

# 디젤발전기가 포함된 독립형 마이크로그리드에서의 BESS 제어기법 및 운전모드 연구

조종민<sup>1</sup>, 안현성<sup>1</sup>, 김지찬<sup>1</sup>, 차한주<sup>†</sup>

## Control and Operating Modes of Battery Energy Storage System for a Stand-Alone Microgrid with Diesel Generator

Jongmin Jo<sup>1</sup>, Hyunsung An<sup>1</sup>, Jichan Kim<sup>1</sup>, and Hanju Cha<sup>†</sup>

### Abstract

In this work, control methods and operating modes are proposed to manage standalone microgrid. A standalone microgrid generally consists of two sources, namely, battery energy storage system (BESS) and diesel generator (DG). BESS is the main source that supplies active and reactive power regardless of load conditions, whereas DG functions as an auxiliary power source. BESS operates in a constant voltage constant frequency (CVCF) control, which includes proportional-integral + resonant controller in a parallel structure. In CVCF control, the concept of fundamental positive and negative transformation is utilized to generate a three-phase sinusoidal voltage under imbalanced load condition. Operation modes of a standalone microgrid are divided into three modes, namely, normal, charge, and manual modes. To verify the standalone microgrid along with the proposed control methods, a demonstration site is constructed, which contains 115 kWh lead-acid battery bank, 50 kVA three-phase DC - AC inverter, and 50 kVA DG and controllable loads. In the CVCF control, the total harmonic distortion of output voltage is improved to 1.1% under imbalanced load. This work verifies that the standalone microgrid provides high-quality voltage, and three operation modes are performed from the experimental results.

**Key words:** Stand-alone microgrid, Battery energy storage system, Diesel generator, CVCF control

### 1. 서 론

최근 지구 온난화 및 환경문제에 대한 심각성이 부각됨에 따라 전 세계적으로 ‘친환경’이란 키워드가 다양한 분야에서 핵심 트렌드로써 큰 관심을 갖고 있으며, 많은 선진국들이 친환경을 위한 다양한 환경규제 정책들을 펼치고 있다. 특히 대표적으로 신재생에너지 기반의 친환경 에너지원에 대한 관심이 급증하는 세계적인 추세에 흐름에 맞춰 전력전자 분야에서도 태양광발전, 풍력발전 등과 같은 신재생에너지를 이용하기 위한 기술과

함께 배터리, 플라이휠 등의 에너지 저장장치의 개발 또한 점진적으로 발전해 가고 있다. 이와 같은 기술개발은 기존 전력계통 시스템이 갖는 단점들을 보완하는 기술들로써 활용되고 있으며, 분산전원 연계가 가능한 마이크로그리드가 대표적인 예이다. 마이크로그리드는 소규모 분산전원을 의미하는 것으로 크게 독립형 마이크로그리드와 계통연계형 마이크로그리드로 구분된다<sup>[1]-[2]</sup>. 일반적으로 기존에 설치된 발전소로부터 멀리 떨어진 지역의 경우, 전력을 공급받기 위해서는 장거리 전송선로가 설치되어야 하며 이는 전력손실 및 설치비용에 따른 경제적 부담감을 증대시키는 단점을 갖는다<sup>[3]</sup>. 또한, 도서 지역의 경우에는 일반적으로 디젤발전기를 이용하여 자체적인 전력생산을 통해 수용가에서 요구하는 전력을 공급하지만, 초기 설치 및 유지보수 비용이 크고 발전효율이 낮은 디젤발전기는 전력을 생산함에 있어 효율적이지 못한 특성을 갖는다. 따라서 도서 지역 등과 같이 기존 전력망으로부터 분리되어 수용가에 전력을

Paper number: TKPE-2018-23-2-2

Print ISSN: 1229-2214 Online ISSN: 2288-6281

<sup>†</sup> Corresponding author: hjcha@cnu.ac.kr, Dept. of Electrical Engineering, Chungnam National University  
Tel: +82-42-821-7006 Fax: +82-42-821-8895

<sup>1</sup> Dept. of Electrical Eng., Chungnam National University  
Manuscript received Jan. 13, 2018; revised Jan. 25, 2018;  
accepted Jan. 29, 2018

공급해야 하는 경우에는 독립형 마이크로그리드가 대안으로 주목받고 있다.

