

# 을지로 3가 지하철 ESS를 모의한 ESS 화재에서 Cell Balancing이 미치는 영향성 분석

윤상선<sup>1</sup>, 기석철<sup>†</sup>

## Analysis of the Cell Balancing Effect on the ESS Fire by Simulating the Euljiro 3-ga Subway ESS

Sang-Sun Yun<sup>1</sup> and Seok-Cheol Kee<sup>†</sup>

### Abstract

Given the change in the energy market, large energy storage systems (ESS) is rapidly entering the market. In this rapid spread, fire accidents are becoming an issue. This study attempts to approach the fire from the system point of view to analyze the problems caused by bonding from different perspectives. Moreover, to conduct this study, the fabrication of real objects is dangerous, which needs to be verified through simulation. In this study, we approach the cause of fire that occurs in large-capacity ESS from the system perspective. We focus on determining the effects of cell balancing performed on the BMS after charging. Thus, we analyze the cell balancing behavior and the linkage risks to the various stacks. The study also explores why no fire occurs during 70% operation.

**Key words:** Energy storage system, Cell balancing, Battery management system, Over voltage protection

### 1. 서 론

전 세계적으로 에너지 자원은 고갈되어가고 있다. 이에 대한 대응방법의 하나인 에너지를 저장하는 배터리에 대한 관심이 집중되면서 대용량 ESS(Energy Storage System)가 보급되기 시작했다. 하지만, 대용량 ESS의 화재로 인하여 사회 보급을 방해하고 있다. 지난 1년 10개월간 전국에서 23건이나 발생한 에너지 저장장치 화재 원인을 산업통상자원부에서 ESS 분야 학계·연구소·시험인증기관 등 19명의 전문가로 구성된 조사위원회는 23개 사고 현장 조사와 자료 분석, 76개 항목의 시험 인증을 통하여 4가지 화재 원인을 밝혔다. “전체 ESS 화재사고 중 14건은 충전이 완료된 후 대기 중에 발생했다”며 “나머지 6건은 충전 과정 중, 3건은 설치·시공 도중 화재가 일어났다”고 민관합동 ESS 화재

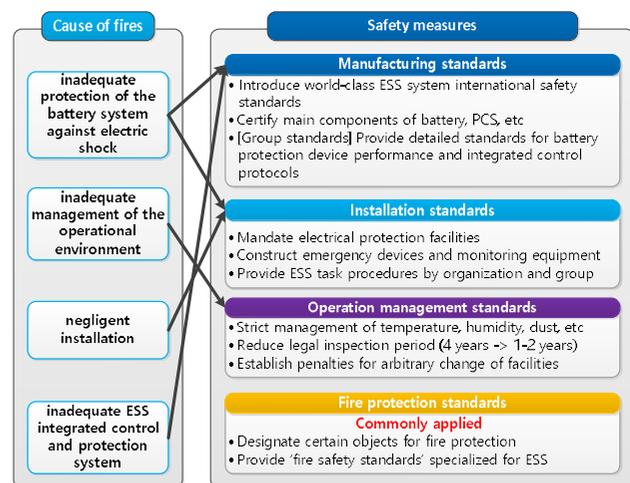


Fig. 1. Causes of ESS fire accidents and safety measures (Document=Ministry of industry).

사고 원인조사위원장은 밝혔다. 지디넷코리아 기사에 실렸다. 조사가 시작된 지 22개월만인 2019년 6월에 조사 보고서가 발표되었다. 조사 결과에 따르면 그림 1에서 화재 원인은 4가지로 전기적 충격에 대한 배터리 보호시스템 미흡, 운영환경 관리 미흡, 설치 부주의, ESS 통합제어·보호체계 미흡 등 총 4가지로 파악했다.

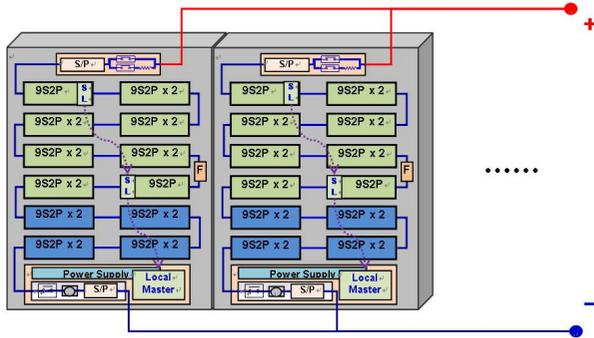


Fig. 2. Euljiro 3-ga ESS battery system diagram.

정부는 화재 원인을 토대로 ESS 제조·설치·운영 단계의 안전관리를 강화하고 소방기준 신설을 통해 화재대응능력을 제고하는 종합 안전강화 대책을 2019년 8월부터 시행키로 했다. 하지만, 방지책 이후에도 추가 화재가 5건이나 났다. 2019년 10월에는 경북 칠곡군의 ESS 설비에서 화재가 또 발생하면서 원인을 누구도 모르는 상황이 되어 버렸다 수개월에 걸친 원인 조사와 함께 재발 방지를 위해 막대한 비용을 투입했는데 백약이 무효인 셈이 되었다고 한국경제신문에 실렸다. 이에 대용량 ESS의 화재 원인을 밝히기 위해서 본 연구를 진행한다. 본인이 기존에 개발한 시스템을 활용한 시뮬레이션 검증으로 우선 시스템의 제반 사항에 대하여 언급하고자 한다.

을지로 3가에 설치된 740kW ESS는 742.5V에 1008A 출력을 기본으로 198S×12Rack으로 구성되었고 Enertech의 42Ah 셀의 공칭 전압 3.75V를 사용했다.

