

운행 전기자동차의 주행특성에 따른 배터리 셀 간 전압편차 분석

이상현¹⁾ · 김우일¹⁾ · 한만배^{*2)}

계명대학교 대학원 기계공학과¹⁾ · 계명대학교 기계공학과²⁾

Analysis of Voltage Deviation Among the Battery Cells According to Driving Characteristics for the Commercial Electric Vehicle

Sanghyun Lee¹⁾ · Wooil Kim¹⁾ · Manbae Han^{*2)}

¹⁾Graduate School of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

²⁾Department of Mechanical Engineering, Keimyung University, Daegu 42601, Korea

(Received 5 October 2022 / Revised 20 October 2022 / Accepted 20 October 2022)

Abstract : In electric vehicles, voltage imbalance occurs little by little due to temperature deviation and aging between battery cells. Therefore, battery cell balancing is recognized as an important factor in prolonging the life of the electric vehicle. In this study, cell voltage deviations of commercial electric vehicles were analyzed according to the driving modes used by the chassis dynamometer. The three driving modes were ASM2525, UDDS, and US06 with 0 % and 5 % slope, and with a battery SOC range of 80 % to 20 %. As a result, the cell voltage deviation increases as the slope increases. Among the driving modes, the largest cell voltage deviation was observed in the US06 mode, which comprises of the highest acceleration, speed, and load. Furthermore, at an SOC less than 20 % for the US06, cell voltage deviation was observed as the most significant. This means that BMS should control cell balancing with more caution at high-speed driving and high-load driving regions where the SOC is quite low.

Key words : Electric vehicle(전기자동차), Battery(배터리), Cell voltage deviation(셀 전압편차), Cell balancing(셀 밸런싱), Driving mode(주행모드), State of charge(충전상태)

1. 서론

세계적으로 자동차 시장은 저탄소 친환경으로 격변의 변화를 맞이하면서 전기자동차에 대한 관심이 집중되어지고 관련연구가 활발히 이뤄지고 있다. 전기자동차의 배터리는 여러 배터리 셀을 통합해 배터리 팩 단위로 구성하여 사용된다. 셀을 배터리 팩으로 구성하려면 여러 개의 셀을 직병렬로 연결하여 각각의 시스템이 필요로 하는 전압 및 전류 그리고 용량에 맞도록 설계하여 사용한다. 이렇게 구성된 셀을 통합 관리하기 위해 배터리관리시스템(Battery Management System, BMS)은 각 셀의 전반적인 데이터를 모니터링 한다. 이를 통해 배터리의 충전상태(State of Charge, SOC) 및 배터리의 건강상태(State of Health, SOH)를 추정하며 과 충전/방전을 방지하

여 안전사고를 예방하고 에너지를 효율적으로 관리한다.¹⁻³⁾ 하지만 BMS를 통한 셀의 관리에도 불구하고 셀 간의 온도편차, 기생저항성분(Parasitic Resistance), 노화 등으로 인해 셀 간의 전압 불균형이 조금씩 발생된다. 그로 인해 전압의 불균형이 누적되어 편차가 심한 셀이 하나라도 존재할 경우 나머지 셀의 에너지를 충분히 활용할 수 없고 배터리의 수명에도 악영향을 끼친다.⁴⁾ 따라서 배터리 팩의 활용도와 수명을 위해서는 셀 밸런싱이 중요한 요인으로 인식되고 있다.

최근에는 배터리 셀들 간의 전하 불균형이 반복되는 충/방전 사이클을 통해 배터리팩 전체의 수명을 급격히 감소시키고 심하면 화재나 폭발의 위험성을 초래한다고 알려져 있다.^{5,6)} 그러므로 배터리팩 모델링에서 셀을 균

*Corresponding author, E-mail: mbhan2002@kmu.ac.kr

[†]This is an Open-Access article distributed under the terms of the Creative Commons Attribution Non-Commercial License(<http://creativecommons.org/licenses/by-nc/3.0>) which permits unrestricted non-commercial use, distribution, and reproduction in any medium provided the original work is properly cited.

