

Bezpieczna eksploatacja magazynów energii a zagrożenia elektryczne

Bezpieczna eksploatacja magazynów energii a zagrożenia elektryczne.

Marcin Ruta – MR Power Systems

Streszczenie

Dynamiczny rozwój magazynów energii (BESS – Battery Energy Storage Systems) powoduje pojawienie się nowych, złożonych zagrożeń eksploatacyjnych, szczególnie w warunkach zwarciovych i łukowych. Referat przedstawia kluczowe zagrożenia związane z eksploatacją magazynów energii, w tym porażenie prądem elektrycznym, oddziaływanie łuku elektrycznego oraz pożary wynikające ze zjawiska thermal runaway. Omówiono wpływ zwarcia na pracę systemów wielkoskalowych (>2 MW), wymagania normatywne i prawne w Europie i Polsce oraz przegląd standardów międzynarodowych (UE, USA, Chiny). W zakresie bezpieczeństwa magazynów energii obserwuje się brak jednej globalnej normy, a wymagania są definiowane przez zestaw komplementarnych standardów IEC, NFPA, UL oraz norm krajowych (np. GB/T w Chinach), które wspólnie tworzą ramy projektowania, testowania i eksploatacji systemów BESS.

1. Wstęp

Zrozumienie zagrożeń z eksploatacją tych urządzeń jest kluczowe dla zapewnienia bezpieczeństwa personelu oraz samych instalacji elektroenergetycznych.

Magazyny energii stanowią kluczowy element transformacji energetycznej i stabilizacji pracy systemów elektroenergetycznych. Ich rosnąca skala oraz integracja z siecią powodują jednak, że klasyczne podejście do bezpieczeństwa instalacji elektrycznych jest niewystarczające.

W systemach BESS występują jednocześnie:

- napięcia DC oraz AC,
- bardzo duże prądy zwarciovych,
- źródła energii chemicznej ((Li-Ion, LiFePO₄, NMC).

Powoduje to konieczność analizy zagrożeń w sposób holistyczny. W przeciwieństwie do klasycznych instalacji elektroenergetycznych, systemy BESS wymagają uwzględnienia sprzężonych zjawisk elektrycznych, termicznych oraz chemicznych, co znacząco zwiększa złożoność analizy ryzyka

2. Klasyfikacja zagrożeń elektrycznych

Eksploatacja magazynów energii wiąże się z kilkoma kluczowymi kategoriami zagrożeń, które wzajemnie na siebie oddziałują. Najważniejsze z nich to:

- porażenie prądem elektrycznym (AC i DC),
- poparzenie od łuku elektrycznego (AC i DC),
- pożary i zjawisko thermal runaway,
- zwarcia zewnętrzne,
- zagrożenia chemiczne (płyyny i gazy).

- Porażenie prądem elek.
- Poparzenie łukiem elek.
- Pożary elektryczne
- Wybuchy (strefy Ex)
- Pole elektromagnetyczne
- Ładunki elektrostatyczne



Rys. 1 Podsumowanie zagrożeń elektrycznych oraz piktogramy ISO/IEC

3. Charakterystyka zagrożeń

a. Porażenia prądem

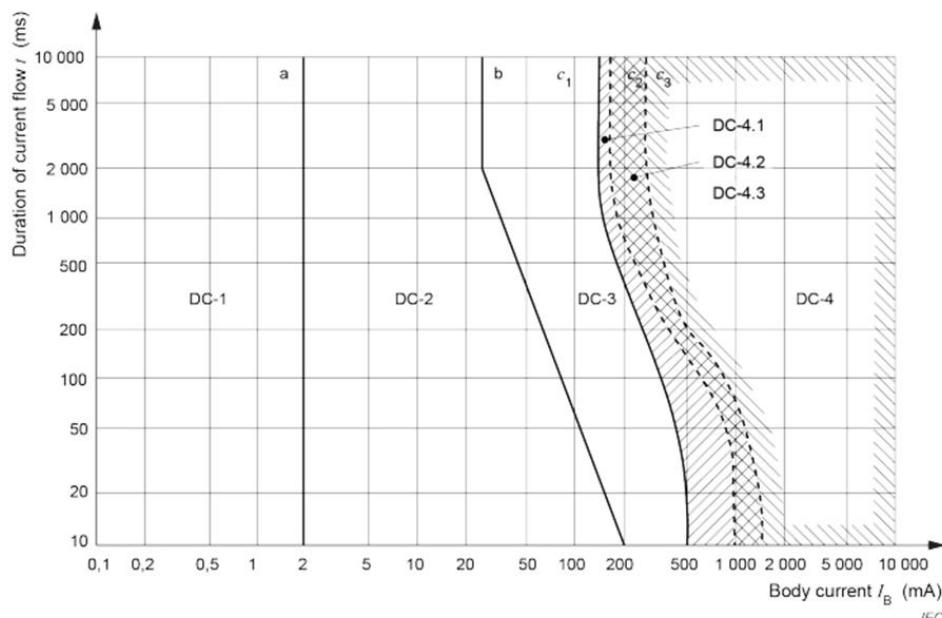
Porażenie prądem stałym (DC) w systemach magazynowania energii stanowi szczególnie istotne zagrożenie ze względu na rosnące poziomy napięć, często powyżej 800 VDC. W przeciwieństwie do prądu przemiennego, prąd stały nie posiada naturalnego przejścia przez zero, co powoduje, że skurcz mięśni jest ciągły. Długotrwały przepływ prądu przez ciało zwiększa ryzyko poważnych uszkodzeń tkanek, zaburzeń pracy serca oraz głębokich oparzeń wewnętrznych. Dodatkowo, w systemach BESS także występuje napięcie zmienne (AC).

