

가스 센서 감시 장치를 이용한 배터리 보호 방법

이재경¹ · 박계춘^{2†}

¹인셀, ²목포대학교 전기 및 제어공학과

Battery Protection Method Using Gas Sensor Monitoring Device

JAEKYUNG LEE¹, GYECHOON PARK^{2†}

¹Incell, 18 Dosicheomdansaneop-ro, Nam-gu, Gwangju 61751, Korea

²Department of Electrical and Control Engineering, Mokpo National University, 1666 Yeongsan-ro, Cheonggye-myeon, Muan 58554, Korea

†Corresponding author :
pgccgp@mokpo.ac.kr

Received 26 March, 2021
Revised 17 April, 2021
Accepted 19 April, 2021

Abstract >> This paper is about the operating environment surrounding the battery and the methods and devices for monitoring battery damage and protecting the battery from fire hazards. More detailed information is about battery protection methods and devices to prevent thermal runaway, including algorithms to detect gas leaks early or to prevent malfunction of gas sensors, referring to the average values obtained based on the sensor signal values measured from the gas sensor.

Key words : Battery(배터리), Gas sensor(가스 센서), Energy storage system (ESS, 에너지저장시스템), Battery management system(배터리 관리 시스템), Thermal runaway(열 폭주)

1. 서론

일반적으로 배터리는 제품군에 따른 적용이 용이하고, 우수한 보존성 및 높은 에너지 밀도 등의 특성을 가지고 있다. 또한, 화석 연료의 사용을 감소시킬 수 있다는 일차적 장점뿐만 아니라, 에너지 사용에 따른 부산물이 발생되지 않는다는 점에서 친환경 및 에너지 효율성 제고를 위한 에너지 공급원으로 주목 받고 있다¹⁾. 때문에, 배터리는 휴대용 기기, 전기차량, 전력 공급시스템 등 다양한 응용 분야에 에너지 저장 시스템(energy storage system, ESS)으로 사용되

며 산업의 기반이 됨과 동시에 일상생활에 편의성을 제공해 주고 있다. 하지만, 이러한 배터리는 운영 중 사용 환경의 부주의나, 제조상 결함, 설치 시 부주의, 미흡한 보호 설계 등이 잠재적 고장 요인으로 작용하여 지속적인 스트레스를 받게 된다²⁾. 이러한 지속적인 스트레스는 예컨대 배터리가 과충전 되거나 수명이 소진될 경우, 배터리 내부 전해액의 전기적, 화학적 열적 반응을 위험수준으로 유도하고 배터리의 내부 압력을 증가시키며 배터리 내부에서 발생하는 전기적, 화학적 작용으로 인하여 결국 다양한 메커니즘을 통해 기화 분해된 전해액 가스가 배터리 외부

로 배출되거나 배터리의 케이스가 부풀어 오르는 스웰링(swelling)³⁾ 현상 등이 초래된다. 이러한 현상은 배터리의 수명을 단축시키고, 용량을 저하시킨다. 또한 즉각적인 대응 조치가 이루어지지 않을 때, 배터리 내 가속화된 열적 화학적 반응으로 배터리 내부 분해된 내용물이 분진과 연기의 형태로 배출되며 결국 열 폭주⁴⁾가 발생하며, 이는 화재 및 폭발과 같은 사고로 이어질 수 있다. 실제 국내뿐만 아니라 해외에서도 배터리 시스템에 화재나 폭발 사고가 이어지고 있으며 그에 따른 직접적 경제적 손실과 배터리에 대한 화재 위험성에 대한 인식으로 에너지 산업 전반에 침체를 불러 오고 있다. 하지만 배터리가 가지고 있는 여러 장점과 앞으로 도래할 4차 산업의 필수 구성 요소로써 무궁한 잠재성을 가진 배터리 산업의 올바른 성장을 위해 주의 깊은 감시와 적절한 제어를 통한 배터리의 안정적 사용 요구와 잠재적 사고 요인으로부터 배터리를 보호할 높은 수준의 안전 설계가 요구되고 있는 실정이다. 이에 따라, 배터리의 가스 배출⁵⁾ 현상 감지 및 배터리 보호와 관련된 다양한 연구 개발이 진행되어 왔으며, 일례로 가스 측정 수단을 이용하여 배출된 가스의 농도 변화를 감지하는 기술이 공지된 바 있다. 그러나 배터리 셀의 물리적 부피 팽창은 가스 누출이 충분히 진행되어야 발생되며, 배터리로부터 가스가 배출된다는 것은 배터리 내부의 손상이 이미 충분히 진행되고 있다는 것이며 배터리의 배출 가스 현상을 초기에 감지하여 적절한 대응이 이루어지지 않으면 열 폭주 현상으로 진행되어 발화가 일어날 수 있는 위험성이

