Wielkoskalowe magazyny energii: elektrochemiczne, pożarowe i cybernetyczne aspekty bezpieczeństwa systemów BESS

Radosław Gutowski

Przewodniczący Polskiego Komitetu
Elektromobilności i Magazynowania Energii SEP
Członek Zarządu Głównego SEP

O autorze



Wykształcenie

ZSE Radom – Zespół Szkół Elektronicznych im. Bohaterów Westerplatte

Olimpiada Wiedzy Technicznej NOT

IMiO

Francuski Instytut Zarządzania

Działalność społeczna

PIME Stowarzyszenie

Polskie Stowarzyszenie Magazynowania Energii

KIGEiT

SEP

Doświadczenie zawodowe

Telekomunikacja







Energetyka







Różnice między LFP a innymi technologiami akumulatorów

Akumulatory **LFP (litowo-żelazowo-fosforanowe)** charakteryzują się znacznie **wyższym poziomem bezpieczeństwa pożarowego** w porównaniu do tradycyjnych technologii litowo-jonowych, takich jak popularne **NMC** (niklowo-manganowo-kobaltowe) czy **LCO** (litowo-kobaltowe).
Główna różnica wynika z ich budowy chemicznej, która drastycznie zmniejsza ryzyko wystąpienia
i intensywność tzw. ucieczki termicznej (ang. *thermalrunaway*).

Poniższa tabela przedstawia szczegółowe porównanie kluczowych parametrów pożarowych między technologią LFP a technologiami opartymi na kobalcie i niklu (NMC/LCO).

Bezpośrednie porównanie parametrów pożarowych

Parametr [4, 5, 6, 7, 8]	Akumulatory LFP ($LiFePO_4$)	Akumulatory NMC / LCO
Temperatura ucieczki termicznej	Wysoka: ok. 270°C – 300°C	Niska: ok. 150°C – 210°C
Wydzielanie tlenu w ogniwie	Brak lub śladowe ilości	Bardzo wysokie (podsyca ogień)
Przebieg awarii (ogień)	Głównie gęsty dym, rzadko płomienie	Gwałtowny wybuch, ogień strumieniowy
Maksymalna temp. pożaru	Ok. 500°C – 620°C	Nawet 800°C – 1000°C+
Prędkość propagacji pożaru	Niska (powolne przechodzenie na sąsiednie ogniwa)	Bardzo wysoka (błyskawiczny łańcuch reakcji)

Kluczowe różnice z punktu widzenia zagrożenia pożarowego energii

- **Stabilność struktury chemicznej:** Katoda LFP posiada silne wiązania kowalencyjne między żelazem, fosforem i tlenem. Dzięki temu, nawet w przypadku wewnętrznego zwarcia lub uszkodzenia mechanicznego (np. przebicia gwoździem), struktura nie ulega łatwemu rozpadowi. W technologiach NMC/LCO wiązania są znacznie słabsze, co prowadzi do szybkiej degradacji pod wpływem ciepła.

- **Brak efektu „samopodsycania" ognia:** Podczas przegrzania ogniw NMC dochodzi do uwalniania tlenu z materiału katody. Tlen ten reaguje z palnym, płynnym elektrolitem, co tworzy idealne warunki do podtrzymywania intensywnego pożaru – ugaszenie takiego ogniwa jest niezwykle trudne, ponieważ pali się ono bez dostępu powietrza atmosferycznego. W LFP, tlen nie jest uwalniany, co drastycznie ogranicza ryzyko powstania otwartego ognia.

- **Odporność na czynniki elektryczne:** Ogniwa LFP wykazują znacznie wyższą tolerancję na przeładowanie, głębokie rozładowanie oraz wysokie prądy ładowania. W sytuacjach awaryjnych, w których ogniwo NMC eksploduje, ogniwo LFP najczęściej zacznie jedynie dymić i oddawać ciepło do otoczenia, nie generując płomieni.

Kluczowe różnice z punktu widzenia zagrożenia pożarowego energii

Specyficzne zagrożenie dla technologii LFP (ważna uwaga):

Choć LFP rzadko staje w płomieniach, to w momencie uszkodzenia termicznego emituje **duże ilości palnych i toksycznych gazów** (głównie wodoru i tlenku węgla).