독립형 마이크로그리드는 에너지 저장장치 시스템 (Battery Energy Storage System : BESS)을 기반으로 디젤발전기 및 다양한 신재생 에너지원들과의 연계를 통해 소규모 전력망을 구성할 수 있으며 독립형 마이크로그리드를 운영하기 위해서는 배터리 뱅크의 SOC 상태 및 구성 요소들의 동작 조건 등에 따른 운전모드가 필요하다. 또한, 독립형 마이크로그리드는 안정성과 신뢰성을 보장하고 높은 효율성을 추구하여 운영하는 것이 필수적이다<sup>[4]-[5]</sup>. 독립형 마이크로그리드에 대한 연구가 진행되던 초기에는 디젤발전기가 주 전원으로 동작하거나 태양광발전시스템이 주 전원의 역할을 수행하여 선로의 전압을 유지하였으며, 분산전원들의 병렬운전 연계에 대한 기술적 어려움으로 각 전원만의 단독 운전으로 운영되었다. 그러나 본 논문에서 제시하는 독립형 마이크로그리드의 운전모드는 기본적으로 BESS가 CVCF 제어를 통해 선로 전압을 유지하는 주 전원으로써 동작하는 운전모드를 채택하였으며, 디젤발전기와 태양광 PCS와 같은 다른 분산 전원들과의 병렬운전이 가능하다. 또한 BESS는 기본적으로는 주 전원 역할을 수행하는 운전모드로 운영되지만, 배터리 뱅크의 SOC가 부족한 경우에는 별도의 운전모드로써 유효 및 무효전력 제어를 수행하는 운전모드로 전환하여 마이크로그리드 내에서 보조전원 역할로써 운영할 수 있는 특성을 갖는다. 독립형 마이크로그리드에서 BESS는 부하 조건에 관계없이 정격 주파수를 갖는 3상 기본파 정상분 전압을 생성하여 선로 전압을 유지하는 주 전원으로써 고품질의 전력을 생산하여 수용가에 전력을 공급할 수 있는 능력이 요구된다<sup>[6]</sup>. 그러나 DC-AC 인버터의 단일 폴에 존재하는 상단 스위치와 하단 스위치의 암 단락을 방지하고자 적용된 데드타임은 부하조건에 관계없이 인버터에 비선형적인 특성을 야기함에 따라 저차 고조파 성분들이 발생하여 인버터 출력 상전압 및 부하 상전압을 왜곡시키는 원인으로 작용한다<sup>[7]-[8]</sup>. 특히, 불평형 부하인 경우 필터 양단에 불평형의 전압 강하가 발생함에 따라 부하 측 전압은 불평형 상태를 유지하게 된다<sup>[9]</sup>. 불평형 부하로 인해 발생된 불평형 전압은 기본파 정상분 전압뿐만 아니라 기본파 역상분 전압성분을 제어함에 따라 3상 평형전압으로 제어하는 것이 가능하다<sup>[10]-[11]</sup>. 따라서, 독립형 마이크로그리드에 적용된 BESS는 부하조건에 관계없이 3상 정현파 전압을 생성하기 위해 기본파 전압제어 및 고조파 제어가 가능한 안정한 CVCF 제어가 필수적이다.

본 논문에서는 독립형 마이크로그리드에서 BESS의 주 전원 역할을 위한 CVCF 제어기법으로 기본파 정상분 전압과 역상분 전압을 동기좌표계 상에서 비례-적분 제어를 적용하여 제어하였으며, 선택적 고조파 보상특성을 갖는 공진제어기를 적용하여 저차 고조파 성분을

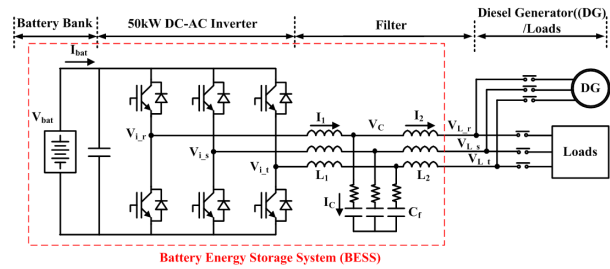


Fig. 1. Configuration of the stand-alone microgrid.

TABLE I  
PARAMETERS OF THE STAND-ALONE MICROGRID

	Parameter	Symbol	Value
Battery Bank	Capacity	$C_n$	115kWh
	Operating voltage range	$V_{range}$	500~650V
DC-AC Inverter	Rated power	$P_{BESS\_rated}$	50kVA
	Rate voltage	$V_{L\_rst}$	380V <sub>rms</sub>
	Switching frequency	$f_s$	10kHz
	Inverter side inductance	$L_1$	1.04mH
	Filter capacitance	$C_f$	32uF
	Load side inductance	$L_2$	0.23mH
Diesel Generator	Rated power	$P_{DG\_rated}$	50kVA
	Rated voltage	$V_{DG\_rated}$	380V <sub>rms</sub>

보상하였다. 또한, BESS와 디젤발전기로 구성된 독립형 마이크로그리드를 운영함에 있어 신뢰성 보장이 가능한 3가지 운전모드를 제안하였다. 115kWh 배터리 뱅크, 50kVA BESS, 50kVA 디젤발전기를 포함하는 실증 구성을 통해 제안한 BESS 제어 기법 및 운전모드의 타당성을 검증하였다.

## 2. 독립형 마이크로그리드 구성 및 BESS 제어기법

### 2.1 독립형 마이크로그리드 구성

그림 1은 독립형 마이크로그리드 구성을 나타내는 것으로 배터리 뱅크, DC-AC 인버터, 디젤발전기 및 부하로 구성된다.

배터리 뱅크, DC-AC 인버터, 필터는 에너지 저장장치 시스템인 BESS를 구성하며, BESS는 부하에서 요구하는 전력을 공급하기 위해 CVCF 제어기법을 통해 부하조건에 관계없이 안정한 3상 전압을 생성하여 고품질의 전력을 공급하는 것이 주 역할이다<sup>[6]</sup>. 디젤발전기는

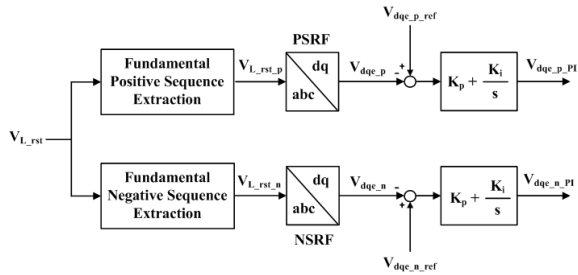


Fig. 2. Fundamental voltage control algorithm for CVCF control method.

