

# 전력 변환 손실 저감을 위한 하이브리드 주거배전시스템

변병주<sup>1</sup>, 서현욱<sup>1</sup>, 최종묵<sup>1</sup>, 이영진<sup>†</sup>, 최규하<sup>1</sup>

## A Study on Residential Hybrid Distribution System for Reducing Power Conversion Loss

Byeng-Joo Byen<sup>1</sup>, Hyun-Uk Seo<sup>1</sup>, Jung-Muk Choi<sup>1</sup>, Young-Jin Lee<sup>†</sup>, and Gyu-Ha Choe<sup>1</sup>

**Abstract** - This paper proposes residential hybrid distribution system that can supply AC power and DC power to AC load and DC load at the same time. This hybrid distribution system consists of three parts: bidirectional inverter, step-up converter and step-down converter. Also that is used to supply voltage to home application is classified of AC load and DC load as load characteristics. The performance of proposed hybrid distribution system is validated through the hardware implementation and the experimental results.

**Keywords:** DC distribution, DC supply voltage, home application, DC interaction

### 1. 서 론

오늘날 화석연료의 고갈과 그에 따른 환경 문제로 인해 신재생에너지를 이용한 분산전원시스템의 관심이 높아지고 있다<sup>[1]</sup>. 특히 환경오염이 없으며 발전을 위한 자원이 풍부한 태양광, 풍력, 연료전지 등이 많이 연구되고 있다<sup>[2][3]</sup>. 이 중에서 태양광과 연료전지의 경우 발전되는 출력이 직류이며, 풍력의 경우 출력이 교류이다. 발전된 출력의 경우 각 신재생에너지마다 다르기 때문에 수용가의 부하에서 신재생에너지를 사용하기 위해서는 기존의 계통과의 연계를 하기 위하여 계통연계형 인버터와 같은 전력전자 장비를 사용해서 원하는 레벨로 변환을 하여 사용해야 한다. 수용가에서 분산전원을 통해 발전한 전력을 전력전자 장비를 통해 부하 및 계통과 연계할 수 있는 전압의 유형 및 레벨을 변환시키는 일은 변환손실을 발생시킨다<sup>[4][5]</sup>. 기존 태양광 PCS의 경우 신재생에너지에서 부하까지 변환되는 횟수는 최소 2번이며 직류를 사용하는 부하의 경우 1번 더 변환을 하여 3번까지 변환이 발생한다<sup>[4]</sup>. 전력의 변환에 따른 손실은 전력전자 장비의 효율과 연관이 깊기 때문에 변환 손실은 전력전자장비의 효율과 변환횟수에 따라서 손실

이 결정된다.

현재 가정에서 사용하는 부하 중에서 직류를 사용하는 부하의 사용이 급격하게 증가하고 있다<sup>[6]</sup>. 직류가 직접 공급 가능한 부하는 대표적으로 LED 전등과 LED 모니터, LCD모니터, 컴퓨터, 노트북 등을 고려할 수 있으며, 이러한 부하들은 전체 부하들 중에서 현재 많은 비율을 차지하진 않지만, 교류부하와 직류부하의 비율이 8:2 정도로 상당한 비율을 차지하고 있으며 미국 전력연구소(EPRI)에 따르면, 2020년에는 5:5의 비율로 직류부하의 비율이 지속적으로 증가할 것으로 예상 했다<sup>[7]</sup>. 기존의 계통에서 직류를 사용하는 부하의 증가에 따라 그에 따른 변환손실이 증가하며 이 손실을 줄이기 위한 방안으로써 직류를 공급하는 방식의 배전방식이 이미 많은 결과들이 나와있다. 기존 연구의 대부분이 데이터 센터나 빌딩에 집중되어 있으며 아파트나 주택과 같은 곳에서의 연구가 필요하다고 생각된다<sup>[8]</sup>. 배전방식의 연구는 크게 기존 교류 배전을 이용하는 방식과 직류를 사용하는 배전으로 나뉜다. 기존 계통을 이용하는 연구에서는 일반적으로 입력단에서 교류를 직류를 변환하는 AC/DC 컨버터를 사용하여 내부에서 직류를 이용하는 연구를 하며, 새로운 직류계통을 사용하는 방식의 경우 입력단에 DC/DC컨버터를 사용하여 내부에서 필요한 직류를 얻는 형태의 연구를 한다<sup>[9][13]</sup>. 기존 계통을 유지하는 연구에서는 직류배전의 효율성을 판단하기 위하여 빌딩 내에 교류를 사용하는 배전방식과 직류를 사용하는 방식을 비교를 하는 연구를 하였고, 여기서는 빌딩 내에서 신재생에너지를 사용하여 직류배전을 할 경우

Paper number: TKPE-2013-18-5-1 ISSN: 1229-2214

<sup>†</sup> Corresponding author: leeyj22@konkuk.ac.kr, Dept. of Electrical Eng., Konkuk University

Tel: +82-2-450-3496 Fax: +82-2-447-9186

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

Manuscript received Mar. 8, 2013; accepted May 28, 2013

기존 계통에 의하여 배전 받는 것보다 우수하다는 결론을 내렸다<sup>[9]</sup>. 그리고 계통에 직류를 사용하여 배전을 하는 경우에 효율성을 판단하기 위하여 기존계통과의 비교를 하였다<sup>[10]</sup>. 여기서는 신재생에너지와 같은 추가적인 분산전원이 없이도 DC/DC 컨버터의 효율개선과 높은 공급전압을 통해 기존의 계통을 대체할 수 있다는 결론을 내렸다. 하지만 현재 교류 계통을 직류로 대체하는 것은 많은 비용이 소요되어 어렵다. 현 시점에는 기존계통을 유지하면서 신재생에너지의 변환손실을 줄일 수 있는 직류배전 방식을 연구하는 것이 현실적이다.

직류로 배전을 하는데 있어서 공급전압을 선정하는 것은 중요한 요소이다. 기존의 부하들은 입력되는 전압레벨이 다르기 때문에 직류를 공급함에 있어서 2가지 방법으로 나눌 수 있다. 첫째, 정류부만 사라지며 직류/직류 변환기는 존재하는 유형으로 이 경우에는 입력단의 전압의 레벨을 변환시켜주는 장치가 있기 때문에 직류 공급전압을 단일한 레벨로 공급할 수가 있다. 이 경우는 미국전기연구원(EPRI)와 일본 NTT 등에서 단일레벨로 전압을 공급하기 위한 적정 레벨선정에 대한 연구를 진행하고 있다<sup>[14][15]</sup>. 둘째, 직류/직류 변환기 자체가 사라지고 직접 전압을 인가해주는 유형이다. 이 경우에는 입력전압의 레벨이 부하에 따라서 편차가 크게 나기 때문에 직류 공급전압을 단일레벨이 아닌 다중레벨로 가야한다<sup>[16]</sup>. 이러한 다중레벨은 변환기를 사용하는 토폴로지를 사용해야하기 때문에 변환손실 측면에서 단일전압으로 인가하는 비교할 때 효율이 떨어진다.

