨버터는 일사량과 온도에 의해 변동하는 태양광 어레이의 출력을 DC 그리드에 공급하는 역할을 하며 일사량과 온도에 의해 변동하는 태양전지의 출력이 항상 최대 출력을 얻기 위해서 MPPT (Maximum Power Point Tracking)제어를 수행한다. 본 연구에서는 MPPT제어 기법 중에서 안정적이고 구현이 용이한 Perturbation & Observation기법을 적용하였다. 협조 제어기에서는 DC 그리드 전압을 상시 측정하여 컨버터 운전 모드를 결정한다.

풍력발전 컨버터는 풍속에 따라 변동하는 풍력발전기의 출력을 DC 그리드에 공급하는 역할을 하며 풍력발전기의 출력을 항상 최대로 얻기 위해서 MPPT제어를 수행한다. 발전기는 DC 그리드에 연결하기 용이하며 가용범위가 넓은 PMSG(Permanent Magnet Synchronous Generator)를 사용하였다. 풍력발전기의 각속도가 일정하도록 전류제어를 하면, λ가 일정하게 유지되어 블레이드의 출력계수가 최대가 되므로 기계적 출력은 최대가 되는 방식을 적용하였다<sup>[9]</sup>. 협조 제어기에서는 태양광

발전 컨버터와 마찬가지로 DC 그리드 전압을 상시 측정하여 운전 모드를 결정한다.

에너지 저장 컨버터는 DC 그리드로 또는 역으로 전력을 전달할 수 있는 양방향 컨버터로서 DC 그리드의 Droop제어를 수행한다. 실측 DC 전압과 협조제어기에서 계산된  $V_{DROOP}^*$ 를 측정하여 DC Voltage Controller를 통과시키고 생성된 전류 레퍼런스와 컨버터 3상의 실측 전류를 측정하여 Current Control을 거쳐 컨버터의 게이트 펄스를 생성해낸다.  $V_{DROOP}^*$ 와 운영 모드는 앞서 설명한 동작 시퀀스에 의하여 결정된다.

엔진발전기는 협조제어기로부터 DC 그리드 전압에 따른 전력 지령을 인가받고 그에 따른 각속도 제어를 수행하게 되며 부하용 컨버터는 기본적으로 부하가 원하는 전압을 제어하는 역할을 수행하게 된다.

#### 4. 시뮬레이션을 이용한 검증

제안하는 독립형 DC 마이크로그리드 제어의 타당성을 검증하기 위하여 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용하여 시뮬레이션을 수행하였다. 실제와 유사한 성능의 검증을 위해서는 반드시 분산전원들의 특성이 시뮬레이션 안에 반영되어야 한다. 이를 위해 사용하는 분산전원들을 PSCAD/EMTDC 내부에 모델링하였다. 태양전지는 그 특성 수식을 사용하여 내부 Controller에서 실시간으로 출력을 만들어 내도록 하였고, PMSG는 PSCAD/ EMTDC의 라이브러리에 포함되어 있는 동기발전기를 변형하여 그 출력 특성을 구현하였다. 사용하는 배터리는 Ni-MH 배터리로서 특성 수식을 사용하여 모델링 되었으며 SOC는 전류적분방식을 사용하였다<sup>[10]</sup>.

표 1은 시뮬레이션에 사용된 독립형 DC 마이크로그리드 구성요소들의 파라미터이다.

시뮬레이션의 목적은 DC 그리드 내부에서 발생할 수 있는 모든 상황에 대해 제안하는 기법의 타당성 검증이

Table 1 Parameters of components

Engine Generator	Rated Power	Rated Voltage	Rated Current	Rated Frequency	Rated Velocity
	1 [kW]	200 [V]	8.7 [A]	400 [Hz]	1714 [rpm]
Wind Power Generator	Rated Power	Rated Voltage	Rated Current	Rated Frequency	Rated Velocity
	3 [kW]	220 [V]	15 [A]	60 [Hz]	1800 [rpm]
PV Array	Rated Power	$V_{MPPT}$	$I_{MPPT}$	$C_{PV}$	$L_{PV}$
	3 [kW]	250 [V]	12 [A]	270 [uF]	2 [mH]
Ni-MH Battery	Rated Power	Rated Voltage	Rated Current	$L_{BAT}$	Internal Resistance
	3 [kWh]	250 [V]	20 [A]	2 [mH]	0.11 [ohm]
AC Load	Rated Power	Rated Voltage	Rated Current	$L_{LOAD}$	$C_{LOAD}$
	3.3 [kW]	220 [V]	15 [A]	2 [mH]	20 [uF]