크다. 또한 배터리로부터 배출되는 연기나 분진은 열 폭주가 임박한 징후로 즉각적인 소방 대응을 하지 않으면 화재로 진행될 위험성이 매우 크다. 배터리 운영 환경 미흡 같은 외부 환경 요인도 배터리 화재의 주요 요인이 되고 있다. 또한 배터리를 저장하는 공간 내 벽체 이음새 부분의 부주의한 시공이나 외벽의 불충분한 단열 시공 등 여러 요인으로 인해 배터리를 저장하는 공간 내 국지적인 지점에 수분 집결이 있을 수 있다. 이로 인해 주변에 있는 배터리나 전기 시설물의 절연을 약화시키고 안전사고의 위험성을 증대시킨다.

2. 실험

2.1 오프 가스를 이용한 단계별 경보

가스 센서를 이용해 배터리로부터 배출되는 가스를 감지한 가스 센서값을 통해 지수 이동 평균값(exponential moving average)을 연산하고, EMA를 바탕으로 허용 민감도(LB1), 하한 한계값(LB2)을 결정하고 상기 측정된 가스 센서값과 상기 허용 민감도 크기를 비교함으로써 센서의 민감도나 외부 환경 요인으로 인한 센서의 오작동을 줄이고 또한 상기 센서값과 하한 한계값을 비교하여 검출된 가스량의 위험 수준을 신속하게 판단한다.

Table 1을 참고하면, 본 연구는 가스 센서를 이용하여 경고 판단 기준을 정한다. 이러한 기준은 알람 상수값 0에서 2까지로 분류되어 관리자에게 전송될

Table 1. Step-by-step alarm using off-gas

	Thermal runaway imminent	Overuse conditions	Normal operation
Exhaust gas characteristics	Rapid increase in off-gas	Small gas emissions due to overuse	Emission of fine gases due to deterioration
Alarm stage	Major alert	Minor alert	Battery health monitoring index
Alert action	Emergency stop device shutdown	Alerts to managers Decision making using event tree	Index report after charging/discharging cycle
Alert judgment criteria	2nd lower limit	1st lower limit exceeded and warning accumulated count	Battery health condition check based on off-gas measurement change during charging and discharging

수 있다. 예를 들어 알람 상수 0은 정상 운용 단계, 알람 상수 1은 과용 단계, 알람 상수 2는 열 폭주 임박 단계로 분류할 수 있다.

2.2 오프 가스 감지 알고리즘

공간 내에 설치된 가스 센서에서 i 번째 시간에 측정된 가스 센서값(y_i)을 통해 현 지수 이동 평균(현 EMA)값을 계산하여 이를 기준으로 센서의 허용 민감도(LB1)와 하한 한계값(LB2)을 결정하고 상기 y_i 를 LB1과 LB2과 비교 평가한다. 상기 y_i 가 LB1보다 클 때, 배터리가 정상 상태라고 판단하며 알람 상수를 0 (=정상)으로 정하고 상기 y_i 가 LB1과 LB2 구간 사이일 때, 센서의 민감도에 의한 변화인지 배터리로부터 실제로 소량의 가스가 배출되는지를 판단하기 위해 상기 y_i 값이 LB1과 LB2 구간 사이에 머무르는 사이 연속적으로 감소하는 횟수를 누적 계산한 현 경고누적지수를 최대누적지수와 비교하여 현 경고누적지수가 최대누적지수보다 작을 시 알람 상수를 0 (=정상)으로 정하며 그렇지 않을 시 1 (=주의)로 정하고, 상기 y_i 가 LB2보다 작을 시, 배터리로부터 급격한 가스 배출로 판단하여 알람 상수를 2 (=비상)로 정한다.

Fig. 1는 가스 센서와 연계된 배터리 관리 시스템(battery management system)을 통해 상기 알고리즘의 상수인 α , P, n을 미리 설정하고 매 시간마다 업데이트 할 변수인 alarm을 0으로 초기화하고, 측정된 y_1 을 현 EMA에 저장하고, 이전 EMA를 현 EMA로 정하며, 현 경고누적지수와 전 경고누적지수를 각각 0으로 초기화하여 저장한다(현 EMA= y_1 , 전 EMA=현 EMA, 현 경고누적지수=0, 전 경고누적지수=0, cf=1, i=2; 1단계). 그리고 y_i (i=2)를 읽어들이고([read y_i]; 2단계), 현 EMA, 허용 민감도(LB1), 하한 한계값(LB2)을 계산한다(현 EMA= $[1-\alpha] \times$ 전 EMA+ $\alpha \times y_i$, LB1=현 EMA $\times [1-P/100.0]$, LB2=현 EMA $\times [1-P \times n/100.0]$; 3단계), 상기 $y_i < LB2$ 인지 확인하는 5단계에서 YES이면 현 경고누적지수를 최대누적지수로 저장하고(현 경고누적지수=최대누적지수); 4-1단계), 상기 5-1단계

후에 알람을 2단계로 저장하며(alarm=2); 4-2단계), 5단계에서 NO이면, $y_i < LB1$ 인지 확인하고(5단계), 상기 5단계에서 NO이면, 현 경고누적지수를 0으로 저장하며(현 경고누적지수 = 0); 5-1단계), 알람을 0으로 저장하고([alarm=0]; 5-2단계), 상기 5단계에서 YES이면(6단계), 상기 6단계 후에 현 경고누적지수를 계

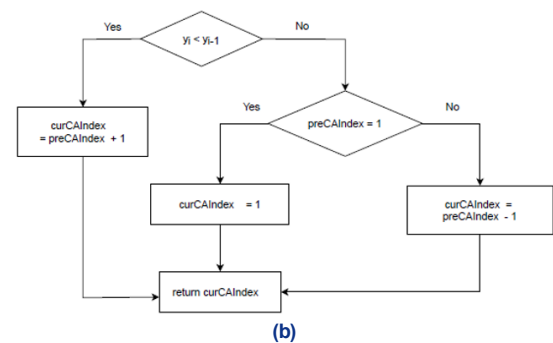
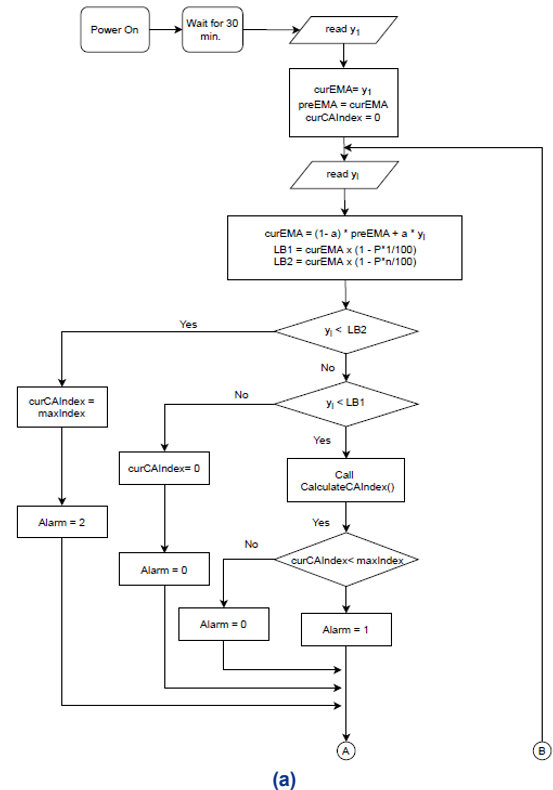


Fig. 1. (a) Algorithm for determining the alarm level by determining the change in the concentration of gas detected by the gas sensor and (b) algorithm for calculating the accumulated warning index to prevent malfunction of the sensor due to the sensitivity of the gas sensor

산하여(7-1단계), 현 경고누적지수<최대누적지수인지 확인한다(7-2단계).