독립형 마이크로그리드에서 보조 전원의 역할을 수행할 수 있으며, BESS와 병렬운전을 통해 부하에서 요구하는 전력을 분담하여 공급하거나, 배터리 뱅크의 SOC가 부족한 경우 배터리 뱅크를 충전하는 역할을 수행한다. 표 1은 독립형 마이크로그리드의 제원을 나타낸다.

## 2.2 BESS의 CVCF 제어 알고리즘

그림 2와 그림 3은 독립형 마이크로그리드에서 BESS의 CVCF 제어 알고리즘으로써 그림 2는 CVCF 제어 중 기본과 전압제어를 보여준다. 독립형 마이크로그리드에서 BESS는 일반적으로 부하조건에 관계없이 안정한 3상 평형전압을 생성하여 선로전압을 유지하는 주 전압원 역할을 수행해야 하며, 이러한 3상 전압은 기본과 정상분 전압 성분만을 포함해야 함을 의미한다. 평형부하 조건에서는 부하에 인가되는 부하 상전압에 기본과 전압 성분 중 정상분 전압만이 존재하지만 부하의 불평형이 발생한 경우에는 인버터 데드타임에 의한 영향으로 인해 부하 상전압은 기본과 역상분 전압을 포함한다. 따라서 불평형 부하조건에서는 기본과 정상분 전압 성분만이 존재하는 부하 상전압을 공급하기 위해서는 기본과 역상분 전압을 영으로 제어하는 것이 요구되며, 그림 2는 기본과 정상분 및 역상분 전압 제어 알고리즘이다.

3상 전압에 존재하는 기본과 역상분 전압은 식 (1)과 같이 기본과 정상분의 상 회전 방향으로 회전하는 좌표 변환(PSRF)을 수행하는 경우 동기좌표계 상에서 2차 고조파 성분으로 존재하게 되며, 비례-적분 제어기는 대역폭의 한계로 인해 시변함수로 존재하는 교류 성분인 2차 고조파 성분을 제어하는 것이 어렵다. 그러나 식 (2)와 같이 기본과 역상분 전압을 정상분 전압의 상 회전 방향에 반대로 회전하는 좌표변환(NSRF)을 통해 동기좌표계로 변환하면 직류 성분으로 변환이 가능하기 때문에 비례-적분 제어기를 통해 영으로 제어하는 것이 가능하다<sup>[10]-[11]</sup>. 따라서 앞서 설명한 개념을 기반으로 기본과 정상분 전압은 정상분 방향으로 회전하는 좌표변환(PSRF)를 통해 동기좌표계로 변환하는 반면, 기본과 역상분 전압은 정상분 방향에 반대로 회전하는 좌표변환(NSRF)를 통해 동기좌표계로 변환하면 직류량 성분으로 변환함에 따라 개별적인 비례-적분 제어기를 통해 기본과 정상분 및 역상분 전압 성분이 모두 제어 가능

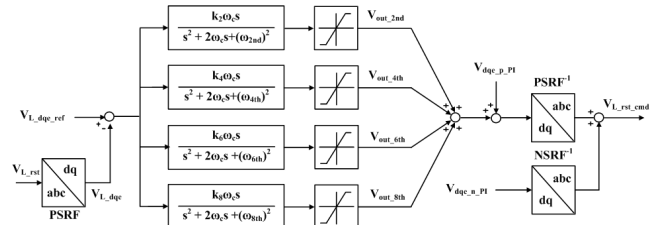


Fig. 3. Harmonic voltage control algorithm for CVCF control method.

하다. 부하 상전압으로부터 3상 기본과 정상분 및 역상분 전압은 각각 식 (3)과 식 (4)과 같이 대칭좌표법을 이용하여 추출 가능하다.

$$T(\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos \omega t & \cos \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin \omega t & -\sin \left( \omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( \omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (1)$$

$$T(-\omega t) = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} \cos(-\omega t) & \cos \left( -\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & \cos \left( -\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \\ -\sin(-\omega t) & -\sin \left( -\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) & -\sin \left( -\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) \end{bmatrix} \quad (2)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Lrp} \\ V_{Lsp} \\ V_{Ltp} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ a^2 & 1 & a \\ a & a^2 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Lr} \\ V_{Ls} \\ V_{Lt} \end{bmatrix} \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (3)$$

$$\begin{bmatrix} V_{Lrn} \\ V_{Lsn} \\ V_{Ltn} \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a^2 & a \\ a & 1 & a^2 \\ a^2 & a & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} V_{Lr} \\ V_{Ls} \\ V_{Lt} \end{bmatrix} \quad a = e^{j\frac{2\pi}{3}} \quad (4)$$

그림 3은 BESS의 CVCF 제어에서 고조파 전압제어 알고리즘을 보여주는 것으로 인버터 데드타임에 의해 발생하는 부하 상전압에 포함된 고조파 성분을 선택적 고조파 보상 특성을 갖는 공진 제어기를 통해 제어하는 방식이다.

