

# 가파도 마이크로그리드에서의 풍력발전 연계를 위한 2MVA급 배터리 에너지 저장시스템(BESS) 적용 및 실증

김승모<sup>†</sup>, 오승진<sup>1</sup>, 이종학<sup>1</sup>, 김태형<sup>1</sup>, 권병기<sup>1</sup>, 안재민<sup>2</sup>, 진경민<sup>2</sup>, 최창호<sup>2</sup>

## The Application and Verification of the 2MVA Battery Energy Storage System(BESS) with Wind-turbine in Micro-grid of Gapado, Jeju

Seung-Mo Kim<sup>†</sup>, Seung-Jin Oh<sup>1</sup>, Jong-Hak Lee<sup>1</sup>, Tae-Hyeong Kim<sup>1</sup>, Byung-Ki Kwon<sup>1</sup>,  
Jae-Min Ahn<sup>2</sup>, Kyung-Min Jin<sup>2</sup>, and Chang-Ho Choi<sup>2</sup>

**Abstract** - This paper shows the test result of 2MVA BESS(Battery Energy Storage System) with wind-turbine in micro-grid of the Gapado. To implement of micro-grid with BESS, characteristics of generator and customer load in grid are considered. Also, to operate of 2-parallel PCU(Power Conversion Unit) in BESS, the droop control is adopted with operating mode of grid independent. Performances of BESS with wind-turbine were verified by analysis of power quality such as voltage harmonics, ratio of voltage and frequency regulation, and by measurement of waveform such as output voltage and current.

**Keywords:** BESS(Battery Energy Storage System), micro grid, droop control, wind turbine

### 1. 서 론

최근 전력수급이 어려운 섬과 같은 고립지역을 중심으로 송전선로 건설과 유지관리 비용 증대에 따른 경제적 문제로 인해 마이크로그리드의 필요성 및 관심이 증대하고 있다. 전기사업자로부터 전력을 공급받는 일반적인 방식과는 달리, 마이크로그리드는 수용가와 다수의 발전원이 소규모 전력망으로 구성되어 있어 독립된 전원공급이 가능한 특성을 갖고 있다. 마이크로그리드에 적용되는 발전원은 화석연료를 이용한 디젤발전기, 신재생에너지를 이용한 풍력 및 태양광 발전이 대표적이다. 디젤발전기는 화석연료에 의한 발전방식으로 배기가스에 의한 환경오염, 도서지역의 연료공급 및 비용상승 문제가 내제되어 있고, 신재생에너지원은 청정자원으로 연

료비가 들지 않아 경제적이거나 지역과 기후에 따라 영향을 받으므로 발전에너지양이 변동함으로 안정적인 전력 공급이 어렵다는 단점을 갖고 있다. 따라서 마이크로그리드에서 신재생에너지를 확대하기 위해서는 발전원의 품질 개선이 요구되며, 에너지 사용량이 적은 시간대에 발생된 전력을 효과적으로 저장하는 방안이 필요하다. 또한 마이크로그리드의 발전원이 계통에서 차단될 경우, 마이크로그리드에 연결된 부하에 안정적인 전력을 공급하는 장치가 필요하다. 이를 위한 방안으로 계통의 안정도 향상과 에너지의 효율적 운영을 위하여 에너지 저장시스템(ESS: Energy Storage System)이 제안되었고, 다양한 종류의 배터리를 적용한 대용량 배터리 에너지 저장장치(BESS: Battery Energy Storage System)가 개발되고 있다.<sup>[1][2]</sup>

본 논문에서는 가파도에 적용된 마이크로그리드에 2MVA 전원용량의 수냉식 PCS(Power Conditioning System)와 500kWh 리튬이온배터리용량의 BCS(Battery Conditioning System)로 구성된 대용량 BESS를 적용하였고, 풍력발전기와의 연계시험을 통해 계통전원의 품질이 IEEE 1547 기준에 만족함을 확인하였다. 또한, 대용량 BESS 내부에서 DC전원을 3상 AC전원으로 변환하는 인버터 스택과 LCL필터로 구성된 PCU(Power Conversion Unit) 2대를 병렬운전하고, Droop제어를 통

Paper number: TKPE-2014-19-4-2

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

<sup>†</sup> Corresponding author: smkim72@poscoict.com, POSCO ICT R&D Center Electric & Electron Technology Team  
Tel: +82-2-3290-4492 Fax: +82-2-925-1812

<sup>1</sup> POSCO ICT R&D Center Electric & Electron Technology Team

<sup>2</sup> POSCO ICT R&D Center

Manuscript received Feb. 4, 2014; accepted Mar. 31, 2014

— 본 논문은 2013년 추계학술대회 우수추진논문임

— 본 논문은 편집위원회에서 우수기술논문으로 추천됨

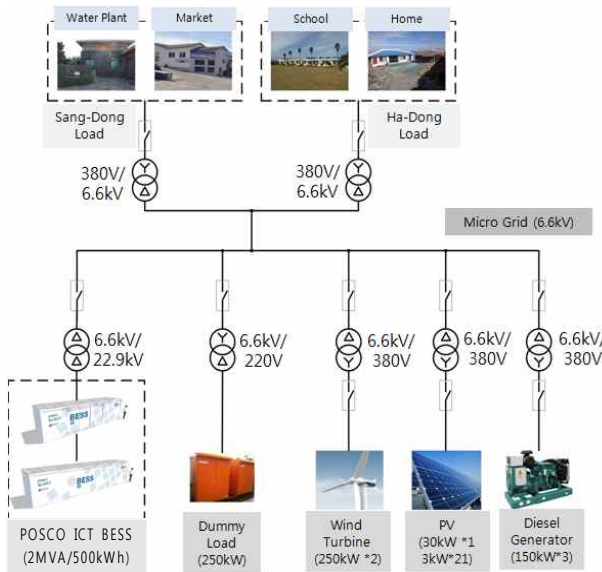


Fig. 1 Micro-grid with BESS in Gapado

해 균등부하운전과 초기 과도전류 억제를 구현하였다. 이를 이용하여 풍력발전기로부터 발생된 전기에너지 충전시험을 수행하였으며, 더미부하를 통한 방전시험을 진행하였다.