Do porażień może dochodzić podczas:

- prac eksploatacyjnych,
- uszkodzeniu modułów baterii (jeśli napięcie przekracza poziom napięcia 120 VDC),
- uszkodzeniu izolacji.

Dodatkowo warto pamiętać, że wg PN-EN 50110 izolowanie miejsca pracy nie ma pełnego zastosowania w pobliżu baterii. Nie możemy w pełni „wyłączyć” lub rozładować energii baterii. W praktyce stosuje się:

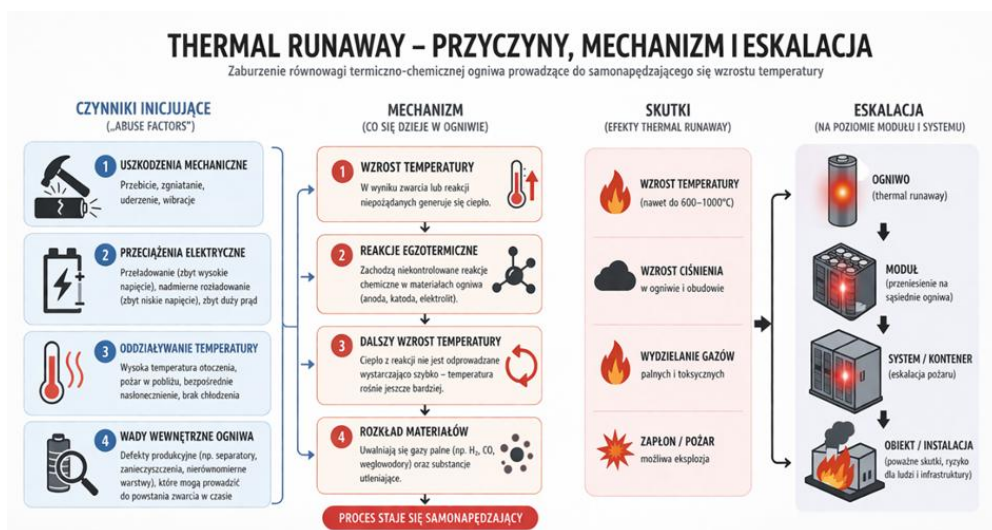
- procedury prac wokół baterii,
- środki ochrony indywidualnej,
- rozwiązania techniczne (sekcjonowanie baterii, modułowy projekt, zabezpieczenia na poziomie modułów itd.).



Rys. 2 Norma IEC 60479-1 4 Strefy czasowo-prądowe skutków przepływu prądu przemiennego przez człowieka (przepływ od lewej ręki do stóp)

b. Thermal runaway

Zjawisko thermal runaway stanowi jedno z najpoważniejszych zagrożeń w magazynach energii. Thermal runaway jest efektem utraty kontroli nad bilansem cieplnym ogniwa, najczęściej inicjowanym przez uszkodzenia mechaniczne, przeciążenia elektryczne, wysoką temperaturę lub defekty wewnętrzne. Grafika poniżej bardzo prosto opisuje przyczyny, mechanizm oraz konsekwencje.



Rys. 3 Mechanizm oraz skutki zjawiska thermal runaway – opracowanie własne autora

Charakter zagrożenia zależy od technologii i chemii użytej do produkcji ogniw.

