



저작자표시-비영리-변경금지 2.0 대한민국

이용자는 아래의 조건을 따르는 경우에 한하여 자유롭게

- 이 저작물을 복제, 배포, 전송, 전시, 공연 및 방송할 수 있습니다.

다음과 같은 조건을 따라야 합니다:



저작자표시. 귀하는 원저작자를 표시하여야 합니다.



비영리. 귀하는 이 저작물을 영리 목적으로 이용할 수 없습니다.



변경금지. 귀하는 이 저작물을 개작, 변형 또는 가공할 수 없습니다.

- 귀하는, 이 저작물의 재이용이나 배포의 경우, 이 저작물에 적용된 이용허락조건을 명확하게 나타내어야 합니다.
- 저작권자로부터 별도의 허가를 받으면 이러한 조건들은 적용되지 않습니다.

저작권법에 따른 이용자의 권리는 위의 내용에 의하여 영향을 받지 않습니다.

이것은 [이용허락규약\(Legal Code\)](#)을 이해하기 쉽게 요약한 것입니다.

[Disclaimer](#)

2021년 8월
석사학위 논문

다병렬 리튬전지시스템의 Hot Swap 알고리즘 설계 연구

조선대학교 대학원
기계시스템·미래자동차공학과
임 남 규

다병렬 리튬전지시스템의 Hot Swap 알고리즘 설계 연구

A Study on the Design of Hot Swap Algorithm for Multiple
Parallel Lithium Battery System

2021년 8월 27일

조선대학교 대학원
기계시스템·미래자동차공학과
임 남 규

다병렬 리튬전지시스템의 Hot Swap 알고리즘 설계 연구

지도교수 이 성 준

이 논문을 공학석사학위 신청 논문으로 제출함

2021년 4월

조선대학교 대학원

기계시스템·미래자동차공학과

임 남 규

임남규의 석사학위논문을 인준함

위원장 조선대학교 교수 박정수



위원 조선대학교 교수 이성준



위원 조선대학교 교수 문지윤



2021년 5월

조선대학교 대학원

목 차

LIST OF TABLES	I
LIST OF FIGURES	II
ABSTRACT	IV
제 1장 서 론	1
1.1 연구 배경 및 필요성	1
1.2 연구 목적 및 내용	4
제 2장 리튬전지 시스템 구성	5
2.1 리튬전지 시스템 모델	5
2.2 리튬전지 소프트웨어 모델링	6
2.2.1 리튬전지 등가모델 설계	6
2.2.2 리튬전지 등가모델 파라미터 도출	10
2.2.3 릴레이 퓨즈 모델링	20
2.2.4 케이블 및 기타 구성장치 모델링	21
2.3 리튬전지 하드웨어 모델링	23
2.4 리튬전지 시스템 소프트웨어 모델 검증	25
제 3장 Hot Swap 알고리즘 설계	33
3.1 Hot Swap 분석 방법	33
3.2 Hot Swap 핵심인자 분석	34
3.2.1 배터리 병렬 수에 따른 영향성	34
3.2.2 전압편차의 영향성	36
3.2.3 부하전류에 따른 영향성	37

3.2.4 온도에 따른 영향성	39
3.3 Hot Swap 동작 조건 도출	40
3.4 Hot Swap 알고리즘 설계	44
3.5 Hot Swap Neural Network 모델 설계	48
제 4장 다병렬 리튬전지 시스템 Hot Swap 알고리즘 검증 ..	53
4.1 Hot Swap 알고리즘 검증	53
제 5장 결 론	55
[참고문헌]	57

LIST OF TABLES

Table 2.1 SDI INR18650-30Q Specification	11
Table 2.2 Battery 0℃ Parameter analysis result	16
Table 2.3 Battery 10℃ Parameter analysis result	16
Table 2.4 Battery 23℃ Parameter analysis result	17
Table 2.5 Battery 35℃ Parameter analysis result	17
Table 2.6 Battery 45℃ Parameter analysis result	18
Table 2.7 1S4P Battery Hardware Composition	24
Table 3.1 Effect of battery parallel configuration on Hot Swap circulating current	35
Table 3.2 Hot Swap operating condition for 1S4P System	40
Table 3.3 ANN Inputs, Targets Data Type	48
Table 3.4 Model performance analysis result according to Hidden Layer and Neurons configuration	48
Table 3.5 Model performance analysis result according to train function	50

LIST OF FIGURES

Figure 1.1 Global energy generation source distribution map	1
Figure 1.2 Large-Scale Energy Storage System . HYOSUNG Corporation	2
Figure 1.3 Key factor determining Hot Swap circulating current	4
Figure 2.1 Battery ECM(Equivalent Circuit Model) Modeling	6
Figure 2.2 Battery ECM(Equivalent Circuit Model) Modeling by Matlab/Simulink	7
Figure 2.3 Battery ECM(Equivalent Circuit Model) Modeling results (2RC)	8
Figure 2.4 Pulse Current Discharge Test Profile	10
Figure 2.5 Battery ECM Parameter Derivation Function	11
Figure 2.6 Battery ECM Parameter Derivation Function Process_1,2	11
Figure 2.7 Battery ECM Parameter Derivation Function Process_4	13
Figure 2.8 Exponential function fitting pre-processing	13
Figure 2.9 Battery ECM Parameter Derivation Function Process	14
Figure 2.10 Parameter validation simulation results	15
Figure 2.11 Effect of capacity change with temperature	18
Figure 2.12 ECM parameter derivation result according to SOC-Temperatures	19
Figure 2.13 Lithium battery system Relay modeling	20
Figure 2.14 Lithium battery system Fuse modeling	20
Figure 2.15 Parameter derivation using finite element analysis software	21
Figure 2.16 1S4P Battery Pack Software Modeling	22
Figure 2.17 1S4P Battery Pack configuration diagram	23
Figure 2.18 1S4P Battery Pack 3D Modeling	24
Figure 2.19 1S2P Battery experiment environment	25
Figure 2.20 1S2P Battery Pack software modeling	25
Figure 2.21 1S2P Battery Hot Swap experiment and simulation comparison result(1m Ω)	26
Figure 2.22 1S2P Battery Hot Swap experiment and simulation comparison result(5m Ω)	27
Figure 2.23 1S4P Battery experiment set	28

Figure 2.24 1S4P Battery pack control/measurement system construction
 using Labview software..... 29

Figure 2.25 3.932V vs 3.822V battery Hotswap experiment and simulation
 comparison results..... 30

Figure 2.26 3.827V vs 3.766V battery Hotswap experiment and simulation
 comparison results..... 31

Figure 2.27 3.766V vs 3.402V battery Hotswap experiment and simulation
 comparison results..... 32

Figure 3.1 Flow chart of Hot Swap algorithm analysis method..... 33

Figure 3.2 Number of battery Hot Swap cases..... 34

Figure 3.3 Influence of battery parallel configuration on Hot Swap
 circulating current..... 35

Figure 3.4 Influence of battery voltage deviation on hot-swap circulating current... 36

Figure 3.5 Influence of load current on hot-swap circulating current (High SOC).... 37

Figure 3.6 Influence of load current on hot-swap circulating current (Low SOC).... 38

Figure 3.7 Influence of battery temperature on hot-swap circulating current..... 39

Figure 3.8 Check the result of Hot Swap operating conditions (Load : 0A/cell)..... 41

Figure 3.9 Check the result of Hot Swap operating conditions (Load : 1A/cell)..... 43

Figure 3.10 Table reflecting Hot Swap operating conditions by temperature..... 44

Figure 3.11 Hot Swap operation algorithm flow-chart..... 45

Figure 3.12 On sequence simulation using hot swap algorithm (Sequence method).... 46

Figure 3.13 On sequence simulation using hot swap algorithm (Priority method).... 47

Figure 3.14 Artificial Neural Network Model composition..... 49

Figure 3.14 Comparison of ANN model and simulation results..... 51

Figure 4.1 Hot-swap algorithm and simulation experiment verification..... 53

Figure 4.2 ANN model experiment verification 54

ABSTRACT

A Study on the Design of Hot Swap Algorithm for Multi-Parallel Lithium Battery System

Lim, Nam-gyu

Advisor : Prof. Lee, Seong-jun, Ph.D.

Department of Mechanical Systems
Engineering Graduate School of Chosun
University

Environmental problems and fuel resource depletion continue to be a problem around the world, and active research is being conducted in various fields such as renewable energy development and eco-friendly vehicle to solve this problem. Install Large Scale ESS(Energy Storage systems) in renewable energy plants such as solar/wind to compensate for the shortcomings of intermittent power generation performance under weather conditions and provide optimal output. The battery that can be applied to large-scale ESS uses lithium-ion batteries. ESS consists of a large power system in which lithium-ion cells are connected in multi-series to form one device and the devices are configured in multi-parallel. In these high-power systems, there is a Hot Swap function. which does not shut down the entire system for maintenance or replacement of a cell or series battery, but disconnects or attaches only the corresponding series unit. However, Hot Swap can only be used under certain conditions. This is because excessive circulating current can occur between batteries if batteries with different charging states are put in. Therefore, we need to design a Hot Swap algorithm after analyzing various conditions in advance for Hot Swap behavior. Various studies have been conducted on the circulating current of existing multi-parallel systems, but no research and verification have been conducted on the key factors that determine circulating current. Therefore, in this work, we perform lithium battery pack design of 1S4P configuration for Hot Swap analysis and simulation model design, and Hot Swap key factor analysis through simulation model design. From the above analysis results, Hot Swap algorithm design was performed by deriving the Hot Swap operating conditions considering the key factors determining the circulatory current that were not reflected in the existing study. The Hot Swap algorithm is reflected in the model in the form of a look-up table based on the derived conditions. When using a table model, it can only be used as a condition to

turn on and off relays. However, if the circulating current generated by Hot Swap operation can be calculated, it can be reflected in the Hot Swap motion judgment as well as in the design of power management algorithms before and after Hot Swap. Therefore, a study is needed to estimate the circulating current generated during the Hot Swap operation. In this work, we applied an ANN(Artificial Neural Network) model, which was previously mainly used for state estimation such as SOC(State of Charge) and SOH(State of Health) in battery systems to estimate circulating currents considering the Hot Swap key-factors. From the above results, we confirm that the ANN model can be used to estimate the circulating current generated during Hot Swap behavior.

제 1 장 서 론

1.1 연구 배경 및 필요성

환경 및 자원고갈 문제가 끊임없이 제기되면서 이를 해결하기 위해 전 세계적으로 환경규제, 신재생에너지 개발 등 다양한 노력이 진행되고 있으며 이 중심에는 태양광 풍력 등을 이용한 신재생에너지발전소와 전기, 하이브리드, 수소에너지를 이용한 운송수단에 대한 활발한 연구개발 및 상용화 과정이 진행되고 있다. 그림 1은 2020년 BNEF(Bloomberg New Energy Finance)에서 글로벌 에너지발전원을 예측한 결과이며 2010년을 기점으로 태양광 및 풍력 자원을 이용한 신재생 에너지 발전이 가속화되며 2050년 50% 이상의 에너지 발전원으로 확장될 것이라고 예상했다 [1]. 태양광 풍력과 같은 친환경 신재생에너지는 기상 조건에 따른 간헐적 발전 성능의 단점이 존재한다. 간헐적 발전 성능의 단점을 보완하기 대용량 에너지 저장시스템(ESS : Energy Storage System)을 신재생 에너지 발전소와 함께 구축함으로써 기상 조건 및 환경 조건에 따른 신재생에너지 발전의 간헐적 발전 성능에 대한 단점의 보완과 에너지 활용을 극대화하고 있다.

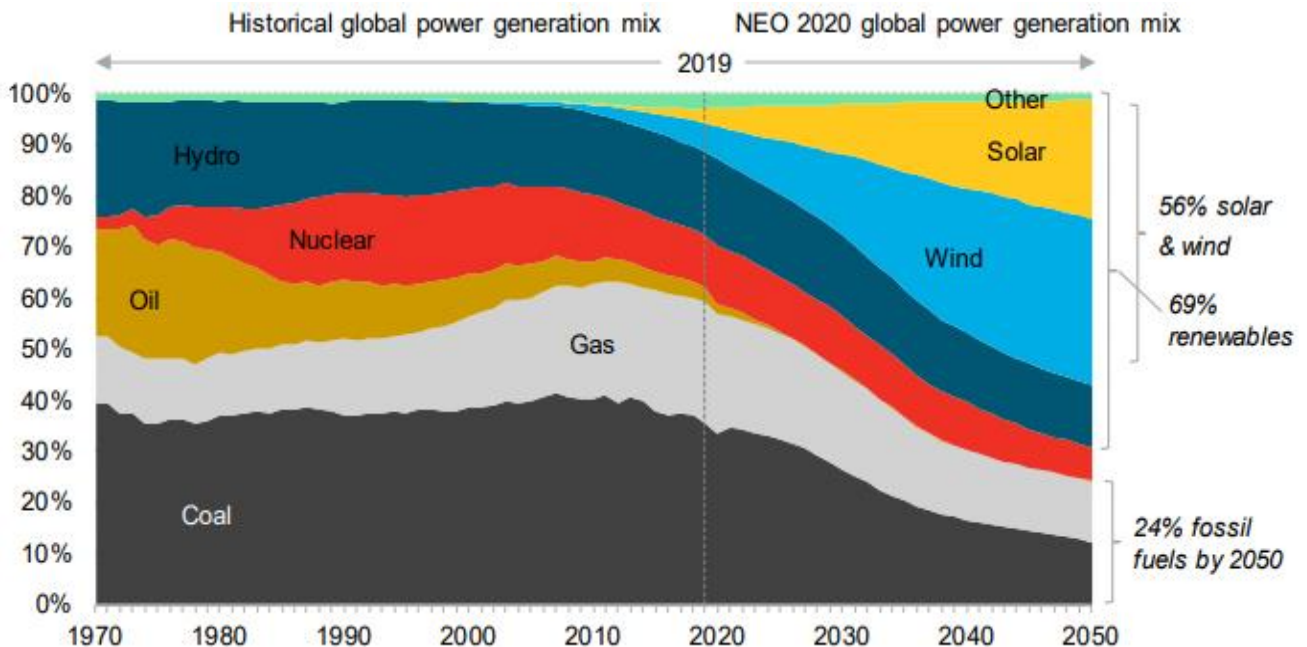


Figure 1.1 Global energy generation source distribution map[1]

신재생에너지 발전소 등에 설치되는 대용량 에너지 저장시스템의 에너지 저장 장치로 대부분 리튬이온배터리를 채택하여 적용하고 있다. 리튬이온배터리는 기존의 대용량 시스템에 적용되었던 납축전지에 비해 에너지 밀도와 출력 밀도가 높고 내부저항이 낮아 리튬이온 배터리의 다직렬·다병렬 구성으로 대전력 시스템을 구축하고 있다. 대용량 에너지 저장 장치를 비롯한 대전력 리튬전지 시스템은 800V급 또는 1000V급의 전압 범위를 기준으로 이를 다병렬 구성하여 시스템을 운용하고 있다. 이러한 시스템에 적용되는 리튬배터리는 18650, 20700, 21700등 원통형 타입의 리튬이온배터리를 비롯해 파우치형, 각형 등 다양한 타입의 배터리가 적용되며 800V 시스템은 약 200개 리튬이온 배터리 셀의 직렬구성, 1000V 시스템은 약 250개의 리튬이온 배터리가 직렬 연결된 셀 구성으로 이루어져 있다. 대용량 에너지 저장장치의 용량의 경우 셀 자체의 용량을 키우는 데 한계가 있어 직렬구성 배터리 시스템이 하나의 단위를(트레이, 모듈 등) 이루며 직렬단위의 시스템이 병렬로 연결되어 대전력 시스템을 이룬다[2,3]. ESS와 같은 대전력 시스템에서 셀 또는 모듈/트레이 단위의 유지보수 또는 교체 등을 위해 전체 시스템을 Shut-down 시키지 않고 해당 직렬단위(이하 랙(Rack))에 고전압 릴레이를 적용하여 기존 시스템에 On/Off(이하 Hot Swap) 할 수 있는 기능을 가지고 있다. Hot Swap 동작은 배터리의 충전상태 차이에 따라 발생할 수 있는 순환전류를 고려하여 설정되어야 하며, 이를 고려하지 않고 동작하는 경우 과도한 순환전류 발생으로 전체 시스템에 영향을 미칠 수 있다. 따라서 다양한 경우의 Hot-Swap 동작에 대한 조건 분석과 해당 조건에서 발생하는 순환전류분석을 통해 배터리의 신규투입 시기를 결정하여야 한다.

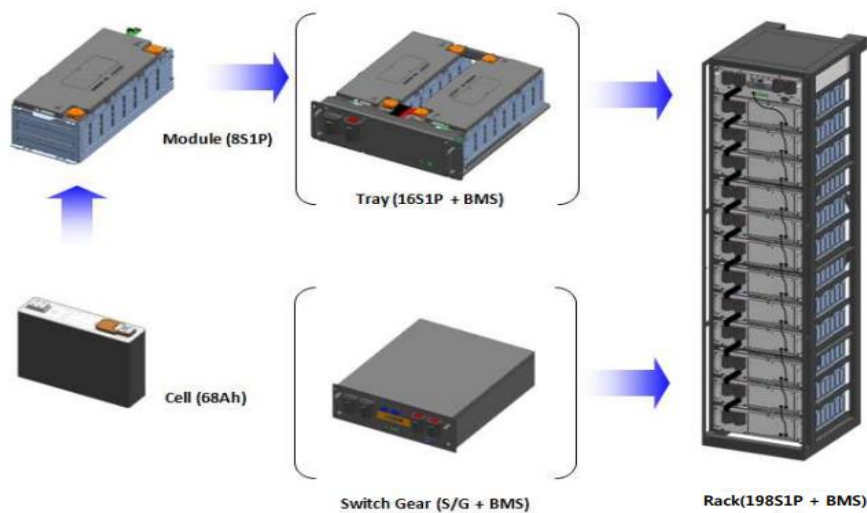


Figure 1.2 Large-Scale Energy Storage System . HYOSUNG Corporation [2]

다병렬 배터리 시스템에서 발생하는 순환 전류를 최소화하는 방법과 순환 전류를 추정하는 연구는 꾸준히 진행되어왔다. Jiang의 연구에서는 buck Regulator[4], Moo의 연구에서는 Buck/Boost Converter를 적용하여 배터리의 전압제어를 통해 순환 전류를 최소화하는 방법을 제시했다[5]. 해당 연구들은 배터리의 전압 차이에 의해 발생하는 순환 전류를 억제할 수 있지만, High Voltage/Current 시스템의 배터리 시스템에 해당 장치를 모두 적용하기에는 한계가 있다. 또한 시스템 사이즈가 커지고, 전력변환 장치 적용에 따른 효율 감소의 문제가 발생하게 된다. Ban의 연구에서는 배터리의 내부저항차에 의해 발생하는 순환 전류를 최소화하기 위해 배터리 시스템에 외부저항을 삽입하고 외부저항 가변을 통해 순환 전류감소와 배터리 간의 전류 불균형 문제를 해결하는 방법을 제안했다[6]. 해당 연구는 납축전지를 이용한 다병렬 배터리 시스템에 대한 연구로 납축전지보다 내부저항이 훨씬 작은 리튬이온배터리에 적용하기 어렵고 저항을 통한 에너지 손실을 피할 수 없다. Song의 연구에서는 Fuzzy Control Logic의 제어 알고리즘을 이용한 배터리에 연결된 스위치 제어를 통해 병렬연결에 따른 순환 전류 감소와 에너지 관리를 수행했다[7]. 해당 연구는 배터리의 충전상태와 출력 부하에 따른 배터리 개수를 분류하여 에너지 관리를 수행했지만, 배터리의 병렬연결 시 발생한 순환 전류를 충전상태 차이로만 판단했다. Lee의 연구에서는 다병렬 리튬배터리 시스템의 등가 모델을 기반으로 Hot Swap 동작 시 발생하는 Inrush-Current를 계산하는 방법을 제시하고 EV Driving Cycle 시뮬레이션을 통해 검증을 수행했다[8,9]. 단, 해당 연구에서는 배터리의 온도, 노화 등 배터리의 상태변경에 따른 특성반영과 부하전류의 방향변환에 대한 검증은 이루어지지 않았다. 위와 같이 다병렬 배터리 시스템의 순환 전류에 대한 다양한 연구가 진행되었지만 순환 전류를 결정짓는 핵심 인자에 대한 분석과 검증연구가 수행되지 않았다. 따라서 본 연구에서는 다병렬 리튬전지 시스템에서 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류를 결정짓는 핵심 인자에 대한 분석과 핵심 인자가 고려된 Hot Swap 동작 조건을 도출하고자 한다. 또한 핵심 인자 분석에 대한 결과를 기반으로 인공신경망(ANN:Artificial Neural Network) 모델 설계를 통해 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류를 추정하고자 한다.

1.2 연구 목적 및 내용

Hot Swap 분석 및 알고리즘 설계의 목적은 다병렬 배터리 시스템에서 Hot Swap 동작 시 배터리 간 발생하는 순환 전류가 시스템의 제한전류를 초과하지 않는 배터리 투입 조건을 결정하기 위해 수행된다. Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류는 배터리 간의 충전상태 차이 뿐만 아니라 배터리의 병렬(구조)구성, 부하전류 크기·방향, 온도, 동작지점, 노화 등의 복합적인 관계로 결정된다[10]. 따라서 본 연구에서는 기존 연구에서 수행되지 않았던 Hot Swap 핵심 인자 분석을 위해 1S4P 구성의 리튬배터리 팩 설계 및 Matlab/Simulink SW를 이용한 배터리 소프트웨어 모델 설계를 수행한다. 따라서 설계된 모델을 기반으로 Hot Swap Case-Study 분석을 수행하고 분석 결과로부터 핵심 인자들이 고려되고 제한전류를 초과하지 않는 Hot Swap 동작 조건을 도출한다.

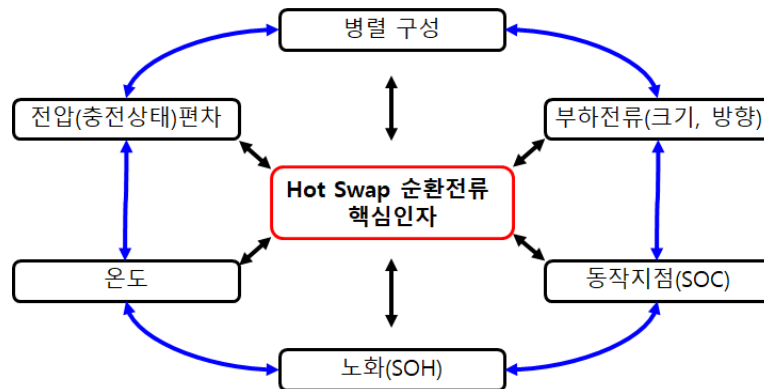


Figure 1.3 Key factor determining Hot Swap circulating current[10]

Hot Swap 동작 조건은 로직 단순화 및 시스템 보호 차원으로 Worst-Case에 대한 분석 조건이 nD Look-up Table 모델로 반영된다. 하지만 Table 모델은 조건이 추가될수록 차원이 급격하게 증가하고 알고리즘 구현이 복잡해질 뿐만 아니라 Hot Swap 동작을 단순 릴레이 On/Off 제어로밖에 사용할 수 없다. 하지만, Hot Swap 동작 전 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류를 추정할 수 있다면 Hot Swap 동작 조건 판별뿐만 아니라 및 Hot Swap 전후의 사용 가능한 가용전력의 알고리즘에 반영하여 전력관리 알고리즘에 적용할 수 있다. 따라서 본 연구에서는 기존의 배터리 시스템에서의 SOC(State of Charge), SOH(State of Health) 등 주로 배터리의 상태추정에만 사용되었던 ANN 모델을 이용하여 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류를 추정하는 방법을 제시하고 ANN 모델을 이용한 순환 전류 추정 수행 및 검증 연구를 수행한다[11-14].

제 2 장 리튬전지 시스템 구성

2.1 리튬전지 시스템 모델


대용량 ESS에 적용되는 배터리 시스템은 1장에 언급한 것과 같이 800V 또는 1000V급의 직렬구성의 배터리 셀이 고전압 스위치, 릴레이를 이용하여 병렬 연결함으로써 용량을 확장해 사용하고 있다. 이러한 다직렬 구성의 배터리 시스템을 셀 단위로 모델링 하면 시뮬레이션 모델이 상당히 벌크해지며 이를 해석하기 위한 시간과 PC 리소스 등 무리한 해석조건이 요구될 수 있다. 따라서 다직렬 구성의 고전압 배터리는 1개의 단일 셀 모델링을 통해 증가화할 수 있다[15].

본 논문에서는 병렬 배터리 시스템의 다양한 환경 조건을 고려한 Hot Swap 분석을 위해 스케일 다운한 1S4P 구성의 리튬배터리팩 하드웨어 모델과 시뮬레이션 모델을 설계하고 다양한 조건에서의 Hot Swap Case-Study 분석을 통해 최적의 Hot Swap 알고리즘을 설계하고자 한다.

본 논문에서 설계한 리튬배터리 팩 설계 및 시뮬레이션 모델에 적용된 배터리는 원통형 타입의 INR18650-30Q 셀로 데이터 시트 정보는 표 2.1과 같다[16].