1개의 Master BMS(Battery Management System)와 12개의 Local Master BMS 그리고 24개의 Slave BMS로 구성되어 있으며 각 Slave BMS는 99S를 제어한다. 그림 2에 시스템 도형을 첨부하였다. 대용량 ESS는 용량이 크기 때문에 평가 항목에 효율성을 평가하는 항목이 있으며 전체 시스템에서 충전하고 방전을 하였을 때 효율성이 PCS(Power Conversion System) 기준 88.6% 이상을 달성해야 하고 배터리 기준으로는 95% 이상을 달성해야 하기 때문에 PCS의 변환 효율을 생각하여 배터리에서 고전압을 제공하고 낮은 저항 시스템을 구현하여 에너지의 손실을 막아야 했다<sup>[1],[2]</sup>. PCS의 경우 입력 전력전원의 전압 차가 작아야 에너지 변환 효율이 좋아지기 때문이다. PCS의 출력은 22700V이다.

ESS의 화재가 발생할 때 특징을 모아 봤다.

1. SOC 90%이상 운용시 화재 발생
2. SOC 70%미만 운용시 화재 미발생
3. 충전 완료 후 대기 중 화재 발생(14건)
4. 충방전 과정에서 화재 발생(6건)

충전 완료 후 대기 중 또는 충방전 과정에서 BMS에서 어떤 일을 수행하는지에 대하여 검토한 결과 충전 완료

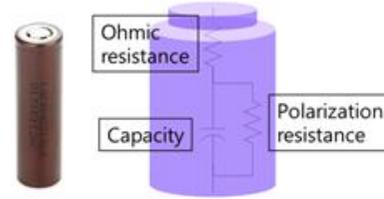


Fig. 3. Battery cell equivalent circuit.

후에 배터리의 셀 밸런싱은 통상 진행하며 충방전 과정에서 셀 밸런싱은 개발과정에서 선택적으로 적용하고 있다. 이에 본 연구자는 대용량 ESS 화재의 원인을 BMS의 셀 밸런싱에서 검토해보고자 한다.

본 연구는 2장에서는 배터리 등가회로를 이용한 시뮬레이션 검증을 진행하고 3장에서 ESS구조에서 발생하는 문제를 제기하고 4장에서 보호회로가 동작하지 않은 원인분석과 5장에서 실험결과와 해결 방안을 제안한다.

본 실험은 배터리의 모델링에 중점을 두는 것이 아니라, 현재 사회적으로 이슈가 되는 ESS 화재와 관련하여 ESS의 시스템 구조에서 Cell Balancing을 수행하는 과정에서 발생할 수 있는 과충전 상황을 모의하는 것에 그 목적을 두었으며, PSpice v16.6를 이용한 모의해석으로 제안한 결과를 입증하였다.

## 2. Battery 시뮬레이션

### 2.1 Battery 모델

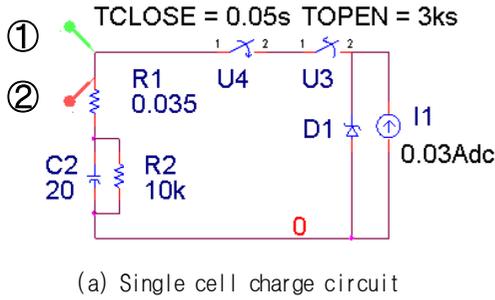
배터리를 분석하기 위한 등가회로가 그림 3과 같다<sup>[3]</sup>. 그림 3의 등가회로를 이용하여 충전에 대한 시뮬레이션을 진행하여 그림 4 같은 파형을 얻을 수 있었다. 시뮬레이션에서 배터리 등가 회로의 저항과 용량은 임의의 값을 설정하였고 CC-CV 충전을 위하여 PSpice Library를 수정하여 4.2V Zener Diode를 생성하여 전압 제한을 두었다.

그림 4(b)에서 전류는 실제 충전 파형과 유사하나 전압의 경우 다름을 확인하였다. 이유는 시뮬레이션 등가 회로에서 R 성분이 고정 값을 가지기 때문이다. 배터리의 DCIR(DC Internal Resistance)은 SOC(State of Charge)의 영향을 받아 SOC가 0과 100%에서 높은 값을 가진다. 이후 배터리의 시뮬레이션은 그림 3에서 보여준 배터리의 등가회로를 이용할 것이다. 본 실험은 Enertech의 42Ah 셀을 스케일다운하여 모의실험을 진행하였다.

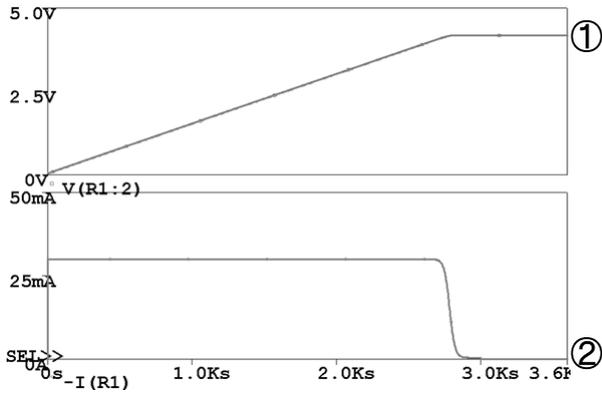
### 2.2 Cell Balancing 동작 원리

배터리에 있어서 셀 밸런싱이 중요한 이유는 배터리의 용량을 최대한 효율적으로 운용하기 위한 것이다<sup>[4]</sup>. 셀 밸런싱이 단셀인 경우 그림 5같이 진행된다.