Najbardziej narażone są ogniwa wykonane z:

- Lithium Cobalt Oxide (LCO)
- Nickel Manganese Cobalt (NMC)

Najmniej :

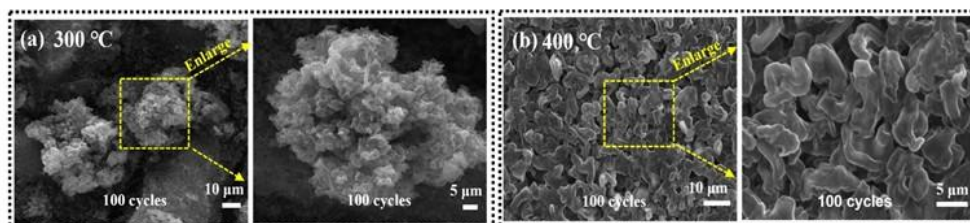
- Lithium Iron Phosphate (LFP)
- Solid-State Batteries (stały elektrolit)

W bateryjnych systemach magazynowania energii szczególne zagrożenie stanowi obecność substancji o właściwościach utleniających, które w warunkach awaryjnych (np. thermal runaway) mogą znacząco zwiększyć intensywność pożaru oraz umożliwić jego rozwój niezależnie od dostępu tlenu z otoczenia. Zgodnie z wymaganiami **NFPA 400** oraz **NFPA 704**, systemy zawierające takie materiały powinny być

odpowiednio klasyfikowane i oznakowane, a ich eksploatacja powinna uwzględniać scenariusze uwolnienia substancji utleniających.

Do inicjacji tego zjawiska dochodzi w wyniku:

- Uszkodzenia mechaniczne - przebicie, zgniatanie, zwarcie wewnętrzne
- Przeciążenia elektryczne - przeładowanie, nadmierne rozładowanie, zbyt duży prąd
- Oddziaływanie temperatury - wysoka temperatura otoczenia, pożar, brak chłodzenia
- Wady wewnętrzne ogniwa - defekty produkcyjne prowadzące do zwarcia w czasie



Rys. 4 Przykład formowania się dendrytów w bateriach litowych Chen, Y.; Yuan, X.; He, C.; Gou, Q.; Yang, N.; Xie, G.; Zhang, K.; Yao, Y.; Hou, Y. Mechanistic Exploration of Dendrite Growth and Inhibition for Lithium Metal Batteries. Energies 2023, 16, 3745. h

c. Łuk elektryczny w systemach BESS

Zwarcie łukowe jest realnym zagrożeniem podczas eksploatacji w systemach BESS. Napięcia DC przekraczają 120 VDC, ale na obecną chwilę do 1500VDC (granica niskiego napięcia dla DC wg **PN-EN 50110**). W instalacjach DC energia łuku elektrycznego jest bardzo mocno zależna od prądu zwarcia i możliwości źródła do potrzymania łuku elektrycznego. Do zwarć łukowych dochodzi podczas:

- uszkodzenia izolacji
- prac eksploatacyjnych (błąd ludzki)
- błędów instalacyjnych
- czynników środowiskowych (wilgoć, zanieczyszczenia, powódź)
- zwarcia wewnętrznego i zewnętrznego

W przeciwieństwie do zwarcia pełnych (metalicznych), zwarcie łukowe charakteryzuje się pewną impedancją łuku elektrycznego co ma swoje konsekwencje w postaci :

- problemów z detekcją prądów zwarć łukowych
- problemów z wyłączaniem prądów zwarć łukowych
- wydłużonym czasem detekcji i wyłączenia

Charakterystycznymi cechami łuku elektrycznego są:

- temperatura dochodząca do 19 400°C
- promieniowanie świetlne (UVA/UVB)
- wzrost ciśnienia (fala uderzeniowa)
- Jonizacja i podgrzanie otaczającego powietrza
- emisja stopionego metalu
- odłamki poruszające się nawet z prędkością do 1100 km/h
- fala dźwiękowa nawet do 160dB



Rys. 5. Opis zjawisk powstających podczas zwarcia łukowego – opracowanie własne autora

d. Zwarcia w systemach BESS

Zwarcia w magazynach energii mają szczególny charakter ze względu na obecność ogniw bateryjnych o dużej wydajności prądowej. Skupiamy się tutaj na bateryjnych magazynach energii stosowanych w instalacjach przemysłowych czy sieciowych. Dla podania skali, systemowe magazyny buduje się z kontenerowych 20' BESS o mocach typowo do 5MWh /1300VDC (12*1P416S) – co znaczy 12 klastrów po 416 modułów 3.2 V.