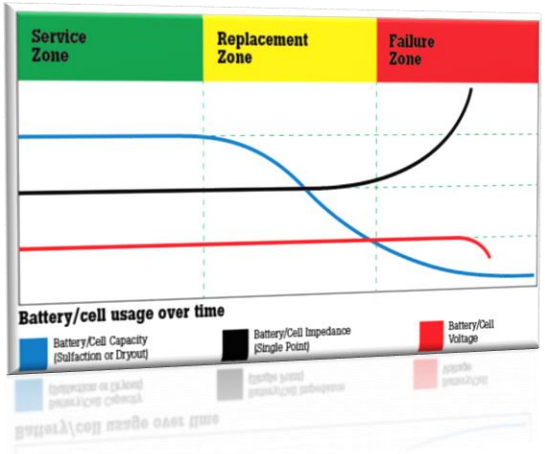
Z tego powodu, w zamkniętych i niewentylowanych pomieszczeniach (np. piwnice z magazynami energii), gaz z uszkodzonej baterii LFP może stworzyć atmosferę wybuchową.

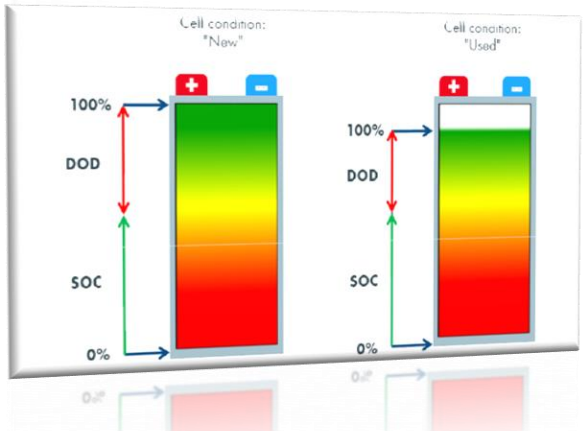
W przypadku zapłonu od zewnętrznego źródła iskry, może dojść do eksplozji nagromadzonych gazów, mimo braku pierwotnego pożaru samego ogniwa.

Magazyny energii – ryzyko ucieczki termicznej

- pojemność znamionowa w Q [Ah]
- rezystancja wewnętrzna Rw [mOhm]
- napięcie maksymalne naładowania Umax [V]
- napięcie znamionowe Un[V]
- napięcie minimalne rozładowania Umin [V]

SOH - state of health – poziom pojemności względem pojemności nowego ogniwa
SOC - state of charge – poziom naładowania akumulatora
DOD - depth of discharge – poziom rozładowania akumulatora





Magazyny energii – ryzyko ucieczki termicznej

Występuje w każdym, źle eksploatowanym rodzaju ogniw litowo – jonowych z następujących powodów:

- Przeciążenie
- Przeładowanie
- Zwarcie
- Temperatura poza zakresem



źródło: Characteristics for Thermal Runaway of Li-ion Batteries
Xuning Fenga, Siqi Zhenga, Dongsheng Renb, Xiangming Hea,*, Li Wanga, Xiang Liub,c, Maogang Lid, Minggao Ouyangb,

Magazyny energii – ryzyko ucieczki termicznej

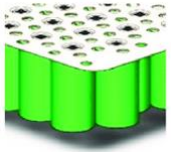
Ogniwa cylindryczne



Resistance welding



Laser wire bonding



Laser spot welding

Ogniwa pryzmatyczne

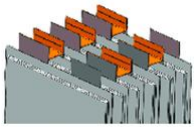


busbar screwing



Laser busbar welding

Ogniwa kieszeniowe (pouch)



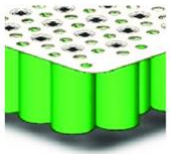
lap joint welding

Magazyny energii – ryzyko ucieczki termicznej

Ogniwa cylindryczne







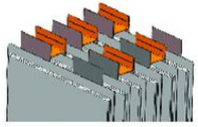
Gdzie wyznaczyć punkty pomiarowe ???