3상 DC-AC 인버터는 단일 폴의 상단 스위치와 하단 스위치가 각각 상보적으로 턴 온, 턴 오프 동작을 수행하는 시점에 일정한 시간을 삽입하는 데드타임이 적용된다. 이와 같이 반도체 스위치의 암 단락을 방지하기 위한 데드타임으로 인해 인버터 출력 상전압에는 홀수 차에 해당하는 저차 고조파 성분이 존재함에 따라 부하 상전압에도 고조파 성분이 발생하게 된다<sup>[7]</sup>. 이러한 저차 고조파 성분은 인버터 데드타임에 의해 부하조건에 관계없이 모든 부하 조건에서 존재하는데 평형부하 조건에서는  $6n \pm 1$ 차 고조파가 발생하지만, 특히 불평형 부하조건에서는  $2n \pm 1$ 차 고조파 성분이 발생함에 따라 더욱 부하 상전압의 왜곡을 야기하게 된다<sup>[8],[10]</sup>. 이러한 고

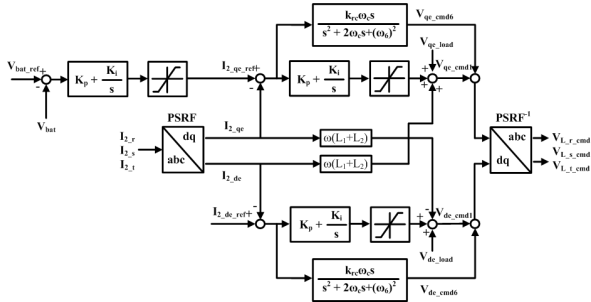


Fig. 4. DC link voltage and current control algorithm for CC-CV control method.

조파 성분은 전압 왜곡의 주된 요인이기 때문에 고품질의 전력을 공급하기 위해서는 저차 고조파 성분 보상이 필수적이다. 3상 부하 상전압에 존재하는 저차 홀수 차 고조파 성분은 좌표변환을 통해 동기좌표계 축 상에서 2n차 고조파 성분으로 변환된다. 그림 3은 전압 왜곡에 큰 영향을 미치는 3상 전압의 저차 고조파 성분을 보상하기 위해 동기좌표계 축 상에서 2차, 4차, 6차, 8차 공진 제어를 적용하였으며, 각 공진 제어기의 출력은 기본과 정상분 전압을 제어하는 비례-적분 제어기의 출력과 합해지는 병렬구조를 구성한다. 식 (5)는 병렬구조로 연결된 공진 제어기의 전달함수를 나타낸다.  $\omega_0$  [rad/s]는 기본과 각주파수 성분을 나타낸다.

$$G_R(s) = \frac{k_2\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (2\omega_0)^2} + \frac{k_4\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (4\omega_0)^2} + \frac{k_6\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (6\omega_0)^2} + \frac{k_8\omega_c s}{s^2 + 2\omega_c s + (8\omega_0)^2} \quad (5)$$

### 2.3 BESS의 CC-CV 제어 알고리즘

독립형 마이크로그리드에서 BESS의 주 역할은 안정한 3상 정현파 전압을 생성함에 따라 선로 전압을 유지함으로써 부하에서 요구되는 전력을 공급하는 것이다. 이러한 역할을 수행하기 위해서는 DC-AC 인버터의 DC 링크에 병렬구조로 연결된 배터리 뱅크의 SOC가 충분해야 한다. 배터리 뱅크의 SOC가 충분하지 못한 경우에는 부하에서 요구되는 전력을 BESS가 공급하기 어렵기 때문에 BESS는 다른 전압원으로부터 전력을 공급받아 SOC를 충전해야 할 필요성이 있다.

이러한 경우, 그림 4에서 보이는 바와 같이 BESS는 동기좌표계 축 상에서 CC-CV 제어를 수행할 수 있으며, CC-CV 제어는 외부 DC 링크 전압 제어와 내부 전류제어 알고리즘으로 구성된다. DC 링크 전압 제어는 DC 전압 지령치( $V_{bat\_ref}$ )를 통해 배터리 뱅크의 SOC를 충전하는 과정에서 발생할 수 있는 과전압 조건을 방지하는 역할을 수행한다. DC 링크 전압 제어기 출력은 3상 전류 제어기의 지령치로써 인가되며, q축 전류제어는 유효전력을, d축 전류제어는 무효전력을 담당하는 역할을 수행한다. 단위 역률 제어를 통해 유효전력만을

B : Battery Energy Storage System  
D : Diesel Generator

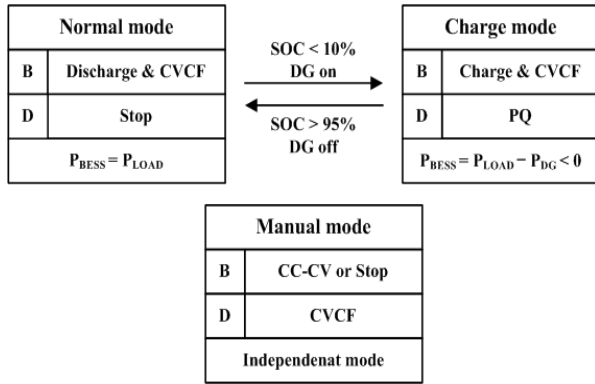


Fig. 5. The three operating modes of the stand-alone microgrid considering BESS and diesel generator.

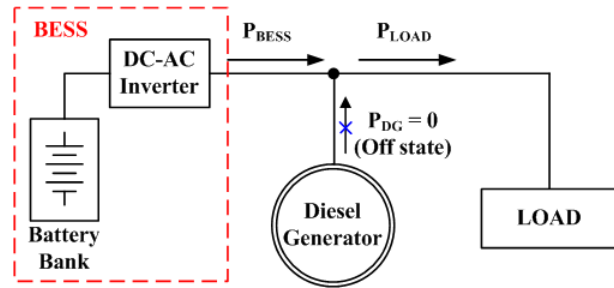


Fig. 6. Power flow in normal mode.