이러한 밸런싱은 배터리 셀이 직렬로 묶여 승압을 하는 과정에서 발생하는 전압 불균형으로 인한 효율 저하

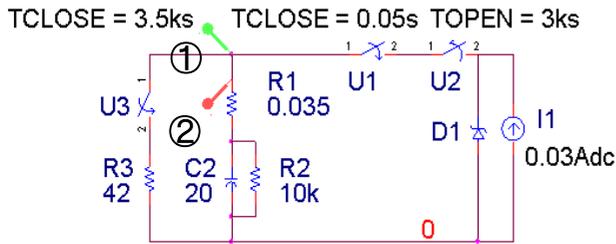


(a) Single cell charge circuit

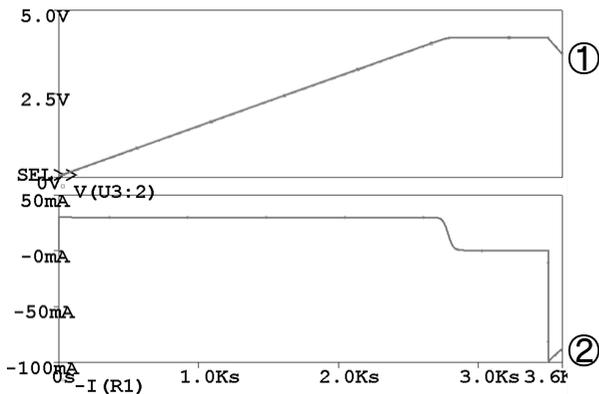


(b) Single cell charge simulation waveform

Fig. 4. Single cell charge simulation results.



(a) Passive cell balancing circuit



(b) Passive cell balancing simulation waveform

Fig. 5. Passive cell balancing simulation results.

를 막기 위해 각 셀의 전압을 측정하여 상대적으로 전압이 높은 셀들에게 부하를 연결하여 열에너지로 소비하는 방법을 사용하고 있다<sup>[4]</sup>. 그림 4(b)에서 수동 셀 밸런싱을 진행하는 파형을 보여주고 있다.

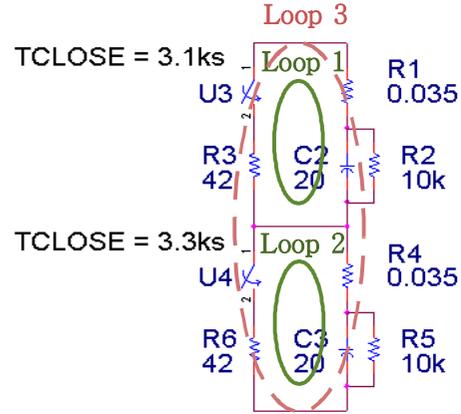


Fig. 6. Balancing loops of continuous cells.

ESS에서 배터리는 PCS에 높은 전압을 제공해야 한다<sup>[1],[5]</sup>. 이때 직렬로 연결된 Stack에서 셀 밸런싱을 모든 셀이 동시에 수행하는 것이 아니라, 짝수 셀과 홀수 셀로 구분하여 밸런싱을 진행한다. 그림 6에서처럼 의도한 Loop 1과 Loop 2를 제외한 의도하지 않은 Loop 3이 생성되기 때문에 안전성에 문제가 발생할 여지가 있다.

그런 이유로 셀 밸런싱은 짝수 셀과 홀수 셀로 구분하여 밸런싱을 진행하거나 3개 셀을 간격(1<sup>st</sup> cycle : 1,4,7,10 cells. 2<sup>nd</sup> cycle : 3,6,9,12 cells. 3<sup>rd</sup> cycle : 2,5,8,11 cells.)으로 밸런싱을 진행한다.

### 3. ESS 구조 문제

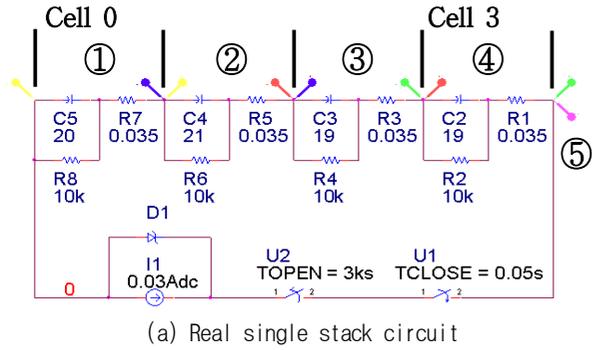
#### 3.1 Single Stack 과 Multi Stack의 차이

짝수 셀과 홀수 셀로 구분하거나 3개 셀을 간격으로 밸런싱을 할 경우에 Single Stack에서는 문제가 없으나 Multi Stack에서는 문제를 일으킬 수 있는 영향에 대하여 시뮬레이션을 진행을 한다.

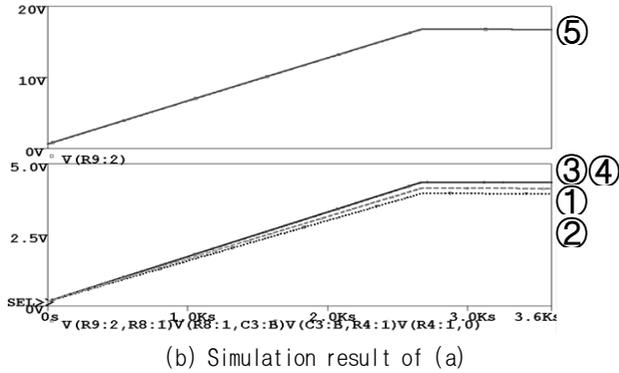
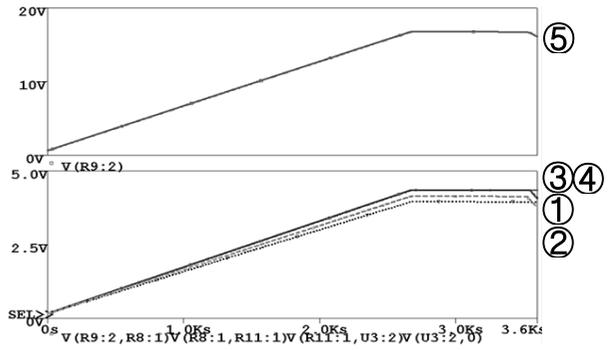
양산 과정에 100% 동일 셀을 생산할 수 없고 용량의 편차가 발생하게 되며 그로 인하여 전압의 불균형이 발생한다. 현장에서의 회로와 파형을 그림 7(a)와 (b)에서 보여주고 있다<sup>[3]</sup>.

