



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](#)

2019年

2月
博士學位論文

분산형 보호회로 및 열해석 기반
에너지 저장시스템 최적설계

朴仁洙

2019年 2月

博士學位 論文

분산형 보호회로 및 열해석 기반 에너지 저장시스템 최적설계

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 仁 洙

2019年 2月

博士學位 論文

분산형 보호회로 및 열해석 기반 에너지 저장시스템 최적설계

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 仁 洙

분산형 보호회로 및 열해석 기반 에너지 저장시스템 최적설계

Distributed Protective Circuit and Thermal Analysis-based
Optimal Design for Energy Storage System

2019年 2月 25日

朝鮮大學校 大學院

電氣工學科

朴 仁 洙

분산형 보호회로 및 열해석 기반 에너지 저장시스템 최적설계

指導教授 曹 錦 培

이 論文을 工學博士學位 申請論文으로 提出함

2018年 10月

朝鮮大學校 大學院

電 氣 工 學 科

朴 仁 洙

朴仁洙의 博士學位 論文을 認准함

委員長 朝鮮大學校 教授 최효상 印

委員 忠南大學校 院長 김종훈 印

委員 朝鮮大學校 教授 김남훈 印

委員 朝鮮大學校 教授 최연옥 印

委員 朝鮮大學校 教授 조금배 印

2018年 12月

朝鮮大學校 大學院

목 차

ABSTRACT

I. 서 론	1
A. 연구 배경	1
B. 연구 목적	4
II. 이론적 고찰	6
A. 에너지 저장시스템 개념	6
B. 에너지 저장시스템 주요구성	12
III. 에너지 저장시스템 설계	18
A. 직병렬조합 에너지 저장시스템 설계	18
1. 18650타입 원통형 셀	18
2. 스크리닝 기반 직병렬조합 에너지 저장시스템	21
B. 배터리관리시스템(BMS) 설계	28
1. 에너지 저장시스템 전기적 등가회로 모델	28
2. 확장칼만필터(EKF)/이중확장칼만필터(DEKF)	32
3. SOC/SOH 추정알고리즘	37
4. 에너지 저장시스템 열해석	42
C. 분산형 보호회로 설계	45
1. 보호회로모듈(PCM)	45
2. 분산형 보호회로 하드웨어 및 제어알고리즘	48
IV. 실험결과 및 고찰	51
A. 직병렬조합 에너지 저장시스템	51

B. 배터리관리시스템(BMS)	57
C. 분산형 보호회로	95
 V. 결 론	 99

참 고 문 헌

List of Tables

Table 2-1. Several purposes, functions and its benefits of the ESS	8
Table 2-2. Industry trend of the ESS key components	10
Table 3-1. Cell specification of the INR18650-29E	19
Table 3-2. Detailed specification of two experimental setups	22
Table 3-3. AVE and STD with voltage variance	26
Table 4-1. Experimental condition of the energy storage system	51
Table 4-2. Materials information of the energy storage system(14S20P)	68
Table 4-3. Duration time and maximum heat generation(discharge/charge)	68
Table 4-4. Boundary condition of the case in the energy storage system	71
Table 4-5. Various analysis cases via 1.25 A(discharge), 1.65 A(discharge), 0.25 A(charge) and 0.75 A(charge)	72
Table 4-6. Maximum deformation and von-mises stress considering various analysis cases(discharge 1.25 A)	78
Table 4-7. Maximum deformation and von-mises stress considering various analysis cases(discharge 1.65 A)	82
Table 4-8. Maximum deformation and von-mises stress considering various analysis cases(charge 0.25 A)	87
Table 4-9. Maximum deformation and von-mises stress considering various analysis cases(charge 0.75 A)	92
Table 4-10. Maximum temperature values of 15 points(T1-T15)	93
Table 4-11. Final SOC status according to SOC level description	96
Table 4-12. SP48M specification	97

List of Figures

Fig. 2-1. Concept map of the ESS	6
Fig. 2-2. Application fields of the ESS	7
Fig. 2-3. Internal configuration of the ESS	12
Fig. 2-4. Comparison between the battery type and non-battery type used as energy storage system	13
Fig. 2-5. PCS hybrid structure and its power flow for renewable source and energy storage system	15
Fig. 2-6. Grid-connected ESS controller	16
Fig. 3-1. 18650 Li-Ion cell with a cylindrical type(INR18650-29E, 2.9 Ah)	18
Fig. 3-2. Discharge curves of the INR18650-29E	20
Fig. 3-3. Two experimental setups for obtaining various experimental results	21
Fig. 3-4. Two-level based screening process	23
Fig. 3-5. Flowchart of two-level based screening process	23
Fig. 3-6. Current profile for 2 nd screening process at arbitrary SOC points ..	24
Fig. 3-7. Initial starting voltage points(ISVP) fixation	25
Fig. 3-8. Cell's averages and standard deviations for ISVP fixation	25
Fig. 3-9. Screening-based energy storage system(14S20P)	27
Fig. 3-10. Equivalent electrical circuit model of a unit cell	28
Fig. 3-11. Equivalent electrical circuit models of unit cell and screening-based energy storage system in series connection	29
Fig. 3-12. Equivalent electrical circuit models of unit cell and screening-based energy storage system in parallel connection	29
Fig. 3-13. Equivalent electrical circuit models of unit cell and screening-based energy storage system in series/parallel connection	29
Fig. 3-14. Model equations of the energy storage system in series connection	30
Fig. 3-15. Model equations of the energy storage system in parallel connection	30

Fig. 3-16. Time & Measurement updates of the EKF	34
Fig. 3-17. Data rejection and noise model at reliable/unreliable region	35
Fig. 3-18. Hybrid pulse power characterization(HPPC) profile	38
Fig. 3-19. Direct current internal resistance(DCIR) profile	38
Fig. 3-20. Flowchart of the EKF	40
Fig. 3-21. Thermal network model (isothermal object) of unit cell	42
Fig. 3-22. Thermal network model(isothermal object) of unit cell(NREL)-1 ..	42
Fig. 3-23. Thermal network model(isothermal object) of unit cell(NREL)-2 ..	43
Fig. 3-24. Thermal network model(lumped capacitance) of the module	43
Fig. 3-25. Thermal network model(lumped capacitance) of the module(NREL)44	
Fig. 3-26. Hardware structure with protection circuit module(PCM)	45
Fig. 3-27. Several components in the PCM hardware structure	45
Fig. 3-28. Radiation and its structure in the PCM	46
Fig. 3-29. FET structure in the PCM	46
Fig. 3-30. Protection circuit module(above a rated current of 30 A)	47
Fig. 3-31. Experimental test for checking PCM operation considering a rated current of 45 A	47
Fig. 3-32. Parallel connection of several energy storage system and its CAN2.0 communication implementation	48
Fig. 3-33. BMS Protocol V1.3 EMS 14S	49
Fig. 3-34. Dip switch setting	49
Fig. 3-35. BMS CAN interface V1	49
Fig. 4-1. Screening-based energy storage system(14S20P)	51
Fig. 4-2. Discharging/charging current, voltage, power and Ah-counting based SOC (CP protocol) of the energy storage system(14S20P)	52
Fig. 4-3. Discharging/charging voltages of the first cell in each series	53
Fig. 4-4. Comparison between discharging/charging voltages of the first cell in each series and their average value	54
Fig. 4-5. Comparison between 14S20P's terminal voltage and cell voltages×14	55

Fig. 4-6. Difference in voltages among 14S20P's terminal voltage and cell voltage×14	56
Fig. 4-7. Matlab/Simulink-based simulation for SOC estimation(EKF)	57
Fig. 4-8. S-function parameters of the Matlab/Simulink-based simulation for SOC estimation(EKF)	58
Fig. 4-9. EKF-based SOC estimation of the energy storage system(14S20P) (reference value; Ah-counting)	58
Fig. 4-10. SOC estimation considering various noise models	58
Fig. 4-11. Equations of the DEKF	59
Fig. 4-12. Flowchart of the DEKF	59
Fig. 4-13. Resistance-based SOH measurement according to cell group	60
Fig. 4-14. DEKF-based SOC/SOH estimations of the ESS(45℃)	60
Fig. 4-15. DEKF-based SOC/SOH estimations of the ESS(0℃)	61
Fig. 4-16. Equivalent circuit model-based SOC/SOH estimation	62
Fig. 4-17. Line connection for temperature sensing for thermal analysis of the energy storage system	63
Fig. 4-18. Temperatures comparison between inner module and outer case of the energy storage system(experiment vs simulation)	63
Fig. 4-19. Distribution of cell temperatures without busbar(discharging)	64
Fig. 4-20. Distribution of cell temperatures with busbar(discharging)	64
Fig. 4-21. Air distribution in the ESS with busbar(discharging)	65
Fig. 4-22. 14S20P energy storage system and its cell assembly	66
Fig. 4-23. 18650 cell FE modeling in the energy storage system(14S20P)	67
Fig. 4-24. Heat generation of the energy storage system(14S20P)	69
Fig. 4-25. Parameters(Ah-counting based discharge capacity and OCV-HPPC based internal resistance) extraction for thermal analysis	70
Fig. 4-26. Heat generation considering 1.25 A(discharge), 1.65 A(discharge), 0.25 A(charge) and 0.75 A(charge)	71
Fig. 4-27. Location for boundary condition of the case in the ESS	73
Fig. 4-28. Various points for temperature sensing(3D and 2D)	73

Fig. 4-29. Time history of temperature result for discharge 1.25 A	74
Fig. 4-30. Temperature results of discharge 1.25 A considering several materials in the energy storage system	74
Fig. 4-31. Maximum heat generation, temperature distribution(case) considering various time, maximum von-mises stress and maximum deformation under discharge current(1.25 A discharge)	75
Fig. 4-32. Maximum heat generation(30 min, 1.25 A discharge, 29.04℃) (Enlarged)	76
Fig. 4-33. Temperature distribution(case)(30 min, 1.25 A discharge, 25.10℃) (Enlarged)	76
Fig. 4-34. Maximum von-mises stress(1.25 A discharge)(Enlarged)	77
Fig. 4-35. Maximum deformation(1.25 A discharge)(Enlarged)	77
Fig. 4-36. Time history of temperature result for discharge 1.65 A	78
Fig. 4-37. Temperature results of discharge 1.65 A considering several materials in the energy storage system	78
Fig. 4-38. Maximum heat generation, temperature distribution(case) considering various time, maximum von-mises stress and maximum deformation under discharge current(1.65 A discharge)	79
Fig. 4-39. Maximum heat generation(30 min, 1.65 A discharge, 31.80℃) (Enlarged)	80
Fig. 4-40. Temperature distribution(case)(30 min, 1.65 A discharge, 26.40℃) (Enlarged)	80
Fig. 4-41. Maximum von-mises stress(1.65 A discharge)(Enlarged)	81
Fig. 4-42. Maximum deformation(1.65 A discharge)(Enlarged)	81
Fig. 4-43. Time history of temperature result for charge 0.25 A	82
Fig. 4-44. Temperature results of charge 0.25 A considering several materials in the energy storage system	82
Fig. 4-45. Maximum heat generation considering various time under discharge current(0.25 A charge)	83

Fig. 4-46. Temperature distribution(case) considering various time, maximum von-mises stress and maximum deformation under discharge current(0.25 A charge)	84
Fig. 4-47. Maximum heat generation(30 min, 0.25 A charge, 25.20℃) (Enlarged)	85
Fig. 4-48. Temperature distribution(case)(30 min, 0.25 A charge, 25.00℃) (Enlarged)	85
Fig. 4-49. Maximum von-mises stress(0.25 A charge)(Enlarged)	86
Fig. 4-50. Maximum deformation(0.25 A charge)(Enlarged)	86
Fig. 4-51. Time history of temperature result for charge 0.75 A	87
Fig. 4-52. Temperature results of charge 0.75 A considering several materials in the energy storage system	87
Fig. 4-53. Maximum heat generation considering various time under discharge current(0.75 A charge)	88
Fig. 4-54. Temperature distribution(case) considering various time, maximum von-mises stress and maximum deformation under discharge current(0.75 A charge)	89
Fig. 4-55. Maximum heat generation(30 min, 0.75 A charge, 26.50℃) (Enlarged)	90
Fig. 4-56. Temperature distribution(case)(30min, 0.75 A charge, 25.30℃) (Enlarged)	90
Fig. 4-57. Maximum von-mises stress(0.75 A charge)(Enlarged)	91
Fig. 4-58. Maximum deformation(0.75 A charge)(Enlarged)	91
Fig. 4-59. Energy storage system(SP48M)	95
Fig. 4-60. PCM and BMS in the energy storage system(SP48M)	96
Fig. 4-61. Block diagram of the energy storage system(SP48M)	98

ABSTRACT

Distributed Protective Circuit and Thermal Analysis-based Optimal Design for Energy Storage System

Park In Su

Advisor : Prof. Guem-bae Cho, Ph.D.

Department of Electrical Engineering

Graduate School of Chosun University

According to increased request of the energy storage system(ESS), this approach newly investigates an interesting topic on distributed protective circuit and battery management system(BMS) for high efficiency ESS.

There are three key issues for studying above topic. First, the ESS that consists of 280 high-energy cylindrical cells(INR18650-29E) connected in series/parallel. Particularly, to avoid cell's voltage/state-of-charge(SOC) difference in the ESS, two level-based screening process via information on Ah-counting-based discharge capacity and internal resistance by direct current internal resistance(DCIR) and hybrid pulse power characterization(HPPC). Screening-based ESS(14S20P) can provide a simplified equivalent electrical circuit modeling including open-circuit voltage(OCV), RC-ladder, and series resistance. Based on this modeling, it is possible to implement SOC/state-of-health(SOH) estimations for knowing ESS's internal charge and health status. For this goal, this research finally selected adaptive methods such as extended Kalman filter(EKF) and dual extended Kalman

filter(DEKF) for SOC/SOH estimations respectively. For validation of the SOC/SOH estimations, Ah-counting and off-line discharge capacity were considered as reference values. All SOC/SOH estimations results of the EKF/DEKF satisfy the specification within $\pm 5\%$. The thermal analysis of the ESS additionally investigated for checking inner thermal status due to ESS frequent discharging/charging and external temperatures.

The distributed protective circuit is additionally investigated to protect ESS's inner fault that result in low performance on the ESS and its risky. For this, in the ESS, a low cost and high efficiency distributed protective circuit using a parallel operation algorithm is loaded.

Three key issues such as screening-based ESS design, BMS(modeling, SOC/SOH estimations, inner thermal analysis), and distributed protective circuit will be helpful for accomplishing high-fidelity and stable ESS.

I. 서 론

A. 연구 배경

화석연료 사용에 따른 환경오염이 매우 심각한 상황이며, 이를 극복하기 위한 전 세계의 연구가 활발히 진행되고 있다. 이를 위해, 전기에너지를 동력으로 사용하는 연료전지, 전기자동차의 연구 및 태양광, 풍력 등의 신재생에너지 분야에 사용되는 분산전원의 시스템 개발 분야에서 배터리 최적 활용에 대한 활발한 연구가 진행되고 있다[1,2]. 특히, 고전압 및 고용량 어플리케이션의 수요에 맞추어 배터리 단위 셀(원통형, 각형 및 파우치형)의 직렬, 병렬 및 직병렬조합인 에너지 저장시스템(energy storage system; ESS)의 관심이 증가하고 있다[3-10]. 최근에 활발히 연구 및 개발 중인 ESS의 대표적인 어플리케이션은 태양광, 연료전지, 풍력 등 신재생에너지와 연계된 마이크로그리드(microgrid) 및 스마트그리드(smart-grid)이며 이는 생산된 전력을 전력계통에 저장하였다가 전력이 가장 필요한 시기에 공급함으로써 에너지 효율을 높인다. 즉, 생산과 동시에 소비가 이루어지는 전기의 특성에 배터리 저장기술을 도입하여 전기수요가 적을 때, 생산된 전기를 저렴한 가격으로 저장하고 수요가 많을 때, 저장된 전기를 공급하는 시스템을 말한다. 이렇게 다양한 목적에 사용되는 에너지저장시설의 수요에 반하여 전 세계적으로 에너지저장시장이 아직 크게 활성화되지 못하는 이유는 단위 용량(kW)당 에너지저장 비용이 상당하기 때문이다. 반면에, 신재생에너지의 보급으로 급증한 소비전력 문제 및 온실가스 문제를 일정부분 해소하였지만, 신재생에너지 특성상 일정시간에 발전 집중 현상 및 외부 환경에 의한 출력 변화 요소가 크기 때문에 계통의 불안전성을 피할 수 없다. 그러므로, 이를 해결하고자 저비용 대비 고효율이 가능한 ESS의 연구 및 개발이 요구되고 있다.

안정적이고 원활한 전력공급을 위한 ESS의 전제조건은 이의 효율적 운용을 위한 배터리관리시스템(battery management system; BMS)의 최적설계 및 구축이다[11-15]. 배터리관리시스템의 성능을 결정하는 주요 척도는 ESS의 내부 충전상태(state-of-charge; SOC)와 수명상태(state-of-health; SOH) 모니터링 기술이며 파워상태(state-of-power; SOP), 에너지상태(state-of-energy ; SOE), 안전

상태(state-of-safety; SOS), 균형상태(state-of-balance; SOB)등도 배터리 관리 시스템에서 주요 척도로 고려되고 있다. 결국, 위 척도들의 정확한 추정 및 예측을 통해 ESS의 과충전/과방전 방지, 수명 증대 등 ESS의 전반적인 효율 운용을 도모한다[16-20]. 부하조건에 따라 다양한 모니터링 기술을 사용할 수 있는데 대표적인 방법은 전기적 등가회로 모델 기반 적응제어(adaptive control) 방법으로 높은 모니터링 정확도를 얻을 수 있다. 확장칼만필터(extended Kalman filter; EKF)와 이중확장칼만필터(dual extended Kalman filter; DEKF) 등의 방법을 적용하여 SOC/SOH 추정알고리즘을 구현하고 실제 배터리의 충방전 실험을 통해 알고리즘 검증이 필요하다.

상온조건에서 기본 설계되는 ESS는 외기온도에 따라 내부 전기화학적 특성이 변한다. 이러한 온도변화에 따른 ESS의 상이한 내부 전기화학적 특성 가변성을 잘 반영할 수 있도록 조치가 필요하며 이는 온도관리(thermal management) 방법을 관리시스템에 반영함을 말한다. 4계절이 뚜렷하고 계절의 변화에 민감한 우리나라 기후 특성상 온도관리는 필수적이며, 온도관리 기능을 앞의 SOC/SOH 추정알고리즘에 접목하여 외부환경의 변화에 상관없이 최적의 추정상태 및 수명 상태를 확보하도록 한다.

배터리관리시스템이 안정적으로 구현되기 위해서는 ESS의 안전한 설계 및 구축이 선행되어야 한다. 단위 셀의 직렬, 병렬 및 직병렬조합으로 구성되는 만큼 전기화학적 특성이 유사한 단위 셀을 사전에 선별하고 이를 이용하여 ESS를 구성함을 의미한다. 상이한 전기화학적 특성을 가진 단위 셀을 이용하여 ESS를 구성 시 내부 셀 간 전압 및 SOC 불균형을 피할 수 없고 이에 따른 충방전 효율 저하와 수명저하를 야기한다. 그러므로, 방전용량 및 내부저항 등의 파라미터 정보를 토대로 스크리닝 구현 및 이의 정확도 확보가 필수적이다. 하지만, 실제적으로 이러한 스크리닝을 고려하지 않고 ESS를 구성하는 경우가 대부분이며 이를 해결하지 않음에 따른 문제점이 많이 제기되고 있다.

배터리관리시스템의 추가적인 척도는 ESS의 고장진단(fault diagnosis) 기능이다. 예기치 않은 정전이나 순간 전압강하(voltage sag)로 인한 ESS의 이상동작 존재 시, ESS의 노화가 불가피하며, 이로 인해 전반적으로 마이크로그리드 및 스마트그리드의 효율적 운용이 쉽지 않다. 정전이나 순간 전압강하로부터 ESS의

안정적 운용을 보장하기 위한 보호회로의 필요성이 대두되고 있다. 특히, 단위 셀의 개수 및 조합에 따라 각각 정의되는 트레이(tray) 및 시스템(system)의 개별적 보호로부터 전체 ESS의 안전을 위한 분산형 보호회로(distributed protective circuit)의 제안을 통해 예기치 않은 ESS의 이상동작을 사전에 방지해야 한다.

결국, ESS의 효율적 운용을 위해서는 단위 셀 선택 및 이의 스크리닝 기반 ESS 설계(셀 간 전압/SOC 균일성 만족), ESS의 내부상태 모니터링 기술과 온도관리를 반영한 열해석, 그리고 예기치 않은 사고나 고장을 방지하기 위한 분산형 보호회로 설계가 필수적이고 이를 하나로 통합하는 에너지 저장시스템이 구현되어야 한다.

B. 연구 목적

국내외 ESS의 수요에 발맞추어 이의 연구 및 개발이 활발히 진행되고 있으나 이에 반해 운용 도중 예기치 않은 사고 등의 여러 문제가 발생하여 안전하고 고효율이 가능한 ESS의 최적설계 및 운용이 요구되고 있다. 위의 목적을 달성하기 위하여 본 논문에서는 ESS 고효율을 위한 분산형 보호회로 및 배터리관리시스템(열해석 포함) 연구를 하고자 한다. 연구내용은 다음과 같다.

1. 에너지 저장시스템(직렬렬조합 배터리팩) 설계 및 실험이다. 전기화학적 특성이 유사한 단위 셀을 스크리닝 기술을 통해 사전 선별한 뒤, 선별된 셀의 직렬렬조합 구성 뒤 단위 셀과 ESS의 상관관계를 분석한다. 스크리닝이 구현된 ESS 일수록 단위 셀의 등가회로 모델과 알고리즘의 유사성이 존재한다. 이를 위해, INR18650-29E 원통형 셀 선정 및 여러 전기화학적 특성실험(방전용량 및 내부 저항 측정)을 진행하였고 단계별 스크리닝을 적용하여 에너지 저장시스템 14S20P를 설계하였으며 이의 검증을 진행하였다.

2. 배터리관리시스템(BMS) 설계 및 실험이다. ESS의 충방전 전압데이터를 통해 전기화학적 특성을 반영할 수 있는 전기적 등가회로 모델을 구현하였다. 전기적 등가회로 모델은 기본적으로 개방전압, 직렬저항 및 RC-ladder로 구성되며 스크리닝 유무에 따라 전기적 등가회로 모델의 간결성을 고려 하였다. 설계된 전기적 등가회로 모델 기반 전류적산법과 적응제어(확장칼만필터 및 이중확장칼만필터)를 이용하여 SOC/SOH 추정알고리즘을 구현함으로써 각각 ESS의 정확한 충전상태와 수명상태를 체크 하였다. 곧, ESS의 과충전/과방전 방지(SOC) 및 장시간 운용(SOH)를 기대되며 구현된 SOC/SOH 추정알고리즘을 실험데이터를 통해 검증함으로써 ESS내 알고리즘 적용 타당성을 판단 하였다. ESS의 충전/방전으로 인한 내부발열 및 외기온도에 의한 상이한 전기화학적 특성변화를 관찰하기 위해 온도관리기능을 고려하고 이를 위한 열해석을 실시 하였다.

3. 분산형 보호회로 설계 및 실험이다. ESS 내부의 이상동작에 따른 성능저하를 막기 위한 고장진단기능을 수행한다. ESS를 구성하는 특정 트레이 보호회로 시스템 보호기능 검용 및 저비용·고효율이 가능한 분산형 보호회로를 설계하고 이의 병렬운전 알고리즘을 제작 하였다.

II. 이론적 고찰

A. 에너지 저장시스템 개념

현대사회는 고도의 경제 성장과 소득 증대 및 생활수준 향상에 의해 소비전력이 급증하면서 전력수급의 안전성 문제에 직면하고 있다. 또한, 지구온난화 유발 및 이를 가중시키는 온실가스 배출에 대한 규제에 의해 탄소배출권이 중요 이슈로 부각되고 있으며, 이에 따른 거래제도 및 대체방안을 마련하기 위한 태양광, 풍력 등의 신재생에너지의 설치가 정부의 신재생에너지 공급의무화(renewable portfolio standard; RPS)에 의해 확대되고 있다. 신재생에너지 보급으로 급증한 소비전력 문제 및 온실가스 문제를 일정부분 해소하였지만, 신재생에너지 특성상 일정시간에 발전이 집중되는 현상과, 외부 환경에 의한 출력변화 요소가 크기 때문에 이를 계획하고 운영 시 많은 어려움이 있어 계통의 불안전성이 발생한다. 전력수급의 불균형 문제 해결을 위해 ESS가 큰 각광을 받고 있으며, 태양광 및 풍력 등 신재생에너지 발전소에 ESS를 설치 시 신재생에너지공급인증서(REC)가중치 부여, 공공건물에 ESS 설치 의무화, 비상전원의 사용 등 다양한 정부 정책과 맞물려 최근 3~4년간 ESS 프로젝트 수가 급증하고 있다. ESS를 활용한 다양한 재생에너지 시장이 다시 활성화되고 있으며, ESS 시장의 개화가 시작되어 기업의 수익성으로 연결될 것으로 예측되고 있다. 그림 2-1은 ESS의 개념을 나타내고 있다.



Fig. 2-1. Concept map of the ESS

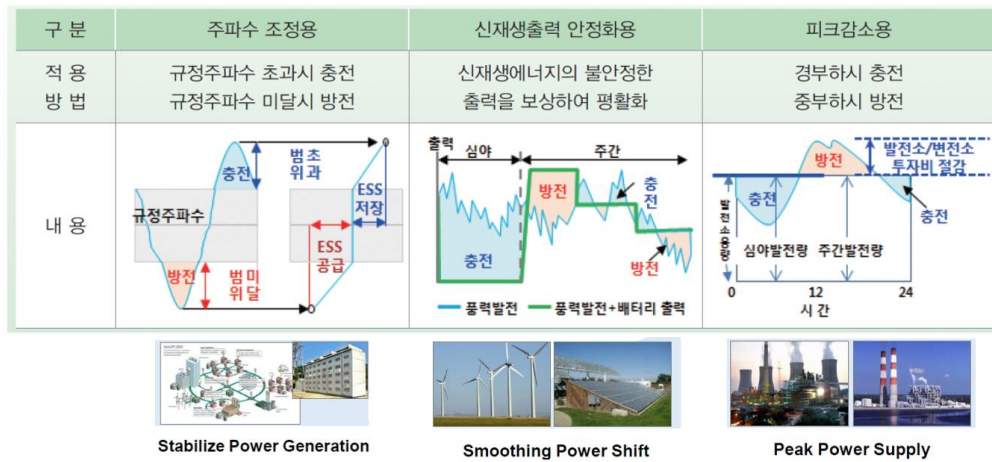


Fig. 2-2. Application fields of the ESS

ESS는 생산된 전력을 저장했다가 전력이 가장 필요한 시기에 공급하여 에너지 효율을 높이는 시스템으로 발전, 송배전, 수용가 단계별 저장이 가능하다. 따라서, ESS를 통해 전력을 효율적으로 사용함으로써, 공급설비 중심에서 수요관리 중심으로 전력공급체계가 변화되었다. ESS에 의해 단방향이었던 전력방향이 양방향으로 변화되었고, 소비자의 능동적인 시장참여가 가능하게 되었다. ESS의 활용 범위가 다양해지면서 고객·용도별로 발전 및 송배전 영역에서 세분된 영역들로 분류되었다. 그림 2-2는 ESS의 응용분야를 나타내고 있다. 발전영역에서는 기존 대형발전 에 부하평준화(load leveling)용, 신재생에너지 통합 발전용으로 세분화 되며 송배전 영역에서는 최대 피크 수요 및 발전량 변동 대응을 위한 여유 용량 확보 차원에서 예비력, 전력망 부하 분산, 주파수 조정영역으로 나누어진다. 소비 단에서 피크 수요 대응을 위한 에너지저장, 신재생에너지 발전 저장, 정전 시 출력 대응(seamless 기능)등 용도별로 다양한 시장에서의 요구사항이 있다. ESS는 전력의 장기저장, 단기저장 등 다양한 용도로 사용가능하며, 기능에 따라 발전자원, 부하자원, 신재생보조, 전력품질 등으로 나뉜다. ESS는 발전자원으로 전력공급, 전력예비력, 주파수 조정서비스(governor free control; GFC, automatic generation control; AGC), 시간대별 요금반응(계통한계가격 system marginal pricing; SMP)으로 사용가능하며, 부하자원으로 송전혼잡감소, 수요관리 용량 입찰, 시간대별 수요 반응(time of use; TOU), 비상전원(uninterruptible power supply; UPS)으로 사용가능하다.

Table 2-1. Several purposes, functions and its benefits of the ESS

구분	기능	편익(100만 kWh당)
발전자원	1 전력공급 용량자원	25억 원/Year 전력공급 용량 시장에 입찰하여 수익창출
	2 예비력 용량자원	11억 원/Year 전력공급 예비력 시장에 입찰하여 수익창출
	3 주파수조정서비스(GFC)	473억 원/Year 실시간으로 변하는 주파수에 즉각적인
	주파수조정서비스(AGC)	167억 원/Year 총 · 방전으로 전력 균형 유지
	4 시간대별 요금반응 (SMP 차액거래)	220억 원/Year 시간대별 SMP 변동에 따른 입찰을 통해 수익창출
부하자원	5 송전혼잡 감소	247억 원/Year 송전 혼잡 시, 방전을 통한 이익 창출
	6 수요관리 용량입찰	80억 원/Year 수용가 내부의 마이너스 부하로써, 수요관리 자원으로 활용(비상시 수요반응)
	7 시간대별 수요반응(TOU)	107억 원/Year 일반용/산업용 시간대별 전기요금에 실시간 으로 반응하여 요금 절감 및 계약용량 감소
신 · 재생 보조	8 비상전원(UPS)	81억 원/Year 정전시, 비상전원으로 활용하여 정전 피해 최소화
	9 신 · 재생 순간 변동 완화	272억 원/Year 신 · 재생에너지원의 급격한 출력변동 완화
	10 지속적 출력 변동 완화	104억 원/Year 신 · 재생에너지원의 출력을 일정하게 유지
전력품질	11 무효전력 제공원	87억 원/Year 계통에 무효전력을 공급하여 전압 조정
	12 송전 안정도 향상	30억/Year 전력 및 부하 급변에 대한 보상, Sag, 공진 등의 과도현상을 보상함으로써 전압안정도 향상

ESS는 화학(chemical), 동역학(kinetic) 및 위치(potential) 에너지 등과 같은 여러 에너지 형태를 활용하여 최종적으로 전기로 변환시킬 에너지를 저장한다. 에너지 저장을 위한 기술의 적용 범위는 저장용량별, 장·단기 운전주기별 옵션에 따라 상이하다. 대용량 저장장치는 용량이 수십~수백MW이며 매일 수 시간의 에너지 저장이 가능하다. 반대로 소규모의 배전 저장장치는 송배전 지점 상에 위치하면서 전력소비자와 직접 연결되어 있는데, 용량이 kW 규모이면서 수 분 단위의 저장이 가능하다.

ESS는 전력품질의 개선에서부터 에너지관리에 이르기까지 그 사용하는 목적과 용도에 따라서 다양한 어플리케이션을 제공한다. 부하관리 등 전력공급을 목적으로 하는 수요관리(demand management; DM) 어플리케이션, 전력품질과 효율향상을 제공하는 계통운영 보조서비스 어플리케이션, 신재생에너지 시스템을 통합하는데 필요한 신재생 어플리케이션 및 분산형 전력저장 어플리케이션이 있다. 전력계통의 피크부하 관리를 위해 수요관리 어플리케이션은 경부하 시 유휴전력을 저장하고 과부하 시에는 저장된 전력을 사용함으로써 부하관리를 가능하게 한다. 에너지 저장시스템을 계통과 결합할 시 시스템의 용량 증가, 송전예비력 확보, 전력차익거래 등의 효용가치를 창출할 수 있다. 즉, 에너지저장기술은 전력의 수급균형과 가격경쟁력 및 에너지효율을 높이는 기술로서 전력예비력을 확보하여 전력피크 및 대규모 정전사고 등에 효과적으로 대응할 수 있도록 한다.

계통운영 보조서비스 어플리케이션은 전력계통의 신뢰성 및 전력품질 유지를 위하여 수분 이하의 수요공급의 편차 발생에 따른 전력에너지의 공급량 조절을 통해 전력계통의 주파수를 일정하게 유지하는 기능이며, 주파수조정 서비스, 예비력 서비스, 전압조정 서비스 등을 포함한다. 향후에 대부분의 전력저장시스템이 계통운영 보조서비스를 제공하는 데 있어 핵심적인 역할을 하게 될 것으로 전망된다. 전력수급에 불균형이 발생하면 주파수가 변동하게 되어 전력품질을 유지시키지 못하는 문제가 발생하며, 이러한 주파수 변동은 전력계통 전체적으로 나타난다. 그러므로, 주파수 저하를 방지하기 위하여 주파수 변동에 자동적으로 대응하여 발전기 출력을 가변시키는 주파수 추종(governor free) 운전과 중앙전력관제센터에 설치된 EMS에서 원격으로 발전기 출력을 조정하는 자동발전제어(automatic generation control) 운전이 있다. 전력수급상의 불균형 해소를 위해 전력을 확보하는 예비력서비스(operation service)를 통해, 10분 이내에 활용이 가능한 운전 중인 발전력(대기 예비력)과 120분 이내에 활용이 가능한 정지 중인 발전력(대체 예비력)을 얻을 수 있다. 계통운영 보조서비스를 통하여 예비력을 확보하여 전력수급 균형을 이루게 하는 기능과 전력설비의 고장 또는 발전기 정지 등과 같은 시스템 우발사태에 대해 신속한 대응을 할 수 있는 장점이 있다. 전압조정(voltage regulation)은 무효전력(reactive power) 공급과 밀접하며 국부적으로 발생한다. 장거리 송전이 불가하고, 무효전력 소비 지점에서 계통 기준 전압의 유지가 필요하다. 현재 ESS 기술은 상용화 정도, 원천·부품소재 기술 수준, 실증 경험 측면에서 선진국보다 아직 열세인 상태에 있다. 그렇지만, 삼성 SDI, LG화학, 효성, LS산전 등의 대기업이 핵심 분야인 배터리와 PCS 분야에서 경쟁력을 확보하고 있다. 이에, 정부는 2011년 5월 ‘에너지저장기술 개발 및 산업화 전략(K-ESS 2020)’을 수립하여 실증사업과 산업화 전략을 추진하고 있다. 이는 ESS가 발전용-송전망-수용가 등 전력망에 널리 활용되는 사회 실현 및 ESS 산업 강국 도약을 비전으로 제시하고 있으며 2020년까지 세계시장 점유율 30%, kWh당 가격 20만원(배터리 기준), 수명 20년, 국내 보급 1700 MW 달성의 목표를 설정하고 이를 실현하기 위한 구체적인 추진과제와 계획을 포함하였다.