공급하기 위해 d축 지령치( $I_{2\_de\_ref}$ )는 0이다. CVCF 제어와 마찬가지로 인버터 데드타임에 의해 발생하는 고조파 성분을 보상하고자 공진 제어기가 d-q축 전류제어기와 병렬구조로 구성되어 6차 고조파를 보상하는 구조이다. 또한, 동기좌표계 상에 나타나는 디커플링 성분을 보상하고 있으며, 전류 제어기의 과도응답 특성 향상 및 백그라운드 전압 고조파 성분을 보상하기 위한 전향 보상 성분을 고려하였다.

## 3. 독립형 마이크로그리드의 운전모드

독립형 마이크로그리드에서 에너지 저장장치 시스템은 BESS를 기반으로 보조 전원의 역할을 수행하는 디젤발전기, 분산전원 연계운전을 위한 태양광, 풍력과 같은 신재생 에너지원으로 구성될 수 있다. 그림 5는 독립형 마이크로그리드에서 BESS와 디젤발전기의 역할에 따른 3가지 운전모드를 나타내는 것으로, 본 논문에서는 신재생 에너지원은 고려하지 않았다.

### 3.1 정상운전 모드 (Normal mode)

정상운전 모드는 독립형 마이크로그리드의 기본적인 운전모드으로써 BESS는 2.2절에서 설명한 기본과 정상분 및 역상분 제어와 고조파 보상 제어를 통해 CVCF 제어를 수행함에 따라 선로 전압을 유지하고, 부하에서 요구

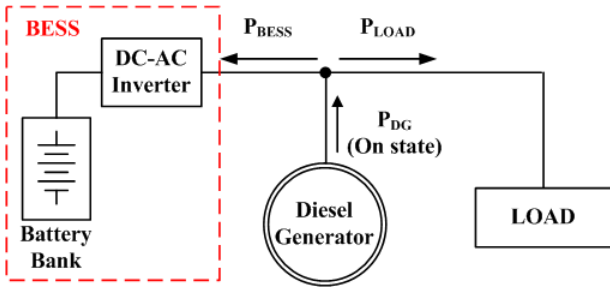


Fig. 7. Power flow in charge mode.

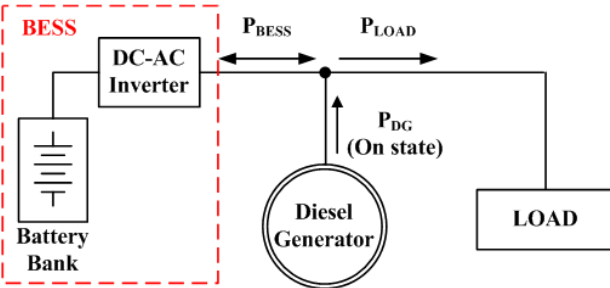


Fig. 8. Power flow in manual mode.

되는 전력을 BESS가 전적으로 담당하여 부하에 공급하는 모드이다. 디젤발전기가 수행하는 역할이 없기 때문에 디젤발전기는 동작을 하지 않은 정지 상태를 유지하며, BESS에서 공급하는 전력과 부하에서 수용하는 전력은 동일하며 전력 흐름도는 그림 6과 같이 BESS에서 부하 측으로 공급되는 방향이다.

3.2 충전운전 모드(Charge mode)

충전운전 모드는 정상운전 모드에서 BESS가 부하에 전력을 전적으로 공급함에 따라 배터리 뱅크의 SOC가 감소하여 일정량 이하가 되면 지속적으로 BESS에서 전력을 공급하기 어렵기 때문에 디젤발전기가 동작하여 보조 전원의 역할을 수행하는 운전모드이다. 이 때, BESS는 정상운전 모드와 동일하게 CVCF 제어를 통해 선로의 전압을 유지하는 주 전원으로써 동작하지만 부하에서 요구되는 전력을 BESS가 공급하는 정상운전 모드와 달리, BESS는 방전상태가 아닌 충전상태로 동작한다. 디젤발전기는 유효 및 무효전력 운전을 수행하여 부하에서 요구되는 전력을 공급함과 동시에 잉여 전력을 배터리 뱅크의 SOC를 충전하기 위한 BESS 충전전력으로 공급한다. 전력 흐름도는 그림 7과 같다.

3.3 수동운전 모드(Manual mode)

수동운전 모드는 독립형 마이크로그리드에서 BESS와 디젤발전기의 주 역할이 바뀌는 독립적인 운전모드으로써 디젤발전기가 CVCF 제어를 통해 선로의 전압을 유지하는 주 전원으로써 동작하고, BESS는 2.3절에서 설명한 CC-CV 제어 알고리즘을 통해 유효 및 무효전력을 제어하는 역할을 수행하거나 정지하는 상태를 유지하는

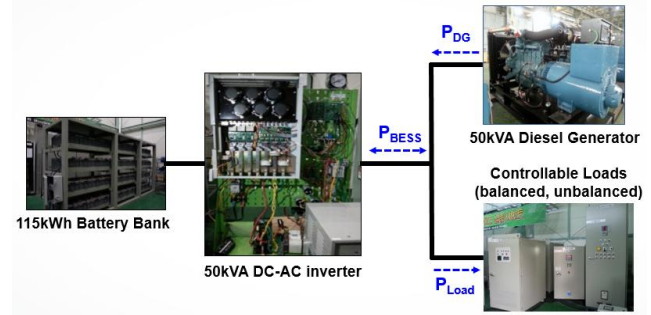


Fig. 9. Demonstration site of the stand-alone microgrid.