형 있게 사용하는 셀 밸런싱에 대한 중요성이 부각되며 관련 연구는 다양하게 진행되어지고 있다. 관련 연구로는 밸런싱 회로의 구조를 변경하여 밸런싱 속도를 높이는 연구가 진행되었고^{7,8)} 밸런싱 제어 알고리즘을 개선하여 가변 전압 편차를 적용한 패시브 셀 밸런싱 방안 또한 연구되어왔다.^{9,10)} 그리고 셀 간 전압편차를 줄이기 위해 낮은 SOC영역에서의 가용전류를 조절하는 방안¹¹⁾ 등 여러 방법으로 다양하게 연구가 진행되어 왔다.

본 연구에서는 서로 다른 특징의 주행모드를 차대동력계에서 운행 전기자동차를 실차 주행하며 배터리 셀 간의 전압편차를 분석하였다. 주행 특징이 다른 3가지 모드는 각각 정속주행이 특징인 ASM2525모드와 가감속구간이 잦은 UDSS모드 그리고 급가속 및 고속주행구간이 포함된 US06모드로 주행모드를 선정했다.

2. 실험장치 구성 및 방법

실험에 사용된 차량은 HYUNDAI사의 전기자동차인 2019년 식 KONA Electric이며 해당 차량의 모터타입은 영구자석형 동기모터(Permanent Magnet Synchronous Motor, PMSM)가 장착되어있다. 모터의 최대출력은 150 kW, 최대토크는 395 Nm 이며 차량에 탑재된 배터리는 리튬이온폴리머 배터리로서 98개의 셀로 구성되어 있다. 실험차량의 자세한 제원은 Table 1에 나타내었다.

Table 1 Specifications of the test vehicle

Motor type	Permanent magnet Synchronous motor
Motor max torque/power	395 Nm/150 kW
Total gear ratio (reduction ratio*FGR)	7.981
Tire	215/55/R17
Battery	Lithium ion, 3P98S Cells, 180 Ah or 64 kWh
Fuel economy	5.6 km/ kWh

2.1 실험장치 구성

본 실험에서 사용한 동력계는 AVL사의 48inch single roll ZÖLLNER 차대동력계이며 이는 장비 System에 차량의 공차중량, 공기저항, 구름저항 등을 입력하여 공도주행을 모사할 수 있는 장비이다. 최대 4500 kg의 전륜 또는 후륜 구동 방식의 차량 실험을 위해 설계되었다.

전류측정은 HIOKI적산전류계로 측정된 값과 OBD에서 측정된 전류 데이터를 비교한 결과 0.98 % 차이로 무시할 만큼 작았다 따라서 본 실험에서는 OBD데이터를 사용하여 데이터 분석을 실시하였다. 98개 셀에 대한 전



Fig. 1 Equipments setting and data acquisition

압, 전류, SOC등의 데이터 측정은 차량의 OBD(On-Board Diagnostics)를 통해 측정하였으며 OBD 데이터를 10 ms 주기로 취득하였다. LabVIEW 프로그램을 이용하여 GUI(Graphic User Interface)기반으로 측정시스템 설계를 구성하였다. Fig. 1은 해당 실험의 구성을 나타내는 그림이다.

2.2 실험방법

서로 다른 특징의 주행모드를 차대동력계에서 실차주행하며 배터리 셀 간의 전압편차를 분석하였다. 연구에 선정된 주행모드는 주행특징이 다른 3가지 모드이며 정속주행이 특징인 ASM2525모드와 가감속구간이 잦은 UDSS모드 그리고 급가속 및 고속주행이 특징인 US06 모드로 주행모드를 선정하였다. 각각 주행모드의 최고 속도는 40 km/h, 91 km/h, 130 km/h 수준이며 가장 큰 가속도를 가지는 주행모드는 US06모드 이다. 이외 실험실 온도환경 조건을 공조장치를 통해 20 ~ 25 °C를 유지하며 차대동력계를 이용한 실차 실험을 진행하였다. 데이터 측정은 OBD단자를 통해 측정하였으며 실시간으로 98개 셀에 대한 전압, 전류, SOC등의 데이터를 취득하였다. 셀 간 전압편차 분석은 주행모드 3종(ASM2525, UDSS, US06)에 경사구배 조건을 추가하여 주행특성에 따른 전비를 계산하고 전압편차를 분석하였다. 그리고 충전상태에 따른 전압편차를 분석하기 위해 SOC 80 ~ 70 %, SOC 60 ~ 50 %, SOC 20 ~ 10 %구간에서 셀 간 전압편차를 분석하였다.