ESS는 안정적이고 효율적인 에너지수급체계 구축에 효과적인 수단으로 막대한 시장 잠재력이 예상되어 새로운 성장 동력으로 국내·외에서 주목받고 있다.

주요 선진국들은 ESS 시장의 확대를 위해 기술개발 지원과 함께 정부 예산으로 실증사업을 추진하고 있으며, 보조금 지급, 세금 감면 및 의무화 등을 통해 보급을 추진하고 있다. 세계 ESS 시장은 아직 초기단계로 실증사업과 시범보급 사업이 추진되고 있다. 실증사업을 통해 기술 신뢰성이 확인되고, 가시적인 성과들도 점차 나타나고 있다. 국내 ESS 시장은 아직 초기 단계로 기술 신뢰성과 경제성 확보를 위한 전략적 노력이 요구된다. 경쟁 우위에 있는 ICT 기술과 리튬이온전지 기술을 기반으로 ESS 시장창출에 보다 적극적이고 선제적으로 대응해 나간다면 글로벌 ESS 시장 확보 경쟁에서 우위를 차지할 수 있을 것으로 전망된다.

배터리는 장치 산업의 특성을 가지면서 대규모의 투자가 필요하고 주로 한·중·일 업체 중 대기업 중심으로 시장을 리딩해 갈 것으로 예상된다. ESS용 배터리 산업은 IT용 배터리 산업과 달리 발주처의 주문 물량이 크고, 규모의 경제를 통한 이익 실현이 되어야 하므로 대규모의 설비 투자가 필요하다. 이는 전기차용 배터리 산업과 유사한 장치 산업인 점과 유사하다. 향후 ESS 시장은 수십~수백 GWh 규모의 시장으로 성장이 예상되는 상황에서 배터리 업체들은 지속적인 대규모 투자가 요구되므로, 기업 규모가 큰 메이저 배터리 업체들의 지속적인 시장 장악력이 커지리라 예상된다.

Table 2-2. Industry trend of the ESS key components

구분	Battery	PCS	SI
사업의 성격	• 장치 산업 • 대규모 투자 필요	• 조립 산업 • 중소규모 투자 필요	• 장치 산업 • 중소규모 투자 필요
제조사 특징	• 한국, 중국, 일본 업체 강세 • 일부 미국, 프랑스 가세 • 중소 업체의 영향력 미미	• 전통적으로 충전기 강자인 미국, 스위스, 네덜란드, 프랑스 중심	• (중대형) 유틸리티 회사, 기존 PCS회사, 전문 SI 업체 중심의 시장 구조 • (소형) 일본, 독일, 중국, 한국, 미국 중심이며, 대기업 및 중소기업이 혼재
시장 환경	• 지속적인 대규모 설비 투자가 요구되면서 대기업 중심의 시장 구조 • 중소기업의 시장 환경의 어려움	• 높은 기술력과 품질 보증을 위해 대기업 중심의 시장 구조	• (중대형) EPC 역할도 수행하는 ESS SI 사업 요구 • (소형) 품질/가격경쟁력/A/S를 위해 대기업 중심의 시장 구조

PCS는 조립산업의 특성을 가지면서 중소 규모의 투자가 필요하고, 주로 전통적으로 중전기 산업에서 강자인 스위스, 프랑스, 미국, 독일, 네덜란드 업체 중심으로 시장이 형성되어 왔으며, 향후에도 오랜 경험과 기술력을 보유한 기업이 지속적으로 ESS의 PCS 시장을 이끌어 나갈 것으로 전망된다. PCS 산업은 ESS용 배터리 산업과 달리 사업 초기에 대규모의 투자를 단행한 후 제조 설비를 보유한 상태에서 사업을 수행하지 않고 시장 상황에 맞게 조립 라인을 점진적으로 증설하여 중소 규모의 투자가 필요한 산업이다.

조립 산업의 특성을 가지면서 중소 규모의 투자가 필요한 ESS 시스템 구축 분야는 주로 유틸리티 회사를 통해 수행되고 있으나 전력기기 회사들도 지속적으로 사업에 진출하리라 전망된다. 유틸리티 업체들은 전력 계통 기술 노하우를 바탕으로 배터리 및 PCS를 구매하여 ESS를 시스템 구축하는 EPS(설계/조달/시공; engineering/procurement/construction) 역할까지 수행한다.

B. 에너지 저장시스템 주요구성

ESS는 배터리와 BMS, 전력변환장치(power conditioning system; PCS), PMS/EMS(power management system/energy management system)등 다양한 요소들을 목적에 따라 하나의 시스템으로 연동하여 통합관리, 통제 및 제어하는 종합적인 시스템이다. 배터리는 PCS를 거쳐 전기를 저장하였다가 필요할 때 전기를 방전하는 역할을 하는 구성부품이고, BMS는 배터리의 전압, 전류 및 온도를 측정하여 배터리의 안전상태와 고장 유무를 전달하고 배터리의 온도와 셀밸런싱을 제어하며, PCS 및 운영시스템과 통신하여 배터리의 데이터를 제공하는 기능을 담당한다. PCS는 배터리로부터 저장된 직류전력을 교류로 변환하여 전력계통에 전력을 공급하는 기능, 직접 교류부하에 전력을 공급하는 기능, 전력계통으로부터 교류전력을 직류로 변환하여 배터리에 전력을 저장하는 기능을 하는 장치로서 용도와 분야에 따라 변전소 적용 ESS용 PCS, 신재생에너지 적용 ESS용 PCS, 수송가 적용 ESS용 PCS등으로 분류한다. EMS는 배터리의 상태 모니터링, PCS의 상태 모니터링 및 제어를 수행하는 운영시스템이다. PMS는 전력망의 곳곳에 많은 수의 ESS를 설치하고 네트워크 기술과 전력전자기술 기반 스마트 통합관리를 통해 수요 및 분산전원의 간헐성을 완충하는 장치이다. 그림 2-3은 ESS의 내부 구성도를 나타내고 있다.

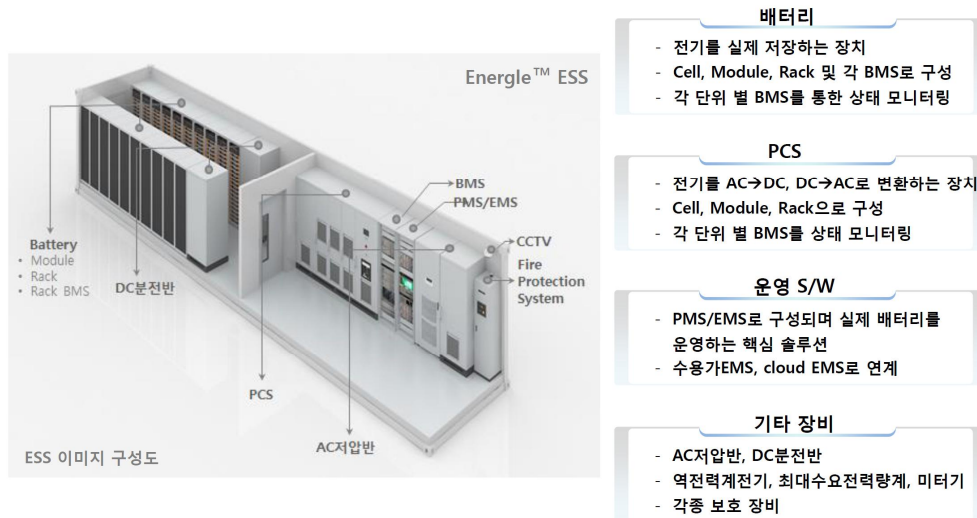


Fig. 2-3. Internal configuration of the ESS

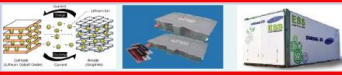
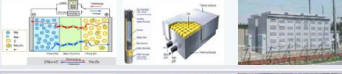
구분	기술	특징
배터리 방식	LIB 	- 리튬이온의 양극과 음극 이동원리 - 장점: 고에너지밀도, 고에너지효율 - 단점: 고비용, 안전성 미검증
	NaS 	- 나트륨이온의 전해질 이동 - 장점: 고에너지밀도, 대용량화 용이 - 단점: 고비용, 저에너지효율
	VRFB 	- 전해액 내 산화/환원 전위차 이용 - 장점: 저비용, 대용량화 용이 - 단점: 저에너지밀도, 저에너지효율
	Super capacitor 	- EDL의 두 직렬 커패시터 에너지 저장 - 장점: 고출력밀도, 장수명, 안정성 - 단점: 저에너지밀도, 고비용
비배터리 방식	CAES 	- 압축된 공기를 가열하여 터빈을 돌림 - 장점: 장시간저장, 저비용, 단가 - 단점: 화석연료 사용 불가피
	Flywheel 	- 전기에너지의 회전 운동에너지로 전환 - 장점: 고에너지효율, 장수명 - 단점: 저에너지밀도, 구축비용 과다

Fig. 2-4. Comparison between the battery type and non-battery type used as energy storage in the ESS

배터리의 경우 리튬이온전지를 이용한 ESS 시장의 본격 개화기가 도래하였다. 미국의 유틸리티업체 등을 중심으로 실증을 시작하였고 3년 이후 안정적 운영이 확인되었으며 연간 2조원의 전기자동차용 리튬이온시장이 형성되면서 대형전지의 원가가 500USD/kWh로 낮아짐에 따라 UPS 등에서 가격 경쟁력을 갖추기 시작하였다. 또한, 태양전지 및 풍력발전 비중이 크게 증가하여 전력망의 안전성을 확보해야 하는 요구가 급증하여 2020년에는 500억달러 수준으로 성장하며 전체 리튬이온전지 셀 시장 성장의 견인차 역할을 할 것으로 기대되고 있다. 그림 2-4는 배터리 방식과 비배터리 방식을 비교하여 나타내었다. ESS는 에너지를 저장하는 방식에 따라 리튬전지, 나트륨황전지(NaS), 바나듐레독스흐름전지(vanadium redox flow battery; VRFB), 슈퍼커패시터 등의 배터리방식과 양수, 압축공기저장, 플라이휠 등의 비배터리 방식으로 나뉜다. 배터리방식은 화학적 에너지 저장장치이며 수요 및 공급측면에서 에너지 효율이 좋다. 비배터리방식은 물리적 에너지 저장장치이며 고출력의 에너지를 신속히 저장할 수 있으나 초기 투자비가 과다한 단점이 있다. 리튬이온전지는 가격을 제외한 대부분의 요구되는 특성에서 특별하게 나쁜 것이 없으므로 ESS 시장을 주도하리라 예측된다. 납축전지 및 나트륨황전지는 비용이 리튬이온전지 대비 30~40% 수준 가격이 낮지만 순간 출력을 높일 수 없어 단기간에 고출력을 공급해야 하는 단

주기 ESS에는 적용이 거의 불가능하다. 슈퍼커패시터 및 플라이휠은 고출력 특성은 좋으나 저장시간이 과도하게 짧아 독립적으로 ESS는 불가능하다. ESS에서 배터리가 차지하는 비중은 약 35%정도이고 나머지 65%는 배터리를 포함한 배터리팩, PCS, PMS/EMS, 배전 및 통신 설비공사 등으로 구성된다. ESS는 대용량 배터리가 대규모로 연결되어 있고 이의 입력/출력이 크므로 BMS의 기술적인 난이도가 상당하다. BMS는 기본적으로 각각 배터리의 전압, 저항 및 온도 등을 체크하여 배터리 셀의 안정화 여부를 판단하고 대규모 배터리가 연결되어 있어 배터리팩의 성능 향상을 위해서 셀 간 밸런싱을 맞춰주고 문제가 발생할 때 전력을 끊어 버리는 보호기능을 제공해야 한다.

PCS는 기본적으로 에너지 저장장치의 직류전력을 전력 계통연계기준에 부합한 교류전력으로 변환하여 공급하거나, 교류전력계통으로부터의 교류전력을 에너지저장장치의 직류전력으로 변환하는 양방향 전력변환의 동작이 요구된다. 또한, ESS용 PCS는 사용용도, 에너지저장장치의 종류, 적용되는 전력시스템에 따라 요구되는 PCS의 구조, 성능, 시험 및 검사 항목에 따라 사양이 다양하다. 시장요구에 따라 높은 신뢰성 향상과 효율 개선을 위한 연구가 진행되고 있다. 이를 위해 멀티레벨 인버터, 불평형 3상 부하에 효율적인 운전을 위한 시스템 구성, 펄스폭 변조 제어(pulse width modulation; PWM) 방법의 이중화, 안정성 확보를 위한 인증에 대한 연구 및 적용, 컨테이너에 대용량 PCS 병렬 설치 및 상위 EMS에 연동하여 동작하기 위한 응답 속도 향상에 관한 연구가 진행되고 있다. 3상 ESS용으로 다양한 타입의 PCS가 사용되며, 일반적으로 2-level 3-leg PCS가 간단한 구조 및 쉬운 장점이 있어 널리 사용되고 있다. 대용량화의 추세에 따라 높은 전압레벨의 배터리가 요구되므로, 이에 알맞은 멀티레벨의 PCS를 많은 업체에서 연구하고 있다. 일반적으로 멀티레벨 PCS의 경우 도통손실은 늘어나지만 스위치에 걸리는 역전압이 감소하므로 스위칭 손실이 줄어들고 효율이 향상되며, 높은 직류전압의 배터리에 사용 가능하다. 신재생에너지원과 에너지저장장치를 동시에 사용가능한 하이브리드 타입의 PCS 토폴로지 연구가 진행되고 있으며 그림 2-5와 같다. 더불어, 0.1%의 효율이라도 향상하기 위해 태양광 대용량 PCS에서는 가변구조(variable structure)를 제어하고 이를 대용량 ESS용 PCS에 동일하게 적용하는 연구가 진행되고 있다. 사용용도에 따라 수 MW에서 수십 MW

까지 병렬 확장 운전이 필요하기 때문에 PCS의 효율적인 병렬 운전 및 개별 PCS 통신지연을 방지하는 연구가 진행되고 있다. ESS는 상위 EMS와 통신으로 연계해서 동작하는 빠른 응답 특성이 요구된다.

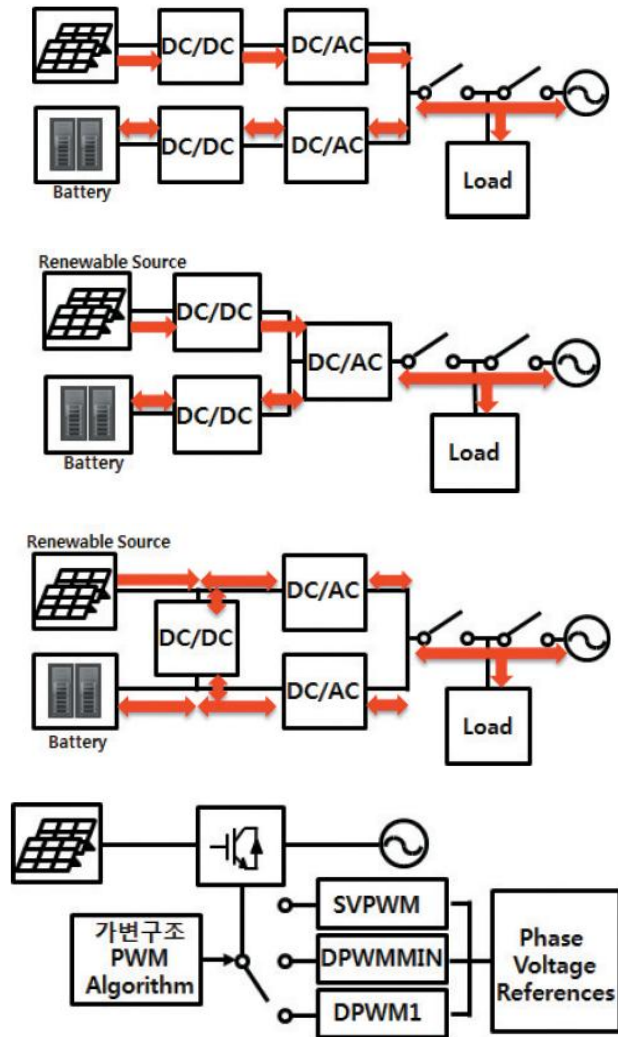


Fig. 2-5. PCS hybrid structure and its power flow for renewable source and energy storage system

더욱이, 주파수조정용 ESS의 경우 주파수를 계측하여 운전에 대한 제어명령이 전달되어 PCS 정격출력시간을 200ms 이내로 요구하므로, 데이터 처리 및 통신에 대한 시간지연을 고려한 PCS의 응답특성이 요구된다. 이에, 제어명령이 PCS에 전달된 시점부터 정격 충전 또는 방전까지의 최대 16.7ms(1/60Hz) 이내로 동작할 수 있도록 응답특성을 향상시킨다. 모듈라로 구성된 시스템 구성에서 핫스왑(hot-swap) 기술이 적용되는데, 이는 시스템의 동작 상태를 유지하면서 시스템을 구성하는 요소들의 교체, 변경, 수리가 가능토록 한다. 모듈라 기반의 ESS의 일부 모듈라에서 수리 및 유지보수의 필요가 있을 때 전체 시스템을 정지하는 것이 아니라 시스템을 운영하여 전력공급의 안정성을 유지하고 일부 모듈라만을 교체하거나 수리할 수 있다. 이 때, 정지된 일부 모듈라의 용량을 동작하는 다른 모듈라가 부하를 분담하여 한시적으로 과부하 동작을 함으로써 전체 시스템의 용량을 유지할 수 있다. 모듈라 기반의 ESS 장점은 다양한 배터리 호환성이다. 집중화 ESS 시스템에서 안정적 운용을 위해서 배터리의 유지보수 시 동일한 종류의 배터리를 사용해야 수명 및 특성이 유지되므로 모듈라 기반의 ESS는 필수적이다. 또한, EMS와의 연계를 통해 수명 및 진단예측이 가능하고, SOC 운용조건을 달리할 수 있다.

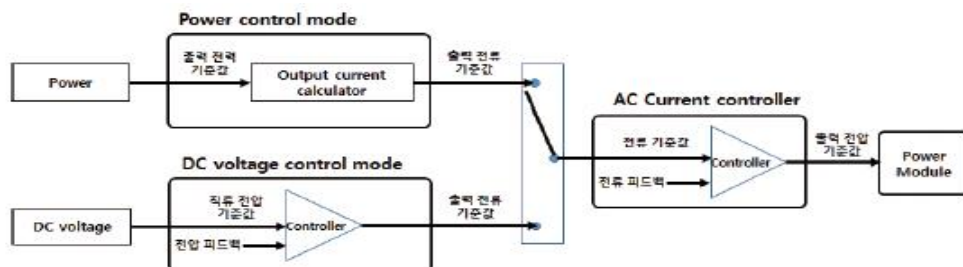


Fig. 2-6. Grid-connected ESS controller

계통 독립형 ESS 제어기술은 섬과 같은 계통 미연계 도서지역에 신재생 발전원을 이용하여 전력을 안정적으로 공급하고 규정된 전력품질을 만족시키기 위해 반드시 필요한 기술이다. 계통독립 운전모드로 동작하면 ESS가 전압을 스스로 발생시켜 전압원으로서 계통의 전압과 주파수를 일정하게 유지한다. 이를 위해, 정격전압과 주파수가 설정되어 있어야 하며, 일반적으로 비례적분 제어기로 구현된 전압제어기를 통해 설정된 전압과 계통측 출력 전압의 크기와 주파수를 비교하여 오차를 보상하는 방식으로 구현된다.

기술개발 초기 계통 독립형 ESS는 주로 단일 ESS의 단독 전압제어를 통해 구현되었지만, 최근에는 ESS 용량이 대형화되면서 다수의 ESS를 병렬로 제어하는 기술이 활발히 진행되고 있다. 계통독립형 ESS의 병렬제어 기술은 크게 주종 제어방식(master-slave control), Droop 제어 방식(droop control)으로 구분되는데, 주종제어방식은 현재 가장 보편적으로 적용되는 방식으로 한 대의 master ESS와 다수의 slave ESS로 구성된다. Droop 제어방식은 ESS의 주파수-전압 수하특성을 이용한 제어방식으로 ESS간 별도의 통신 없이 제어가 가능하다. 모듈 간 순환전류 발생 시 순환유효전력은 모듈 간 출력전압의 위상편차에 대한 함수로, 순환무효전력은 출력전압의 크기편차에 대한 함수로 나타낸다. 이는 출력의 주파수를 이용해서 순환유효전력을, 출력전압의 크기를 이용해서 순환무효전력을 제어할 수 있다는 것을 보여준다. 각 ESS는 출력전압과 전류를 측정하여 계산하고, 계산된 유/무효전력을 수하특성에 따라 Droop gain과 곱해 출력전압과 주파수 제어를 수행한다.

EMS는 전력망과 부하를 모니터링 하여 ESS가 적기에 작동하고 충전할 수 있도록 제어하는 시스템이다. ESS는 사용 용도에 따라서 충전시기와 방전시기에 차이가 있는데 이를 프로그램화하여 컴퓨터가 제어함을 의미한다.

Ⅲ. 에너지 저장시스템 설계

A. 직병렬조합 에너지 저장시스템 설계

1. 18650타입 원통형 셀

본 논문에서는 3kW급 직병렬조합 에너지 저장시스템 설계를 위해 18650타입 원통형 셀을 사용하였다. 일반적으로, 에너지 저장시스템의 부하조건에 따라 고출력(high-power) 혹은 고용량(high-energy)용 18650 원통형 셀이 사용되는데 본 논문에서는 장주기용 에너지 저장시스템을 위한 고용량용 18650 원통형 셀로서 그림 3-1과 같은 삼성SDI의 INR18650-29E를 선택하였다. 표 3-1은 INR18650-29E 원통형 셀의 동작 특성을 정리하였다. 표준전압(3.65 V)일 때, 만충전압(4.2 V)부터 만방전압(2.5 V)까지 0.2C의 방전전류를 적용하여 2.75~2.85 Ah의 용량이 측정된다. 이 중, 2.75 Ah의 최소용량 정보를 이용하여 최대 방전전류/충전전류가 2.75 A(1C)로 결정되며, 원통형 셀 안전을 위한 충전전류를 1.375 A(0.5C)로 권고한다. 충전방식은 정전류(constant current; CC)-정전압(constant voltage; CV)으로서 동일크기의 충전전류를 적용하고, 배터리 전압이 만충전압에 도달 시 만충전압은 유지하며 점진적으로 충전전류의 크기를 줄여 충전을 마무리 한다.



Fig. 3-1. 18650 Li-Ion cell with a cylindrical type(INR18650-29E, 2.9 Ah)

Table 3-1. Cell specification of the INR18650-29E

Item	Specification
3.1 Nominal Capacity	2,850 mAh (0.2C, 2.50 V discharge)
3.1.1 Typical Capacity	2,850 mAh (0.2C, 2.50 V discharge)
3.1.2 Minimum Capacity	2,750 mAh (0.2C, 2.50 V discharge)
3.2 Charging Voltage	4.20 ± 0.05 V
3.3 Nominal Voltage	3.65 V(0.2C discharge)
3.4 Charging Method	CC-CV (constant voltage with limited current)
3.5 Charging Current	Standard charge: 1,375 mA
3.6 Charging Time	Standard charge: 3hours
3.7 Max. Charging Current	2,750 mA(not for cyclelife)
3.8 Max. Discharging Current	2,750 mAh(continuous discharge) 8,250 mAh(not for continuous discharge)
3.9 Discharging Cut-off Voltage	2.50 V
3.10 Cell Weight(max. (g))	48 g
3.11 Cell Dimension	Diameter(max.) : 18.40 mm Hight(max.) : 65.00 mm
3.12 Operating Temperature (Cell Surface Temperature)	Charge : 0 to 45℃ Discharge : -20 to 60℃
3.13 Storage Temperature	1 year : -20~25℃ 3 months : -20~45℃ 1 month : -20~60℃

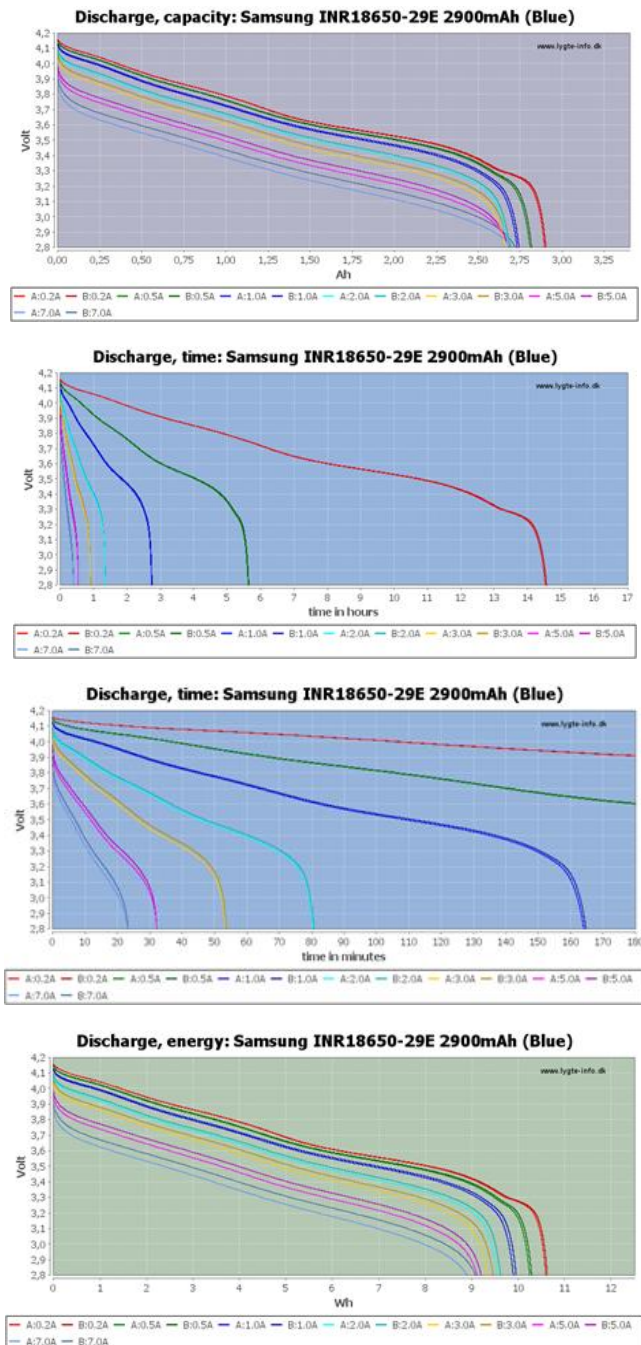


Fig. 3-2. Discharge curves of the INR18650-29E

2. 스크리닝 기반 직병렬조합 에너지 저장시스템

에너지 저장시스템의 안전한 운용을 위해서는 시스템을 구성하는 원통형 셀의 전기화학적 특성이해가 선행되어야 한다. 각 원통형 셀의 전기화학적 특성이 서로 상이할 수 있으므로 이의 특성을 잘 파악하고 이를 사전에 선별해야 한다. 스크리닝의 목적은 다음과 같다. 첫째, 원통형 셀 간의 성능 편차 예측 및 균일한 동작 특성을 갖는 셀들을 이용하여 에너지 저장시스템을 구성할 때 불필요한 밸런싱 비용을 줄일 수 있으며 노화를 방지한다. 둘째, 시스템의 방전 용량, 충전 및 방전 사이클 특성, 과충전/과방전에 대한 안전성을 확보한다.

스크리닝을 위해서는 원통형 셀의 여러 전기화학적 특성실험을 통한 실험데이터가 요구되므로 그림 3-3의 충방전기 세트를 이용하였다.

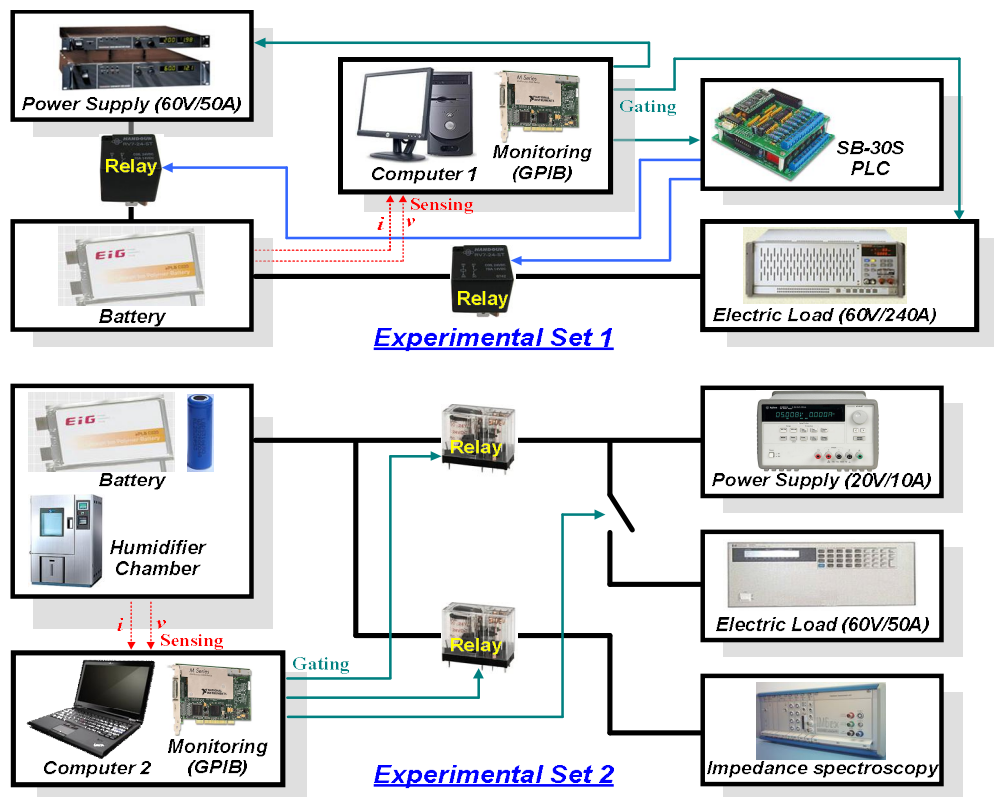


Fig. 3-3. Two experimental setups for obtaining various experimental results

표 3-2는 충방전기 2개 세트의 품명, 정격 및 용도를 나타낸다. 세트 1은 실험 장치의 정격 상 정격용량이 큰 폴리머 셀($\text{LiMn}_2\text{O}_4/\text{LiFePO}_4$) 및 에너지 저장시스템 실험을 담당하며 배터리의 충전 역할을 담당하는 전원공급장치(DC power supply), 방전 역할을 담당하는 전기부하기(electric load)로 구성되어 있다. 전기 화학적 특성실험에 사용될 기본 전류프로파일 및 실제 하이브리드 자동차 구동용 전류프로파일이 실험배터리의 정격용량에 맞게 스케일이 조정된다. 메인 PC(personal computer)는 주행 사이클에 대한 지령을 GPIB(general purpose interface bus)를 통해 전원공급장치와 전기부하기에 전달한다. 원통형 셀의 충방전은 SB-30S PLC를 이용한 RS232 통신을 통해 릴레이 제어되며 측정된 전압 및 전류 정보는 1초 단위로 GPIB를 통해 메인 PC에 저장된다.

Table 3-2. Detailed specification of two experimental setups

		품 명	정 격	용 도
충방전기 세트 1	전원공급장치	DCS60-50E/ Sorensen	0~60 V/0~50 A Max. 3 kW	충전
	전기부하기	3317C/Prodigit	0~60 V/0~240 A Max. 1.8 kW	방전
충방전기 세트 2	전원공급장치	E3633A/Agilent	0~20 V/0~10 A Max. 0.2 kW	충전
	전기부하기	6050A/ Hewlett Packard	0~240 V/0~50 A Max. 1.8 kW	방전
	항온항습기	U-6652P-CH3/ Hitachi	-70~180℃ 온도 30~100% 습도	온도실험
	임피던스 측정기	IM6ex/ Zahner	-10~10 V/-2~2 A Frequency range 10 μHz ~3 MHz	임피던스 측정

세트 2는 정격용량이 작은 원통형 리튬이온 셀의 실험을 주로 담당하며 전원공급장치와 전기부하기 외에 추가로 항온항습기와 임피던스 측정기를 세트에 연결하여 셀의 온도 실험 및 임피던스 측정을 수행한다. 앞의 실험세트 1과 달리 RS232 통신이 사용되지 않고, 메인 PC의 주행 사이클 지령을 GPIB 통신을 통해 전원공급장치, 전기부하기 및 릴레이에 전달하며 측정된 전압, 전류정보는 0.1초 단위로 GPIB를 통해 메인 PC에 저장된다. 항온항습기는 임의로 외기온도를 변화시켜 온도에 따라 가변하는 전기화학적 특성을 파악하며 주파수 성분 분석은 임피던스 측정기가 담당한다.