Ogniwa pryzmatyczne

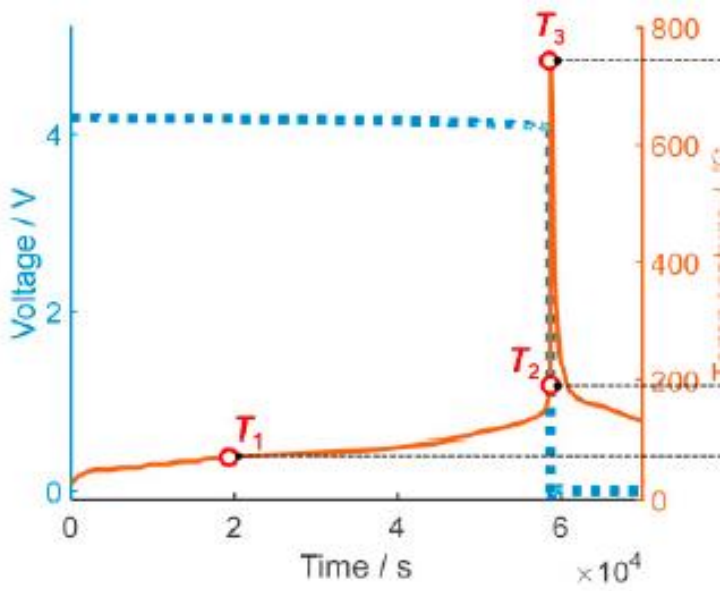




Ogniwa kieszeniowe (pouch)



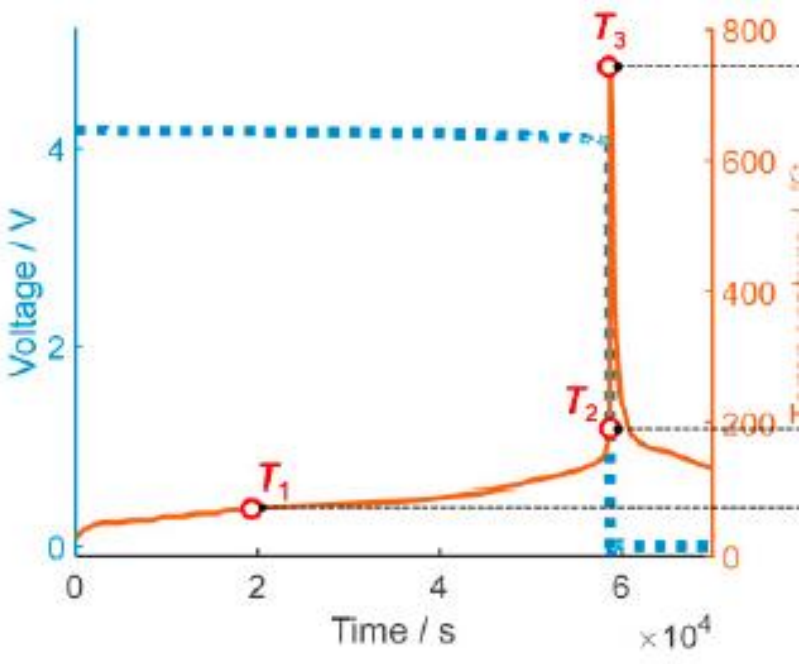
Magazyny energii – ucieczka termiczna



T1 jest temperaturą początkową wykrywalnego wytwarzania własnego ciepła , które początkuje ucieczkę termiczną.

źródło: Characteristics for Thermal Runaway of Li-ion Batteries
Xuning Fenga, Siqi Zhenga, Dongsheng Renb, Xiangming Hea,*, Li Wanga, Xiang Liub,c, Maogang Lid, Minggao Ouyangb,