3. 실차 운전 시 배터리 셀 간 전압편차 분석

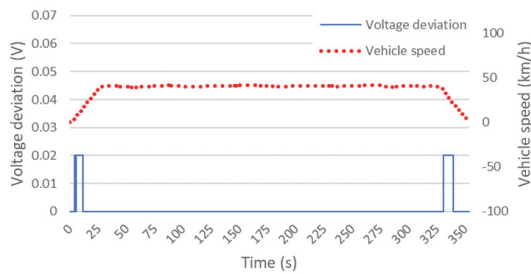
3.1 주행모드에서 경사구배에 따른 셀 간 전압편차

경사구배에 따른 셀 간 전압편차 분석은 ASM2525모드에서는 경사구배 0 %, 5 %, 10 %조건에서 진행하였으

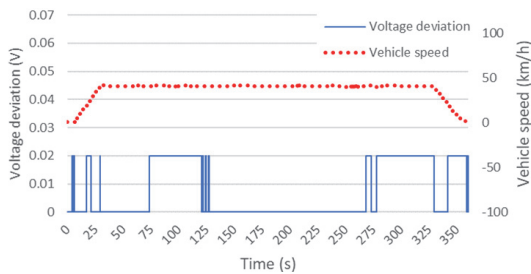
며 UDDS와 US06모드에서는 경사구배 0%, 5% 조건에서 진행하였다. 해당 주행모드는 가감속이 많이 포함된 주행모드이므로 경사구배 10%에 대하여 실험차량의 주행 성능이 부족하였다. 따라서 UDDS모드와 US06모드는 주행이 가능한 경사구배 0%, 5%에 대하여 주행하였다. 주행모드별 낮은 전비가 기록된 순서는 Table 2와 같이 동일한 경사구배에서 US06, UDDS, ASM2525 순이었으며 모든 주행조건에서는 ASM2525모드에서 경사구배 10%가 가장 낮은 전비를 보였다.

Table 2 Electric vehicle fuel economy table(km/kWh)

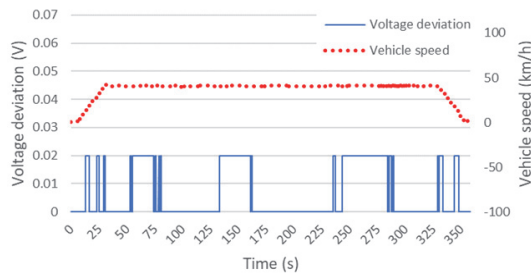
Slope gradient	0 %	5 %	10 %
ASM2525	8.12	2.45	1.42
UDDS	6.30	2.31	-
US06	4.32	1.98	-