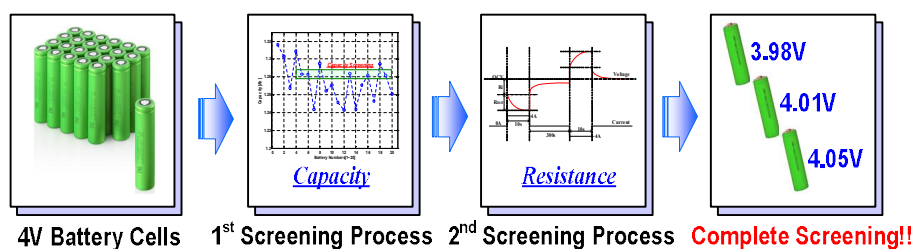


Fig. 3-4. Two-level based screening process

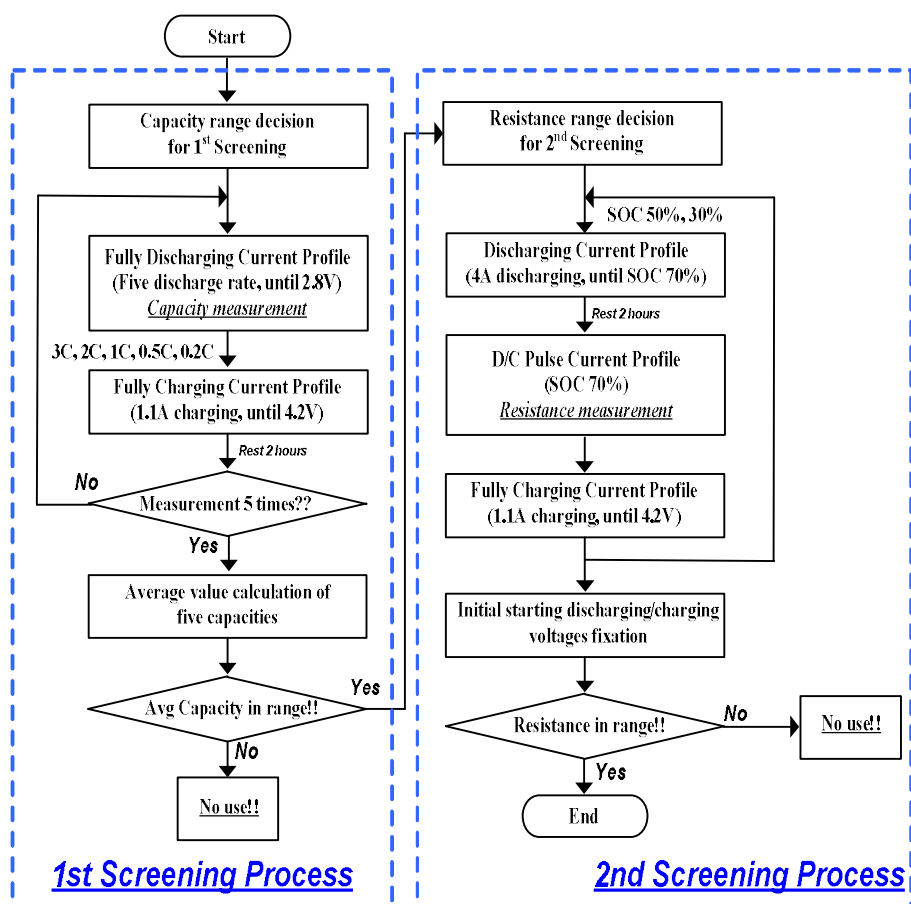


Fig. 3-5. Flowchart of two-level based screening process

그림 3-4는 본 논문에서 적용한 스크리닝 방법이다. 해당 방법은 원통형 셀의 방전용량과 내부저항(파라미터; 전압변화정보)를 스크리닝 척도로 고려하고, 이를 순차적으로 적용해 스크리닝을 진행한다. 다수의 INR18650-29E 원통형 셀의 방전용량 측정 및 비교를 통해 1차 스크리닝 프로세스를 구현한다. 방전용량을 이용한 스크리닝은 전류적산법(Ah-counting)으로 구하며 이는 식 (3.1)-(3.2)와 같다.

$$\text{Capacity} = \int i dt \quad (3.1)$$

$$\text{SOC} = \text{SOC}_0 - \frac{\int i dt}{\text{Capacity}} \quad (3.2)$$

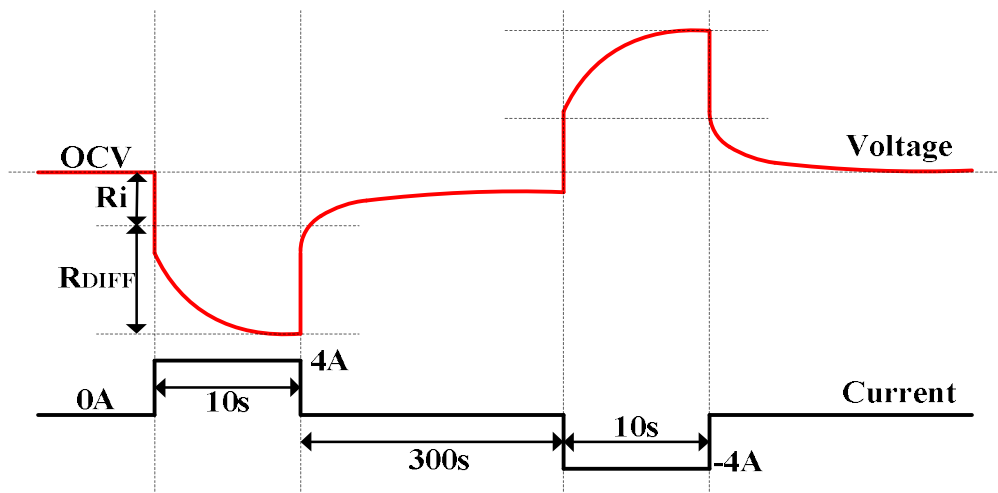


Fig. 3-6. Current profile for 2nd screening process at arbitrary SOC points

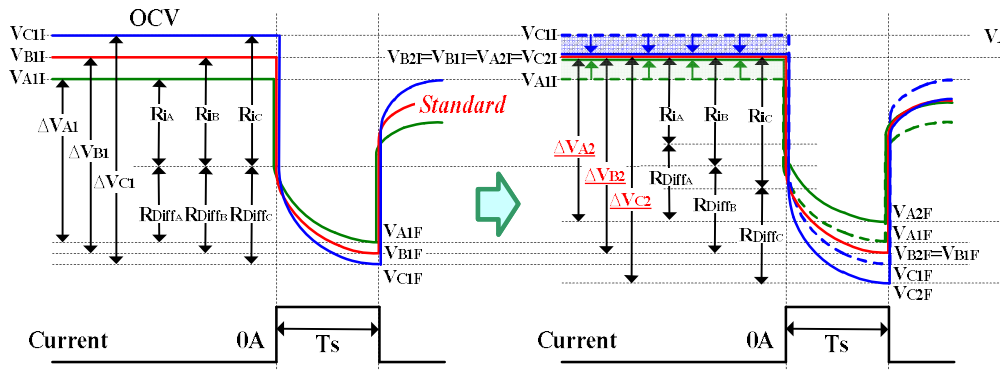


Fig. 3-7. Initial starting voltage points(ISVP) fixation

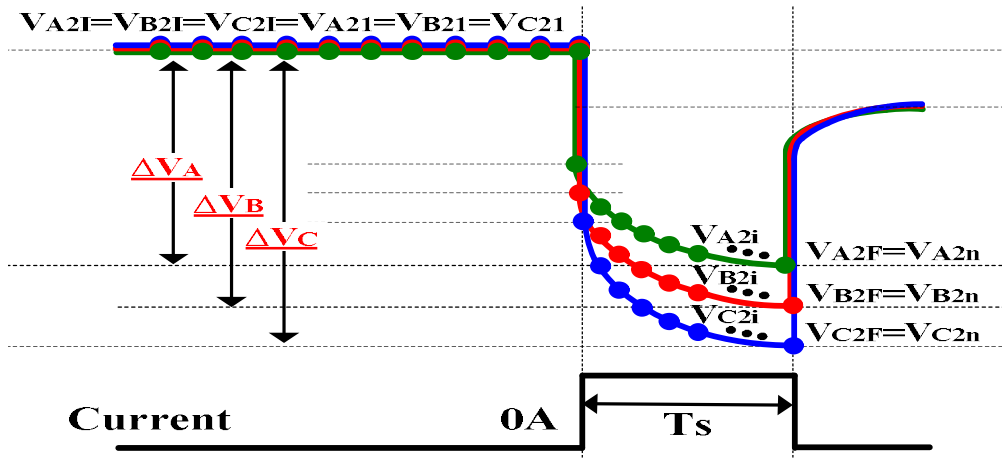


Fig. 3-8. Cell's averages and standard deviations for ISVP fixation

$$\text{Battery(A)}_{\text{AVE}} = \frac{\sum_{i=1}^n V_{A2i}}{n} \quad (n=1,2,\dots,F) \quad (3.3)$$

$$\text{Battery(A)}_{\text{STD}} = \sqrt{\frac{\sum_{i=1}^n (V_{A2i} - \text{Battery(A)}_{\text{AVE}})^2}{n}} \quad (n=1,2,\dots,F) \quad (3.4)$$

1차 스크리닝을 통해 선별된 원통형 셀들을 대상으로 2차 스크리닝을 진행한다. 동일한 전압 및 SOC 조건에서 동일한 전류 적용 시 전압변화를 관찰한다. 그림 3-6은 2차 스크리닝을 위한 특정 SOC에서의 전류프로파일을 나타낸다.

방전전류와 충전전류가 10초간 주어질 때, 각각의 전압변화정보를 이용하여 2차 스크리닝을 진행한다. 정교한 2차 스크리닝을 위해 전류프로파일에 따른 전압변화의 기준을 맞추어야 한다. 이럴 시, 하나된 개방전압 OCV를 얻을 수 있고 각 셀의 전압변화정보의 비교가 가능하다. 그림 3-7은 원통형 셀들의 초기전압을 맞추는 과정을 나타낸다. 예를 들어, 셀 3개의 서로 다른 초기전압 ($V_{A1I}-V_{C1I}$)이 주어진다고 가정할 때, 셀 B의 초기전압 V_{B1I} 을 기준으로 정한다. 이 때, 셀 A와 C의 초기전압이 $V_{A1I} \Rightarrow V_{A2I}$, $V_{C1I} \Rightarrow V_{C2I}$ 과 같이 이동하며, 셀 3개의 초기 기준전압이 하나로 맞춰진다. 위의 룰을 이용하여 주어진 방전조건에 따른 단위 셀들의 전압 평균 및 표준편차를 그림 3-8에 나타내었다. 더불어 셀 A 전압의 평균과 표준편차를 식 (3-3)과 (3-4)에 나타내었다. 더불어, 주어진 방전조건에서 셀 3개의 평균(AVE)과 표준편차(STD) 비교를 식 (3-5)와 (3-6)에 각각 나타내었다.

$$\text{Battery(A)}_{\text{AVE}} > \text{Battery(B)}_{\text{AVE}} > \text{Battery(C)}_{\text{AVE}} \quad (3.5)$$

$$\text{Battery(A)}_{\text{STD}} < \text{Battery(B)}_{\text{STD}} < \text{Battery(C)}_{\text{STD}} \quad (3.6)$$

Table 3-3. AVE and STD with voltage variance

Voltage variance (Initial voltage-Final voltage)	Discharging		Charging	
	AVE	STD	AVE	STD
Large voltage variance	small	large	large	large
Small voltage variance	large	small	small	Small

표 3-3은 충전/방전 시 전압변화 조건에 따른 평균(AVE)/표준편차(STD) 특성을 나타낸다. 충전/방전 조건에 상관없이 전압변화 정보가 큰 경우 표준편차가 큰 값을 나타낸다. 방전용량은 만충부터 만방까지 다양한 방전 C-rates (3C, 2C, 1C, 0.5C, 0.2C)에 따라 방전을 진행한다. 임의의 방전 C-rate를 이용하여 용량 측정 후 만방상태이므로 0.5C의 충전 C-rate를 이용하여 배터리를 만충시킨다. 총 5번의 방전용량 실험 후, 측정된 방전용량들의 평균값을 토대로 1차 스크리닝을 완료한다. 1차 스크리닝을 구현한 원통형 셀들을 바탕으로 2차 스크리닝, 즉 내부저항을 측정한다. SOC 70%, 50% 및 30%일 때 주어진 펄스전류에 따른 전압변화정보를 가지고 2차 스크리닝을 진행한다. 전압변화정보를 비교할 때, 미세한 초기전압의 불일치가 존재할 가능성이 있으므로 초기전압 맞춤과정을 실시한다. 최종적으로, 전기화학적 특성이 유사한 셀을 얻을 수 있다. 즉, 모든 스크리닝 과정 후 선별된 셀들을 이용하여 에너지 저장시스템 구성 시 안전한 운용이 가능하다.



Li-ion Battery	
Model	EMSP48-29E-57
Nominal Voltage	51.1V
Nominal Capacity	57Ah
Operation Voltage	42~56V
Charging Voltage	56V
Charging Current	25A Max.
Discharging Current	75A Max.
Operation Temperature	-20 ~ 45°C
Date	2015. 03
 E P 1 5 0 3 0 0 0 1	

Fig. 3-9. Screening-based energy storage system(14S20P)

B. 배터리관리시스템(BMS) 설계

1. 에너지 저장시스템 전기적 등가회로 모델

앞에서 스크리닝 기반 설계된 에너지 저장시스템 충전 및 방전에 문제가 없음을 확인하였다. 하지만, 수시로 충전 및 방전이 수행되는 에너지 저장시스템의 특성상 내부상태의 정확한 모니터링이 반드시 필수적이다. 따라서, 에너지 저장시스템의 배터리관리시스템(BMS)을 구현 및 탑재함으로써 효율적 운용을 도모한다.

첫 단계는 에너지 저장시스템의 전기적 등가회로 모델 구현이다. 전류프로파일에 의한 충전 및 방전전압을 토대로 회로요소인 저항, 커패시터, 인덕터 등을 이용하여 모델을 구현한다. 스크리닝 기반 설계된 에너지 저장시스템의 실험을 통해 내부 셀 간 전압 불균형이 거의 없음을 확인하였으므로 에너지 저장시스템의 전기적 등가회로 모델은 단순해진다. 우선 단위 원통형 셀의 전기적 등가회로 모델은 랜들스(Randles) 모델로부터 시작되며, 개방전압(OCV), 내부저항(R_i) 및 RC-ladder등으로 구성된다. OCV는 전기회로에 아무런 저항이 없는 순수한 전압의 상태로서 미세한 전류도 흐르지 않음을 나타낸다. 내부저항과 RC-ladder를 측정하는 방법은 스텝전류를 이용한 방법, EIS를 이용한 방법 외에 배터리의 펄스파워 측정을 통한 hybrid pulse power characterization(HPPC) 방법과 direct current internal resistance(DCIR) 방법이 있다.

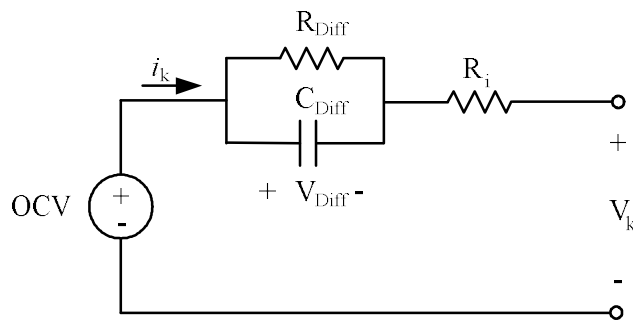


Fig. 3-10. Equivalent electrical circuit model of a unit cell

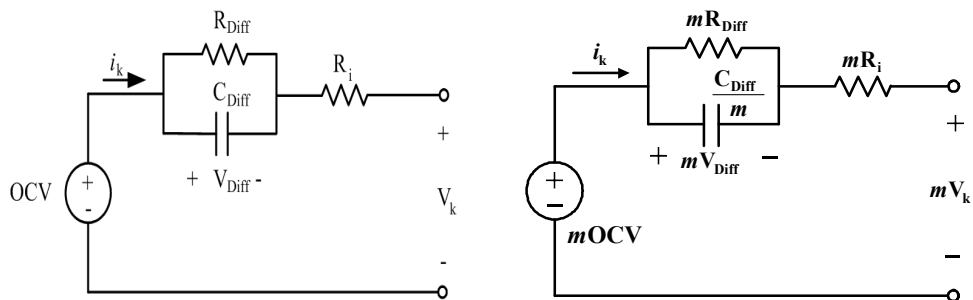


Fig. 3-11. Equivalent electrical circuit models of unit cell and screening-based energy storage system in series connection

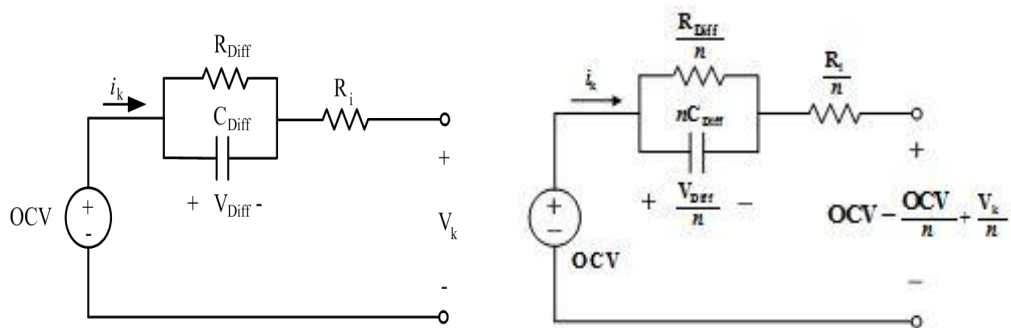


Fig. 3-12. Equivalent electrical circuit models of unit cell and screening-based energy storage system in parallel connection

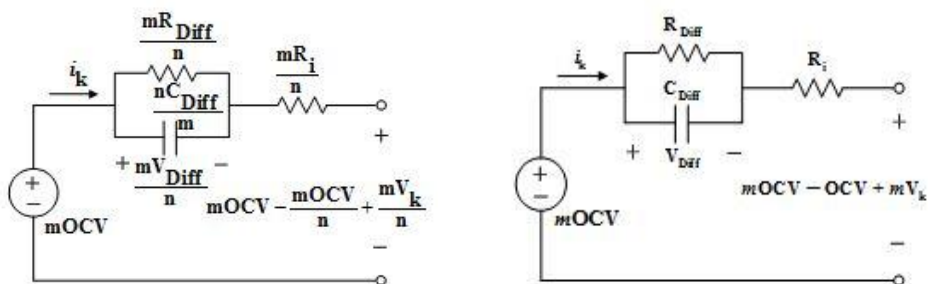


Fig. 3-13. Equivalent electrical circuit models of unit cell and screening-based energy storage system in series/parallel connection

$$\begin{aligned}
 OCV_{(\text{Series})} &= mOCV = OCV_1 + OCV_2 + \cdots + OCV_m \\
 C_{n(\text{Series})} &= C_{n_1} = C_{n_2} = \cdots = C_{n_m} \\
 R_{i(\text{Series})} &= mR_i = R_{i_1} + R_{i_2} + \cdots + R_{i_m} \\
 R_{\text{Diff}(\text{Series})} &= mR_{\text{Diff}} = R_{\text{Diff_1}} + R_{\text{Diff_2}} + \cdots + R_{\text{Diff_m}}
 \end{aligned}$$

$$mV_k = mOCV - mV_{\text{Diff}} - mR_i i_k$$

Fig. 3-14. Model equations of the energy storage system in series connection

$$\begin{aligned}
 OCV_{(\text{Parallel})} &= OCV = OCV_1 = OCV_2 = \cdots = OCV_n \\
 R_{i(\text{Parallel})} &= \frac{R_i}{n} = \frac{1}{\frac{1}{R_{i_1}} + \frac{1}{R_{i_2}} + \cdots + \frac{1}{R_{i_n}}} \\
 R_{\text{Diff}(\text{Parallel})} &= \frac{R_{\text{Diff}}}{n} = \frac{1}{\frac{1}{R_{\text{Diff_1}}} + \frac{1}{R_{\text{Diff_2}}} + \cdots + \frac{1}{R_{\text{Diff_n}}}} \\
 C_{n(\text{Series})} &= nC_n = C_{n_1} + C_{n_2} + \cdots + C_{n_n}
 \end{aligned}$$

$$OCV - \frac{OCV}{n} + \frac{V_k}{n} = OCV - \frac{V_{\text{Diff}}}{n} - \frac{R_i}{n} i_k$$

Fig. 3-15. Model equations of the energy storage system in parallel connection

그림 3-10의 단위 셀 전기적 등가회로 모델을 토대로 직렬, 병렬 및 직병렬조합 에너지 저장시스템 등가회로 모델로 확장할 수 있다. 단위 셀 대비 직렬, 병렬 및 직병렬조합 시 전기적 등가회로 모델을 각각 3-11부터 3-13에 나타내었다. 전기적 등가회로 모델 구조는 동일하지만 에너지 저장시스템 내 셀의 조합 형태와 각 조합별 셀의 개수에 따라 내부 파라미터의 크기가 변한다. 직렬조합 및 병렬조합 시 셀의 개수에 따른 내부 파라미터 크기는 그림 3-14와 3-15의 방정식을 통해 계산할 수 있다. 충전 및 방전실험을 통해 에너지 저장시스템의 내부 파라미터 동적특성을 파악하고 이를 통해 등가회로 모델의 RC-ladder를 결정한다. 즉, 스크리닝 구현 시 단위 셀과 에너지 저장시스템의 전기적 등가회로 모델의 선형성 상관관계를 분석한다.

2. 확장칼만필터(EKF)/이중확장칼만필터(DEKF)

앞에서 설계된 에너지 저장시스템의 전기적 등가회로 모델을 통해 배터리관리 시스템을 구현하기 위해서는 적응제어 방법이 반드시 필요하다. 그러므로, 대표적인 적응제어 방법인 확장칼만필터(extended Kalman filter; EKF)와 이중확장칼만필터(dual extended Kalman filter; DEKF)를 소개한다. 참고로, 이중확장칼만필터는 확장칼만필터를 2개 병렬 연결한 형태로서 기본원리는 동일하다.

백색소음(white noise)에 의해 교란되는 시스템에서 내부상태(state)를 최소자승오차(least mean square)로 추정하는 것이 칼만필터이다. 기본적으로 정확한 모델에 기반하여 추정할 때, 내부상태의 오차가 백색소음의 형태(독립, 가우시안 분포)를 띠면 직전 상태 값을 가지고 과거의 모든 데이터를 통계적으로 처리한 것과 같은 효과를 얻을 수 있다. 또한, 모델에 의한 내부상태 추정오차가 반드시 백색소음의 형태를 띠지 않더라도 상당한 정확도로 추정이 가능하다. 칼만필터 알고리즘은 선형시스템으로 모델링 된다.

$$\text{:진행방정식} \quad x_k = F_{k-1} \cdot x_{k-1} + w_{k-1}, \quad w_k \sim N(0, Q_k) \quad (3.7)$$

$$\text{:측정방정식} \quad z_k = H_k \cdot x_k + v_k, \quad v_k \sim N(0, R_k) \quad (3.8)$$

직전상태 추정값(posteriori value,(+))을 가지고 현재의 예측값(priori value,(-))을 계산한 뒤 예측된 값을 가지고 결과값을 예측한다. 실제값(Z_k) 측정 뒤, 실제값과 예측값의 오차에 칼만게인(K_k)을 곱해서 내부상태의 현재 예측값을 보정한 다. 이렇게 보정된 값이 최종 추정값이 된다.

$$\hat{x}_k(-) = F_{k-1} \cdot \hat{x}_{k-1}(+) \quad (3.9)$$

$$\hat{z}_k(-) = H_k \cdot \hat{x}_k(-) \quad (3.10)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + \bar{K}_k(z_k - \hat{z}_k) \quad (3.11)$$

예측값 보정을 위한 칼만게인 계산은 진행방정식에서 사용된 F_k 와 Q_k (노이즈 분산)를 가지고 내부상태 추정값의 오차분산(P_k)을 계산한다. 여기서 오차분산은 추정된 값으로서 실제값이 아니다. 진행방정식이 어느 정도 정확도를 가지고 있지 않다면 계산된 오차분산(P_k)은 실제값과 맞지 않으며 전체 시스템의 정확도는 저하되는 문제를 끼치게 된다.

$$P_k(-) = F_{k-1} P_{k-1}(+) F_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (3.12)$$

$$\bar{K}_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + R_k]^{-1} \quad (3.13)$$

$$P_k(+) = \{I - \bar{K}_k H_k\} P_k(-) \quad (3.14)$$

$$\text{If } R_k = 0 \quad \bar{K}_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T]^{-1} = H_k^{-1} \quad (3.15)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + \bar{K}_k (z_k - \hat{z}_k) = H_k^{-1} z_k \quad (3.16)$$

$$\text{If } R_k = \infty \quad \bar{K}_k = P_k(-) H_k^T [H_k P_k(-) H_k^T + \infty]^{-1} = 0 \quad (3.17)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + 0(z_k - \hat{z}_k) = \hat{x}_k(-) \quad (3.18)$$

내부상태의 오차분산을 계산한 후, 위의 값과 측정 방정식을 이용하여 칼만게인(K_k)을 구한다. 마지막으로, 칼만게인에 의해 내부상태가 보정되었으므로 오차 분산도 식 (3.16)과 같다. 칼만게인은 칼만필터에서 측정방정식을 어느 정도로 이용할 것인가를 나타낸 지표이다. 칼만게인이 작으면 측정방정식에 의한 보정을 작게 가져가는 것이고, 이와 반대로 칼만게인이 크면 측정방정식을 신뢰하여 보정을 크게 가져감을 의미한다. 칼만게인은 측정오차 분산인 R_k 에 의해 좌우되며 이는 측정방정식의 정확도를 나타내는 지표이다. R_k 값이 극단적으로 0이 되면, 내부상태는 완전히 측정방정식에 의해 추정된다. 이에 반해 R_k 값이 아주 클 경우, 시스템의 진행방정식에 기반해서 내부상태를 추정하게 된다. 이러한 원리를 바탕으로 초기값 오차와 누적 오차와 같은 전류적산법에 비해 전기적 등가회로 모델이 정확할 때는 큰 칼만게인에 의해 회로 모델을 많이 사용하고, 외란에 의해 회로 모델이 잘 맞지 않을 때는 작은 칼만게인에 의해 전류적산법이 주로 사용된다.

칼만필터가 선형시스템에 적합한 것이라면 확장칼만필터(EKF)는 비선형시스템을 위해 고안된 것이다. 원리는 칼만필터와 동일하며 대신 비선형시스템을 작은 구간으로 선형화시켜 칼만필터 기법을 적용시킨 것이다. 진행방정식의 f_k 와 측정방정식의 h_k 를 선형화시켜 사용한다.

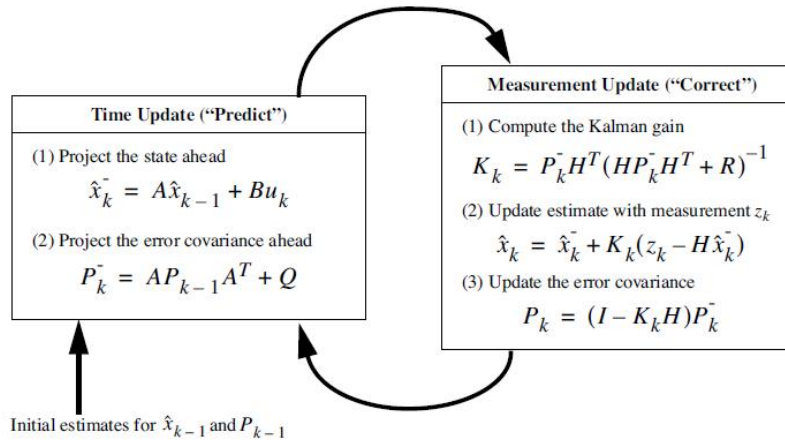


Fig. 3-16. Time & Measurement updates of the EKF

$$: \text{진행 방정식} : x_k = f_{k-1}(x_{k-1}) + w_{k-1}, \quad w_k \sim N(0, Q_k) \quad (3.19)$$

$$: \text{측정 방정식} : z_k = h_k(x_k) + v_k, \quad v_k \sim N(0, R_k) \quad (3.20)$$

$$\hat{x}_k(-) = f_{k-1}(\hat{x}_{k-1}(+)) \quad (3.21)$$

$$\hat{z}_k(-) = h_k(\hat{x}_k(-)) \quad (3.22)$$

$$A_{k-1} \approx \left. \frac{\partial f_k}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_{k-1}(-)} \quad (3.23)$$

$$\hat{x}_k(+) = \hat{x}_k(-) + \bar{K}_k(z_k - \hat{z}_k) \quad (3.24)$$

$$H_k^{[1]} \approx \left. \frac{\partial h_k}{\partial x} \right|_{x=\hat{x}_k(-)} \quad (3.25)$$

$$P_k(-) = A_{k-1}P_{k-1}(+)A_{k-1}^T + Q_{k-1} \quad (3.26)$$

$$\bar{K}_k = P_k(-)H_k^T [H_k P_k(-)H_k^T + R_k]^{-1} \quad (3.27)$$

$$P_k(+) = \{I - \bar{K}_k H_k\} P_k(-) \quad (3.28)$$

칼만필터에서 진행방정식에 의해 예측된 내부상태는 측정방정식에 의해 수정되는데 이 때, 측정방정식이 부정확하거나 다른 요인에 의해 큰 노이즈를 포함할 경우, 내부상태를 잘못된 방향으로 유도할 가능성이 있다. 이를 줄이기 위해, 측정방정식에서 큰 오차가 발생할 경우 이를 내부상태 추정에 사용하지 않는 것이 데이터 리젝션(data rejection)의 기본개념이다. 측정방정식에 의한 내부상태 보정 방법을 100% 사용하지 않는 것을 데이터 리젝션이라 하고, 측정 노이즈 값을 상수가 아닌 모델로서 구체화 한 것을 측정 노이즈 모델이라고 한다. 개념상으로 보면, 측정된 데이터를 100% 사용하지 않고, 일정 정도 줄여서 사용한다는 개념으로 볼 수 있다. 측정방정식에서 노이즈를 정확하게 묘사하는 것이 중요한데, 이는 칼만게인을 결정하는 중요한 변수이다. 이상적인 경우 이 노이즈는 백색소음으로 분산은 가우시안 분포이고 평균은 0이다. 하지만, 일반적인 경우 시스템을 완벽하게 모델링 할 수 없으므로 실제시스템에서 측정된 실측치와 모델을 통한 예측치 사이의 모델오차도 노이즈에 포함된다. 모델이 부정확할 때, 모델 오차에 의한 노이즈 값이 크게 나타나며, 이는 대개 가우시안 분포를 나타내지 않는다. 그러므로 칼만필터가 수식적으로 유도된 오차범위보다 더 큰 오차를 나타내기도 한다. 하지만, 대체로 노이즈가 평균값으로 0을 유지한다면 큰 문제는 아니다.

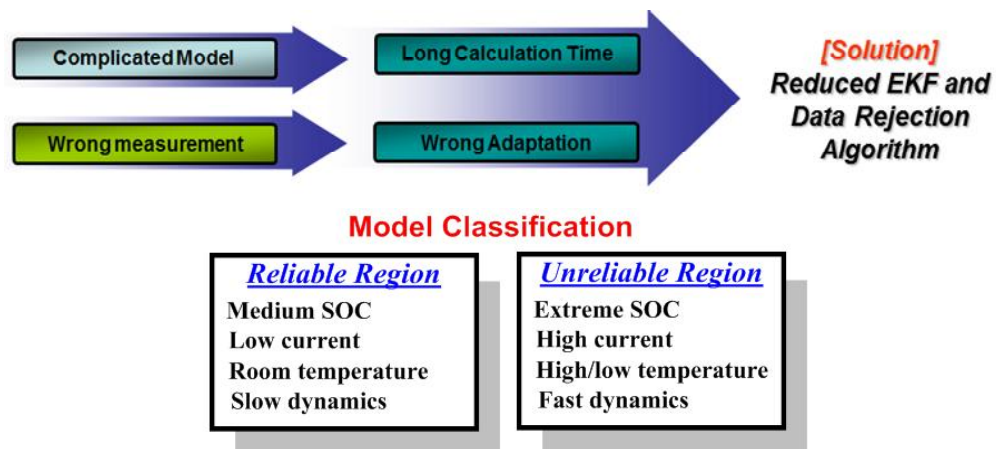


Fig. 3-17. Data rejection and noise model at reliable/unreliable region

노이즈와 칼만게인은 역의 관계를 가진다. 노이즈가 크다는 것은 모델 오차가 크다는 것이고, 이런 경우 칼만게인을 줄여 측정방정식의 영향을 줄인다.

$$\begin{aligned} \left| z_k - \hat{z}_k \right| &> A \max \quad or \\ \left| (z_k - \hat{z}_k) - (z_{k-1} - \hat{z}_{k-1}) \right| &> A \max \end{aligned} \quad (3.29)$$

식 (3.29)의 방식은 이전 데이터 리젝션 방식이다. 비교적 많은 상황에서 동작하지만 문제가 되는 경우도 있다. 내부상태의 초기값이 틀린 경우와 같이 예측값과 실제값의 차이가 측정방정식의 부정확성에 의한 오차가 아닌 실제 내부상태의 부정확성에 의한 오차일 경우 데이터 리젝션은 오히려 칼만필터의 특성을 느끼게 하거나 최악의 경우 반복되는 데이터 리젝션으로 칼만필터가 작동되지 않게 할 가능성도 있다.

3. SOC/SOH 추정 알고리즘

앞에서 언급했듯이, 본 논문의 에너지 저장시스템의 SOC/SOH 추정 알고리즘 구현 및 결과제시를 위해 적응제어(EKF/DEKF)기반 방법을 이용한다. 알고리즘 구현 전에 SOC/SOH 정의 및 이의 구현을 위한 여러 방법은 다음과 같다.

State-of-charge(SOC)란 배터리의 전체 이용 가능한 에너지 대비 현재 충전된 상태를 나타내는 정규화된 값(normalized value)으로 정의한다. SOC 측정 방법이 많이 연구되고 있으며 전류적산법, 파라미터 측정법, 발견적 학습법, 그리고 적응 방법이 대표적이다. 전류적산법은 SOC 정의에 기반한 방법으로서 구현이 간단하며, 초기값 및 측정 전류의 정확성이 주어질 때 추정의 정확도가 우수하다. 하지만, 적분형 알고리즘의 특성을 가지므로 초기값 및 측정 전류의 정확성이 보장되지 않으면 측정오차의 누적이 불가피하다. 파라미터 측정법은 내부의 물리적 특성을 이용하여 SOC를 추정하는 실험 기반 방법으로서 임피던스 측정기를 이용한다. 현재의 상태를 변화시키지 않고 SOC 추정이 가능하며, 물리적 파라미터를 측정하므로 배터리 상태에 대한 다른 정보도 얻지만 파라미터 측정 구현이 어려우며 노이즈에 민감하다. 수많은 실험 데이터를 근거로 입출력(전류, 전압)에 관계된 함수를 찾아내고 이를 SOC 추정에 이용하는 발견적 학습법은 과거의 데이터에 영향을 받지 않고 현재의 입력에 있어서 SOC를 추정하므로 전류 적산법의 오차 누적의 단점을 해결할 수 있다. 또한, 내부 상태를 정확히 알 필요가 없으므로 시스템 구현이 간단하다. 하지만, 실험 데이터를 얻기 위해 많은 시간이 소요된다. 적응 방법은 전류 적산법의 오차 누적의 단점, 파라미터 측정법의 노이즈 민감의 단점 및 발견적 학습법의 오랜 실험 시간 소요의 단점을 어느 정도 해결할 수 있는 방법이지만, 계산이 복잡하여 시스템 구현이 복잡하다. 결국, SOC를 추정을 위한 근본적인 해결책을 제시하기가 쉽지 않다.