본 논문에서는 1)기존의 인프라를 기반으로 신재생에너지와 기존 교류 전원을 사용하여 직류와 교류를 동시에 공급해줄 수 있는 하이브리드 배전방식의 시스템을 제안하고, 2)또한 제안된 배전시스템에 적합한 동작 제어알고리즘을 구성하였다. 3) 하이브리드 배전방식의 효율성을 검증하기 위하여 가정용 부하들을 특성에 따라 분류를 하고, 실제 가정용 전기부하를 사용하여 공급전원에 따라서 소비전력의 차이를 분석한다. 전체 시스템 동작은 3[kW] 시스템을 구성하여 하이브리드 배전시스템의 동작은 시뮬레이션 및 실험을 통하여 검증한다.

## 2. 제안된 하이브리드배전 시스템

하이브리드 배전을 위한 시스템은 직류 연계방식인 DC bus를 사용하는 구성방식을 채택하였다. 본 시스템의 경우 크게 세부분으로 구성된다. 그 세부분은 계통과의 연계 그리고 무효전력을 제어하여 역률을 1로 제어해 주기 위한 양방향 계통연계형 인버터, 태양광에서 발전되는 에너지를 MPPT제어를 통하여 최대로 사용하기 위한 승압 컨버터 그리고 직류부하에 일정한 전압으로 에너지를 공급하기 위하여 강압 컨버터로 구성되어 있다.

### 2.1 하이브리드배전 시스템의 동작모드

하이브리드배전 시스템은 신재생에너지를 사용하기 때문에 신재생에너지의 발전량과 부하의 소비전력량에 따라서 동작모드가 절환을 해야한다. 따라서 제안된 시스템은 그림 1과 같이 신재생에너지의 발전량과 직류부하의 전력소비량의 차이에 의해서 모드가 절환이 된다. 그에 따른 자세한 동작은 그림 2, 3, 4에 나타내었다. 각 모드는 직류부하에서 소비되는 전력량과 신재생에너지에서 발전되는 전력량의 관계에 따라서 3가지 유형(정격부하 모드, 중부하 모드, 발전 모드)으로 동작모드를 구성하였다.

### 2.2 정격부하모드

그림 2는 신재생에너지의 발전되는 전력량과 직류부하에서 소비되는 전력량이 동일한 경우로서 신재생에너지에서 발전되는 전력은 직류부하로만 공급이 되며 계통에서는 교류부하에 전력을 공급을 한다. 아래 식 (1), (2)는 정격부하모드의 경우, 계통과 태양광으로부터 부하에 전달되는 전력을 변환효율에 관한 식으로 나타내고 있다.

$$P_{DC} = \delta_{bs} \delta_{bu} P_{sol} \tag{1}$$

$$P_{AC} = P_{grid} \tag{2}$$

여기서  $P_{DC}$ : 직류부하 소비전력,  $P_{sol}$ : 태양광 발전전력,  $P_{AC}$ : 교류부하 소비전력,  $P_{grid}$ : 계통 입력전력,  $\delta_{bs}$ : 승압 컨버터 효율,  $\delta_{bu}$ : 강압 컨버터 효율.

위에 식에서 보면 정격부하모드의 경우 교류부하는 계통에서 전달되기 때문에 따로 변환손실이 발생하지는 않지만 직류부하의 경우 컨버터 두 대를 거쳐서 전달되기 때문에 두 번의 변환 손실이 발생하게 된다.

### 2.3 중부하 모드

그림 3는 중부하 모드로 신재생에너지에서 발전되는

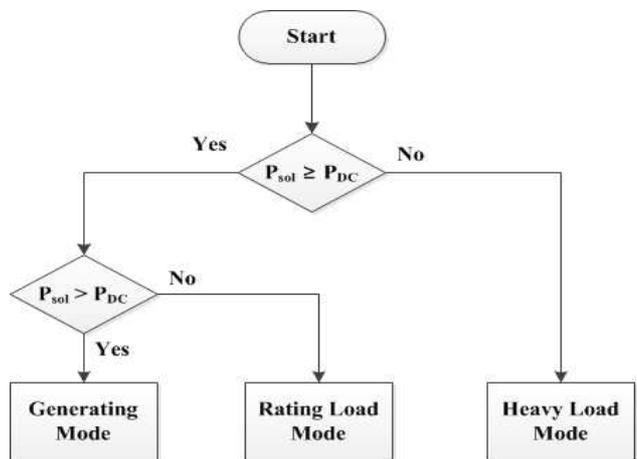


Fig. 1 Flow chart of operation mode change algorithm

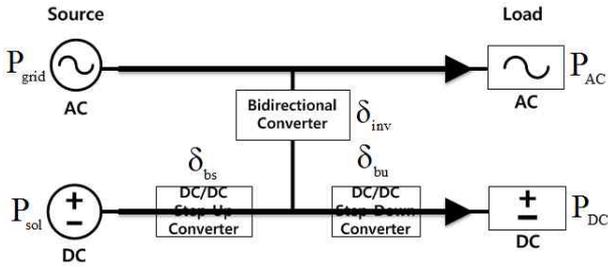


Fig. 2 Rating load mode

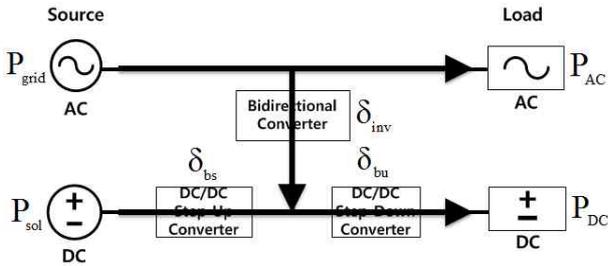


Fig. 3 Heavy load mode

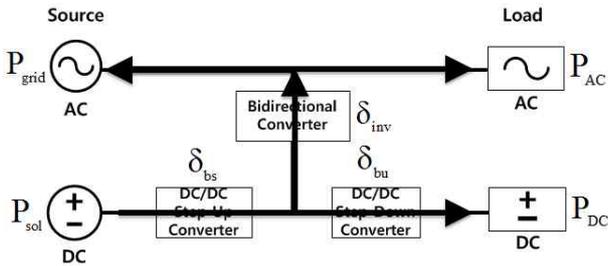


Fig. 4 Generation mode

전력량이 직류부하에서 소비되는 전력량보다 작은 경우로서, 신재생에너지에서 발전되는 전력만으로 부족함으로 계통에서도 전력을 끌어와서 같이 직류부하에 공급을 하게 된다. 아래 식 (3), (4)는 중부하모드의 경우, 계통과 태양광으로부터 부하에 전달되는 전력을 변환효율에 관한 식으로 나타내고 있다.