(a) ASM2525 Slope 0 %



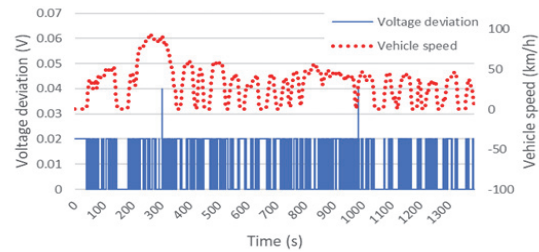
(b) ASM2525 Slope 5 %



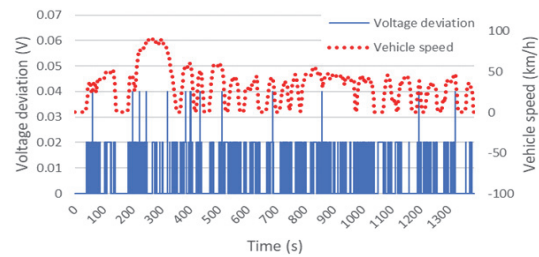
(c) ASM2525 Slope 10 %

Fig. 2 Voltage deviation in ASM2525 mode

주행모드에서 경사구배에 따른 98개 리튬이온 셀에 대한 전압편차를 Figs. 2 ~ 4에 나타냈었다. 전압편차는 주행시간에 따른 최대 셀 전압에서 최소 셀 전압의 차이로 구하였으며 OBD를 통해 측정된 전압은 0.02 V 단위씩 측정되었으며 데이터 샘플링 주기는 10 ms으로 데이터를 취득하였다. 해당 그래프를 살펴보면 동일한 경사구배에서는 US06모드를 주행 시 전압편차가 발생한 횟

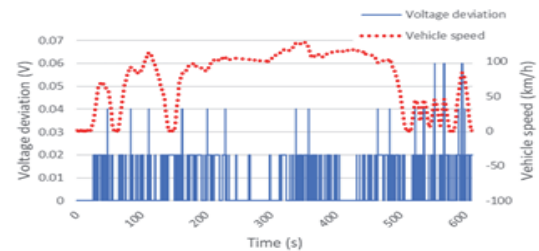


(a) UDDS Slope 0 %

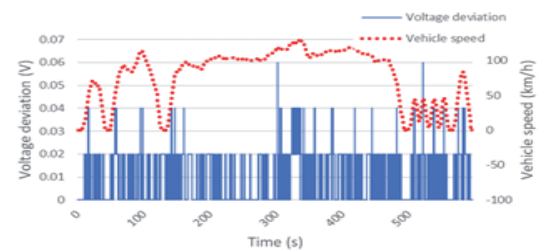


(b) UDDS Slope 5 %

Fig. 3 Voltage deviation in UDDS mode



(a) US06 Slope 0 %



(b) US06 Slope 5 %

Fig. 4 Voltage deviation in US06 mode

수가 두드러지게 증가하였고 최대 전압편차 또한 0.06 V 로 가장 높게 나타났다.

Tables 3 ~ 5는 각 주행모드에서 전압편차가 발생한 횟수를 Count 하여 빈도율로 변환한 표이다. 경사구배를 증가시켜 방전하는 전류의 크기를 키울수록 전압편차의 빈도는 미약한 수준이지만 증가하는 경향을 보였다. 또한 정속주행이 특징인 ASM2525모드에서는 모든 경사구배 조건에서 타 주행모드에 비해 상대적으로 적은 전압차이가 나타났으며 최대 전압차이는 0.02 V 수준이었다.

이러한 결과로 US06모드처럼 고속으로 주행하며 짧은 시간 안에 큰 전력을 소모하여 방전하는 전류의 크기가 커질수록 셀 밸런싱의 어려움이 발생한다는 것을 확인하였다. 하지만 전비가 가장 낮게 기록된 ASM2525모드 경사구배 10%조건에서 전압편차가 보다 적게 나타났다.

Table 3 Voltage deviation according to slope in ASM2525 mode

Voltage deviation (V)	Slope 0 %	Slope 5 %	Slope 10 %
0	95.68	64.93	68.80
0.02	4.31	35.06	31.19
0.04	0	0	0
0.06	0	0	0
0.08	0	0	0
0.1	0	0	0
Standard deviation	0.0041	0.0096	0.0093