Table 2 Checking items

No.	Checking items in Simulation
1	Operation Sequence of Energy Storage
2	SOC Limit Control of Energy Storage
3	Control Accuracy in DC Grid Voltage
4	MPPT & Coordinated Control of DGs
5	Transient Phenomena of DC Grid Voltage
6	Percentage of DC Grid with respect to Power

며 또한 운용에 일어날 수 있는 과도현상도 체크해 보아야 한다.

이를 위해 타당한 시나리오를 설정하고 약 15초 동안 시뮬레이션을 수행하였으며 최대 전력이 발생하도록 하여 DC 그리드 전압의 변동을 분석하였으며 표 2에 시뮬레이션에서 점검하고자 하는 항목들을 나타내었다.

그림 11에 통합 연계제어 시뮬레이션 결과를 나타내었다.

그림 11(a)는 위에서부터 DC 그리드 전압, 부하 전력, 태양광발전, 풍력발전, 엔진발전의 전력을 나타내며 DC 그리드 전압은 운영기법에 의해서 총용량 대비 380~420v에서 안전하게 제어되고 있음을 확인하였으며 부하에도 원하는 전력을 안정적으로 공급하고 있음을 보여준다. 태양광발전과 풍력발전은 입력되는 일사량 데이터와 풍속 데이터에 따라서 출력이 가변되고 있으며 MPPT제어가 원활히 수행되고 있음을 보여준다. 또한 DC 그리드 전압에 따라서 협조제어를 원활히 수행하여 DC 그리드의 전력균형을 유지하고 있음을 확인하였다. 엔진발전은 전력 지령 제어를 수행하고 있으며 DC 그리드 전압에 따라서 3 State로 스텝 체인지를 통해 DC 그리드의 전력균형을 유지하도록 협조제어를 수행함을 확인하였다.