## 2. 가파도 마이크로그리드 구성

가파도는 제주특별자치도에서 약 5km 떨어진 서남쪽에 위치한 섬으로써 면적은 0.85km<sup>2</sup>으로 제주부속도서 중 4번째 규모이며, 총 134세대가 거주하고 있다. 기존에는 150kW급 디젤발전기 3대를 이용하여 가파도에 전원을 공급하고 있으며, 신재생에너지원으로는 250kW급 농형유도 풍력발전기 2기와 총 50kW의 각 수용가에 개별로 설치된 소용량 태양광발전이 다수로 이루어져 있다. 전체 계통은 6.6kV로 구성되어 있으며, 수용가 부하는 상동과 하동으로 분리되어 일반 가정, 학교 및 관공서, 담수화 설비 등을 포함하고 있다. 그림 1은 계통연계용 변압기를 포함한 가파도의 마이크로그리드 전체 구성도를 나타내고 있다.<sup>[3]</sup>

### 2.1 풍력발전기

가파도 마이크로그리드에 적용된 풍력발전기는 농형유도발전기로서 동기발전기에 비해 기계적 특성이 우수하고, 싸이리스터에 의한 AC전압 도통각 제어방식으로 제어가 단순하다. 또한 스텝제어방식을 채택하여 정격풍속을 초과하는 바람이 불 때 회전자 블레이드에서 양력을 감소하고 항력을 증가시킴으로써 발전출력을 제한하는 특징을 갖는다. 그러나 농형유도발전기의 발전 방식에 의하여 계통측으로 여자전류가 흐르기 때문에 역률 저하가 나타나며, 특히 독립전원으로 적용시 고정자측에 병렬로 컨덴서를 설치하여 역률을 보상하나, 부하측의

Table 1 Specification of Wind-turbine

Parameter	Value
Rated Output	250kW
Rated Wind Speed	14m/sec
Rotor Diameter	30m
Tower Height	30m
Operating Range	4 ~ 25m/sec
Power Control	Stall Control
Annual Production	657MWh

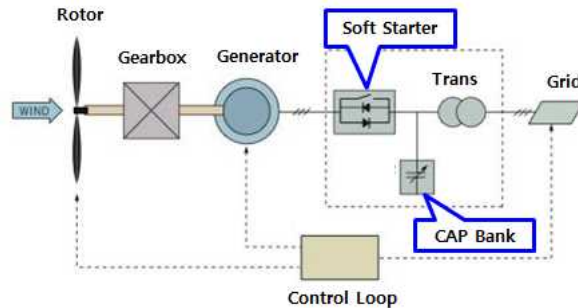


Fig. 2 Wind-Turbine and Driving Circuit in Gapado

진압 및 주파수 변동에 의해 출력전원이 불안정해지는 단점이 있다. 표 1은 풍력발전기의 사양을 나타낸다. 정격 풍속 14m/sec에서 250kW의 발전용량을 갖으며, 이때 회전자의 속도는 약 1150rpm을 유지한다. 운전모드는 풍속에 따라 6.5m/sec 이하에서는 저속모드, 8m/sec 이상에서는 고속모드로 나누어지며, 농형유도발전기의 토크-속도 특성에 따라 동기속도 이전에는 기동모드, 이후에는 발전모드로 구분한다.

농형유도발전기의 기동회로는 소프트스타터, 커패시터뱅크, 계통연계용 변압기, 제어기를 포함한다. 그림 2에서는 구동회로를 포함한 풍력발전기의 구성을 나타내었다. 초기 운전시, 계통에서 공급된 AC 전원을 소프트스타터의 싸이리스터 스위치를 이용한 제어를 통해 풍력발전기를 동기속도까지 기동한다. 그 후, 풍력발전기의 발전모드로 진입하면 소프트스타터의 점점스위치를 닫고 커패시터뱅크를 투입함으로써 역률을 보상하고 계통에 전력을 공급한다.<sup>[4]</sup>

그림 3은 농형유도발전기 2대를 동시에 고정풍속 12.2 m/sec로 기동 시 시뮬레이션 결과를 나타낸다. 초기 기동시 계통에서 공급되는 3상 AC 전원과 구동회로의 싸이리스터 도통각 제어에 의한 스위치 양단의 전압파형 왜곡으로 인해 풍력발전기의 고정자 측에 고조파 전류가 발생함을 볼 수 있다. 이때, 최대 유효전력은 32kW, 최대 무효전력은 957kVAR 이다. 또한, 발전모드에서는 소프트스타터의 싸이리스터가 동작을 멈추고, 점점스위치 동작으로 고정자측에 고조파전류가 발생하지 않음을 볼 수 있으며, 이때 발전된 유효전력은 485kW, 무효전력은 300kVAR임을 알 수 있다. 따라서 가파도 마이크

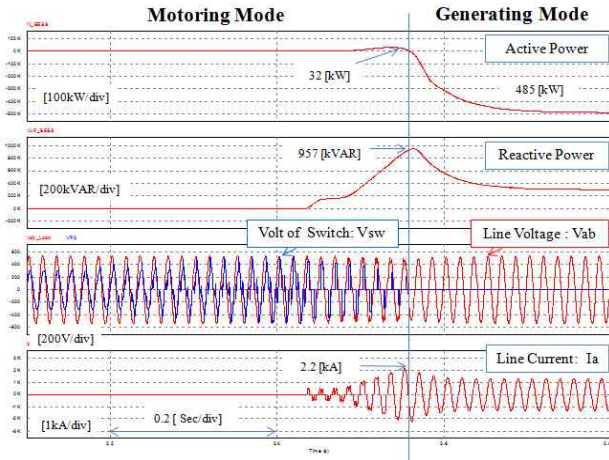


Fig. 3 Simulation Waveform of Wind-Turbine in Gapado

로그리드에서의 대용량 BESS는 풍력발전기의 기동모드시 고조파전류에 의한 전압파형 왜곡을 최소화 하도록 출력전압 품질을 유지 하여야 하며, 최대 무효전력 공급 능력을 갖추어야 한다.