Table 4 Voltage deviation according to slope in UDDS mode

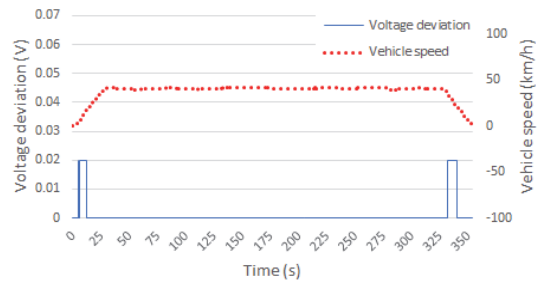
Voltage deviation (V)	Slope 0 %	Slope 5 %
0	60.90	69.81
0.02	39.07	30.11
0.04	0.01	0.06
0.06	0	0
0.08	0	0
0.1	0	0
Standard deviation	0.0098	0.0092

Table 5 Voltage deviation according to slope in US06 mode

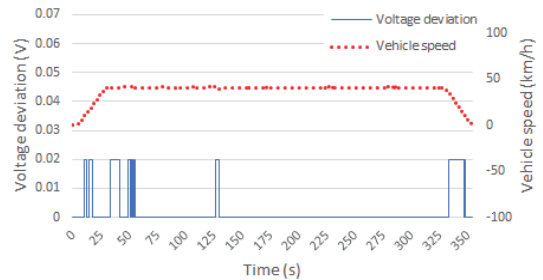
Voltage deviation (V)	Slope 0 %	Slope 5 %
0	64.79	55.98
0.02	34.50	42.27
0.04	0.62	1.68
0.06	0.06	0.04
0.08	0	0
0.1	0	0
Standard deviation	0.0099	0.0107

경사구배 및 주행모드에 따른 셀 간 전압편차는 셀 온도 변화와 이에 따른 셀 내부저항 감소가 주된 원인이다. 즉, 주행 시 경사구배가 증가하거나 주행모드의 특성이 가속이 많고 주행속도가 높은 경우 차량에서 요구되는 충/방전 전류량이 상대적으로 증가하는데, 이는 배터리 셀 온도를 상대적으로 증가시킨다. 배터리팩 설계 구조적으로 셀 위치에 따른 온도 편차가 발생하고, 셀 온도의 증가는 셀 내부저항을 낮춘다. 이렇게 낮아진 셀 내부저항 편차는 셀 간 전압편차로 측정되므로, 상대적으로 높아진 셀 온도 및 셀들 간의 온도편차, 이로 인한 셀 내부저항 감소의 편차가 셀 간 전압편차를 크게 한다.

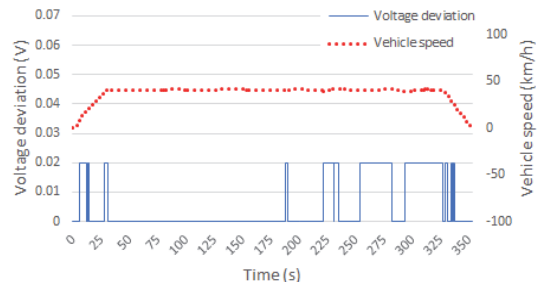
3.2 주행모드에서 SOC구간에 따른 셀 간 전압편차 경사구배에 따른 전압편차를 분석한 이후 SOC구간에