State-of-health(SOH)란 방전용량이나 전류에 따른 전압 변화의 정보를 비교하여 판단한다. 용량 정의는 노화에 따른 방전용량의 감소 및 정격용량의 80% 기준을 확인하여 수명을 판단한다. 용량 정의의 단점은 방전용량을 측정하기 위한 실험시간이 오래 소요된다는 점이다. 반면에, 전류를 적용하여 전압 변화 정보를 얻고 이를 비교하는 펄스 파워 정의는 시간적인 측면에서 효율적인 방법으로서 많이 적용되고 있다.

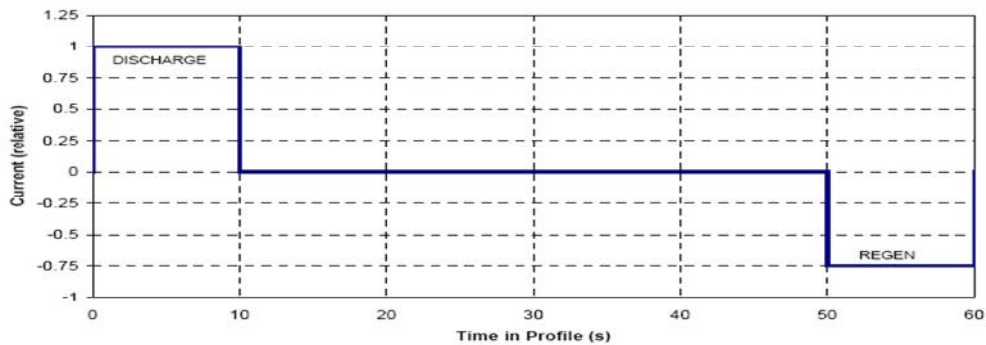


Fig. 3-18. Hybrid pulse power characterization(HPPC) profile

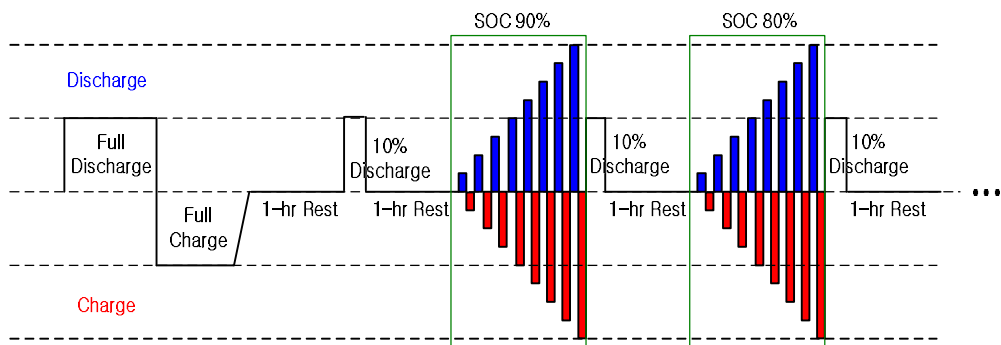


Fig. 3-19. Direct current internal resistance(DCIR) profile

펄스 파워 정의 기반 SOH 예측의 대표적인 방법은 HPPC와 DCIR 방법이다. HPPC 방법은 특정 SOC에서 방전(1C) 및 충전전류(0.75C)를 적용 후 얻어진 전압 변화 정보를 이용하여 펄스 파워 능력(pulse power capability)을 측정한다. DCIR 방법 기반 SOH 예측 방법은 특정 SOC에서 방전 및 충전전류를 적용하여 전압 변화를 얻는 점은 HPPC 방법과 유사하지만, 특정 SOC에서 전류에 따른 전압 변화의 기울기를 구하며 이를 10% SOC의 간격을 적용하여 전 영역을 고려한 뒤 펄스 파워 능력을 구한다. HPPC와 DCIR 방법에서 보듯, SOH 예측은 실험 데이터에 근거하며 SOC 추정에 비해 간단하다. 또한, 단시간의 충방전이나 일시의 외부요인으로 인한 값의 가변성이 적다. 그렇지만, 과충전 혹은 과방전이 오래 지속될 경우 배터리의 노화가 불가피하다. 그러므로, 운용할 수 있는 허용 전류 범위 안에서 충전 및 방전을 수행하는 것이 노화를 방지하는 길이다.

적응제어를 사용하여 SOC를 추정할 경우 두 가지 문제가 존재한다. 첫 번째 문제는 칼만필터는 모델에 기반한 내부상태 추정방법으로 모델이 정확하지 않으면 추정된 값의 정확도도 보장될 수 없다. 하지만, 배터리의 경우 비선형적인 특징과 더불어 시간에 따라 상태가 변하므로, 정확하게 모델링하기 위해서는 수 많은 내부상태 변수와 비선형 함수가 필요하다. 하지만, 현실적으로 이러한 모든 것을 모델에 포함시키는 것은 어려우므로 오차는 필연적으로 발생한다. 또 하나의 문제는, 칼만필터 자체는 다른 알고리즘 보다 좀 더 복잡한 계산방식을 가지고 있어서 계산시간이 오래 걸린다. 특히, 모델에서 사용하는 내부상태가 많을수록 더 긴 계산시간을 요구한다. 모델의 오차를 줄이기 위해서는 내부상태를 많이 사용하는 복잡한 모델을 사용해야 한다. 하지만, 계산시간의 증가를 초래하므로, 결국 계산시간과 모델 오차는 일종의 trade-off 관계이다. 계산시간의 증가는 시스템 구현 비용의 증가를 초래하기 때문에, 배터리 모델의 오차를 감수하더라도 단순화된 모델이 필요하다. 단순화된 모델에 따른 오차를 해결하기 위해서는 여러 방법이 필요하다. 모델을 정교하게 구성하여 모델 오차를 0에 가깝게 만들고, 단순화 과정을 거쳐서 시스템에 적용할 수 있는 수준으로 조정한다. 이럴 경우, 어떤 부분이 단순화 되어 모델의 오차를 발생하는지 파악 가능하다. 단순화되어 모델에서 빠진 부분은 이후 노이즈 모델에 포함시켜 내부상태 추정에서 발생할 수 있는 오차를 줄이기 위해 사용된다.

축소된 칼만필터 진행방정식의 내부상태는 SOC와 RC-ladder의 커패시턴스 부분이다. 측정방정식은 배터리의 단자전압과 관련된 식으로 구성된다. OCV와 SOC 관련식은 OCV 테이블을 이용한다. 이를 수식으로 표현하면 다음식 (3.30) ~ 식 (3.34)와 같다.

$$\frac{dSOC}{dt} = \frac{i}{Cn} \dots\dots\dots SOC_K = SOC_{K-1} + \frac{\Delta t}{Cn} \cdot i_{K-1} \quad (3.30)$$

$$\frac{dV_{Diff}}{dt} = \frac{i}{C_{Diff}} - \frac{V_{Diff}}{C_{Diff} \cdot R_{Diff}} \dots V_{Diff_K} = \left(1 - \frac{\Delta t}{C_{Diff} \cdot R_{Diff}}\right) \cdot V_{Diff_K-1} + \frac{\Delta t}{C_{Diff}} \cdot i_{K-1} \quad (3.31)$$

$$\begin{bmatrix} SOC_K \\ V_{Diff_K} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{C_{Diff} \cdot R_{Diff}} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} SOC_{K-1} \\ V_{Diff_K-1} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{Cn} \\ \frac{\Delta t}{C_{Diff}} \end{bmatrix} \cdot i_{K-1} \quad (3.32)$$

$$V_T = h_K(OCV, V_{Diff}) - V_S = OCV - V_{Diff1} - V_{Diff2} - V_S \quad (3.33)$$

$$\frac{\partial h_K}{\partial x_K} = \begin{bmatrix} \frac{\partial h_{soc}(SOC)}{\partial SOC} & 0 \\ 0 & -1 \end{bmatrix} \quad \text{where } OCV = h_{soc}(SOC), h_{soc} = f_{ocv}^{-1} \quad (3.34)$$

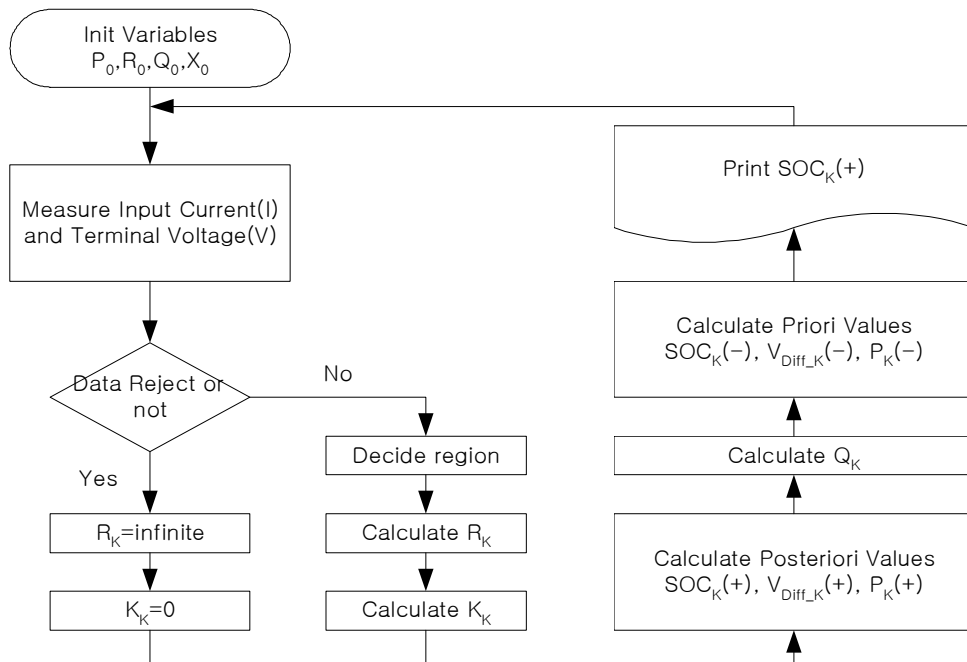


Fig. 3-20. Flowchart of the EKF

노이즈 값은 측정되는 값으로 영역에 따라 값이 다르게 나온다. 또한 임의분포를 보이기 때문에 전체적으로 측정하여 분산과 평균을 구하게 된다. 하지만, 노이즈에는 임의 노이즈 뿐만 아니라 모델 오차도 포함되어 있으므로 이 부분은 어느 정도 영역별로 구별하여 측정한다. 모델의 설계와 단순화 과정을 거치면서 모델의 입장에서 신뢰성 있는 영역(reliable region)과 신뢰할 수 없는 영역(unreliable region)으로 구별할 수 있게 된다. 배터리 모델의 경우 SOC의 영역, 전류크기, 온도, 전류의 동적특성에 따라 영역을 구별할 수 있다. 이럴 경우, 각 영역별로 따로 노이즈를 측정해서 사용하면 칼만필터의 효율성을 높인다.

알고리즘의 흐름은 다음과 같다. 기동 후 초기값 세팅이 있고 그 다음부터는 알고리즘을 포함하는 주 루프가 구성된다. 주 루프의 첫 단계는 센싱 값을 읽어오는 과정이다. 전류성분과 전압성분을 읽어온 후 데이터 리젝션에 해당하는지 그렇지 않은지 먼저 확인하고 만약 데이터 리젝션에 해당 할 경우 칼만게인을 0으로 처리하여 측정방정식의 영향을 제거한다. 그렇지 않을 경우에는 측정 노이즈 모델에 따라 노이즈 값을 결정하고 그 값을 가지고 칼만게인을 구한다. 칼만게인을 구한 후의 첫 번째 단계는 예측치를 획득하는 과정인데, 이 때는 진행방정식에 의해 구하게 된다. 이 값을 가지고 측정방정식에서 최종값을 구한다.

4. 에너지 저장시스템 열해석

본 논문의 에너지 저장시스템은 원통형 셀(INR18650-29E)의 직병렬조합으로 구성되어 있으므로 이의 열해석을 위해서는 우선 원통형 셀의 열해석 실시 및 이를 시스템으로 확장할 필요가 있다.

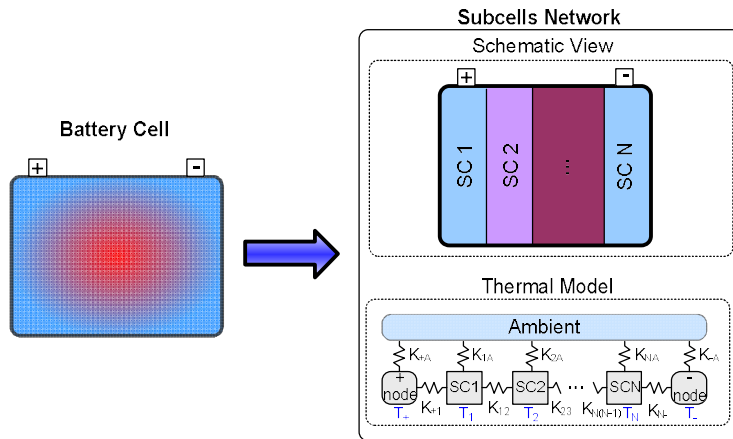


Fig. 3-21. Thermal network model (isothermal object) of unit cell

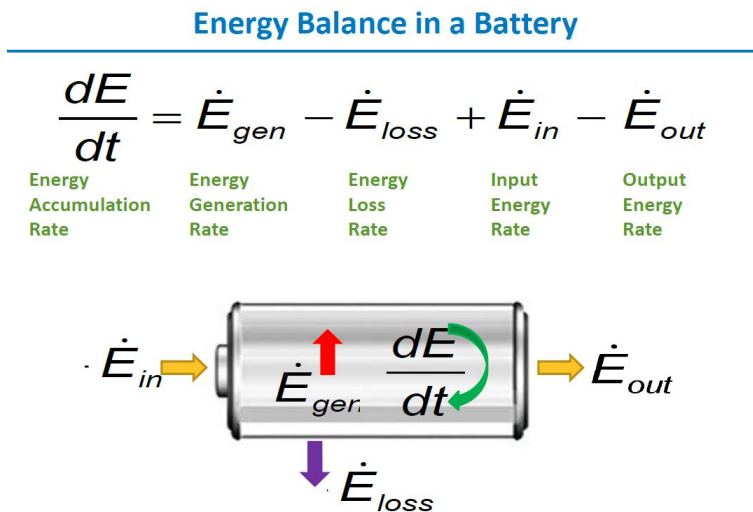


Fig. 3-22. Thermal network model(isothermal object) of unit cell(NREL)-1

그림 3-21은 원통형 셀의 isothermal object 기반 thermal network model을 나타낸다. 단위 셀 내부 온도분포의 상이함을 열저항으로 표현하였으며, 스크리닝 기반 선별된 셀의 동일실험을 통해 열저항의 대표값을 확정하였다. 단위 셀 열해석 레퍼런스 참고를 위해 NREL에서 연구한 열해석의 방정식은 그림 3-22와 같이 나타내었다.

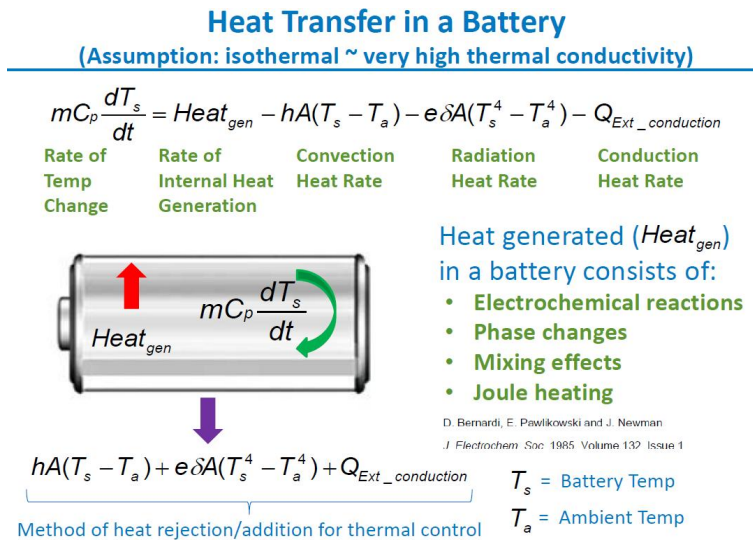


Fig. 3-23. Thermal network model(isothermal object) of unit cell(NREL)-2

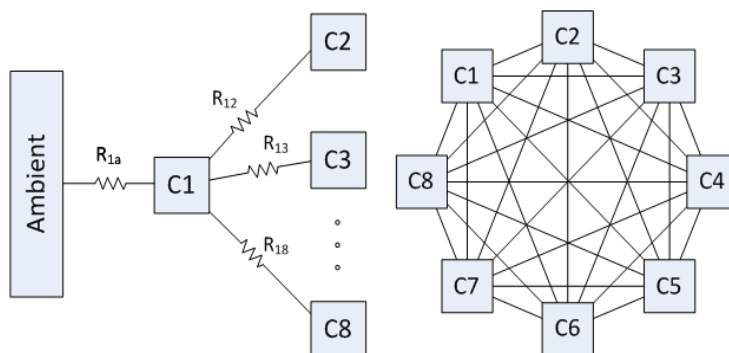


Fig. 3-24. Thermal network model(lumped capacitance) of the module

Lumped Capacitance Thermal Model for Vehicle Simulations

- For vehicle simulation, the thermal model needs to be linked to the battery model for temperature dependency
- A 2-node lumped thermal model (case + homogenous core) with simple heat convection is developed for ADVISOR vehicle simulator

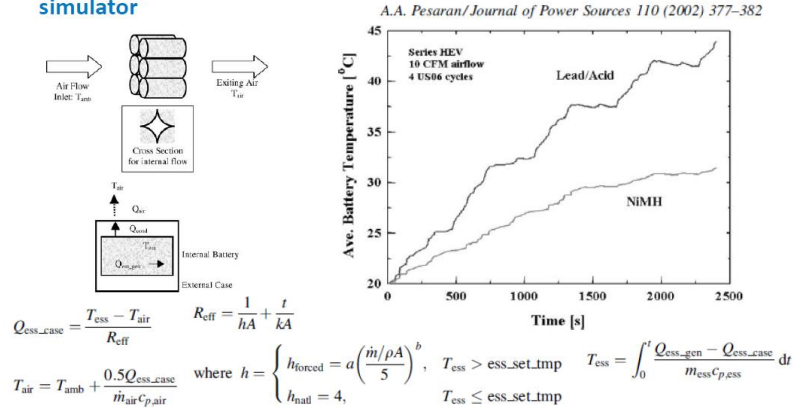


Fig. 3-25. Thermal network model(lumped capacitance) of the module(NREL)

단위 셀의 thermal network model 구축 후, 에너지 저장시스템 확장의 중간단계인 모듈의 thermal network 모델은 그림 3-23, 그림 3-24을 구축해야 하며, 이를 위해 lumped capacitance를 적용하였다. 모듈의 thermal network 모델을 위해 단위 셀 내부의 온도분포를 하나의 lumped capacitance로 가정하였으며, 임의의 특정 셀의 온도변화가 주변 다른 셀에 영향을 미침을 착안하였다. 그림 3-25와 같이 모듈 열해석 레퍼런스 참고를 위해 NREL에서 연구한 열해석을 참고하였다.

C. 분산형 보호회로 설계

1. 보호회로모듈(PCM)

3 kW급 분산형 보호회로의 기본요소인 보호회로모듈(protection circuit module; PCM) 설계를 위해 모듈 내부의 구성을 선정해야 한다. 그림 3-26은 PCM을 포함한 하드웨어 구성도로서 모듈 내 충/방전 전류검출부 및 충/방전 보호회로부가 있으며 정격전류 30 A이상을 만족한다. 충/방전 전류검출부의 경우 원가 절감 및 최적설계를 고려하여 홀센서 대신 shunt resistor를 적용하여 비용을 개선하고 공간을 확보한다. 충/방전 보호회로부 설계를 위해 DC contactor 및 MOSFET을 사용한다. MOSFET의 경우 내부의 기생다이오드를 사용하여 충전/방전 보호시 독립적으로 보호기능을 수행하고 DC contactor 구조에 별도 다이오드를 추가하여 기능을 구현한다.

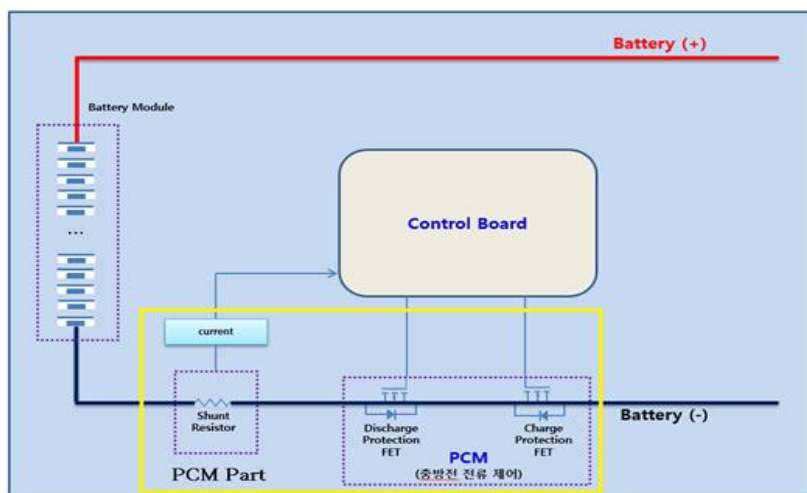
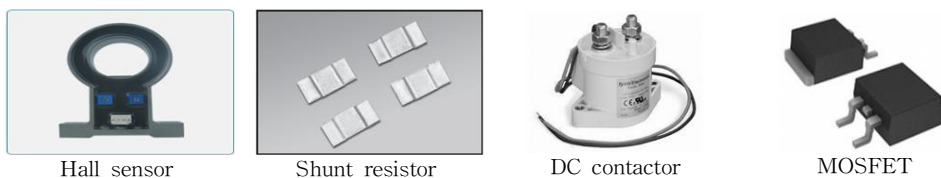


Fig. 3-26. Hardware structure with protection circuit module(PCM)



Hall sensor

Shunt resistor

DC contactor

MOSFET

Fig. 3-27. Several components in the PCM hardware structure

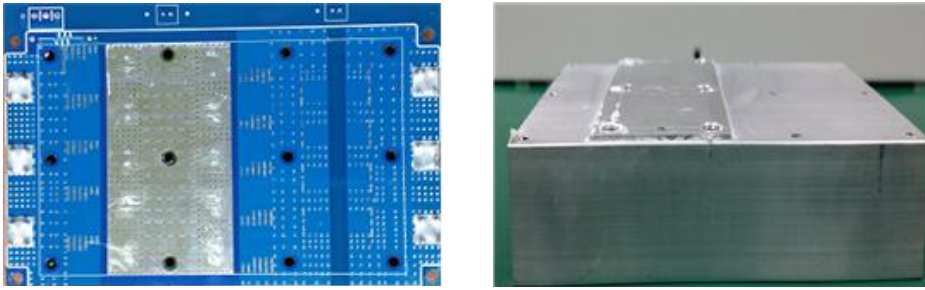


Fig. 3-28. Radiation and its structure in the PCM

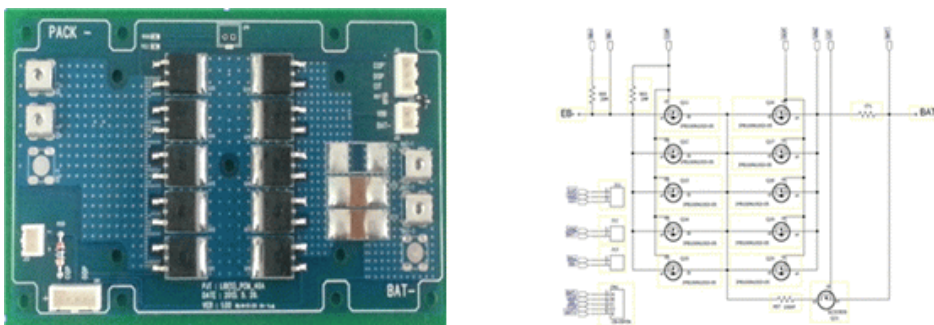


Fig. 3-29. FET structure in the PCM

그림 3-28과 같은 방열구조의 경우 PCB 설계 시 방열판에 열 전도성을 높이기 위해 표면처리를 동박 노출로 설계하고, 방열판 설계 시 발열원 접합 용이 및 FET 라인 간에 절연을 확보할 수 있도록 방열판의 접합부와 비접합부에 단을 주어 설계한다. 그림 3-29는 PCM 내부의 FET 구조를 나타낸다. 그림 3-30은 설계된 PCM을 나타내며 이의 동작 성능 검증을 위해 그림 3-31과 같은 충전/방전 테스트를 진행한다. 정격전류의 150% 이상으로 연속 충전/방전을 실시하여 PCM의 입력과 출력, FET, shunt resistor의 발열상태를 측정하였고 50℃ 미만으로 측정되어 모두 양호함을 확인하였다. 또한, FET 병렬 구조에서 특정 FET로의 전류 쏠림 현상이 발생하지 않았다. 결론적으로, 설계된 PCM의 안전성 점검 결과 이상이 없음을 확인하였다.

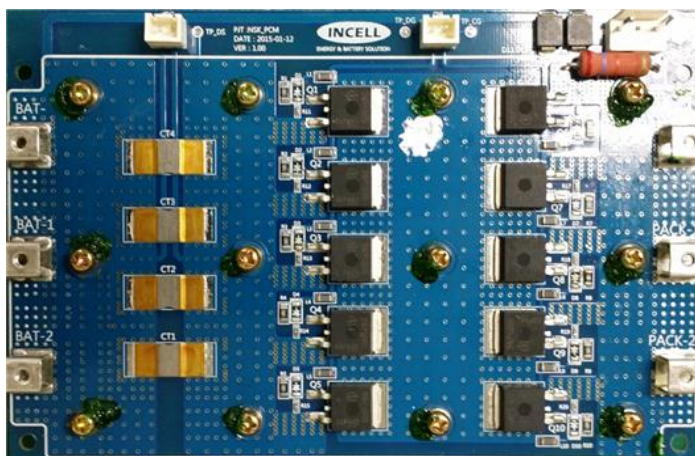


Fig. 3-30. Protection circuit module(above a rated current of 30A)

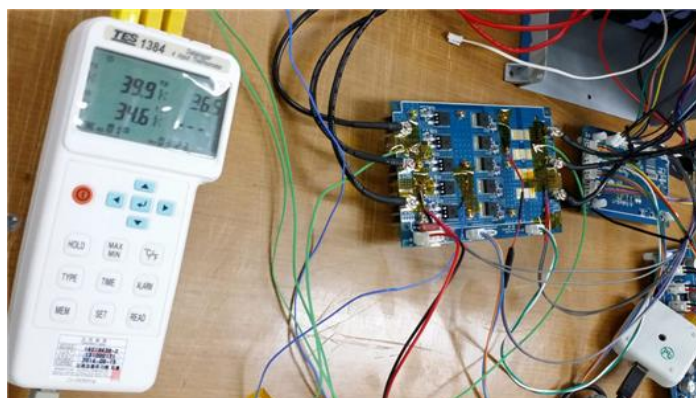


Fig. 3-31. Experimental test for checking PCM operation considering a rated current of 45A

2. 분산형 보호회로 하드웨어 및 제어알고리즘 구현

3 kW급 분산형 보호회로 하드웨어 및 제어알고리즘은 기본적으로 병렬로 운전하며, 이 때 에너지 저장시스템 상호간에 통신을 위해 CAN2.0을 구현한다. 병렬연결 및 CAN2.0 통신구현은 배터리용량과 전류성능을 높이기 위함이다. 배터리팩 ID configuration 알고리즘을 추가로 구현한다.

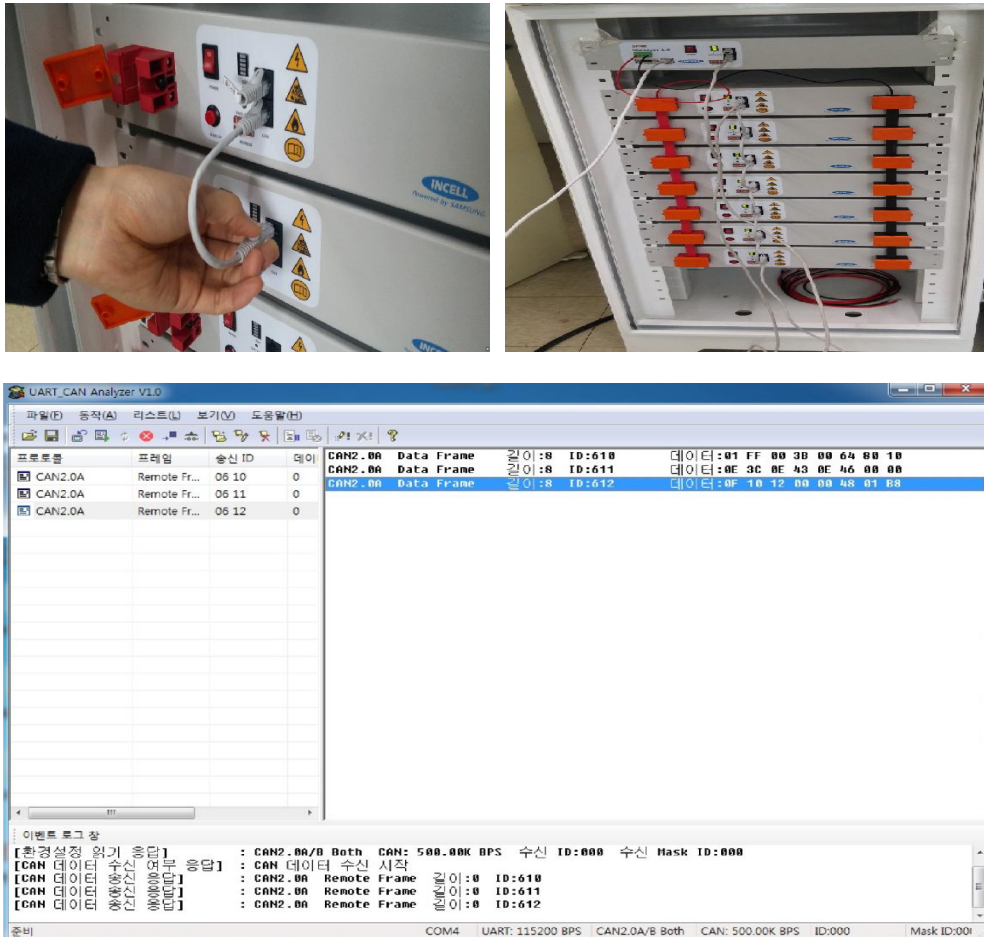


Fig. 3-32. Parallel connection of several energy storage system and its CAN2.0 communication implementation

Fig. 3-33. BMS Protocol V1.3 EMS 14S

ON

1 2 3 4 5 6 7

▶ 1 ~ 4 : Pack address

▶ 5 : Master Wake up Function

▶ 6 : Slave Wake up Function

▶ 7 : Select(Master or Slave)

Fig. 3-34. Dip switch setting

- BMS CAN Communication Parameters
 - CAN2.0(CAN2.0B available)
 - Baudrate : 500Kbit
 - Usage ID range : 0x600 ~ 0x602
 - RTR(Remote Transmission Request)

- CAN Message list

CAN ID	Name	CAN Byte	Data Type	Scal-ing	Unit	Min	Max	Default	Description (Upper byte = Ub, Lower byte = Lb)	
0x630	Total Voltage	Total Voltage_Ub Total Voltage_Lb	0 1	U16	0.1	V	0	6553.5	0	Total Voltage=(Ub*256+Lb)*0.1
	Current	Current_Ub Current_Lb	2 3	S16	0.1	A	-3276.8	3276.7	0	Current=(Ub*256+Lb)*0.1 (0x8000~0x00~0x7FFF)
	Reserved	Reserved	4							
	Reserved	Reserved	5							
	Reserved	Reserved	6							
	Reserved	Reserved	7							
	Min Cell Voltage	Min Cell Voltage_Ub Min Cell Voltage_Lb	0 1	U16	0.001	V	0	65.535	0	Min Cell Voltage=Ub*256+Lb)*0.001
	Average Cell Voltage	Average Cell Voltage_Ub Average Cell Voltage_Lb	2 3	U16	0.001	V	0	65.535	0	Average Cell Voltage=Ub*256+Lb)*0.001
0x631	Max Cell Voltage	Max Cell Voltage_Ub Max Cell Voltage_Lb	4 5	U16	0.001	V	0	65.535	0	Max Cell Voltage=Ub*256+Lb)*0.001
	SOC	SOC(State Of Charge)	6	U8	1	%	0	100	0	SOC = 0%~100%(0x00~0x64)
	BMS Status	BMS Status	7	bit		disable/enable	0	1	0	
	Min Cell Temperature	Min Cell Temp_Ub Min Cell Temp_Lb	0 1	S16	0.1	°C	-20	120	0	Min Cell Temp.=Ub*256+Lb)*0.1 (0x8000~0x00~0x7FFF)
0x632	Average Cell Temperature	Average Cell Temp_Ub Average Cell Temp_Lb	2 3	S16	0.1	°C	-20	120	0	Average Cell Temp.=Ub*256+Lb)*0.1 (0x8000~0x00~0x7FFF)
	Max Cell Temperature	Max Cell Temp_Ub Max Cell Temp_Lb	4 5	S16	0.1	°C	-20	120	0	Max Cell Temp.=Ub*256+Lb)*0.1 (0x8000~0x00~0x7FFF)
	SOC	SOC(State Of Charge)	6	U8	1	%	0	100	0	SOC = 0%~100%(0x00~0x64)
	BMS Status	BMS Status	7	bit		disable/enable	0	1	0	

* BMS Status

Data order	Name	Unit	Min	Max	Default	Description
7bit	Normal_Flag	disable/enable	0	1	0	Normal Mode
4bit	OVP_Flag	disable/enable	0	1	0	OVP Mode (Over Voltage fault)
5bit	UVP_Flag	disable/enable	0	1	0	UVP Mode (Under Voltage fault)
4bit	OTP_Flag	disable/enable	0	1	0	Over Temperature fault
3bit	OCP_Flag	disable/enable	0	1	0	Over Current fault
2bit	Comm.Err_Flag	disable/enable	0	1	0	Sub BMS Communication Error flag
1bit	Reserved					
0bit	Reserved					

Fig. 3-35. BMS CAN interface V1

각 에너지 저장시스템의 Dip 스위치를 통하여 그림 3-34와 같이 기능을 설정한다. 1~4pin은 Pack address로써 Master Pack과 Slave Pack의 주소를 할당한다. 5pin과 6pin은 각각 Master Wake up function과 Slave Wake up function을 담당한다. 5pin은 Master Pack 전용 핀으로 Slave를 Wake up signal을 보낼 것인지 설정하며, Slave Pack의 경우 6pin은 반드시 off(down)을 수행하는 Slave 전용핀 으로서 기능을 담당한다. Enable(UP)은 Master에서 Slave로 Wake up signal을 보내며 Disable(Down)은 Master에서 Slave로 Wake up signal을 보내지 않는다. 6pin은 Slave Pack의 전용핀 으로서 Master에서 Wake up signal이 오면 Start up을 할 것인지 설정하며 이 때 5pin은 반드시 off(down)를 수행하는 Master 전용핀 으로서 기능을 담당한다. Enable(UP)은 Wake up signal을 받으면 Start up을 하며, Disable(Down)은 Wake up signal을 받아도 Start up을 하지 않는다. 그러므로 Start up을 하기 위해서 Wake up 버튼을 누른다. 7pin은 Select로서 단일 에너지 저장시스템 사용 시에는 반드시 Slave Pack으로 설정하고, 다수의 에너지 저장시스템을 병렬로 연결하여 사용할 경우 Master Pack은 반드시 한 대만 설정하고 가장 높은 순번의 어드레스 번호를 지정한다.