그림 11(b)는 위에서부터 배터리 SOC, 등가저항, 태양광발전 FLAG, 풍력발전 FLAG, 엔진발전 FLAG를 나

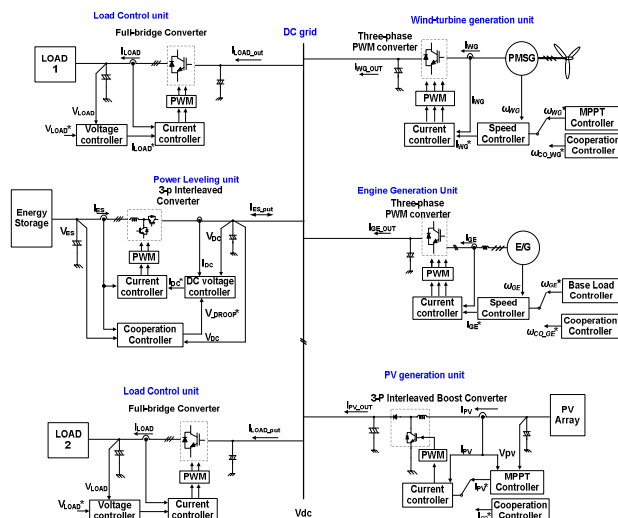


Fig. 10 Entire control block

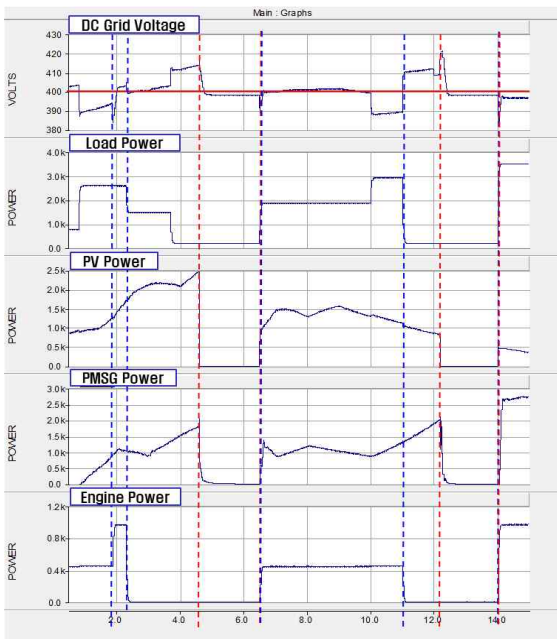
타낸다. 배터리 SOC는 정해진 범위 안에서 안정적으로 운영되고 있으며 배터리 보호제어가 제안하는 운영기법을 통해 효과적으로 이루어짐을 확인하였다. Droop제어를 형성하는 등가저항은 배터리 SOC와 DC 그리드 전압에 따라서 변환되고 있으며, 태양광발전, 풍력발전, 엔진발전의 FLAG는 DC 그리드의 전압 상황에 따라서 변환되어 원활한 협조제어가 수행되고 있음을 확인하였다.

그림 11(c),(d)는 DC 그리드 전압-전류의 Droop 곡선 시뮬레이션 결과이다. 제안한 협조적 Droop곡선과 매우 유사한 특성을 얻었으며 SOC 보호 운용구간, DC 그리드 전압에 따른 Droop곡선의 변경되는 부분을 모두 검증할 수 있었다.

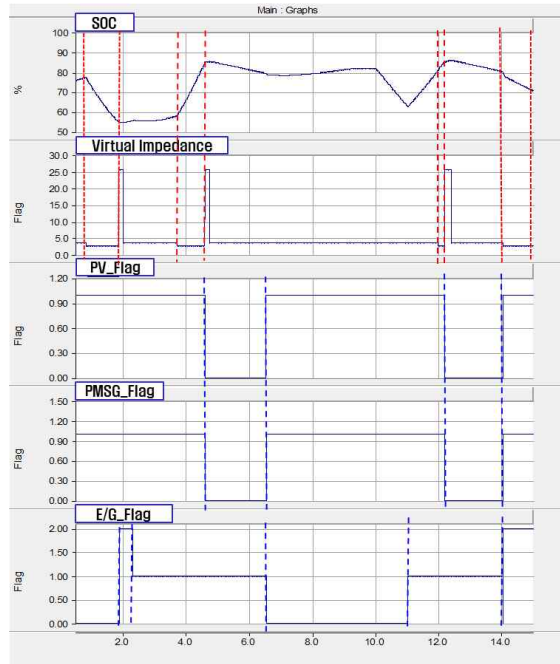
앞서 표 2에서 확인하고자 하였던 사항들은 시뮬레이션 결과들에서 보는 바와 같이 모두 검증이 되었으며 전체 시뮬레이션 동안에 과도상태도 매우 안정적임을 보였다.

### 5. 실험을 통한 결과분석

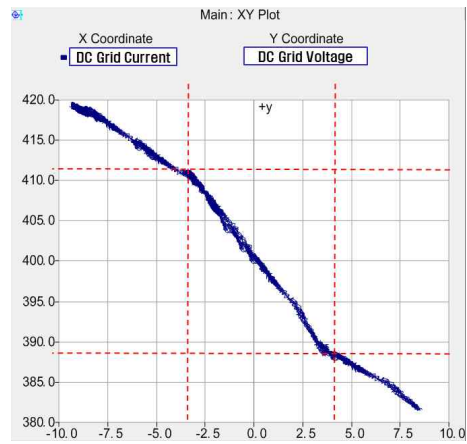
그림 12는 독립형 DC 마이크로그리드 통합 실험을 위해 구축된 실험환경이다. 구비된 PV Array 시뮬레이터의 용량은 3kW, 풍력발전 시뮬레이터의 용량은 3kW이며 부하는 3.3kW의 전자부하를 사용하였다. 실험에 사용된 분산전원들은 모두 임의의 일사량이나 풍속에 대해서 출력의 변동을 줄 수 있으므로 실제 환경에서의 특성 적용이 가능하다. 또한 배터리는 전용 BMS를 사용하여 CAN 통신을 통해 배터리 컨버터에 SOC 및 기타 정보를 수신한다. 실험 시 중요 점검 항목과 하드웨어 파라미터들은 시뮬레이션과 동일하다.