(a) ASM2525 SOC 80 %

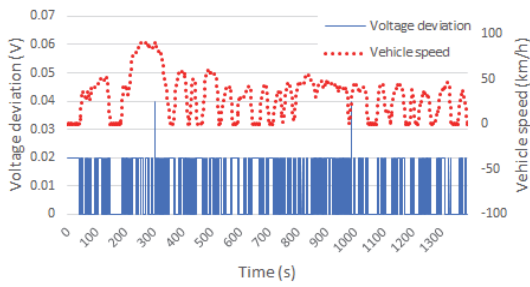


(b) ASM2525 SOC 60 %

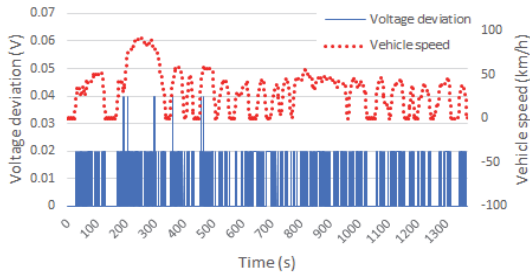


(c) ASM2525 SOC 20 %

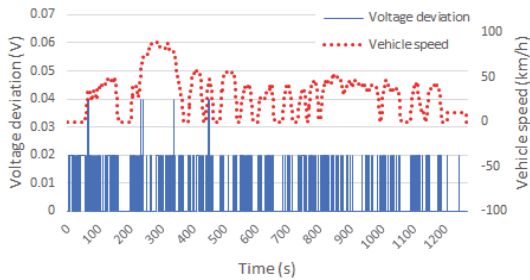
Fig. 5 Voltage deviation with respect to SOC in ASM2525 mode



(a) UDSS SOC 80 %



(b) UDSS SOC 60 %

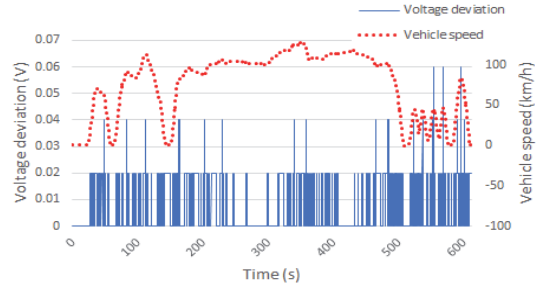


(c) UDSS SOC 20 %

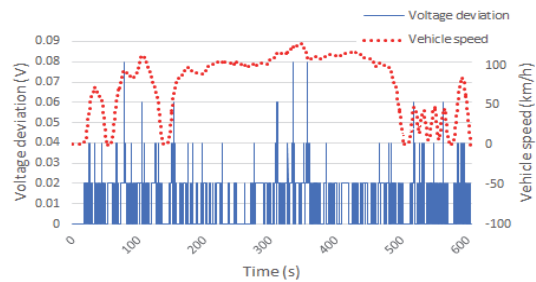
Fig. 6 Voltage deviation with respect to SOC in UDSS mode

다른 셀 간 전압편차를 분석하였다. 배터리 셀 간의 전압 편차는 배터리의 특성이 불안정해지는 저온의 환경이나 방전하는 전류의 크기가 클수록 전압편차가 커지고 특히 낮은 SOC의 영역에서 전압편차가 발생된다고 알려져 있다. 따라서 SOC구간에 따른 셀 전압편차분석은 배터리팩의 SOC 80 ~ 70 %, SOC 60 ~ 50 % 그리고 SOC 20 ~ 10 %의 총 3구간으로 나누어서 주행모드별 셀 전압 편차를 분석하였고 해당 결과는 Figs. 5 ~ 7을 통해 나타내었다.

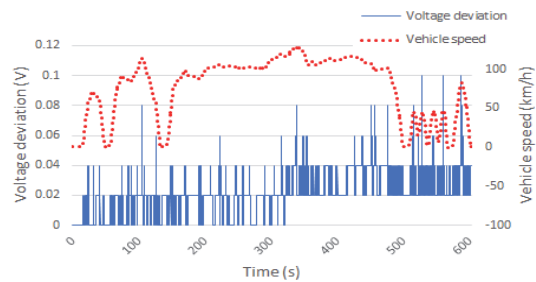
SOC구간별 전압차이는 SOC 80 %구간 대비 모든 SOC구간에서 전압편차의 정도와 빈도가 증가하는 경향을 보였고 특히 급가속 및 고속주행이 특징인 US06모드에서는 그 경향이 타 주행모드에 비해 두드러지게 나타났다. US06모드는 SOC 80 %구간에서 최대 전압편차는 0.06 V가 발생하였으며 SOC 20 %이하의 구간에서는 최



(a) US06 SOC 80 %



(b) US06 SOC 60 %



(c) US06 SOC 20 %

Fig. 7 Voltage deviation with respect to SOC in US06 mode

대 0.1 V의 전압편차를 보였다. 다른 주행모드가 0.02 V, 0.04 V수준인 것을 감안하면 US06모드에서는 눈에 띄게 증가하였다.