TABLE II  
MAXIMUM HARMONIC VOLTAGE DISTORTION IN PERCENT OF RATED VOLTAGE

Individual harmonic order	Percent (%)
$h < 11$	4.0
$11 \leq h < 17$	2.0
$17 \leq h < 23$	1.5
$23 \leq h < 35$	0.6
$35 \geq h$	0.3
Total harmonic distortion	5.0

보조 전원 역할을 수행한다. 수동운전 모드는 2가지 조건에서 수행될 수 있다. 첫 번째는 충전운전 모드와 동일하게 배터리 뱅크의 SOC가 부족한 경우 BESS에서 요구하는 유효전력량을 디젤발전기로부터 공급받아 SOC를 충전할 수 있으며 SOC가 충분한 경우에는 디젤발전기와 동시에 부하에 전력을 분담하여 공급할 수 있다, 두 번째는 BESS의 유지·보수가 필요한 경우 부하에서 요구되는 전력을 디젤발전기가 전적으로 공급하여 BESS 기동을 정지해야 하는 조건에서 운전 가능하다. 전력 흐름도는 그림 8과 같이 BESS의 전력 흐름은 양방향성을 나타낸다.

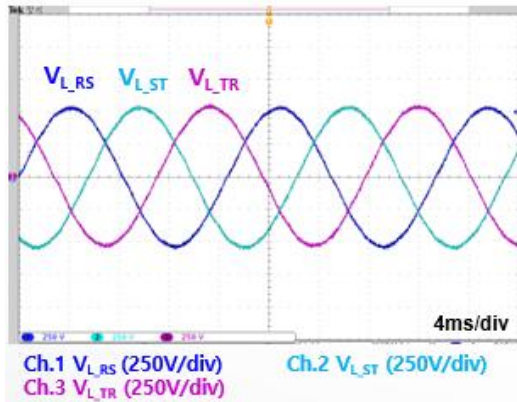
4. 실험 결과

그림 9는 독립형 마이크로그리드의 실증 구성을 보여준다, 배터리 뱅크는 표 1과 같이 115kWh 용량을 갖으며 납축 배터리 48개가 직렬 연결되어 있으며, 50kVA BESS와 디젤발전기가 부하에 병렬로 연결된 구조이다.

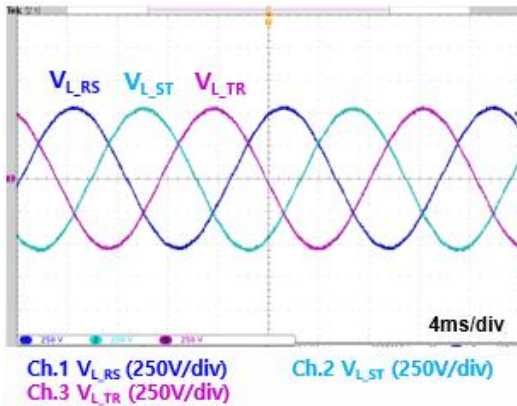
표 2는 분산전원 연계기준인 IEEE std.1547<sup>[12]</sup>에서 규정하고 있는 정격전압에 대한 최대 고조파 전압 왜곡비율을 나타내며, 정격전압의 THD는 5% 이하를 만족해야 한다. 따라서, 본 논문에서는 제안한 BESS CVCF 제어의 안정성뿐만 아니라 분산전원 연계기준 조건의 충족여부를 실험을 통해 검증하였다.

그림 10은 독립형 마이크로그리드에서 정상운전 모드에 대한 BESS의 CVCF 제어 수행에 따른 3상 부하 선





(a) Balanced load condition



(b) Imbalanced load condition

Fig. 10. Experimental results of BESS CVCF control in normal mode.

간전압 실험결과 출력파형이다. 그림 10(a)는 R, S, T상 모두 16.6kW 부하용량을 갖는 평형부하 조건으로 60Hz 주파수를 갖는 안정한 정현파 전압이 평형 상태를 유지하고 있으며, 전압 크기는 380V<sub>rms</sub> 출력됨을 확인할 수 있다. 전압 THD는 1%로 낮은 THD 특성을 갖는다. 그림 10(b)는 R상 15kW, S상 15kW, T상 20kW 부하 용량을 갖는 불평형 부하 조건에서 3상 부하 선간전압 실험결과 출력파형을 보여준다.

부하 불평형 조건에도 불구하고 기본과 역상분 전압 성분을 0으로 제어함에 따라 3상 전압은 평형 상태를 유지하고 있으며, 전압 THD는 1.1%로 평형 조건과 같이 낮은 전압 THD를 갖음을 알 수 있다. 인버터 데드 타임에 의해 발생된 저차 고조파 성분이 선택적 고조파 보상특성을 갖는 공진 제어기로 인해 보상됨에 따라 낮은 THD를 갖는 정현적인 전압파형 특성을 갖는다. 따라서, 정상운전 모드에서 BESS의 CVCF 제어가 안정하게 수행됨을 검증하였다.