Magazyny energii – ucieczka termiczna

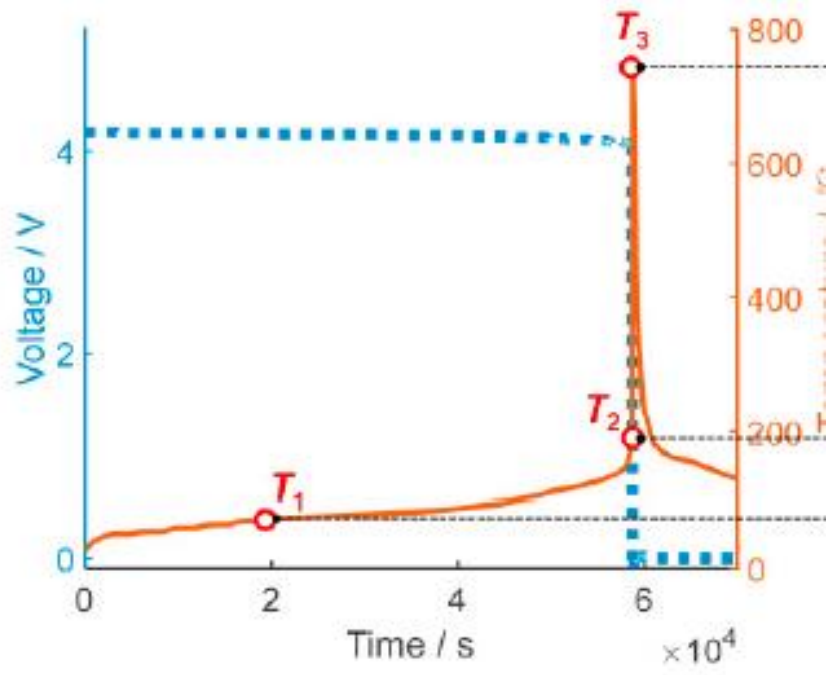


źródło: Characteristics for Thermal Runaway of Li-ion Batteries
Xuning Fenga, Siqi Zhenga, Dongsheng Renb, Xiangming Hea,*, Li Wanga, Xiang Liub,c, Maogang Lid, Minggao Ouyangb,

T2 jest temperaturą wyzwalania dla Thermal Runaway. Znajomość **T2** ma kluczowe znaczenie dla bezpieczeństwa akumulatora.

Wyższa **T2** zwykle oznacza lepszą ogólną stabilność termiczną, a zatem bateria może być mniej podatna na przeładowania.

Magazyny energii – ucieczka termiczna



T3 to maksymalna temperatura akumulatora może dotrzeć podczas Thermal Runaway.

Różnica **ΔT = T3-T2** jest bezpośrednio związana z całkowitym ciepłem uwolnionym podczas ucieczki termicznej.

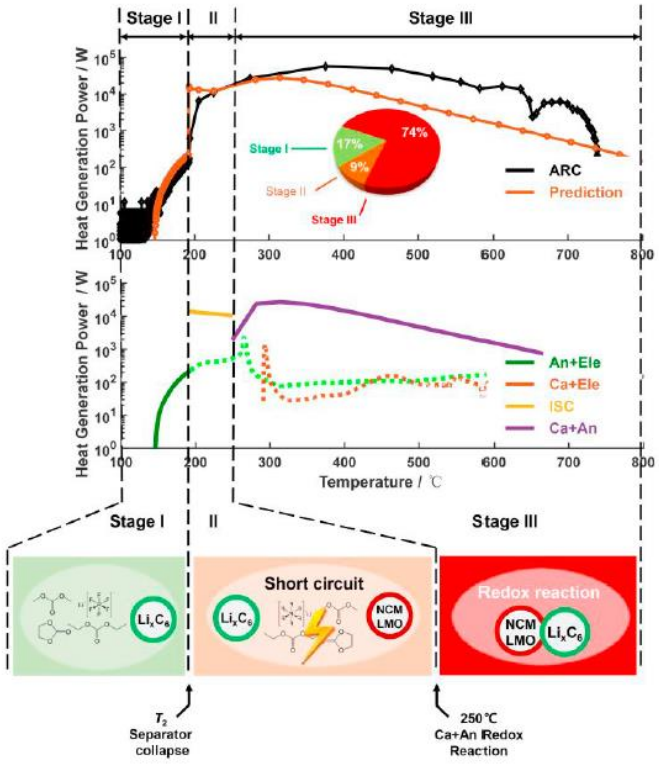
źródło: Characteristics for Thermal Runaway of Li-ion Batteries
Xuning Fenga, Siqi Zhenga, Dongsheng Renb, Xiangming Hea,*, Li Wanga, Xiang Liub,c, Maogang Lid, Minggao Ouyangb,

Magazyny energii – ucieczka termiczna

Stan I : W niskich temperaturach **(<T2)** separator jest nienaruszony **(ok. 190 ℃),**