해당 결과를 좀 더 자세히 분석하기 위해 전압편차가 발생한 횟수를 빈도율로 변환 하여 Tables 6 ~ 8에 나타내었다. 정속주행인 ASM2525모드의 경우 모든 SOC구간에서 최대 전압편차는 0.02V로 별다른 차이가 보이지 않았으며 SOC가 낮은 구간일수록 최대 전압편차의 발생빈도는 각각 4.31 %, 9.55 %, 25 %이었다. SOC 20 %이하의 구간에서는 SOC 60 %구간 대비 최대 전압편차 발생빈도가 15.45 %가 증가하였다. US06모드의 SOC 20 % 이하의 구간에서 주행 시 전압편차가 발생하지 않았던 비율은 20 %가 채 되지 않으며 해당 구간에서 0.04 V의 전압편차의 비율은 0.6 %에서 21 %까지 증가하는 모습을 보였다.

Table 6 Voltage deviation according to slope in ASM2525 mode

Voltage deviation (V)	SOC 80 %	SOC 60 %	SOC 20 %
0	95.68	90.44	74.03
0.02	4.31	9.55	25
0.04	0	0	0
0.06	0	0	0
0.08	0	0	0
0.1	0	0	0
Standard deviation	0.0041	0.0059	0.0088

Table 7 Voltage deviation according to slope in UDDS mode

Voltage deviation (V)	SOC 80 %	SOC 60 %	SOC 20 %
0	60.90	73.02	75.75
0.02	39.07	26.89	24.14
0.04	0.01	0.08	0.1
0.06	0	0	0
0.08	0	0	0
0.1	0	0	0
Standard deviation	0.0098	0.0089	0.0086

Table 8 Voltage deviation according to slope in US06 mode

Voltage deviation (V)	SOC 80 %	SOC 60 %	SOC 20 %
0	65.04	64.79	19.98
0.02	34.34	34.50	57.60
0.04	0.52	0.6	21.35
0.06	0.09	0.06	0.83
0.08	0	0	0.16
0.1	0	0	0.06
Standard deviation	0.0099	0.0099	0.0137

SOC가 매우 낮은 영역인 20%이하의 구간에서 전압 편차의 크기와 발생빈도가 높은 이유는 셀 내부저항의 편차 증가로 판단된다. 셀 온도가 일정할 경우 SOC가 낮은 영역에서는 셀 내부저항이 급격히 증가하는 것으로 알려져 있다.¹²⁾ 전술한 바와 같이 배터리팩 설계 구조적으로 셀 위치에 따른 온도 편차가 발생한다. 즉, 주행모드 특성에 따른 충/방전 전류량의 차이에 의하여 셀 간 온도 차이를 발생하고, 셀 온도의 증가는 내부저항을 낮춘다. 이렇게 SOC에 의한 내부저항 변화와 주행모드 특성에 따른 셀 간 온도 편차에 의한 내부저항 변화가 맞물려 전압편차 크기 및 발생빈도가 증가한 것으로 판단된다. 그러므로 SOC 20%이하에서 고속 주행 및 경사도

증가에 따른 고 부하 운전영역에서는 보다 효과적인 셀 밸런싱을 위한 BMS 제어가 필요함을 확인하였다.

4. 결론

본 연구에서는 전기자동차에서 실차 운전 시 주행특성에 따른 셀 간 전압편차를 분석하였다. 이러한 셀 간 전압편차 발생은 셀 간의 내부저항 편차에 의한 것으로 판단된다. 본 연구에서 도출한 주요 결과를 요약하면 다음과 같다.