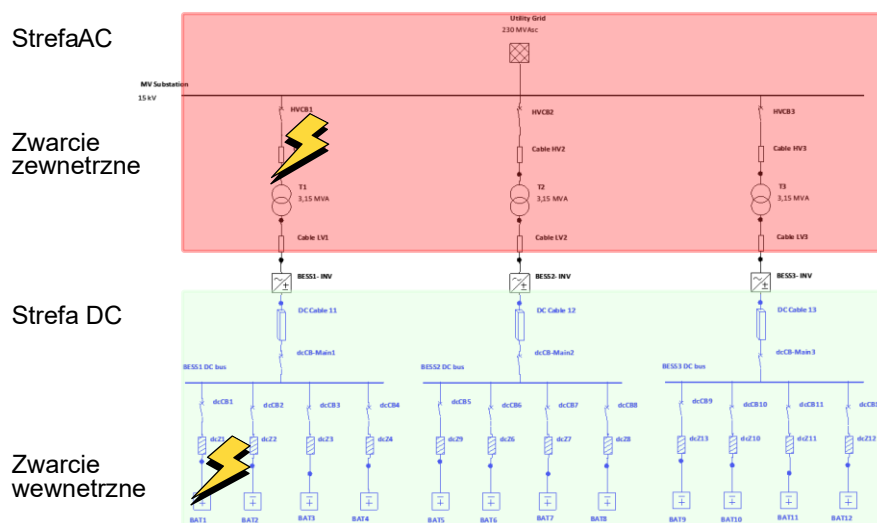
Systemy budowane z takich kontenerów osiągnęły wartości :

- Edwards & Sanborn Solar - USA, California, 821 MW/3287MWh
- Collie Battery - Australia, 560 MW/2240MWh
- Bisha BESS - Saudi Arabia, 500 MW/2000MWh

W dużych systemach magazynowania energii zwarcia mają znaczenie nie tylko lokalne, ale również systemowe. Pełnią też różne role od magazynowania energii lokalnie do szybkiego wsparcia częstotliwości (frequency support). Z perspektywy magazynu energii prąd zwarciový możemy podzielić na :

- zewnętrzny
- wewnętrzny

Ten sam podział można zrobić na poziomie samego ogniwa tj. zwarcia występujące poza ogniwem oraz występujące w ogniwie np. z powodu przebicia membrany elektrolitu przez formację dendrytów.



Rys. 6 Schemat poglądowy magazynu BESS przyłączonego do sieci i zwań zewnętrznych i wewnętrznych.

W odróżnieniu od klasycznych systemów elektroenergetycznych, prądy zwarciorowe w systemach BESS są w dużej mierze determinowane przez charakterystykę układów energoelektronicznych (PCS), co wpływa zarówno na poziom energii łuku elektrycznego, jak i skuteczność jego detekcji.

Skutki **eksploatacyjne** zwarcia prowadzą do:

- przyspieszonej degradacji ogniów,
- wyłączenia instalacji
- zagrożeń podczas eksploatacji

Skutki **systemowe** w przypadku dużych instalacji mogą prowadzić do:

- zaburzenia stabilności sieci,
- kaskadowych wyłączeń
- pożar instalacji

4. Studium przypadku – Tesla Big Battery

Jednym z najbardziej znanych zdarzeń związanych z magazynami energii był pożar instalacji Victoria Big Battery (300 MW / 450 MWh) w Australii w 2021 roku. Zdarzenie miało miejsce podczas testów odbiorczych systemu i stanowi istotny przykład ryzyka charakterystycznego dla wielkoskalowych systemów BESS.

Bezpośrednią przyczyną zdarzenia było wewnętrzne uszkodzenie jednego z modułów bateryjnych. Doszło do utraty szczelności płynu chłodzącego a następnie do zwarcia, które to doprowadziło do lokalnego przegrzania, a następnie inicjacji zjawiska thermal runaway. W wyniku utraty kontroli nad bilansem cieplnym doszło do rozprzestrzenienia się zjawiska na sąsiednie moduły w obrębie kontenera.

Pomimo zastosowanych systemów zabezpieczeń, takich jak systemy detekcji oraz środki gaśnicze, zdarzenie doprowadziło do długotrwałego pożaru, który trwał kilka dni. W trakcie zdarzenia zaobserwowano emisję gazów oraz intensywne oddziaływanie cieplne, co wymusiło wyznaczenie strefy bezpieczeństwa wokół instalacji. Analiza zdarzenia wskazuje na kilka kluczowych wniosków:

- inicjacja zdarzenia może nastąpić na poziomie pojedynczego modułu,
- thermal runaway ma charakter propagacyjny w obrębie kontenera,
- standardowe systemy gaszenia mogą być niewystarczające do zatrzymania procesu, ale pozwalają ograniczać skalę pożaru i jego rozprzestrzeniania
- kluczowe znaczenie ma wczesna detekcja oraz separacja modułów,
- projektowanie systemów BESS powinno uwzględniać scenariusze eskalacyjne, a nie tylko pojedyncze awarie.