이러한 용량의 편차로 인하여 발생하는 충전 및 방전 시 발생하는 전압차를 제거하기 위하여 셀 밸런싱을 진행하게 된다. 그림 7(c)와 (d)에서 짝수 셀을 밸런싱한 파형을 그림 7(e)와 (f)에서 홀수 셀을 밸런싱한 파형을 순차적으로 보여주고 있다. Single Stack에서 셀 밸런싱을 진행하였을 때 그림 7(d)와 (f)에서 전체전압이 내려가는 것을 3.5ksec와 3.55ksec에서 확인할 수 있다. 이것이 Multi Stack에서는 어떤 영향을 미치는지 확인해보겠다.

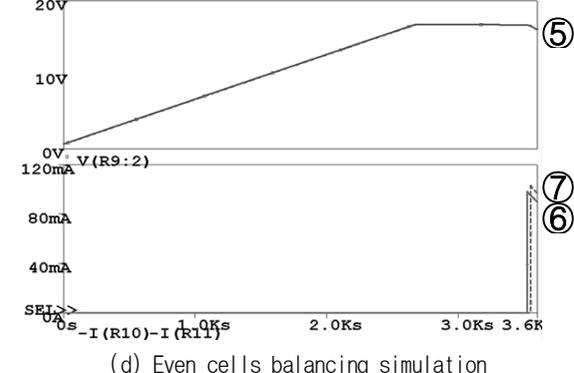
을지로 3가에 설치한 ESS를 기준으로 설명하면 그림 8(a)의 회로는 그림 2의 시스템을 모방한 것으로 각 Stack은 Rack과 동일하며 PRA(Power Relay Assembly)에 의해서 3Stack이 연결된 상태에서 충전이 완료되고



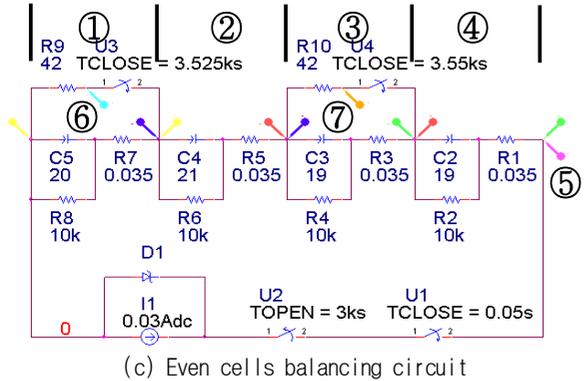
(a) Real single stack circuit



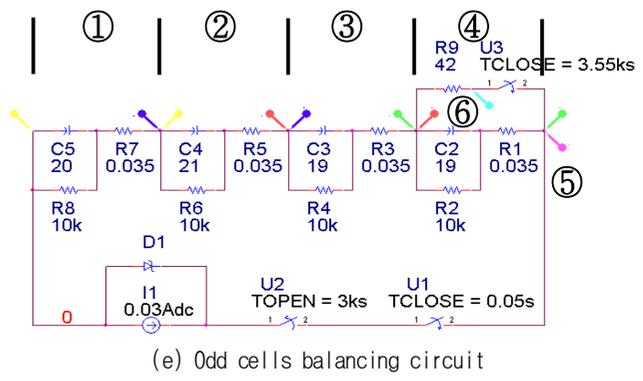
(b) Simulation result of (a)