Table 2.1 SDI INR18650-30Q Specification

Specification INR18650 - 30Q	
Chemistry	NCA
Dimension(mm)	Diameter :18.33±0.07 Height :64.85±0.15
Nominal Voltage	3.6V
Capacity	3,040mAh
Charge (Current/Voltage)	CC-CV 1.5A/4.2V
Discharge (Current/Voltage)	0.2C/2.5V
Cycles	<250cycles



2.2 리튬전지 소프트웨어 모델링

2.2.1 리튬전지 등가모델 설계

배터리 모델링은 그림 2.1과 같이 등가회로(ECM:Equivalent Circuit Model) 모델로 구성하여 배터리의 비선형적인 특성을 묘사한다. 등가 모델 구성은 DC 전압 원, 저항, 커패시터로 구성되며 DC 전압 원에 적용되는 개방전압(OCV:Open Circuit Voltage)파라미터는 배터리에 전류가 흐르지 않는 정상상태의 개방전압을 나타낸다. 저항 R_i 는 배터리의 내부 직렬저항이며 RC 병렬 R_{diff} , C_{diff} 는 배터리의 확산 저항, 커패시턴스를 나타낸다. 그림 2.1의 (a) 는 RC 래더가 한 개인 first-order 모델이며 해당 모델의 터미널 전압을 식 2.1로 나타낼 수 있다. (b) 는 RC 래더가 두 개인 second-order 모델이고 해당 모델의 터미널 전압은 식 2.2로 나타낼 수 있다[17].

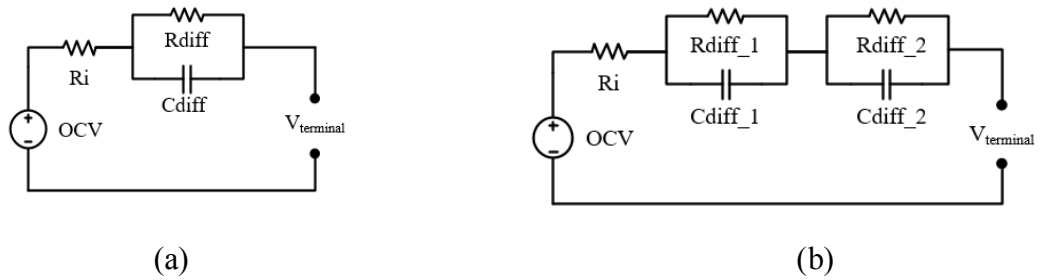


Figure 2.1 Battery ECM(Equivalent Circuit Model) Modeling, (a) Battery ECM Model (1-RC), (b)Battery ECM Model (2-RC)

$$(a) \quad V_{terminal.1RC} = V_{ocv} - I_{load} \times R_i - I_{load} \times R_{diff} e^{-\frac{t}{\tau}} \quad (2.1)$$

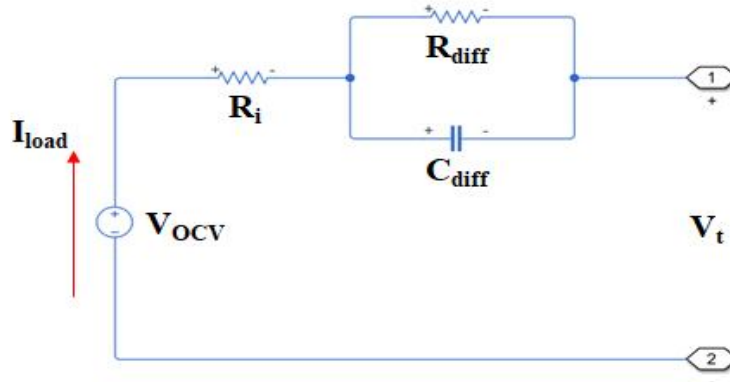
$$(b) \quad V_{terminal.2RC} = V_{ocv} - I_{load} \times R_i - I_{load} \times R_{diff_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - I_{load} \times R_{diff_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}} \quad (2.2)$$

$$\tau = R_{diff} \times C_{diff} \quad (2.3)$$

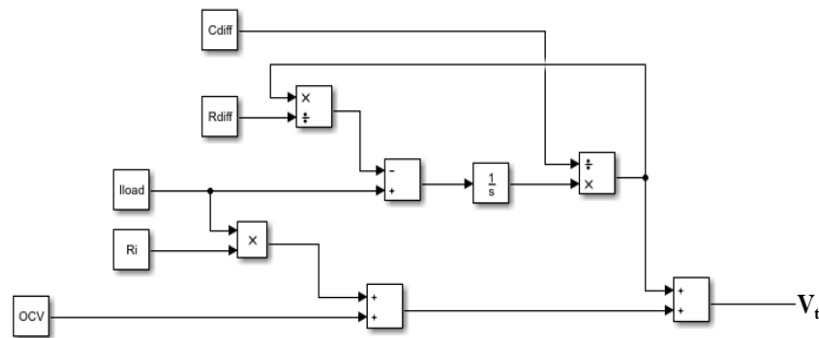
배터리 등가 모델은 그림 2.1과 같이 RC 래더 1개 또는 2개 모델을 주로 사용하며 모델 정확성일 더 높이기 위해 3개 이상의 RC 래더를 사용할 수 있지만 대용량 리튬전지 시스템 모델링 설계 시 모델의 구성 인자들이 기하급수적으로 많아지게 되고 이에 따라 시뮬레이션 모델의 용량과 해석 시간의 비효율성 문제가 발생하게 된다. 따라서 본 논문에서는 Matlab/Simulink 소프트웨어를 이용하여 RC 래더 1개 또는 2개의 경우에 대한 비교 분석을 진행하였으며 시뮬레이션 모델은 RC 래더

2개 구성의 등가 모델로 리튬전지시스템 모델링을 구축하였다.

Matlab/ Simulink 소프트웨어를 이용하여 배터리 등가 모델을 구성하는 방법은 크게 두 가지로 구분할 수 있다. Simulink의 Simscape 또는 Powersim 라이브러리를 이용하여 그림 2.2 (a) 와 같이 전압 원, 저항, 커패시터 등 전기 소자 블록을 이용하는 방법과 (b) 와 같이 simulink의 기본 블록을 이용하여 등가 모델을 수식화한 모델을 반영함으로써 배터리 등가 모형을 구성하는 방법이 있다.



(a)



(b)

Figure 2.2 Battery ECM(Equivalent Circuit Model) Modeling by Matlab/Simulink, (a) Modeling using simscape library (b) Equation-based modeling using basic blocks

$$V_t = V_{ocv} - I_{load} \times R_i - \frac{1}{s} \left(\frac{1}{C_{diff}} + \frac{V}{R_{diff} \times C_{diff}} \right) \quad (2.4)$$

그림 2.2의 (a) 는 Simulink의 Simscape 라이브러리를 이용한 등가회로 모델이다. Simscape 라이브러리에서 제공하는 전기적 회로 소자를 사용하기 때문에 그림 2.1의 (a) 와 동일한 구성으로 등가회로 모델을 동일하게 구현할 수 있어 설계가 용이하

다. 그림 2.2의 (b) 는 등가회로 수식(2.1)을 라플라스 변환한 식(2.4)를 블록화한 모델이며 Simulink에서 제공하는 기본 블록을 이용하여 모델링 가능하다. 기본 블록을 사용함으로써 시뮬레이션 모델의 컴파일 시간을 줄일 수 있고 수치화된 모델을 이용하여 계산 오류를 최소화할 수 있지만 리튬전지시스템에 반영된 다양한 부속장치 (릴레이, 퓨즈, 케이블임피던스 등)의 특성을 모델에 반영하기 어려운 문제가 있다. 따라서 본 연구에서는 리튬전지 소프트웨어의 배터리 모델을 Simscape 라이브러리를 이용해 리튬전지시스템 등가 모델링을 진행하였으며 리튬배터리 등가회로 모델 결과는 그림 2.3과 같다.

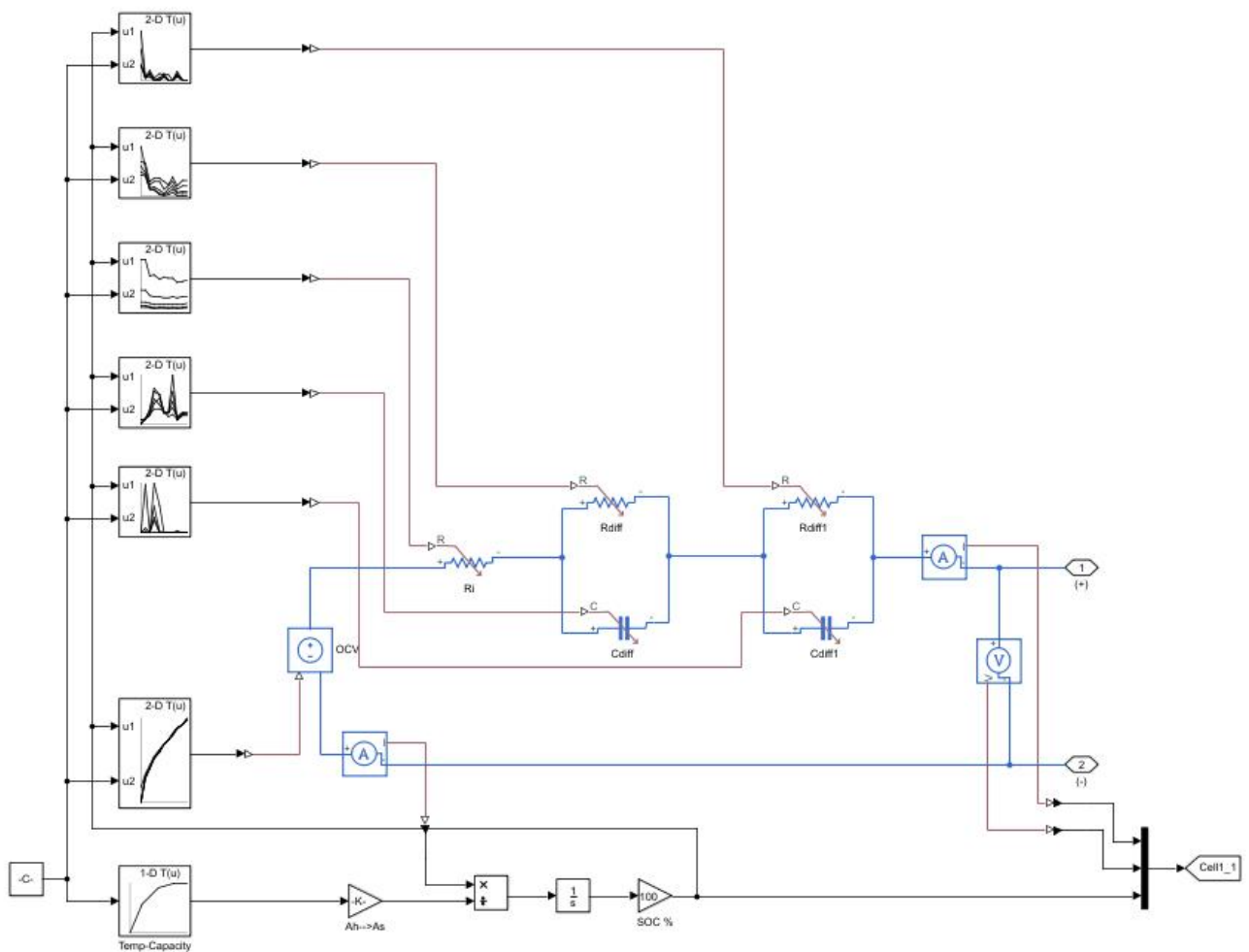


Figure 2.3 Battery ECM(Equivalent Circuit Model) Modeling results (2RC)

Simscape 라이브러리를 이용한 그림 2.3의 2-RC 구성의 배터리 모델은 리튬전지의 충전상태(SOC)와 온도에 따라 달라지는 배터리의 특성을 반영하기 위해 특정 온도 (0°C, 10°C, 23°C, 35°C, 45°C) 특성 정보를 반영한 2D-Lookup Table을 이용하며 충전상태,

온도 조건에 따른 배터리 정보를 나타낼 수 있다. 모델에 적용되는 충전상태(SOC)는 일반적으로 사용되는 식 2.5의 전류 적산법을 기반으로 모델링하였으며 온도 정보는 사용자 외부 입력값으로 사용된다.

$$SOC(n) = SOC(n-1) + \frac{\int I \times dt}{Capacity} \times 100(\%) \quad (2.5)$$

2.2.2 리튬전지 등가모델 파라미터 도출

본 논문에서는 18650(INR18650-30Q) 타입의 배터리의 파라미터 도출을 위해 배터리 충·방전 장비(BTS 4000, Neware)를 이용한 펄스 방전 실험을 진행하였다. 배터리 충·방전 장비에 적용된 실험 프로파일은 그림 2.4의 순서로 진행되었다. 배터리를 정상적인 만충(SOC 100%) 영역을 맞추기 위해 배터리를 만방(SOC 0%)까지 방전시킨 후 90분간의 휴지 시간을 가진다. 이후 CC(1.5A(0.5C))-CV(4.2V,<0.15A(0.05C)) 충전조건으로 만충 후 약 90분간의 휴지 시간을 가진다. 이때 정상상태의 배터리 전압을 SOC 100% 전압으로 판단한다. 이후 충전상태별 파라미터를 도출하기 위해 SOC 10% 간격으로 총 10회 방전하였다. SOC는 직접 측정이 불가능하므로 배터리의 방전용량 대비 1.5A(0.5C)로 10% 방전할 수 있는 시간을 도출한다. 이후 도출된 시간만큼 방전 후 90분의 휴지 시간을 가지게 되면 해당 방전 구간에서 배터리 등가회로의 파라미터와 SOC 90%의 개방전압을 도출할 수 있다. 위 방법을 총 10회 반복하여 SOC 10% 간격으로 배터리 등가회로 파라미터 도출을 위한 실험을 진행한다[18,19].

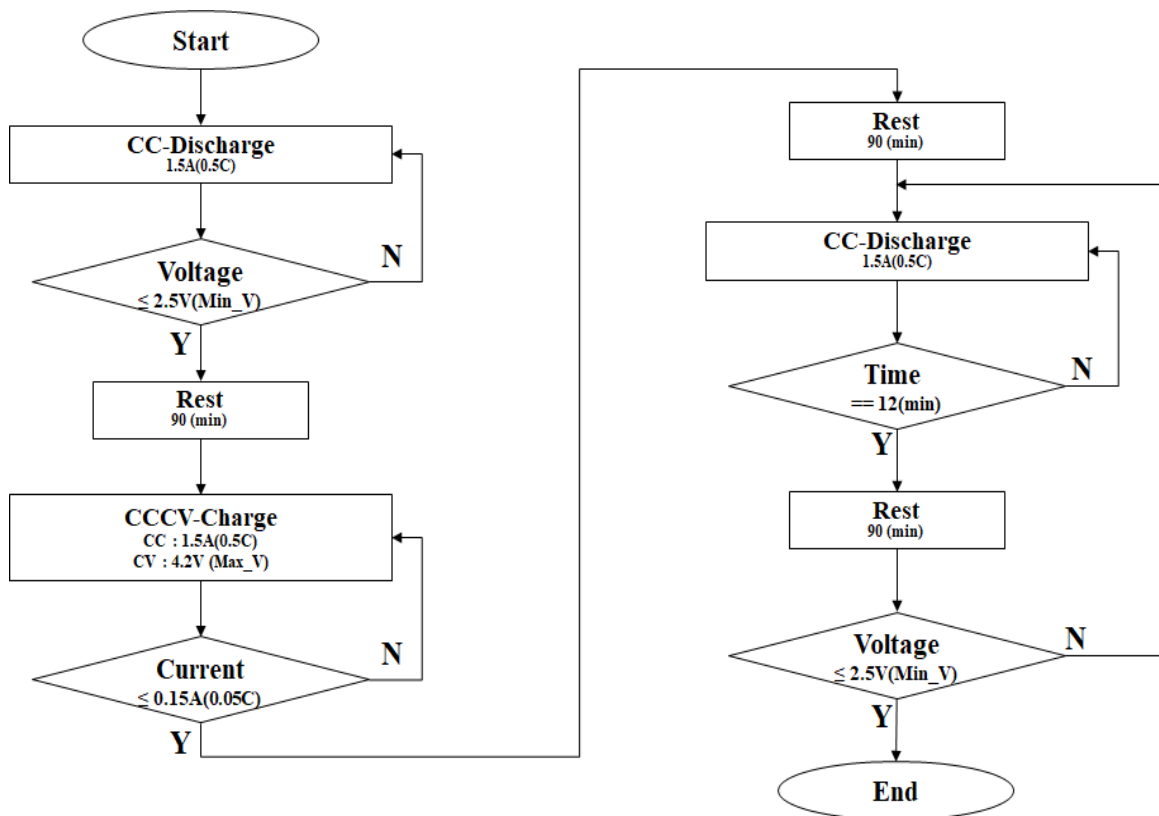


Figure 2.4 Pulse Current Discharge Test Profile

본 논문에서는 배터리의 충전상태 및 온도 상태에 따른 파라미터 도출을 위해 Matlab 소프트웨어의 Curve fitting Toolbox를 이용하여 피팅 함수를 배터리 등가 모델의 파라미터를 도출하였으며 파라미터 도출 방법의 일관성을 위해 그림 2.5의 순서로 배터리 파라미터 자동화 함수 설계를 진행하였다.

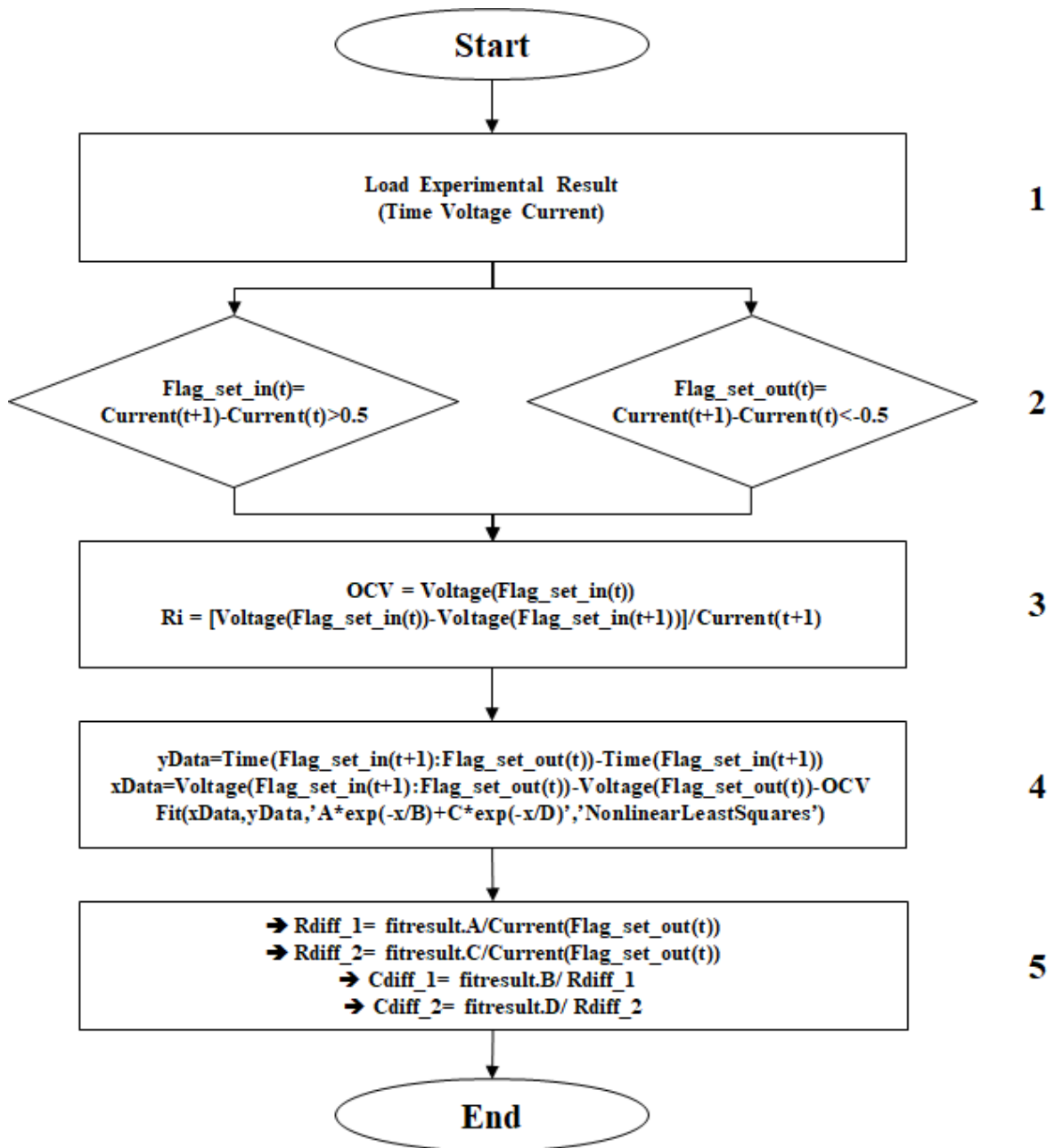


Figure 2.5 Battery ECM Parameter Derivation Function

그림 2.6은 그림 2.5의 1,2 과정에 관한 결과이다. 그림 2.5의 (a) 는 그림 2.5의 배터리 펄스 방전 시험의 전압 전류 결과이며 (b) 는 부하전류의 인가, 소거 시점에 대한 구분 결과이다. 위 과정에서 부하전류가 인가되기 전 전압인 $Flag_set_in(t)$ 의 전압이 OCV파라미터이며 직렬저항 R_i 파라미터는 부하전류가 인가된 ΔV 값을 부하전류로 나눈 값이다.

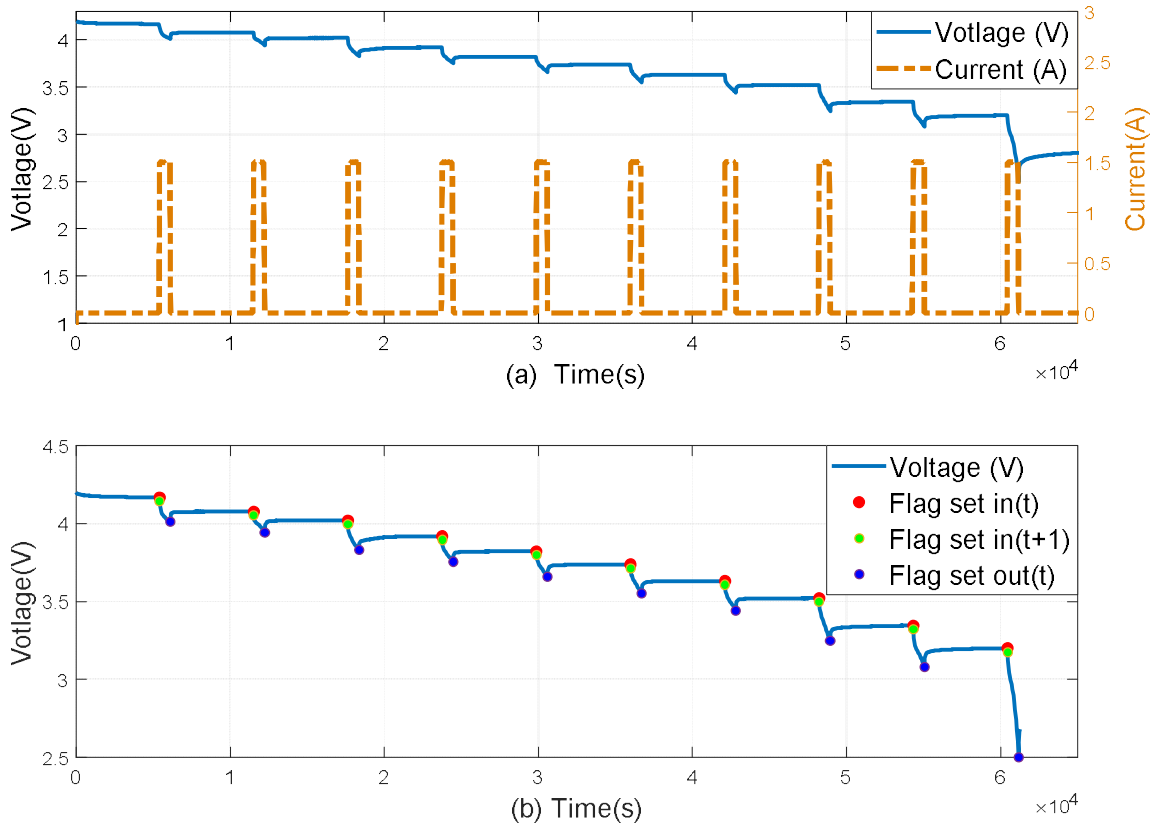


Figure 2.6 Battery ECM Parameter Derivation Function Process_1,2

앞선 RC래더 한 개의 배터리 터미널 식 2.1에서 직렬저항 R_i 파라미터와 개방 전압 OCV 파라미터 도출하였으며 R_{diff} , C_{diff} 파라미터 도출을 위해 식 2.8과 같은 형태가 남아있으며 이는 터미널전압에서 부하전류인가에 따른 OCV 파라미터 감소와 직렬저항에 따른 IR-drop 값을 뺀 나머지를 지수함수 형태로 피팅을 통해 도출하게 된다.

$$\begin{aligned}
 (1RC) \quad V_t - V_{ocv} - I_{load} \times R_i &= -I_{load} \times R_{diff} e^{-\frac{t}{\tau}} \\
 (2RC) \quad V_t - V_{ocv} - I_{load} \times R_i &= -I_{load} \times R_{diff_1} e^{-\frac{t}{\tau_1}} - I_{load} \times R_{diff_2} e^{-\frac{t}{\tau_2}}
 \end{aligned} \tag{2.8}$$

OCV는 그림 2.7과 같이 일정 부하전류가 인가됨에 따라 선형적으로 감소하게 되며 Rdiff, Cdiff 파라미터를 구하기 위한 식 2.8의 지수함수의 피팅을 위해 터미널 전압에서 개방전압과 IR-drop을 뺀 나머지 값을 Curve fitting toolbox를 이용하여 방전 구간의 지수함수 피팅을 진행한다.