2.3 외부 가스에 의한 반응 알고리즘

Fig. 2는 일시시에에 따라 외부에서 가스가 배터리 실내로 유입될 때, 외부 가스가 유입되는 개구부 근처에 설치된 비교 가스 센서와 배터리 근처에 설치된 가스 감시 센서의 동시적 반응을 비교하여 감시 센서의 반응이 외부 가스에 의한 반응인지를 판단하는 알고리즘과 이를 보여주는 그래프이다.

본 연구에 사용된 가스 센서의 동작 원리를 살펴보면, 가스에 민감한 금속산화물 MEMS 감지 기관이 주변 공기와 접촉하여 변화하는 전기 신호를 통

해 가스의 양을 판단한다. 배터리가 설치된 실내나 함체에 외부 공기 유입을 위한 개구부가 장착되어 유입된 외부 공기에 포함된 가스에 의한 경보 오작동을 방지하기 위해, 상기 개구부 근처에 설치된 비교 센서(Sensor X)에서 가스 유출이 감지되면 상기 비교 센서와 배터리 가스 유출을 감지하는 감시 센서(Sensor Y)의 센서값을 비교 연산하여 알람 교정 상수(cf)를 결정한다. cf는 0 또는 1의 값을 가지며 가스 감시 센서에서 발생한 알람값에 cf 값을 곱하여 알람값을 재차 정의한다. 상기 cf를 결정하기 위해, 비교 센서(Sensor X)에서 계산된 현 경고누적지수 >0인지 판단하고(제1단계), 상기 1단계에서 NO이면 cf=1 정하고(제2-1단계), YES이면 전 경고누적지수 =0인지 판단하여(제2-2단계), 상기 2-2단계에서 YES이면 비교 센서 신호값을 이용하여 노름 Hx=(현 EMAx-xi)/현 EMAx, Ax=노름 Hx×dt를 계산하고 감시 센서 신호값을 이용하여 노름 Hy=(현 EMAy-yk)/현 EMAy, Ay=노름 Hy×dt를 계산하며(제3-1단계), 상기 2-2단계에서 NO이면 비교 센서 신호값을 이용하여 노름 Hx=(현 EMAx-xi)/현 EMAx, Ax=Ax+노름 Hx×dt를 계산하고 감시 센서 신호값을 이용하여 노름 Hy=(현 EMAy-yi)/현 EMAy, Ay=Ay+노름 Hy×dt를 계산하고(제3-2단계), Ax-Ay<임계값을 확인하며(제4단계), 상기 4단계에서 NO이면 cf=0으로 저장하고 YES이면 cf=1로 저장한다(제5단계).

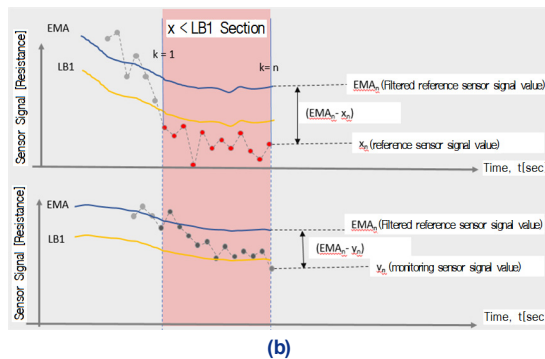
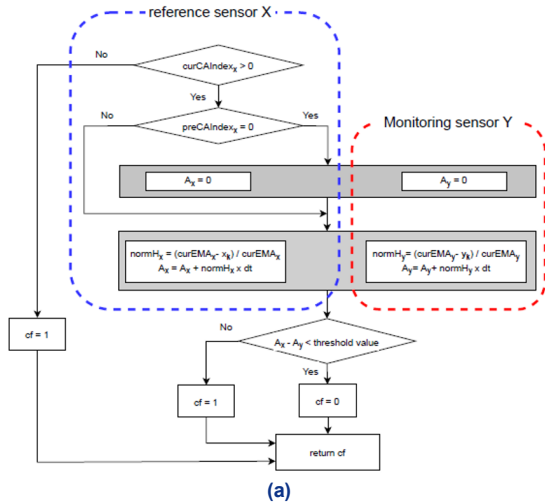