추가로 Wakeup 알고리즘 및 fault 발생 시 안전운전 수행을 위한 알고리즘은 그림 3-35와 같이 구현한다. Wake up Button은 전원을 켜고 끄기 위한 버튼으로서 Power Switch를 On 시킨 후 Wake up Button을 길게 누르면 Shutdown Mode에 Operation Mode로 동작한다. Shutdown Mode는 Pack의 전원 소모를 최소화 하기 위한 모드이며, 충전 및 방전이 불가하다. Operation Mode는 Pack이 동작하고 정상적인 충전 및 방전이 가능한 모드이다. 과부하 보호를 위해 BMS 안에 있는 보호회로(MOSFET)를 사용하였고, 과부하 시 안전하게 출력을 차단하여 셀을 손상시키지 않고 높은 전류를 차단한다. BMS 안에 있는 보호회로를 통해 출력 단락(합선)으로부터 배터리를 보호한다. 보호회로는 짧은 반응속도를 가지고 있으며, 어떤 구성요소의 손상도 없이 단락(합선)상태에서 출력을 분리할 수 있다. 직렬로 다수의 배터리를 연결하여 사용하는 경우 각각의 배터리 셀 간에 화학적, 전기적 특성들에 의해 전하 불균형 현상이 발생할 수 있으며 이는 배터리팩에 문제를 야기할 수 있다. 이의 해결을 위해 BMS 안에 셀 밸런싱을 구현하였고 셀 간 전압을 균일하게 유지하여 배터리의 수명을 연장시킨다.

IV. 실험결과 및 고찰

A. 직병렬조합 에너지 저장시스템

그림 4-1은 앞의 스크리닝 절차를 통해 선별된 원통형 셀의 직병렬조합으로
통해 구성된 에너지 저장시스템(14S20P)을 나타낸다. 총 280개의 INR18650-29E
원통형 셀이 사용되며 직렬 14S, 병렬 20P로 구성된다. 설계된 에너지 저장시스
템의 동작에 문제가 없는지 확인하기 위해 표 4-1의 실험조건을 토대로 충전 및
방전을 수행하였다. 그림 4-2는 14S20P의 정파워(constant power; CP) 프로토콜
기반 방전/충전전류, 단자전압, 파워 및 전류적산법 기반 SOC를 나타낸다. 해당
실험을 통해 문제없이 14S20P 에너지 저장시스템이 운용됨을 확인할 수 있다.

Table 4-1. Experimental condition of the energy storage system

Charge condition	Discharge condition
- Method : CC-CV - Charge voltage : 56 V(SOC 80%) - Charge current : 25 A - Cutoff voltage under 1.5 A	- Method : CP - Discharge power : 2500 W - Cutoff voltage : 2.8 V
Capacity	Other condition
- CP(2500 W) discharge time : 53m55s - Capacity(Wh) : (2500 Wh/3600 s)*3235 s = 2246 Wh	- Room temperature : 23°C

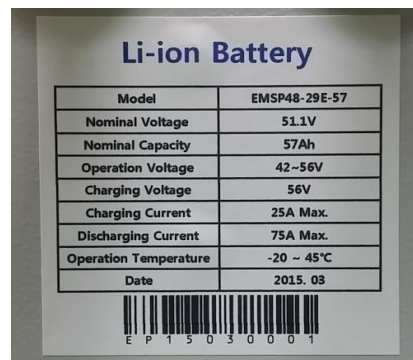


Fig. 4-1. Screening-based energy storage system (14S20P)

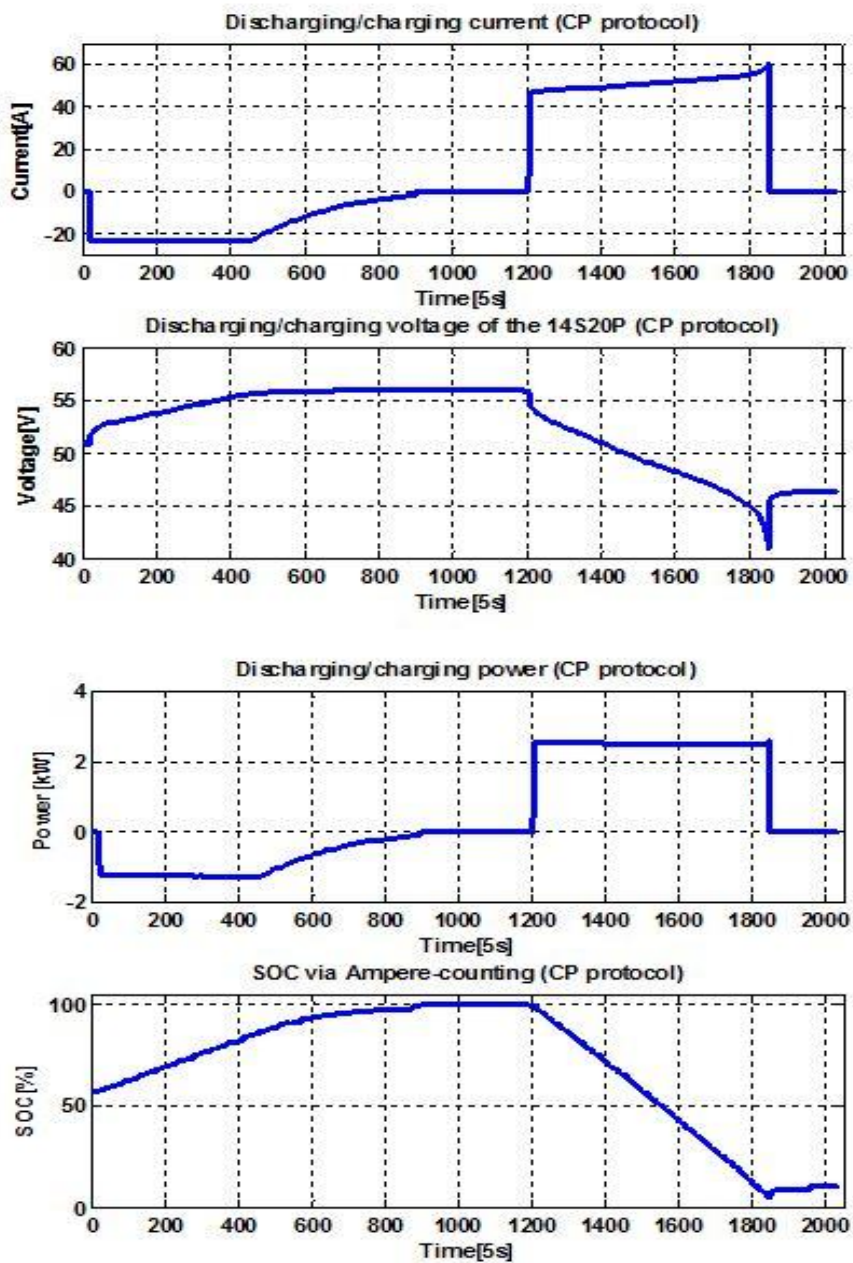


Fig. 4-2. Discharging/charging current, voltage, power and Ah-counting based SOC (CP protocol) of the energy storage system(14S20P)

원통형 셀의 직병렬조합으로 구성되어 있으므로 에너지 저장시스템 내부에 셀 간 전압 불균형 유무를 판단해야 한다. 이를 위해, 그림 4-2의 전기화학적 특성 실험 시 각 직렬구성(14S)의 단위 셀 전압을 동시에 측정하였고 이를 비교하였다. 그림 4-3에서 보듯이 단위 셀 간 단자전압이 매우 유사함을 확인하였다. 그림 4-4는 각 직렬구성(14S)의 첫 번째 셀 전압과 14개 셀 전압의 평균값을 확인한 결과이며, 그림 4-5와 4-6은 에너지 저장시스템 단자전압과 각 직렬구성 셀 전압의 14배를 배수하였을 때의 비교결과를 나타내며 전압 차이가 매우 작음을 확인할 수 있다. 이를 통해, 스크리닝 기반 설계된 에너지 저장시스템의 동작에 문제가 없음을 최종적으로 확인하였다.

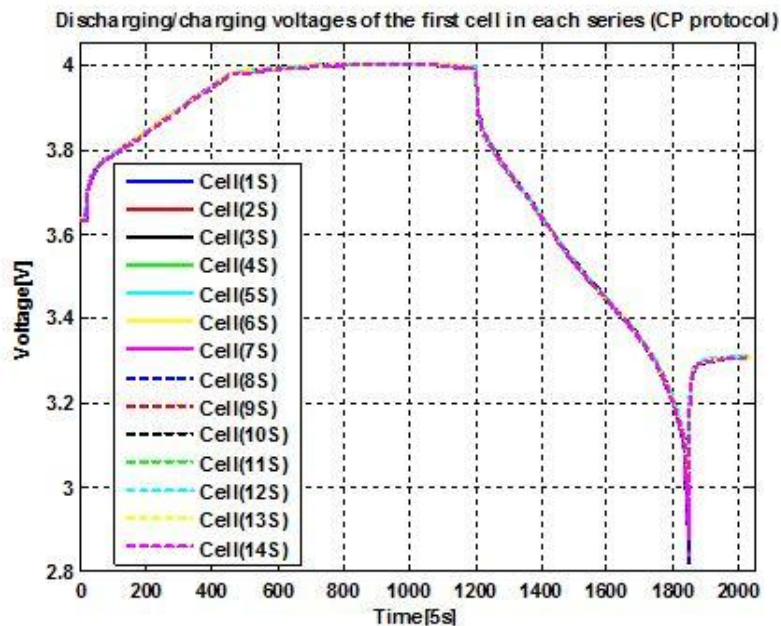


Fig. 4-3. Discharging/charging voltages of the first cell in each series

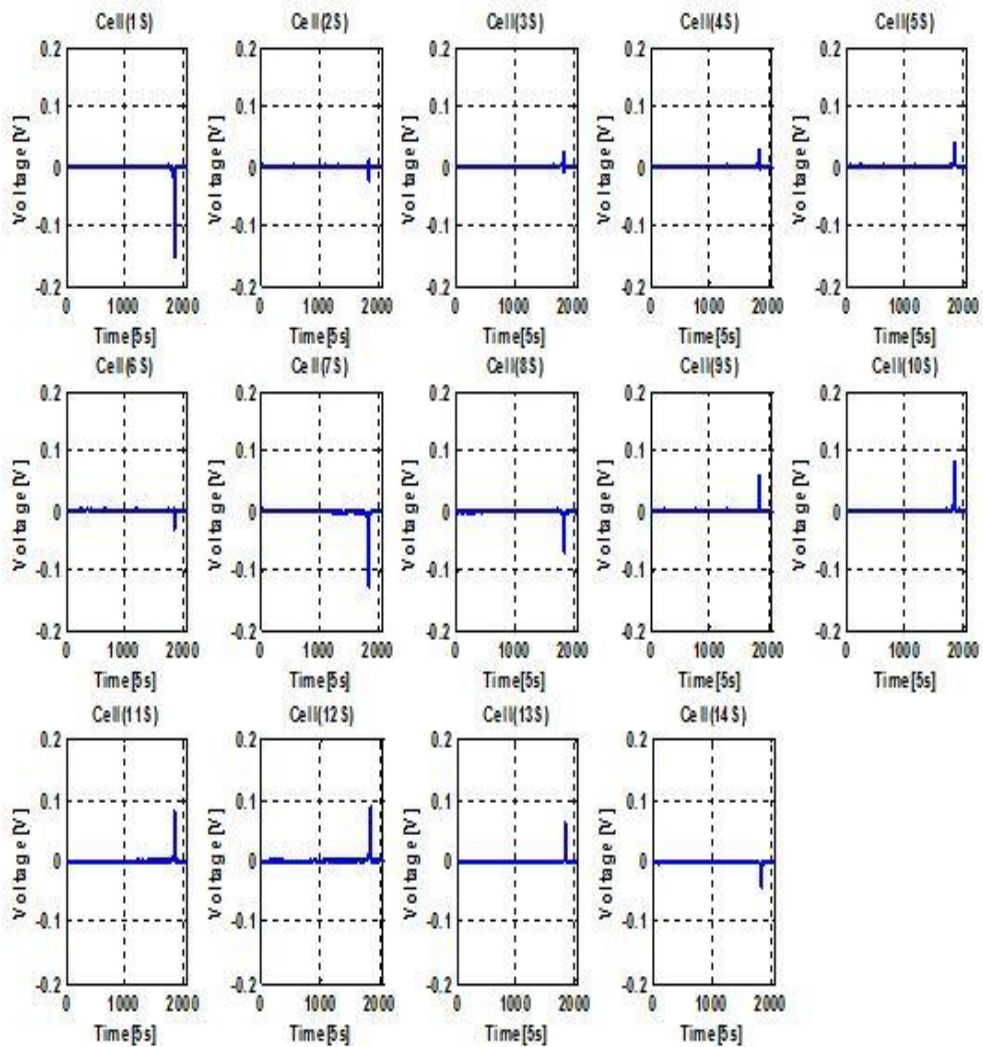


Fig. 4-4. Comparison between discharging/charging voltages of the first cell in each series and their average value

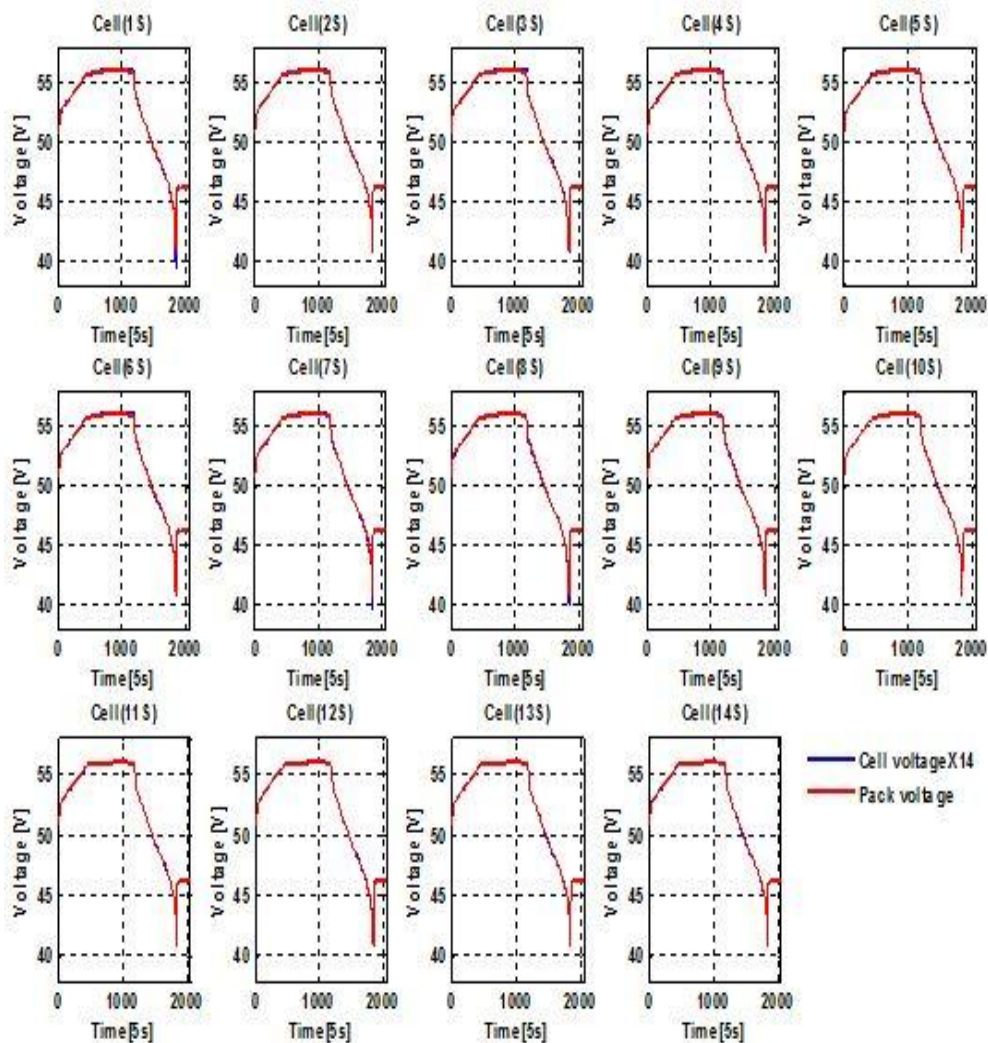


Fig. 4-5. Comparison between 14S20P's terminal voltage and cell voltages $\times 14$

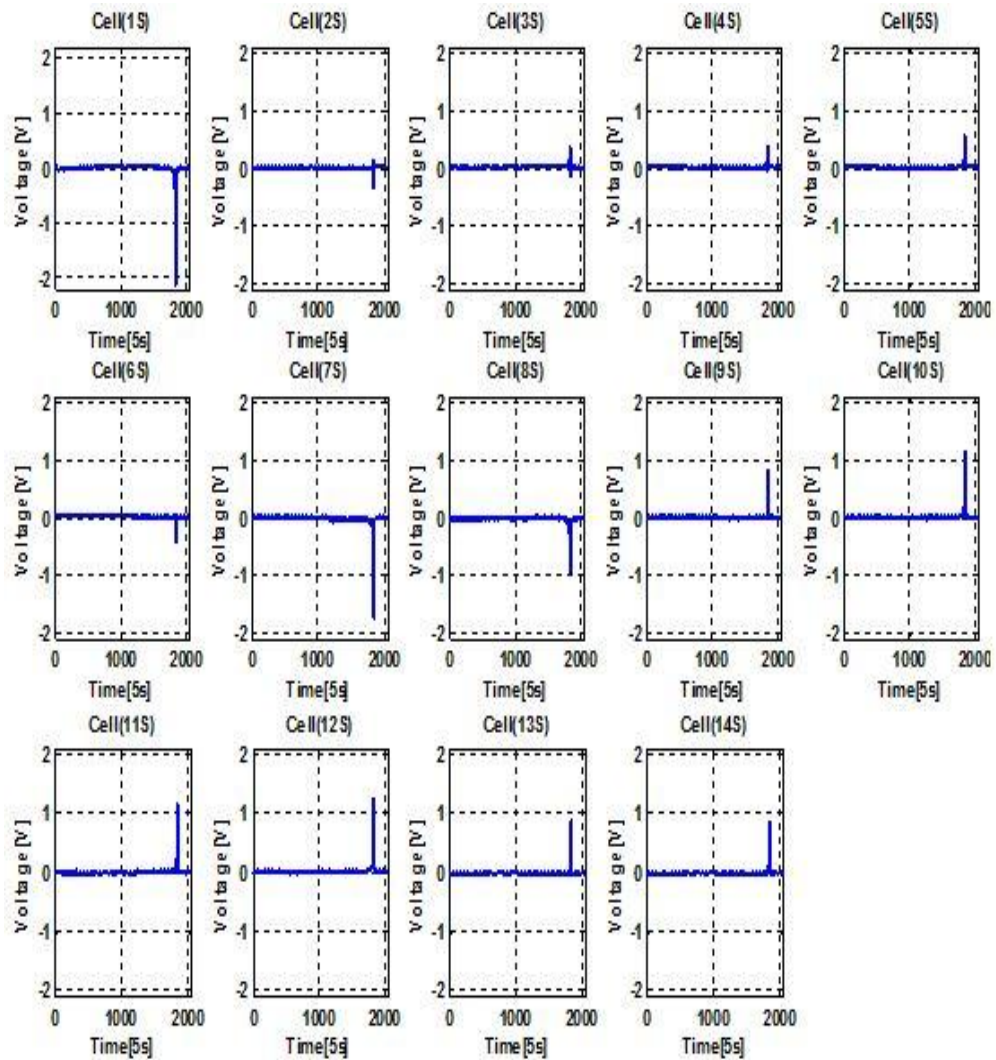


Fig. 4-6. Difference in voltages among 14S20P's terminal voltage and cell voltage $\times 14$

B. 배터리관리시스템(BMS)

그림 4-7과 4-8은 EKF 알고리즘을 구현한 Matlab/Simulink 시뮬레이션 파일 및 이의 내부 파라미터 설정을 나타낸다. 해당 알고리즘은 기본적으로 C++언어로 구성되어 있으며, S-function을 사용하여 알고리즘과 Matlab/Simulink를 연동하였다. 그림 4-9는 SOC 알고리즘 추정결과로서 전류적산법 기반 SOC를 기준으로 할 시 SOC 추정에러가 3% 이내로 만족함을 확인하였다. 그림 4-10은 알고리즘 내 다양한 노이즈 모델에 따른 SOC 추정알고리즘 결과를 비교한 것으로서 노이즈 모델 유무에 따라 SOC 추정알고리즘 성능 차이를 확인할 수 있다.

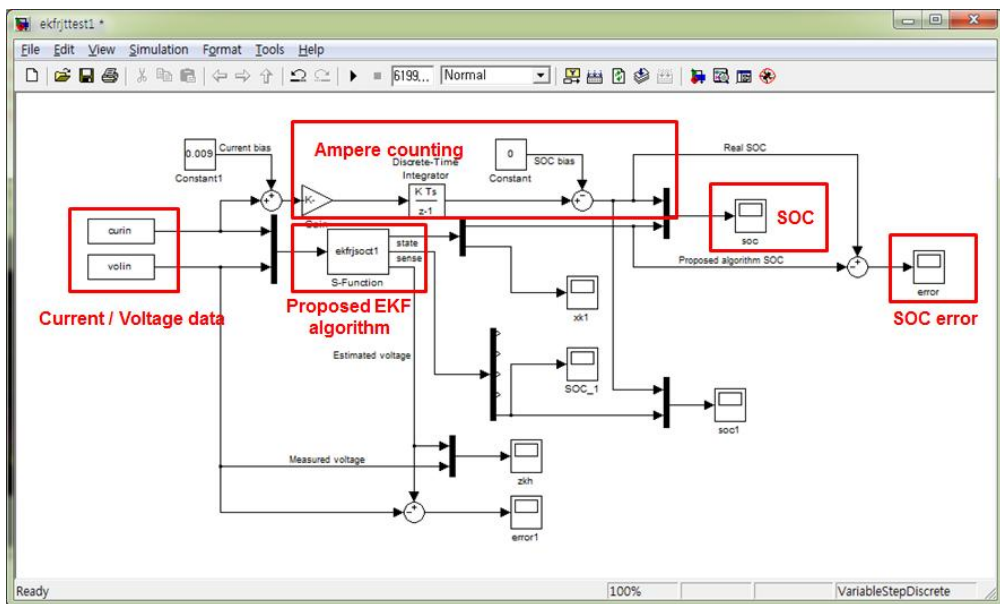


Fig. 4-7. Matlab/Simulink-based simulation for SOC estimation(EKF)

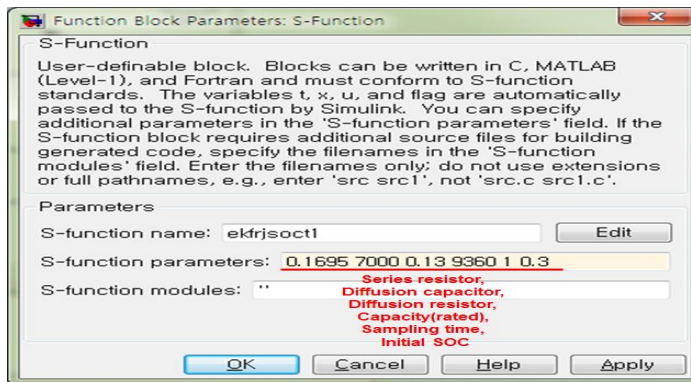


Fig. 4-8. S-function parameters of the Matlab/Simulink-based simulation for SOCEstimation(EKF)

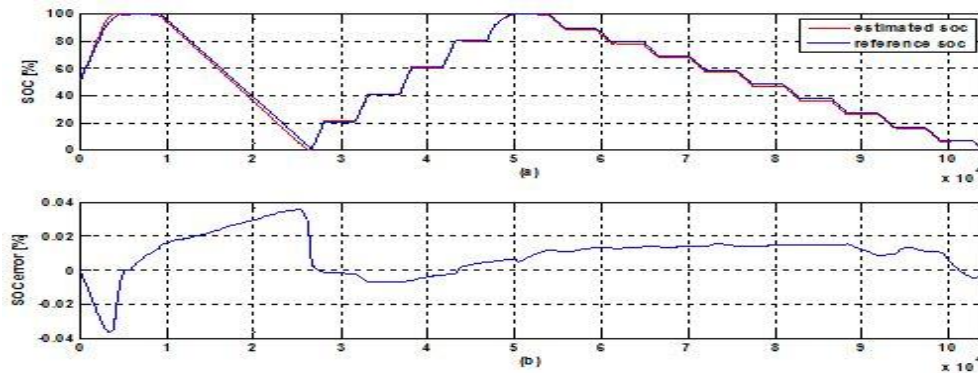


Fig. 4-9. EKF-based SOC estimation of the energy storage system(14S20P) (reference value; Ah-counting)

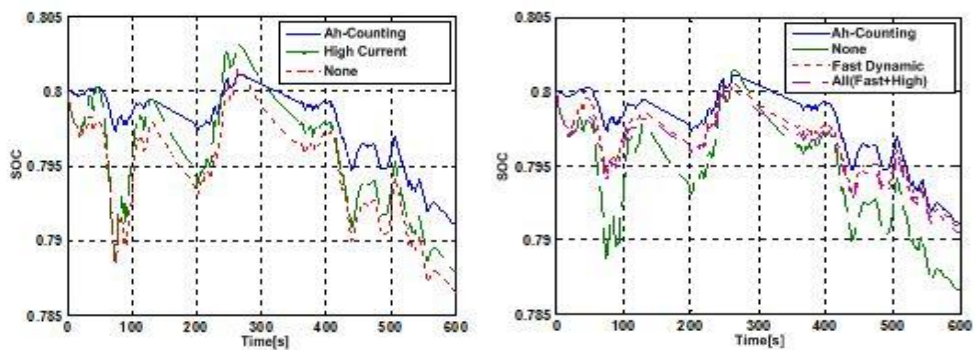


Fig. 4-10. SOC estimation considering various noise models

$$\begin{aligned}
 \text{State filter} \quad \begin{bmatrix} SOC_{k+1} \\ V_{Diff,k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 - \frac{\Delta t}{C_{Diff} R_{Diff}} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} SOC_k \\ V_{Diff,k} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{\Delta t}{C_n} \\ \frac{\Delta t}{C_{Diff}} \end{bmatrix} i_k + w_k^x \\
 \theta_k = \begin{bmatrix} C_{n,k+1} \\ R_{i,k+1} \end{bmatrix} &= \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ 0 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{n,k} \\ R_{i,k} \end{bmatrix} + w_k^\theta \quad \text{Weight filter} \\
 V_k = OCV(SOC_k) - V_{Diff,k} - R_{i,k} i_k + v_k & \quad \hat{y}_k^- = H_k(\hat{x}_k^-, \hat{\theta}_k^-) \quad \text{Measurement equation}
 \end{aligned}$$

$$\begin{aligned}
 H_k^{SOC} &= \frac{\partial V_k}{\partial SOC_k} = \frac{\partial OCV_k}{\partial SOC_k} \\
 H_k^{V_{Diff}} &= \frac{\partial V_k}{\partial V_{Diff,k}} = -1 \\
 H_k^{C_n} &= \frac{dOCV}{dC_n} = \frac{\partial OCV}{\partial C_n} \bigg|_{C_n} + \frac{\partial OCV}{\partial SOC_k} \frac{dSOC_k^-}{dC_n} \\
 H_k^{R_i} &= \frac{\partial V_k}{\partial R_{i,k}} = -i_k
 \end{aligned}$$

Fig. 4-11. Equations of the DEKF

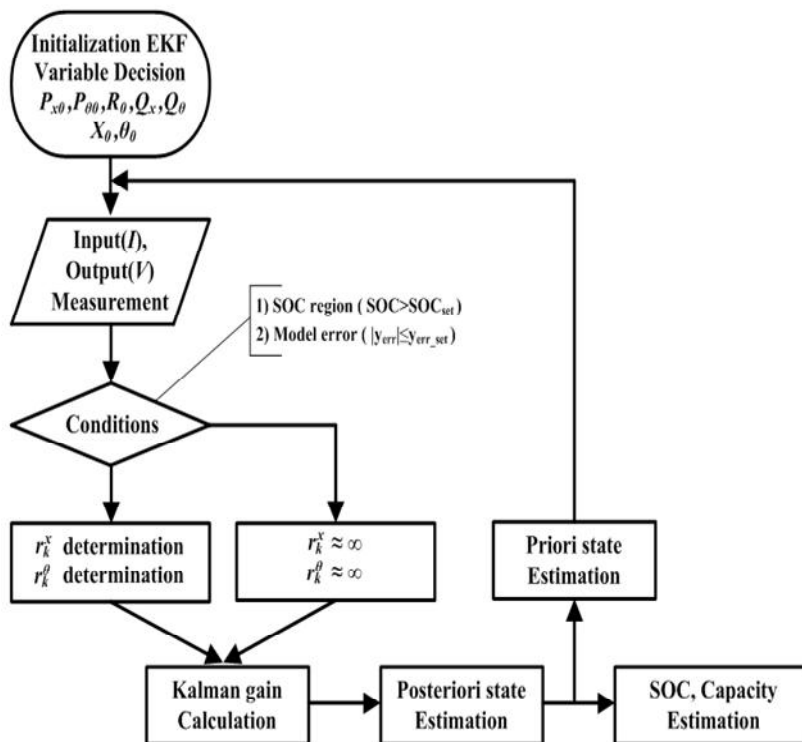


Fig. 4-12. Flowchart of the DEKF



Fig. 4-13. Resistance-based SOH measurement according to cell group

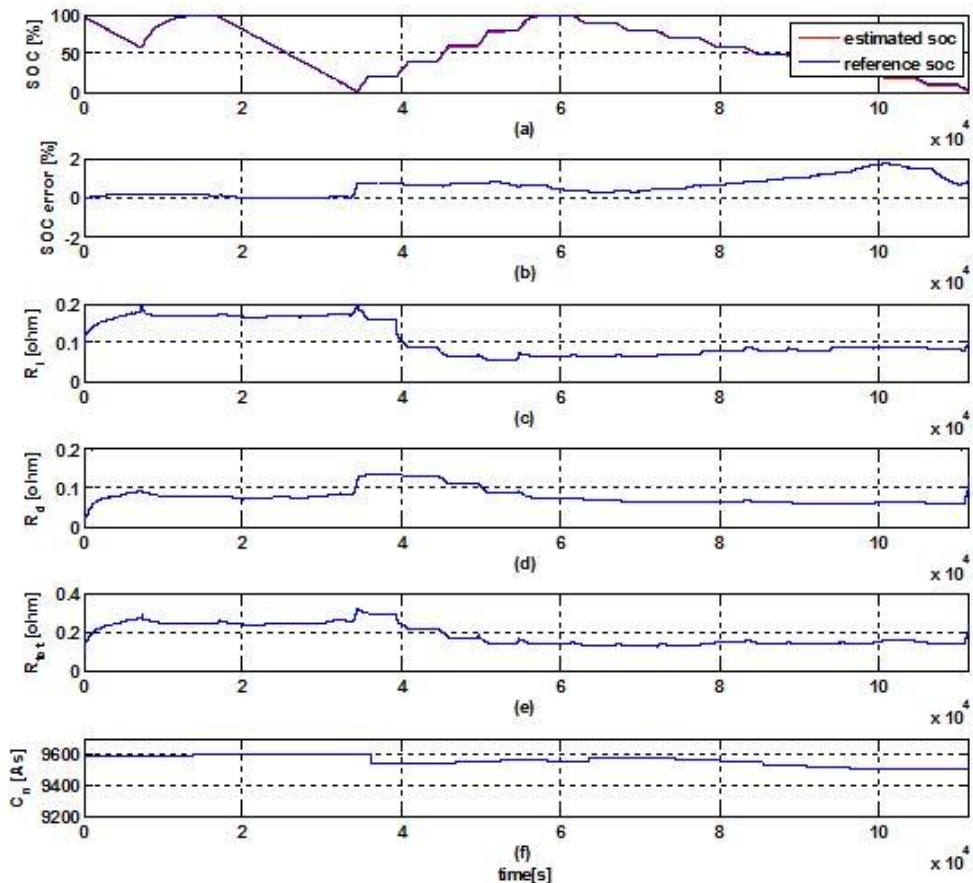


Fig. 4-14. DEKF-based SOC/SOH estimations of the ESS(45°C)

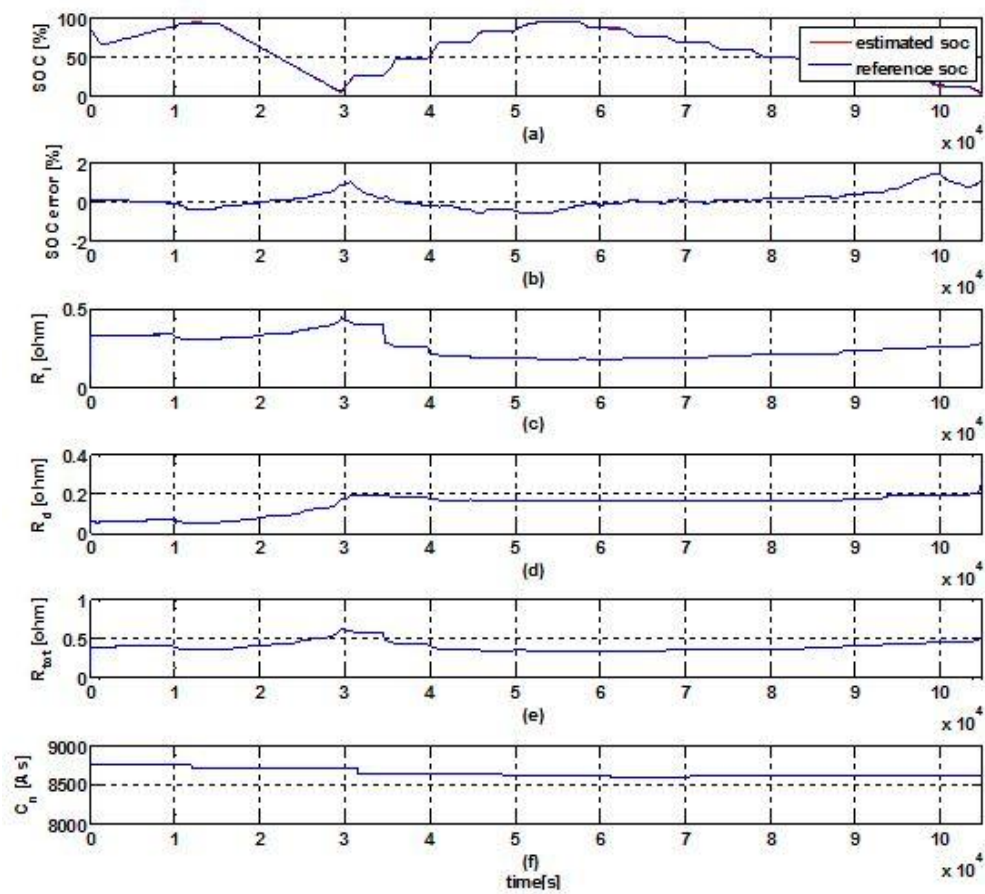


Fig. 4-15. DEKF-based SOC/SOH estimations of the ESS(0°C)

이중 확장칼만필터(DEKF)는 확장칼만필터를 2개 병렬 연결한 형태로서 SOC와 SOH의 동시 추정이 가능하다. 그림 4-11에서 보듯이, 기존 EKF에 weight filter를 추가하여 DEKF를 구현하며 이는 EKF의 state filter, measurement equation과 추가된 weight filter와 정보를 주고받는다. 참고로, 방전용량과 내부저항 정보를 토대로 SOH 추정을 위한 사전 정보가 요구된다. 즉 에너지 저장시스템의 노화하지 않은 상태에서 방전용량과 내부저항 정보가 요구되며, 최종상태(노화의 극함)에서의 용량과 내부저항 정보도 또한 요구된다. 그림 4-12에서 보듯이, 방전용량의 경우 초기용량의 80%인 경우를 극한 상태로 정의하나, 저항의 경우 구체화된 정의가 아직 없음을 알 수 있다. 그림 4-13의 DEKF 흐름도를 토대로 외기온도 45℃와 0℃에서 에너지 저장시스템의 SOC/SOH 추정알고리즘 결과를 그림 4-14와 4-15에 나타내었고 추정에러가 3%/5% 이내로 만족함을 확인하였다.