그림 11은 독립형 마이크로그리드에서 충전운전 모드로 동작하는 경우 BESS의 CVCF 제어 특성을 보여주는 실험결과 파형이다. BESS는 CVCF 제어를 통해 선로 전압을 안정하게 제어하면서 15kW 부하에 전력을 공급하던 중에 20kW 유효전력 지령치를 디젤발전기 측

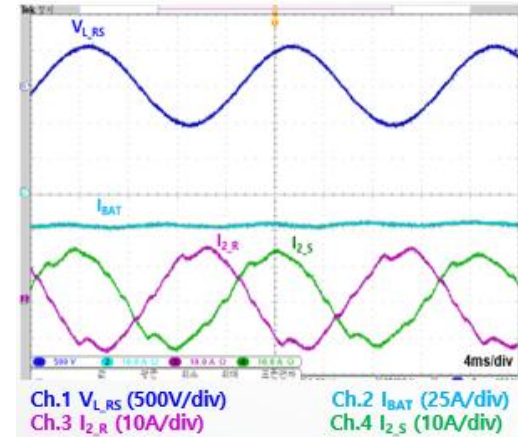
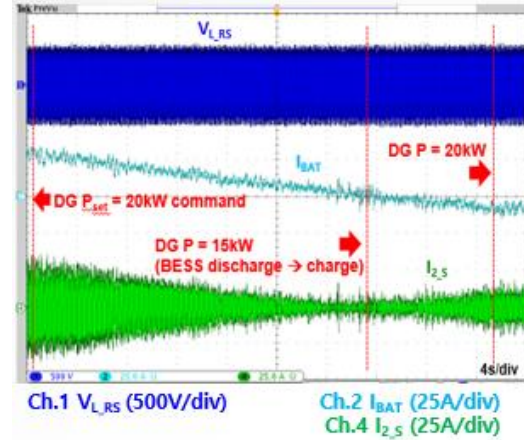


Fig. 11. Experimental results of BESS CVCF control in charge mode.

에 인가하였으며 디젤발전기는 정지 상태에서 전력량을 상승시킨다.

BESS와 디젤발전기는 15kW 부하에 전력을 분담하여 공급하고 있으며, 디젤발전기가 공급하는 전력량이 증가함에 따라 BESS의 공급 전력은 감소한다.  $I_{bat}$  전류부하가 양인 경우 BESS는 방전 상태, 음인 경우 BESS 충전 상태를 나타낸다. 디젤발전기는 유효전력 지령치가 인가되고 약 28초 후에 공급전력이 15kW에 도달함에 따라 부하에서 요구되는 전력을 모두 담당하고 BESS에서 공급되는 전력은 0이다. 디젤발전기의 공급전력이 20kW 정상상태에 지점에서 15kW는 부하에 공급하고 잉여전력인 5kW는 BESS에 공급함에 따라 배터리 뱅크를 충전을 수행한다. 충전운전 모드에서 BESS는 CVCF 제어를 통해 안정한 3상 전압을 생성하여 선로 전압을 유지하고 있음을 검증하였다.

그림 12는 독립형 마이크로그리드에서 수동운전 모드로 동작하는 경우에 대한 실험결과 파형이다. 초기에 디젤발전기가 선로 전압을 유지하고 있는 상태에서 BESS 측에 40kW 유효전력을 충전하기 위한 지령치를 인가하였다. BESS의 CC-CV 제어를 수행하여 소프트 스타트 구간을 통해 3상 전류가 점차적으로 상승하여 정상상태에 도달하고 안정한 전류제어가 수행되고 있으며, 디젤

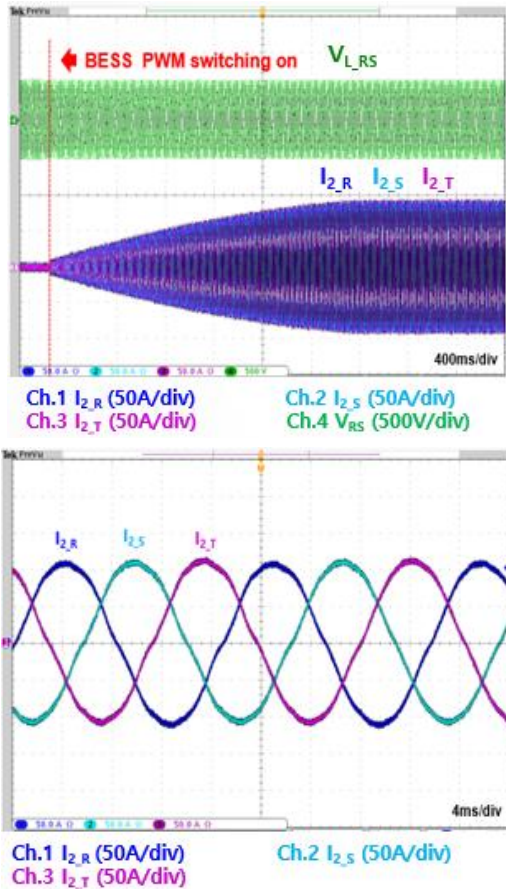


Fig. 12. Experimental results of BESS CC-CV control in manual mode.

발전기로부터 배터리 뱅크를 충전하는 결과를 도출함에 따라 수동운전 모드에서도 안정적인 BESS의 CC-CV 제어특성을 검증하였다.