$$P_{DC} = \delta_{bs}\delta_{bu}P_{sol} + \frac{\delta_{bu}}{\delta_{inv}}\left(\frac{P_{DC}}{\delta_{bu}} - \delta_{bs}P_{sol}\right). \quad (3)$$

$$P_{AC} = P_{grid} - \frac{1}{\delta_{inv}}\left(\frac{P_{DC}}{\delta_{bu}} - \delta_{bs}P_{sol}\right). \quad (4)$$

여기서  $P_{DC}$ : 직류부하 소비전력,  $P_{sol}$ : 태양광 발전전력,  $P_{AC}$ : 교류부하 소비전력,  $P_{grid}$ : 계통 입력전력,  $\delta_{bs}$ : 승압 컨버터 효율,  $\delta_{bu}$ : 강압 컨버터 효율,  $\delta_{inv}$ : 양방향 컨버터 효율.

위에 식에서 보면 중부하모드의 경우 계통과 신재생 에너지에서 전력을 전달받기 때문에 정격부하모드와 달리 인버터의 변환효율에 관련된 2번째 항이 나타난다.

### 2.4 발전 모드

그림 4는 신재생에너지에서 발전되는 전력량이 직류부하에서 소비되는 전력량보다 많은 경우로서, 신재생 에너지에서 발전되는 전력이 직류부하에서 소비되는 전력보다 많음으로 계통과 교류부하로 전력이 전달되게 된다. 아래 식 (5), (6)은 발전모드의 경우, 계통과 태양광으로부터 부하에 전달되는 전력을 변환효율에 관한 식으로 나타내고 있다.

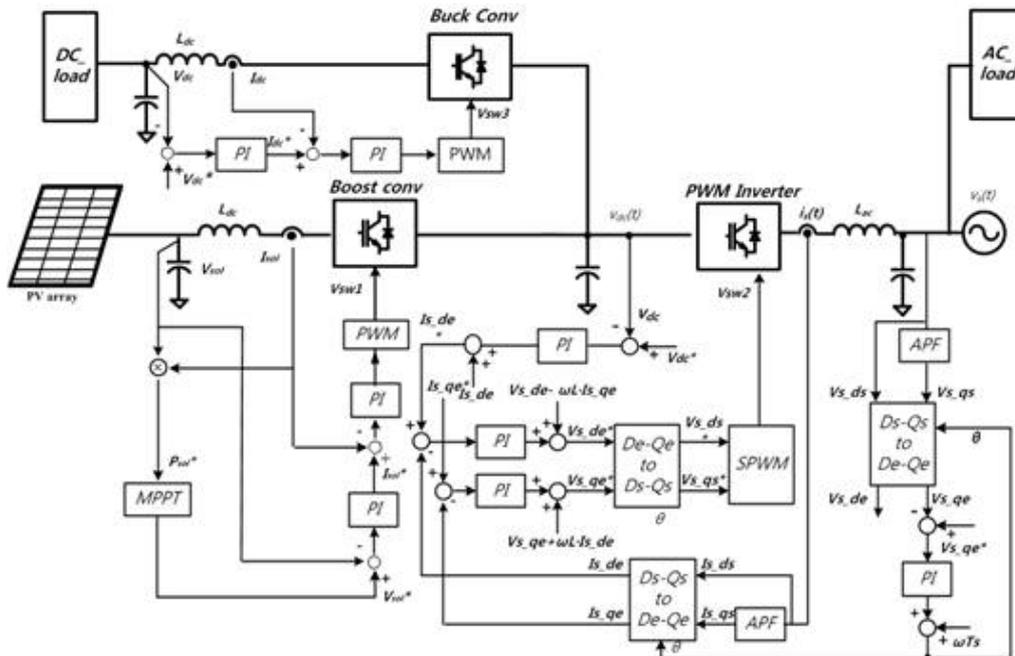


Fig. 5 Control block diagram

$$P_{AC} = \delta_{inv} (\delta_{bs} P_{sol} - \frac{P_{DC}}{\delta_{bu}}) + P_{grid}. \quad (5)$$

$$P_{DC} = \frac{P_{DC}}{\delta_{bu}}. \quad (6)$$

여기서  $P_{DC}$ : 직류부하 소비전력,  $P_{sol}$ : 태양광 발전전력,  $P_{AC}$ : 교류부하 소비전력,  $P_{grid}$ : 계통 입력전력,  $\delta_{bs}$ : 승압 컨버터 효율,  $\delta_{bu}$ : 강압 컨버터 효율,  $\delta_{inv}$ : 양방향 컨버터 효율.

위 식에서 보면 신재생에너지에서 발전된 전력과 직류부하에서 소비전력의 차이만큼 발전되며, 그 전력은 계통의 전력과 함께 교류부하로 들어가는 것을 알 수 있다.

### 2.5 하이브리드 배전시스템의 제어선도

그림 5는 하이브리드 배전시스템의 통합 제어선도를 나타내고 있다. 부스트 컨버터의 경우, 신재생에너지에서 발생하는 전력의 최대치를 추종하기 위해 MPPT기능을 수행하는데, P&O (Perturbation&Observation)이라는 추종 알고리즘을 이용한다<sup>[7]</sup>. 또한 MPPT를 수행하기 위하여 입력단 전압제어를 수행하는데, 입력단 전압과, 전류를 피드백 받아서 사용하는 2중 루프 PI 제어를 사용한다. 벡컨버터의 경우, 출력단에 전압제어를 수행하는데, 여기서도 출력단 전압과 전류를 피드백 받아서 사용하는 2중 루프 PI 제어를 사용한다. 계통 연계형 인버터의 경우 연계를 위하여 계통의 역률 및 THD를 계통기준에 맞추는 기능을 갖기 위하여 PLL을 사용하여 계통 위상을 추종하며, 직류링크단 전압제어와 출력단 전류제어를 PI 제어를 이용하여 수행하며 양방향 전력제어기능을 갖는다. 또한 계통에서 사고가 발생했을 경우 단독운전을 검출하기 위하여 RPV(Reactive Power Variation)알고리즘을 사용한다<sup>[8]</sup>.