Przypadek Tesla Big Battery pokazuje, że zagrożenia w magazynach energii mają charakter systemowy i wymagają podejścia obejmującego zarówno projektowanie, jak i eksploatację instalacji.



Rys. 7 Pożar magazynu BESS Victoria Tesla Big Battery 300MW/450MWh Source : <https://reneweconomy.com.au>

5. Standardy i regulacje

a. Regulacje europejskie i polskie

Świadomość zagrożeń elektrycznych znalazła odzwierciedlenie w szeregu regulacji prawnych na poziomie europejskim i krajowym:

- Dyrektywa 89/391/EEC z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy. Art. 6.2. wprowadza zasady ogólne dotyczące zapobiegania zagrożeniom.
- Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 8 czerwca 2021 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy urządzeniach energetycznych (Dz.U. z 2021 Poz. 1210).
- PN-EN 50110-1:2023 Eksploatacja urządzeń elektrycznych - Część 1: Wymagania ogólne.

b. Standardy międzynarodowe

Na świecie opracowano szereg norm i standardów dotyczących ochrony przed zagrożeniem łukiem elektrycznym:

- IEC 61482-2 Live working - Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc - Part 2: Requirements
- IEC 61482-1-1 Prace pod napięciem -- Odzież ochronna przed zagrożeniami termicznymi spowodowanymi łukiem elektrycznym -- Część 1-1: Metody badań -- Metoda 1 -- Określanie parametrów łuku (ATPV, EBT50, ELIM) dla materiałów trudnopalnych na ubrania
- NFPA 70E Handbook for Electrical Safety in the Workplace (wydanie 2024)
- IEEE 1584-2018 IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations
- ISSA Guide Guideline for the selection of personal protective equipment when exposed to the thermal effects of an electric fault arc (2011)
- DGUV 203-077 Thermal hazards due to electric fault arcing Guide for the selecting personal protective equipment (2021)

W kontekście magazynów energii szczególnie istotne oraz stanowiące przydatne źródło wiedzy są grupy norm:

Europa / IEC:

- IEC 62933 (seria)Electrical Energy Storage (EES) systems – Series of standards (np. IEC 62933-1-1:2018 – Terminology; IEC 62933-5-2 – Safety requirements)
- IEC 62619:2022Secondary cells and batteries containing alkaline or other non-acid electrolytes – Safety requirements for secondary lithium cells and batteries, for use in industrial applications
- IEC 62485 (seria)Safety requirements for secondary batteries and battery installations (np. IEC 62485-2:2018 – Stationary batteries)

USA:

- NFPA 855:2023Standard for the Installation of Stationary Energy Storage Systems
- UL 9540Energy Storage Systems and Equipment
- UL 9540ATest Method for Evaluating Thermal Runaway Fire Propagation in Battery Energy Storage Systems

Chiny:

- GB/T 36276-2018Electrochemical Energy Storage System – Lithium-ion Battery Technical Specification
- GB/T 34131-2023 (aktualizowana wersja)Technical Specification for Electrochemical Energy Storage Power Station
- NB/T33015(seria) Technical standards for electrochemical energy storage systems in power applications
- NB/T33004
Technical specification for grid-connected operation of electrochemical energy storage systems

Obszar	Europa / IEC	USA	Chiny
Zakres ogólny systemów BESS	IEC 62933 – Electrical Energy Storage Systems (EES)	UL 9540 – Energy Storage Systems and Equipment	GB/T 34131 – Technical Specification for Electrochemical Energy Storage Power Station
Bezpieczeństwo baterii (ogniwa i moduły)	IEC 62619 – Safety requirements for lithium batteries (industrial)	UL 1973 – Batteries for Use in Stationary Applications	GB/T 36276 – Lithium-ion Battery Technical Specification
Instalacja i integracja systemu	IEC 62485 – Battery installations	NFPA 855 – Installation of Energy Storage Systems	NB/T 33015 – Energy storage system technical requirements
Thermal runaway / testy pożarowe	IEC 62933-5-2 – Safety requirements (system level)	UL 9540A – Thermal Runaway Fire Propagation Test	GB/T (częściowo ujęte w testach systemowych)
Bezpieczeństwo eksploatacji (BHP)	PN-EN 50110-1 – