

# 2MVA급 배터리 에너지 저장시스템 개발

김수홍<sup>†</sup>, 김태형<sup>1</sup>, 김윤현<sup>1</sup>, 인동석<sup>1</sup>, 권병기<sup>1</sup>, 최창호<sup>2</sup>

## A Development of 2MVA Battery Energy Storage System

Soo-Hong Kim<sup>†</sup>, Tae-Hyeong Kim<sup>1</sup>, Yun-Hyun Kim<sup>1</sup>, Dong-Seok In<sup>1</sup>,  
Byung-Ki Kwon<sup>1</sup>, and Chang-Ho Choi<sup>2</sup>

**Abstract** - Energy storage system connected to the grid has two functions such as the surplus power of a grid is stored in batteries or the energy stored in batteries will supply to the grid when the grid needs. The battery energy storage system consist of power condition system (PCS) for power supply and battery conditioning system (BCS). Lithium-ion batteries are mainly used. In this paper, the battery energy storage system connected to the grid described. The configuration of the 2MVA class power control system using water cooling and battery system are presented. And control method for the system and the output filter design method are proposed. Experimental verification of the proposed system is provided with 2MVA PCS and 500kWh BCS.

**Keywords** : Battery energy storage system(BESS), ESS, Lithium-ion battery, LCL filter

### 1. 서 론

산업이 고도화됨에 따라 전력소비는 날로 증가하고 있으며, 화석연료의 무분별한 사용으로 인해 지구온난화 및 환경오염 등이 중요한 사회적문제로 이슈화 되고 있다. 화석연료의 사용을 감소시키고, 환경오염 문제들을 해결하고자 전 세계적으로 풍력, 태양광과 같은 신재생 에너지에 대한 투자가 매년 증가되고 있다<sup>[1-3]</sup>. 그러나 이러한 신재생 에너지원은 지역 및 기후에 따라 출력되는 에너지양의 예측이 어렵고, 자연조건에 따라 출력이 크게 변동되므로, 연계계통의 안정적인 운영에 큰 영향을 미친다<sup>[4-5]</sup>. 출력변동이 심한 발전특성을 갖는 신재생 에너지원의 확대를 위해서는 발전되는 출력의 전력품질 개선이 요구되며, 에너지의 사용량이 적은 특정시간대에 생산된 에너지를 효과적으로 사용하기 위한 방안이 요

구된다. 또한 신재생 에너지 발전원의 보급증가로 인해 대규모 발전단지가 동시에 계통에서 탈락될 경우 계통 안정도를 무너뜨리는 경우가 발생하였으며, 전력계통에 순간고장이 발생하여도 규정된 시간 이내에서 발전기가 계통에서 탈락하지 않고 발전을 지속하도록 하는 규정 (low voltage ride through, LVRT)도 제정하게 되었다<sup>[6]</sup>.

계통의 안정도 향상과 에너지의 효과적인 운용을 위해 에너지 저장시스템에 대한 연구가 활발히 진행되고 있으며, 다양한 종류의 배터리를 사용한 대용량 배터리 에너지 저장장치(battery energy storage system, BESS)가 개발되고 있다<sup>[7-8]</sup>. 전력저장분야가 확대됨에 따라 배터리에 대한 수요도 급증하고 있으며, 다양한 배터리가 개발되어 사용되고 있다<sup>[2,9]</sup>. 특히 리튬이온 배터리는 셀당 에너지 밀도와 출력전압이 높고, 용량에 비해 작고 가벼우며, 수명이 길고 충·방전 특성이 우수하며, 자가 방전율이 낮고 메모리 효과가 없기 때문에 각광을 받고 있다<sup>[10]</sup>.

본 논문에서는 계통연계용 리튬이온 배터리 에너지 저장시스템의 구성 및 설계, 해석, LCL출력필터 설계방법 및 전체 알고리즘 구성을 제시하였다. 제시한 방법의 타당성을 검증하기 위해 2MVA 수냉식 PCS와 500kWh BCS의 충·방전 실험 및 계통연계 실험을 수행하였다.

Paper number : TKPE-2012-17-2-12

ISSN : 1229-2214

<sup>†</sup> Corresponding Author : shkim7676@gmail.com, Department Electrical and Computer Engineering, Texas A&M University  
Tel : +82-2-3290-4437

<sup>1</sup> POSCO ICT R&D Center PowerElectronics Team

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

Manuscript received Dec. 16, 2011; accepted Feb. 10, 2012

— 본 논문은 2011년 전력전자학술대회 우수추천논문임

— 본 논문은 편집위원회에서 우수기술논문으로 추천됨

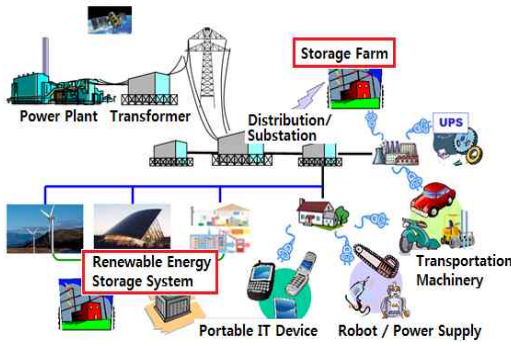


Fig. 1 The energy storage system

## 2. 에너지 저장시스템 개요

그림 1은 대규모 전력저장 및 신재생 에너지 저장을 위한 에너지 저장시스템의 형태를 보여준다. 에너지 저장시스템이란 생산된 전력에너지를 저장하여, 필요할 때 사용함으로써 에너지 이용 효율 향상, 신재생 에너지 활용도 제고 및 전력공급 시스템 안정화를 위한 장치로, 에너지 저장기술은 미래의 에너지 시장을 선도할 중요한 기술이다. 배터리 에너지 저장기술은 필요한 때 전기 에너지를 저장하거나, 저장한 전기에너지를 사용하도록 하는 기술을 의미하며, 저장하는 에너지의 양과 저장 방식에 따라 다양하게 분류할 수 있다<sup>[11]</sup>. 에너지 저장기술의 기술개발과 관련하여 공통적으로 요구되는 사항은 에너지 저장밀도와 출력밀도의 증대, 장수명화(long cycle life), 동작의 고속화, 설치비용의 저가화 등이 있다. 대용량 BESS의 해외개발사로는 ABB, A123, Altairnano, Exergonix, Xtreme Power社 등이 있고, MW급 대용량 전력저장용 배터리로써는 납축전지, NaS 배터리, 슈퍼커패시터(supercapacitor), 리튬이온 배터리, 레독스플로우 배터리(redox flow battery, RFB)등이 사용될 수 있다<sup>[12]</sup>.

## 3. 개발된 배터리 에너지 저장시스템

### 3.1 시스템의 구성

그림 2는 개발된 배터리 에너지 저장시스템의 구성을 보여준다. 시스템의 기본 구성은 전력설비와 제어설비로 나뉘며, 전력설비는 계통의 잉여전력을 배터리에 저장 또는 배터리에 저장된 에너지를 계통에 공급해 주는 전력변환 시스템, 에너지를 저장하거나 방전하는 역할을 하는 배터리와 배터리 시스템으로 구성된다. 제어설비는 최상위 제어기인 EMS(energy management system)와 연계를 위한 PMS(power management system), 전력변환 제어를 위한 PCS제어기, 배터리의 상태 및 냉각설비를 제어할 BCS제어기로 구성된다.

PCS는 제어기, AC/DC변환을 위한 PCU(power conversion unit), 계통과의 연계를 위한 계통 연계형 변

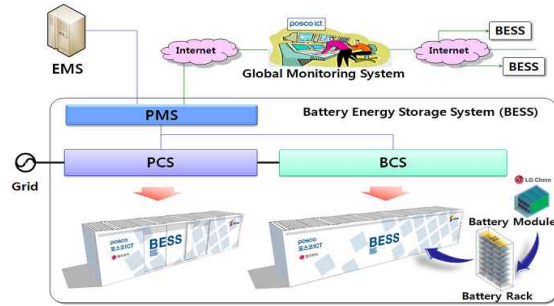


Fig. 2 The system configuration

압기 및 스위치 기어로 구성되며, BCS는 배터리, BMS(battery management system), HVAC(heating ventilation and air-conditioning)로 구성된다. 제어기는 TCP/IP, eCAN을 이용하여 상태를 주고받으며, PMS는 최상위 EMS와 IEC61850 게이트웨이를 이용하여 상태 정보나 고장정보 등을 주고받는다. 표 1은 개발된 BESS의 기본 사양을 보여준다. PCS의 최대 용량은 2MVA이며, 무효전력 보상 기능을 포함하고 있다. 또한 PCS는 설치위치와 주변 온도여건, 냉각효율, 설치면적 등을 고려하여 수냉식 냉각방식으로 설계되었다. BCS의 경우 리튬이온 배터리를 사용하였고, 시스템 정격은 1.5 MW/500 kWh이다. 리튬이온 배터리의 경우 충·방전시 배터리의 적정 온도(25 °C) 유지가 가장 중요하며, BESS의 충·방전(round-trip) 효율은 90 %이상이다.

Table 1 BESS Specifications

Classification		Parameter	Value
PCS	PCU	Capacity	2 MVA
		DC Voltage	650~800 VDC
		AC Voltage	350 VAC
		Frequency	60 Hz
		Efficiency	> 97 %
		Cooling	Water
	TR	Capacity	2.1 MVA
		Voltage	22,900/350 VAC
	SWGR	Capacity	2 MVA
		Voltage	22,900 VAC
Compensation(VAR)			1 MVar
BCS	Battery System	Voltage	650~800 VDC
		Current	2160 ADC
		Capacity	1.5 MW
			500 kWh
		Type	Li-ion (LG Chem.)
	Structure	16 · Rack	
	Cooler	Capacity	25 RT
Fire Suppression			HFC-23
PMS Controller	Comm.	Modbus/TCP	
	Interface	EMS, PCS, BCS	
HMI	OS	Windows 2000/XP	
OIT	Comm.	RS-232C	
Round-Trip Efficiency			> 90%

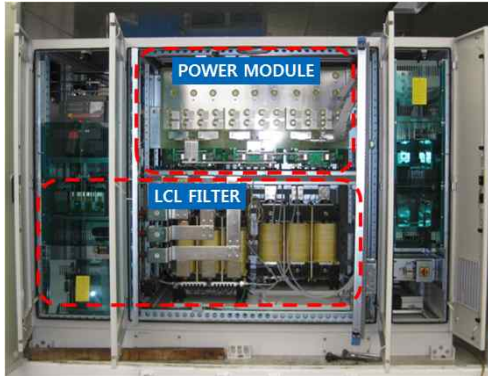


Fig. 3 PCU configuration

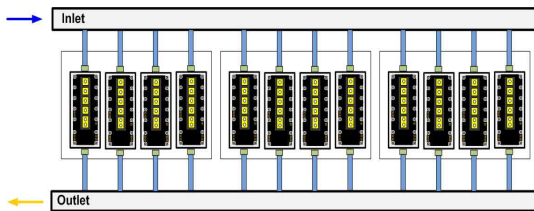


Fig. 4 PCU configuration of the water-cooling type

3.2 PCS 설계

PCS는 계통에 전력을 공급하거나 배터리에 에너지를 저장하도록 하는 장치이다. 개발된 수냉식 PCS는 제어기, PCU, 계통 연계형 변압기, 스위치기어, 냉각시스템으로 구성되었다.

3.2.1 PCU 설계 및 사양

그림 3은 PCU구성을 보여준다. PCU는 1MVA를 기준으로 설계하였으며, 전력변환모듈과 LCL필터로 구성되었다. 전력변환모듈은 DC-link 커패시터, 4병렬 IGBT와 수냉식 방열판(heatsink)으로 구성하였다.

그림 4는 수냉식 PCU의 방열판 구성을 보여주며, 열적인 균형과 안정성을 고려하여 병렬로 구성하였다. 방열판 설계를 위해 IGBT의 손실계산이 선행되어야 하며, 반도체 소자의 손실은 전력손실(power loss, PL)과 도통손실(conduction loss, Pcond), 스위칭손실(switching loss, Psw), 차단손실로 나눌 수 있다. 차단손실의 경우는 매우 작은 값이므로 무시할 수 있고, 전력손실은 도통손실과 스위칭손실의 합으로 나타낼 수 있다.

$$P_L = P_{cond} + P_{sw} \tag{1}$$

IGBT의 최대손실 및 냉각수 입·출력 온도차를 고려하여 열량소모에 필요한 최소 유량을 식(2)와 같이 계산할 수 있다. (\*MFR : minimum flow rate)

$$MFR[l/min] = \frac{Q[kcal/h]}{60[min/h] \cdot c[kcal/kg \cdot ^\circ C] \cdot \Delta t[^\circ C]} \tag{2}$$

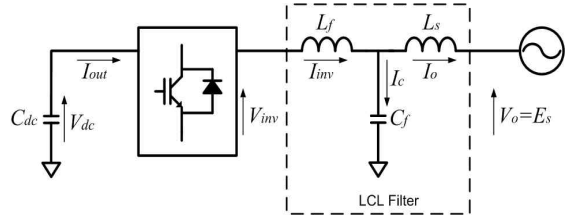


Fig. 5 PCU equivalent circuit

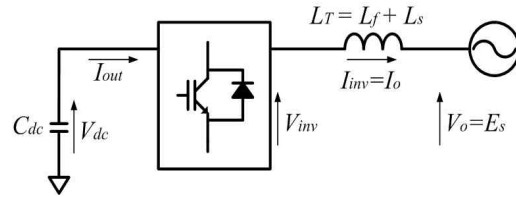


Fig. 6 PCU equivalent circuit by LCL approximation

식(1)과 식(2)를 사용하여 계산된 IGBT모듈의 최대 손실은 약 2.4 kW이고, 최소 냉각수량은 약 6.8 l/min이다. 대용량 컨버터 입력단에 사용되는 DC-link 커패시터의 경우 리플전류(ripple current)를 고려하여 설계하여야 하며, 커패시터의 RMS리플전류는 식(3)과 같이 계산된다.

$$I_{c,s} = I_{L,S} \cdot \sqrt{\frac{\sqrt{3} \cdot m_i}{2 \cdot \pi} + \left( \frac{\sqrt{6} \cdot m_i}{\pi} - \frac{9 \cdot m_i^2}{8} \right) \cdot \cos(\phi)^2} \tag{3}$$

여기서,  $m_i$ 는 Module Index,  $\cos(\phi)$ 는 전압과 전류 위상차를 의미한다.

3.2.2 LCL필터 설계

계통 연계형 인버터의 경우 출력전류에 기본파 성분 외에 스위칭주파수와 그 정수배에 해당하는 고조파 성분이 포함되어 있다. 계통에 주입되는 전류 고조파 성분을 줄이기 위해 인버터 출력단에 필터를 사용하게 되는데, 필터의 성능을 높이기 위해 인덕턴스를 크게 설계할수록 비용 및 부피가 증가하는 단점이 있다. LCL필터의 경우 L, LC필터에 비해 작은 용량으로 높은 고조파 감쇄효과를 보이며, 비용 및 부피를 감소시킬 수 있다. 그러나 파라미터 선정이 복잡하며, 전류 리플, 스위칭 리플 감쇄율, 필터 커패시터에 흐르는 무효성분 전류 등을 고려하여야 한다<sup>[13-14]</sup>.

또한 공진이 발생하므로 적절한 값을 선정하여 제어기의 안정성을 보장해 주어야 하며, 인버터 출력전압의 THD(total harmonic distortion)와 출력전류의 TDD(total demand distortion)를 고려하여 설계하여야 한다. 그림 5는 PCU의 등가회로를 보여준다. 그림 5의 등가회로를 이용하여 입출력 전달함수를 구하면 식(4)와 같다.

$$\begin{aligned}
\frac{I_o(s)}{V_{inv}(s)} &= \frac{\omega_{res\_LCL}^2}{L_T \cdot s \cdot (s^2 + \omega_{res\_LCL}^2)} \\
\frac{I_{inv}(s)}{V_{inv}(s)} &= \frac{s + \omega_{res\_L_f C_f}^2}{L_f \cdot s \cdot (s^2 + \omega_{res\_LCL}^2)} \\
\frac{V_c(s)}{V_{inv}(s)} &= \frac{\omega_{res\_L_f C_f}^2}{s^2 + \omega_{res\_L_s}^2} \\
\frac{I_o(s)}{I_{inv}(s)} &= \frac{\omega_{res\_L_s C_f}^2}{s^2 + \omega_{res\_L_s}^2}
\end{aligned} \quad (4)$$

여기서,  $L_T$ 는  $L_s + L_f$ ,  $\omega_{res\_L_s C_f}$ 는  $1/\sqrt{L_s C_f}$ ,  $\omega_{res\_L_f C_f}$ 는  $1/\sqrt{L_f C_f}$ ,  $\omega_{res\_LCL}$ 는  $\sqrt{(L_s + L_f)/(L_s \cdot L_f \cdot C_f)}$ 를 나타낸다.

필터의 공진주파수가 계통주파수 보다 매우 크다고 가정하면, 식(5)와 같이 근사화 할 수 있고, 인버터 출력 전압과 계통 출력전류는  $L_T$ 에 의해 결정되는 것을 알 수 있다. 커패시터로 흐르는 전류가 거의 0이므로 커패시터에 의한 영향을 무시할 수 있다.

$$\begin{aligned}
\frac{I_o}{V_{inv}} &\approx \frac{1}{L_T \cdot s} \\
\frac{I_{inv}}{V_{inv}} &\approx \frac{1}{L_f \cdot s} \\
\frac{I_c}{V_{inv}} &\approx 0 \\
\frac{I_o}{I_{inv}} &\approx 1
\end{aligned} \quad (5)$$

LCL필터의 등가회로를 재구성 하면 그림 6과 같이 표현할 수 있다. 필터의 등가인덕턴스를 선정하기 위해서는 DC-link전압, 계통전압, 출력전류를 고려하여야 하며, 인덕턴스가 증가하면 고조파 감쇄율이 증가하나, 리액터에 의한 전압강하가 증가된다. 이는 높은 DC전압을 요구 하고 스위칭손실을 증가시키므로, 등가리액터 선정시에는 계통전압의 변동율을 고려하여 설계해야 한다<sup>[13]</sup>. 등가인덕턴스의 범위 계산시 IGBT의 데드타임(dead-time)을 고려한 출력전압은 식(6)과 같다.

$$V_{inv} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{6}} \cdot \frac{T_{samp} - 2T_{dead}}{T_{samp}} = \frac{V_{dc}}{\sqrt{6}} \cdot \eta \quad (6)$$

여기서,  $T_{samp}$ 는 샘플링 시간,  $T_{dead}$ 는 데드타임,  $\eta$ 는 효율을 의미한다.

인버터 최대 출력전압을 초과하지 않고, 정격 DC전압에서 계통전원으로 정격전류를 흘리기 위한 등가리액터의 범위는 식(7)과 같이 제한된다.

$$L_T \leq \frac{\sqrt{\frac{V_{dc}^2}{6} \cdot \eta^2 - E_s^2 \cdot pf^2 - E_s \sqrt{1 - pf^2}}}{\omega_c I_{o\_rated}} \quad (7)$$

선정된  $L_T$ 에 대한 TDD 분석을 통하여 원하는 범위에 대해서 만족하는지 판단해야한다. 또한 리액터의 정격용량 선정시에는 1)전압 변동율에 따른 정격전류와 2) 전압이용율의 범위를 고려하여야 한다. 계통의 전압변동으로 인해 계통전압강하가 발생하게 되면 정격출력시 리액터에 과전류가 흐르게 되므로, PCS의 정격전류 과부하율(110 %)을 초과할 경우 출력을 제한해야 한다. 또한 계통전압 변동이 -12 %인 경우에 대해 정격전류를 결정하면 된다<sup>[15]</sup>. 선정된 등가리액터로부터 필터인덕터( $L_f$ )와 계통리액터( $L_s$ )로 분배되며, 분배율은 식(8)과 식(9)의 성능함수를 통하여 최적값을 선택할 수 있다.

$$\left| \frac{V_c}{V_{inv}} \right|_{s=j\omega_{sw}} = \frac{\omega_{L_f C_f}^2}{\omega_{L_s C_f}^2 - \omega_{sw}^2} \quad (8)$$

$$\left| \frac{I_o}{I_{inv}} \right|_{s=j\omega_{sw}} = \frac{\omega_{L_s C_f}^2}{\omega_{L_s C_f}^2 - \omega_{sw}^2} \quad (9)$$

그림 7은 파라미터 선정시 리액터의 비율에 따른 고조파 감쇄곡선 및 커패시터 변화에 대한 결과를 보여주고 있다. 전류 및 전압에 대한 성능곡선은 서로 반비례 관계이며, 약 5:5의 비율로 분배했을 경우 두 성능곡선이 교차하는 것을 알 수 있다. 공진주파수와 고조파 감쇄를 고려할 경우  $L_f$ 와  $L_s$ 는 동일한 값을 갖도록 설계하는 것이 효과적이다. 계산된 필터리액터의 값을 사용하여  $L_f C_f$  공진주파수를 선정한다. 일반적으로 공진주파수는 스위칭 주파수의 1/2보다 작고, 기본과 주파수의 10배 이상으로 선정하므로 공진주파수의 범위는 식(10)과 같이 계산될 수 있다.

$$10 \cdot \omega_c < \omega_{res\_L_f C_f} < \frac{1}{2} \cdot \omega_{sw} \quad (10)$$

공진주파수의 계산식을 통하여 필터커패시터( $C_f$ )의 값을 구할 수 있으며, 논의된 수식을 사용하여 계산된 필터파라미터는 다음과 같다.

$$\therefore L_f = L_s = 20 \mu H, C_f = 2100 \mu F$$

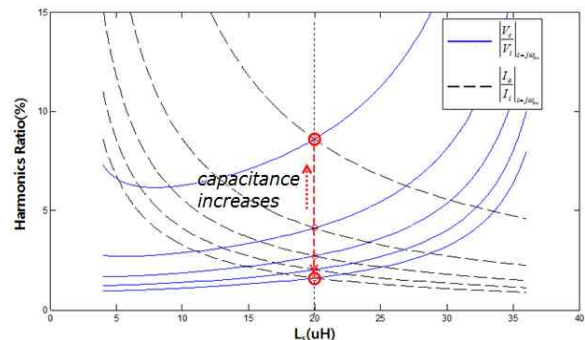


Fig. 7 Harmonic attenuation curve by ratio of equivalent reactor

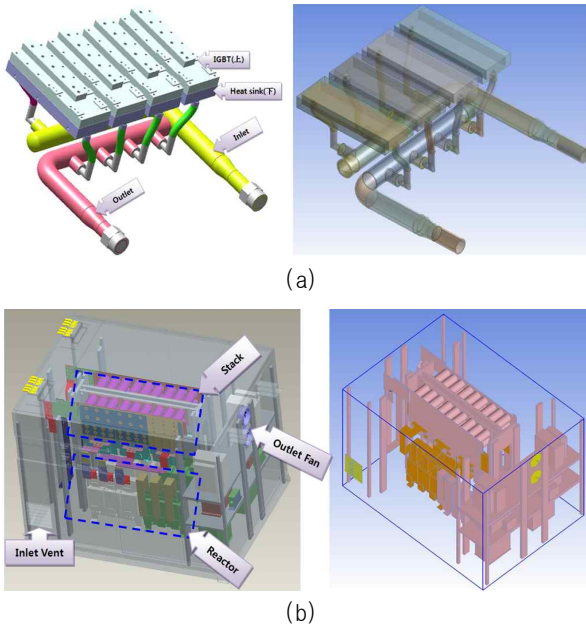


Fig. 8 PCS modeling (a)Power conversion module (b)PCU

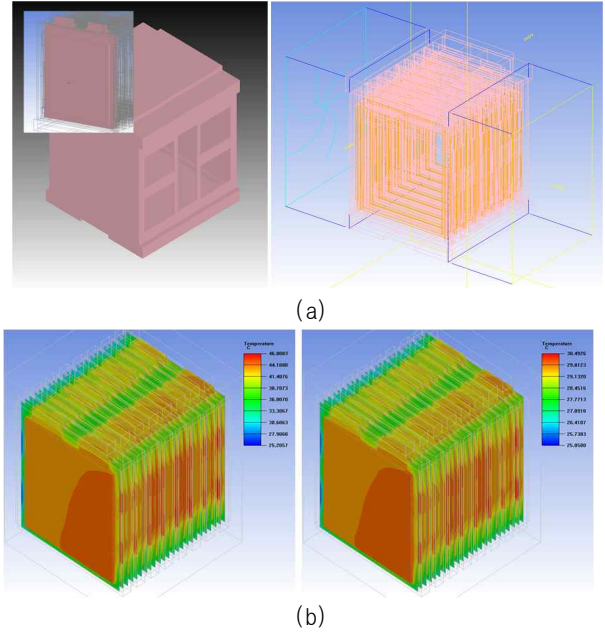


Fig. 10 Battery System (a) Modeling (b)thermal analysis

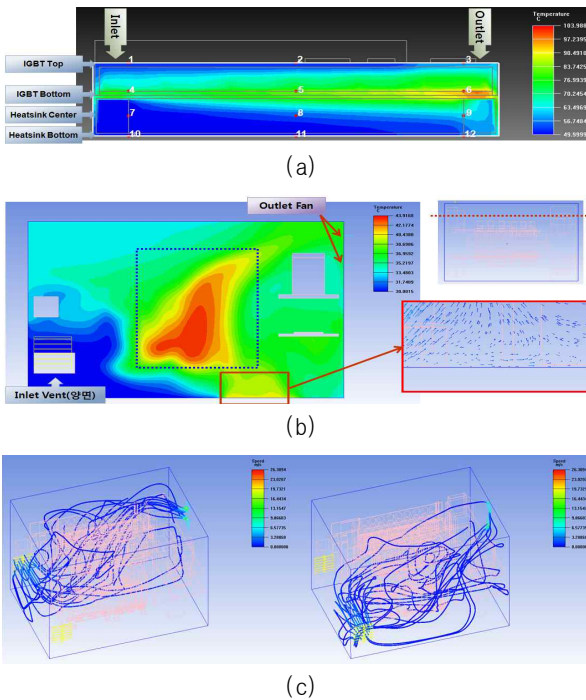


Fig. 9 PCS thermal/flow analysis (a)IGBT (b)PCU (c)PCU flow

**3.2.3 모델링 및 열해석**

개발된 BESS는 발열체를 포함하여 밀폐구조로 설계되었다. 발열은 성능저하와 심각한 손실을 야기할 수 있으므로, 설계시 방열에 대한 충분한 고려가 요구된다. 본 제품은 안정성 및 설계의 타당성을 검증하기 위해 PTC社의 Pro/Engineer를 사용하여 모델링을 하였으며, ANSYS社의 Icepak을 이용하여 열/유동해석을 수행하였다.

특히 주 발열체인 IGBT모듈 및 리액터에 대한 상세 모델링과 수식을 통하여 계산된 손실분과 냉각유량을 이용하여 열해석을 수행하였다. 그림 8은 PCS 모델링 결과를 보여준다. 모델링은 해석결과의 수렴성을 높이기 위해 해석에 영향을 미치지 않는 나사 및 홀 등의 형상을 제거하여 단순화 하였다. 그림 9는 PCS의 열/유동해석 결과를 보여준다. 그림 9(a)는 IGBT의 열해석 결과이며, 냉각수는 방열판내부에서 고르게 분포하며 유입구(Inlet)와 유출구(outlet) 사이에는 약 10° C의 온도차가 발생한다. 그림 9(b)는 전력변환모듈의 열해석 결과이며, 리액터 부근의 온도가 상승하나 설계치 이하임을 확인하였다. 그림 9(c)는 PCU내부의 유동해석결과를 보여준다. 내부 유동흐름을 보면 유입구에서 들어온 공기는 PCU중간부분까지 골고루 분포되나, 배기구 팬측 하단 방향으로 적절한 유동 분배가 일어나지 않아 팬과 같은 추가적인 장치를 설치하여 유동이 골고루 분포됨을 확인 하였다.

**3.3 BCS 설계**

BCS는 냉각, 절연, 항습, 안정성의 문제들을 고려하여 설계해야 한다. 그림 10(a)는 BCS의 내부를 모델링한 결과이다. 배터리 시스템은 랙(rack)형태로 구성되었고, 배터리 셀이 직·병렬로 조합되어 있다.

그림 10(b)는 배터리의 열해석 결과를 보여준다. 리튬이온 배터리의 경우 각 셀의 온도차에 의해 출력전압 및 충전상태(SOC)의 차이가 크게 발생하므로, 동일한 출력을 갖는 배터리 셀간의 온도균형이 중요하다. 4C로 운전할 경우 배터리 셀간의 온도차는 3.5° C 이내로  $\Delta T_{max} \leq 5^{\circ} C$ 의 설계조건을 만족함을 확인하였다.

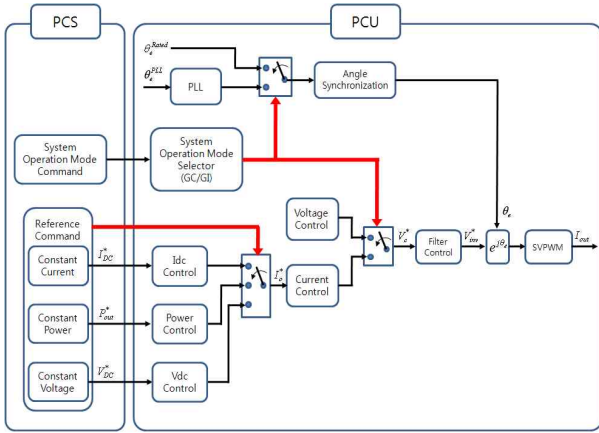


Fig. 11 The BESS controller block diagram

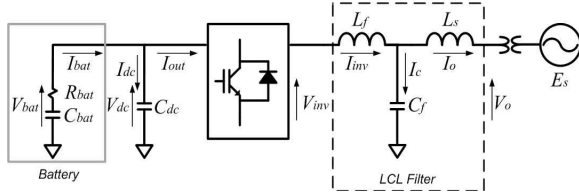


Fig. 12 Equivalent circuit with BESS

### 3.4 제어알고리즘

그림 11은 BESS제어기의 전체 구성도를 보여준다.

BESS는 계통에 연계되어 운전하는 계통연계운전모드, 계통에서 분리되어 독립적으로 부하에 전원을 공급하는 독립운전모드를 갖는다. 그리고 계통을 안정화하기 위한 계통 안정화모드와 배터리에 에너지를 저장하는 에너지 저장모드로 구분할 수 있다. 본 절에서는 에너지 저장모드와 계통 안정화모드에 대한 알고리즘을 간략히 설명하였다. 그림 12는 배터리를 포함한 BESS의 등가회로를 보여준다.

#### 3.4.1 정전류 제어모드

정전류 제어모드는 전류의 방향을 제어하여 충·방전을 결정한다. 출력전류와 배터리 전류의 입출력 전달함수는 식(11)과 같이 구할 수 있다.

$$\frac{I_{bat}(s)}{I_o^*(s)} = \frac{\omega_{cCC}}{s + \omega_{cCC}} \frac{3E_s^q}{2V_{dc}} \cdot A \cdot \frac{B}{s+B} \quad (11)$$

여기서,  $\frac{\omega_{cCC}}{s + \omega_{cCC}} = \frac{I_o^*(s)}{I_o^*(s)}$ ,  $A = \frac{C_{bat}}{C_{bat} - C_{dc}}$ ,  $B = \frac{C_{bat} - C_{dc}}{R_{bat} C_{dc} C_{bat}}$ 이다.

그림 13은 전류제어기의 구성도를 보여준다.

#### 3.4.2 정전력 제어모드

BESS는 순시적으로 변동되는 전력을 안정화시키기 위해 유효전력에 따라 에너지를 충·방전한다. 전류제어

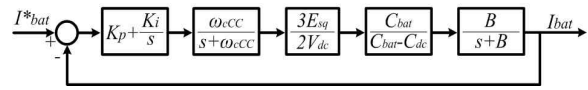


Fig. 13 Current controller block diagram

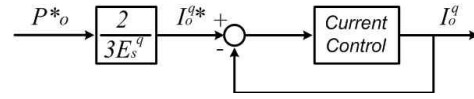


Fig. 14 Power controller block diagram

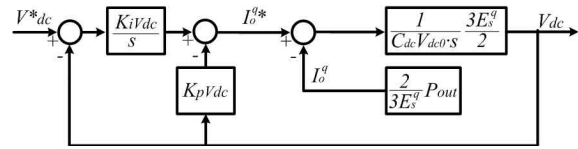


Fig. 15 Voltage controller block diagram

기를 사용할 경우 전압에 따라 계통의 전력이 변동되므로 전력을 일정하게 제어하는 방법이 필요하다. 정전력 제어모드로 운전하면 정전류 제어모드와 비교하여 시스템을 더 빠르게 제어할 수 있어 발전량이 급격히 변동하는 시스템에서 빠른 응답성을 기대할 수 있다. 전력제어기의 전달함수는 식(12)와 같이 나타낼 수 있다. 그림 14는 전력제어기 구성도를 보여준다.

$$\frac{I_o^q}{P_o^*} = \frac{3E_s^q}{2} \frac{\omega_r^2 CC}{s^2 + 2\zeta_{CC}\omega_r CC s + \omega_r^2 CC} \quad (12)$$

#### 3.4.3 정전압 제어모드

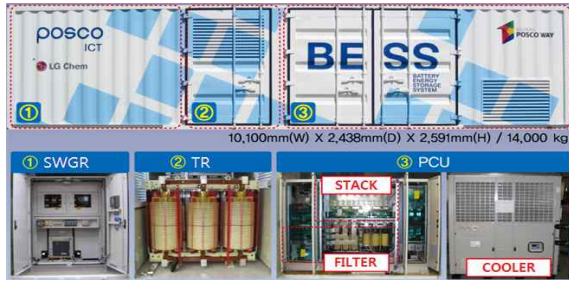
전압제어기는 충전시 정전류 제어모드에서 정전압 제어모드로 전환할 경우에 사용된다. 등가회로를 이용하여 커패시터 축 전력을 테일러 시리즈로 전개하여 2차항 이상을 무시하고, 식을 전개하면 전압제어기 입·출력 전달함수를 식(13)과 같이 나타낼 수 있다. 그림 15는 전압제어기를 보여준다.

$$\frac{V_{dc}(s)}{V_{dc}^*(s)} = \frac{\omega_c^2 V_{dc}}{s^2 + 2\zeta_{Vdc}\omega_c V_{dc} s + \omega_c^2 V_{dc}} \quad (13)$$

여기서,  $\omega_c^2 V_{dc} = -\frac{3}{2} \frac{E_s^q K_i V_{dc}}{C_{dc} V_{dc0}}$ ,  $2\zeta_{Vdc}\omega_c V_{dc} = -\frac{3}{2} \frac{E_s^q K_p V_{dc}}{C_{dc} V_{dc0}}$ ,  $K_i V_{dc} = -\frac{2}{3} \frac{C_{dc} V_{dc0}}{E_s^q} \omega_c^2 V_{dc}$ ,  $K_p V_{dc} = -\frac{2}{3} \frac{C_{dc} V_{dc0}}{E_s^q} 2\zeta_{Vdc}\omega_c V_{dc}$ ,  $V_{dc0}$ 는 초기전압을 의미한다.

## 4. 실험결과

본 장에서는 논의된 이론 및 시뮬레이션 결과를 이용



(a)



(b)

Fig. 16 The prototype BESS (a) PCS (b) BCS

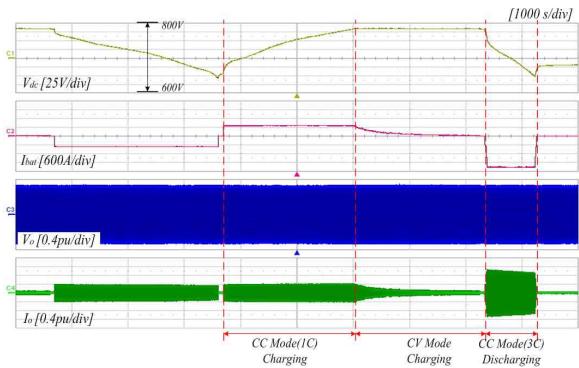


Fig. 17 The output waveforms of charging/discharging

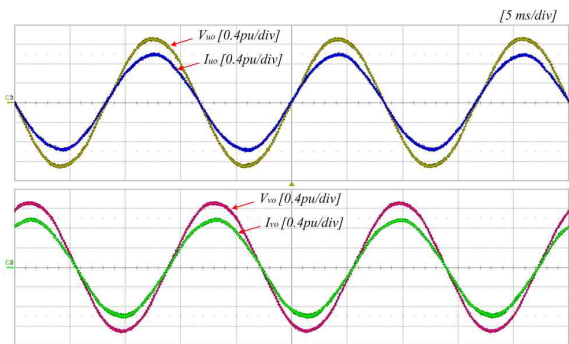


Fig. 18 Voltage and current output waveforms of grid

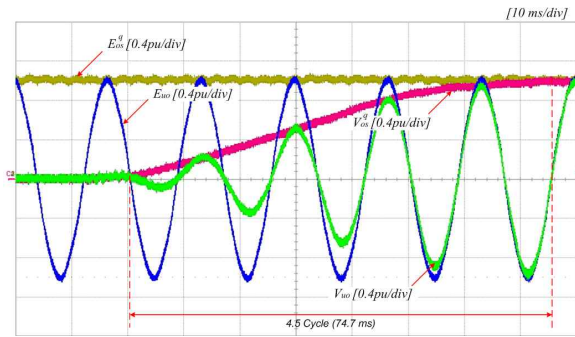


Fig. 19 The output waveforms of grid-connection and synchronization

그림 18은 계통단에서 측정된 전압과 전류를 보여준다. 시스템이 계통에 연계되어 정격운전시 전압과 전류가 동상임을 알 수 있다. 그림 19는 BESS의 계통연계 및 동기화 출력파형을 보여준다.

BESS와 같은 시스템을 계통에 연계하기 위해서는 계통 전압과 인버터 시스템의 출력 전압, 주파수 및 위상차가 제어기 설정 범위 이내로 제한되어야 하며, 동기화가 완료되어 시스템을 계통에 투입시 돌입전류의 크기를 제한해야 한다. 실험결과를 통하여 개발된 제품은 4.5주기 이내에 계통과 동기화됨을 확인하였으며, 계통 투입시 최대 돌입전류의 크기는 정격전류의 10% 이내임을 확인하였다.

### 5. 결 론

본 논문은 대용량 리튬이온 배터리를 이용한 계통연계형 배터리 에너지 저장시스템의 구성 및 시스템 모델링, 열/유동 해석, 계통 연계를 위한 LCL필터의 설계방법 및 BESS제어알고리즘을 제시하였다. 개발된 시스템은 대용량 배터리의 충·방전 특성시험, 계통연계 및 동기화 시험을 통하여 제품의 성능을 검증하였다. 또한 본 제품은 1.5 MW급 신재생 에너지원인 풍력발전기에 연계되어 계통안정화를 위한 에너지 충·방전 시스템으로 사용될 예정이다.

### 참 고 문 헌

- [1] Plastow J.W., "Energy service for an electricity industry based on renewable energy", *Engineering Science and Education Journal*, Vol. 10, pp. 145-152, 2001.
- [2] Arai J., Iba K., Funabashi T., Nakanishi Y., Koyanagi K., Yokoyama R., "Power electronics and its applications to renewable energy in Japan", *IEEE, Circuits and Systems Magazine*, Vol. 8, pp. 52-66, 2008.
- [3] Moreno R., Strbac G., Porrua F., Mocarquer S., Bezerra B., "Making room for the boom", *IEEE, Power and*

한 시스템 제작 및 실험결과를 제시하였다. 그림 16은 제작된 2MVA급 PCS와 500 kWh BCS를 보여준다. 그림 17은 계통과 연계된 BESS의 배터리 충·방전 결과파형을 보여준다. 계통의 전압이 일정하게 제어되므로 배터리의 충·방전 크기에 따라 계통의 전류가 변화된다.

*Energy Magazine*, Vol. 8, pp. 36-46, 2010.

- [4] Senjyu T., Hayashi D., Urasaki N., Funabashi T., "Optimum configuration for renewable generating systems in residence using genetic algorithm", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 21, pp. 459-466, 2006.
- [5] Quinonez Varela G., Ault G.W., Anaya Lara O., McDonald J.R., "Electrical collector system options for large offshore wind farms", *IET, Renewable Power Generation*, Vol. 1, pp. 107-114, 2007.
- [6] Lars Gertmar, Lars Liljestrand, Heinz Lendenmann, "Wind energy powers-that-be successor generation in globalization", *IEEE Trans. Energy Conversion*, Vol. 22, pp. 13-28, 2007.
- [7] K.C.Divya, Jacob Ostergaard, "Battery energy storage technology for power systems-An overview", *Electric Power Systems Research*, pp. 511-520, 2009.
- [8] 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.
- [9] Gyuk I., Kulkarni P., Sayer J.H., Boyes J.D., Corey G.P., Peek G.H., "The United States of storage [electric energy storage]", *IEEE Power and Energy Magazine*, Vol. 3, pp. 31-39, 2005.
- [10] Spotnitz R., "Advanced EV and HEV batteries", *IEEE Conference, VPPC*, 2005.
- [11] Smart Renewable Project Business Plan(POSCO ICT), 2009.
- [12] Chang Soo Jin, "Battery for Large Scale Energy Storage", *KIC News*, Vol. 13, No. 2, pp. 23-29, 2010.
- [13] Marco Liserre, Frede Blaabjerg, Steffan Hansen, "Design and control of an LCL filter based three phase active rectifier", *IEEE Trans. Industry Applications*, Vol. 41, No. 5, pp. 1281-1291, 2005.
- [14] Jong-Hyoung Park, Min-Hum Chi, Heung-Geun Kim, Tae-Won Chun, and Eui-Cheol Nho, "LCL filter design for grid-connected PCS using total harmonic distortion and ripple attenuation factor", *KIPE Transaction on Power Electronics*, Vol. 15, No. 3, pp. 235-243, 2010.
- [15] IEEE Application Guide for IEEE Std 1547.2<sup>TM</sup>\_2008.



### 김수홍(金洙弘)

1976년 8월 11일생. 2004년 중앙대 대학원 전자전기공학부 졸업(석사). 2008년 동 대학원 전자전기공학부 졸업(공학박). 2008년~2011년 (주)POSCO ICT 정보제어기술 연구소 전력전자기술팀 선임연구원. 2011년~현재 Texas A&M University 박사후 과정.



### 김태형(金泰亨)

1983년 7월 2일생. 2010년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 2010년~현재 (주)POSCO ICT 정보제어기술연구소 전력전자 기술팀 연구원.



### 김윤현(金允賢)

1982년 5월 3일생. 2005년 전북대 전기공학과 졸업. 2005년~현재 (주)POSCO ICT 정보제어기술연구소 전력전자기술팀 주임 연구원.



### 인동석(印東石)

1981년 12월 11일생. 2009년 수원대 대학원 정보통신공학과 졸업(석사). 2010년~현재 (주)POSCO ICT 정보제어기술연구소 전력전자기술팀 연구원.



### 권병기(權炳基)

1970년 12월 5일생. 1995년 광운대 대학원 전기공학과 졸업(석사). 1995년~현재 (주)POSCO ICT 정보제어기술연구소 전력전자 기술팀 팀장/책임연구원.



### 최창호(崔昌鎬)

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