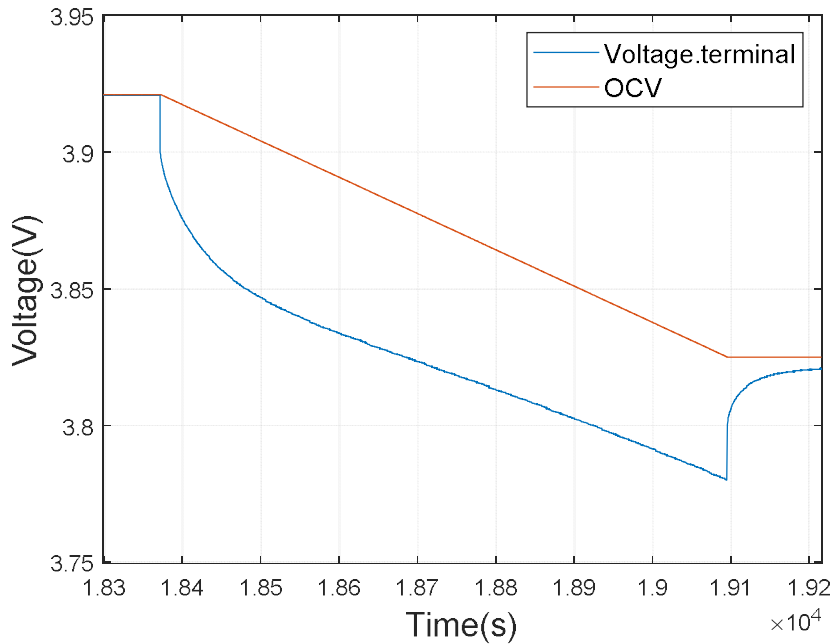


Figure 2.7 Battery ECM Parameter Derivation Function Process_4

식 2.8에서의 1-RC의 $[A \cdot e^{-t/B}]$ 또는 2-RC의 $[A \cdot e^{-t/B} + C \cdot e^{-t/D}]$ 형태의 지수함수 피팅을 위해 그림 2.8의 좌측 터미널 전압에서 OCV와 IR-Drop을 뺀 결과 파형을 오른쪽과 같이 반전했으며 각 방전 구간에 대한 피팅 결과는 그림 2.9와 같다.

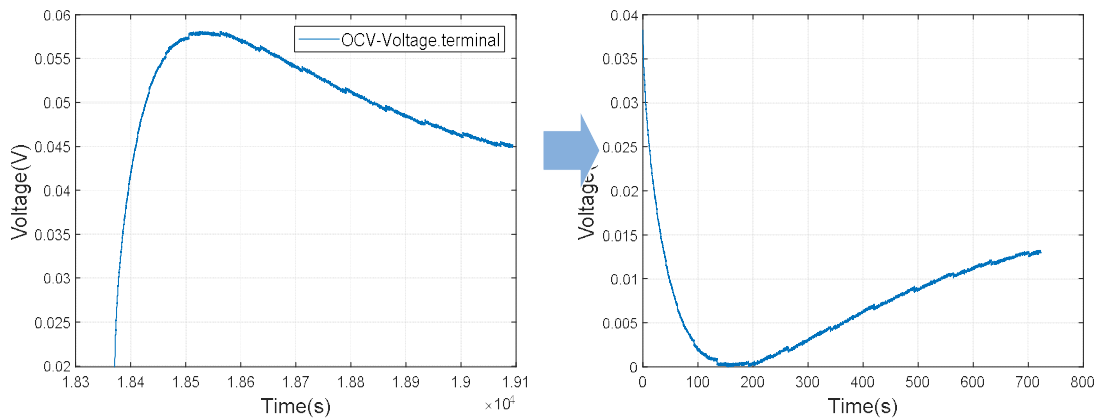


Figure 2.8 Exponential function fitting pre-processing

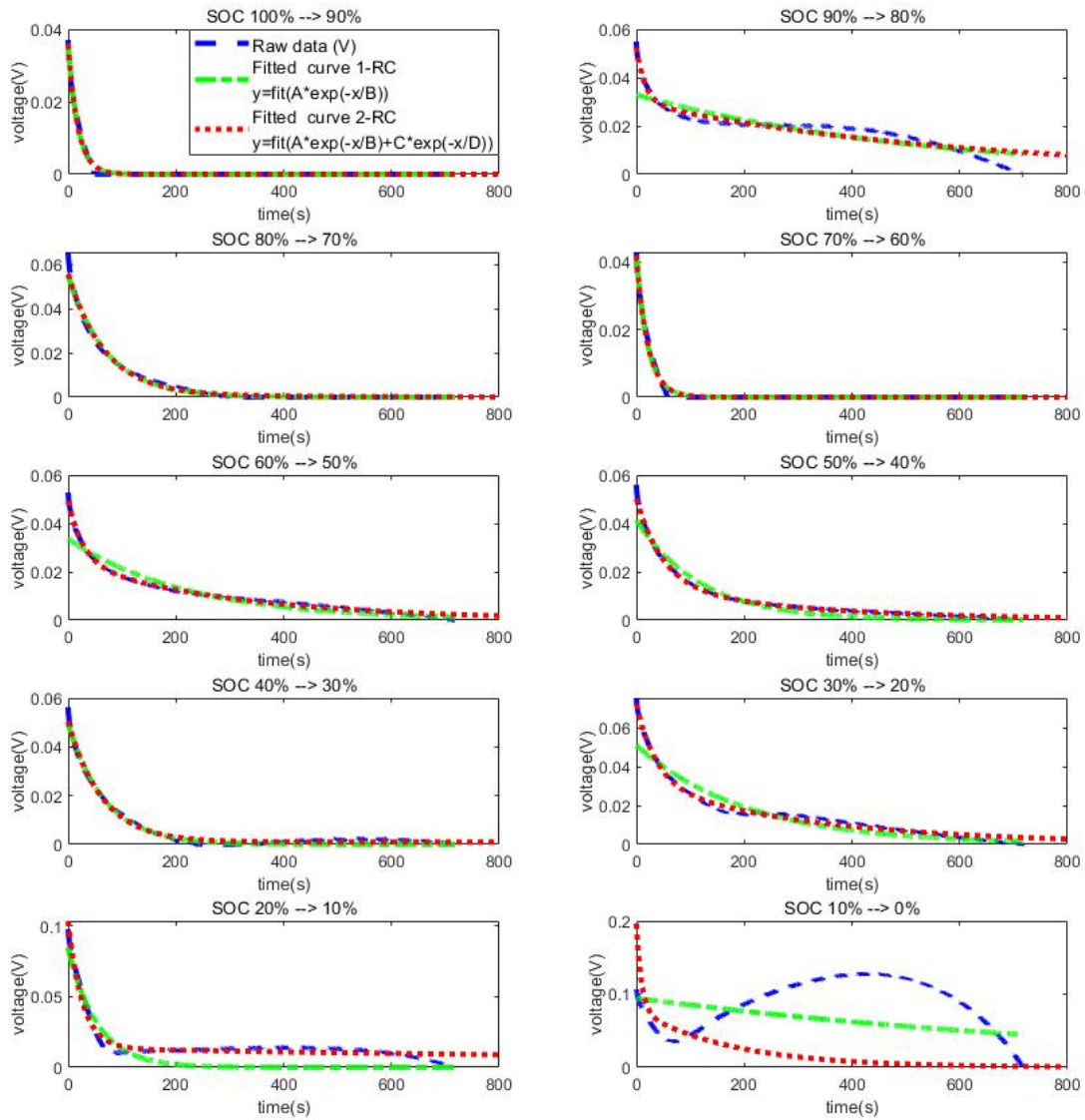


Figure 2.9 Battery ECM Parameter Derivation Function Process

각 방전 구간별 지수함수 형태의 피팅 결과 비선형성 특성이 심하게 나타나는 Low SOC를 제외한 대부분 영역에서 RMSE 0.01 이하의 정확도를 확인하였으며 위 피팅 결과로부터 식 2.9, 2.10을 통해 R_{diff} 및 C_{diff} 파라미터를 도출할 수 있다.

$$R_{diff_1} = fitresult.A / I_{load}, \quad C_{diff_1} = fitresult.B / R_{diff_1} \quad (2.9)$$

$$R_{diff_2} = fitresult.C / I_{load}, \quad C_{diff_2} = fitresult.D / R_{diff_2} \quad (2.10)$$

도출된 파라미터 검증을 위해 1-RC, 2-RC 구성의 시뮬레이션 모델을 통해 실험 데이터와 도출된 파라미터를 적용한 시뮬레이션 결과를 비교하였으며 상온(23°C)의 파라미터 검증 시뮬레이션 결과는 그림 2.10과 같다. 파라미터 도출 성능은 비선형성이 심한 Low SOC 부분을 제외한 대부분 영역에서 $\pm 30\text{mV}$ 수준의 오차 성능을 확인하였다. 본 파라미터 도출 방법을 이용하여 온도(0°C, 10°C, 23°C, 35°C, 45°C) 조건별 리튬전지 파라미터 도출을 위한 방전 실험 결과 분석을 통해 배터리 등가 모델 구성 파라미터를 도출하였으며 결과는 표 2.2~2.6 그림 2.11, 2.12와 같다.

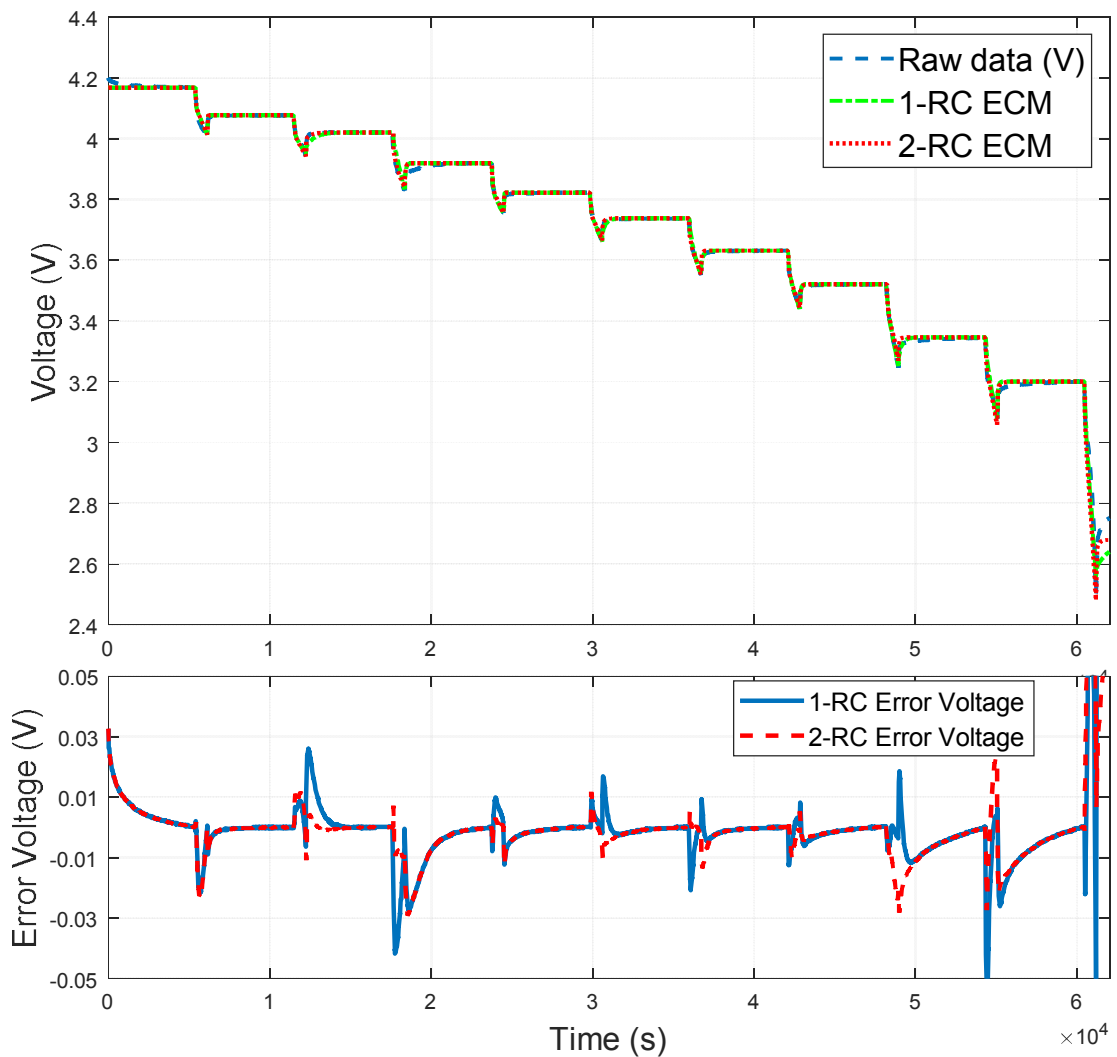


Figure 2.11 Parameter validation simulation results

Table 2.2 Battery 0°C Parameter analysis result

SOC (%)	OCV (V)	Ri (Ω)	Rdiff_1 (Ω)	Rdiff_2 (Ω)	Cdiff_1 (F)	Cdiff_2 (F)
0	3.029	0.058	0.091	0.166	28.31	435.38
10	3.248	0.058	0.089	0.010	427.85	3871.44
20	3.406	0.043	0.046	0.035	653.56	4565.12
30	3.544	0.044	0.052	0.009	1022.97	4186.46
40	3.660	0.040	0.054	0.022	1044.36	3594.66
50	3.745	0.042	0.045	0.020	918.05	4085.82
60	3.825	0.041	0.037	0.020	532.42	4929.23
70	3.900	0.041	0.055	0.000	705.49	4303.06
80	4.009	0.037	0.036	0.029	407.35	4558.50
90	4.071	0.038	0.048	0.000	747.42	5020.36
100	4.145	0.039	0.048	0.000	747.42	5020.36

Table 2.2 Battery 10°C Parameter analysis result

SOC (%)	OCV (V)	Ri (Ω)	Rdiff_1 (Ω)	Rdiff_2 (Ω)	Cdiff_1 (F)	Cdiff_2 (F)
0	2.781	0.030	0.126	0.101	73.37	1496.03
10	3.222	0.030	0.075	0.006	421.04	15998.7
20	3.358	0.025	0.037	0.026	575.38	5007.97
30	3.529	0.024	0.045	0.001	1420.96	533635
40	3.646	0.024	0.046	0.006	1732.19	4876.20
50	3.739	0.023	0.028	0.023	770.95	5679.84
60	3.822	0.023	0.036	0.002	819.24	7132.07
70	3.913	0.024	0.046	0.002	1136.89	5437.02
80	4.015	0.023	0.029	0.024	522.48	8628.06
90	4.073	0.024	0.036	0.000	860.47	7323.76
100	4.151	0.024	0.036	0.000	860.47	7323.76

Table 2.3 Battery 23°C Parameter analysis result

SOC (%)	OCV (V)	Ri (Ω)	Rdiff_1 (Ω)	Rdiff_2 (Ω)	Cdiff_1 (F)	Cdiff_2 (F)
0	2.814	0.019	0.080	0.052	130.82	2473.2
10	3.200	0.019	0.066	0.009	405.94	29958.1
20	3.345	0.018	0.030	0.021	735.31	6524.8
30	3.521	0.017	0.034	0.001	1681.09	668352
40	3.631	0.017	0.025	0.009	1312.17	8036.8
50	3.737	0.017	0.019	0.016	791.86	8791.7
60	3.822	0.017	0.028	0.000	750.55	10491.3
70	3.919	0.017	0.036	0.001	1537.34	6843.1
80	4.020	0.017	0.021	0.020	443.30	16571.8
90	4.076	0.017	0.024	0.000	729.38	12154.7
100	4.168	0.018	0.024	0.000	729.38	12154.7

Table 2.4 Battery 35°C Parameter analysis result

SOC (%)	OCV (V)	Ri (Ω)	Rdiff_1 (Ω)	Rdiff_2 (Ω)	Cdiff_1 (F)	Cdiff_2 (F)
0	2.782	0.016	0.068	0.050	286.96	5715.52
10	3.188	0.016	0.061	0.008	426.41	2046790
20	3.342	0.015	0.027	0.018	877.50	7404.11
30	3.517	0.014	0.027	0.001	2194.67	1135498
40	3.623	0.014	0.019	0.001	1982.46	44467.2
50	3.738	0.014	0.015	0.012	847.37	13248.6
60	3.823	0.014	0.021	0.000	842.26	14336.4
70	3.920	0.014	0.027	0.001	2189.87	8644.50
80	4.022	0.014	0.017	0.016	350.68	32661.8
90	4.077	0.014	0.017	0.000	677.09	17294.2
100	4.174	0.015	0.017	0.000	677.09	17294.2

Table 2.5 Battery 45°C Parameter analysis result

SOC (%)	OCV (V)	Ri (Ω)	Rdiff_1 (Ω)	Rdiff_2 (Ω)	Cdiff_1 (F)	Cdiff_2 (F)
0	2.772	0.015	0.060	0.047	318.48	6453.35
10	3.184	0.015	0.058	0.010	403.24	193258
20	3.340	0.014	0.028	0.013	1055.10	7125.69
30	3.515	0.013	0.025	0.002	2421.81	2100803
40	3.619	0.014	0.016	0.000	1959.56	1168114
50	3.740	0.014	0.013	0.011	810.47	16638.0
60	3.825	0.013	0.016	0.000	859.90	17866.7
70	3.921	0.014	0.020	0.002	3290.44	10054.6
80	4.024	0.013	0.014	0.012	289.97	55175.3
90	4.078	0.014	0.014	0.000	618.29	21511.8
100	4.176	0.014	0.014	0.000	618.29	21511.8

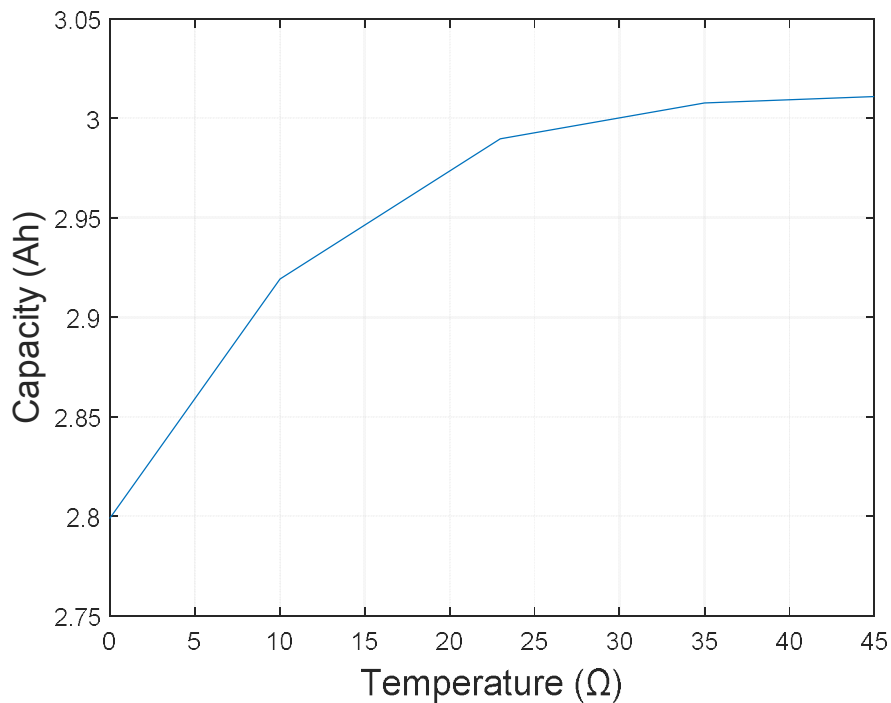


Figure 2.11 Effect of capacity change with temperature

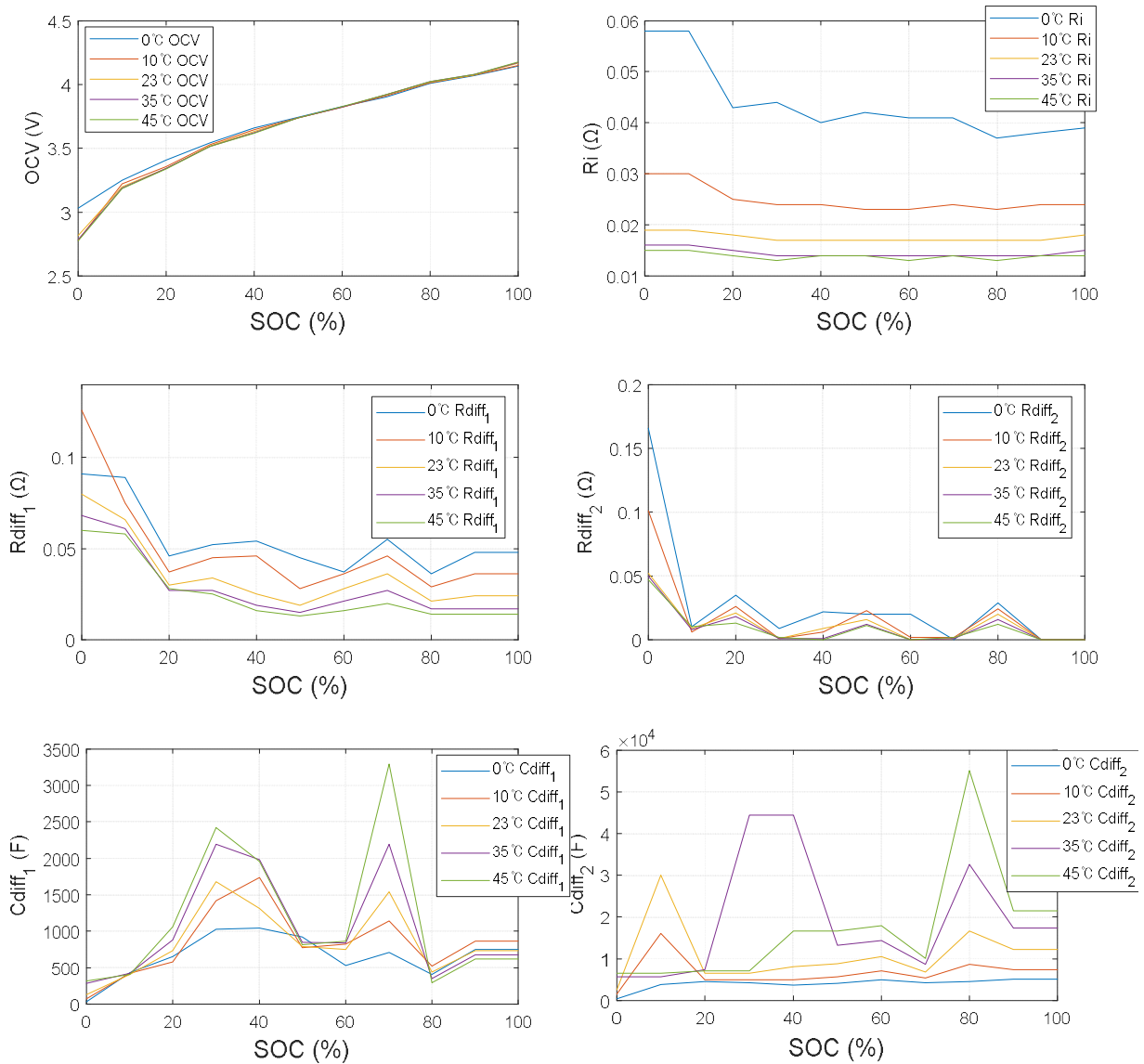


Figure 2.12 ECM parameter derivation result according to SOC-Temperatures

본 과정으로 도출된 등가 모델의 OCV, Ri, Rdiff1, Rdiff2, Cdiff1, Cdiff2 파라미터는 리튬전지 시스템모델의 2D-lookup Table(SOC, Temperature-Parameter)블록으로 반영하고 용량은 1D-lookup Table(Temperature-Capacity)로 반영함으로써 온도, SOC 정보가 반영된 리튬전지 등가 모델 설계가 가능하다.

2.2.3 릴레이, 퓨즈 모델링

리튬배터리의 병렬연결 On/Off 동작을 위한 릴레이 모델은 Simulink/Simscape Library의 Switch 모델 블록을 사용하였다. 스위치에 특정 값 입력될 경우 스위치가 On/Off 되는 조건으로 동작하며 본 모델에 적용된 릴레이의 Contact 저항 파라미터 값은 30mΩ 데이터 시트(<100mΩ) 및 실험(약 30mΩ) 결과로부터 도출되었다[20]. 릴레이의 입력값은 Hot Swap 알고리즘이 탑재된 S-Function의 출력값으로 Hot Swap 동작 조건 결과에 따라 On/Off 동작하며 과전류 발생 시 Off 동작을 하게 된다. 모델에 반영된 형태는 그림 2.13과 같다.