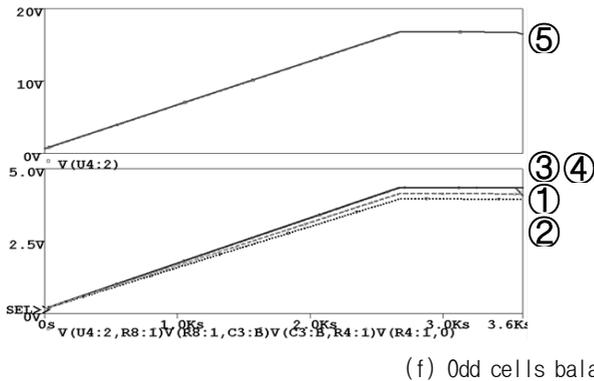
(d) Even cells balancing simulation



(c) Even cells balancing circuit



(e) Odd cells balancing circuit



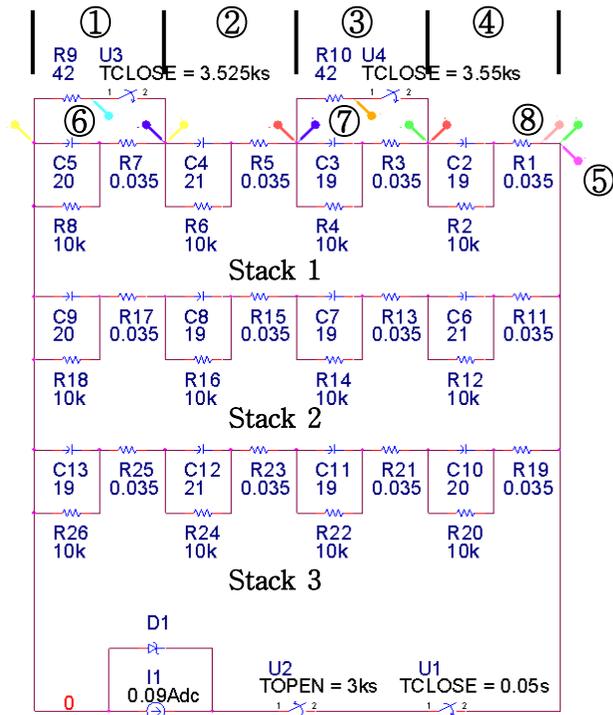
(f) Odd cells balancing simulation

Fig. 7. Single stack battery system.

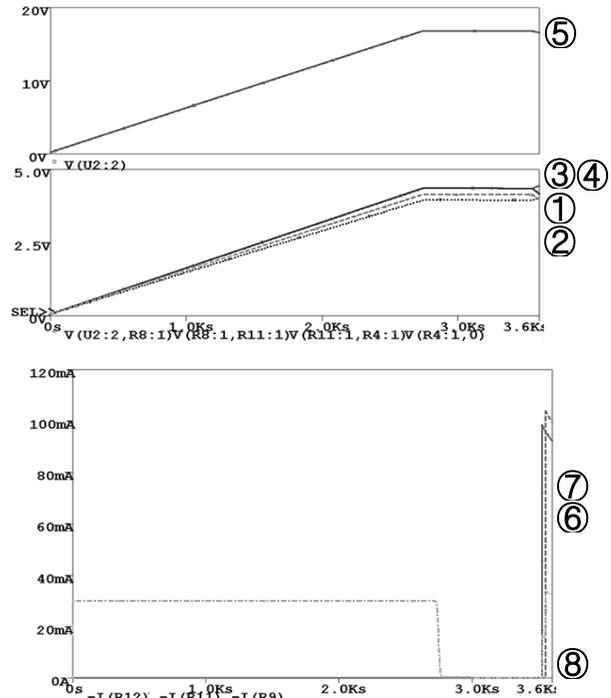
Stack 1에서 짝수 셀에 대한 밸런싱을 진행하였을 경우에 대한 회로를 보여주고 있다<sup>[6]</sup>.

그림 8의 시뮬레이션에서 밸런싱 타이밍을 다르게 하여 시뮬레이션을 진행하였다. Cell 0는 3.525ksec에 밸런싱을 시작하고 Cell 2는 3.55ksec에 밸런싱을 시작하도록

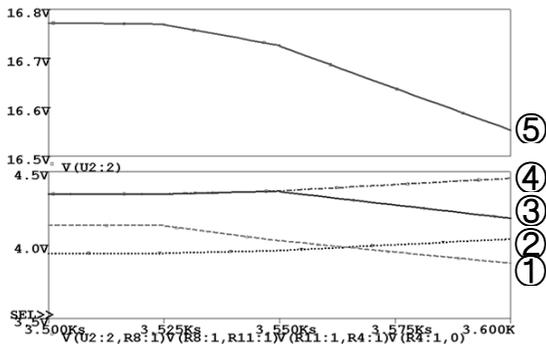
시뮬레이션을 진행하였다. 결과로 그림 8(b)의 파형을 얻게 되었으며 셀 밸런싱 스위치가 close 되면서 3.525ksec에서 의도하지 않은 이상파형이 관찰되어 확대한 것이 그림 8(c)이다. 그림 8(c)에서 3.525ksec에 최초의 셀 밸런싱이 시작되고 3.55ksec에 두 번째 셀 밸런싱



(a) Cell balancing circuit in multi stack



(b) Simulation result of (a)



(c) 3.5ksec to 3.6ksec extension of (b)

Fig. 8. Cell balancing in multi stack.

이 같이 시작된다. 3.525ksec에서 셀 밸런싱이 일어날 때 해당 셀은 전압 강하가 일어나지만 나머지 모든 셀에서 충전이 일어난다. 이미 SOC 100% 충전을 마치고 셀 밸런싱을 들어갔는데 밸런싱 이외의 셀들에 과충전이 일어나고 있는 것이다. 밸런싱하는 셀에서 소실된 에너지를 병렬로 연결된 다른 Stack에서 에너지 보상이 일어나게 된다. 이때 일어나는 에너지 보상은 셀 전압에서 총 밸런싱 전류를 곱한 전력을 Stack 전압으로 나눈 전류가 보상으로 다른 Stack에서 가져오게 된다.

밸런싱을 진행하는 수에 비례하여 전류값이 커지게 됨을 그림 8(c)의 상단 그래프에서 확인할 수 있다. 밸런싱 셀이 1개인 3.525ksec에서는 16.4mA가 밸런싱 셀이 2개인 3.55ksec에서는 33.4mA가 Stack 전압에 걸리는 보상전류가 발생함을 확인하였다. 보상 전류는 작수 셀과 홀수 셀로 밸런싱을 진행할 경우 셀 밸런싱 전류