Stan II : Separator uszkodzi się **(>T2),** część elektrolitu nadal istnieje w ogniwie (ok. 250 ℃),

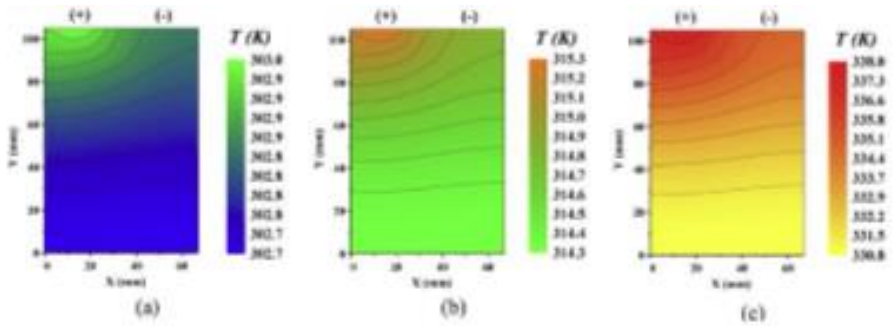
Stan III: Rozpoczyna się reakcja utleniania pomiędzy katodą i anodą wydzielają dużą ilość ciepła



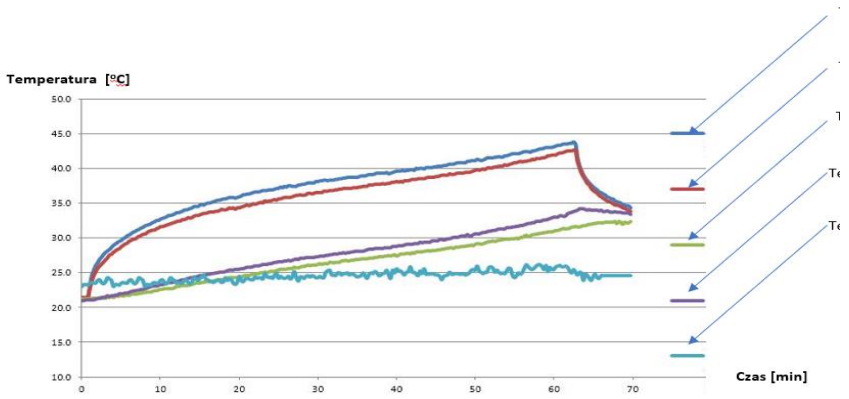
źródło: Characteristics for Thermal Runaway of Li-ion Batteries
Xuning Fenga, Siqi Zhenga, Dongsheng Renb, Xiangming Hea,*,
Li Wanga, Xiang Liub,c, Maogang Lid, Minggao Ouyangb,