## 3. 기존 시스템과 변환 손실 비교

### 3.1 기존 시스템의 분석

그림 6은 기존의 태양광 발전시스템을 나타내고 있다. 기존의 태양광 발전시스템의 경우 태양광으로부터 발전되는 전력이 부하 또는 계통으로 전달되기 위해서는 DC/DC 컨버터와 계통연계형 인버터를 통해서 변환된

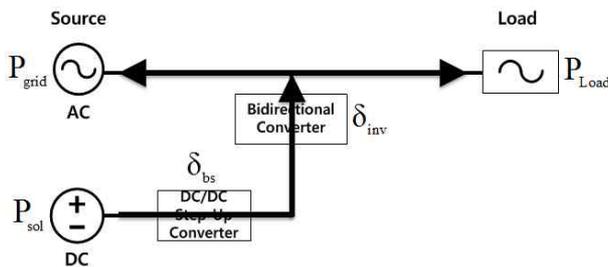


Fig. 6 Conventional Converter

전력이 부하에 전달되는데, 그 변환된 전력과 부하에 전달되는 전력은 아래 식 과 같이 나타낼 수 있다.

$$P_{Load} = \delta_{bs} \delta_{inv} P_{sol} + P_{grid}. \quad (7)$$

여기서  $P_{sol}$ : 태양광 발전전력,  $P_{Load}$ : 부하 소비전력,  $P_{grid}$ : 계통 입력전력,  $\delta_{bs}$ : 승압 컨버터 효율,  $\delta_{inv}$ : 양방향 컨버터 효율.

위 식에서 보면 부하에 전달되는 전력은 신재생에너지에서 발전된 전력과 계통에서 들어오는 전력의 합으로 표현이 되며, 발전되는 전력이 부하의 소비전력보다 커지면 발전하게 된다. 또한 DC/DC 컨버터와 계통연계형 인버터의 효율에 따라서 전력이 감소되어 전달된다.

### 3.2 기존 시스템과의 변환손실 비교 분석

하이브리드 배전시스템의 신재생에너지로부터 부하로 전달될 때의 변환손실을 기존시스템과의 비교를 통하여 하이브리드 배전시스템의 타당성을 입증하고자 한다. 계통연계형 인버터, 승압 컨버터, 강압 컨버터의 효율을 그림 7과 같이 가정하였다. 여기서는 비교를 쉽게 하기 위하여 교류부하는 없다고 가정하고 직류부하만 고려하였다. 또한 정확한 변환손실 비교를 위하여 동작모드 3가지 상황에 맞추어서 비교를 진행하였다. 그림 8은 각 모드별로 가정하고 기존 시스템과의 변환손실을 비교한 것이다.

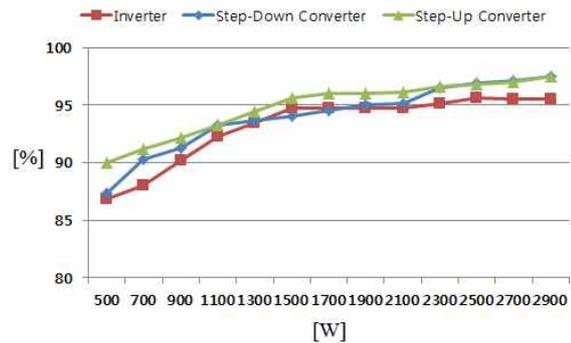


Fig. 7 Converters Efficiency

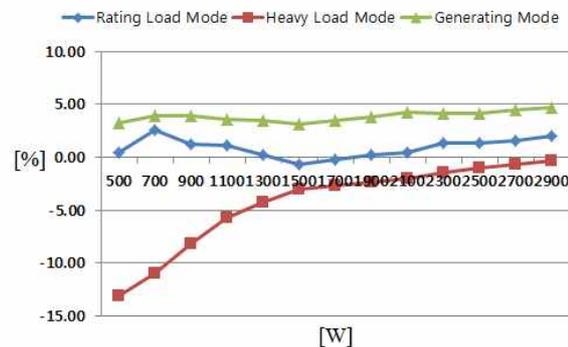


Fig. 8 Comparison of power conversion loss

정격부하모드의 경우 신재생에너지에서 직류부하로 발전되는 동작모드를 뜻하고, 이에 따라서 직류부하를 200[W]씩 500~2900[W]까지 증가시켰을 때 평균적으로 약 1[%]정도 변환손실이 감소하였다. 그리고 변환손실이 최대 2.6[%]까지 감소하거나, 오히려 -0.7[%] 증가하는 현상을 보였다.

중부하모드의 경우 직류부하를 3[kW]로 고정하고 신재생에너지의 발전전력을 500~2900[W]까지 발전시켰을 때 변환손실을 비교해보았다. 발전전력이 낮을 경우에는 계통에서 전력이 들어오므로 최소 -13.1[%] 변환손실이 기존 시스템에 비해서 더 발생하였으며, 발전전력이 부하와 거의 비슷한 2900[W]에서는 약 -0.1[%]로 거의 차이가 발생하지 않는 것을 확인하였다. 따라서 중부하모드에서는 신재생에너지의 발전량에 따라서 기존 시스템에 비해 오히려 손실이 발생할 수도 있다.

발전모드의 경우 신재생에너지의 발전량을 3[kW]로 고정하고 직류부하를 500~2900[W]까지 증가시키면서 변환손실을 비교해보았다. 직류부하가 거의 없을 때는 기존시스템과의 변환손실이 거의 비슷하며, 직류부하가 신재생에너지의 발전량과 비슷하게 되면 최대 4.7[%]의 변환손실이 감소하게 되며 발전모드의 경우 평균 4[%]정도 변환손실이 감소하는 것을 확인 할 수 있다.

이를 통하여 하이브리드배전 시스템을 기존 시스템과의 변환손실 비교를 했을 때, 3가지 동작모드 중에 2가지 모드에서는 기존시스템에 비하여 변환손실이 더 적은 것을 알 수 있었으며, 중부하모드의 경우 발전량에 따라서 기존시스템에 비하여 변환손실이 더 발생했으며, 이것은 신재생에너지의 발전량에 따라서 최대 -13.1[%]에서 최소 -0.1[%]까지 변동이 가능하다. 그러나 중부하모드의 분석결과는 시스템의 효율에 따라서 변동하는 부분으로 공진형 컨버터와 같이 고효율의 시스템을 사용하면 손실을 감소시킬 수 있다. 또한 중부하모드로서 동작하는 시간은 전체중 30[%]미만 정도로 볼 수 있으므로 충분히 보상이 가능하다.