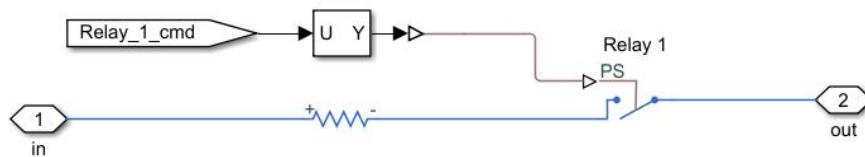


Figure 2.13 Lithium battery system Relay modeling

단락 및 사고 등 배터리 시스템에 입/출력 과전류의 차단을 위한 퓨즈를 장착하며 Fuse 모델은 Simulink/ Simscape의 Fuse 블록 모델을 이용하며 Opening time is tabulated 조건으로 모델에 반영한다. 이는 Fuse 제조사에서 제공하는 그림 2.14과 같이 퓨즈의 Time-Current Curve의 특정 지점을 테이블로 반영하여 해당 전류 인가 시간에 따른 용단 동작 기능을 반영할 수 있다.

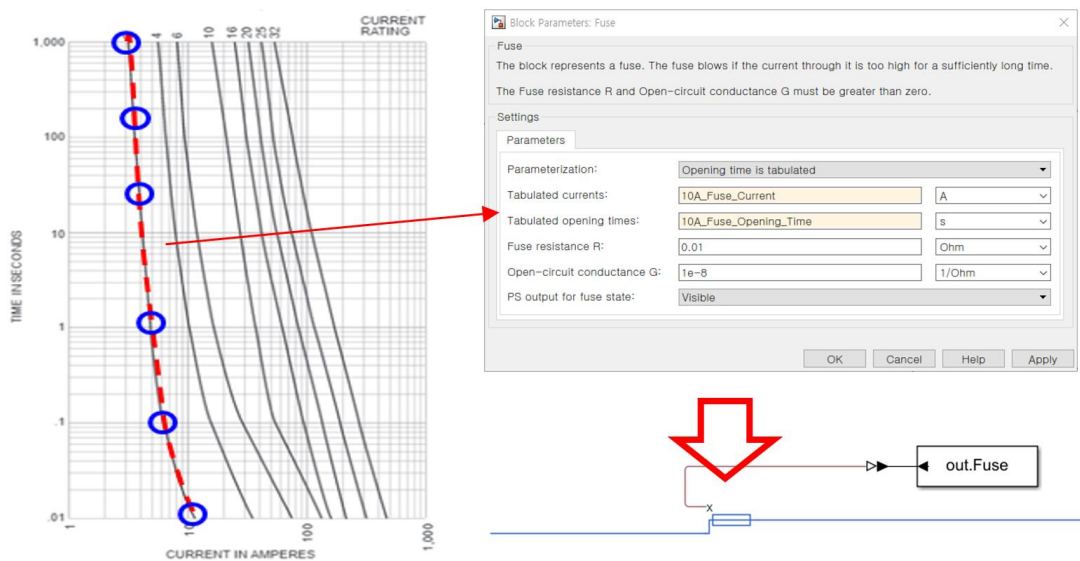


Figure 2.14 Lithium battery system Fuse modeling

2.2.4 케이블 및 기타 구성장치 모델링

리튬전지시스템의 케이블 및 구성 장치의 R/L 파라미터는 케이블 길이(l) 및 두께(t)의 계산으로 도출될 수 있으며 굴곡 및 복잡한 형상을 가지는 구성 장치의 경우 유한요소해석 소프트웨어를 통해 해석기반으로 케이블 파라미터값을 도출할 수 있다. 기본적인 케이블 저항은 단면적에 따른 길이로 식 2.11로 나타낼 수 있으며 인덕턴스의 경우 식 2.12로 나타낼 수 있다[21].

$$R(\Omega) = \frac{\rho l}{A} \quad (2.11)$$

$$L(\mu H) = 2 \times 10^{-3} x l \left[\frac{\ln(2 \times l)}{w + t} + 0.5 + 0.2235(w + t)/l \right] \quad (2.12)$$

$$l = \text{length}(cm), \quad w = \text{width}(cm), \quad t = \text{thickness}(mm)$$

그림 2.15와 같이 복잡한 형상에 대한 파라미터가 요구되는 경우 유한요소해석 소프트웨어를 이용하여 형상 기반의 파라미터를 도출하여 모델에 반영할 수 있다.

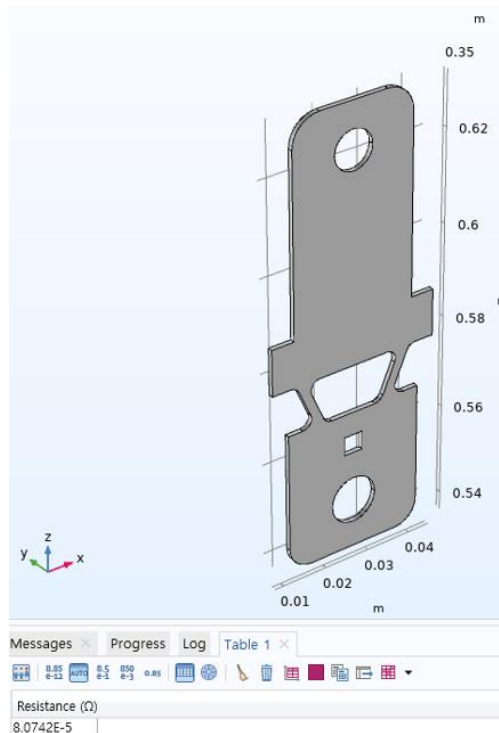


Figure 2.15 Parameter derivation using finite element analysis software
(Comsol_multiphysics_Electric Current Tool Box)

위 설명한 소프트웨어 모델링 방법으로 1S4P 시스템을 그림 2.16과 같은 형태로 모델링 하였다. 좌측부터 Load는 부하전류 또는 충전전류를 묘사하기 위해 DC 전류 원으로 모델링 하였으며 리튬배터리 셀 병렬연결 동작을 위한 On/Off 스위칭 릴레이 모델과 INR18650-30Q 특성이 반영된 셀 등가회로 모델로 구성하였다. 또한 기구 형상에 따른 케이블 및 접촉 저항 등 해당 특성을 모델에 하나의 등가 저항으로 반영하였으며 각 저항값은 실험을 통해 도출된다.

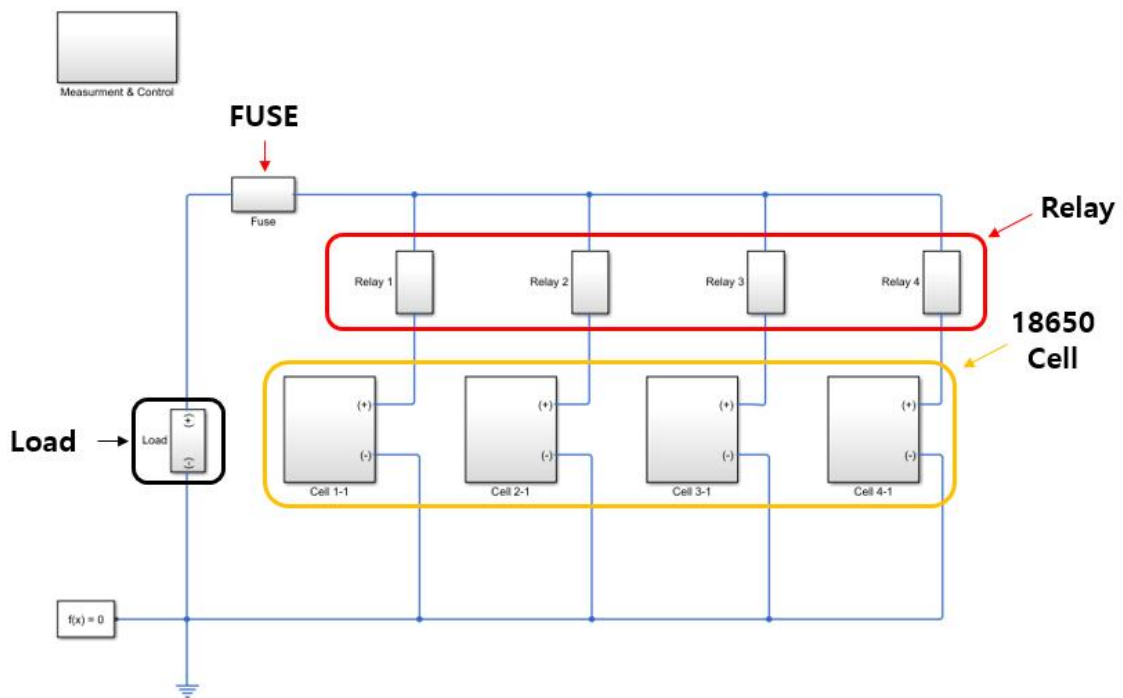


Figure 2.16 1S4P Battery Pack Software Modeling

2.3 리튬전지 하드웨어 모델링

다병렬 리튬전지 시스템의 Hot Swap 동작 검증 및 소프트웨어 모델검증을 위해 축소된 1S4P 타입의 1S4P 구성의 리튬전지 팩 설계를 진행하였다. 설계 중점 사항으로 리튬배터리 셀의 병렬연결 동작의 On/Off 제어를 할 수 있도록 각 직렬단위 셀마다 릴레이를 부착하고 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환전류 계측을 위해 전류 센서를 릴레이와 함께 구성하였다. 1S4P 리튬전지 팩의 구성은 그림 2.17과 같다.

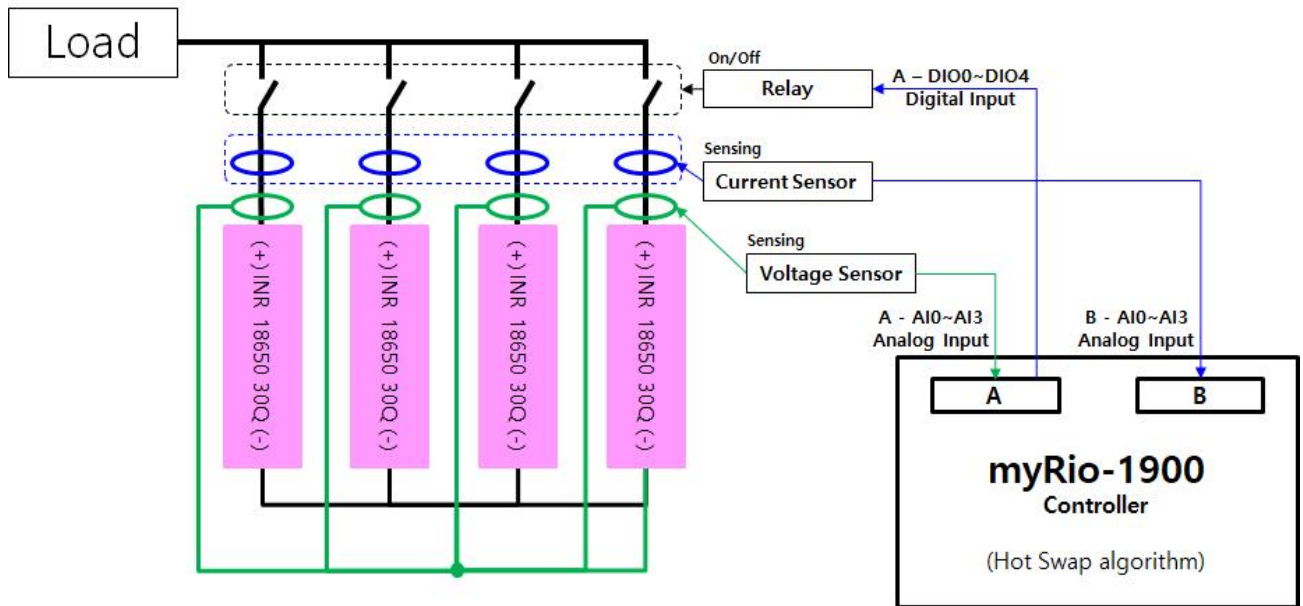


Figure 2.17 1S4P Battery Pack configuration diagram

1S4P 배터리팩 시스템에 적용되는 구성 장치는 표 2.7과 같다. 배터리는 실린더 타입의 INR18650-30Q 모델을 적용하였으며 Hot Swap 동작을 위한 릴레이는 5V 신호로 동작할 수 있고 최대 전류 사양이 10A인 4채널 릴레이 모듈을 사용하였다. 릴레이의 On/Off는 myRio-1900 컨트롤러를 이용해 디지털 신호로 제어하며 전류 계측을 위한 전류 센서 모듈은 최대 5A 수준의 DC 전류계측이 가능한 홀 타입의 ACS 712를 사용하여 계측하였다[22,23]. 전압계측의 경우 컨트롤러의 아날로그 입력 범위(<5V)에 만족하여 별도의 장치 없이 배터리의 양극/음극에 연결하여 전압값을 계측하였다. 릴레이의 On/Off 제어 및 전압/전류 계측의 로깅을 위해 Labview 소프트웨어를 이용하여 리튬배터리 팩 제어·계측 시스템을 구성하였다.

Table 2.7 1S4P Battery Hardware Composition

	Item	SW Model Parameter
Battery (Type 18650)	Samsung SDI INR-18650 30Q (3,000mAh)	f(SOC,Temp)
Relay	5V Relay Module (SZH-RLBG-012 : <10A)	30mΩ
Current Sensor	Current sensor (ACS712 : <5A)	
Controller	NI Myrio-1900	-
Cable	1.5mm ² (Cooper)	5mΩ
Nickel Plate	5mm/0.15T	
Structure	3D Printing (PLA)	-

CATIA V5 소프트웨어를 활용한 1S4P 리튬전지 팩의 3D 기구 형상 모델은 그림 2.19와 같다[24,25]. 배터리 셀의 음극은 니켈플레이트(0.5mm/1.5T)를 spot 용접시켜 병렬연결을 진행하였으며 배터리 셀의 양극은 전류 센서와 릴레이를 거쳐 병렬 연결 되고 해당 구간은 1.5mm²의 케이블을 이용하였다. 릴레이와 홀 타입의 전류 센서를 동일 위치에 둘 경우 릴레이 내 구성된 코일의 자기장의 영향으로 전류 센서의 계측에 방해됨에 따라 그림 2.18과 같은 형상으로 릴레이와 전류 센서의 이격 거리를 고려하여 기구배치를 진행하였다.

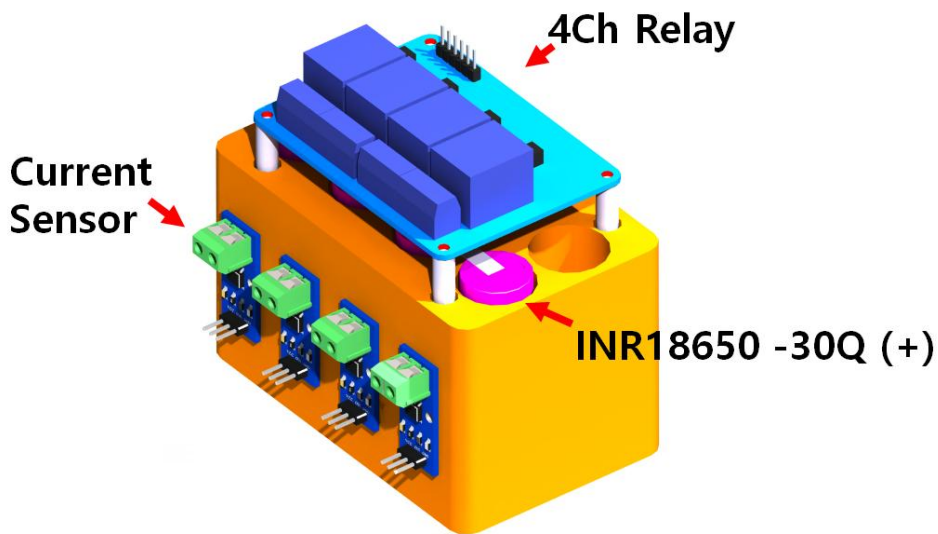


Figure 2.18 1S4P Battery Pack 3D Modeling

2.4 리튬전지 시스템 소프트웨어 모델 검증

설계된 리튬전지 소프트웨어 모델 검증을 위해 리튬전지 팩에 적용되는 릴레이, 전류 센서, 배터리 셀(INR18650-30Q) 2개로 1차 소프트웨어 모델 검증을 진행하였으며 구성은 그림 2.19와 같다. 셀 및 릴레이 연결 간 사용된 케이블과 니켈플레이트 등 기타 등가 저항 파라미터를 모델에 반영하기 위해 약 1mΩ 수준의 저항모델(그림 2.20 Contact Resistor)을 셀 모델에 추가하여 그림 2.20과 같은 시뮬레이션 모델을 구성했다.

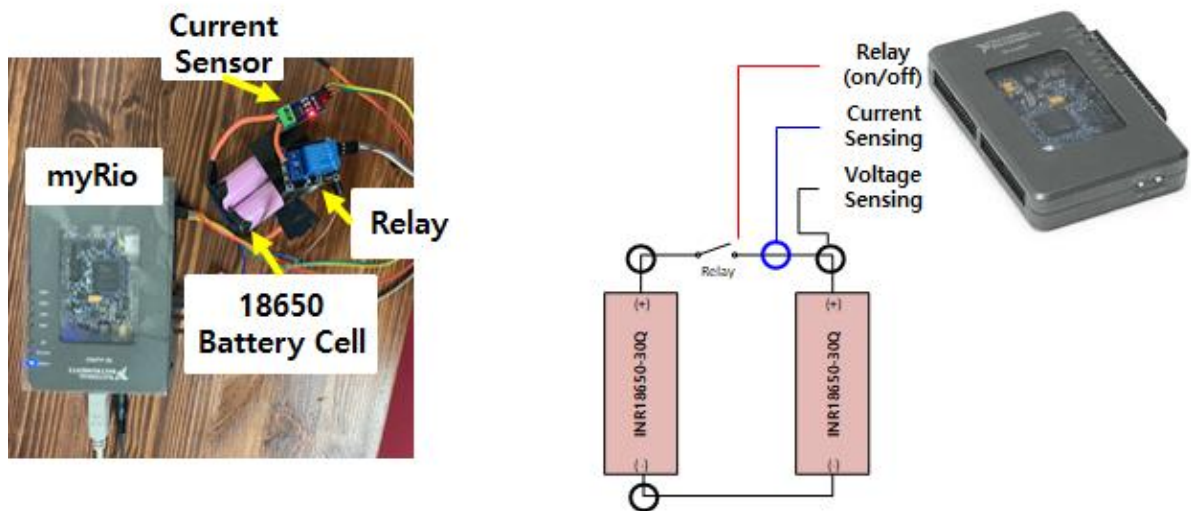


Figure 2.19 1S2P Battery experiment environment

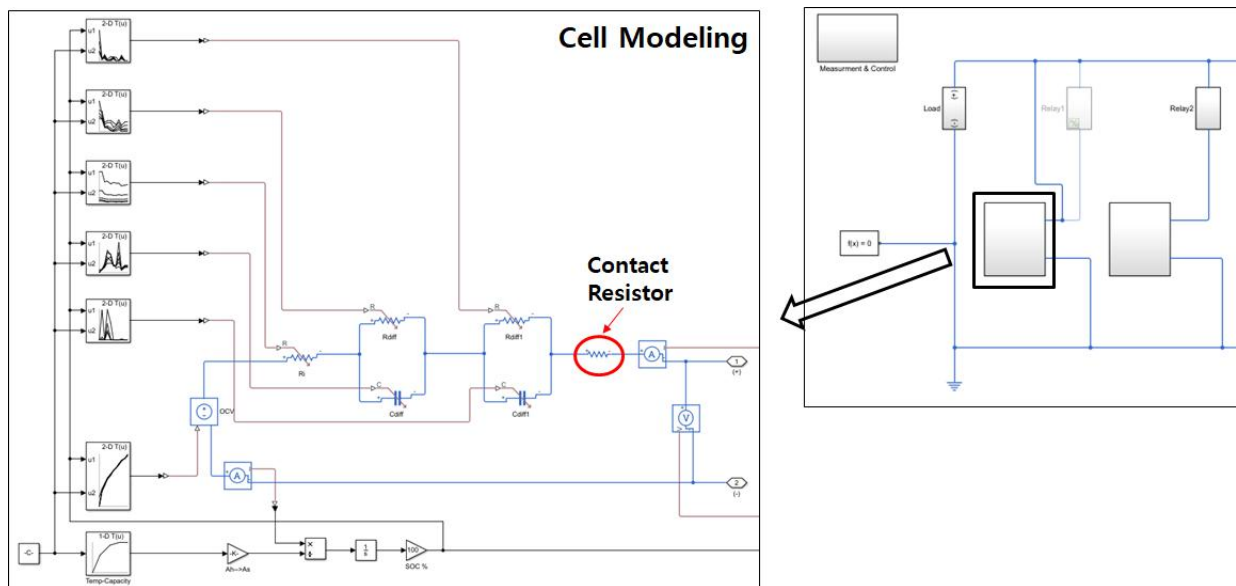


Figure 2.20 1S2P Battery Pack software modeling

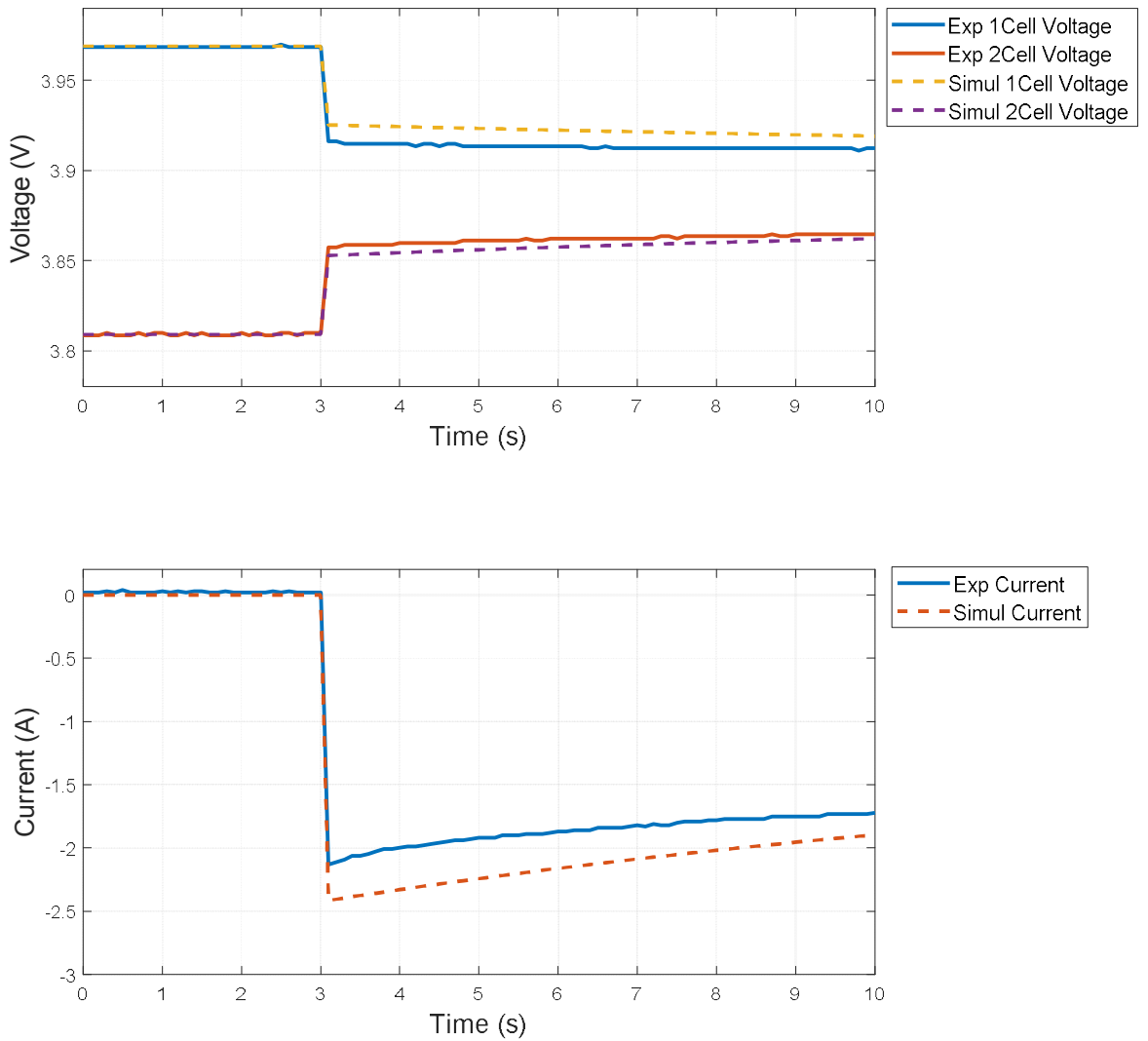


Figure 2.21 1S2P Battery Hot Swap experiment and simulation comparison result(1mΩ)

실험 검증을 위해 충전상태가 다른 두 개의 배터리 셀(1번 셀 3.969V, 2번 셀 3.809V)이 릴레이 On 동작을 진행함으로써 두 배터리 간 흐르는 순환 전류와 셀 전압을 계측하였으며 결과는 그림 2.21과 같다. 실험 결과와 시뮬레이션 결과 비교 시 셀의 접촉 저항(케이블, 접촉저항 등)의 크기는 5mΩ, 릴레이의 저항을 30mΩ으로 설정할 경우 순환 전류의 크기와 전압 편차가 그림 2.22과 일치함을 확인할 수 있다. 위 결과로부터 셀 및 릴레이의 모델을 검증하였고 1차 소프트웨어 모델 검증을 진행하였다.

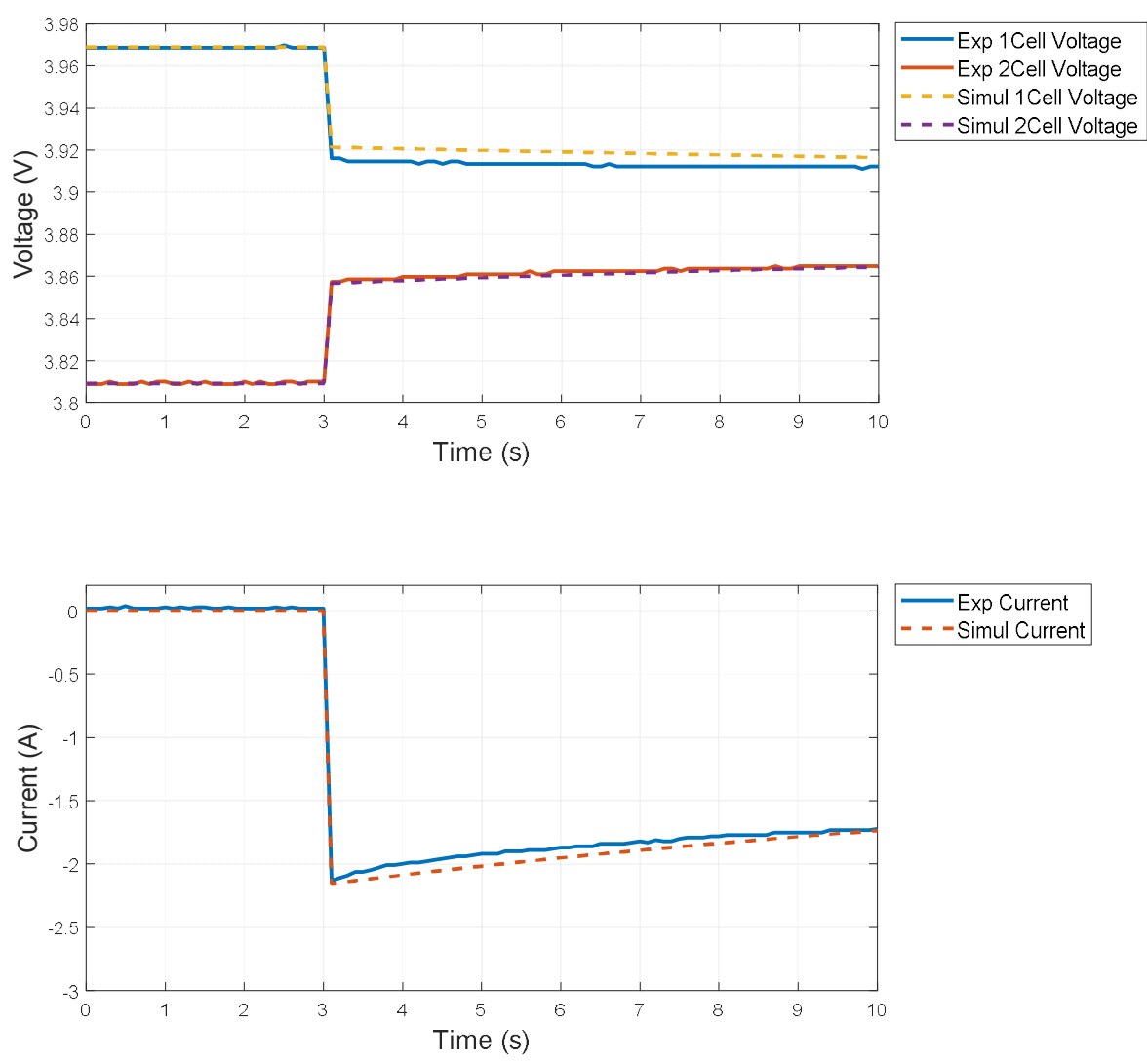


Figure 2.22 1S2P Battery Hot Swap experiment and simulation comparison result(5mΩ)

1S2P 구성에 이어 1S4P 구성의 리튬전지 시뮬레이션 모델 및 실험검증을 진행하였다. 실험 구성은 2.3절의 그림 2.18과 같으며 실험환경은 그림 2.23과 같다. 데이터 계측 및 릴레이 제어를 위해 myRio-1900 컨트롤러와 Labview 소프트웨어를 이용하여 그림 2.24와 같이 계측 제어 환경을 구축하였다.

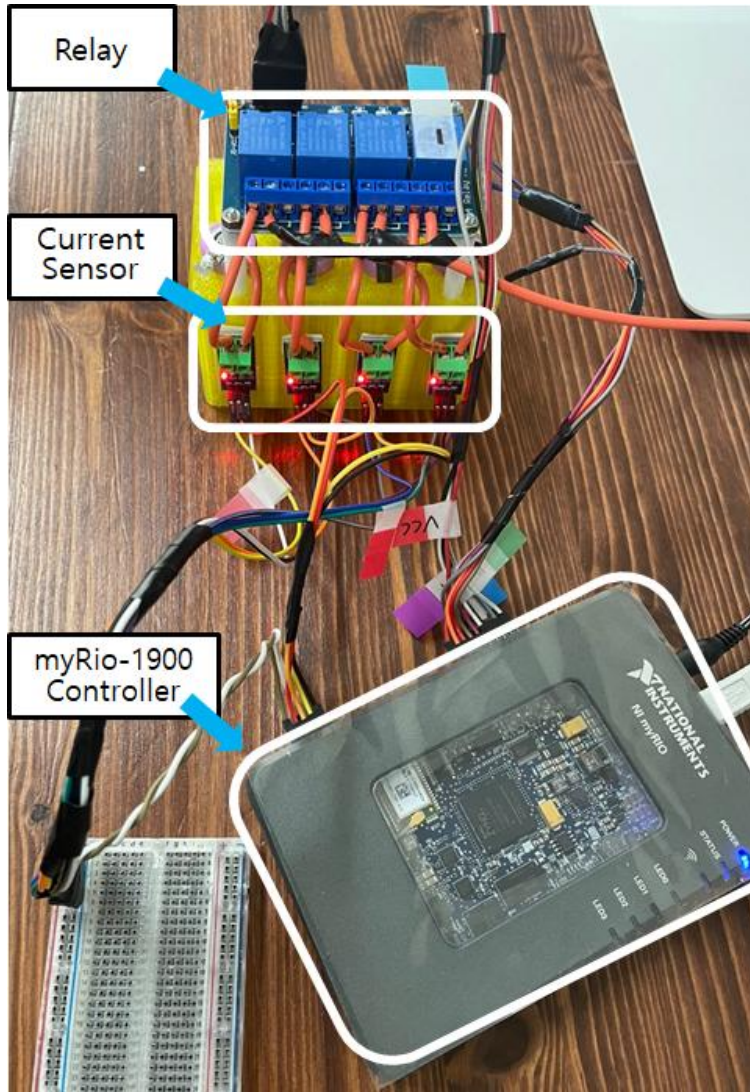


Figure 2.23 1S4P Battery experiment set

1S4P 리튬전지 팩에 대한 시뮬레이션 모델 검증을 위해 4개 셀에 대해 1VS1 병렬연결 실험을 진행하였으며 실험 결과로부터 시뮬레이션 모델을 검증하였다. 그림 2.25는 1번 셀(3.932V), 2번 셀(3.822V)의 Hot Swap 동작 시 발생하는 전압, 전류에 대한 실험과 시뮬레이션 비교 결과이다. 두 셀 간의 전압 편차가 약 0.11V일 때 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류는 약 1A 수준이며, 동일 조건의 시뮬레이션 결과 실험 결과와 유사한 순환 전류를 나타냄을 확인하였다.

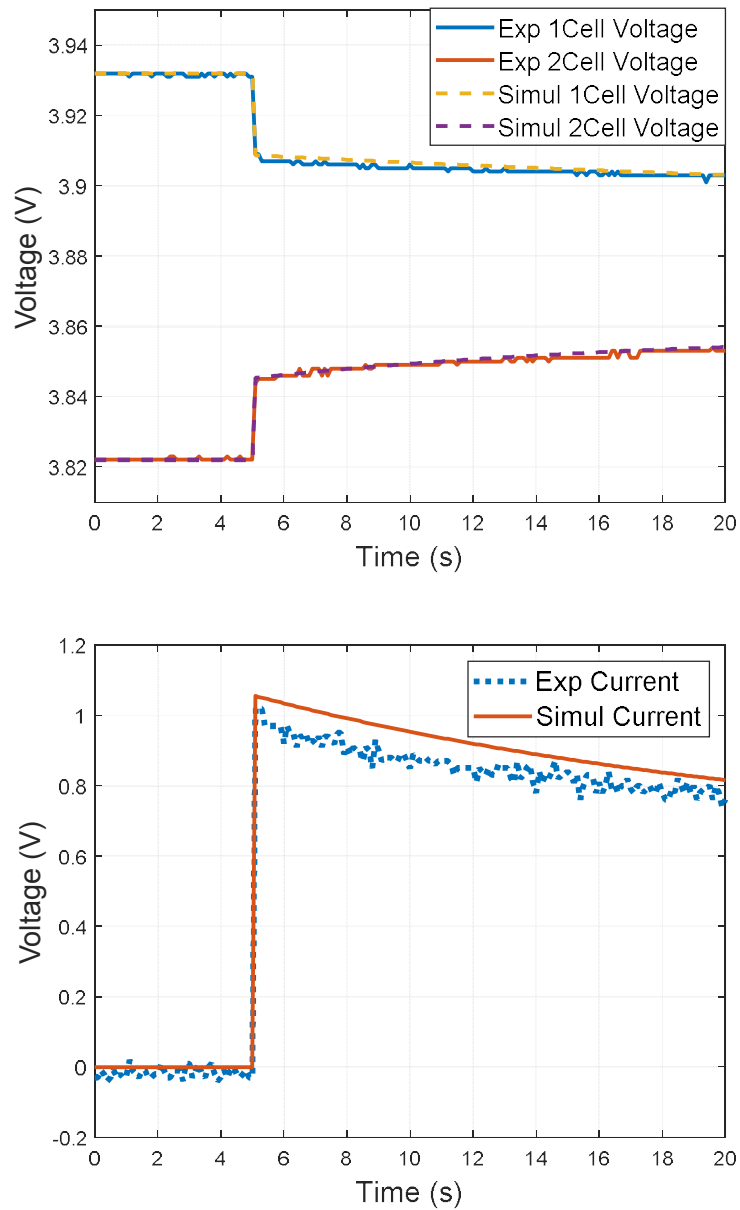


Figure 2.25 3.932V vs 3.822V Hot Swap experiment and simulation comparison results

그림 2.26은 동일 시뮬레이션 모델에서 2번 셀(3.827V), 3번 셀(3.766V)의 Hot Swap 동작 시 발생하는 전압 전류에 대한 실험 및 시뮬레이션 비교 결과이다. 두 셀 간의 전압 편차가 약 0.05V일 때 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류는 약 0.6A 수준이며, 실험과 동일 조건에서의 시뮬레이션 결과 실험 결과와 유사한 전압, 순환 전류 결과를 확인하였다.

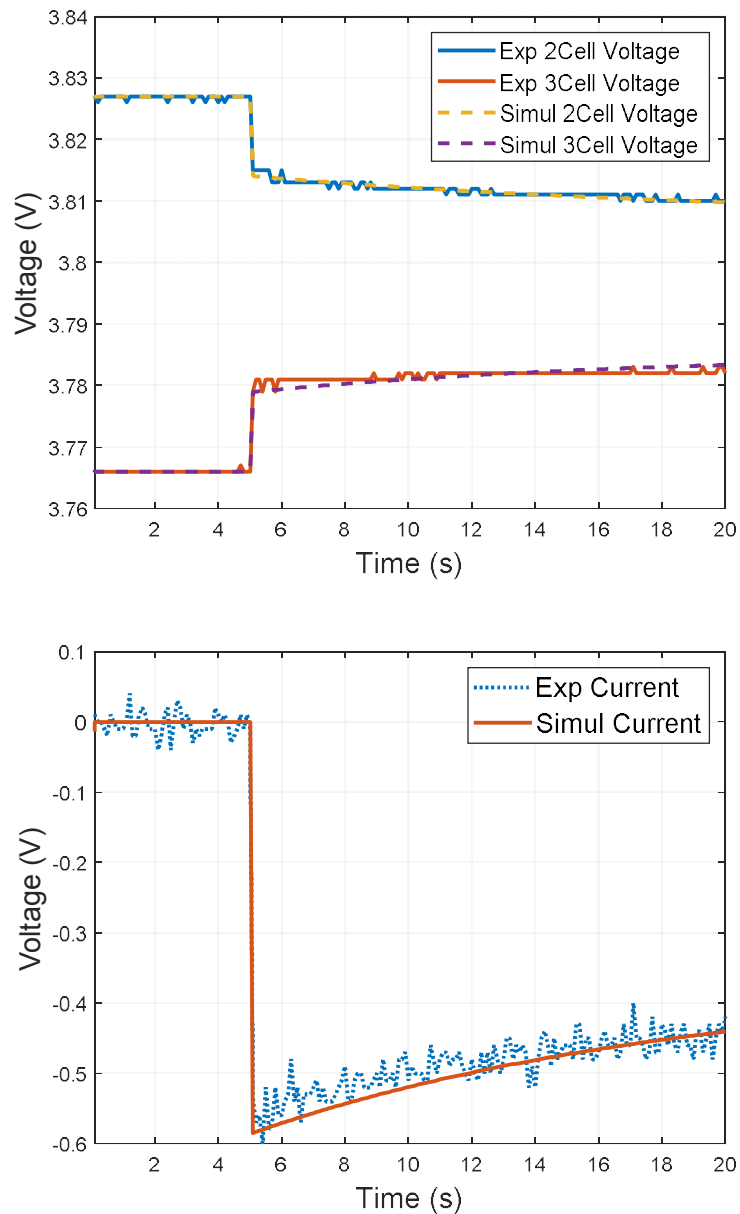


Figure 2.26 3.827V vs. 3.766V Hot Swap experiment and simulation comparison results

그림 2.27은 동일 시뮬레이션 모델에서 3번 셀(3.766V), 4번 셀(3.402V)의 Hot Swap 동작 시 발생하는 전압 전류에 대한 실험 및 시뮬레이션 비교 결과이다. 두 셀 간의 전압 편차가 약 0.3V일 때 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류는 약 3.5A 수준이며, 실험과 동일 조건에서의 시뮬레이션 결과 실험 결과와 유사한 전압, 순환 전류 결과를 확인하였다.

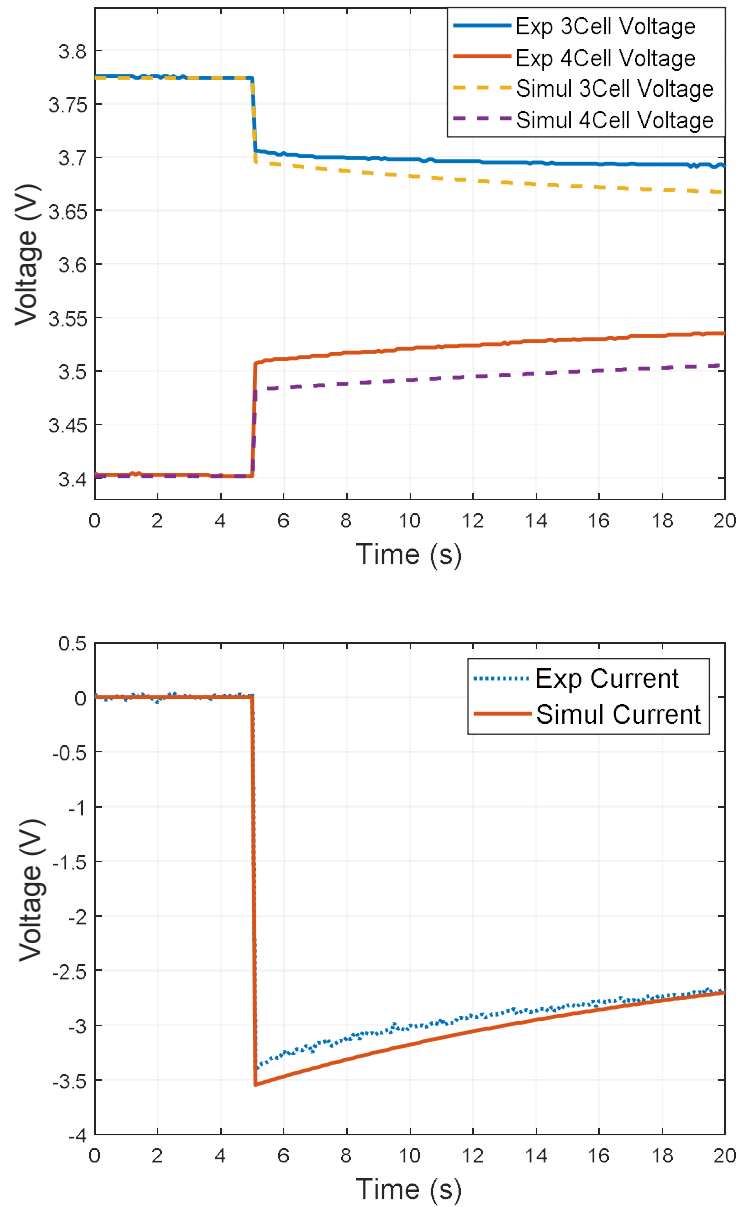


Figure 2.27 3.766V vs. 3.402V Hot Swap experiment and simulation comparison results

제 3 장 Hot Swap 알고리즘 설계

3.1 Hot Swap 분석 방법

Hot Swap 알고리즘 설계는 그림 3.1의 순서로 진행한다. 본 논문의 2장에서 1S4P 시스템의 리튬전지 팩 및 소프트웨어 모델 설계/검증을 진행했고 3장에서는 2장에서 설계한 소프트웨어 모델 기반으로 Hot Swap Case-Study를 통한 핵심 인자 및 Hot Swap 동작 조건을 도출하고 Case-Study의 결과를 Neural Network 알고리즘에 학습시킴으로써 Hot Swap 알고리즘 기반의 Hot Swap 순환 전류 예측을 수행하고자 한다.

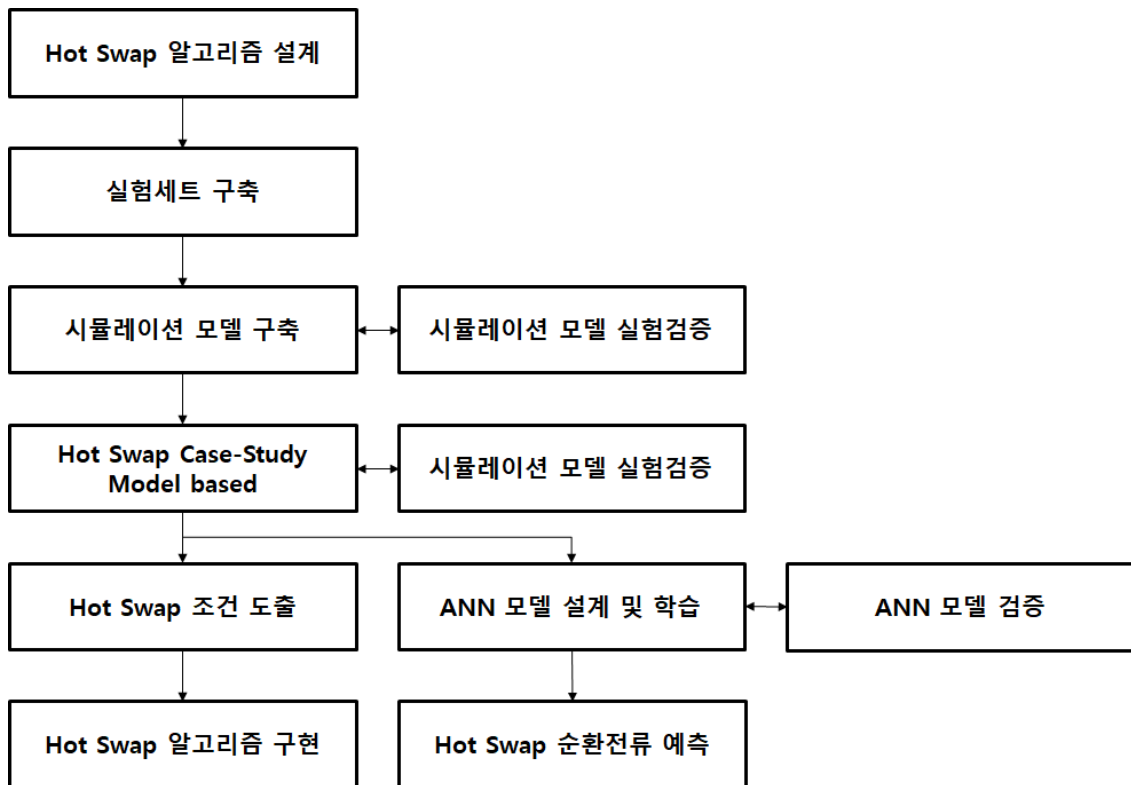


Figure 3.1 Flow chart of Hot swap algorithm analysis method

3.2 Hot Swap 핵심인자 분석

다병렬 리튬전지 시스템에서 배터리가 신규 투입되거나 유지보수 등으로 교체된 경우 기존 연결된 배터리와 투입될 배터리의 상태를 고려한 조건에서 Hot Swap 동작하여야 과도한 순환 전류를 발생시키지 않고 안전하게 동작할 수 있다. 이때 고려해야 할 조건이 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류를 결정짓는 핵심 인자이며 본 논문에서는 배터리 병렬구성, 전압 편차, 부하전류, 온도로 판단했다. 2장에서 설계한 1S4P 시뮬레이션 모델을 기반으로 Hot Swap 핵심인자의 영향성 분석을 진행하였다.

3.2.1 배터리 병렬 수에 따른 영향성

기존 연구 결과에 따르면 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류는 그림 1.3과 식 1.1~1.4로 나타내었다. 위 제시된 결과에 따라 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류의 크기는 리튬전지의 병렬 구성에 따른 영향성이 존재한다. 본 1S4P 배터리 팩의 Hot Swap 구성은 그림 3.2와 같이 1(on) vs1(off) ~ 3(on) vs1(off)의 총 4가지의 경우로 나타낼 수 있다. 배터리의 병렬 구성에 따른 Hot Swap 순환 전류의 영향성 분석을 위해 상온, 부하(0A), 동작지점 3.7V(충전상태:46%) 조건에서 +0.4V(4.1V) 또는 -0.4V(3.3V) 상태의 배터리가 Hot Swap 동작하였을 때 발생하는 순환 전류의 분석을 진행하였으며 결과는 표 3.1과 같다.

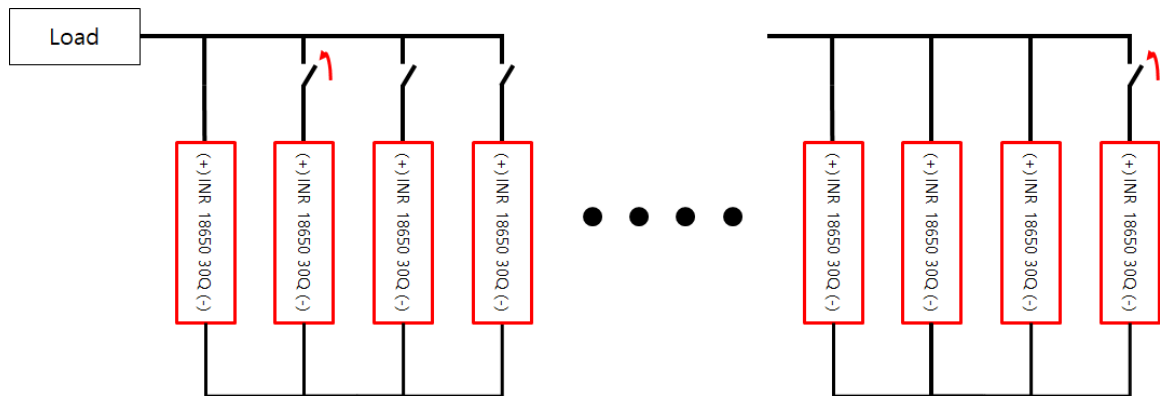


Figure 3.2 Number of battery Hot Swap cases

배터리 셀 구성에 따른 Hot Swap 시뮬레이션 결과 병렬연결 구성에 따라 동일

전압 편차에서 발생하는 순환 전류의 크기의 영향성이 존재함을 확인할 수 있다. 이는 기존에 동작 중인 n개의 배터리가 충전상태(전압 편차)가 다른 한 개의 신규투입된 배터리와 에너지 평형상태를 맞추기 위해 n개의 배터리와 한 개의 배터리 간 전류를 주고받음을 확인할 수 있다. 따라서 위 결과로부터 Hot Swap 동작 시 배터리 시스템 구성에 따라 병렬 연결된 구성이 많을수록 Hot Swap 대상 배터리에 큰 순환 전류가 발생함을 확인할 수 있다.