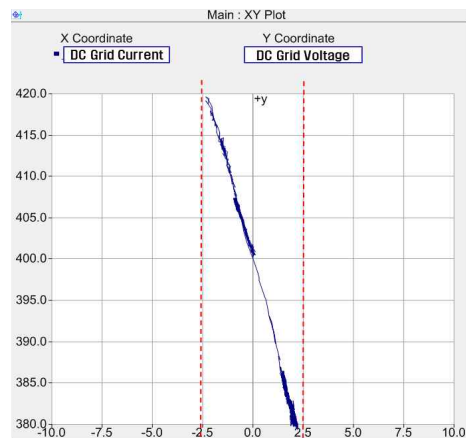
(a) DC grid voltage, power of load, PV generation, wind power generation, engine generation



(b) SOC of battery, virtual impedance, flag of pv generation, wind power generation, engine generation



(c) Coordinated droop curve



(d) SOC limit Droop curve

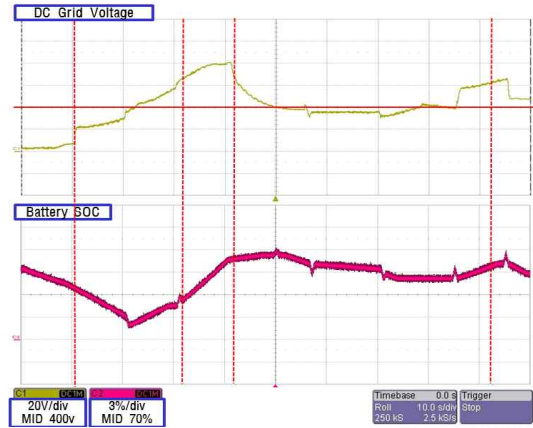
Fig. 11 Simulation results

그림 13(a)는 위에서부터 태양광발전, 풍력발전, 엔진발전, 부하소모 전력을 나타낸다. 태양광발전과 풍력발전은 시뮬레이터에 입력되는 일사량 데이터와 풍속 데이터에 따라서 출력이 가변되고 있으며 MPPT제어가 원활히 수행되고 있음을 보여준다. 또한 각 기기들은 DC 그리드 전압에 따라서 협조제어를 원활히 수행하여 DC 그리드의 전력균형을 유지하고 있음을 확인하였다. 엔진발전은 전력 지령 제어를 수행하고 있으며 DC 그리드 전압에 따라서 3 State로 스텝 체인지를 통해 DC 그리드의 전력균형을 유지하도록 협조제어를 수행함을 확인하였다. 부하는 스텝적으로 변경하면서 과도 없이 DC 그리드로부터 안정적으로 전력을 공급받고 있다.

그림 13(b)는 DC 그리드 전압과 배터리 SOC를 나타낸다. 현상을 짧은 시간 내에 명확히 분석하고자, 배터리 SOC의 제한치를 좁게 설정하여 실험을 수행하였다. 배터리 SOC는 정해진 범위 안에서 안정적으로 운영되고 있으며 배터리 보호제어가 효과적으로 이루어짐을 확인하였다. 또한 배터리와 분선전원들의 협조적 Droop 제어에 의하여 총용량 대비 DC 그리드 전압이 기준치  $\pm 5\%$ 내에서 유지되면서 DC 그리드의 전력균형을 유지함을 확인하였다.

그림 13(c),(d)는 DC 그리드 전압-전류의 Droop 곡선

이다. 제한한 협조적 Droop곡선과 매우 유사한 특성을 얻었으며 SOC 보호 운용구간, DC 그리드 전압에 따른 Droop곡선의 변경되는 부분을 모두 검증할 수 있었다.