#### 4. 부하군 분류 및 손실 분석

##### 4.1 전기적인 특성에 따른 부하 분류

가정에서 사용하는 전기부하는 매우 다양하다. 하이브리드 배전에 앞서 폭넓은 부하를 통하여 검증하기 위하여, 부하를 전기적 특성에 맞추어 분류를 해야 한다. 표 1에 가정용 부하들을 부하의 전기적 특성에 따라 전열부하, 디지털부하, 조명부하, 유도성부하로 분류하였다. 전열부하는 가정에서 사용되는 다리미, 전기히터, 커피포트 등 역률 1을 갖는 순수 저항성 부하를 말하며, 교류 실험 시 입력전압과 전류가 동상이 되는 순저항 특성을 갖는다. 현재 사용 중인 전열부하는 대부분 기기 내부 전류제어를 바이메탈로 된 온도센서를 이용하기 때문에 직류공급 시 교류 220[V]와 동일한 실효값 직류

Table 1 Load classification according to type

	Type	Example
AC Load	Resistive Load	Electric iron, Coffee port, Electric heater etc.
	Inductive Load	Electric fan, refrigerator, microwave etc.
DC Load	Digital Load	Notebook, Scanner, Desktop computer, LCD monitor etc.
	Illumination Load	Inverter stand, LED fluorescent light, LED incandescent light etc.

220[V]를 인가해야만 정상적인 동작이 가능하며, 그 이상전압에서는 과전류 소손, 그 이하 전압에서는 부족전류로 인해 오동작을 하게 된다. 디지털부하의 경우 PC 본체, LCD 모니터, LCD TV, 오디오, 스캐너, 프린터 각 최종적으로 사용하는 전압의 형태가 직류인 부하들이며 입력부에 AC/DC 컨버터가 내장되어 있어 입력측 전류가 전압 최대값 부근에서 펄스형으로 나타나므로 고조파가 다량 함유되는 특성이 있다. 그러나 일부 직류부하의 경우 PFC기능을 가지는 AC/DC 컨버터를 내장하기도 한다. 조명부하로 삼파장 형광등과 LED 램프의 부하 특성을 조사하였다. 교류를 인가할 경우 입력단의 AC-DC 컨버터에 의해 디지털 부하와 유사한 입력전류 특성을 보이며 입력전류의 역률은 0.5~0.8로 낮았고, 또, 전류 THD가 30[%]이상으로 계통에 좋지 못한 영향을 미칠 수 있음을 알 수 있다. 유도성 부하로는 현재 상용화되고 있는 에어컨 및 냉장고는 컴프레셔에서 전동기 구동을 위해 교류전원을 바로 사용하기 때문에 입력전류가 흐르는데, 보통 역률 0.84의 유도성으로 분석되었다<sup>[6]</sup>. 따라서 본 논문에서는 교류 부하는 저항성부하, 유도성부하 그리고 직류부하는 디지털부하, 조명부하로 정의하였다.

현재 직류부하 컴퓨터, TV, LED 램프 등의 대표적인 부하들은 제품 내부의 교류를 직류로 변환을 하기 위하여 정류기를 사용한다. 따라서 본 하이브리드 배전 시스템에서 직류전압이 공급될 경우 기존 교류전압을 공급하는 경우와의 이론적인 손실비교를 통해 타당성을 검증하고자 하다.

##### 4.2 공급전압 유형에 따른 부하 손실 분석

그림 9는 제품 내부의 정류회로를 교류전원 및 직류전원에 각각 연결한 경우를 나타내고 있다. 이 두 경우를 비교하기 위해 내부 정류기 다이오드의 전원강하  $V_f$  및 내부 저항  $r_d$ , 커패시터의 내부 직렬저항  $r_e$ , 부하저항  $R$  등을 정의하였다. 각 경우 회로 손실은 다이오드와 필터 커패시터에 흐르는 전류에 의해 좌우된다. 우선 교류전원이 연결된 경우, 정류회로의 모든 다이오드가 모두 작동되며, 커패시터로 전류가 흐르게 된다. 이 때, 회로내에 흐르는 각 부의 주요파형은 그림 9(a)와 같고 회로의 발생하는 손실과 소비전력을 구해보면 아래 식 (8), (9)와 같다.

$$P_{ac\_loss} = 2r_d I_{ac}^2 + 2V_f I_{ac(mean)}, P_{ac\_loss\_c} = r_c I_c^2. \quad (8)$$

$$P_{out1} = (\sqrt{I_{ac}^2 - I_c^2})^2 R. \quad (9)$$

여기서  $P_{ac\_loss}$ : 정류기 손실,  $P_{ac\_loss\_c}$ : 커패시터 손실,  $r_d$ : 다이오드 내부저항,  $V_f$ : 다이오드 전압강하,  $I_{ac}$ : 입력전류 실효치,  $I_c$ : 커패시터전류 실효치,  $P_{out1}$ : 정류기 출력,  $R$ : 정류기 출력저항.

그림 9(b)에서 직류전원을 내부 정류회로에 공급할 경우, 두 개의 다이오드만이 동작하고, 커패시터 전압이 전원전압과 같아지면 더 이상 전류가 흐르지 않게 되어, 그림 9(b)와 같은 파형이 나타난다. 직류전압 인가시 회로의 손실과 부하의 소비전력은 식 (10), (11)와 같다.

$$P_{dc\_loss} = 2r_d I_{dc}^2 + 2V_f I_{dc}. \quad (10)$$

$$P_{out2} = I_{dc}^2 R. \quad (11)$$

여기서  $P_{dc\_loss}$ : 정류기 손실,  $r_d$ : 다이오드 내부저항,  $V_f$ : 다이오드 전압강하,  $I_{dc}$ : 입력전류,  $P_{out2}$ : 정류기 출력,  $R$ : 정류기 출력저항.

전원 유형에 무관하게  $P_{out1}$ 과  $P_{out2}$ 는 소비전력이 동일해야하므로 교류 및 직류에 대한 관계식을 다음 식 (12), (13)와 같이 구할 수 있다.

$$I_{ac}^2 = I_{dc}^2 + I_c^2. \quad (12)$$

$$P_{ac\_loss} + P_{ac\_loss\_c} > P_{dc\_loss}. \quad (13)$$

위 식에 의하면 직류전원 인가 시 전류의 크기  $I_{dc}$ 가 교류전원 인가시 전류  $I_{ac}$ 보다 작음을 알 수 있고, 같은 소비전력을 얻기 위해서 교류전원의 경우 더 높은 손실이 발생한다는 것을 알 수 있다. 그러므로 부하에 직류를 공급했을 때 전력손실이 감소하므로 에너지 효율을 높일 수 있다.