Table 3.1 Effect of battery parallel configuration on Hot Swap circulating current

배터리 구성	전압편차 +0.4V		전압편차 -0.4V		
	X 셀 전류(A)	Y 셀 전류(A)	X 셀 전류(A)	Y 셀 전류(A)	
1 vs 1	-3.836	3.836	3.732	-3.732	X vs Y X : 기존 셀 Y : 투입 셀 부하전류 0A 기존 셀 3.7V
2 vs 1	-2.555	5.11	2.52	-5.041	
3 vs 1	-1.915	5.746	1.886	-5.657	

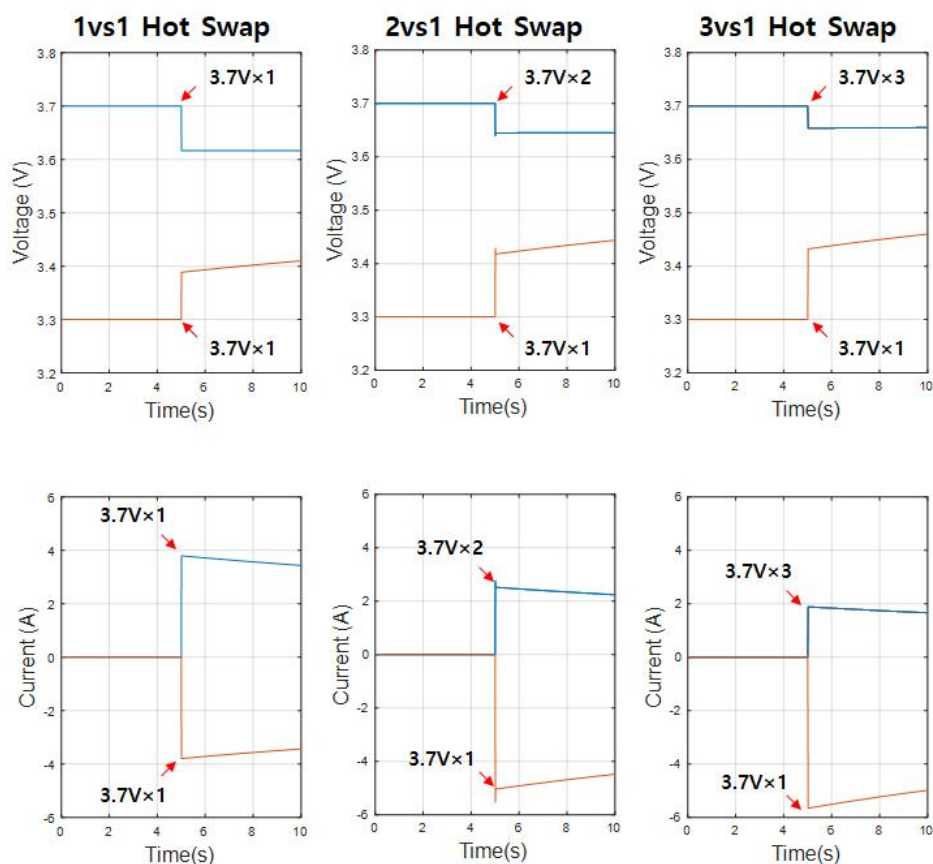


Figure 3.3 Influence of battery parallel configuration on Hot Swap circulating current (1vs1, 2vs1, 3vs1)

3.2.2 전압편차의 영향성

Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류는 배터리 간 충전상태 차이로부터 에너지 평형 상태를 유지하는 과정에서 발생한다. 그림 3.4는 3VS1의 배터리 구성, 상온 (23°C), 부하전류 0A, 3.7V의 전압을 가지는 조건에서 기존 연결된 배터리 대비 -0.45V~0.45V의 전압 편차를 가지는 한 개의 배터리를 Hot Swap 동작한 경우 발생하는 기존 배터리 및 신규 배터리에 흐르는 최대 순환 전류의 계측 결과이다. 위 분석 결과에 따라 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류는 전압 편차에 따라 선형적인 결과를 나타냄을 확인할 수 있다.

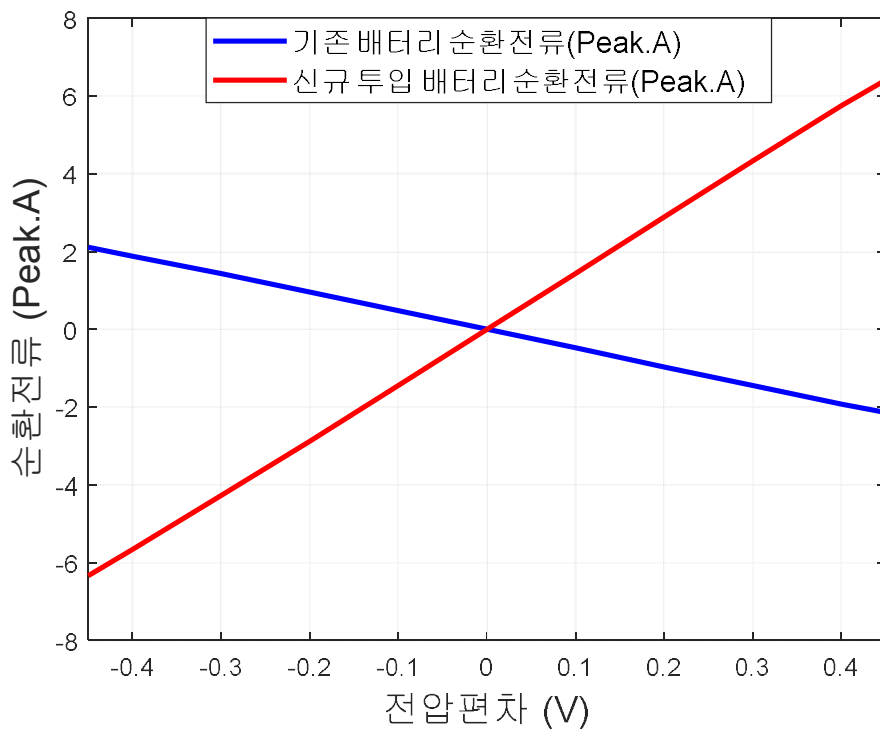


Figure 3.4 Influence of battery voltage deviation on hot-swap circulating current

3.2.3 부하전류에 따른 영향성

기존 연결된 병렬 배터리에 방전전류가 흐르는 상태에서 전압 편차 다른 한 개의 배터리가 동작하는 경우에 대한 분석을 진행하였다. 그림 3.5는 기존에 3 병렬 배터리에 3A/cell의 방전전류가 흐르는 경우 터미널 전압 대비 0.4V 높은 신규 배터리가 신규 투입하고 투입 3초 이후 부하전류가 충전전류로 흐를 때에 대한 시뮬레이션 분석 결과이다.

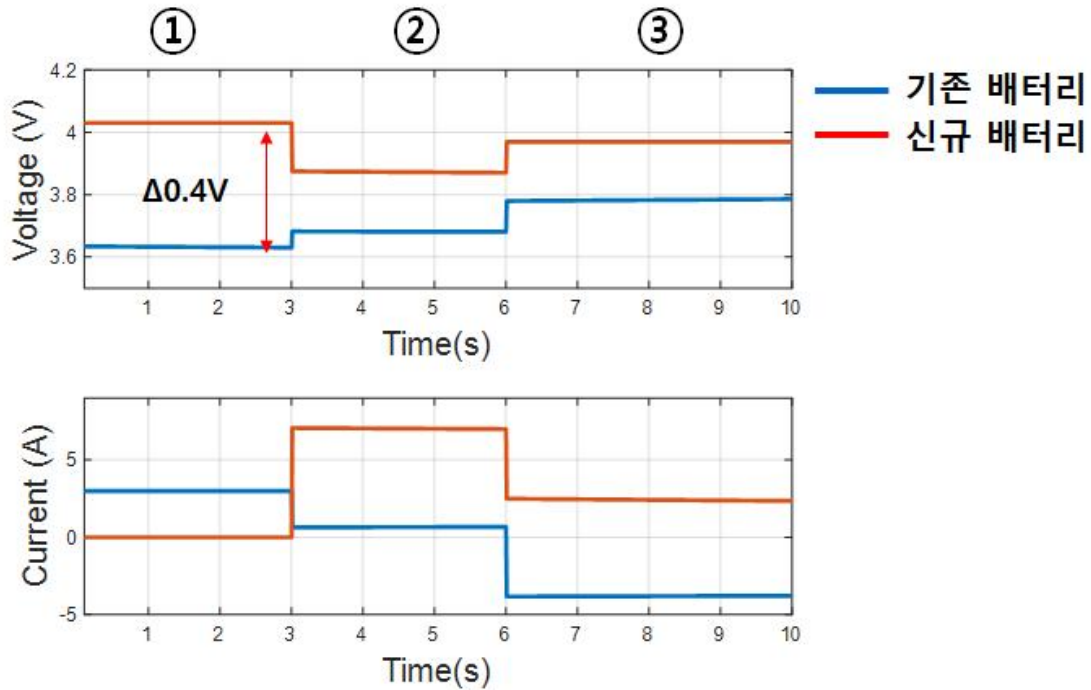


Figure 3.5 Influence of load current on hot-swap circulating current (High SOC)

그림 3.5는 공칭전압 3.7V의 기존 배터리에 ① 3A 수준의 방전 부하전류가 흐르고 있을 때 ② 기존 배터리 대비 +0.4V 높은 신규 배터리가 투입 될 때 기존 3 병렬의 배터리에 흐르고 있던 각 3A 수준의 방전전류가 신규 투입된 모듈을 먼저 방전시키기 위해 신규 배터리에 방전 부하전류가 집중되는 결과를 확인할 수 있다. ③ Hot Swap 동작 이후 방전전류가 충전전류로 바뀌는 경우 신규 투입 배터리는 기존 배터리들에 충전전류를 공급하여 방전전류의 결과를 나타내며 기존 배터리는 충전전류 외 신규 투입된 배터리로부터 충전전류를 추가 공급받는 결과를 확인할 수 있다.

그림 3.6은 위와 같은 시뮬레이션 조건에서 신규투입 배터리의 충전상태가 높은

배터리가 연결되었을 때의 시뮬레이션 결과이다. ①기존 셀에 3A/cell 수준의 방전 부하전류가 흐르는 경우 ②기존 배터리 대비 -0.4V 낮은 신규 배터리가 투입됨에 따라 신규 배터리를 충전하기 위해 기존 부하전류 외 신규 배터리를 충전하기 위한 전류를 공급하는 결과를 확인할 수 있다. ③Hot Swap 동작 이후 방전전류가 충전전류로 바뀌는 경우 충전상태가 낮은 신규투입 배터리를 먼저 충전하기 위해 충전 부하전류가 신규투입 배터리에 집중되는 결과를 확인할 수 있다.

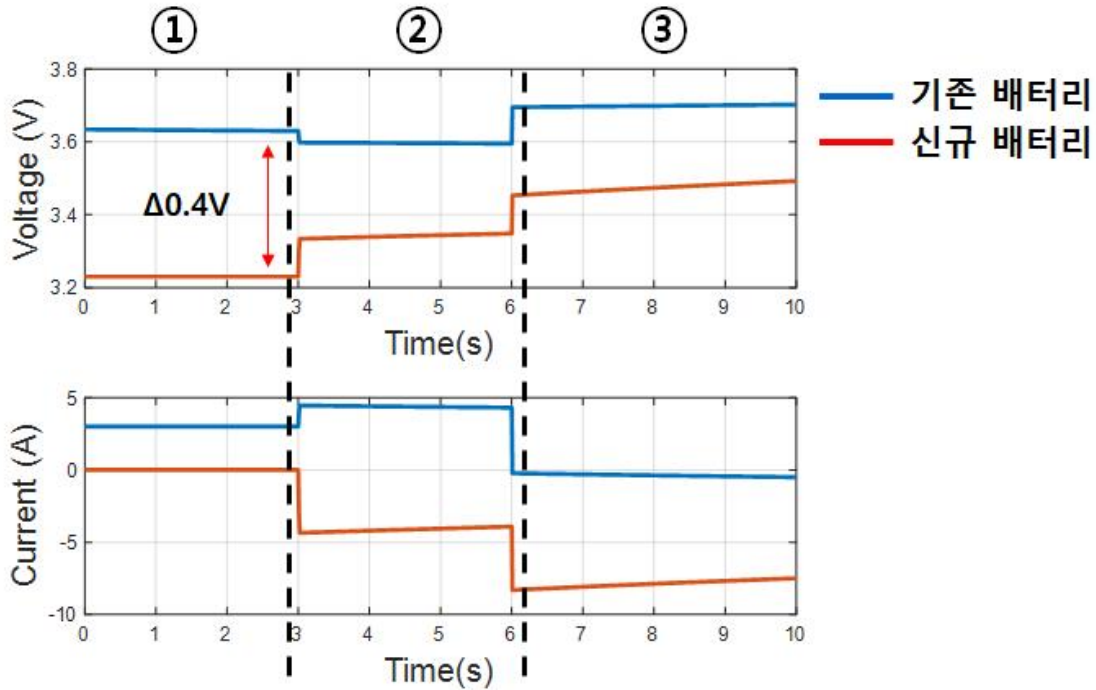


Figure 3.6 Influence of load current on hot-swap circulating current (Low SOC)

위 분석 결과로부터 방전전류가 흐르는 경우 충전상태가 높은 배터리가 신규 투입될 경우 신규투입 배터리를 먼저 방전하려는 결과 큰 순환 전류를 유발할 수 있으며 반대로 충전전류가 흐르는 경우 충전상태가 낮은 배터리가 연결 될 때 신규 투입된 배터리를 먼저 충전하려는 결과로 큰 순환 전류를 유발할 수 있다. 따라서 충전 및 방전 부하 조건에 따라 Hot Swap 동작 범위의 변동을 예상할 수 있다.

3.2.4 온도에 따른 영향성

2.1.1절의 배터리 파라미터 분석 결과에 리튬배터리는 온도에 따라 용량, 개방전압, 내부저항의 파라미터가 변동함을 확인할 수 있다. 분석 결과에 따라 배터리의 용량은 온도가 높을수록 증가하며, 개방전압은 온도가 낮을수록 내부저항의 경우 온도가 낮을수록 증가하는 결과를 확인할 수 있다. 따라서 동일 조건에서 온도에 따라 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류의 크기가 다를 수 있다. 그림 3.7은 배터리 동작 온도별(0°C 10°C 23°C 35°C 45°C) 부하가 없는 상태에서 Hot Swap 분석을 진행한 결과이다. 기존 3.7V의 배터리가 3 병렬 구성이며 3.3V의 배터리가 온도별로 신규 투입 될 때 신규 투입된 배터리에 흐르는 순환 전류의 결과이며 동일 Hot Swap 동작 조건에서 0°C일 때 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류가 가장 작고 45°C에서 순환 전류가 가장 큼을 확인할 수 있다.

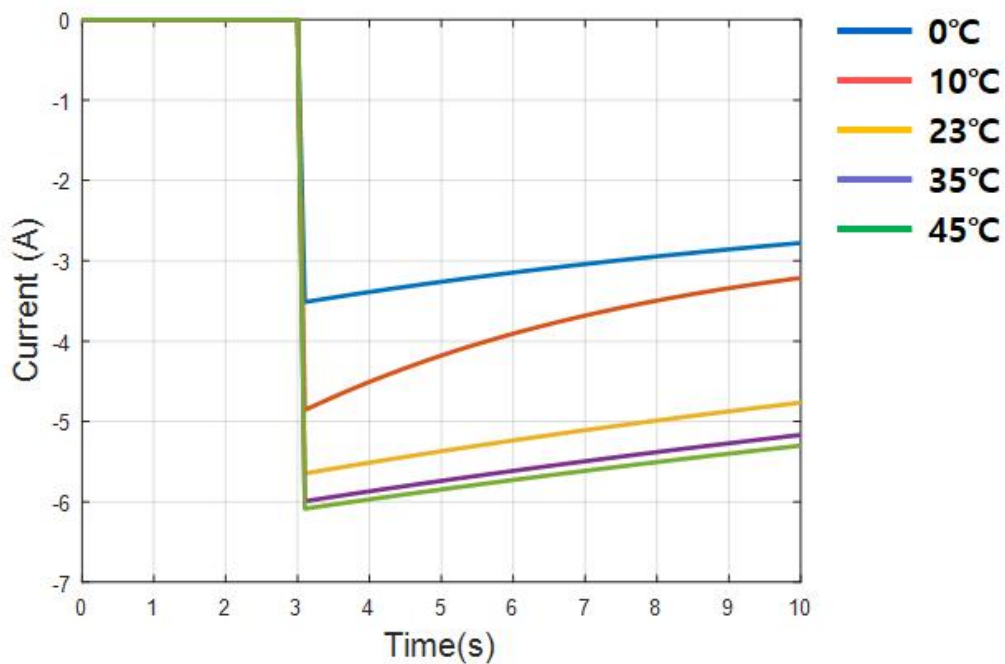


Figure 3.7 Influence of battery temperature on hot-swap circulating current

3.3 Hot Swap 동작 조건 도출

Hot Swap 분석은 3.2절에서 분석한 Hot Swap 영향성에 미치는 인자를 고려한 Worst-Case 조건으로 분석하였다. Hot Swap 분석조건으로 배터리 구성은 3개 병렬구성에서 신규 배터리 하나가 추가되는 조건으로 설정하였으며 분석 전압지점은 배터리 단일 셀 기준 3.7V에서 수행되었다. 부하전류의 경우 시스템 운용에 따라 충전 및 방전 전류의 변동을 고려하여 Hot Swap 동작 3초 이후 반대의 부하전류를 인가하는 경우의 분석 결과이다. Hot Swap 동작 조건은 부하 조건에 따라 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류가 최대 3A/Cell(1C)을 초과하지 않는 경우의 전압 편차 범위를 수립하였으며 해당 조건에 만족하는 온도 및 부하전류에 따른 Hot Swap 동작 전압 편차 조건은 표 3.2와 같다.

Table 3.2 Hot Swap operating conditions for 1S4P system

		Hot Swap 동작을 위한 전압편차 조건 (Peak<3A/Cell)				
Mode	Load (A/cell)	0℃	10℃	23℃	35℃	45℃
Discharge	3A	-0.04~0.23	-0.01~0.14	0.01~0.11	0.00~0.10	0.00~0.10
	2A	-0.12~0.25	-0.08~0.17	-0.06~0.14	-0.06~0.13	-0.06~0.13
	1A	-0.23~0.28	-0.18~0.20	-0.14~0.17	-0.14~0.16	-0.13~0.16
	0	-0.31~0.30	-0.23~0.23	-0.20~0.20	-0.19~0.19	-0.19~0.19
Charge	1A	-0.23~0.28	-0.20~0.15	-0.17~0.13	-0.16~0.12	-0.16~0.12
	2A	-0.24~0.05	-0.17~0.06	-0.14~0.06	-0.13~0.06	-0.13~0.05
	3A	-0.21~-0.07	-0.14~-0.03	-0.11~-0.01	-0.10~-0.01	-0.10~-0.01

표 3.2의 결과를 통해 부하전류가 없는 조건에서 Hot Swap 동작 가능한 전압 편차 범위가 가장 넓으며 충전 및 방전 부하전류가 인가됨에 따라 비대칭적인 Hot Swap 동작 결과를 확인할 수 있다. 부하 조건이 방전일 때 비교적 양의(+) 전압 편차, 충전일 때 음의(-)전압편차의 범위가 상대적으로 확장됨을 확인할 수 있다. 위의 도출된 Hot Swap 동작을 위한 전압 편차 조건을 검증하기 위해 해당 조건에 대한 시뮬레이션 분석을 진행하였으며 결과는 그림 3.8과 3.9와 같다.

표 3.2의 결과에 따라 상온 23°C의 경우 $\pm 0.2V$ 의 전압 편차에 대해 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류의 크기가 3A/Cell 이내를 만족하는 결과를 도출하였으며 그림 3.8은 해당 조건의 시뮬레이션 결과이다. 그림 3.8의 좌측 그림은 3.7V의 터미널 전압 기준 0.2V 높은 셀이 투입되는 결과이며 우측 그림은 0.2V 낮은 셀이 투입된 결과이다. 시뮬레이션 진행 결과 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류가 3A/Cell 미만임을 확인하였다.

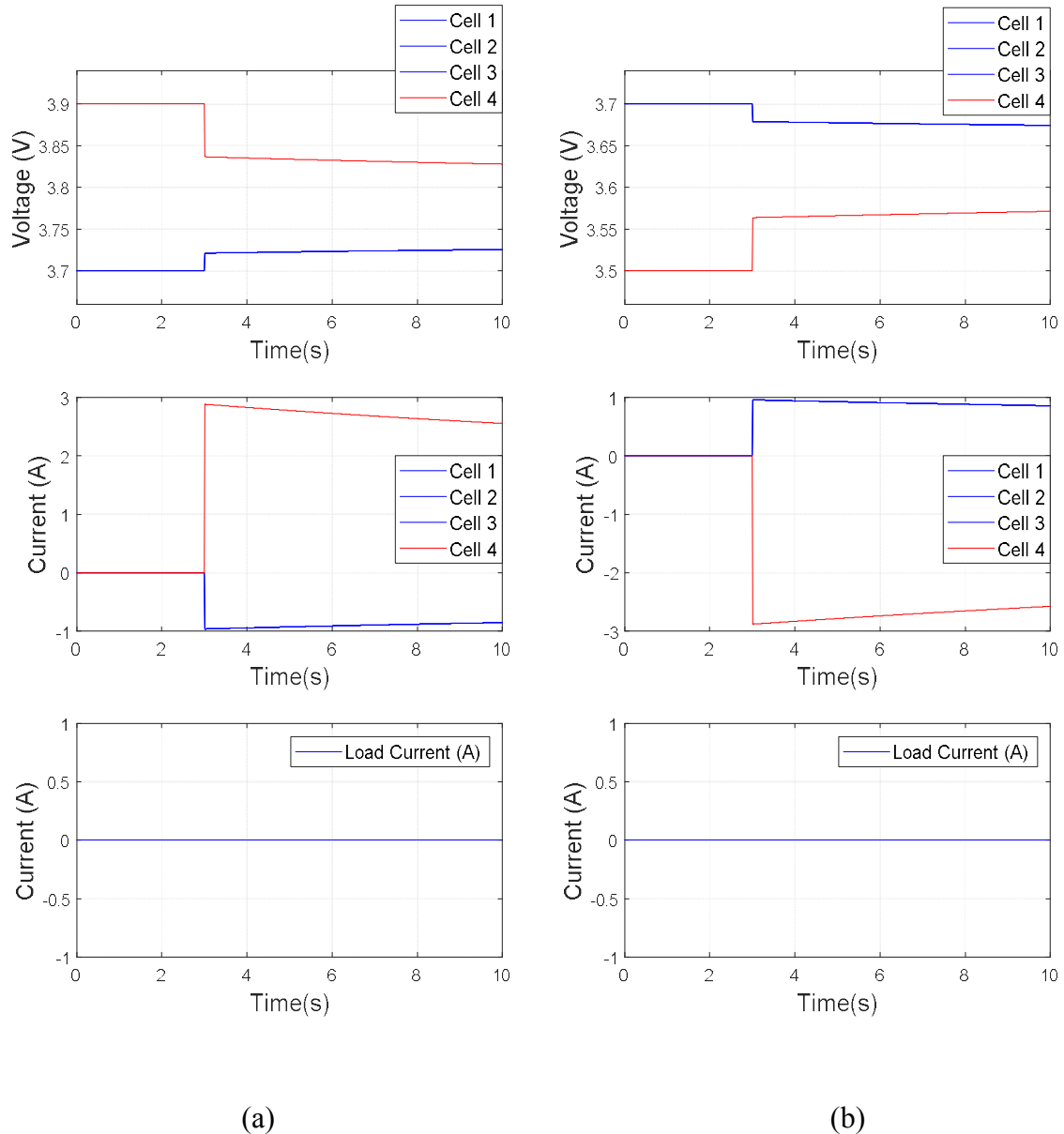


Figure 3.8 Check the result of Hot Swap operating conditions (a) +0.2V Battery Hot Swap simulation result, (b) -0.2V Battery Hot Swap simulation result

상온 조건에서 1A/Cell 수준의 충전전류가 흐르는 경우 Hot Swap 동작 전압은 -0.17V~0.13V로 설정되었으며 이는 충전 및 방전의 부하전류 방향 변동에도 Hot Swap으로 인한 순환 전류가 제한전류 이내에 만족하는 기준이다. 그림 3.9의 좌측 그림은 기존 셀 대비 충전상태가 -0.17V 낮은 셀이 신규투입 된 결과이며 신규 셀이 투입될 때 -3A 수준의 충전전류가 발생하게 되고 기존 3개 셀은 1A 충전전류가 신규 투입된 셀로 집중되는 결과를 나타낸다. 이후 부하 조건이 충전→방전전류로 바뀌면서 기존 충전상태가 높은 3개 셀은 공급할 1A/Cell보다 더 많은 방전전류 내보내게 된다. 이때 초과한 전류는 충전상태가 낮은 신규 투입된 셀의 충전전류로 흐른다. 우측 그림은 기존 셀 대비 충전상태가 0.13V 높은 셀이 신규투입 된 결과이며 기존 1A/Cell로 충전전류가 흐르고 있을 때 충전상태가 높은 신규 셀이 투입될 때 신규투입 셀은 1.5A 수준의 방전전류를 공급하고 이 전류는 기존 셀에 1.5A만큼의 충전전류를 공급하게 된다. 이후 부하 조건이 충전→방전전류로 바뀌는 경우 충전상태가 높은 신규 투입 셀에 방전 부하전류가 집중되는 결과를 확인할 수 있다.