- 1) 동일한 경사구배에서 전압편차를 비교하면 3가지 주행모드 중 US06모드에서 전압편차의 크기와 발생빈도가 가장 크게 나타났으며 ASM2525모드에서는 최대 전압편차가 가장 안정적인 모습을 보였다.
- 2) 모든 경사구배 조건에서는 ASM2525모드에 경사구배 10%의 전비가 가장 낮게 나왔지만 US06모드 대비 전압편차의 크기와 발생빈도는 적게 나타났다. 이는 US06모드가 ASM2525모드 보다 주행패턴에서 잦은 가속과 급가속 및 고속 운전의 영향으로 판단된다.
- 3) SOC구간 별 전압편차는 SOC 20% 이하의 구간에서는 모든 주행모드에서 셀 간 전압편차의 크기와 빈도가 크게 증가하였다. 그러므로 SOC 20% 이하에서 고속 주행 및 경사도 증가에 따른 고 부하 운전에서는 보다 효과적인 셀 밸런싱을 위한 BMS 제어가 필요하다.

References

- 1) P. Weicker, Handbook of A Systems Approach to Lithium-Ion Battery Management, Artech House, Boston, 2014.
- 2) G. L. Plett, Handbook of Battery Modeling, Artech House, Boston, 2015.
- 3) G. L. Plett, Handbook of Equivalent-Circuit Methods, Artech House, Boston, 2016.
- 4) F. Feng, X. Hu, L. Hu, F. Hu, Y. Li and L. Zhang, "Propagation Mechanisms and Diagnosis of Parameter Inconsistency Within Li-Ion Battery Packs," Journal of Renewable and Sustainable Energy Reviews, Vol.112, pp.102-113, 2019.
- 5) M. A. Xavier, A. K. De Souza, K. Karami and G. L. Plett, "A Computational Framework for Lithium Ion Cell-Level Model Predictive Control Using a Physics-Based Reduced-Order Model," Journal of American Automatic Control Council, Vol.5, No.4, pp.1387-1392, 2002.
- 6) A. K. De Souza, S. M. Trimboli and G. L. Plett, "Lithium-Ion Battery Charging Control Using a Coupled Electro-Thermal Model and Model

- Predictive Control,” Journal of American Automatic Control Council, Vol.5, No.4, pp.1387-1392, 2020.
- 7) D. J. Park, S. Y. Choi, Y. W. Kim and R. Y. Kim, “A Novel Cell Balancing Circuit for Fast Charge Equalizatio,” Journal of The Transactions of the Korean Institute of Power Electronic, Vol.20, No.2, pp.160-166, 2015.
 - 8) J. H. Park, J. W. Kim, J. H. Kim and R. Y. Kim, “A Study on the Battery Voltage Prediction Model by Analyzing Fault Factor Characteristics Based on the SOC Deviation Estimation Algorithm for Prognosis of Over-discharge,” KSAE Fall Conference Proceedings, p.1248, 2020.
 - 9) H. W. Song, N. G. Lim, H. H. Jeong, J. S. Go and S. J. Lee, “A Study on the Simulation of Passive Cell Balancing Algorithm Applying Variable Voltage Deviation According to Long-Term Battery Charging/Discharging,” Journal of The Transactions of the Korean Institute of Power Electronic, Vol.20, No.2, pp.567-568, 2021.
 - 10) H. W. Song, N. G. Lim, H. H. Jeong, J. S. Go, J. E. Kim and S. J. Lee, “A Study on the Passive Cell Balancing Algorithm Applying Variable Voltage Deviation for Electric Vehicle Battery,” KSAE Spring Conference Proceedings, pp.765-766, 2021.
 - 11) H. J. Lee, J. H. Park, J. H. Kim, P. Y. Lee, S. J. Lee, H. C. Song and M. R. Ha, “Current Derating in Low SOC Range to Reduce Cell Voltage Deviation of Large Capacity Li-ion Battery Pack,” Journal of The Transactions of the Korean Institute of Power Electronic, pp.153-155, 2018.
 - 12) T. W. Kang, J. H. Kim, P. Y. Lee, M. L. Ha, H. C. Song and J. H. Kim, “Analysis of Electrical Characteristics of 24S1p Battery Considering Temperature and C-rates,” Journal of The Transactions of the Korean Institute of Power Electronic, pp.474-475, 2018.