의 1/2을 넘길 수 없고 3개 셀 단위로 밸런싱을 진행할 경우 1/3을 넘길 수 없다. 보상 전류는 작으나 총 전류량이 문제가 된다. 셀 밸런싱이 진행되어 셀간 전위차를 최소화하기 위해 소비하는 에너지량 만큼 Stack에 전체에 보상하게 된다. 전위차 50mV가 발생하면 Stack에 이것을 보상하기 위한 CC충전이 일어나고 이때 SOC 100%에 더 근접한 셀들은 DCIR 값이 높기 때문에 전압 상승률이 상대적으로 크다<sup>[3]</sup>. 충전이 완료된 이후 일어난 잉여 충전은 과충전전압의 영역을 지나 파괴전압까지 넘어서게 된다. 전압이 높은 셀들은 전압 상승률이 더 높으며 충전 전류가 작지만 전류량은 크기에 위험이 크다. 특히, 배터리의 용량 차이로 인한 노후화 속도가 다르기 때문에 사용시간이 흐를수록 위험성은 더 커진다<sup>[2],[3],[7]</sup>. 그림 8(c)에서 아래 파형을 보면 충전이 완료된 후에 셀 밸런싱이 일어나는 시점에 충전이 완료되었

음에도 Stack 전체에 보상 전류가 발생하여 전압이 상승하는 현상을 확인하였다. 액티브 밸런스에 대하여 고려했으나 에너지를 중간단계에 저장하는 과정에 보상 전류가 발생하므로 완벽한 해결이라고 할 수는 없다<sup>[8]</sup>. 이는 ESS에서 발생할 수 있는 과충전 상황의 하나로 이후에 ESS의 고전압 시스템에서 우려되는 Cell Balancing으로 인한 추가적인 위험 상황에 대한 연구가 이어 갈 것이다. Multicell battery stack에서 다수의 Monitoring IC를 사용하면서 발생할 수 있는 과충전 상황에 대하여 연구할 것이다.

**3.2 70% 운용 시 차이점**

왜 70% 운용하는 경우에는 문제가 없는가? 을지로 3가에서 사용했던 배터리 셀의 충전 데이터 그림 9를 이용해 설명하겠다. 그림 9는 Enertech에서 시험하여 제공한 자료에서 발췌한 데이터로 충전 중지 시점은 0.05C이며 환경 온도는 25도이다.

그림 9(a)에서 SOC를 90%이상을 0.5C 완속 충전한 경우 하나의 셀의 전압이 4.1345V인 것을 확인할 수 있다. 여기에 하나의 Stack에서 셀을 양산하는 과정에서 발생하는 용량편차를 대입한다. Enertech 승인원에서 보증하는 용량은 충전과 방전을 0.5C로 진행하였을 경우 Nominal : 21.0Ah, Minimum : 20.1Ah이다. 즉, -5%를 보증하며 +의 경우에 제한이 없다. 그렇다면 이러한 경우 5% 이상의 용량 차이가 발생할 수 있으며 이를 기준으로 SOC 90% 충전하였을 경우 SOC 95% 이상의 전압을 가지는 셀들이 하나의 Stack에 존재할 수 있다. 즉, 4.1792V 전압을 가지는 셀들이 존재한다고 봐야한다. 이때 짝수 셀과 홀수 셀의 밸런싱을 진행한다면 CC 충전이 일어나고 과전압 영역을 넘어가는 것은 이상할 것이 없다. 반대로 그림 9(a)에서 0.5C로 충전하여 70%인 경우 셀의 평균 전압은 그림 9(c)에서 3.9965V로 용량 편차 5%를 적용하여도 4.0321V로 4.2V까지 충분한 여유가 있는 것을 확인할 수 있다.

**4. Protection의 미동작**

앞에서 논의한 셀 밸런싱에 의한 화재사고가 발생하기 위해서는 하나의 전제조건이 성립해야 한다. BMS가 셀 밸런싱하는 동안에 OVP(Over Voltage Protection)가 미동작해야 한다. 그 부분에 대하여 논의하기로 한다.

**4.1 전류 센싱**

배터리에서 전류를 측정하는 방법은 Shunt 저항을 이용하거나 Hall C.T.를 이용하는 방법이 대표적이다. 이 두 가지 방법은 서로 장점과 단점을 가지기에 용도에 따라 사용 영역이 나뉜다. Shunt는 측정 영역의 외곽물이 적다 하지만 저항 성분에 전류를 흐르는 방식이라 배터리의 에너지를 소비하게 된다. Hall C.T.는 전류에서

C-rate (A)	SOC 70%		SOC 90%	
	Voltage	Temp	Voltage	Temp
0.5C (11A)	3.9965	25.3	4.1345	25.1
1C (22A)	4.0309	25.7	4.1796	25.6
2C (44A)	4.0938	27.4	4.2012	27.4
3C (66A)	4.1467	29.2	4.2010	28.8
4C (88A)	4.1921	31.6	4.2012	30.5
5C (110A)	4.2012	33.9	4.2012	31.7

(a) Charge data by C-rate

C : 4.20V(Rate)~D : 3.0V(0.5C), Cut-off 0.05C					
0.5C				96.89%	100.00%
7653.7	4.201V	11.0A	22.04Ah	25.4℃	100.00%
Sec	V	A	Ah	T(℃)	E(%)
6495	4.1345	11	19.845	25.1	90%
6565	4.1417	11	20.059	25.1	91%
6635	4.1497	11	20.273	25.2	92%
6710	4.1587	11	20.502	25.2	93%
6780	4.1681	11	20.716	25.2	94%
6855	4.1792	11	20.945	25.1	95%
6925	4.1902	11	21.159	25.1	96%
7000	4.2012	10.02	21.386	25	97%
7100	4.2012	6.37	21.606	25.1	98%
7265	4.2012	3.52	21.824	25	99%
7653.7	4.2012	1.1	22.043	24.9	100%

(b) 0.5C charge sata from 90% to 100%

C : 4.20V(Rate)~D : 3.0V(0.5C), Cut-off 0.05C					
0.5C				96.89%	100.00%
7653.7	4.201V	11.0A	22.04Ah	25.4℃	100.00%
Sec	V	A	Ah	T(℃)	E(%)
5050	3.9965	11	15.43	25.3	70%
5120	4.0031	11	15.644	25.2	71%
5195	4.0102	11	15.873	25.2	72%
5265	4.0173	11	16.087	25.2	73%
5340	4.0249	11	16.316	25.2	74%
5410	4.0321	11	16.53	25.2	75%
5485	4.0399	11	16.759	25	76%
5555	4.0472	11	16.973	25.1	77%
5625	4.0548	11	17.187	25.1	78%
5700	4.0625	11	17.416	25	79%
5770	4.0696	11	17.63	25.1	80%

(c) 0.5C charge sata from 70% to 80%

Fig. 9. Charge voltage table by C-rate.