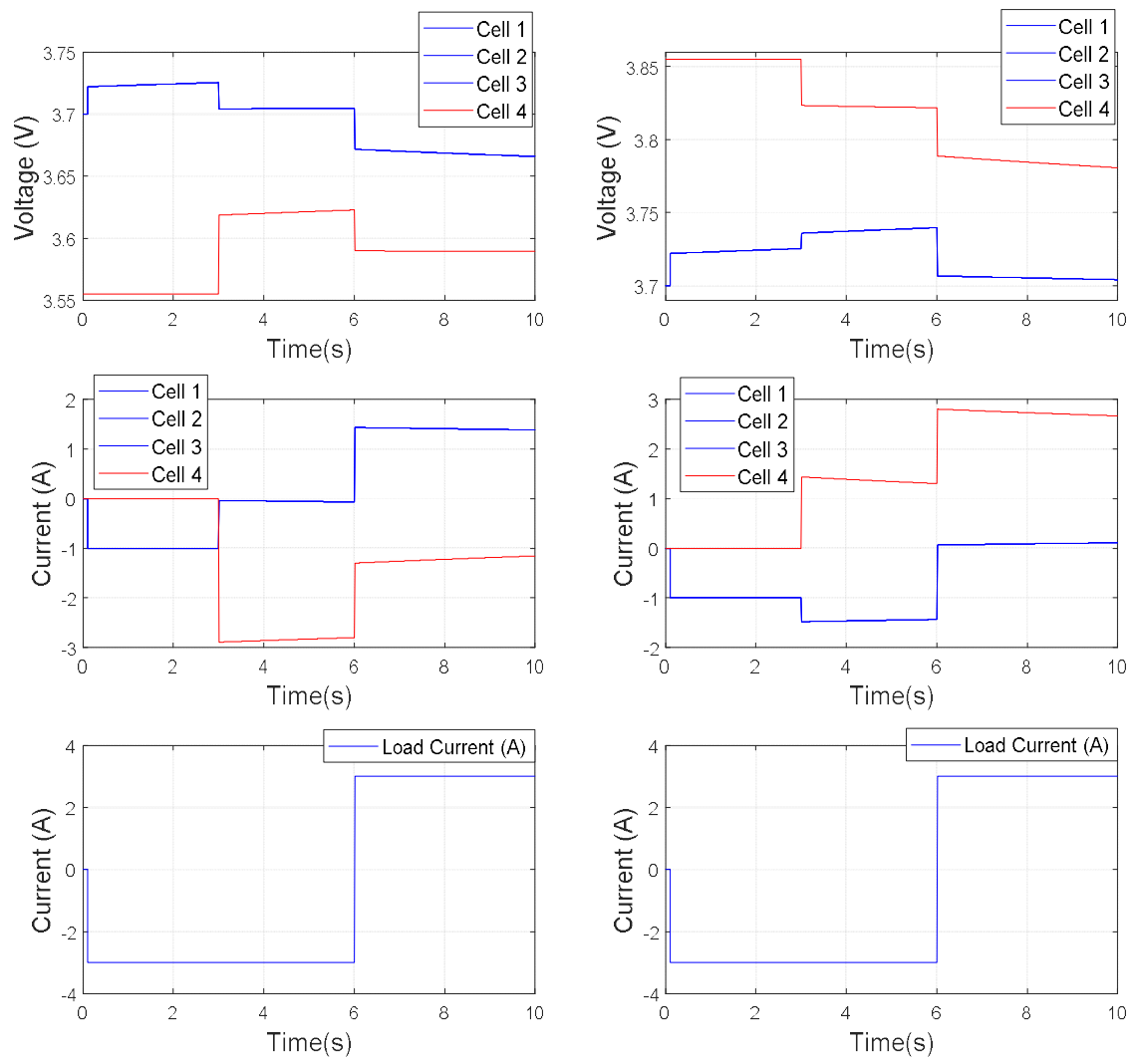


Figure 3.9 Check the result of Hot Swap operating conditions (Load : 1A/Cell Charge → Discharge) (a) -0.17V Battery Hot Swap simulation result, (b) 0.13V Battery Hot Swap simulation result

3.4 Hot Swap 알고리즘 설계

3.3절까지 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류의 크기가 제한전류(3A/Cell)를 만족하는 조건을 표 3.2의 온도, 부하전류에 따른 전압 편차의 결과로 제시하였다. 위 결과로부터 충전 및 방전 부하전류에 따라 양/음 전압 편차의 범위가 비대칭적인 결과를 확인하였으며 알고리즘의 설계 편의를 위해 부하전류 $\pm 1A$ 일 때 온도별 전압 편차 범위로 Hot Swap 동작 조건 기준을 설정하였다. 설정 조건은 배터리 최대 온도가 $0^{\circ}C$ 인 경우 $\pm 0.23V$, $10^{\circ}C$ 인 경우 $\pm 0.15V$, $23^{\circ}C$ 인 경우 $\pm 0.13V$, $35^{\circ}C$ 인 경우 $\pm 0.12V$, $45^{\circ}C$ 인 경우 $\pm 0.12V$ 이며 그림 3.10과 같은 형태의 온도-전압 편차에 대한 1D-Table로 모델에 반영하였다.

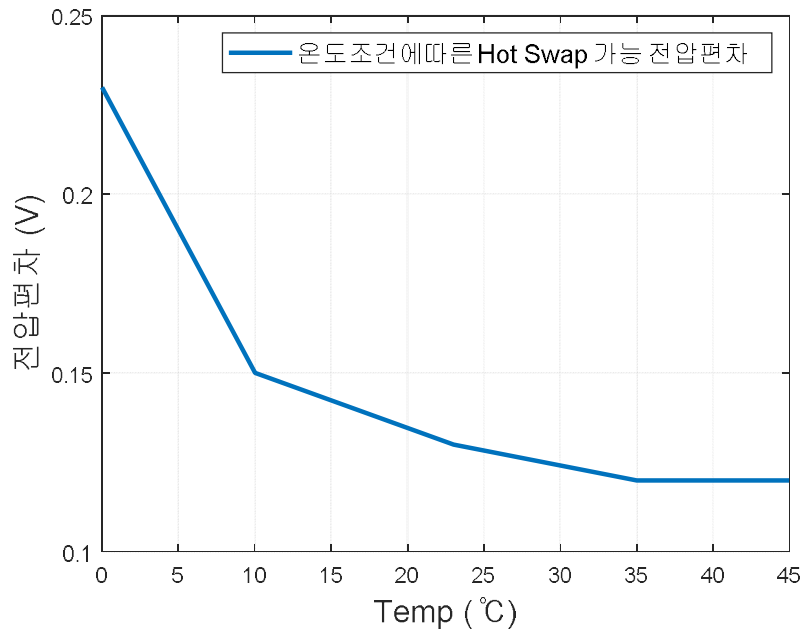


Figure 3.10 Table reflecting hot-swap operating conditions by temperature

Hot Swap 알고리즘은 초기 시스템 구동 시 Off 된 배터리들을 연결하는 초기 On-Sequence 알고리즘에 적용할 수 있다. 시스템의 안정적인 동작을 위해선 최초 운용 시 가용한 모든 배터리를 연결하는 것이 유리하다. 이때 연결되지 못하는 배터리는 충전 및 방전 동작 중 연결이 이루어지며 ESS의 대용량 시스템은 발전 및 부하 조건에 따라 수 시간 또는 수일 동안 연결되지 못할 경우가 있다. 이 경우 시스템의 병렬 구간에 따라 에너지 불균형이 야기되고 또한 연결되지 못한 셀만큼의 에너지 손실이 발생하게 된다. 기존 On-Sequence 또는 Hot Swap 동작 알고리즘은 병렬 구

성에 따라 순서대로 Hot Swap 수행조건에 만족하는 경우 동작하도록 설계되고 있다 [26]. Hot Swap 동작은 기존 연결된 배터리의 평균 전압 대비 신규투입 배터리의 전압 차이로 동작하게 되며 Worst-case의 배터리가 투입되는 경우 평균 전압의 영향으로 다음 차례에 연결될 수 있는 배터리를 연결하지 못하는 경우가 발생한다. 이러한 문제는 Hot Swap 동작 순서의 변경으로 해결할 수 있다. 본 논문에서는 Off 상태의 배터리를 분류하여 기존 시스템과 가장 유사한 상태의 배터리가 먼저 연결될 수 있도록 우선순위를 배치한 알고리즘을 그림 3.11과 같이 구현하였다.

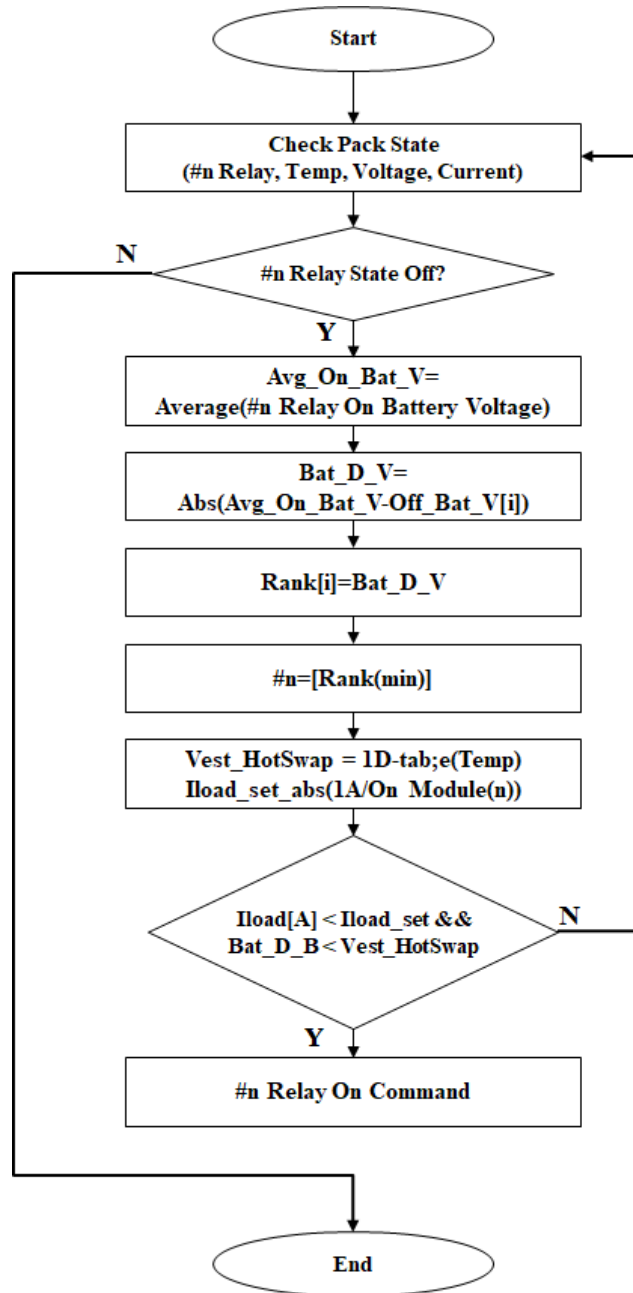


Figure 3.11 Hot Swap operation algorithm flow-chart

본 논문에서 설계한 Hot Swap 알고리즘 동작 순서는 최초 On 되어있는 릴레이의 검출과 온도, 전압, 부하전류를 확인한다. Off 된 릴레이가 있는 경우 기존 On 되어있는 배터리의 평균 전압을 계산 후 Off 되어 있는 배터리들의 절댓값 전압 차를 계산한다. Hot Swap 동작 시 전압 차이가 적은 배터리부터 먼저 연결하기 위해 전압 차이가 가장 적은 배터리를 선정하고 Hot Swap 조건에 만족하는지 판단한다. Hot Swap 조건이 만족하는 경우 해당 배터리의 Hot Swap 동작을 수행하게 된다.

그림 3.12는 충전상태가 각기 다른 배터리가 순차적 연결된 경우의 시뮬레이션 결과이다. 배터리가 순차적으로 Hot Swap 동작하는 경우 조건에 만족하는 순서대로 '1-2-3-4-8-9-10-7'과 같이 연결됨을 확인할 수 있으며 연결 시 발생한 배터리의 순환 전류는 제한전류 사양을 만족함을 확인했다.

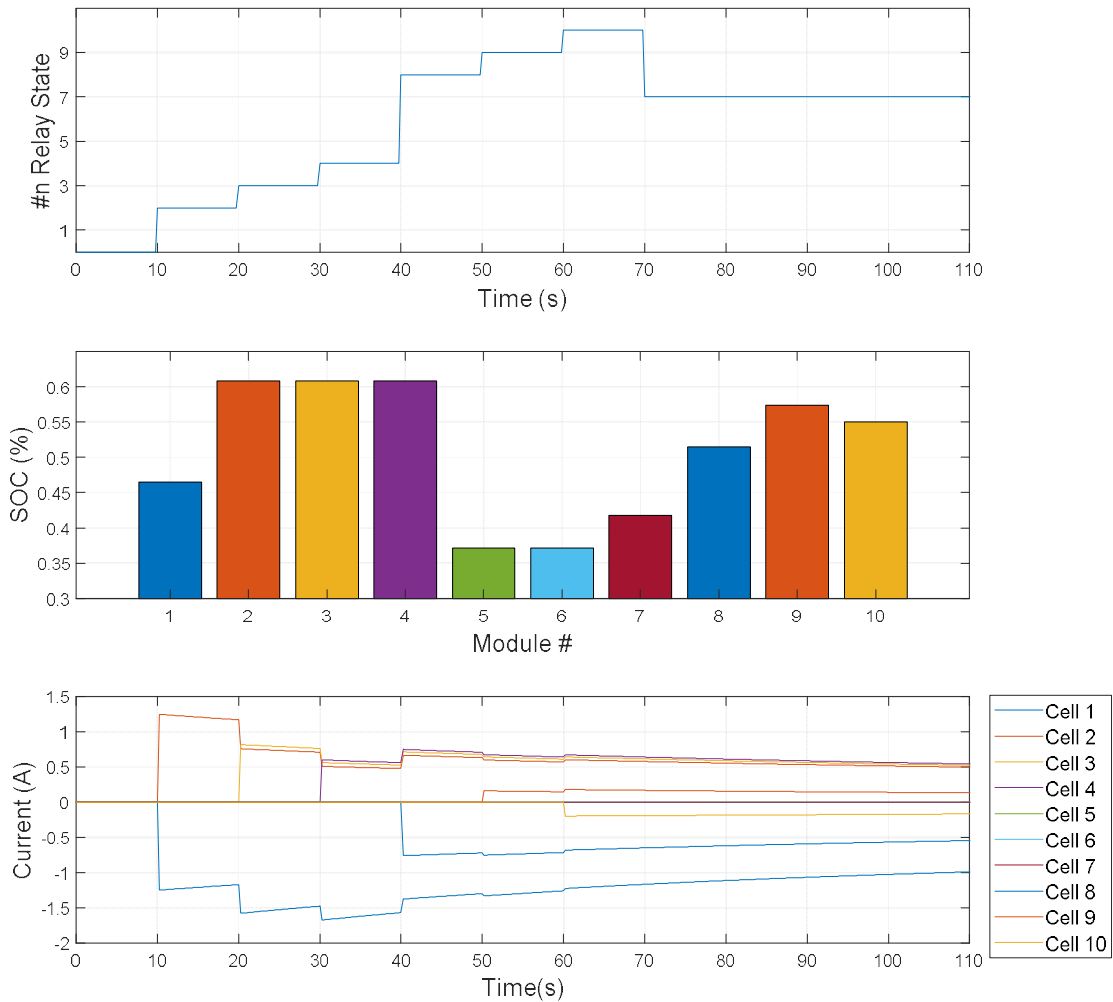


Figure 3.12 On sequence simulation using hot swap algorithm (Sequence method)

그림 3.13은 동일 조건에서 그림 3.11의 알고리즘을 적용한 결과이다. 1번 배터리는 On(default) 상태이며 충전상태 차이가 가장 적은 7번부터 ‘1-7-6-5-8-10-9-2-3-4’ 순서로 10개 구성의 모든 배터리가 연결되었으며 제한전류 조건 $\pm 3A/cell$ 이내의 순환 전류를 확인했다. 따라서 해당 방법을 통해 Hot Swap 알고리즘을 이용해 효율적인 On-Sequence 동작을 할 수 있음을 검증했다.

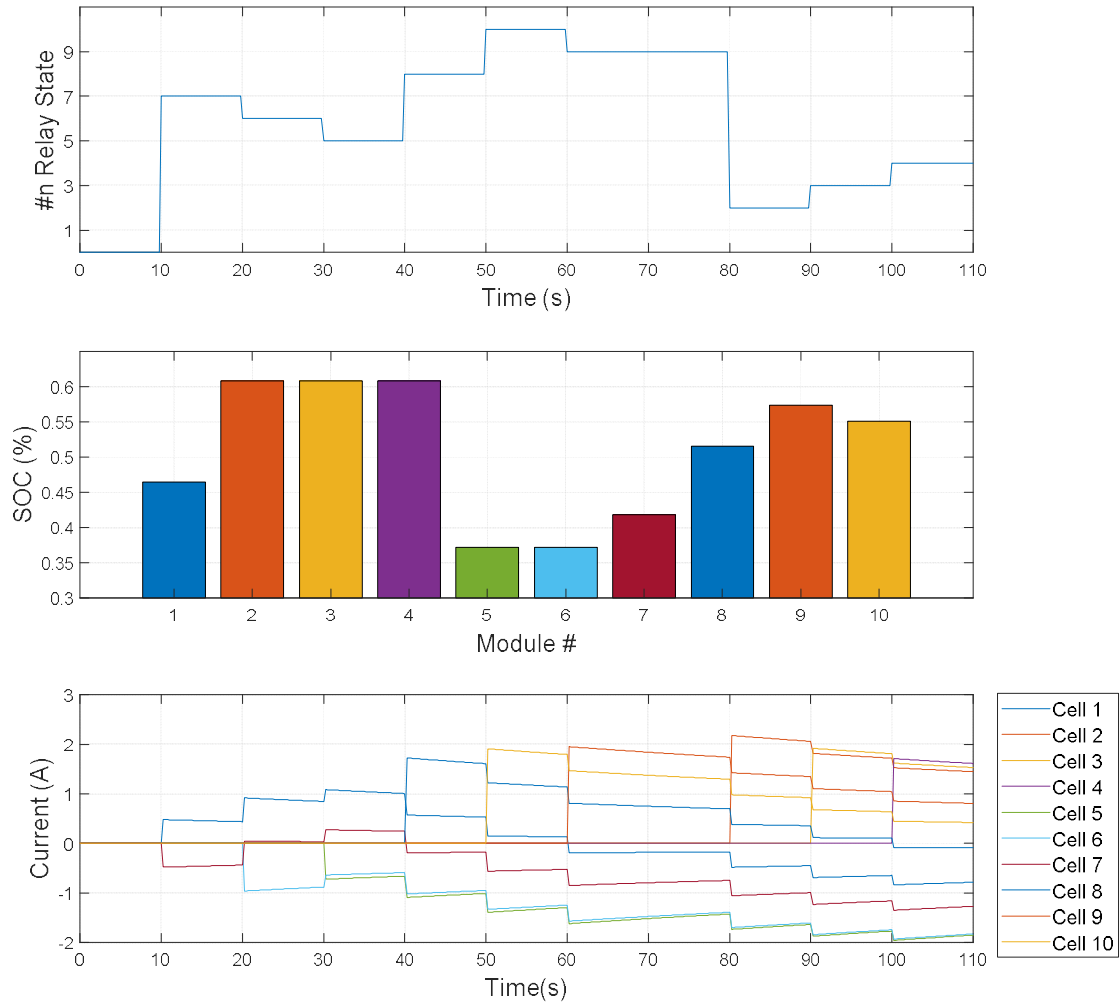


Figure 3.13 On sequence simulation using hot swap algorithm (Priority method)

3.5 Hot Swap Neural Network 모델 설계

앞선 분석 결과 제한전류 이내의 Hot Swap 동작 조건을 배터리의 온도, 기존 배터리에 흐르고 있는 부하전류, 기존 배터리와 신규 투입될 배터리의 전압 편차에 대해 표 3.2와 같이 테이블 결과를 제시하였다. 위의 결과로 Hot Swap 알고리즘 설계할 경우 단순 Hot Swap 대상의 Relay를 On/Off 조건으로밖에 사용될 수밖에 없다. 하지만 Hot 동작 전에 Hot Swap 동작시 발생하는 순환전류를 추정할 경우 Hot Swap 동작 판단 뿐만아니라 Hot Swap 전/후의 전력관리 알고리즘에 적용할 수 있다. 따라서 본 절에서는 Mathworks에서 제공하는 Deep Learning Toolbox의 Artificial Neural Network(ANN: 인공 신경망) 알고리즘을 이용해 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류를 예측하고 이에 따른 Hot Swap 동작 여부를 판단하고자 한다[27,29].

인공 신경망의 학습데이터는 Hot Swap 동작 조건을 도출하기 위해 수행되었던 배터리 구성, 온도, 부하전류, 전압 편차에 대한 다수의 시뮬레이션 결과에 대한 4개의 입력값과 해당 조건에서 발생한 순환 전류 및 부하전류 방향이 바뀔 때에 대해 배터리에 흐르는 전류를 기존 배터리와 신규 투입 배터리에 대해 4개의 타겟 데이터로 설정하였다. 표 3.3은 해당 모델의 입력 데이터와 단위 결과이다.

Table 3.3 ANN Inputs, Targets Data Type

Inputs parameters	Unit of measure	Targets parameters	Unit of measure
Parallel State (Ex, 1=1vs1, 2=2vs1)	Number	Work_BAT	A/cell
Temperature	°C	New_BAT	A/cell
Load Current	A/cell	Work_BAT_re	A/cell
Deviation Voltage	V	New_BAT_re	A/cell

Mathworks에서 제공하는 인공 신경망은 입력데이터 100% 중 train_set 70%, validation_set 15%, test_set 15%로 무작위 분류되어 학습을 자동 진행한다. 그림 3.14의 Neural Network 모델은 입·출력 layer 사이에 존재하는 1개 이상의 Hidden layer와 이를 구성하는 뉴런(Neurons)에 따라 학습 모델의 성능이 결정된다.

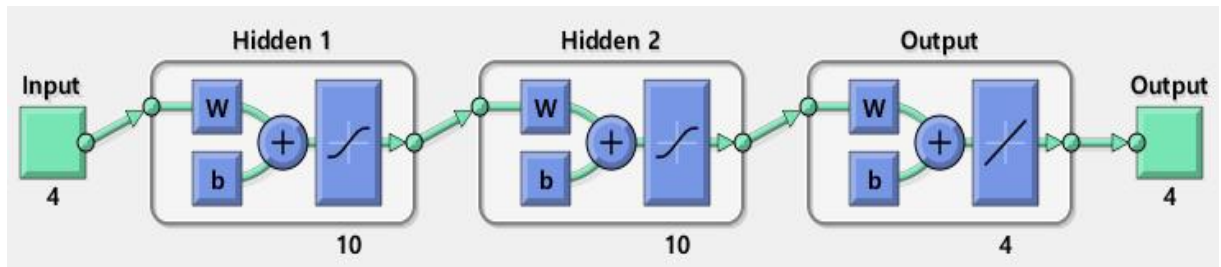


Figure 3.14 Artificial Neural Network Model composition

Hidden Layer와 뉴런의 구성에 따른 모델 성능을 판단하기 위해 Levenberg-Marquardt 알고리즘 함수가 적용된 모델을 기반으로 Hidden Layer의 개수와 해당 Layer의 뉴런의 수에 따른 모델의 성능(MSE, MAE)을 비교하였으며 결과는 표 3.4와 같다. Hidden Layer와 뉴런의 수가 많을수록 모델의 정확도는 증가할 수 있으나 모델을 만들기 위한 학습 시간이 오래 걸리고 과적합(Over fitting) 문제가 발생할 수 있다. 따라서 Hidden Layer와 뉴런의 Case-Study 진행 결과 Hidden Layer 2개, 뉴런은 각 10개 구성에서 MSE(Mean Square Error) 5.89E5, MAE(Mean Absolute Error) 0.0055로 비교 조건에서 최적의 구성으로 판단했으며 해당 조건으로 분석을 진행하였다.