2.2 배터리 에너지 저장시스템

BESS란 발전된 전기에너지를 배터리에 저장하여, 필요 방전시 출력하여 에너지 이용 효율을 향상시키고, 신재생 에너지의 활용도를 높이며, 전력공급 시스템을 안정화하기 위한 장치이다.<sup>[5]</sup>

그림 4는 가파도에 적용된 배터리 에너지 저장시스템의 구성을 나타낸다. 시스템의 기본 구성은 전력설비와 제어설비로 나누어진다. 전력설비는 계통의 잉여전력을 배터리에 저장 또는 배터리에 저장된 에너지를 계통에 공급해 주는 PCS, 에너지를 저장하거나 방전하기 위하여 배터리와 배터리셀을 제어하는 BCS로 구성된다.

제어설비는 최상위 운영시스템과의 연계를 위한 PMS(Power Management System), 전력변환 제어를 위한 PCS Controller, 배터리 상태 및 공조, 소방설비를 제어하는 BCS Controller로 구성된다. PCS 내부는 BCS 출력을 3상 AC전원으로 변환하는 인버터 스택과 출력 LCL필터로 구성된 2대의 PCU, 계통과의 연계를 위한 변압기 및 스위치 기어로 구성되며, BCS 내부는 배터리와 BMS(Battery management System), HVAC(Heating Ventilation and Air Conditioning)로 구성된다. 제어기는 TCP/IP, eCAN을 이용하여 상태정보를 교환하고, PMS는 최상위 운영시스템과 IEC 61850 게이트웨이를 이용하여 상태정보, 고장정보, 운전지령을 송수신한다. 표 2는 가파도에 적용된 BESS의 사양을 나타내었다. 여기에서 PCS 내부의 TR2는 가파도 계통을 위해 신설된 변압기로 1.5MVA 용량의 계통측 전압은 6.6kV 이다. PCS 최대용량은 2MVA로서 무효전력 보상 기능을 포함하고 있으며, 설치위치와 주변 온도환경, 냉각효율 등을 고려하여 수냉방식으로 설계되었다. BCS의 배터리는

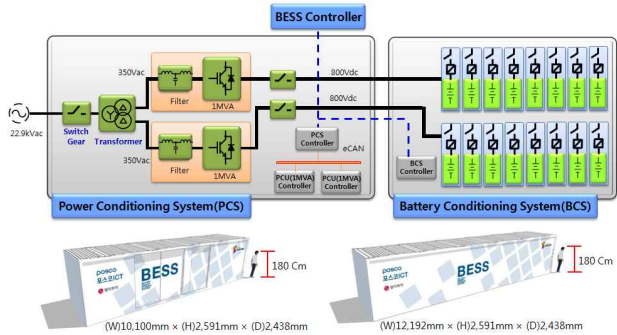


Fig. 4 Configuration of the BESS in Gapado

Table 2 Specification of BESS in Gapado

Classification	Parameter	Value	
PCS	PCU	Capacity	2MVA
		DC Voltage	650~800Vdc
		AC Voltage	350Vac
		Frequency	60Hz
		Efficiency	> 97%
	TR1	Capacity	2.1MVA
		Voltage	350/22,900Vac
		TR2	Voltage
	SWGR	Capacity	2MVA
		Voltage	22,900Vac
BCS	Battery system	Voltage	650~800Vdc
		Current	2,160A
		Capacity	4CP, 500kWh
		Type	Li-ion
		Structure	16 Rack Parallel
		Cooling	Air
PMS Controller	Comm	Modbus/TCP	
	Interface	EMS, PCS, BCS	
Round-Trip Efficiency		>= 90%	
Reactive Power Compensation		1MVAR	

리튬이온배터리를 채택하였고, 배터리 방전능력 4CP 기준으로 2MW/500kWh 용량을 적용하였다. 리튬이온전지는 동작 시 25°C로 온도를 유지하여야 하며, 2MVA BESS의 충, 방전(Round-trip) 효율은 90% 이상이다.

BESS에서의 에너지 충전 및 방전 동작을 그림 5에 나타냈다. 리튬이온배터리에 정전류(CC: Constant Current)제어로 일정전류를 배터리에 주입하고, 배터리 전압이 기준전압까지 충전된 이후, 배터리에 주입되는 전류가 완충기준 5%이하로 강하할 때 까지 정전압(CV: Constant Voltage)제어를 수행하여 에너지를 공급한다.

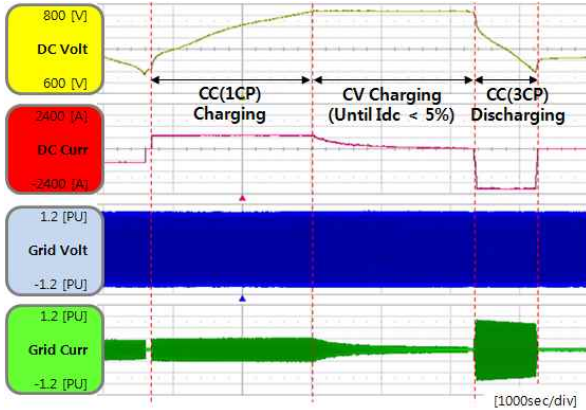


Fig. 5 The waveform of charging and discharging in Li-ion Battery

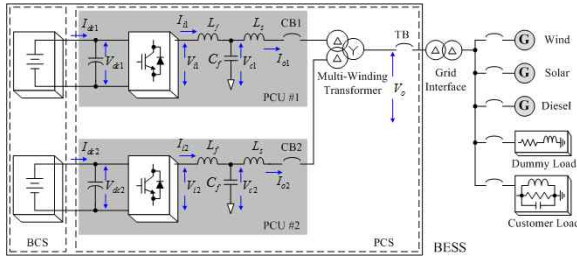


Fig. 6 Single line diagram in 2MVA BESS in gapado

본 충전시험에서는 500kWh 배터리 정격용량에 따른 1CP로 일정전류 충전을 수행하였다. 충전효율 검증을 위한 배터리에너지 방전시험에서는 배터리 정격 전류용량의 3배에 해당하는 부하를 적용하여 수행하였다.<sup>[6]</sup>

### 3. 배터리 에너지 저장시스템 제어알고리즘

본 2MVA급 BESS의 PCU는 발전원과 부하원을 포함하는 마이크로그리드에 전력을 공급하기 위해, 계통측 기준전압을 제어하고 부하분담을 위한 전류제어를 수행한다. 여기에서 계통측 전압제어를 수행하는 PCU가 마스터로서 제어 우선권을 가진다. 부하분담 전류제어를 수행하는 PCU는 슬레이브로 동작하여, 계통전원의 위상 동기화 및 PCU 두 대의 출력전류를 균등하게 제어한다. 그림 6은 1MVA 2대의 PCU로 병렬구성된 2MVA BESS와 가파도 마이크로그리드의 구성을 단선도로 나타내었다.