Fig. 2. (a) Algorithm and (b) graph to determine whether the sensor's response is due to external gas

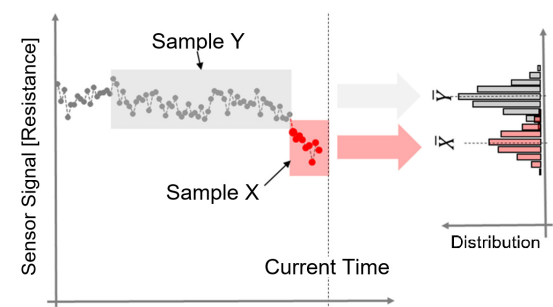


Fig. 3. An algorithm that detects gas discharged from the battery using a gas sensor and calculates the change in the concentration of the detected gas and generates an alarm accordingly

3. 결과 및 고찰

3.1 본 연구의 일실시예로서의 알고리즘

Fig. 3는 가스 센서를 이용하여 배터리에서 배출되는 가스를 검출하고 검출 가스 농도의 변화를 계산하고 그에 따른 경보를 발생하는 알고리즘은, 먼저 상기 가스 센서와 연계된 BMS를 통해 센서 신호 측정값의 이력 데이터를 두 샘플 데이터 구간으로 나누어 저장하는 것으로 시작한다. 상기 두 샘플 구간은 가장 최근 M개의 data 개수로 구성된 가스 data 샘플 $X=x_1, x_2, \dots, x_M$ (총 M개)과, 상기 data 샘플 이전에 기록된 L개의 데이터 개수로 구성된 기준 data 샘플 $Y=y_1, y_2, \dots, y_L$ 로 구성된다. Fig. 4는 상기 가스 data 샘플과 기준 data 샘플을 통해 상기 가스 센서와 연계된 BMS가 가스 농도 변화량에 따른 농도의 이상 증가량을 판단하고 단계별 경고를 발생시킨다. 이를 테면 두 샘플 그룹의 평균을 비교하여 통계적 유의성을 분석하는 two sample test를 수행($H_0: \bar{X} \leq \bar{Y}$) 한다. 두 그룹의 평균값의 차이가 0이라는 가설 검정

을 세우고 그에 따른 t-통계값을 계산하고 두 그룹이 이분산이라고 가정하여 자유도를 구한다. 상기 자유도에 따른 t 분포에서 p-value를 결정한다. 미리 정한 알람단계에 따른 유의수준과 상기 p-value 값을 비교하여 가설을 검증한다. 검증 결과에 따라 알람 상수를 결정한다. 즉, t-statistics로 두 그룹의 평균을 비교하여 가스 이상 증가 유무를 판단한다.

3.2 본 연구의 다른 실시예로서의 알고리즘

본 연구의 다른 실시예로서 가스 센서에서 측정된 센서 신호값을 바탕으로 가스 농도 변화량에 따른 단계별 경고 발생에 대한 알고리즘이다. 먼저 상기 가스 센서와 연계된 BMS를 통해 상기 가스 센서로부터 측정된 센서 신호값을 토대로 매 측정 시간마다 센서 신호 변화 백분율을 계산한다. 현 센서 신호 변화 백분율(S_i)은 현 센서 신호값에서 이전 신호값을 뺀 값을 이전 센서 신호값으로 나눈 값으로 정의한다. 이를 테면, 현 시간 I일 때 $S_i=(y_i-[y_i-1])/y_i-1$ 로 구한다. 그리고 농도의 이상 증가량 판단 기준으로 미리 정의된 소량 검출 판단 기준(S_1)과 급격한 가스 검출 판단 기준(S_2)과 현 센서 신호 변화 백분율과 비교한다. 예를 들어 상술한 바와 같이 계산된 $S_1 < s_i < S_2$ 일 경우 주의 경고를 발생하고, $s_i > S_2$ 일 경우 비상 경고를 발생한다.