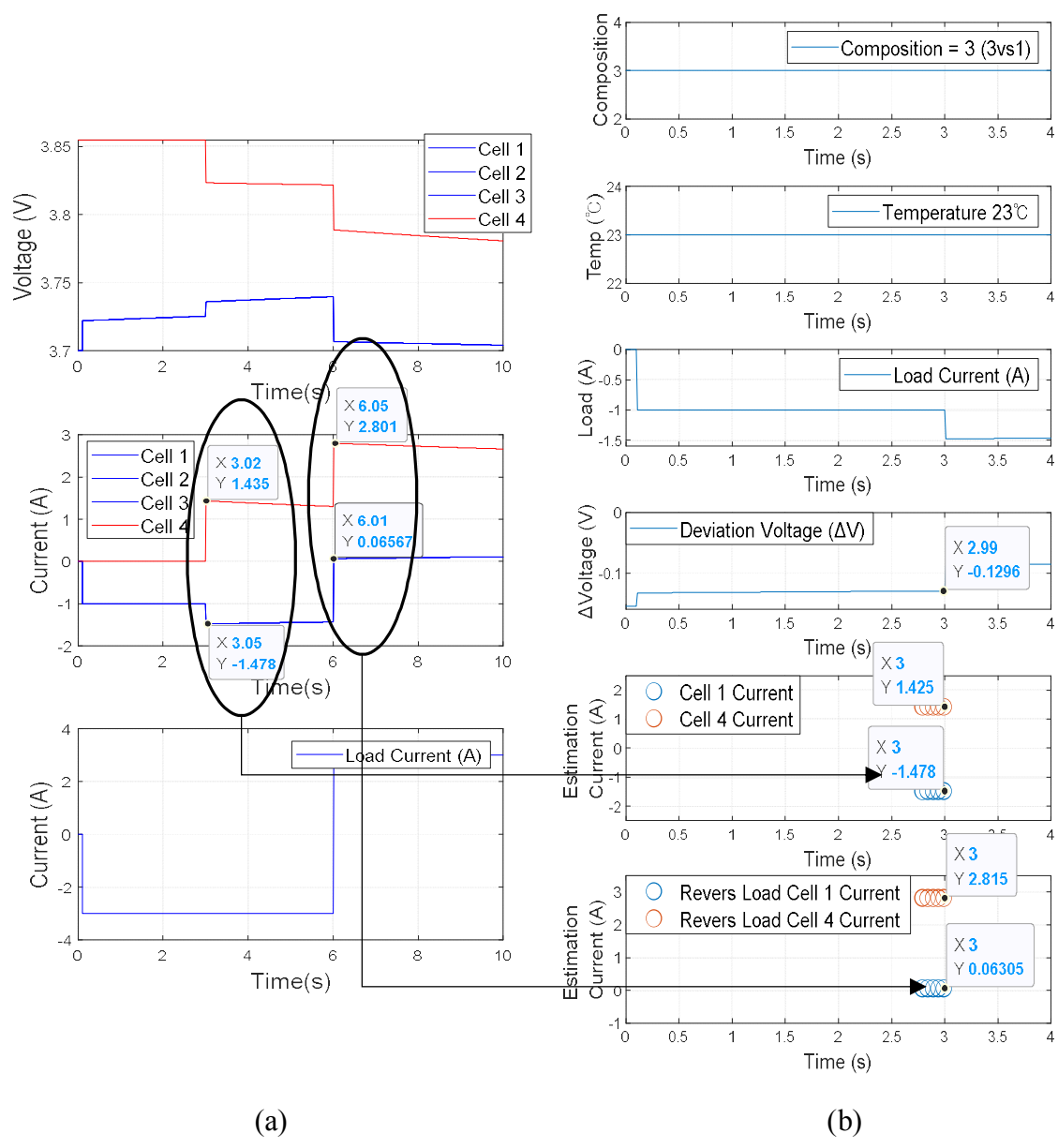
Table 3.4 Model performance analysis result according to Hidden Layer and Neurons configuration

Train function lm, Train 70%, Valid 15%, Test 15%			
Hidden Layer	Neurons	MSE	MAE
1	5	0.0252	0.1246
1	10	7.64e-4	0.0177
1	15	3.97e-4	0.0138
2	5 5	1.7e-3	0.0274
2	5 10	1.70e-4	0.0096
2	10 5	8.93e-5	0.0071
2	10 10	5.89e-5	0.0055
3	5 5 5	9.78e-4	0.0196
3	5 5 10	6.71e-4	0.0167
3	5 10 10	5.92e-5	0.0058
3	5 10 5	1.1e-3	0.0238
3	10 10 5	2.0e-3	0.0329
3	10 10 10	2.63e-5	0.0035

위 결과로부터 각 10개의 뉴런으로 구성된 2개의 Hidden Layer 모델을 기반으로 Neural Network 모델을 구성하였고 다음 과정으로 해당 모델에 적용하기 위한 함수를 선택하기 위해 동일 조건에서 함수별 모델 정확성 검증을 진행하였다. Mathworks에서 제공하는 Neural Network 함수 알고리즘은 약 12개로 구성되며 함수별 모델 정확도는 표 3.5와 같다. 총 12개의 함수 중 정확도가 가장 높은 알고리즘은 Levenberg-Marquardt와 Bayesian Regularization으로 분류할 수 있으며 상대적으로 모델 학습 시간이 짧은 Levenberg-Marquardt 알고리즘이 적용된 trainlm 함수를 사용하였다.

Table 3.5 Model performance analysis result according to train function

Train function	Algorithm	MSE	MAE
trainlm	Levenberg-Marquardt	5.89e-5	0.0055
trainbr	Bayesian Regularization	3.09e-5	0.0038
trainbfg	BFGS Quasi-Newton	0.0023	0.0358
trainrp	Resilient Backpropagation	0.0139	0.0898
trainscg	Scaled Conjugate Gradient	0.0088	0.0702
traincgb	Conjugate Gradient with Powell/Beale Restarts	0.0094	0.0738
traincgf	Fletcher-Powell Conjugate Gradient	0.0314	0.1376
traincgp	Polak-Ribière Conjugate Gradient	0.0272	0.1262
trainoss	One Step Secant	0.0322	0.1416
traingdx	Variable Learning Rate Gradient Descent	0.2575	0.4019
traingdm	Gradient Descent with Momentum	35.2494	4.9497
traingd	Gradient Descent	0.2088	0.3584



Cell_1				Cell_4 (New)			
Load		reverse Load		Load		reverse Load	
Simul	Estimation	Simul	Estimation	Simul	Estimation	Simul	Estimation
1.435A	1.425	-1.478A	-1.478A	0.065A	0.063A	2.801A	2.815A

Figure 3.15 Comparison of ANN model and simulation results

학습된 Neural Network의 모델을 검증하기 위해 3.3절의 그림 3.9 (b) Hot Swap 모델 검증 시뮬레이션 결과와 동일 조건으로 분석된 학습모델의 결과를 비교했다. 결과는 그림 3.15와 같다. 해당 시뮬레이션 분석 조건은 기존 3.7V의 3개 배터리가

1A/Cell로 충전 중인 경우 기존 대비 +0.13V 높은 배터리가 신규 투입된 경우이며 시뮬레이션 결과 기존 셀은 -1.478A, 신규 투입된 배터리는 -1.478A의 전류가 흐름을 확인할 수 있었고 학습 모델의 경우 동일 조건에서 기존 셀은 1.435A, 신규 투입된 배터리는 1.425A의 전류가 흐름을 확인할 수 있었다. 이후 부하전류가 반전되는 경우 (충전-->방전) 기존 배터리는 0.065A, 신규 투입된 배터리는 2.801A의 전류가 흐름을 확인할 수 있었고 학습된 모델의 경우 기존 배터리는 0.0063A, 신규 투입된 배터리는 2.815A의 전류가 흐름을 확인할 수 있었다. 위 결과로부터 해당 조건에서 ANN 모델의 전류 추정 성능이 3% 이내로 동작함을 확인했다.

제 4 장 리튬전지시스템 Hot Swap 알고리즘 검증

4.1 Hot Swap 알고리즘 검증

Hot Swap 알고리즘은 3.5절의 그림 3.13과 3.14의 On-Sequence 시뮬레이션 결과로 정상 동작을 확인했다. 본 절에서는 1S4P 리튬전지 시스템의 Hot Swap 실험 결과를 기반으로 시뮬레이션 모델과 알고리즘 검증을 진행했다. 실험 구성의 배터리 충전 상태는 1번 셀(3.927V), 2번 셀(3.826V), 3번 셀(3.765V), 4번 셀(3.458V)이며 부하전류가 없고 상온(23℃) 조건에서 실험이 진행되었다. Hot Swap 동작은 10초 간격으로 수행되었으며 4번 셀은 Hot Swap 조건에 만족하지 않아 동작을 수행하지 않았다.

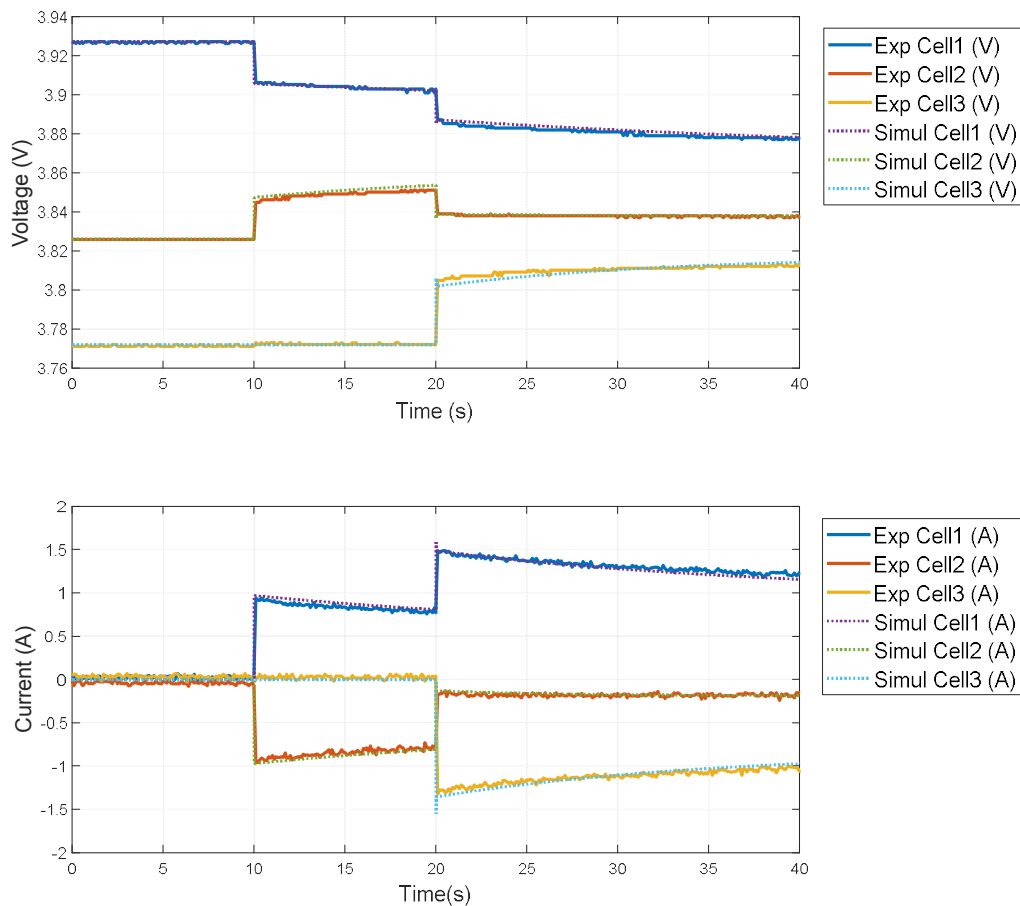
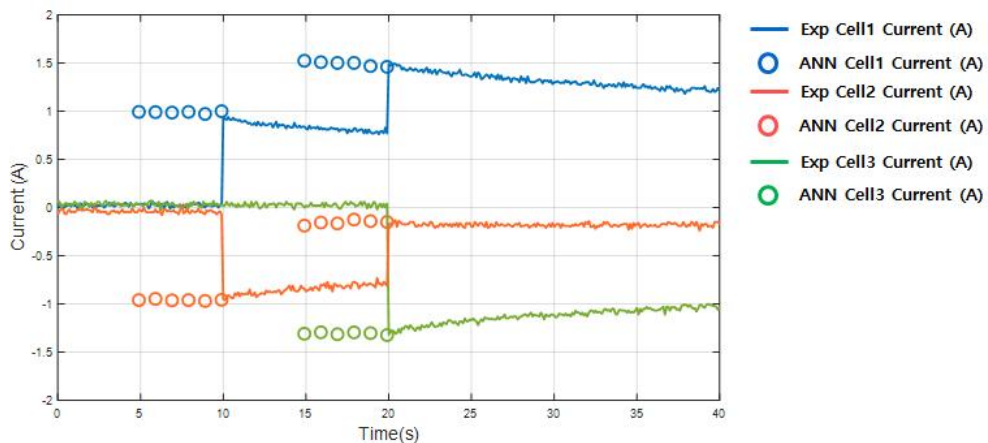


Figure 4.1 Hot-swap algorithm and simulation experiment verification

실험과 시뮬레이션 결과 비교 결과 10초 지점 $-0.09V$ 의 전압 편차를 가지는 셀이 Hot Swap 하는 경우 1번 셀의 전류는 실험 $0.94A$, 시뮬레이션 $0.97A$ 2번 셀에 흐르는 전류는 실험 $-0.95A$, 시뮬레이션 $0.95A$ 로 4% 이내의 오차 성능을 보였다. 20초 지점 1번 셀과 2번 셀 간 순환 전류가 흐르고 있을 때 1번 셀 대비 $-0.13V$ 의 전압 편차를 가지는 셀이 Hot Swap 하는 경우 1번 셀의 전류는 실험 $1.49A$, 시뮬레이션 $1.485A$ 2번 셀에 흐르는 전류는 실험 $-0.17A$, 시뮬레이션 $0.13A$ 3번 셀에 흐르는 전류는 실험 $-1.32A$, 시뮬레이션 $1.356A$ 로 3% 이내의 오차 성능을 보였다. 위 결과로부터 1S4P 구성의 리튬전지 소프트웨어 모델의 약 4% 이내의 모델 정확성과 Hot Swap 알고리즘을 검증했다.

해당 실험 조건의 ANN 모델의 추정 결과는 그림 4.2와 같다. 10초 지점 부하 전류가 없는 상태에서 약 $-0.09V$ 전압 편차를 가지는 배터리가 1VS1 Hot Swap 될 때 ANN 모델은 $0.99A$ (1번 셀), $-0.96A$ (2번 셀) 크기의 순환 전류가 발생할 것으로 추정했으며 실험 결과 $0.94A$ (1번 셀), $-0.95A$ (2번 셀) 수준의 순환 전류가 발생했다. 20초 지점 1번 셀 대비 $-0.13V$ 의 전압 편차를 가지는 3번 셀이 2VS1 Hot Swap 하는 경우 ANN 모델은 $1.495A$ (1번 셀), $-1.38A$ (3번 셀) 크기의 순환 전류가 발생할 것으로 추정했으며 실험 결과 $1.49A$ (1번 셀), $-1.32A$ (3번 셀) 크기의 순환 전류가 발생함을 확인했다. 위 결과로 ANN 모델의 오차는 약 6% 내외의 오차 성능으로 Hot Swap 순환 전류 추정 성능 결과를 제시했다.



10s				20s			
Cell_1		Cell_2		Cell_1		Cell_3	
Exp	ANN	Exp	ANN	Exp	ANN	Exp	ANN
0.94A	0.99A	-0.95A	-0.96A	1.49A	1.495A	-1.32A	-1.38A

Figure 4.2 ANN model experiment verification

제 5 장 결 론

Hot Swap 알고리즘의 설계 목적은 ESS 등에 적용되는 대용량 다병렬 배터리 시스템에서 초기 시퀀스 동작 및 신규투입, 유지보수 등 독립상태의 배터리가 DC-Bus에 병렬연결 될 때 충전상태 차이에 의해 과도한 순환 전류가 발생하지 않고 안전하게 연결하기 위함이다. 기존의 다병렬 배터리 시스템의 순환 전류에 대한 다양한 연구가 진행되어왔지만 순환 전류를 결정짓는 핵심 인자에 대한 연구 및 분석이 이루어지지 않았다. 따라서 본 연구에서 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류는 배터리 간의 충전상태 차이뿐만 아니라 배터리의 온도, 병렬구성, 부하전류 등 다양한 인자의 영향성이 존재함을 확인했으며 순환전류를 결정짓는 핵심 인자들을 고려해야 과도한 순환 전류 없이 안전한 Hot Swap 동작을 수행할 수 있음을 확인했다. Hot Swap 분석 방법은 리튬전지 시스템의 등가 회로를 구성하고 이를 계산하여 순환 전류를 예상할 수 있으나 ESS와 같은 대전력 시스템을 계산하는 데 한계가 존재한다. 따라서 본 논문에서는 Matlab/Simulink/Simscape 소프트웨어를 이용한 리튬전지 시스템의 시뮬레이션 모델 설계를 통해 다 병렬 리튬전지 시스템 모델을 분석하였다. 설계된 모델을 기반으로 Hot Swap 동작 조건을 도출하기 위해 순환 전류를 결정짓는 핵심 인자에 대한 Case-Study를 수행하였으며 이때 발생한 최대 순환 전류가 제한전류($\pm 3A/Cell$) 이내에 만족하는 온도-부하전류-전압 편차 조건을 도출하였다. 위 결과로부터 기존연구에서 진행되지 않았던 순환 전류를 결정짓는 핵심 인자를 고려해 Hot Swap 알고리즘을 설계 하였다.

Hot Swap 알고리즘은 다양한 조건으로 도출된 동작 조건을 Look-up Table 모델을 이용해 릴레이의 On/Off 제어로 동작하게 된다. 단, Table 모델로 Hot Swap 동작 조건을 판단하게 될 경우 단순 릴레이를 On/Off 시키는 조건으로만 사용할 수 있어 Hot Swap 동작으로 인한 전력관리 알고리즘에 어려움이 있다. 따라서 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류를 추정하기 위해 인공신경망 모델을 적용해 순환전류를 추정 연구를 수행하였다. ANN 모델은 배터리 시스템에서 주로 SOC, SOH 등 배터리의 상태추정 연구에만 사용되어왔지만 본 연구에서는 Hot Swap Case-Study 분석 과정에서 도출된 수많은 시뮬레이션 데이터를 ANN 모델에 학습 시켜 Hot Swap 핵심인자를 고려해 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류를 추정하였다. ANN 모델을 이용해 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환 전류 추정 결과 약 6% 수준의 오차

수준으로 추정하였다. 위 결과로부터 Hot Swap 순환 전류를 추정하는 방법으로 ANN 모델을 사용할 수 있음을 확인했다. 또한 기존의 순환전류 추정 방법보다 정확하고 효율적으로 Hot Swap 동작 시 발생하는 순환전류를 추정할 수 있다.

향후 본 연구에서 고려하지 못한 SOH, SOP 등 SOx 조건을 고려한 모델 설계를 통해 순환 전류를 결정짓는 다양한 상황을 고려해 Hot Swap 동작 알고리즘을 수립해야 할 필요가 있으며, ANN 모델의 최적화 및 확장을 통해 다병렬 배터리 시스템의 모든 배터리에 발생하는 순환 전류를 추정하여 Hot Swap 동작 전/후의 시스템 전력관리 알고리즘의 연구 및 설계가 필요하다.

【참고문헌】

- [1] BNEF “New Energy Outlook 2020”, 2020.00.00, <https://about.bnef.com/new-energy-outlook>
- [2] Large-Scale Energy Storage System for Renewable Energy , HYOSUNG Corporation, 2017,
- [3] Baronti, F. Investigation of series-parallel connections of multi-module batteries for electrified vehicles. Proceedings of IEEE International Electric Vehicle (IEVC)(2014), Florence, Italy. (pp. 1 - 7).
- [4] Jiang, Y., Habib, A. H., Zhao, X., Shrinkle, L. J., & Callafon, R. Centralized recursive optimal scheduling of parallel buck regulated battery modules. Proceedings of IEEE Conference on Decision and Control (CDC)(2017), Melbourne, VIC, Australia.(pp. 2029 - 2034).
- [5] Chin-Sien Moo, ; Kong Soon Ng, ; Yao-Ching Hsieh. Parallel Operation of Battery Power Modules. IEEE Transactions on Energy Conversion(2008), 23 (2), 701 - 707.
- [6] Ban, H.-S. Load sharing improvement in parallel-operated lead acid batteries. Proceedings of IEEE International Symposium on Industrial Electronics (ISIE) (2001), Pusan, South Korea. (pp. 1026 - 1031).
- [7] Song, C., Shao, Y., Song, S., Chang, C., Zhou, F., Peng, S., & Xiao, F. Energy management of parallel-connected cells in electric vehicles based on fuzzy logic control. Energies (2017), 10, 404.
- [8] Seongjun Lee; Jonghoon Kim, Inrush current estimation and hot-swapping for safe parallel battery pack, International Journal of Electronics(2020),1-16
- [9] Lee, S., Kim, J., Ha, M., & Song, H. Inrush current estimation for hot swap of the parallel connected large capacity battery pack. Proceedings of IEEE Energy Conversion Congress and Exposition (ECCE)(2018), Portland, OR, USA. (pp. 2489 - 2492).
- [10] 임남규, 이성준, 박준호.(2020). 전기선박용 다병렬 리튬전지 시스템의 Hot-Swap 분석용 시뮬레이션 모델 설계. 한국군사과학기술학회 종합학술대회.822-

- 823.
- [11] Lin, Ho-Ta; Liang, Tsorng-Juu; Chen, Shih-Ming. Estimation of Battery State of Health Using Probabilistic Neural Network. *IEEE Transactions on Industrial Informatics*(2013), 9(2), 679 - 685.
- [12] Ismail, Mahmoud; Dlyma, Rioch; Elrakaybi, Ahmed; Ahmed, Ryan; Habibi, Saeid. Battery state of charge estimation using an Artificial Neural Network. *2017 IEEE Transportation Electrification Conference and Expo (ITEC)*(2017), 342 - 349.
- [13] Farmann, A.; Waag, W.; Marongiu, A.; Sauer, D.U. Critical review of on-board capacity estimation techniques for lithium-ion batteries in electric and hybrid electric vehicles. *J. Power Sources* 2015, 281, 114 - 130.
- [14] Zhu, Q.; Xu, M.; Liu, W.; Zheng, M. A state of charge estimation method for lithium-ion batteries based on fractional order adaptive extended kalman filter. *Energy* 2019, 187, 115880.
- [15] 박진형, 이평연, 윤창오, 김종훈, 장성수.(2017). 배터리팩 전기적 등가회로 모델 기반 파라미터 추출 및 시뮬레이션 검증. *전력전자학회 추계학술대회*, 155-156.
- [16] Datasheet. Introduction of INR18650-30Q. 2014. Available online: http://enerpower.de/wp/wp-content/uploads/2016/03/Technical_Information_INR18650-30Q.pdf (accessed on 25 September 2019).
- [17] Zhang, Lijun; Peng, Hui; Ning, Zhansheng; Mu, Zhongqiang; Sun, Changyan (2017). Comparative Research on RC Equivalent Circuit Models for Lithium-Ion Batteries of Electric Vehicles. *Applied Sciences*, 7(10), 1002 - . doi:10.3390/app7101002
- [18] Jackey, Robyn; Saginaw, Michael; Sanghvi, Pravesh; Gazzarri, Javier; Huriya, Tarun; Ceraolo, Massimo. SAE Technical Paper Series [SAE International SAE 2013 World Congress & Exhibition - (APR. 16, 2013)] SAE Technical Paper Series - Battery Model Parameter Estimation Using a Layered Technique: An Example Using a Lithium Iron Phosphate Cell. (2013) , 1(1-14)
- [19] RENAULT NISSAN TECHNOLOGY & BUSINESS CENTRE INDIA PRIV

- ATE LIMITED, "Battery Parameter Estimation". <https://www.mathworks.com/content/dam/mathworks/mathworks-dot-com/images/events/matlabexpo/in/2018/lithium-ion-battery-parameter-estimation-for-hil-sil-and-mil-validation.pdf/>
- [20] Datasheet. Introduction of Relay(JQC-3FF-s-z). <https://denkovi.com/Documents/JQC-3FF-S-Z.pdf>
- [21] Flat Wire Inductor Calculator. <https://chemandy.com/calculators/flat-wire-inductor-calculator.htm>
- [22] Datasheet. Introduction of NI myRio-1900g. <https://www.ni.com/pdf/manuals/376047c.pdf>
- [23] Datasheet. Introduction of Current Sensor ACS712 5A. <https://www.sparkfun.com/datasheets/BreakoutBoards/0712.pdf>
- [24] 3D Modeling. 4ch Relay Module.step. <https://grabcad.com/library/arduino-relay-module-1>
- [25] 3D Modeling. ACS 712.STEP. <https://grabcad.com/library/acs712-electronic-component-1>
- [26] 송현철, 하미림.(2018). 전기선박용 다병렬 리튬전지체계 Hot Swap 운용방안 연구. 한국군사과학기술학회 종합학술대회.1018-1019
- [27] MAHMOUD ISMAIL. Estimation Strategies for Training of Deep Learning Neural Networks, DOCTOR OF PHILOSOPHY (2018), McMaster University, Hamilton, Ontario (Mechanical Engineering)
- [28] Math works Deep learning Tool Box. Neural Network Pattern-net,<https://kr.mathworks.com/products/deep-learning.html#net>
- [29] A. Romero et al. "FitNets: Hints for Thin Deep Nets". In:arXiv:1412.6550 (2015).