마이크로그리드에서 배터리 에너지 저장시스템(BESS)은 전원공급모드로 기동 시, 마스터로 설정된 PCU는 IEEE 1547 규정에 따라 계통측 출력전압을 정격전압의  $\pm 3\%$  이내, 출력주파수는 기본주파수의  $\pm 0.5\text{Hz}$  이내, 그리고 출력전압 왜형률은 5% 이내를 유지하여야 한다. 또한, 각각의 PCU에 부하전류를 균등하게 제어하기 위해서는 출력부하측 임피던스를 추정하여 슬레이브로 설정된 PCU는 전류제어를 수행하여야 한다. 부하측 임피

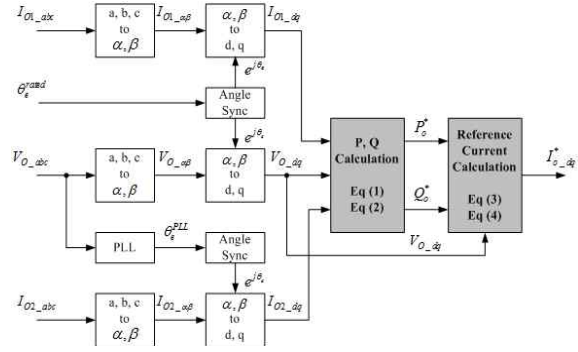


Fig. 7 Calculation process of output reference current in the PCU(Power Conversion Unit) of 2MVA BESS

던스는 각 PCU 출력전류와 다권선변압기 2차측에서의 출력전압을 통하여 BESS의 유효전력과 무효전력 수식으로 구한다. 유효전력과 무효전력 연산은 PCS에서 수행되며 식 1, 2와 같다. 여기에서,  $P_o^*$ 는 유효전력,  $Q_o^*$ 는 무효전력,  $V_{O.dq}$ 는 동기좌표계로 환산된 출력전압,  $I_{O.dq}$ 는 동기좌표계로 환산된 각 PCU의 출력전류인  $I_{O1.dq}$ 와  $I_{O2.dq}$  합이다.

$$P_o^* = \frac{3}{2} \cdot \text{Re}(V_{O.dq} \cdot \bar{I}_{O.dq}) \quad (1)$$

$$Q_o^* = \frac{3}{2} \cdot \text{Im}(V_{O.dq} \cdot \bar{I}_{O.dq}) \quad (2)$$

슬레이브로 설정된 PCU의 출력 전류 지령은 PCS에서 계산된 유효전력과 무효전력 값에 의한 부하 임피던스에 의해 연산되며, 부하임피던스의 관계식과 슬레이브 PCU 출력전류 지령식은 식 3, 4와 같다.

$$Z^{-1} = \frac{2}{3} \cdot \frac{1}{V_{O.d}^2 + V_{O.q}^2} \cdot (P_o^* + Q_o^*) \quad (3)$$

$$I_{O.dq}^* = \frac{1}{2} \cdot V_{O.dq} \cdot Z^{-1} \quad (4)$$

그림 7은 각 PCU의 3상 출력전류와 다권선변압기측 3상 출력전압 검출값에 의해 배터리 에너지 저장시스템(BESS)의 유효전력 및 무효전력, 부하임피던스, 슬레이브 PCU의 출력전류지령치의 연산과정을 나타내었다.

여기에서, 3상 전압 전류를 정지좌표  $\alpha, \beta$ 로 변환하고 동기좌표로 환산하기 위한 위상검출은 마스터 PCU에서는 계통전압의 정격위상인  $\theta_e^{\text{Rated}}$  과 슬레이브 PCU는 출력전압으로부터 PLL을 이용한 위상값인  $\theta_e^{\text{PLL}}$ 을 적용하였다. 이때 두 위상각  $\theta_e^{\text{Rated}}$ ,  $\theta_e^{\text{PLL}}$ 은 위상동기제어에 의해  $\theta_e$ 의 동일위상을 갖는다. 그림 8은 2MVA급 BESS의 제어블럭도를 나타내었다. 계통의 전압제어를 수행하는 PCU는 마스터로 우선권을 가지며 PI 전압제어기, Droop 제어기, 필터제어기로 구성되어 있다. 부하분담



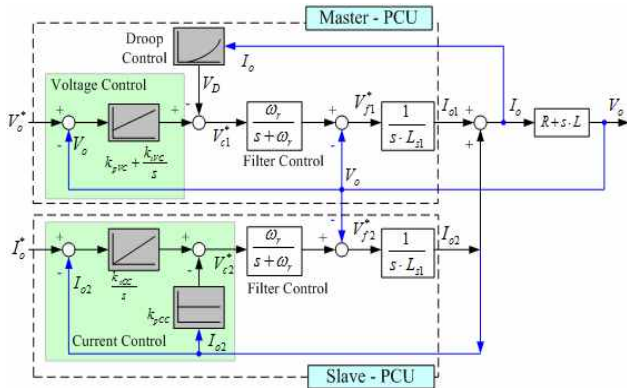


Fig. 8 Control Block of the two PCU(Power Conversion Unit) in the BESS(Battery Energy Storage System)

전류제어를 수행하는 PCU는 슬레이브로써 IP 전류제어기 및 마스터 PCU 위상동기제어기로 구성되어 있다. 전류제어기 및 전압제어기의 P-I 이득은 식 5, 6과 같다. 여기에서  $K_{pCC}$ 는 전류제어기 P제어기 이득,  $K_{iCC}$ 는 전류제어기 I제어기 이득,  $\zeta$ 는 댐핑계수,  $L_s$ 는 LCL 필터의 계통측 L의 인덕턴스,  $\omega_{cc}$ 는 전류제어기의 차단주파수이다.

$$\begin{aligned} K_{pCC} &= 2\zeta \cdot L_s \cdot \omega_{cc} \\ K_{iCC} &= L_s \cdot \omega_{cc}^2 \end{aligned} \quad (5)$$

또한,  $K_{pVC}$ 는 전압제어기의 P제어기 이득,  $K_{iVC}$ 는 전압제어기의 I제어기 이득,  $\omega_{vc}$ 는 전압제어기의 차단주파수,  $\omega_r$ 은 LCL필터의 공진주파수이다.<sup>[7][8]</sup>

$$\begin{aligned} K_{pVC} &= \frac{\omega_{vc}}{\omega_r} \\ K_{iVC} &= \omega_{vc} \end{aligned} \quad (6)$$

계통 전압제어를 수행하는 마스터 전력변환장치는 마이크로그리드의 주전원의 역할을 수행하므로 3상 전압과 기준 위상각( $\theta_e^{Rated}$ )을 출력한다. 여기에서, 마스터 PCU의 전압제어기는 Droop 제어기와 연동하며, 과도 전류 발생시 출력발생 기준전압을 강하하여 출력전류를 제한한다. 이를 통해 과전류에 의한 전력변환장치의 소손을 방지하고, 초기 기동시 마이크로그리드의 계통임피던스에 의한 과도전류의 유입을 제한한다. Droop 제어기는 배터리 에너지 저장시스템(BESS)의 출력전류에 따라 마스터 전력변환장치의 출력기준전압의 강하를 조정하는 역할을 한다. 그림 9는 출력전류와 출력기준전압 강하 비율을 나타낸 그래프로서 전류가 정격의 설정범위 초과시 동작하며, 정격 전류 100%에서는 출력기준전압을 정격전압의 88%까지 강하시킨다. 이는 계통에서 허용하는 전압 변동률 범위를 만족하도록 설계되었으며, 그래프는 출력 전류의 크기에 따라 3구간으로 나눈다.

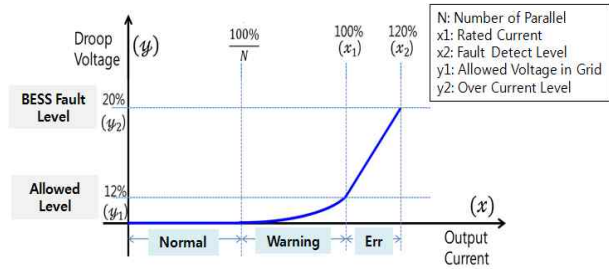


Fig. 9 Droop Ratio according to Output Current

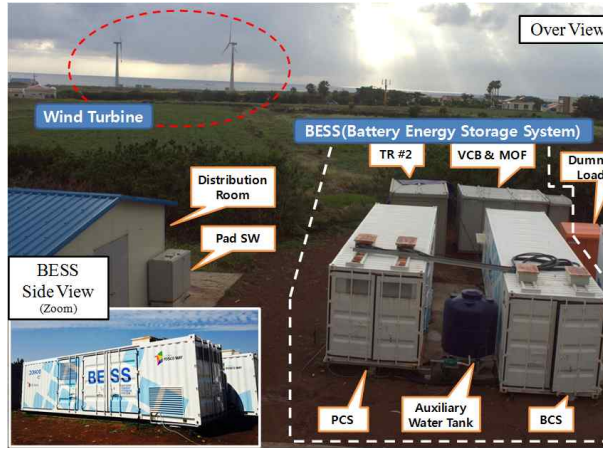


Fig. 10 2MVA BESS with Wind-turbine in Micro-grid Gapado

구간 1은 Droop 제어가 동작하지 않는 영역이고, 구간 2는 Droop 제어가 시작하는 영역으로서 출력 전류가 정격 범위 내에 있으므로 계통에 출력되는 전압이 정격 용량에 유지 될 수 있도록 한다. 이때 출력기준전압의 강하는 지수함수 형태로 증가시킨다. 출력 전류가 정격 전류에 이르면 출력기준전압의 강하는 허용 전압 변동률을 만족하도록 정격 전압의 88%로 제한한다. 구간 3은 출력 전류가 정격 범위를 초과한 경우로써 출력 기준전압의 강하율을 높게 설정하여 마이크로그리드의 정전상태가 되는 것을 방지한다. 구간별 그래프의 기울기를 수식으로 나타내면 다음과 같다.<sup>[9]</sup>

$$1 \text{ 구간: } Droop \text{ Voltage} = 0 \quad (7)$$

$$2 \text{ 구간: } Droop \text{ Voltage} = 0.1 \times \left( e^x - e^{\frac{1}{N}} \right) \quad (8)$$

$$3 \text{ 구간: } Droop \text{ Voltage} = \frac{y_2 - y_1}{x_2 - x_1} \times (x - x_1) + y_1 \quad (9)$$

#### 4. 실험 결과

가파도 마이크로그리드에서의 2MVA BESS 적용시험은 풍력발전기와 연계하여 수행되었다. 시험 항목은 전력품질측정과 제어성능검증 그리고 배터리 상태검증으로 이루어졌다.

그림 10에서는 가파도에 설치된 2MVA BESS를 나타

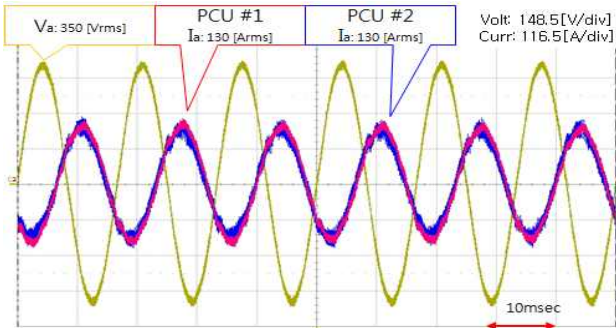


Fig. 11 Output-current of the PCS in BESS

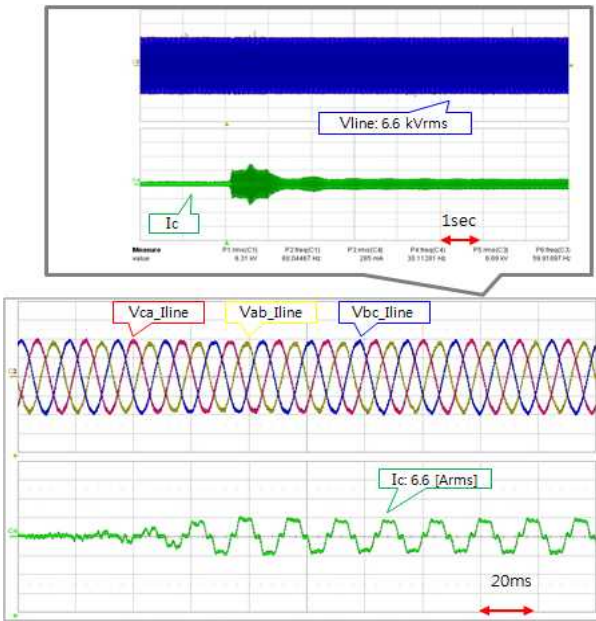


Fig. 12 Waveform of Voltage and Current in Micro-grid Motoring(Low-Speed) Mode in Wind Turbine

내었다. 여기에서 6.6kV 가파도 계통연계를 위한 TR2와 VCB 및 MOF판넬, 보조물탱크는 가파도 현장 요구에 따라 신설된 장치이고, 풍력발전기 2대, Pad Switch, 더미부하, 배전실은 기존의 가파도 마이크로그리드 설비 일부이다.

그림 11은 2대의 풍력발전기 연계운전시 A기 기동모드, B기 발전모드로 운전하는 PCU에서 측정된 출력 상전압과 상전류이다. 두 대 병렬 구성에서 출력전류가 슬레이브로 설정된 PCU의 전류제어에 의해 각 PCU 출력전류의 크기와 위상이 균등하게 제어되었다. 또한 각 풍력발전기의 기동, 발전모드 동작에 의해 출력전압과 전류의 위상차이가 약 135° 발생하였다.

그림 12는 1대의 풍력발전기 저속운전모드 기동시 6.6kV 계통연계용 변압기에서 측정된 3상 선간전압과 상전류를 나타내었다. 풍력발전기 기동전류에도 가파도 마이크로그리드 계통 전압크기는 6.6kV로 일정하게 유지되었다. 가파도 마이크로그리드에서의 풍력발전기 초기 기동시 상전류 출력은 농형유도발전기의 소프트스타

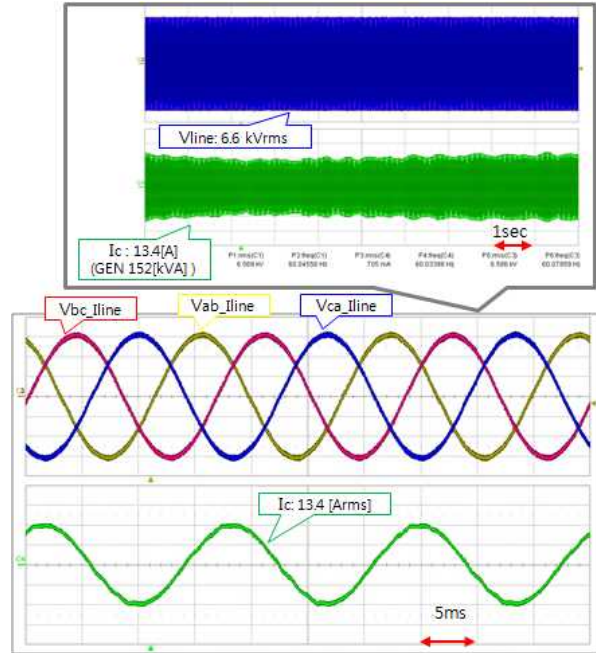


Fig. 13 Waveform of Voltage and Current in Micro-grid Generating(High-Speed) Mode in Wind Turbine

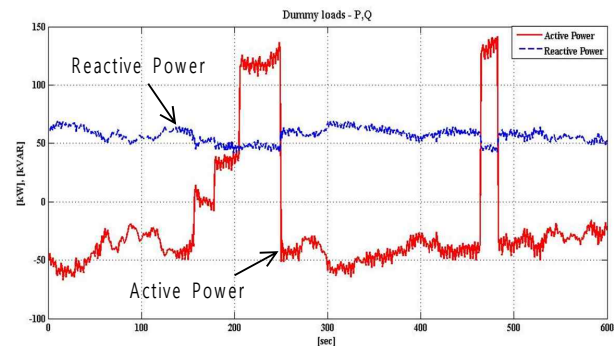
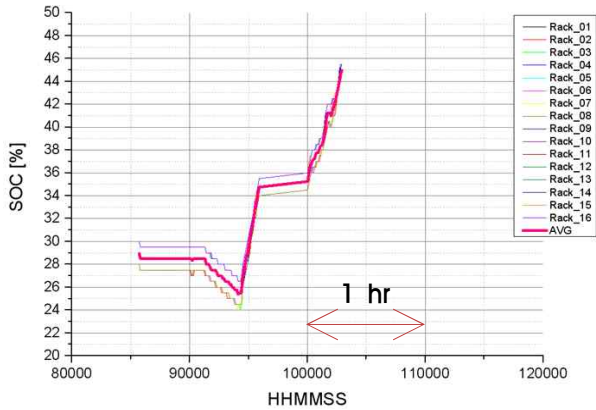


Fig. 14 Dummy-Load Test in Gapado Micro-grid

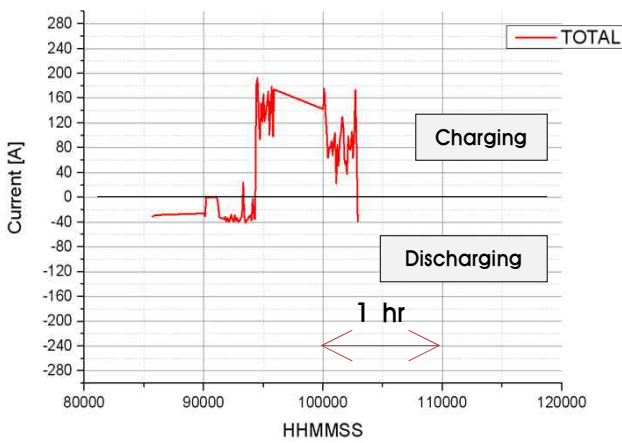
터 동작에 의해 고조파성분이 포함된 전류파형이 발생되고, 이에 따른 출력전압의 크기변동 및 파형왜곡은 발생하지 않음을 볼 수 있다.

그림 13은 풍력발전기 한 대로 고속운전모드 발전 시, 2MVA BESS의 출력특성을 나타내었다. 풍력발전기 운전 시, 전기에너지는 계통측 전류의 크기와 전압파형과의 180° 위상차이에 의해 확인하였다. 평균발전전력은 피상전력 152kVA이며 계통전류의 변동에 의하여 발전양에 차이가 있으며, 확대한 계통측 전압과 전류파형을 통해 풍력발전기 계통전압의 왜곡이 발생하지 않음을 볼 수 있다.

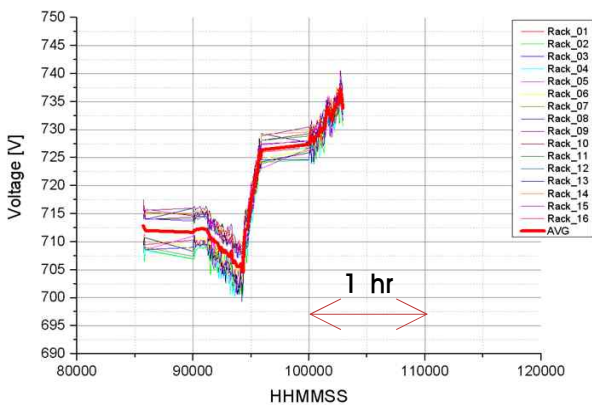
그림 14는 1대의 풍력발전기를 저속운전모드로 발전 시 저항과 인덕터 소자로 구성된 더미부하 투입시험의 결과를 유효 전력량으로 나타내었다. 발전유효전력이 약 50kW에서 더미부하의 크기를 50kW, 100kW, 175kW



(a) Battery Charging Status in 2MVA BESS



(b) DC-Current of BCS in the 2MVA of BESS

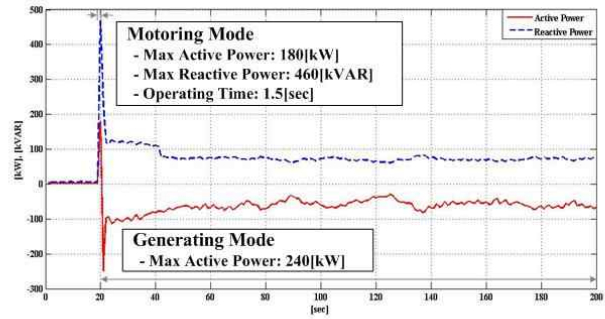


(c) DC-Voltage of BCS in the 2MVA BESS

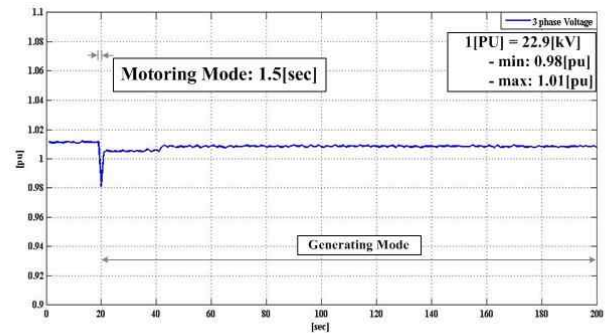
Fig. 15 Battery Status in Gapado Micro-grid

로 순차 가변했을 경우와 175kW를 동시 투입하였을 때, 2MVA BESS의 전력공급능력을 입증하였다.

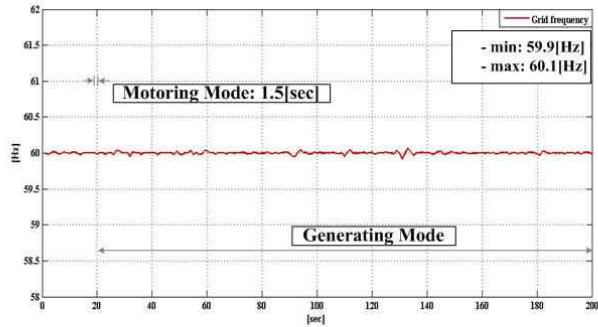
그림 15는 풍력발전기 한 대의 고속운전모드로 운전 시 2MVA BESS의 배터리 충전 특성, 배터리 전압과 전류 상태를 나타내고 있다. 16개의 배터리 랙에서 수집한 배터리 상태로써, 풍력발전기의 연계시험으로 충전전류가 가변되고 이에 따라 배터리 전압과 충전상태가 가변함을 볼 수 있다.



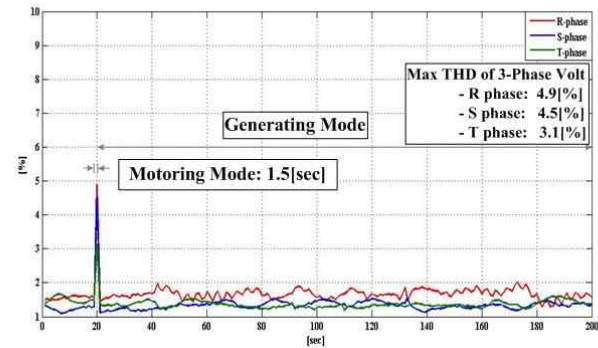
(a) Active and Reactive Power



(b) Voltage Fluctuation Regulation



(c) Grid Frequency Regulation



(d) Total Harmonic Distortion

Fig. 16 Power Quality Estimation in Gapado Micro-grid

그림 16에서는 풍력발전기 한 대의 고속운전 시, 가파도 마이크로그리드에서 측정된 전력품질 결과이다.

그림 16 (a)에서는 유, 무효 전력량 현황, (b)는 전압변



동률, (c)는 주파수변동률, (d)는 전압 왜형률을 동일한 측정시간으로 나타내었다.