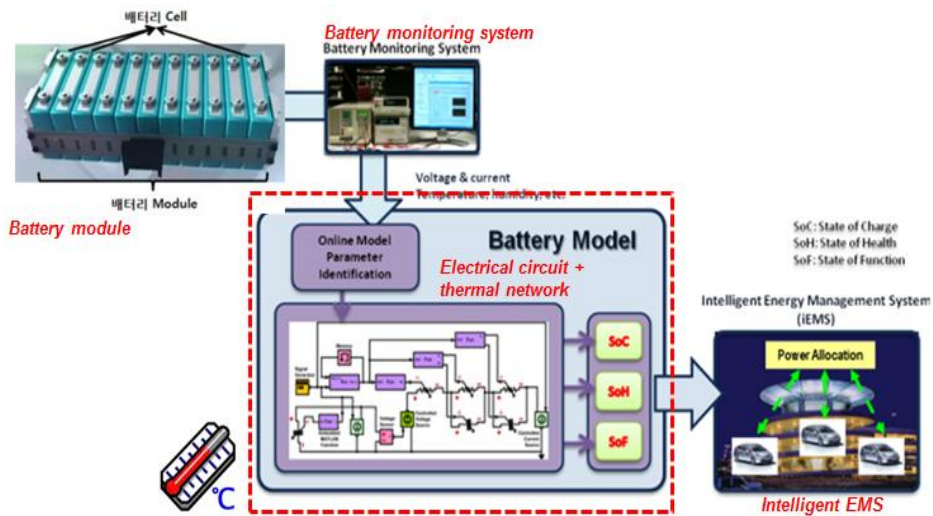


Fig. 4-16. Equivalent circuit model-based SOC/SOH estimation

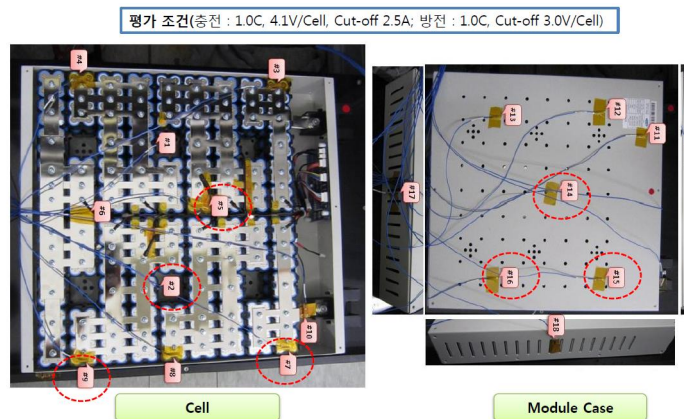


Fig. 4-17. Line connection for temperature sensing for thermal analysis of the energy storage system

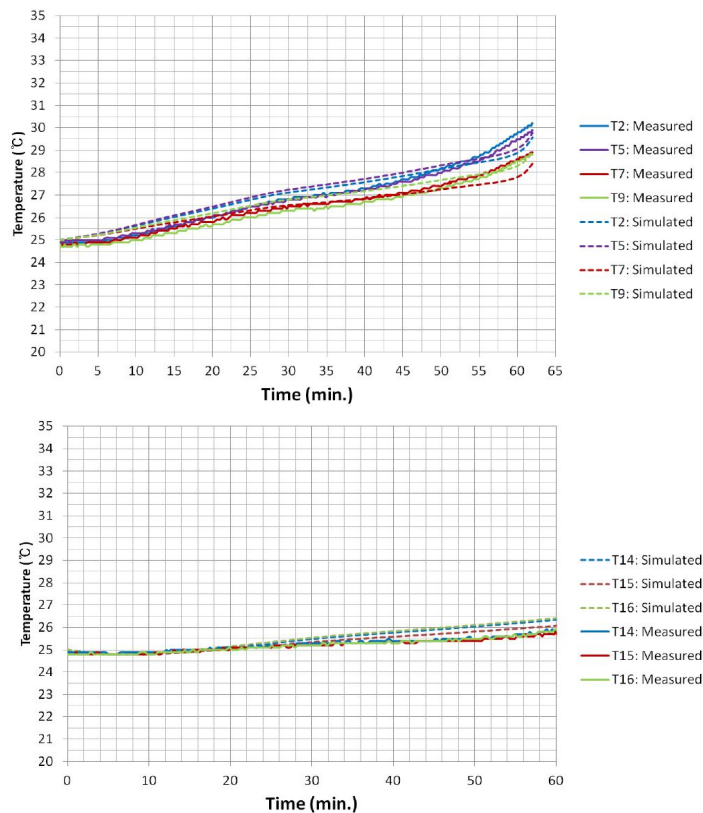


Fig. 4-18. Temperatures comparison between inner module and outer case of the energy storage system(experiment vs simulation)

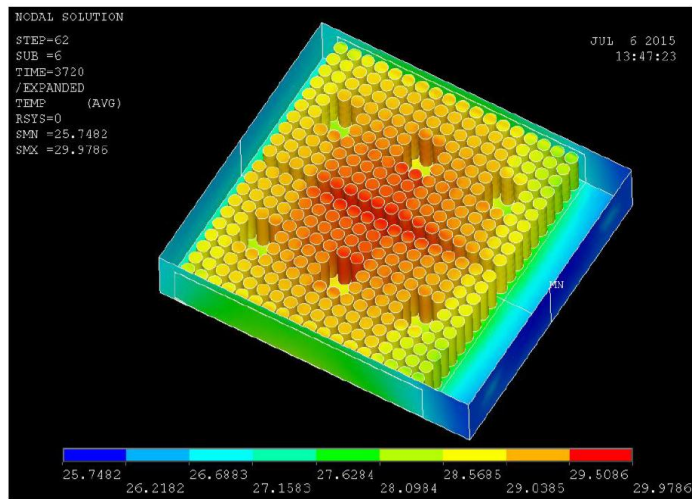


Fig. 4-19. Distribution of cell temperatures without busbar(discharging)

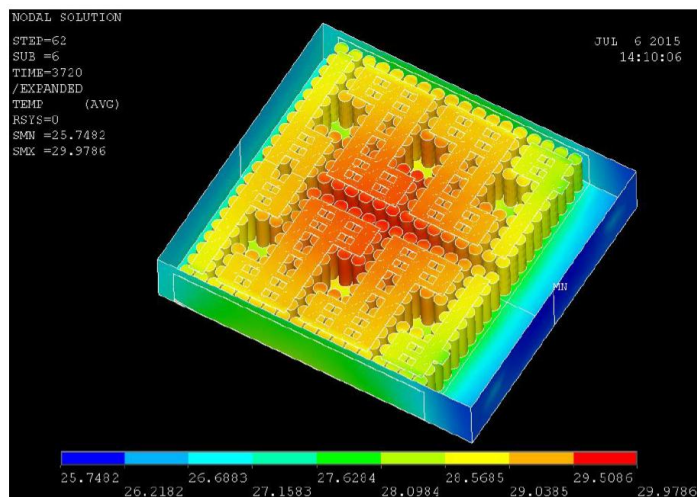


Fig. 4-20. Distribution of cell temperatures with busbar(discharging)

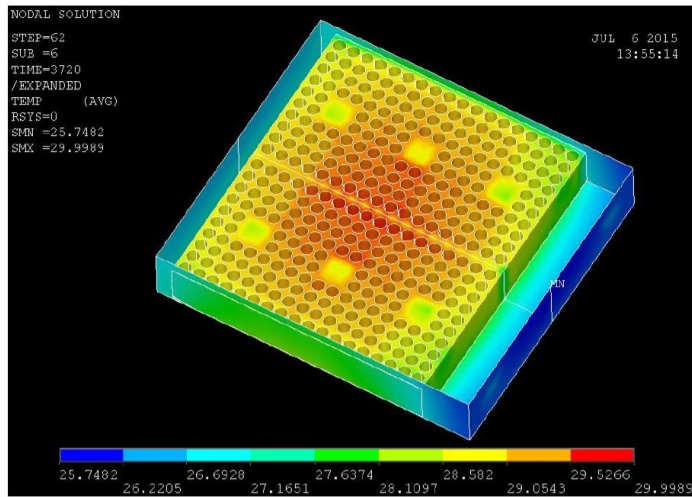


Fig. 4-21. Air distribution in the ESS with busbar(discharging)

실제 설계된 14S20P의 열해석은 1차 및 2차 열해석으로 구분하였다. 1차 열해석은 에너지 저장시스템의 방전 시 내부의 셀 온도 및 주의 공기 온도분포를 체크하였으며, 열해석 특이사항을 2차 열해석에 참고하여 진행하였다.

그림 4-17은 에너지 저장시스템의 열해석을 위해 설계된 14S20P 내부에 온도 센싱선을 연결한 그림을 나타낸다. 이를 토대로 열해석을 실시하며, 실제 온도실험결과와 비교하여 열해석을 검증한다. 그림 4-18은 에너지 저장시스템 내부 및 케이스 온도 변화 결과를 나타내며 실제 실험결과와 시뮬레이션 상에 큰 차이가 없음을 알 수 있다. 이를 토대로, 에너지 저장시스템의 방전 말기 원통형 셀을 연결하는 부스바의 유무에 따른 내부 온도분포를 그림 4-19와 4-20에 비교하였고, 온도 상승에 따라 에너지 저장시스템 내부의 공기분포를 그림 4-21에 나타내었다. 1차 열해석 결과를 토대로 다양한 실험조건 및 실험데이터를 토대로 2차 열해석을 진행하였다. 상용프로그램 기반 열해석을 실시하였으며 1차의 경우 Ansys, 2차의 경우 NFX를 이용하였다.

NFX 기반 2차 열해석을 위해 유체 구조 연성해석을 채택하였으며, 에너지 저장시스템을 충전 및 방전 시 내부파라미터 값 기반의 발열 분포, 열 분포 특성과 온도 상승으로 인한 구조 변형 파악을 목적으로 하였다. 첫 번째, 유체 열 유동 해석(transient fluid heat transfer)는 비선형 과도 열전달해석으로 불리며 배터리 외부의 공기층을 유체로 가정하여 온도 및 열흐름 추출이 가능하다. 두 번째, 유체 구조 연성해석은 공기층을 유체로 가정하여 온도 및 열흐름을 추출하고 응력, 변위를 추출하며 온도에 따라 구조의 변형을 파악할 수 있다. 세 번째, 구조 열 전달해석(transient structure heat transfer)은 배터리 외부의 공기층을 고체로 가정하여 유체 해석과 달리 온도만 추출할 수 있으며 유체 열 유동 해석과 비교할 시 상대적으로 해석 시간의 단축이 가능하다.

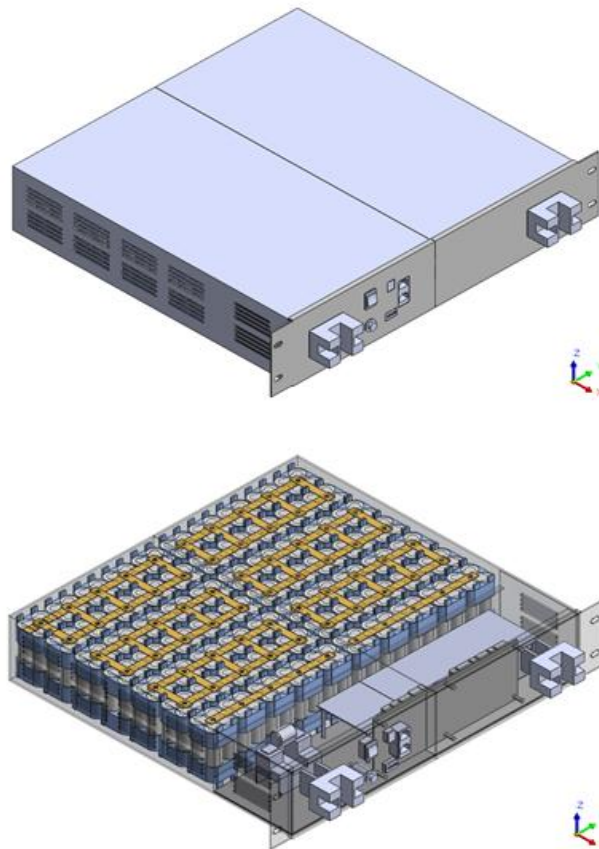
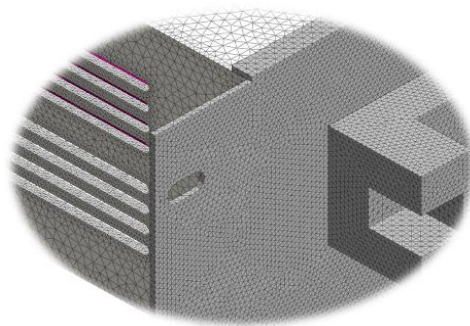


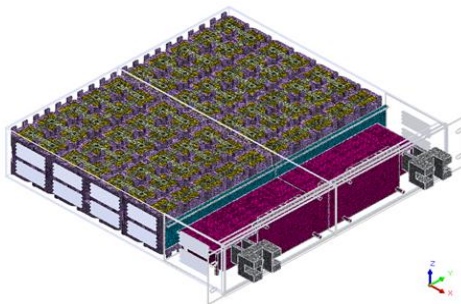
Fig. 4-22. 14S20P energy storage system and its cell assembly



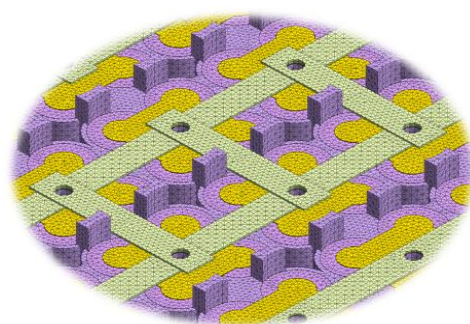
18650 cell FE modeling(view 1)



18650 cell FE modeling(view 1 detail)



18650 cell FE modeling(view 2)



18650 cell FE modeling(view 2 detail)

Fig. 4-23. 18650 cell FE modeling in the energy storage system(14S20P)

열 구조 연성해석은 유체 구조 연성해석과 비슷하지만 공기층이 고체이며 구조의 응력 및 변위를 추출할 수 있으며 상대적으로 유체 구조 연성 해석보다 해석력을 떨어지지만 시뮬레이션 시간이 빠른 장점이 있다. 해당 열해석을 위해 INR18650-29E 셀의 전기적 특성실험을 통해 SOC 10%별 내부저항을 산출, 충전과 방전 진행 시 SOC 10%별 I^2R 을 사용하여 각 셀당 발열량을 산출하였다. 배터리 외부 공기층을 유체로 가정하였고, 배터리의 충방전에 따라 셀의 발열량으로 각각의 포인트에서의 온도 및 열의 이동방향 또는 열의 흐름을 파악하였다. 더불어, 발생하는 발열에 따라 에너지 저장시스템의 구조 변형을 파악하였다. 그림 4-22는 열해석을 위한 14S20P 에너지 저장시스템 및 내부 원통형 셀의 결합 형태를 나타낸다. 열해석 진행 전에 요소 품질을 확인하는 작업이 필요하며, 자코비안 비율(Jacobian ratio)와 종횡비(aspect ratio)를 고려한다.

Table 4-2. Materials information of the energy storage system(14S20P)

Material	Density [kg/m ³]	Elastic Modulus [GPa]	Poisson's Ratio	Expansion coefficient	Specific heat [J/kg-T]	Conductivity [W/m-T]	Yield Strength [MPa]
INR18650-29E	2,479	200	0.29	1.10E-05	877.3	3.10E+00	215
PC Resin	2,200	72	0.17	5.50E-07	760.0	1.40E+00	58
EGI-N8	1,700	200	0.29	2.36E-05	1,800.0	1.12E+02	152
SP48M	2,145	1.25	0.28	1.03E-04	1,136.0	8.00E-02	80
Nickel	8,500	210	0.31	1.70E-05	460.0	4.30E+01	317
UNS C70600	8,950	140	0.34	1.65E-05	383.0	4.01E+02	250
Air	1.17	200	0.29	-	1,006.0	2.20E-02	-

Table 4-3. Duration time and maximum heat generation(discharge/charge)

Item	Discharge		Charge	
	1.25 A	1.65 A	0.25 A	0.75 A
Duration Time	7,950[sec]	5,970[sec]	32,000[sec]	15,000[sec]
Max. Heat Generation	6,420[W/m ³]	11,236 [W/m ³]	262[W/m ³]	2,206[W/m ³]

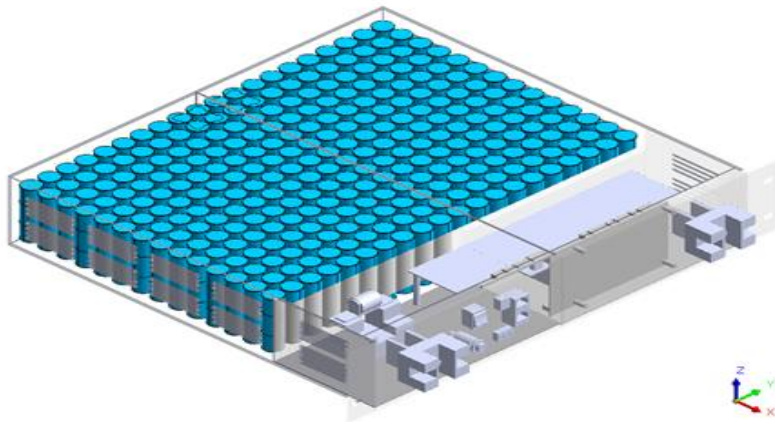


Fig. 4-24. Heat generation of the energy storage system(14S20P)

온도 분포 특성은 비선형 과도상태 열전달해석(nonlinear transient heat transfer analysis)을 통해 파악하고, 온도변화 시 열팽창특성은 선형정적해석(linear static analysis)을 수행하여 파악하였다. 비선형 과도상태 열전달해석은 에너지 저장시스템 내부에 위치한 배터리에 단위부피 당 열량을 적용한 과도발열량(transient heat generation)을 배터리 1개에 대한 실험데이터를 시간에 따라 적용하였다. 과도발열량은 방전 시 1.25 A와 1.65 A, 충전 시 0.25 A와 0.75 A에 대한 4가지 값을 입력값으로 사용하였다. 그림 4-26은 각 전류량에 따른 충전 및 방전 수행 시 열량변화 곡선을 나타내었다. 열전달해석에서 경계 조건은 외부 케이스에 대류 조건을 부여했으며, 외기온도(ambient temperature)는 상온조건인 25℃, 대류계수는 25 W/m²-T (평판에 대한 자연대류계수)를 적용하였으며 외부조건 6면은 모두 동일하다.

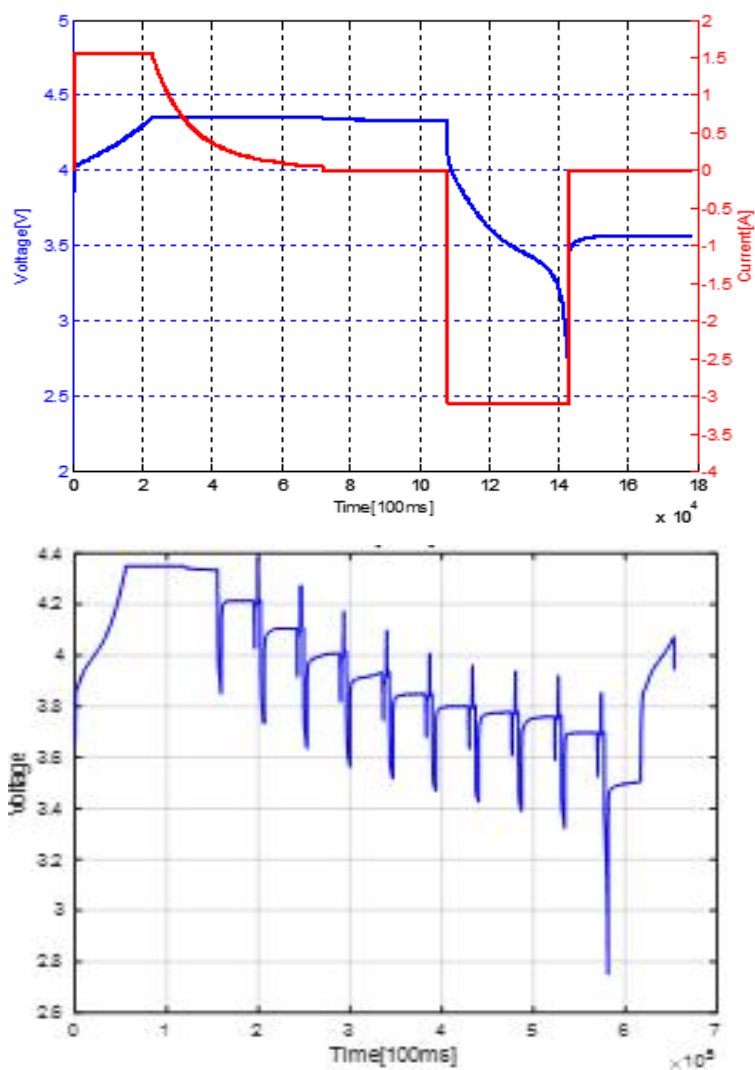


Fig. 4-25. Parameters(Ah-counting based discharge capacity and OCV-HPPC based internal resistance) extraction for thermal analysis

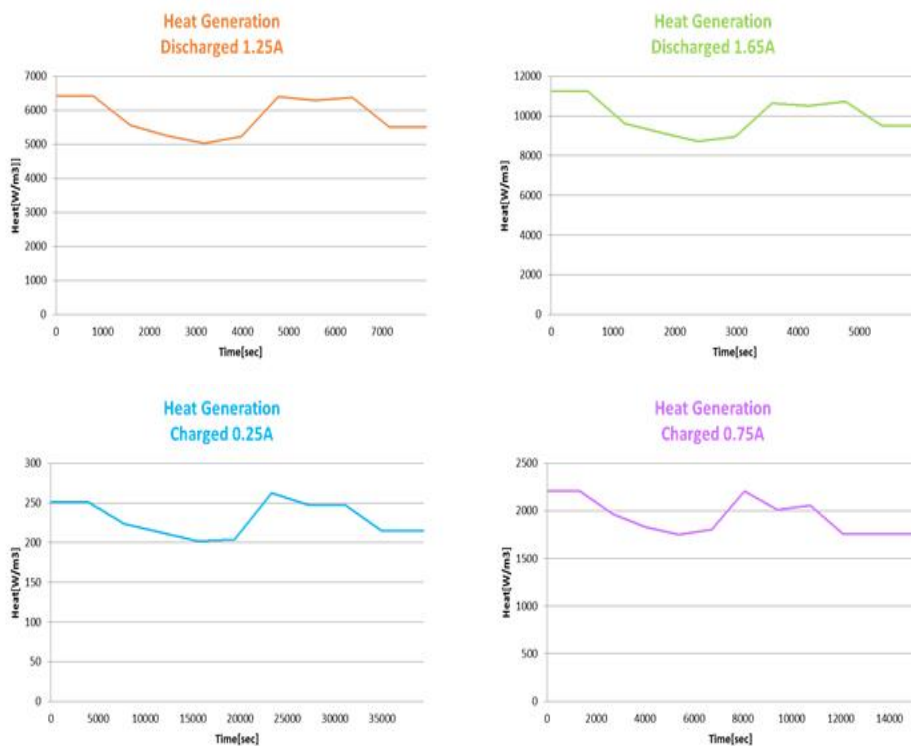


Fig. 4-26. Heat generation considering 1.25 A(discharge), 1.65 A(discharge), 0.25 A(charge) and 0.75 A(charge)

Table 4-4. Boundary condition of the case in the energy storage system

Part	Boundary Condition		Note
	Ambient Temperature	Convection Coefficient	
Case	25°C	25 W/m ² -T	

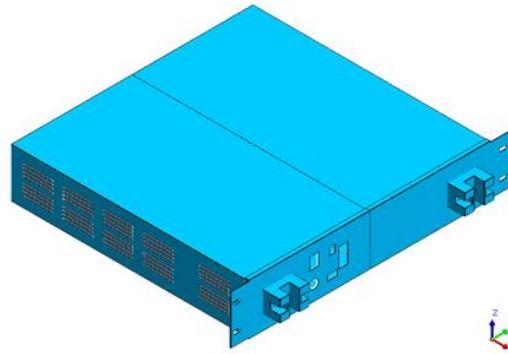


Fig. 4-27. Location for boundary condition of the case in the ESS

Table 4-5. Various analysis cases via 1.25 A(discharge), 1.65 A(discharge), 0.25 A(charge) and 0.75 A(charge)

Analysis Case	Characteristic	Analysis Type	Result
Case #1-1	Discharged 1.25 A	Heat Transfer	Temperature
Case #1-2		Thermal Expansion	Deformation, Stress
Case #2-1	Discharged 1.65 A	Heat Transfer	Temperature
Case #2-2		Thermal Expansion	Deformation, Stress
Case #3-1	Charged 0.25 A	Heat Transfer	Temperature
Case #3-2		Thermal Expansion	Deformation, Stress
Case #4-1	Charged 0.75 A	Heat Transfer	Temperature
Case #4-2		Thermal Expansion	Deformation, Stress

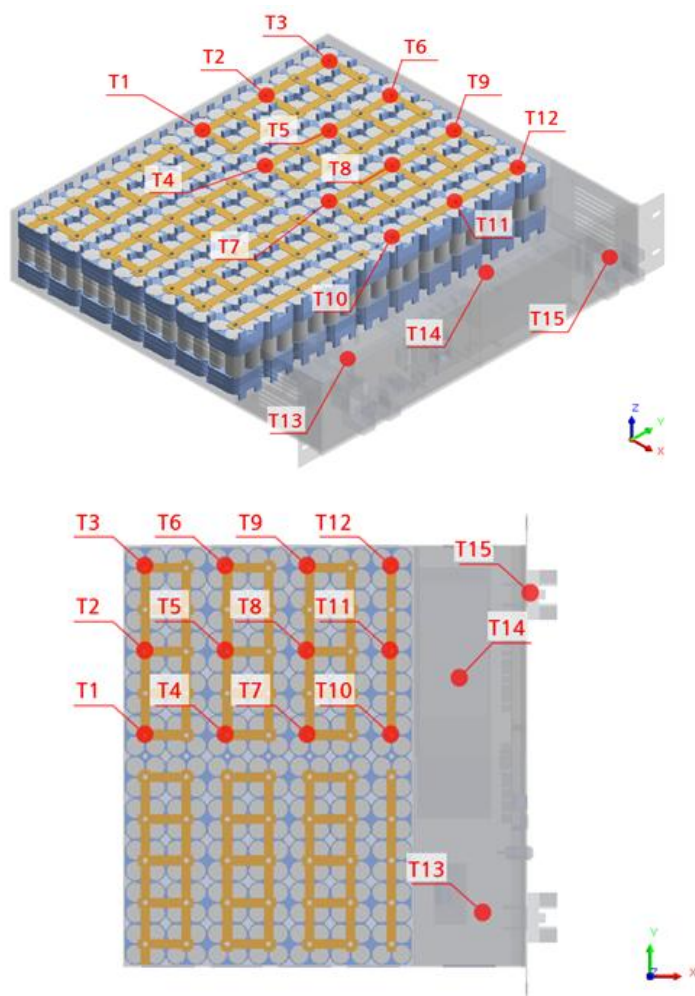


Fig. 4-28. Various points for temperature sensing(3D and 2D)

비선형과도열전달해석(Case #1-1, Case #2-1, Case #3-1, Case #4-1)에서는 온도분포결과를 확인하였다. 실제 모델에 장착한 온도센서를 포함하여 해석결과에서는 총 15개소에 대해 온도분포 결과를 도출하였다. 측정온도는 해당위치를 기준으로 busbar에서 도출하여 그래프로 나타내었고, 각 각의 analysis case에서 30분 간격으로 측정하였으며 표 4-5와 같고 그림 4-29, 4-30과 같이 나타내었다.