Rozkład temperatury – prawdy i mity

Rozkład temperatur ogniwa bateryjnego



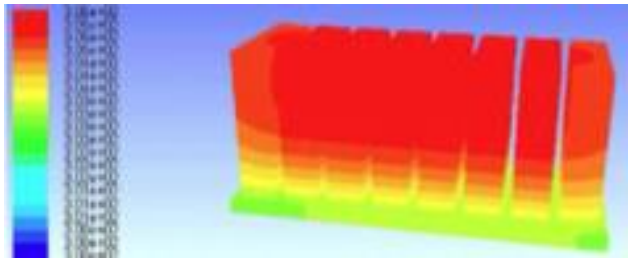




Rozkład temperatur na ogniwie

Rozkład temperatury – prawdy i mity

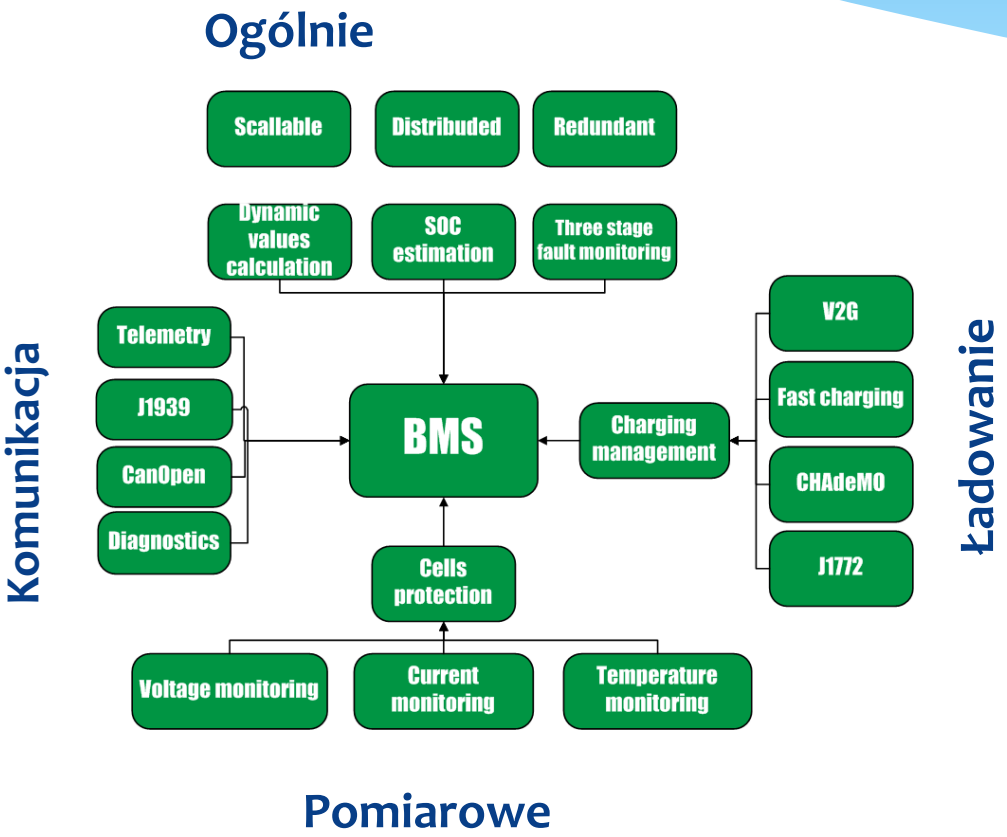




Rozkład temperatur w typowym module typu autobusowego

Czy konieczne musimy stosować moduły bateryjne przeniesione wprost z sektora eletromobilności w obszar pracy stacjonarnej ??

Wymagania eksploatacyjne – rola BMS



Tylko BMS na który mamy kontrolę **100 %** i jesteśmy pewni jego kodu źródłowego daje nam pewność prawdziwego **BEZPIECZEŃSTWA I CYBERBEZPIECZEŃŚTWA**