(b) DC grid voltage, SOC of battery

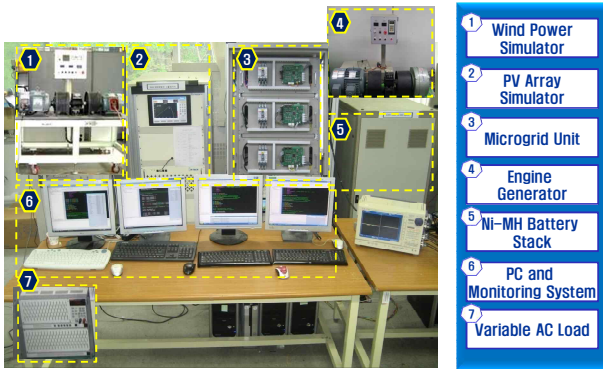
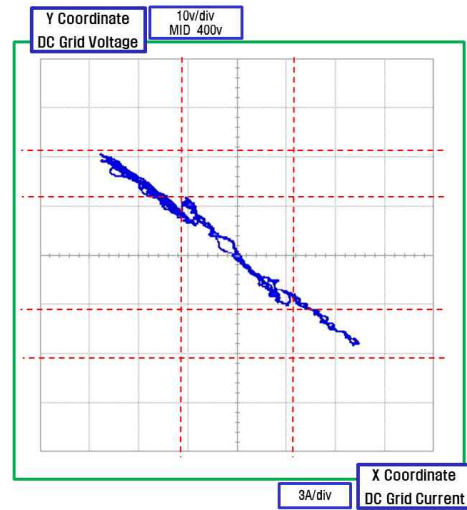
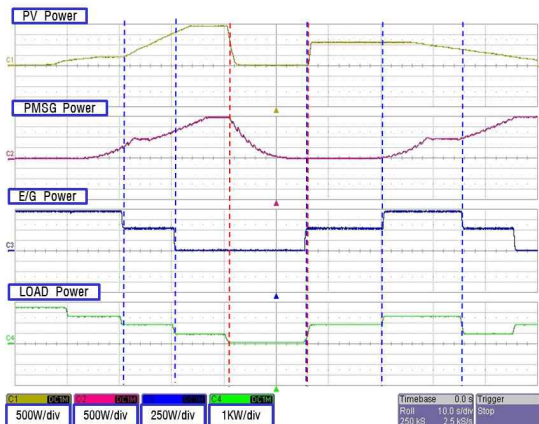


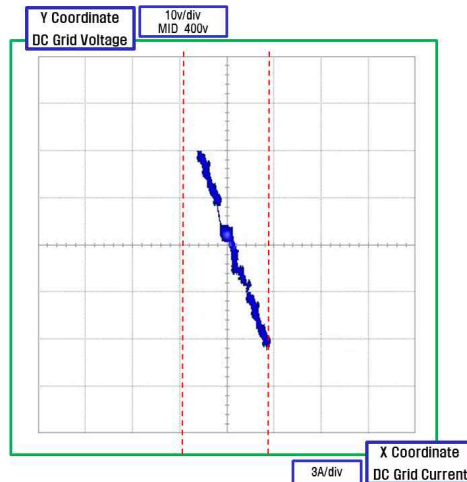
Fig. 12 Experimental set-up



(c) Coordinated droop curve



(a) Power of PV generation, wind power generation, engine generation, load



(d) SOC limit Droop curve

Fig. 13 Experimental result



앞서 표 2에서 확인하고자 하였던 사항들은 실험 결과들에서 보는 바와 같이 모두 검증이 되었으며 전체 실험 동안에 과도상태도 매우 안정적임을 보였다. 따라서 제안하는 운용기법은 어떠한 상황에서도 DC 마이크로그리드를 안정적으로 운용이 가능하며 부하에 고품질의 전력을 공급할 수 있음이 검증되었다.

## 6. 결 론

본 논문에서는 독립형 DC 마이크로그리드의 신뢰도와 분산전원의 활용도를 향상시키기 위한 협조적 Droop 제어기법을 제안하였다. 시스템의 동작 타당성을 체계적으로 분석하기 위해 PSCAD/EMTDC 소프트웨어를 이용한 시뮬레이션 모델을 개발하였으며 이를 기반으로 하드웨어 시뮬레이터를 제작하여 실험적으로 제안하는 협조적 Droop 제어기법의 동작을 검증하였다.

제안하는 독립형 DC 마이크로그리드는 자율제어 방식을 토대로 DC 그리드 전압에 대해 분산전원과 에너지저장의 협조적 제어를 통해 높은 신뢰도와 안정성을 얻을 수 있었으며 우수한 배터리 관리 능력도 보여준다. 향후 독립형 전원시스템과 DC 배전 시스템 및 스마트 그리드에 적용 가능할 것으로 기대된다.