발생하는 자기장을 이용하여 측정하는 방식으로 배터리의 에너지를 소비하지 않지만 측정 영역에서 외곽이 발생한다. 때문에 대전류 Hall C.T.의 경우 1채널은 ±50A 2채널은 ±200A를 측정하는 방식을 가진다. 대용량 ESS

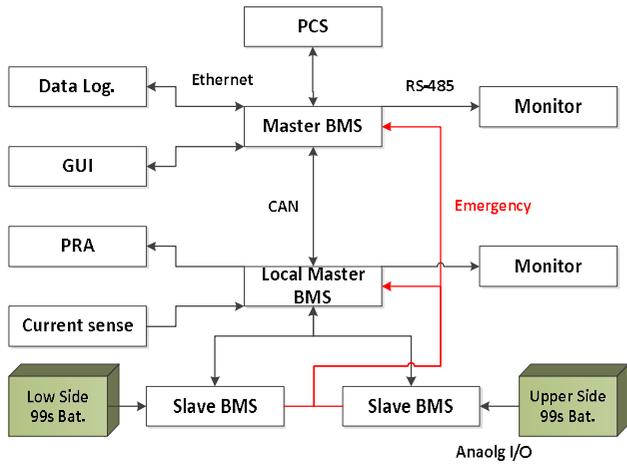


Fig. 10. Euljiro 3-ga ESS system block diagram.

에서는 효율을 중요시하기 때문에 Hall C.T.방식을 선호한다. 때문에 Monitoring IC가 아닌 그림 9처럼 Local Master BMS의 MCU(Micro Control Unit)에서 측정하는 구조를 가지게 된다.

Hall C.T.를 이용한 전류 측정에서 오차를 발생 시키는 대표적인 이유는 외란에 의한 흔들림과 Hall C.T. 자체의 편심과 이득오차 그리고 ADC에서 기준 전압의 떨림을 말할 수 있다. 이러한 오차 성분으로 Local Master에서 전류를 측정하는 과정에 전류가 흐르지 않는 0A(Open Circuit)에서도 노이즈를 미소전류가 흐르는 충전과 방전을 하는 상태로 받아들인다. 때문에 0A 근처에서는 전류 값  $\pm 1A$ 는 전류가 안 흐른다고 가정했다.

#### 4.2 Protection

그림 10처럼 ESS에서 Slave BMS의 Monitoring IC에서 과전압 알람이 울리게 되면 Slave BMS는 Local Master BMS에게 알람 정보를 CAN 통신으로 보내고 Local Master BMS에서 PRA(Power Relay Assy)를 제어하여 차단하게 된다.

통신으로 Local Master BMS에게 보내지기 때문에 Local Master BMS는 충전이 완료된 휴지기 시간에 셀 밸런싱을 진행하면서 충전 중에 체크하는 OVP(Over Voltage Protection) Flag를 바라보고 있어야 한다. 하지만 F/W 엔지니어는 배터리의 에너지 공유 현상이 발생할 것에 대한 정보가 없었기에 다들 이 부분을 간과하고 넘어간 것이 화재사고에 이르게 되었다고 생각한다.

BMS에서 PRA를 제어하는 것은 충전상태, 방전상태이다. 때문에 충전과 방전을 하지 않는 상태에서는 사용자가 직접 제어하지 않는 한 PRA를 제어하지 않는다. 하지만 Cell Balancing으로 인해 발생하는 미소 전류는 충전도 방전도 아닌 상태로 판단하여 대기 상태에서 전압상승에 대한 PRA 제어를 정의하는 경우는 거의 없다. 따라서, F/W 엔지니어는 배터리의 에너지 공유 현상이 발생할 것에 대한 정보가 없었으므로 이 부분을 점검하지 못한 것이 화재사고의 원인이 될 수 있다고 판단하였다.

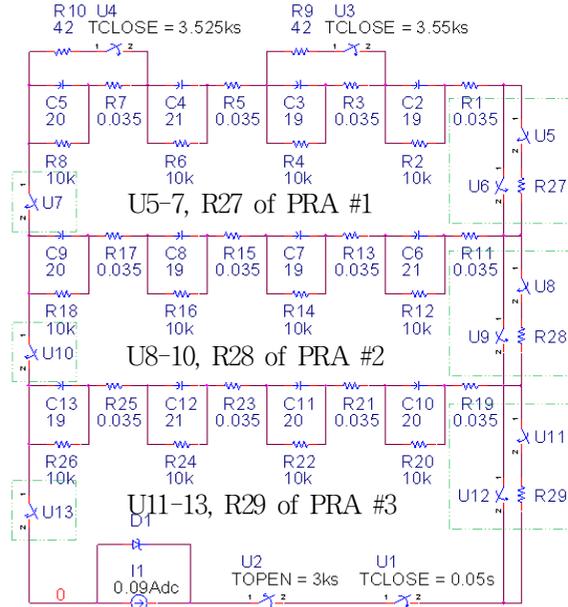


Fig. 11. ESS battery stack block diagram after charge.