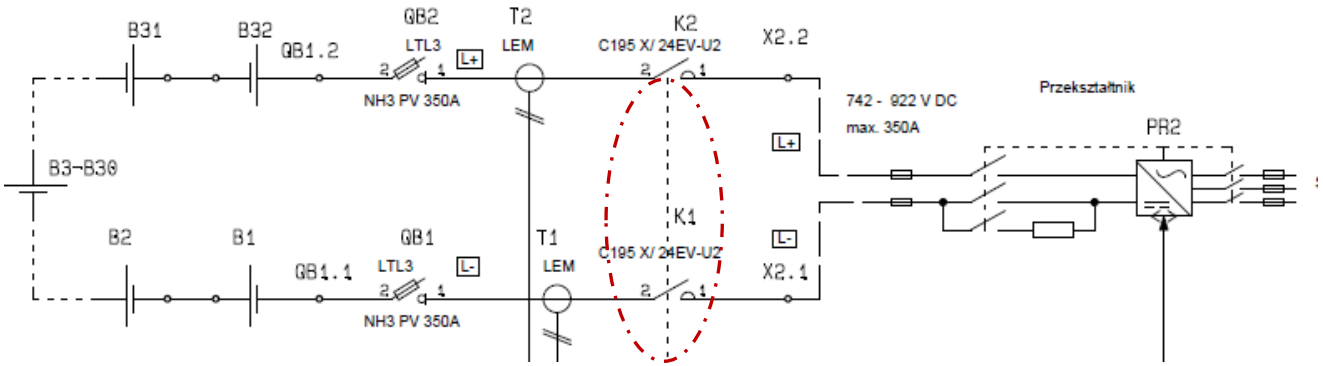
Magazyny energii – rola BMS

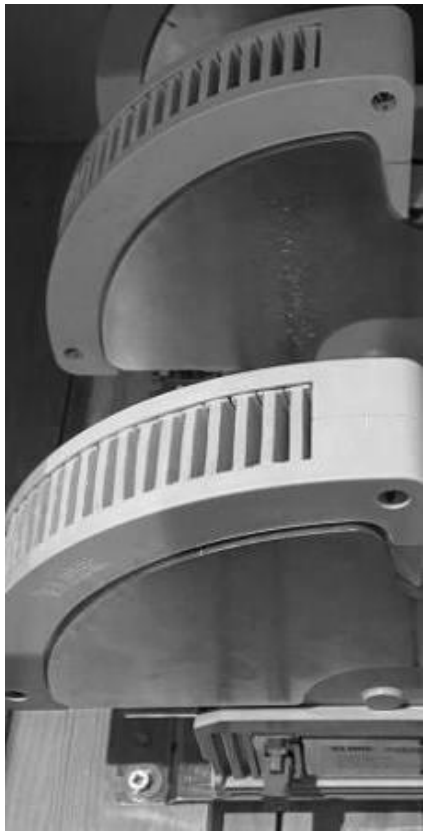
- **Zapewnienie bezpieczeństwa**
- Różnie rodzaje systemów bateryjnych
- Dostosowane do nich struktury BMS
- Zapewnienie dokładności pomiarów
- Zapewnienie prawidłowej kalkulacji i prezentacji parametrów użytkowych
- SOC, SOH, DOD
- Prawidłowa komunikacja
- Sterowanie układami zabezpieczeń



Magazyny energii – gdzie rodzi się niebezpieczeństwo ?

Moduły bateryjne są zestawione w łańcuchy bateryjne o takiej długości, aby zakres napięć wyjściowych łańcucha był dopasowany do napięć wejściowych przekształtnika dwukierunkowego.



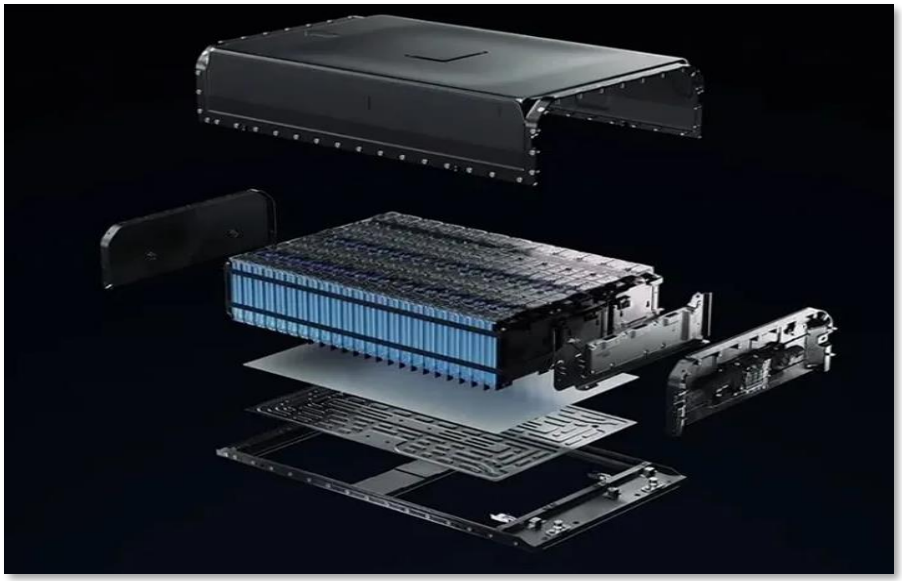


Natychmiastowe i bezpieczne rozłączenie całych ciągów DC pod pełnym obciążeniem (bez wystąpienia łuku elektrycznego), niezależnie od stanu przekształtnika lub układu zarządzania.

Czy takie produkt łatwo się gasi ?

- zespoły LiB znajdują się zwykle w ciasnych obudowach z minimalną wolną przestrzenią, co utrudnia dostęp środków gaśniczych.

- Woda pod różnymi postaciami wydaje się być jednym z najlepszych środków do gaszenia pożarów LiB, chociaż trwające badania potwierdzają również dużą skuteczność środków chemicznych



https://www.electrive.com/2024/09/16/catl-announces-extra-long-life-battery-for-electric-buses/

- https://www.ppoz.pl/czytelnia/ratownictwo-i-ochrona-ludnosci/Jak-to-sie-pali-jak-to-gasic/idn:2984

Czy takie produkt łatwo się gasi ?