10.5m/sec 이상의 풍속발생 시 풍력발전기의 기동모드에서 발전모드로 전환되는 시간은 약 1.5초가 소요되었으며, 이는 BESS를 기준으로 출력전류의 흐름이 계통에서 장치로 흐를 때의 유효전력으로 판단하였다. 기동순간 최대 무효전력 460kVAR, 소비전력은 180kW이며 발전모드에서의 최대 발전전력은 240kW, 소비 무효전력은 약 80kVAR을 유지하였다. 가과도 마이크로그리드에서의 풍력발전기와 연계된 2MVA BESS 성능시험에 있어 고려해야할 전압 및 부하환경은 풍력발전기의 기동모드에서 발전모드로 전환 되는 구간이다. 이는 풍력발전기의 최대기동전류 소모에서 발전된 에너지가 BESS에 유입되는 구간으로써, 최대 유효 및 무효 전력공급이 필요하고 소프트스타터에 의한 농형유도전동기의 제어를 위해서는 전압왜형률을 최소화 하여야 한다.

본 시험에서는 가과도 마이크로그리드 실증시험을 통해 2MVA BESS의 출력특성이 전압왜형률 5% 이하, 전압 및 주파수 변동률 3% 이하의 IEEE 1547<sup>[10]</sup> 및 분산형전원 배전계통 연계 규정에 만족하는 결과를 확인하였다.

## 5. 결 론

본 논문에서는 가과도 마이크로그리드에 적용된 2MVA BESS와 풍력발전기의 연계시험을 통해, 계통전원 품질이 IEEE 1547 기준에 만족함을 확인하였다. 또한, 내부 구성품인 2대 병렬구성의 전력변환장치(PCS) 운전과 Droop제어 구현을 통해 균등부하운전과 초기 과도전류 억제를 확인하였다. 풍력발전기로부터 발생된 전기에너지 충전시험을 통해 배터리의 상태를 모니터링하였으며, 풍력발전기 발전시 더미부하를 통한 방전시험을 통해 전력공급능력을 검증하였다. 이를 통해 가과도 마이크로그리드에서 제안된 2MVA BESS의 성능과 특성을 검증하였다.

## References

- [1] Sergio Vazquez, Srdjan M. Lukic, Eduardo Galvan, Leopoldo G. Franquelo, Juan M. Carrasco, "energy storage systems for transport and grid applications," *IEEE Trans. Industrial Electronics*, Vol. 57, No. 12, pp. 3881-3895, 2010.
- [2] K.C.Divya, Jacob Ostergaard, "Battery energy storage technology for power system - An overview," *Electric Power Systems Research*, pp. 511-520, 2009.
- [3] Young-hun Jung,, "Korea's Smart Grid policy and deployment," *Ministry of Knowledge Economy(MKE) Counselor to the Minister*, pp. 15-17, Nov. 2013.
- [4] Anca D. Hansen, Florin Iov, Frede Blaabjerg and Lars

H. Hansen, "Review of Contemporary Wind Turbine Concepts and their Market Penetration," *Wind Engineering* Vol 28, No. 3, pp. 247-263, 2004.

- [5] Smart Renewable Project Business Plan(POSCO ICT), 2009.
- [6] Soo-Hong Kim, Tae-Hyeong Kim, Yun-Hyun Kim, Dong-Seok In, Byung-Ki Kwon, Chang-Ho Choi, "A Development of 2MVA Battery Energy Storage System," *The Transactions of Korean Institute of Power Electronics*, Vol. 17, No. 2, pp. 174-181, Apr. 2012.
- [7] Seung-Jin Oh, Tae-Hyeong Kim, Byung-Ki Kwon, "A Parallel Control Algorithm using Droop Control for Battery Energy Storage System(BESS)," *The Korean Institute of Power Electronics*, pp. 131-132, Nov. 2013.
- [8] Seung-Jin Oh, Tae-Hyeong Kim, Byung-Ki Kwon, "A Parallel Control Algorithm using Droop Control for Battery Energy Storage System(BESS)," *The Korean Institute of Power Electronics*, pp. 131-132, Nov. 2013.
- [9] Seung-Jin Oh, Tae-Hyeong Kim, Byung-Ki Kwon, "A Parallel Control Algorithm using Droop Control for Battery Energy Storage System(BESS)," *The Korean Institute of Power Electronics*, pp. 131-132, Nov. 2013.
- [10] IEEE Application Guide for IEEE Std 1547.2<sup>TM</sup> 2008.



### 김승모(金勝模)

1972년 9월 13일생. 2001년 중앙대 전자전기공학부 졸업. 2003년 동 대학원 전자전기공학과 졸업(석사). 2007년~현재 POSCO ICT 기술연구소 전력전자기술팀 책임연구원.



### 오승진(吳丞鎭)

1983년 2월 15일생. 2009년 명지대 전기공학과 졸업. 2011년 동 대학원 전기전자제어공학과 졸업(석사). 2011년~현재 POSCO ICT 기술연구소 전력전자기술팀 선임연구원.



### 이종학(李鐘鶴)

1984년 7월 15일생. 2009년 숭실대 전기공학부 졸업. 2011년 동 대학원 전기공학부 졸업(석사). 2011년~현재 POSCO ICT 기술연구소 전력전자기술팀 선임연구원.



### 김태형(金泰亨)

1983년 7월 2일생. 2008년 광운대 전기공학과 졸업. 2010년 동 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 POSCO ICT 기술연구소 전력전자기술팀 선임연구원.





**권병기(權炳基)**

1970년 12월 5일생. 1995년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년~현재 POSCO ICT 기술연구소 전력전자기술팀 팀장/수석연구원.



**안재민(安宰民)**

1982년 1월 30일생. 2009년 숭실대 공대 전기공학과 졸업(석사). 2009년~2012년 한국 전기안전공사 전기안전연구원 연구원. 2012년~현재 POSCO ICT 기술연구소 스마트 그리드 사업단 선임연구원.



**진경민(秦炅敏)**

1985년 5월 25일생. 2011년 제주대 전기공학과 졸업. 2013년 동 대학 풍력특성화협동 과정 졸업(석사). 2013년~현재 POSCO ICT 기술연구소 스마트그리드 사업단 연구원.



**최창호(崔昌鎬)**

1956년 10월 18일생. 1984년 서울대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2000년 한양대 대학원 전기공학과 졸업(공박). 1983년~1987년 LG산전 기술연구소 선임연구원. 1987년~1991년 한국 서보주식회사 책임연구원. 1991년~현재 POSCO ICT 기술개발센터장(본부장).