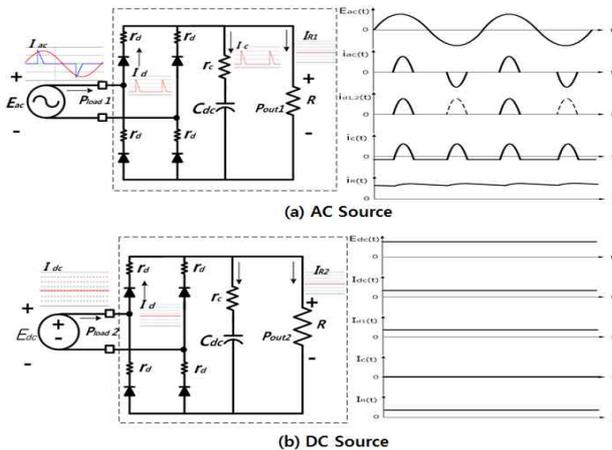


Fig. 9 Internal rectifier with DC source and AC source

Table 2 Parameter of hybrid distribution system

Parameter	Value
$P_{PWM\_Converter}$	5[kW]
$P_{DC}$	3[kW]
$P_{Boost}$	3[kW]
DC link Voltage	380[V]
Grid Voltage	220[Vac]
DC Voltage	220[V]
Boost Voltage	280[V]
PWM frequency	10[kHz]
DC frequency	20[kHz]
Boost frequency	20[kHz]

### 5. 실험

본 논문에서 제안된 하이브리드 배전 시스템의 성능을 검증하기 위하여 표 2와 같이 설정하여 시스템을 제작을 하였고, 이는 그림 10과 같다. 제작된 시스템의 성능을 검증하기 위하여 그림 11과 같이 동작시나리오를 설정을 하였다. 시나리오는 총 5가지로 구성되며 교류부하의 경우 계통에서 에너지를 직접 공급받는 구조이므로 고려하지 않았다. 또한 검증된 하이브리드 배전 시스템을 통하여 대표적인 직류부하에 직류 220[V]를 공급하여 소비전력의 비교 하였다.

그림 12, 13, 14, 15, 16는 설정한 시나리오를 동작시켰을 때의 입출력 파형을 나타내었고 각 시스템은 정격 부하 3[kW] 일 때 동작을 실험하였다.

그림 12는 직류부하가 3[kW]이며, 태양광에서 발전전력이 없을 경우, 계통에서 직류부하로 전력을 전달하는 상황에서 계통과 직류부하의 입출력 전압, 전류를 보여 주고 있다. 계통연계형 인버터에서 입력단 전류의 PFC 제어를 통해 역률이 1로 제어되고 있으며, 벽 컨버터의 출력단 전압제어가 정상적으로 제어되고 있다.

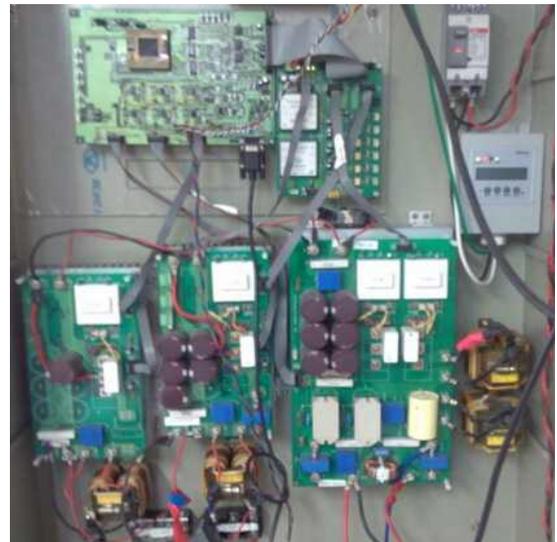


Fig. 10 Hybrid distribution system

그림 13은 직류부하에서 전력소비가 없을 때 태양광에서 발전하는 전력을 3[kW]로 가정하고, 모두 계통으로 나가는 것을 보여주고 있다. 계통연계형 인버터에서 발전 상황에 맞춰서 전류가 전압위상과 180도 차이가 나도록 제어되고 있으며, 부스트 컨버터에서도 입력단 전압이 제어 되고 있는 것을 알 수 있다.

그림 14는 정격부하 모드로서 태양광에서 발전되는 전력은 3[kW], 직류부하에서 소비되는 전력이 3[kW]로 가정하고 계통으로는 전력이 발전되지 않으며 태양광에서 발전되는 전력이 모두 직류부하로 전달되고 있는 것을 나타내고 있다.

그림 15는 직류부하의 소비전력이 태양광에서 발전되는 발전량 보다 많은 경우로서, 태양광에서 1.5[kW] 발전되고 직류부하가 3[kW] 일 때, 계통에서 1.5[kW]의 전력이 들어오고 있는 것을 나타내고 있다.

그림 16은 직류부하의 소비전력이 태양광에서 발전되는 발전량 보다 적은 경우로서, 태양광에서 3[kW] 발전되고 직류부하가 1.5[kW] 일 때, 계통으로 1.5[kW]의 전력이 나가는 것을 나타내고 있다.

그림 17은 신재생에너지로부터 발전하고 있는 상황에서 부하의 증가에 따른 배전시스템 동작모드 변화를 보여주고 있다. 그림 17(a)는 부하증가에 따른 전체 실험 파형이고 그림 17(b)는 발전모드 상황에서 부하가 증가하여 발전되는 전류가 감소하는 것을 확인할 수 있다. 그림 17(c)는 부하가 더 증가하여 발전모드에서 중부하모드로 전환되는 모습을 보여주고 있다. 계통전류는 발전모드에서 중부하모드로 전환됨에 따라 위상이 180도 지연되는 것을 확인할 수 있다.

그림 18과 표 3은 실제 하이브리드 배전시스템을 통하여 직류부하(스탠드, 모니터, LED 전등, 컴퓨터, 노트북)에 교류 220[V]와 같은 직류 220[V]를 공급하여 교류를 인가하였을 때의 소비전력과 직류를 공급하였을 때의 소비전력을 비교한 자료이다. 전체적으로 기존 교류를 인가했을 때보다 약 5[%]의 변환손실의 저감의 결과를 얻을 수 있었으며, 각 부하별로 보면 전기 스탠드의 경우 약 8.2[%], 모니터의 경우 약 9.6[%], LED 전등의 경우 약 3.2[%], 컴퓨터의 경우 약 4.2[%], 노트북의 경우 약 -0.5[%]로 노트북을 제외한 모드 부하에서 소비 전력의 저감이 되었다. 이는 직류를 공급함으로써 교류를 공급할 때 발생하던 손실이 줄어들었기 때문에 발생한 결과이다.