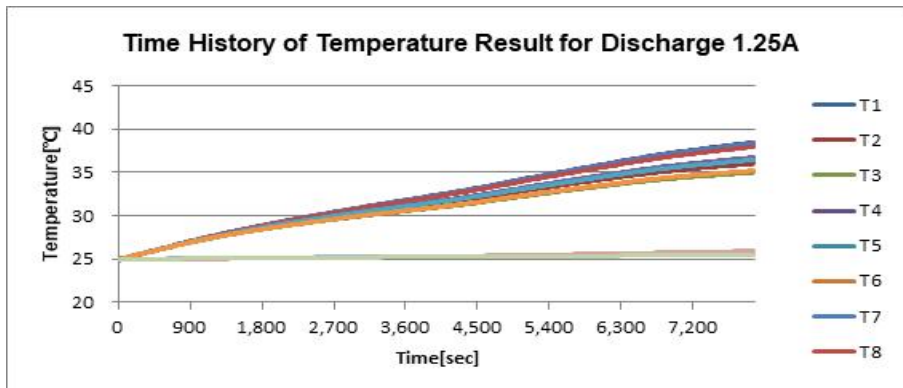


Fig. 4-29. Time history of temperature result for discharge 1.25 A

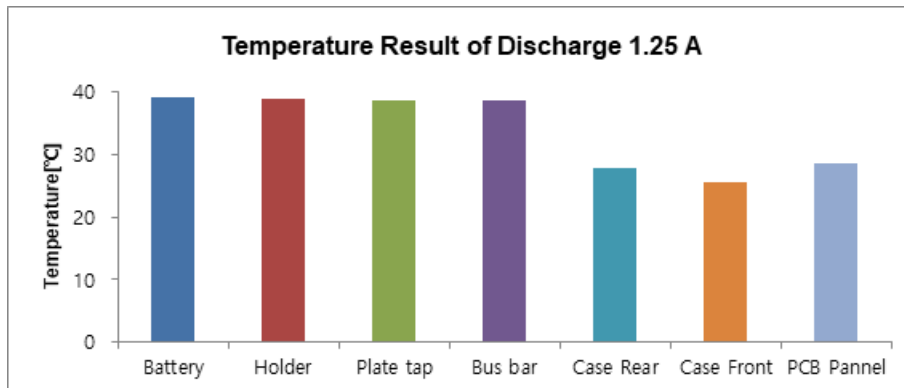


Fig. 4-30. Temperature results of discharge 1.25 A considering several materials in the energy storage system

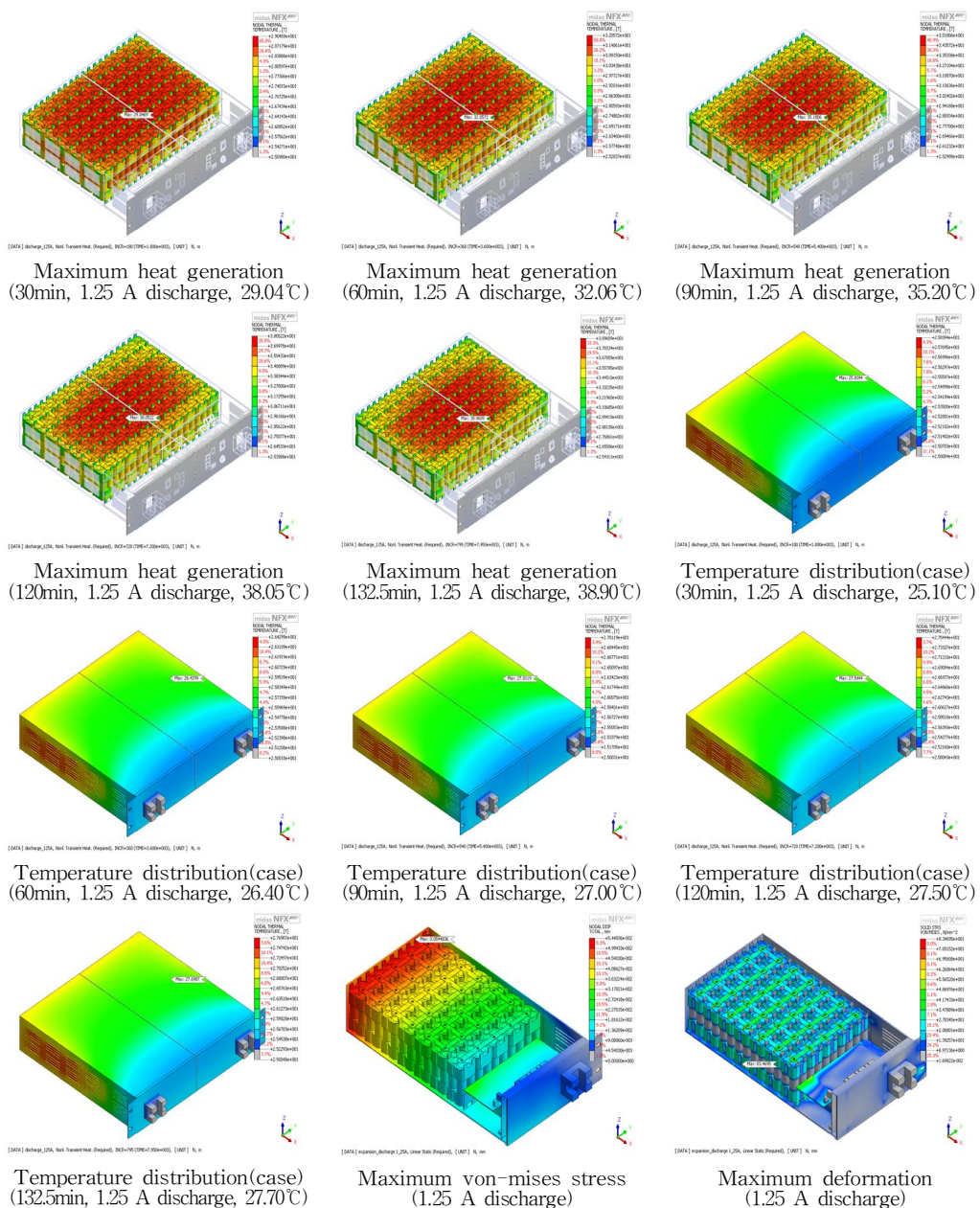


Fig. 4-31. Maximum heat generation, temperature distribution(case) considering various time, maximum von-mises stress and maximum deformation under discharge current(1.25 A discharge)

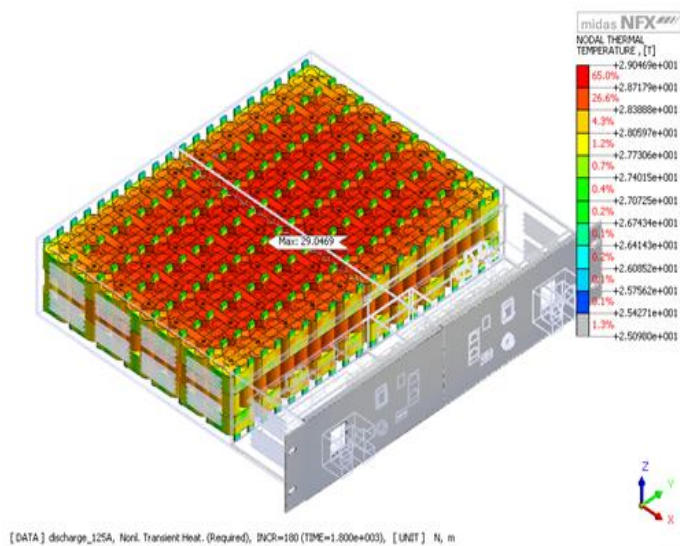


Fig. 4-32. Maximum heat generation(30 min, 1.25 A discharge, 29.04°C)(Enlarged)

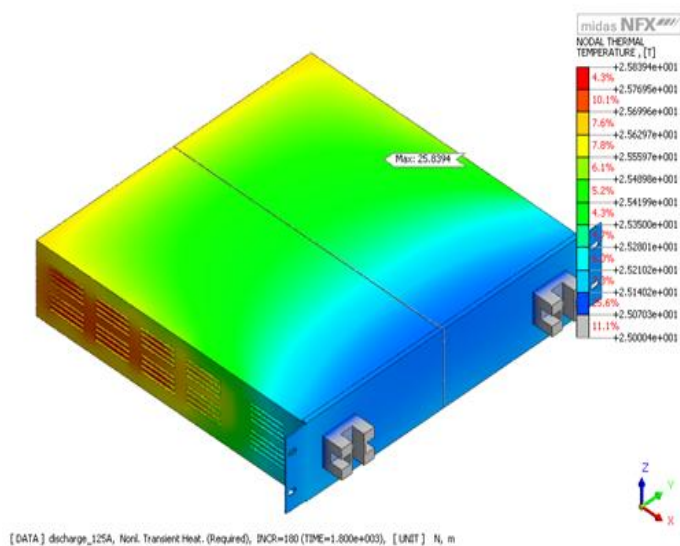


Fig. 4-33. Temperature distribution(case)(30 min, 1.25 A discharge, 25.10°C)(Enlarged)

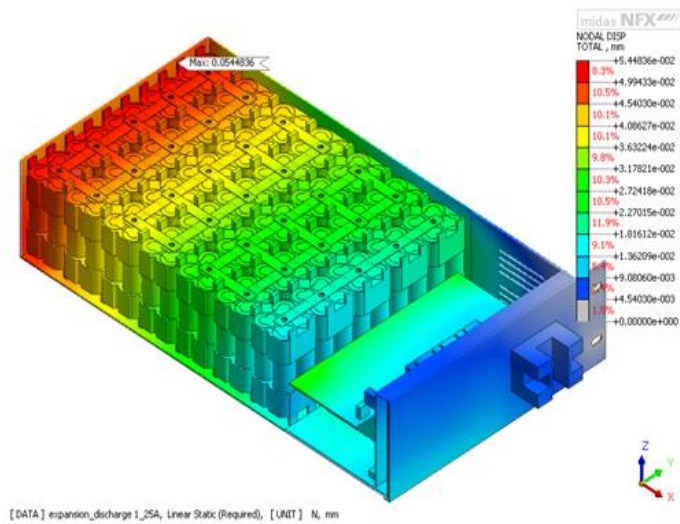


Fig. 4-34. Maximum von-mises stress(1.25 A discharge)(Enlarged)

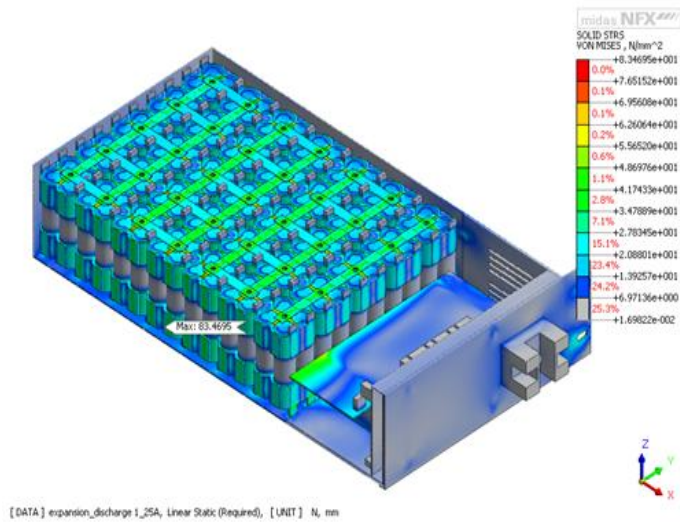


Fig. 4-35. Maximum deformation(1.25 A discharge)(Enlarged)

Table 4-6. Maximum deformation and von-mises stress considering various analysis cases(discharge 1.25 A)

Analysis Case	Max. Deformation [mm]	Max. Von-Mises Stress [MPa]	Note
Battery	0.054	54.40	
Holder	0.054	81.52	
Plate tap	0.054	83.47	
Bus bar	0.053	66.50	
Case Rear	0.054	62.41	
Case Front	0.013	29.47	
PCB Panel	0.031	64.74	

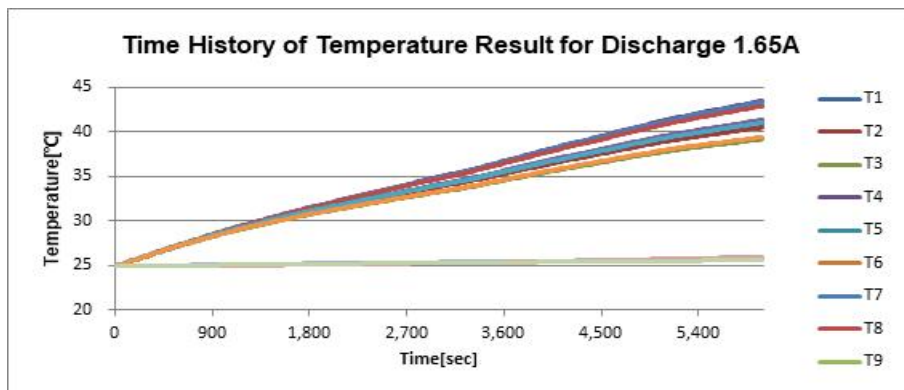


Fig. 4-36. Time history of temperature result for discharge 1.65 A

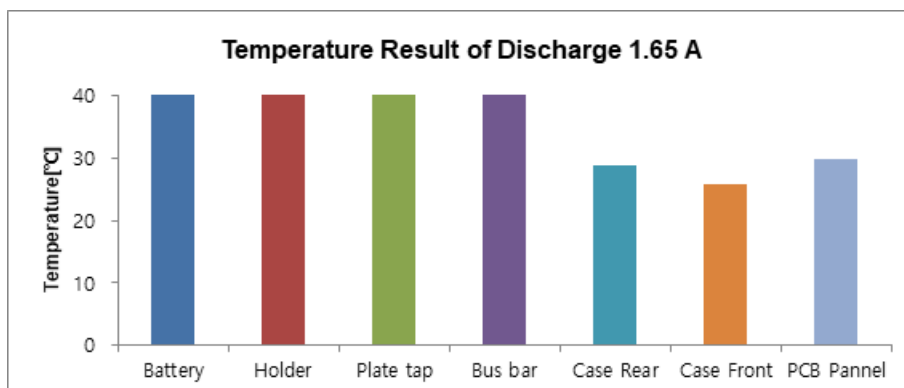


Fig. 4-37. Temperature results of discharge 1.65 A considering several materials in the energy storage system

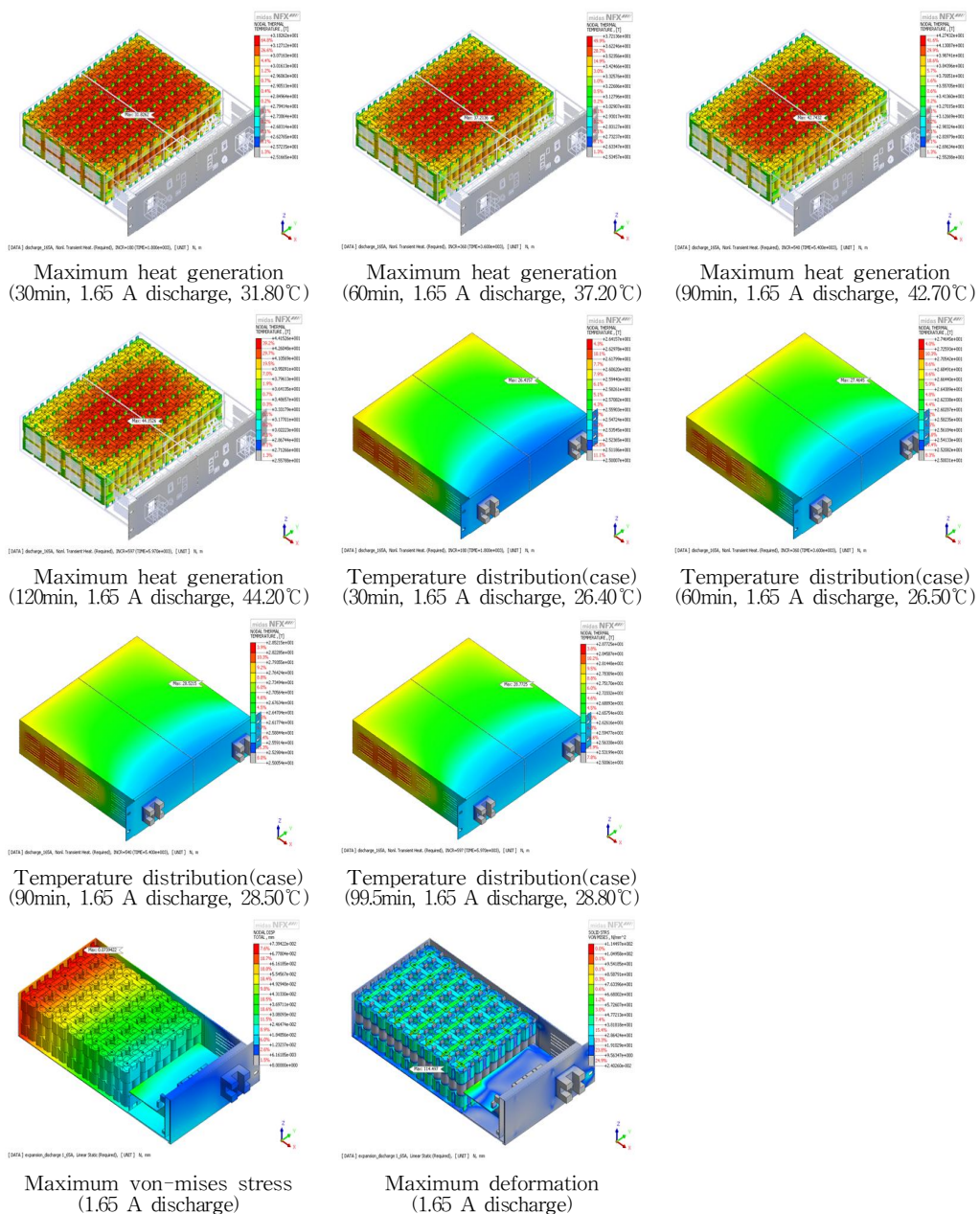


Fig. 4-38. Maximum heat generation, temperature distribution(case) considering various time, maximum von-mises stress and maximum deformation under discharge current(1.65 A discharge)

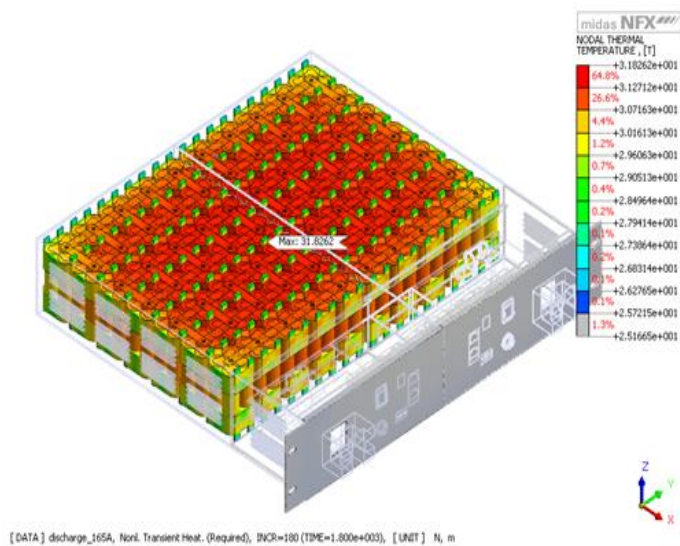


Fig. 4-39. Maximum heat generation(30 min, 1.65 A discharge, 31.80°C)(Enlarged)

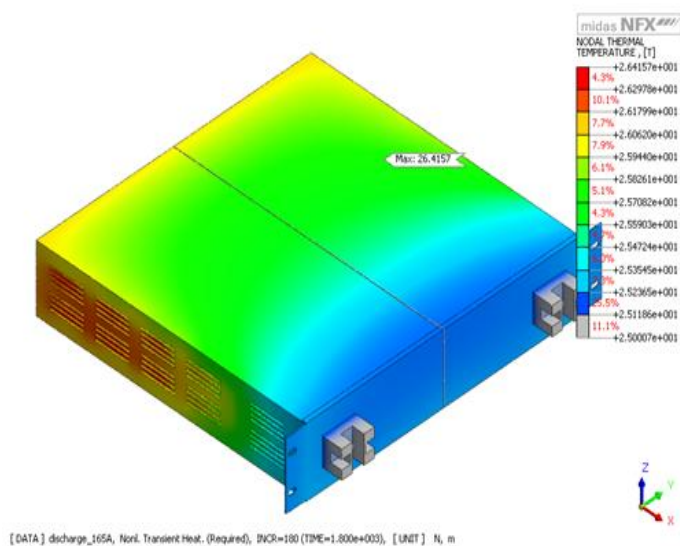


Fig. 4-40. Temperature distribution(case)(30 min, 1.65 A discharge, 26.40°C)(Enlarged)

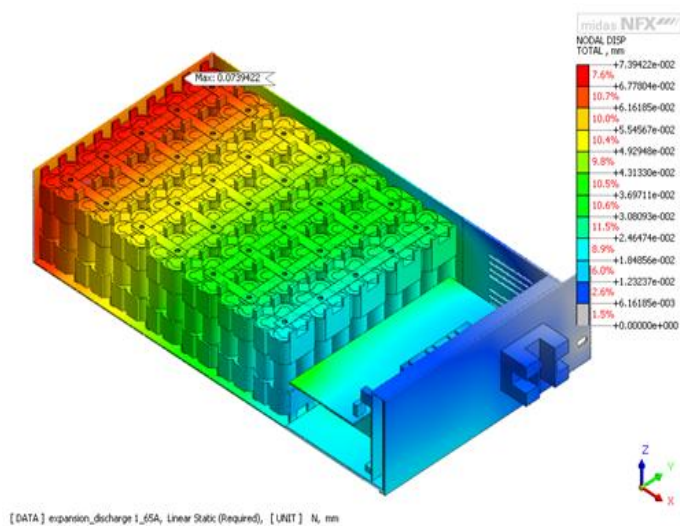


Fig. 4-41. Maximum von-mises stress(1.65 A discharge)(Enlarged)

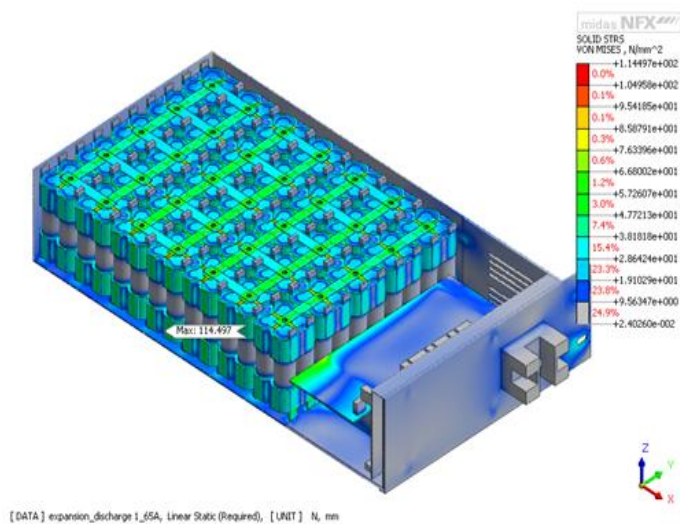


Fig. 4-42. Maximum deformation(1.65 A discharge)(Enlarged)

Table 4-7. Maximum deformation and von-mises stress considering various analysis cases(discharge 1.65 A)

Analysis Case	Max. Deformation [mm]	Max. Von-Mises Stress [MPa]	Note
Battery	0.073	74.55	
Holder	0.074	111.44	
Plate tap	0.073	114.50	
Bus bar	0.072	91.21	
Case Rear	0.073	79.46	
Case Front	0.017	37.99	
PCB Panel	0.038	87.73	

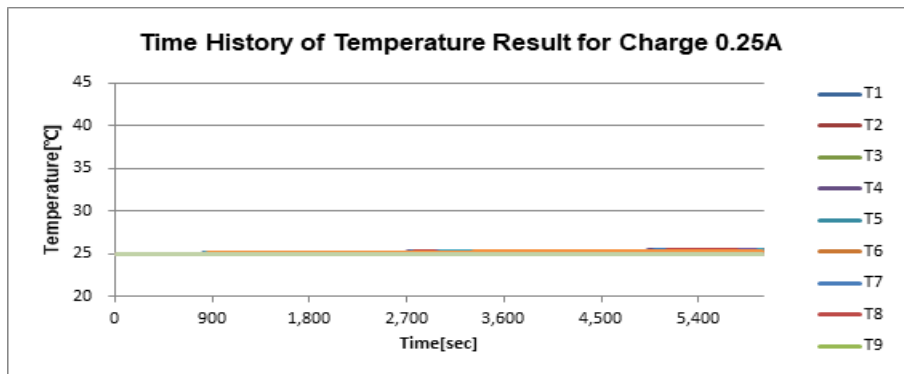


Fig. 4-43. Time history of temperature result for charge 0.25 A

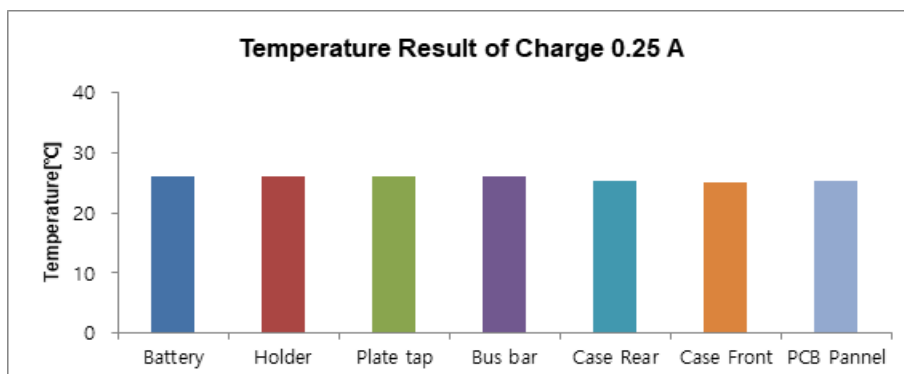


Fig. 4-44. Temperature results of charge 0.25 A considering several materials in the energy storage system

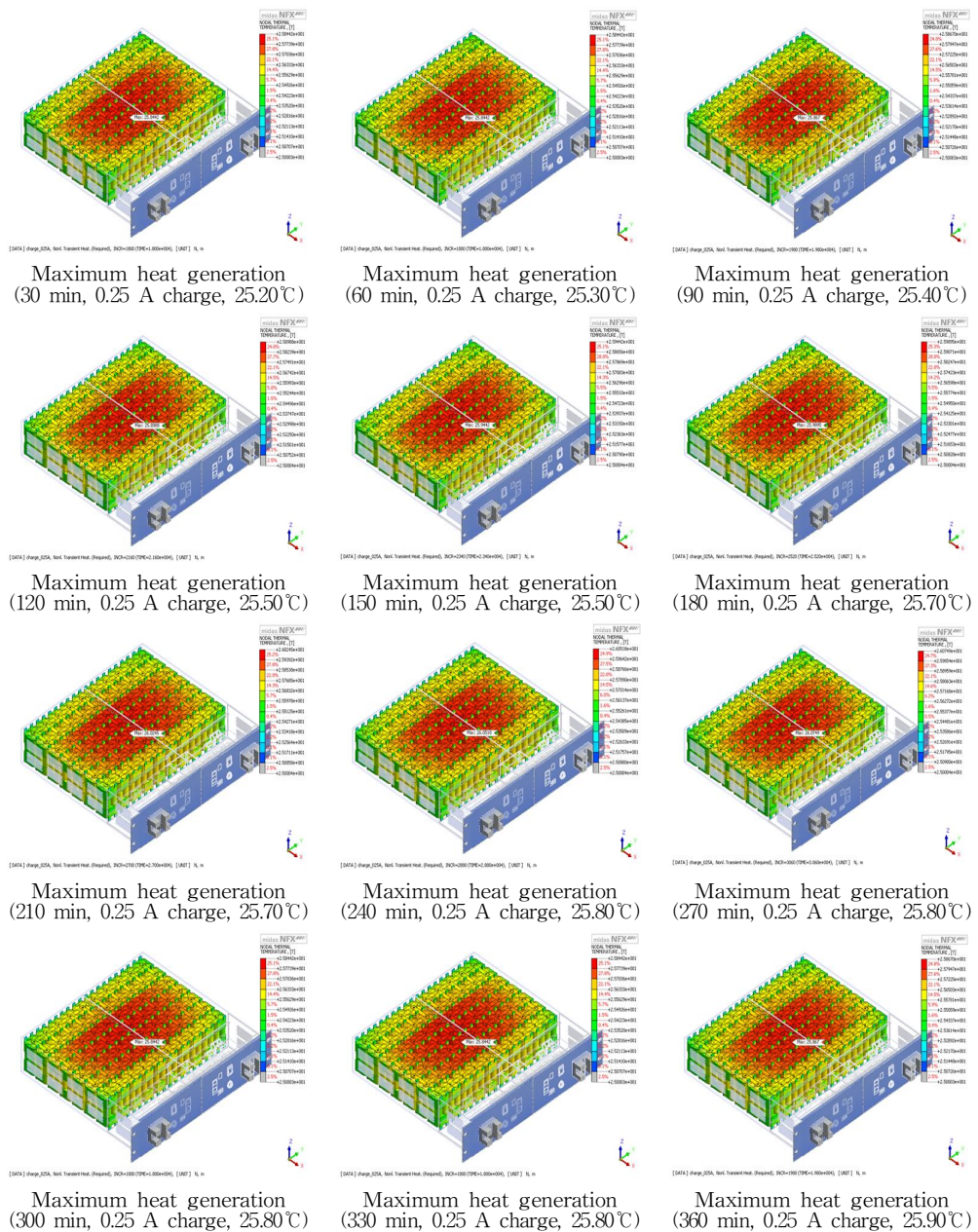


Fig. 4-45. Maximum heat generation considering various time under discharge current(0.25 A charge)

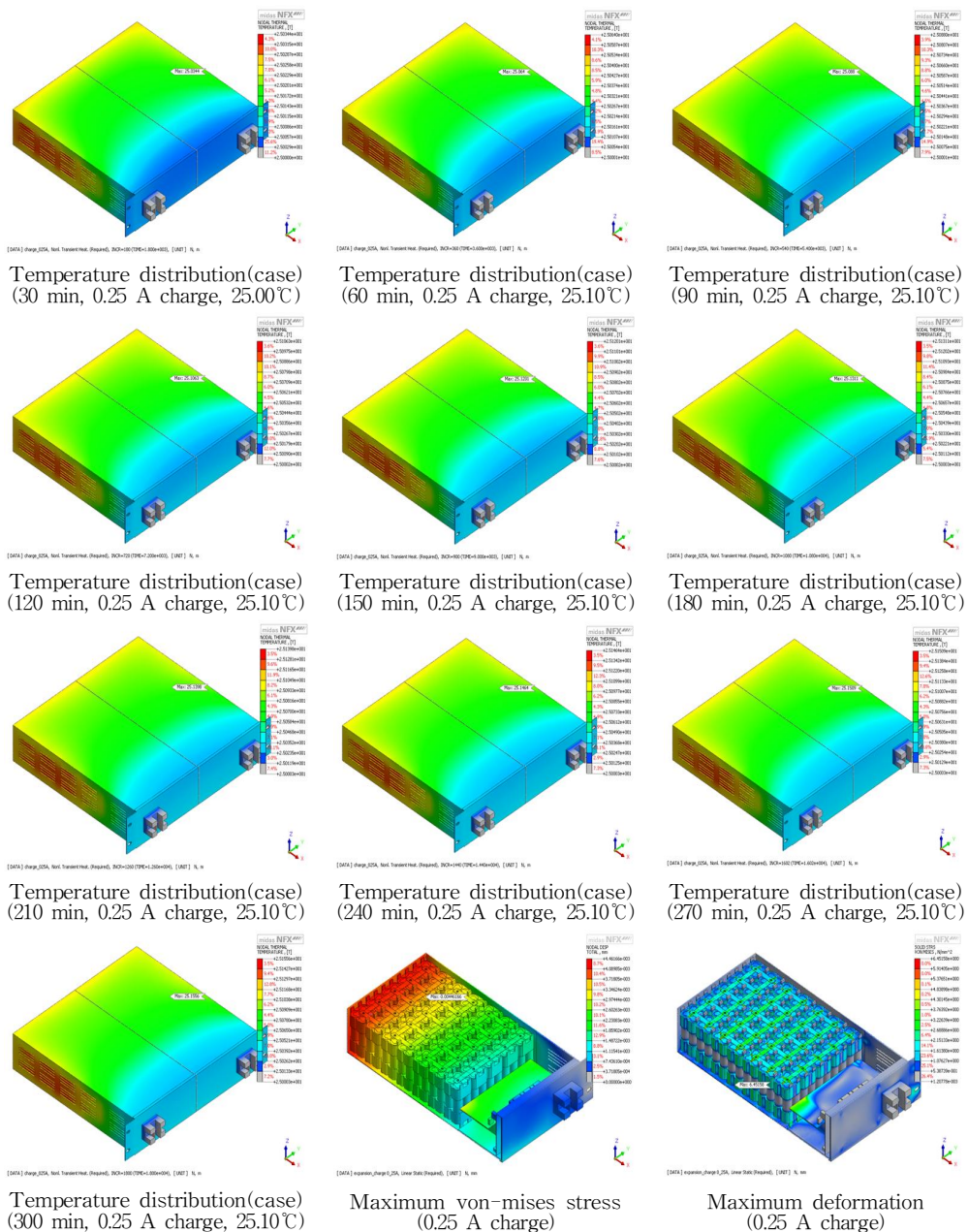


Fig. 4-46. Temperature distribution(case) considering various time, maximum von-mises stress and maximum deformation under discharge current(0.25 A charge)

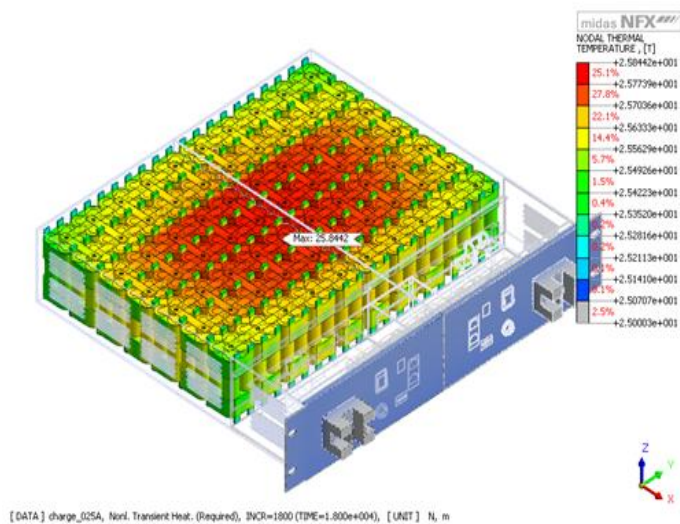


Fig. 4-47. Maximum heat generation(30 min, 0.25 A charge, 25.20°C)(Enlarged)

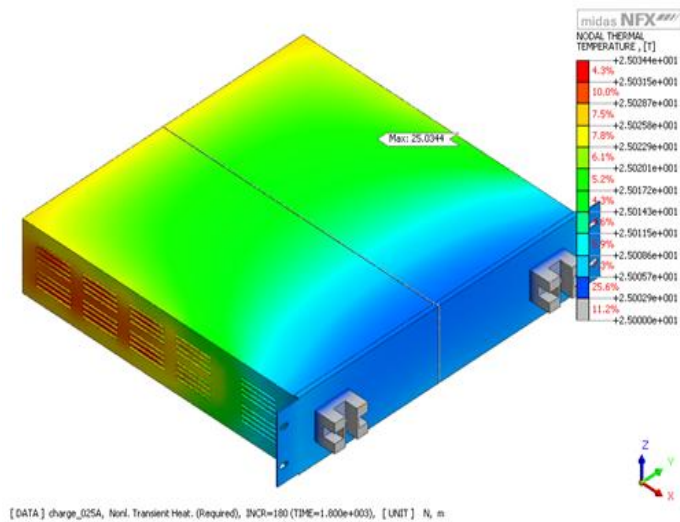


Fig. 4-48. Temperature distribution(case)(30 min, 0.25 A charge, 25.00°C)(Enlarged)

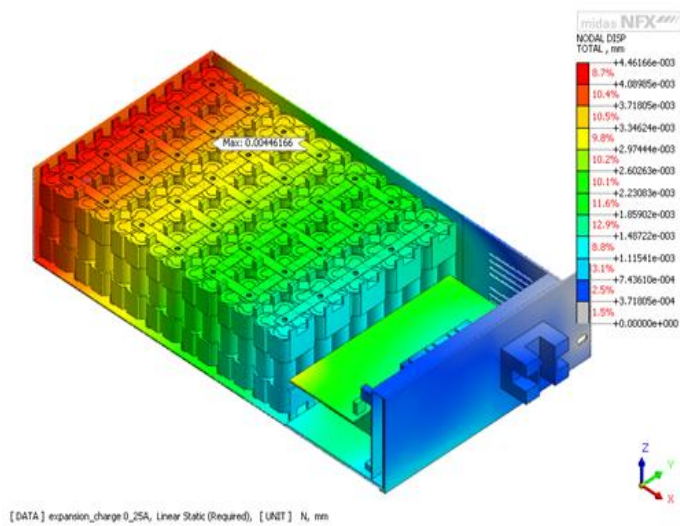


Fig. 4-49. Maximum von-mises stress(0.25 A charge)(Enlarged)

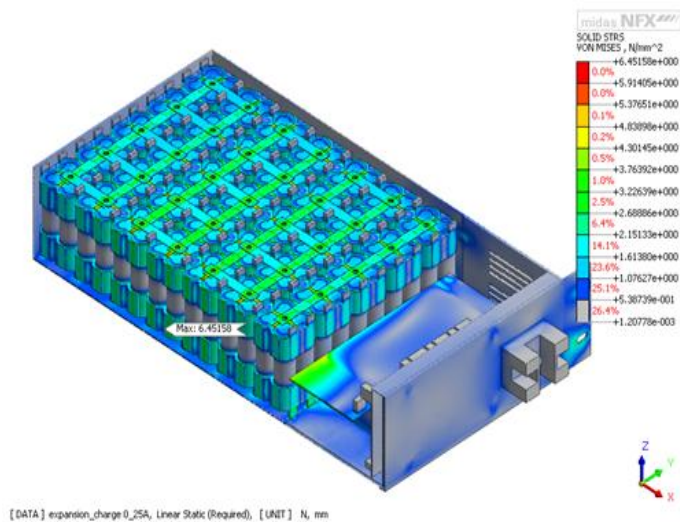


Fig. 4-50. Maximum deformation(0.25 A charge)(Enlarged)

Table 4-8. Maximum deformation and von-mises stress considering various analysis cases(charge 0.25 A)

Analysis Case	Max. Deformation [mm]	Max. Von-Mises Stress [MPa]	Note
Battery	0.004	4.30	
Holder	0.004	6.45	
Plate tap	0.004	6.45	
Bus bar	0.004	5.14	
Case Rear	0.004	6.13	
Case Front	0.001	2.86	
PCB Panel	0.003	5.29	

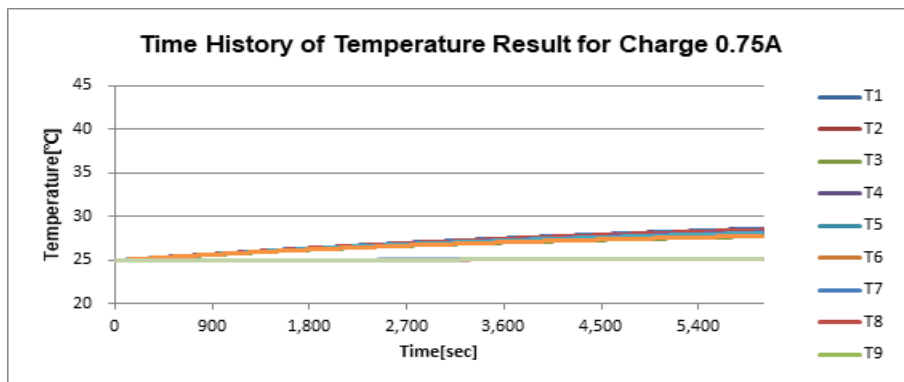


Fig. 4-51. Time history of temperature result for charge 0.75 A

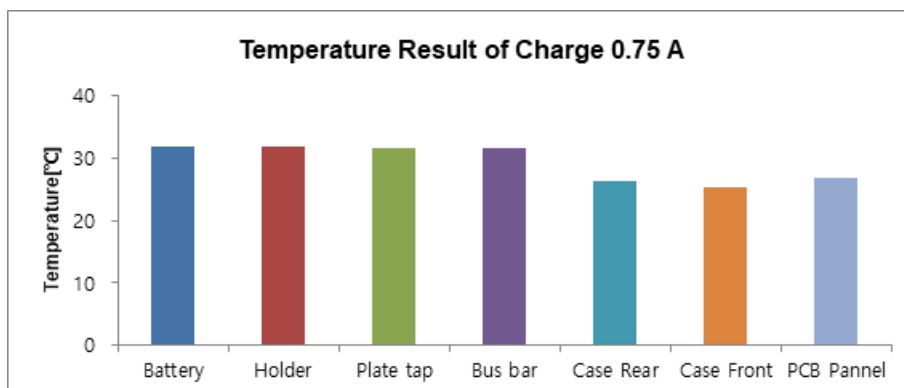


Fig. 4-52. Temperature results of charge 0.75 A considering several materials in the energy storage system

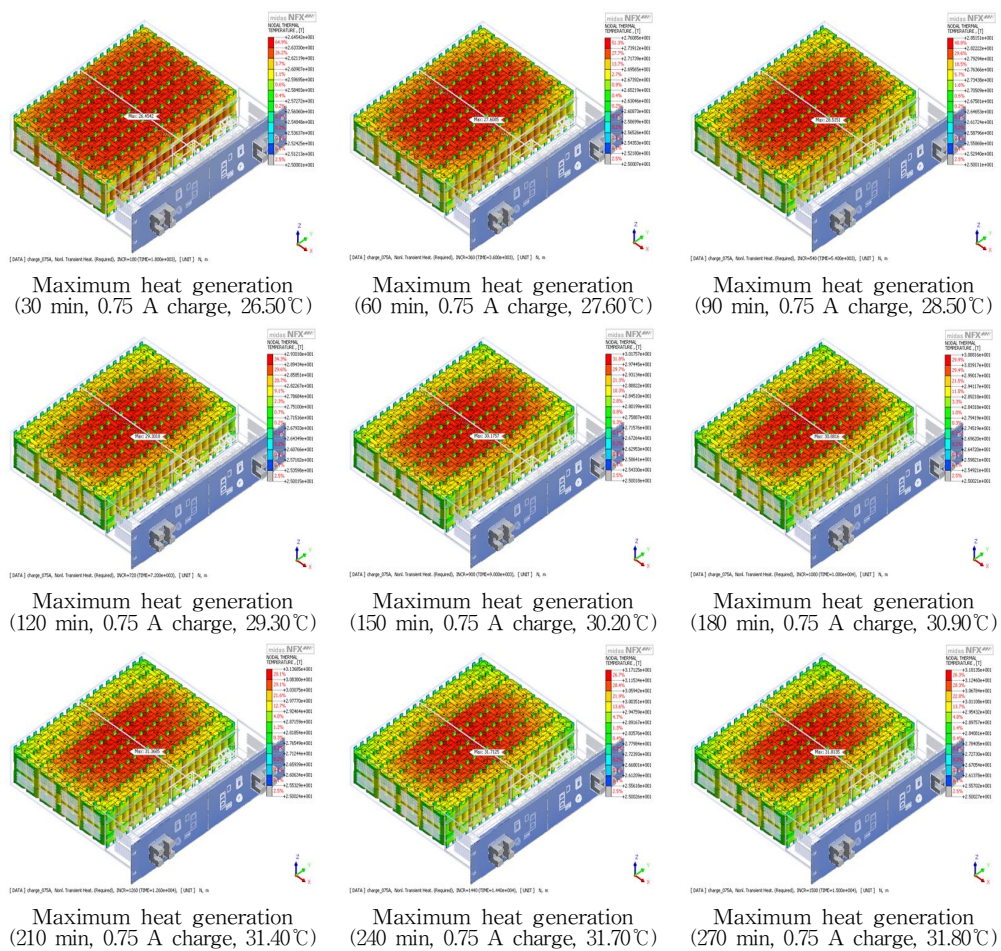


Fig. 4-53. Maximum heat generation considering various time under discharge current(0.75 A charge)

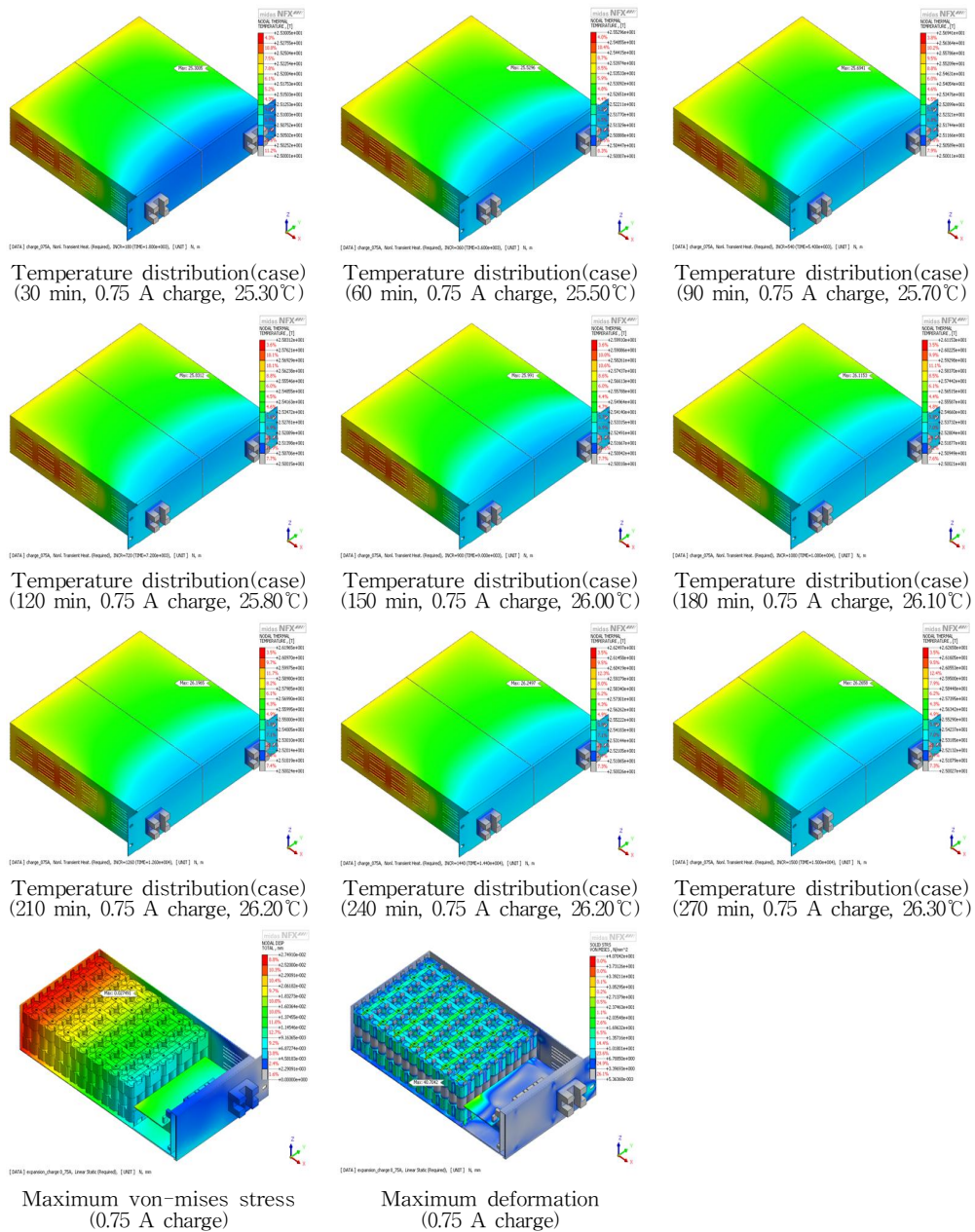


Fig. 4-54. Temperature distribution(case) considering various time, maximum von-mises stress and maximum deformation under discharge current(0.75 A charge)

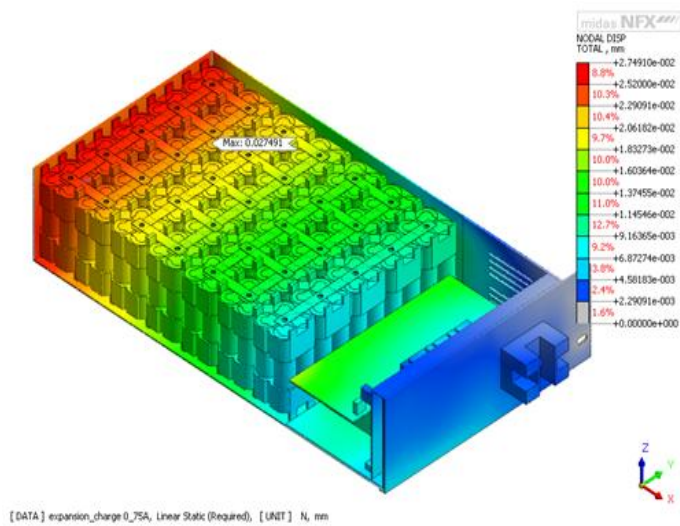


Fig. 4-57. Maximum von-mises stress(0.75 A charge)(Enlarged)

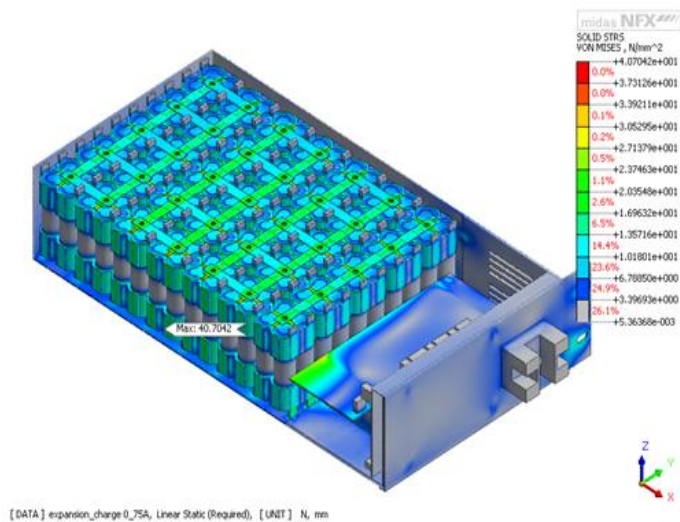


Fig. 4-58. Maximum deformation(0.75 A charge)(Enlarged)

Table 4-9. Maximum deformation and von-mises stress considering various analysis cases(charge 0.75 A)

Analysis Case	Max. Deformation [mm]	Max. Von-Mises Stress [MPa]	Note
Battery	0.027	26.54	
Holder	0.027	40.25	
Plate tap	0.027	40.70	
Bus bar	0.027	32.44	
Case Rear	0.027	35.72	
Case Front	0.006	16.57	
PCB Panel	0.018	31.60	

Table 4-10. Maximum temperature values of 15 points(T1-T15)

Item	Max. Temperature [°C]				Evaluation
	Discharge		Charge		
	1.25 A	1.65 A	0.25 A	0.75 A	
T1	36.3	40.9	25.8	30.3	Reasonable
T2	36.0	40.5	25.8	30.1	Reasonable
T3	35.0	39.2	25.7	29.5	Reasonable
T4	38.5	43.5	26.0	31.5	Reasonable
T5	38.0	43.0	26.0	31.2	Reasonable
T6	36.7	41.3	25.9	30.5	Reasonable
T7	38.4	43.4	26.0	31.5	Reasonable
T8	37.9	42.9	26.0	31.2	Reasonable
T9	36.6	41.2	25.9	30.5	Reasonable
T10	36.7	41.4	25.9	30.6	Reasonable
T11	36.4	41.0	25.8	30.4	Reasonable
T12	35.2	39.4	25.7	29.7	Reasonable
T13	25.6	25.8	25.0	25.3	Reasonable
T14	25.9	26.0	25.1	25.7	Reasonable
T15	25.5	25.6	25.0	25.2	Reasonable

에너지 저장시스템 내 원통형 셀 INR18650-29E에 대한 충전 및 방전시의 전류량에 따른 온도특성과 온도상승에 따른 열팽창 특성을 유한요소해석의 결과를 나타내었다. 방전은 1.25 A와 1.65 A의 전류를 적용하였고, 충전의 경우 방전보다 약간 작은 0.25 A와 0.75 A의 전류를 적용하였다. 먼저 온도분포특성에 있어 충전/방전 시 초기부터 시간이 지남에 따라 발생하는 발열량은 다소 변동이 있으나 온도분포를 알아보는 비선형 과도상태 열전달해석에서 살펴본 바, 온도 편차는 발열량의 변동량 만큼 차이를 보이지 않고 선형적으로 증가하는 현상을 확인하였다. 이것은 배터리나 busbar가 가진 고유성질인 비열(specific heat), 열전도율(heat conductivity)이 높기 때문에 큰 변동이 발생하지 않는다. 전류량이 가장 많은 방전 1.65 A에서 가장 높은 온도가 측정되었으며, 그 값은 45℃를 초과하지 않는다. 다음으로 열팽창 특성에서는 온도 상승 폭이 큰 조건에서 변형량과 응력값이 높게 도출되는데 방전 시 1.65 A에서 가장 큰 값이 도출되었다. 최대변형은 bolt가 체결되는 front case로부터 가장 먼 거리에서 발생하며 그 값은 0.07 mm 미만으로 미세한 변형이 발생하나 대부분 탄성한계 내에 존재하는 응력값이 도출되었으므로 영구변형에 대한 여지는 거의 없음을 확인하였다. 최대응력은 114MPa 가량으로 재질특성인 항복강도(yield strength)를 초과하지 않음을 확인하였다.

결론적으로, 설계된 에너지 저장시스템의 온도분포(최대 45℃를 초과하지 않음)를 통해 열적 안정성이 확보되었음을 확인하였으며, 최대응력은 114 MPa 이하로 재료의 항복강도를 초과하지 않으므로 구조적 안전성을 충분히 확보하고 있음을 판단하였다.

C. 분산형 보호회로

분산형 보호회로 최종 점검을 위해 에너지 저장시스템(SP48M)의 동작 검증 및 시험을 실시하였다. 분산형 보호회로를 포함한 최종 에너지 저장시스템 특징은 용량과 전류성능을 높이기 위해 병렬로 연결하였고, 에너지 저장시스템 단위 BMS 내장으로 셀 전압 정밀 측정 및 내부 션트 저항을 통해 셀의 과충전/과방전을 방지하고 SOC를 산출하였다. 내부 온도를 추가로 측정하여 에너지 저장시스템의 과열을 방지하였다. 보호회로(MOSFET) 내장으로 과부하시 빠른 반응속도로 안전하게 출력 차단 및 단락(합선)으로부터 배터리를 보호하고 어떤 구성요소의 손상도 없이 출력을 분리하게 하였다. 에너지 저장시스템 내부 셀 간의 화학적/전기적 특성들에 의해 전하 불균형 현상이 발생할 수 있으므로 셀 밸런싱 기능을 탑재하여 셀 간 전압을 균일하게 유지하여 배터리 수명을 연장하였다. 표 4-11은 SOC에 따른 에너지 저장시스템 상태 추정 지표를 나타내고 표 4-12는 설계된 에너지 저장시스템(SP48M)을 나타낸다.



Fig. 4-59. Energy storage system(SP48M)



Fig. 4-60. PCM and BMS in the energy storage system(SP48M)

Table 4-11. Final SOC status according to SOC level description

Status	Description
100%	SOC Level : > 81%
80%	SOC Level : 61 ~ 80%
60%	SOC Level : 41 ~ 60%
40%	SOC Level : 21 ~ 40%
20%	SOC Level : 0 ~ 20%

Table 4-12. SP48M specification

Item	Spec	Note
	SP48-29E-57M	
Nominal Voltage	51.8 V	
Nominal Capacity	50 Ah	
Operation voltage	42~56 VDC	SOC 80%
Cell voltage max. cut-off	4.2 V	
Cell voltage min. cut-off	2.7 V	
Cell voltage shutdown	2.5 V	Deep Discharge
Standard charge current	15 A	
Continuous discharge current	25 A	
Max. discharge current	33 A	(1.2sec)
Short circuit protection	200 A	(400μs)
Operating temperature	-20 ~ 45℃	
Communication	CAN	
Parallel connection	8 EA	
Self-discharge rate per month	<3%	shutdown mode
Operating mode consumption	3 W	
Shutdown mode consumption	10 μA	
Connection terminal	M6 screw	
Weight	About 25 Kg	
Dimension(WHD mm)	433 X 88 X 455	
Cell	Lithium-ion Samsung SDI	

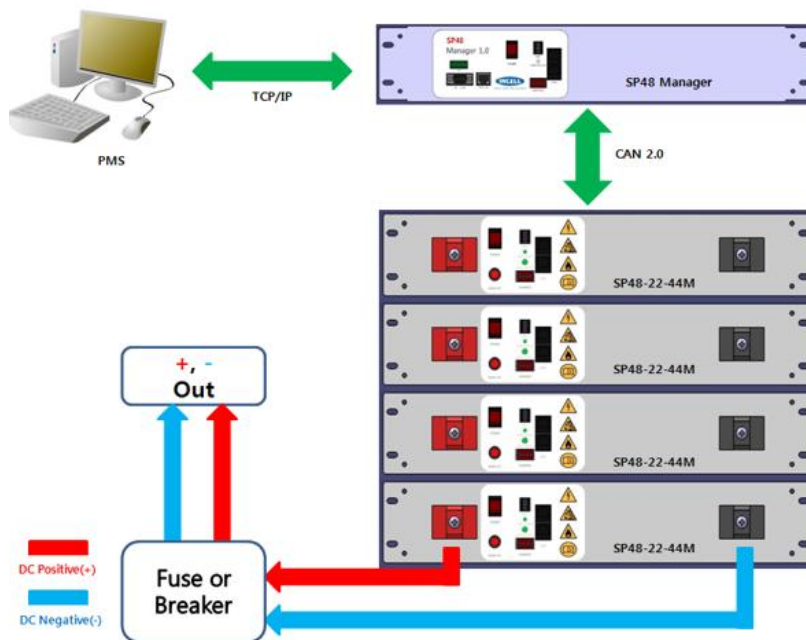


Fig. 4-61. Block diagram of the energy storage system(SP48M)

V. 결 론

화석연료 사용에 따른 환경오염을 해결하기 위해 태양광, 풍력, 연료전지 등의 신재생에너지 분야의 연구가 활발히 진행되고 있으며, 이 분야에 사용되는 분산 전원 시스템 개발에 있어 배터리는 없어서는 안 될 중요한 수단이다. 이에 발맞추어 안전한 배터리의 사용 및 체계적인 관리를 위한 연구의 필요성이 동시에 대두되고 있으며, 특히 고전압/고용량 어플리케이션의 부하조건에 따라 단위 셀의 직렬, 병렬 및 직병렬조합 연결 형태인 에너지 저장시스템의 관심 증대 및 이의 효율적 운용을 위한 배터리관리시스템 및 보호회로 연구도 매우 중요하다. 그러므로, 본 논문에서는 에너지 저장시스템의 최적설계 및 이의 효율적인 운용을 위한 분산형 보호회로 및 배터리관리시스템(SOC/SOH 추정알고리즘 및 열해석) 연구하고 이를 실제 설계된 에너지 저장시스템(14S20P)에 탑재하여 성능을 최종 검증하였다.

우선 원통형 셀(INR18650-29E)을 이용하여 직병렬조합 배터리팩(에너지 저장 시스템)을 설계 및 실험을 진행하였다. 전기화학적 특성이 유사한 단위 셀을 사전에 선별하고 이를 토대로 에너지 저장시스템을 설계하여 내부 셀 간 야기될 수 있는 전압과 SOC 불균형을 최소화하였다. 스크리닝 관련 정보 확보를 위해 각 셀의 방전용량 및 내부저항을 측정하였고 이의 유사성을 통계처리 기반 판단하여 스크리닝 구현 및 이를 바탕으로 에너지 저장시스템을 설계하였다. 스크리닝 기반 설계된 에너지 저장시스템은 배터리관리시스템 설계 시 매우 유리함을 보인다. 단위 셀과 에너지 저장시스템의 전기적 등가회로 모델 구조는 동일(개방 전압, 직렬저항, RC-ladder 사용 동일)하며 시스템 내 셀의 개수 및 직병렬조합 형태에 따라 전기적 등가회로 모델 내부 파라미터 값을 조절할 수 있음을 확인하였다. 설계된 전기적 등가회로 모델을 토대로 적응제어기법(확장칼만필터 및 이중확장칼만필터)를 사용하여 SOC/SOH 추정알고리즘을 구현하여 에너지 저장 시스템의 내부 충전상태 및 수명상태를 체크하였고 목표하는 에러율을 달성하였다. SOC/SOH 추정알고리즘 검증을 위해 레퍼런스 값을 선정해야 하는데, SOC 추정알고리즘의 경우 전류적산법, SOH 추정알고리즘의 경우 오프라인 방전용량 값으로 선정하여 알고리즘 성능을 검증하였다. 더욱이, SOC/SOH 추정알고리즘

구현 시 SOC 추정오류의 정도에 따라 신뢰영역과 비신뢰영역으로 구분하고 비신뢰영역의 경우 노이즈 모델 및 데이터리젝션을 추가로 반영하였다. 이를 위해, 확장칼만필터와 이중확장칼만필터의 칼만게인을 조정하였고, 이는 곧, 측정에러 노이즈 분산 값을 조절함을 의미한다. 전류의 크기, SOC 영역 및 동적특성에 따라 칼만게인 및 측정에러 노이즈 분산값은 수시로 조절되며 SOC 추정오류를 최소화 할 수 있는 값으로 최적화 됨을 확인하였다. 참고로, 이중확장칼만필터는 확장칼만필터 2개를 병렬로 연결한 형태로서 기존 확장칼만필터에서 SOC 추정만 할 수 있다면, 이중확장칼만필터는 SOC/SOH 동시 추정이 가능하다.

에너지 저장시스템의 배터리관리시스템은 기본적으로 상온에서 설계된다. 그러므로 사계절이 뚜렷한 우리나라 기후 특성상 외기온도를 반영한 배터리관리시스템을 추가로 반영해야 한다. 실제로, 여름과 겨울 외기온도에 따라 에너지 저장시스템의 내부 전기화학적 상태가 상이하므로 이를 모니터링 하여 온도에 따른 에너지 저장시스템의 내부변화 등을 최소화 할 필요가 있다. 그러므로, 본 논문에서는 에너지 저장시스템의 내부상태 열해석을 통해 온도에 강한 시스템 솔루션을 확보하였다. 더불어, 온도관리 기능을 SOC/SOH 추정알고리즘에 접목하여 외부환경의 변화에 상관없이 최적의 추정상태 및 수명상태를 확보하도록 하였다. NFX 기반 2차 열해석을 위해 유체 구조 연성해석을 채택하였고, 에너지 저장시스템의 충전 및 방전 시 내부파라미터 값 기반의 발열 분포 및 열 분포 특성과 온도 상승으로 인한 구조 변형을 반영하였다. 더불어, 해당 열해석을 위해 원통형 셀의 전기적 특성실험을 통해 SOC 10%별 내부저항을 산출, 충전과 방전 진행 시 SOC 10%별 I^2R 을 사용하여 각 셀당 발열량을 산출하였다.

예기치 않은 정전이나 순간 전압강하로 인해 에너지 저장시스템의 이상동작 발생 시 에너지 저장시스템의 노화가 불가피하며, 이로 인해 마이크로그리드 및 스마트그리드의 효율적 운용이 저해된다. 그러므로, 본 논문에서 단위 셀의 개수 및 조합에 따라 각각 정의되는 트레이 및 시스템 개별적 보호로부터 전체 에너지 저장시스템의 안전을 위한 분산형 보호회로를 제안하였다. 3 kW급 분산형 보호회로 하드웨어 및 제어알고리즘은 기본적으로 병렬로 운전하고, 이 때 에너지 저장시스템 상호간에 통신을 위해 CAN2.0을 구현하여 배터리용량과 전류성능을 높이도록 하였고 ID configuration 알고리즘을 추가로 반영하였다.

본 논문의 스크리닝 기반 에너지 저장시스템 설계, 전기적 등가회로 모델 설계 및 이를 기반으로 한 SOC/SOH 추정알고리즘(적응제어기반), 에너지 저장시스템의 충전/방전 시 내부상태 및 외기온도에 따른 상이한 전기화학적 특성을 반영하는 열해석, 그리고 예기치 않은 사고로부터 에너지 저장시스템을 보호하기 위한 분산형 보호회로까지 어느 하나 소홀한 부분이 없다. 각 부분이 유기적으로 연결될 시 에너지 저장시스템의 최적설계가 가능하고, 나아가 마이크로그리드 및 스마트그리드에서의 에너지 솔루션으로 부족함이 없으리라 판단한다.

참 고 문 헌

- [1] T.Kim, W.Qiao, L.Qu, “Power electronics-enabled self-X multicell batteries: A design toward smart batteries”, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 27, No.11, pp. 4723-4733, 2012.
- [2] L.-R.Chen, J.-J.Chen, C.-M.Ho, S.-L.Wu, D.-T.Shieh, “Improvement of Li-ion battery discharging performance by pulse and sinusoidal current strategies”, IEEE Trans. Ind. Electron., Vol. 60, No.12, pp. 5620-5628, 2013.
- [3] C.Zhang, Y.-L.Wei, P.-F.Cao, M.-C.Lin, “Energy storage system: Current studies on batteries and power condition system”, Renew. Sust. Energ. Rev., Vol. 82, pp. 3091-3106, 2018.
- [4] Z.Song, H.Hofmann, J.Li, X.Han, X.Zhang, M.Ouyang, “A comparison study of different semi-active hybrid energy storage system topologies for electric vehicles”, J. Power Sources, Vol. 274, pp. 400-411, 2015.
- [5] Z.Zhang, Y.-Y.Cai, Y.Zhang, D.-J.Gu, Y.-F.Liu, “A Distributed Architecture Based on Microbank Modules With Self-Reconfiguration Control to Improve the Energy Efficiency in the Battery Energy Storage System”, IEEE Trans. Power Electron., Vol. 31, No.1, pp. 304-317, 2016.
- [6] M.R.Aghamohammadi, H.Abdolahinia, “A new approach for optimal sizing of battery energy storage system for primary frequency control of islanded Microgrid”, Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 54, pp. 325-333, 2014.

- [7] M.Dubarry, A.Devie, K.Stein, M.Tun, M.Matsuura, R.Rocheleau, “Battery Energy Storage System battery durability and reliability under electric utility grid operations: Analysis of 3 years of real usage”, J. Power Sources, Vol. 338, pp. 65-73, 2017.
- [8] Y.Yang, S.Bremner, C.Menictas, M.Kay, “Battery energy storage system size determination in renewable energy systems: A review”, Renew. Sust. Energ. Rev., Vol. 91, pp. 109-125, 2018.
- [9] B.D.Olaszi, J.Ladanyi, “Comparison of different discharge strategies of grid-connected residential PV systems with energy storage in perspective of optimal battery energy storage system sizing”, Renew. Sust. Energ. Rev., Vol. 75, pp. 710-718, 2017.
- [10] T.Hosseini-mehr, A.Ghosh, F.Shahnia, “Cooperative control of battery energy storage systems in microgrids”, Int. J. Electr. Power Energy Syst., Vol. 87, pp. 109-120, 2017.
- [11] 김종훈, “효율적인 배터리 관리 시스템을 위한 스크리닝 및 배터리 팩 모델링 기법 연구”, 서울대학교 박사학위논문, 2012.
- [12] K.W.E.Cheng, B.P.Divakar, H.Wu, K.Ding, H.F.Hao, “Battery-management system (BMS) and SOC development for electrical vehicles“, IEEE Trans. Veh. Technol., Vol. 60 No.1, pp. 76-88, 2011.
- [13] N.Damay, C.Forgez, M.-P.Bichat, G.Friedrich, “Thermal modeling of large prismatic LiFePO₄/graphite battery. Coupled thermal and heat generation models for characterization and simulation”, J. Power Sources, Vol. 283, pp. 37-45, 2015.

- [14] L.Lu, X.Han, J.Li, J.Hua, M.Ouyang, “A review on the key issues for lithium-ion battery management in electric vehicles”, J. Power Sources, Vol. 226, pp. 272-288, 2013.
- [15] J.Li, J.K.Barillas, C.Guenther, M.A.Danzer, “A comparative study of state of charge estimation algorithms for LiFePO₄ batteries used in electric vehicles”, J. Power Sources, Vol. 230, pp. 244-250, 2013.
- [16] Y.Wang, C.Zhang, Z.Chen, “A method for state-of-charge estimation of LiFePO₄ batteries at dynamic currents and temperatures using particle filter”, J. Power Sources, Vol. 279, pp. 306-311, 2014.
- [17] S.Lee, J.Kim, B.H.Cho, “Maximum pulse current estimation for high accuracy power capability prediction of a Li-Ion battery”, Microelectron. Reliab., Vol. 55, pp. 572-581, 2015.
- [18] S.Lee, J.Kim, J.Lee, B.H.Cho, “State-of-charge and capacity estimation of lithium battery using a new open-circuit voltage versus state-of-charge”, J. Power Sources, Vol. 185, pp. 1367-1373, 2008.
- [19] Y.Wang, D.Yang, X.Zhang, Z.Chen, “Probability based remaining capacity estimation using data-driven and neural network model”, J. Power Sources, Vol. 315, pp. 199-208, 2016.
- [20] Y.Wang, C.Zhang, Z.Chen, “A method for state-of-charge estimation of Li-ion batteries based on multi-model switching strategy”, Appl. Energ., Vol. 137, pp. 427-434, 2015

감사의 글

박사과정을 진행하면서 저의 박사학위 논문이 잘 마무리 되도록 도움을 주신 많은 분들께 이 글을 통해 감사의 인사를 드리고자 합니다.

먼저 석·박사과정 동안 한결같이 모범적인 학자의 길을 보여주시고 저를 이 자리에 있기까지 지도해 주신 조금배 지도교수님께 존경과 감사의 인사를 드립니다. 그리고 제 논문심사 과정에서 바쁘신 중에도 심도 있는 분석과 조언으로 논문의 완성도를 높이고자 정성껏 지도 편달 해주신 최효상 교수님, 김남훈 교수님, 최연옥 교수님, 충남대 김종훈 교수님과 태양광 실험실 동료들께도 머리숙여 고맙다는 인사를 드립니다.

주어진 직무에 충실하면서 학업에 매진 할 수 있도록 배려해주신 허상국 처장님, 그리고 품질안전실, 한빛 사업처 직원들, 기술연구원 안재영 박사, 광주전기기술사회 회원들께도 무한한 감사의 말씀을 드립니다.

박사학위 논문을 마무리 하면서 논문 진행에 어려움이 많았지만 자식을 사랑으로 키워주신 아버님, 고인이 되신 어머님, 사랑하는 동생들, 그리고 온통 부족한 것 뿐인 저를 믿고 응원해준 처갓집 가족분들에게도 진심으로 감사의 마음을 전하고 싶습니다.

나와 결혼해서 한결같은 마음으로 희생과 격려로 혼자 직장일과 육아까지 모두 도맡아서 고생만한 사랑하는 아내 김근수 감사하고 사랑합니다. 당신에게 이 박사학위 취득의 영광을 돌리고 싶습니다. 그리고 사랑하는 박지연, 시연, 주원 세 딸들과도 이 기쁨을 같이하고자 합니다.

지면의 제한으로 언급하지 못했지만 저에게 힘이 되어 주시고 아껴주신 모든 분들께도 진심으로 감사하다는 말씀을 전합니다.

끝으로 저는 “이게 끝이 아닌 새로운 시작”이라고 생각하고 더욱 노력 할 것을 약속드립니다.

2018년 12월

박 인 수