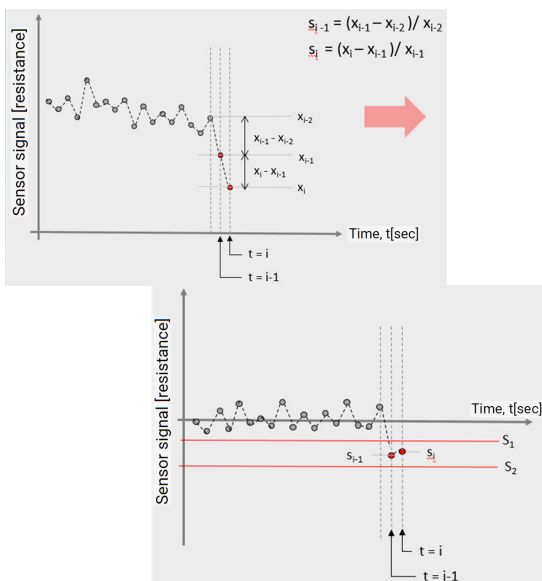


Fig. 4. Algorithm for the generation of step-by-step warnings according to the amount of gas concentration change based on the sensor signal value measured by the gas sensor

4. 결론

본 논문은 다양한 센서 응용과 함께 누적 경고 지수 알고리즘 또는 분석 알고리즘, 오작동 방지 알고리즘을 통해 신속 정확하게 경보를 발생하여, 배터리 사고의 위험성을 완화시키며 배터리 운용의 효율성과 안정성을 높일 수 있는 효과가 발생한다는 것을 보여준다. 또한 여러 수준의 경보를 발생하여 다양한 조건에 따라 나뉜 누적 경고지수를 통해 해당 알람을 관리자에게 통지하고 경고 수준에 따른 적절하고 차별화된 대응을 가능토록 함으로써 경보에 따른 불필요한 가동 중단 시간을 줄일 수 있고 보수 편의와

비용 절감의 장점을 가진다. 결과적으로 최적의 운영 조건 유지로 배터리 성능/수명/안전성 향상과 외부 환경요인에 의한 화재 위험성 감소와 배터리 손상 조건으로 인한 화재 위험성을 감소하기 위한 알고리즘을 포함하는 배터리 보호 장치를 제공한다. 감지 센서는 BMS와 연계를 통해 감지 신호를 관리자에게 전송하여 소화 설비 작동 등 적절한 조치를 취하도록 할 수 있다.

후 기

본 논문은 2020년도 교육부의 재원으로 한국연구재단의 지원을 받아 수행된 지자체-대학 협력기반 지역혁신 사업의 연구 결과입니다.

References

1. C. Chen, Y. Wei, Z. Zhao, Y. Zou, and D. Luo, "Investigation of the swelling failure of lithium-ion battery packs at low temperatures using 2D/3D X-ray computed tomography", *Electrochimica Acta*, Vol. 305, 2019, pp. 65-71, doi: <https://doi.org/10.1016/j.electacta.2019.03.038>.
2. D. Ren, X. Feng, L. Liu, H. Hsu, L. Lu, L. Wang, X. He, and M. Ouyang, "Investigating the relationship between internal short circuit and thermal runaway of lithium-ion batteries under thermal abuse condition", *Energy Storage Materials*, Vol. 34, 2021, pp. 563-573, doi: <https://doi.org/10.1016/j.ensm.2020.10.020>.
3. B. Rowden and N. Garcia-Araez, "A review of gas evolution in lithium ion batteries", *Energy Reports*, Vol. 6, Suppl. 5, 2020, pp. 10-18, doi: <https://doi.org/10.1016/j.egyr.2020.02.022>.
4. S. S. Baek, S. W. Yu, and H. S. Kim, "Experimental study of cooling performance comparison of a 18650 Li-ion unit battery module (air cooling vs. PCM-based cooling)", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 29, No. 2, 2018, pp. 212-218, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2018.29.2.212>.
5. S. G. Kim, B. M. Gil, G. J. Hwang, and C. H. Ryu, "Electrochemical characteristics of hybrid cell consisting of Li secondary battery and supercapacitor", *Trans Korean Hydrogen New Energy Soc*, Vol. 30, No. 1, 2019, pp. 43-48, doi: <https://doi.org/10.7316/KHNES.2019.30.1.43>.