### 6. 결 론

하이브리드 배전시스템의 경우 디지털 부하의 증가에 따라서 직류부하와 교류부하를 동시에 사용하면서 변환 손실 저감을 가져 올 수 있는 시스템이다. 본 논문에서는 하이브리드 배전시스템의 연계구조에 대하여 연구를 하여 직류 연계 구조를 가진 시스템과, 동작 모드에 대하여 제안을 하였으며, 시뮬레이션을 통하여 동작을 검증하였다. 본 논문의 결론을 아래 세 가지로 요약하였다.

- 기존의 태양광 전력을 사용할 때의 변환손실은 제안된 방법을 사용할 경우 계통연계형 인버터에서 강압 컨버터를 사용하여 그 효율의 차이만큼 변환손실을 저감할 수 있다는 것을 확인하였다.

- 제안된 하이브리드 시스템과 기존 시스템의 동작에 따른 손실비교를 하였을 때, 전체 동작시간의 30[%] 미만에 해당하는 중부하모드에서는 손실이 더 발생하였지만 대부분의 운전시간을 차지하는 정격부하모드와 발전모드에서는 효율이 높았다. 따라서 제안된 방법이 손실 저감을 가져오는 것을 확인하였으며, 중부하모드에 대한 연구가 더 필요하다.

- 기존부하 내에서 직류로 공급 시 발생하는 에너지 손실의 약 4.58[%]를 저감가능하다는 것을 확인하였다.

향후 중부하모드에서 발생하는 손실 저감을 위하여 토폴로지의 고 효율화에 대한 연구가 필요하며, 또한, 본 연구에서는 공급전압을 220[V]로 선정하여 실험을 진행했으나, 향후 가정용 부하에 장시간 직류를 공급하는 실증을 하여 각 부하들의 손실을 최소화 할 수 있는 최적의 공급전압을 선정하는 연구가 필요하다.

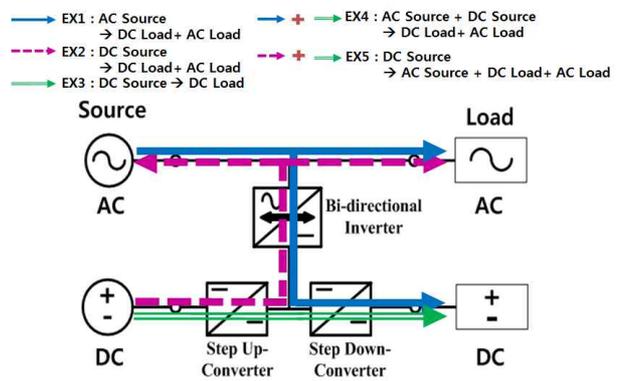


Fig. 11 Operation scenario of hybrid distribution system

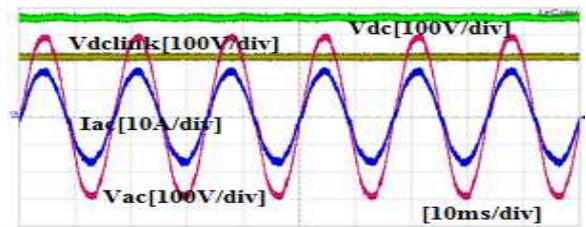


Fig. 12 Experimental result waveform of EX1

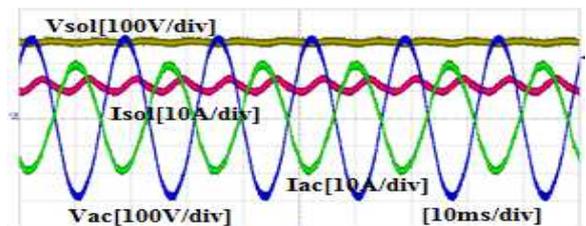


Fig. 13 Experimental results waveform of EX2

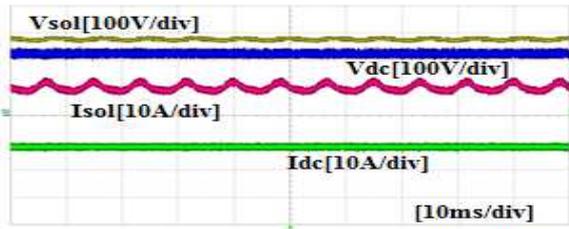


Fig. 14 Experimental results waveform of EX3

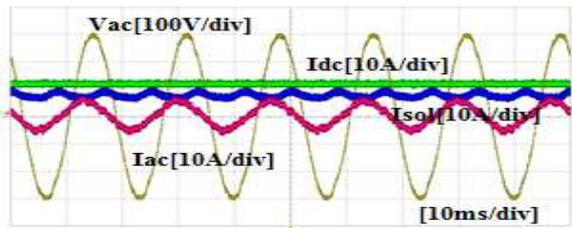


Fig. 15 Experimental results waveform of EX4

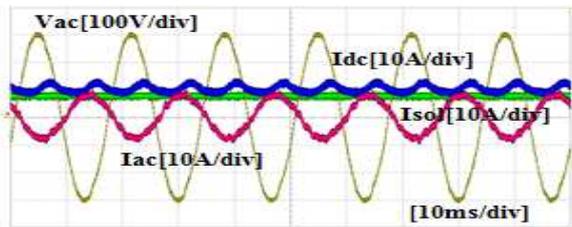


Fig. 16 Experimental results waveform of EX5

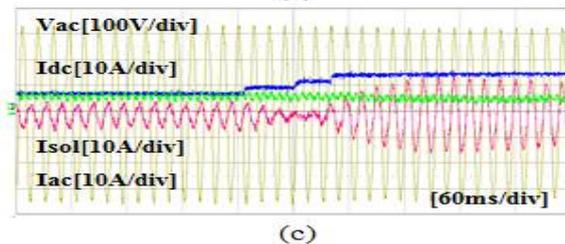
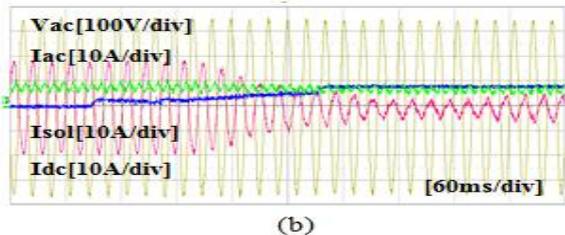
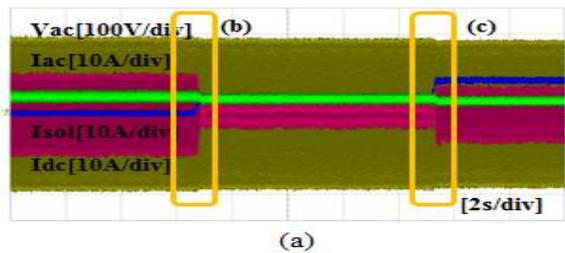