### 5. 실험 결과 및 해결 방안

본 시뮬레이션에 ESS의 화재 원인을 시스템 측면에서 분석하여 유력한 가능성을 확인하였다. 대전력 ESS의 고전압을 만들기 위해 다수의 셀을 직렬로 연결하는 것과 용량을 키우기 위해서 Multi Stack을 사용하고 있지만 이것으로 인하여 셀 밸런싱 중에 에너지 소비에 대한 전류 보상이 일어나고 과충전하여 알람이 발생하여도 CAN 통신으로 전달하며 Local Master 입장에서는 대기 중인 상태에서 전압상승에 대한 동작이 정의되어 있지 않기에 화재를 방지하지 못했다고 판단한다. 그림 11에서 PRA #1~3은 그림 2에 Rack의 상단과 하단에 배치된 릴레이 스위치이다. U5, U8, U11은 Precharge Relay이고 U6, U9, U12는 Main Relay 그리고 U7, U10, U13은 Bottom Relay이다. 각 Stack을 병렬로 연결하기 위해서는 PRA의 Precharge Relay를 이용하여 전압을 동전압으로 만들고 Main Relay를 붙여야 돌입전류의 과도응답에 대한 충격을 줄일 수 있다. 이런 PRA를 이용하여 초기에 Stack을 연결한 후에 충전을 완료하고 Relay를 개방하여 Stack을 독립시킨 후에 밸런싱을 진행하고 완료된 Stack들부터 순차적으로 연결하면 에너지 보상에 의한 과전압충전을 막을 수 있다. 이때 PRA에서 Precharge Relay에 연결된 저항은 최대충전 전압과 최대방전 전압의 차를 가지고 Watt를 계산하면 된다.

본 연구를 진행하면서 ESS 시스템에서 SOC 100%까지 충전하고 사용하는 것이 옳은 것인가에 대한 의문이 생겼다. 이후에 진행할 연구 목표는 SOC가 방치 시에 SOH(State of Health)에 미치는 영향과 외국의 ESS에서는 왜 공칭전압이 4V 이상의 셀을 사용하는지보다 깊은 연구를 진행할 것이다.

이 논문은 2019년도 정부(산업부)의 재원으로 한국산업기술진흥원의 지원을 받아 수행된 연구임.  
(No. N0002428, 미래형자동차부품 및 서비스 R&D 인력양성 및 산학연계형 생태계 구축)

## References

- [1] K. H. Bae, J. M. Kim, J. Lee, T. H. Eom, K. Ryu, and C. Y. Won, "Multi-parallel operation control method of high efficiency PCS module for ESS," in *2019 10th International Conference on Power Electronics and ECCE Asia (ICPE 2019 - ECCE Asia)*, pp. 1-6, May 2019.
- [2] H. S. Jeong, J. Choi, Y. Choi, and Y. h. Ok, "Study on the development of the renewable energy management system by using ESS," in *2015 Power Electronics Annual Conference*, pp. 107-108, Jul. 2015.
- [3] Y. Song, M. Park, M. Seo, and S. W. Kim, "Improved SOC estimation of lithium-ion batteries with novel SOC-OCV curve estimation method using equivalent circuit model," in *2019 4th International Conference on Smart and Sustainable Technologies (SpliTech)*, Jun. 2019.
- [4] M. Serbanescu, O. Ionescu, I. Georgescu, V. Dumitru, and O. Buiu, "Studies for an optimal balancing system for li-ion batteries based on state of health assessment," in *2016 International Semiconductor Conference (CAS)*, Oct 2016.
- [5] M. S. Ballal, K. V. Bhadane, R. M. Moharil, and H. M. Suryawanshi, "A control and protection model for the distributed generation and energy storage systems in microgrids," *Journal of Power Electronics*, Vol. 16, No. 2, pp. 748-759, Mar. 2016.
- [6] E. Hosseinzadeh, M. X. Odio, J. Marco, and P. Jennings, "Unballanced performance of parallel connected large format lithium ion batteries for electric vehicle application," in *2019 International Conference on Smart Energy Systems and Technologies (SEST)*, pp. 1-6, Sept. 2019.
- [7] S. Kim, D. Han, and J. Kim, "Relative degradation grade estimation based on fuzzy logic algorithm for ESS battery fire protection," in *2019 Power Electronics Annual Conference*, pp. 441-442, Jul. 2019.
- [8] V. L. Pham, T. T. Nguyen, D. H. Tran, V. B. Vu, and W. Choi, "A new cell-to-cell fast balancing circuit for lithium-ion batteries in electric vehicles and energy storage system," in *2016 IEEE 8th International Power Electronics and Motion Control Conference (IPEMC-ECCE Asia)*, pp. 2461-2465, May 2016.



### 윤상선(尹相善)

1978년 6월 16일생. 2004년 청주대 전자공학과 졸업. 2007년 충북대 전자공학과 졸업(석사). 2007년~2008년 웨이브 일렉트로닉스 통신장비 개발 주임연구원. 2015년~2017년 모트랩 H/W개발 책임연구원. 2018년~현재 충북대 스마트카협동과정 박사과정.



### 기석철(奇錫哲)

1964년 4월 28일생. 1987년 서울대 제어계측공학과 졸업. 1989년 동 대학원 제어계측공학과 졸업(석사). 2001년 동 대학원 전기공학부 졸업(공학박). 1989년~2007년 삼성종합기술원 수석연구원. 2010년~2015년 만도전자센터장. 2015년~현재 충북대 산학협력중점 교수 및 스마트카연구센터장.