- Wodę można stosować w postaci:
- strumienia kierowanego **bezpośrednio na płonące materiały**, zapewniając chłodzenie i zapobiegając ponownemu zapłonowi (strumienia wody nie należy stosować na urządzeniach elektrycznych pod napięciem ze względu na ryzyko porażenia prądem),

- zraszaczy lub tryskaczy wytwarzających małe krople wody lub generujących mgłę wodną (krople < 1000 µm). Drobniejsze kropelki mają większy stosunek powierzchni do objętości w porównaniu z większymi kropelkami, co skutkuje większą absorpcją energii cieplnej z gorącego powietrza dla tej samej objętości wody, jednak większe krople dają większą pewność dotarcia do źródła ognia przed odparowaniem.

- https://www.ppoz.pl/czytelnia/ratownictwo-i-ochrona-ludnosci/Jak-to-sie-pali-jak-to-gasic/idn:2984

Czy kontenery morskie są bezpieczne ?

- Zwykły stalowy kontener morski (typu ISO) ma odporność ogniową na poziomie zaledwie **kilkunastu minut**.
- Blacha stalowa pod wpływem wysokiej temperatury szybko się nagrzewa i odkształca, przez co nie spełnia kryteriów szczelności (E) ani izolacyjności (I) wymaganych przez normę **EI120** (czyli 120 minut ochrony).

Czy kontenery morskie są bezpieczne ?

- Oznacza to w praktyce , że inwestor wybierając to rozwiązanie jest skazany na ponoszenie dodatkowych kosztów ochrony ppoż .
- Powód – transport morski produktów z Azji nie da się zrealizować inaczej niż kontenerach morskich 20 lub 40 stopowych.
- Rozwiązanie – magazyn energii produkowany w Europie nie musi posiadać jako obudowy kontenera morskiego lecz może być wykonany w obudowie kontenerowej w odpowiedniej klasie odporności ogniowej np.EI120 czy EI240

Wybór środka gaśniczego

Zależy od skali magazynu i specyfiki obiektu:

- **Stałe Urządzenia Gaśnicze Gazowe (SUG-G):**

  stosowane gazy (np. Novec 1230, Azot N_2, CO_2) skutecznie tłumią płomienie zewnętrzne i inertyzują atmosferę, zapobiegając deflagracji. Wyzwaniem jest jednak brak efektu chłodzenia wewnątrz ogniw oraz konieczność zachowania odpowiedniego czasu retencji (hold-time) ze względu na długotrwałe wydzielanie gazów pożarowych.

- **Systemy Aerozolowe:**
  stosowane głównie w małych kubaturach (pojedyncze szafy); szybko tłumią płomień, ale nie chłodzą baterii, co niesie wysokie ryzyko ponownego zapłonu – nie rekomendowanedo gaszenia pożarów magazynów energii.

Wybór środka gaśniczego

- **Woda i Mgła Wodna:**

uważane za najskuteczniejsze narzędzia do chłodzenia ogniw i przerywania propagacji ucieczki termicznej. Mgła wodna efektywnie odbiera energię z ogniw i obniża temperaturę otoczenia.











3 sec !!!.

Podsumowanie

Kluczowe Czynniki Skuteczności.

Skuteczna strategia ochrony przeciwpożarowej powinna realizować zamkniętą pętlę
„wykrywanie – decyzja – działanie” w czasie krótszym niż 60 sekund.

Do najważniejszych działań ratowniczych należą:

- Automatyczne wyłączenie zasilania i zatrzymanie procesów ładowania w momencie wykrycia pożaru. – rola BMS i EMS
- Przerwanie procesu nagrzewania baterii poprzez intensywne chłodzenie np. mgła wodna
- Wentylacja pomieszczenia, umożliwiająca odprowadzenie wysoce łatwopalnych i toksycznych gazów np. klapy antywybuchowe

Dziękuję za uwagę



Radosław Gutowski

Przewodniczący Polskiego Komitetu
Elektromobilności i Magazynowania Energii SEP
Członek Zarządu Głównego SEP