Fig. 17 Mode transition waveform according to load

Table 3 Comparison of power consumption according to supplying DC voltage

Type	Convention [W]	Proposed [W]	Difference [%]
Electric stand	13.2	12.2	8.2
Monitor	31.2	28.2	9.7
LED Lingting	47.9	46.3	3.3
Computer	73.2	70.1	4.2

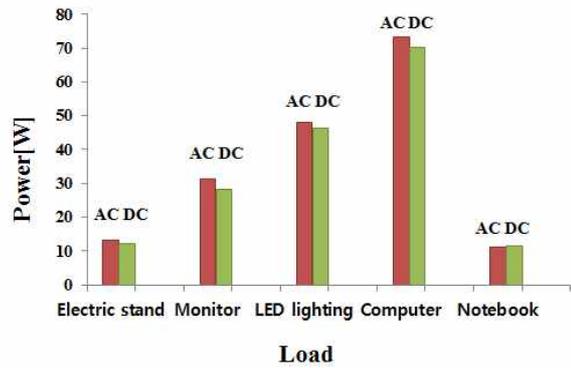


Fig. 18 Comparison of power consumption according to supplying DC voltage

본 논문은 중소기업청에서 지원하는 2012년도 산학연공동기술개발사업(No.C0041237)의 연구수행으로 인한 결과물임을 밝힙니다.

References

- [1] V.H.M. Quezada, J.R. Abbad, T.G.S Roman, "Assessment of energy distribution losses for increasing penetration of distributed generation," *IEEE Trans. Power Syst*, Vol. 21, pp. 533-540, May 2006.
- [2] J. Benner, L. Kazmerski, "Photovoltaics gaining greater visibility," *IEEE Spectr*, Vol. 36, No. 9, pp 34-42, Sept. 1999.
- [3] R. Wolk, "Fuel cells for home and hospitals," *IEEE Spectr*, Vol. 36, No. 5, pp. 45-52, May 1999.
- [4] L. Weixing, M. Xiaoming, Z. Yuebin, C. Marnay, "On Voltage standards for DC Home Microgrids Energized by Distributed Sources," *Power Electronics and Motion Control Conf*, Vol. 3, pp. 2282-2286, June 2012.
- [5] Engin Cetina, Ahmet Yilanci, H. Kemal Ozturka, Metin Colakb, Ismail Kasikcic, Serdar Iplikci, "A micro-DC power distribution system for a residential application

energized by photovoltaic - wind/fuel cell hybrid energy systems," *Energy and Buildings*, Vol. 42, pp. 1344-1352, Aug. 2010.

- [6] F. Dastgeer, A. Kalam, "Efficiency comparison of DC and AC distribution systems for distributed generation," in *2009 Power Engineering Conf.*, pp. 27-30, Sept. 2009.
- [7] K.H. Lee, K.Y. Koo, "Demonstration case of the Green Home and DC power distribution," *The korea institute of electric engineers*, Vol. 7, Sept. 2010.
- [8] L. Weixing, M. Xiaoming, Z. Yuebin, C. Marnay, "On voltage standards for DC home microgrids energized by distributed sources," in *2012 7th Int. Power Electron. and Motion Control Conf.*, pp. 2282-2286, 2012.
- [9] D.J. Hammerstrom, "AC Versus DC Distribution Systems Did We Get it Right?," *Power Engineering Society General Meeting*, pp. 1-5, June 2007.
- [10] M.R. Starke, L.M. Tolbert, B. Ozpineci, "AC vs. DC distribution: A loss comparison," in *2009 T&D. IEEE/PES Transmission and Distribution Conf. and Expo.*, pp. 1-7, April 2008.
- [11] K. Engelen, E. Shun, P. Vermeyen, I. Pardon, R. D'hulst, J. Driesen, R. Belmans, "The feasibility of small-scale residential dc distribution systems," *IEEE Industrial Electron. Conf.*, pp. 2618-2632, Nov. 2006.
- [12] D. Nilsson, A. Sannino, "Efficiency analysis of low- and mediumvoltage dc distribution systems," *Power Engineering Society General Meeting*, Vol. 2, pp. 2315-2321, Jun. 2004.
- [13] A. Sannino, G. Postiglione, M. H. J. Bollen, "Feasibility of a dc network for commercial facilities," *IEEE Transactions on Industry Applications*, Vol. 39, No. 5, pp. 1499-1507, Oct. 2003.
- [14] Pratt, A., Kumar, P. "Evaluation of 400V Dc Distribution in Telco and Data Centers to Improve Energy Efficiency," in *2007 Intelec.*, pp. 33-39, 2007.
- [15] NNT Facilities Inc., "Development of 400VDC Power Distribution System and 400VDC Output Rectifier," 2009.
- [16] G. Byeon, H. Lee, "A research on the characteristics of fault current of DC distribution system and AC distribution system," in *2011 IEEE 8th Int. Power Electron. and ECCE Asia (ICPE & ECCE) Conf on.*, pp. 543-550, 2011.
- [17] Y.J. Lee, D.H. Han, "DC Characteristics Analysis of Various AC loads for Hybrid Distribution," *The transactions of korea institute of power electronics*, Vol. 3, 2010.
- [18] Y.S. Jung, G.J. Yu, "A New MPPT Algorithm based on P&O Algorithm," *The transactions of korea institute of power electronics*, Vol. 2, 2003.
- [19] G.H. Choe, D. Bayasgalan, Y.J. Lee, D.H. Han, "Characteristics Analysis of RPV and AFD for Anti-Islanding in Active Method," *The transactions of korea institute of power electronics*, Vol. 14, 2009.



### **변병주(邊秉柱)**

1988년 12월 10일생. 2001년 건국대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 석박사과정.



### **서현욱(徐玄旭)**

1989년 1월 2일생. 2001년 건국대 전기공학과 졸업. 2011년~현재 동 대학원 석박사과정.



### **최중묵(崔重默)**

1983년 1월 1일생. 2008년 건국대 공대 전기공학과 졸업. 20010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010~2011년 LS산전 중앙연구소, 2011년~현재 동 대학원 박사과정.



### **이영진(李永鎭)**

1983년 2월 26일생. 2008년 건국대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 현재 동 대학원 박사과정.



### **최규하(崔圭夏)**

1955년 7월 24일생. 1978년 서울대 공대 전기공학과 졸업. 1980년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1986년 동 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1987년~1988년 미국 오레곤 주립대 전기공학과 Post-Doc. 1998년~1999년 버지니아주립대 교환방문교수. 1996년~현재 건국대 산업기술연구원 인버터제어기술연구센터 소장. 현재 건국대 전기공학과 교수. 2007년~2008년 당 학회 회장역임.