## 5. 결 론

본 논문은 BESS와 디젤발전기로 구성된 독립형 마이크로그리드를 안정하게 운영하기 위한 BESS의 CVCF 제어기법 및 3가지 운전모드를 제안하였다. 독립형 마이크로그리드에서 BESS는 불평형 부하조건에서 전압 불평형을 야기하는 기본과 역상분 전압을 제어하기 위해 3상 부하전압으로부터 대칭좌표법을 통해 기본과 정상분과 역상분 성분을 추출하고 동기좌표계 축 상에서 개별적인 비례-적분 제어를 적용하여 제어하였으며, 저차 고조파 성분을 보상하기 위해 공진제어를 적용하였다. 또한, 독립형 마이크로그리드를 운영하기 위해 배터리 뱅크의 SOC 상태 및 구성요소들의 제어기법에 따라 3가지 운전모드는 정상운전, 충전운전 및 수동운전 모드를 제안하였다. 115kWh 납축 배터리 뱅크, 50kVA DC-AC 인버터 및 50kVA 디젤발전기를 포함하는 실증 구성에서 3가지 운전모드를 검증하였다. 정상운전 및 충전운전 모드에서 BESS의 CVCF 제어기법을 통해 부하

선간전압은 1.1%의 낮은 THD를 갖고 안정한 3상 평형 전압 제어를 수행하였으며, 수동운전 모드에서 CC-CV 제어기법을 통해 안정한 3상 전류제어를 수행함에 따라 배터리 뱅크를 충전하는 실험 결과를 통해 본 논문에서 제안하는 BESS 제어기법 및 운전모드의 타당성을 검증하였다.

### 감사의 글

이 연구는 충남대학교 학술연구비에 의해 지원되었음

## References

- [1] F. J. Sachs and O. Sawodny, "A two-stage model predictive control strategy for economic diesel-pv-battery island microgrid operation in rural areas," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 7, No. 3, pp. 903-913, Jul. 2016.
- [2] Q. Jiang, M. Xue, and G. Geng, "Energy management of microgrid in grid-connected and stand-alone modes," *IEEE Trans. Power Syst.*, Vol. 28, No. 3, pp. 3380-3389, Aug. 2013.
- [3] R. J. Wai, C. Y. Lin, and Y. R. Chang, "Design of high-performance stand-alone and grid-connected inverter for distributed generation applications," *IEEE Trans. Ind. Electron.*, Vol. 60, No. 4, pp. 1542-1555, Apr. 2013.
- [4] B. Zhao, X. Zhang, J. Chen, and C. Wang, "Operation optimization of standalone microgrids considering lifetime characteristics of battery energy storage system," *IEEE Trans. Sustain. Energy*, Vol. 4, No. 4, pp. 934-943, Oct. 2013.
- [5] S. Mishra, D. Ramasubramanian, and P. C. Sekhar, "A seamless control methodology for a grid connected and isolated PV-diesel microgrid," *IEEE Trans. Power Systems*, Vol. 28, No. 4, pp. 4393-4404, Nov. 2013.
- [6] J. Philip, B. Singh, and S. Mishra, "Design and operation for a standalone DG-SPV-BES microgrid system," *Power India International Conference (PIICON) 2014 6<sup>th</sup> IEEE*, pp. 1-6, Dec. 2017.
- [7] T. K. Vu, S. H. Lee, and H. J. Cha, "A new on-line dead-time compensator for single-phase PV inverter," *Trans. KIEPE*, Vol. 17, No. 5, pp. 569-576, Oct. 2012.
- [8] J. W. Choi and S. K. Sul, "Inverter output voltage synthesis using novel dead time compensation," *IEEE Trans. Power Electron.*, Vol. 11, No. 2, pp. 221-227, Mar. 1996.
- [9] P. Li, B. Dan, K. Yong, and C. Jian, "Research on three-phase inverter with unbalanced load," *Applied Power Electronics Conference and Exposition 2004. APEC '04. Nineteenth Annual IEEE*, pp. 128-133, 2004.

- [10] J. Y. Jeong, J. M. Jo, J. W. Lee, W. K. Chae, and H. J. Cha, "Dead time compensation of stand-alone inverter under unbalanced load," *Trans. KIPE*, Vol. 20, No. 2, pp. 115-121, Apr. 2015.
- [11] K. H. Kim, N. J. Park, and D. S. Hyun, "Advanced synchronous reference frame controller for three-phase ups powering unbalanced and nonlinear loads," *Power Electronics Specialists Conference PESC '05*, IEEE 36th, pp. 1699-1704, 2014.
- [12] "IEEE standard for interconnecting distributed resources with electric power systems," IEEE standard 1547-2003, Jun. 2003.



**조종민(趙鍾珉)**

1987년 4월 1일생. 2013년 충남대 전기공학과 졸업. 2015년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**안현성(安賢聖)**

1985년 1월 25일생. 2010년 충북대 물리학과 졸업. 2013년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2013년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정.



**김지찬(金志燦)**

1979년 9월 4일생. 2005년 한밭대 정보통신공학과 졸업. 2015년 충남대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2015년~현재 동 대학원 전기공학과 박사과정. 2005년~현재 대전광역시 도시철도공사 연구개발원 선임연구원 재직 중.



**차한주(車翰周)**

1988년 서울대 전기공학과 졸업. 1990년 포항공대 전자전기공학과 졸업(석사). 2004년 미국 Texas A&M University, College station(공박). 1990년~2001년 LG산전연구소 책임연구원. 2009년 미국 United Technology Research Center 방문교수. 2005년~현재 충남대 전기공학과 교수.