본 연구는 중소기업청의 산학연 공동기술개발 사업(과제번호:000454680111)의 지원에 의하여 이루어진 연구로서, 관계부처에 감사드립니다.

## 참 고 문 헌

- [1] D. Salomonsson, L. Sode, A. Sannino, "An Adaptive Control System for a DC Microgrid for Data Centers," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 44, No. 6, pp. 1910-1917, Nov. 2008.
- [2] H. Kakigano, Y. Miura, T. Ise, "Low-Voltage Bipolar-Type DC Microgrid for Super High Quality Distribution," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 25, No. 12, pp. 3066-3075, Dec. 2010.
- [3] Bi. Rui, Ding. Ming, Xu. Ting Ting, "Design of common communication platform of microgrid," *Power Electronics for Distributed Generation Systems (PEDG)*, Jun. 2010.
- [4] A. Ruiz-Alvarez, A. Colet-Subirachs, O. Gomis-Bellmunt, J.M. Fernández -Mola, J. López-Mestre, A. Sudria -Andreu, "Design, management and commissioning of a utility connected microgrid based on IEC 61850," *Innovative Smart Grid Technologies Conference Europe (ISGT Europe)*, Oct. 2010.
- [5] C. Lee, C. Chu, P. Cheng, "A New Droop Control Method for the Autonomous Operation of Distributed Energy Resource Interface Converters," *IEEE Transactions on Power Electronics*, Vol. 28, No. 4, pp. 1980-1993, April, 2013.
- [6] F. Katiraei, R. Iravani, P. Lehn, "Micro-grid autonomous operation during and subsequent to islanding process," *IEEE Transaction on Power Delivery*, Vol. 20, No. 1, pp. 248-257, Jan. 2005.
- [7] B. Meersman, J.D.M. De Kooning, L. Vandeveldel, "Analogy Between Conventional Grid Control and Islanded Microgrid Control Based on a Global DC-Link Voltage Droop," *IEEE Transactions on Power Delivery*, Vol. 27, No. 3, pp. 1405-1414, July. 2012.
- [8] Woo-Hee, Lee, Mi-Young Lee, Jun-Ha Lee, Hoong-Joo Lee, "Calculation of capacity of solar cell and battery for stable solar system design," *Journal of the Korea Academia-Industrial cooperation Society*, Vol. 6, No. 5, pp. 396-400, 2005.
- [9] Hyun-Jun Kim, Do-Hyun Kim, Kyung-Tae Kim, Byung-Moon Han, "Operation Mode Development and Evaluation for Grid-Tied PMSG Wind Power System Combined with Battery Energy Storage," *The Transaction of The Korean Institute of Electrical Engineers*, Vol. 61, No. 1, pp. 41-49, Jan. 2012.
- [10] Ji-Heon Lee, Hyun-Jun Kim, Byung-Moon Han, Yu-Seok Jeong, Hyo-Sick Yang and Han-Ju Cha, "DC Micro-grid Operational Analysis with a Detailed Simulation Model for Distributed Generations," *Journal of Power Electronics*, Vol. 11, No. 3, pp. 350-359, May. 2011.



**한태희(韓台熙)**

1988년 8월 27일생. 2011년 대덕대 전기공학과 졸업. 2012년 명지대 대학원 전기공학과 석사과정.



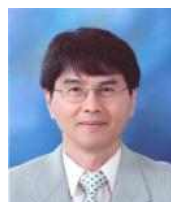
**이지헌(李知憲)**

1983년 12월 19일생. 2008년 명지대 전기공학과 졸업. 2008년~2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**김현준(金賢竣)**

1985년 11월 12일생. 2011년 명지대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 전기공학과 석사과정.



**한병문(韓炳文)**

1976년 서울대 전기공학과 졸업. 1988년 미아리조나 주립대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1992년 동 대학원 전기공학과 졸업(공학박사). Westinghouse 중앙연구소 선임연구원. 인천대 전기공학과 조교수. 현재 명지대 공과대학장 및 전기공학과 교수. 2011년 당 학회 회장.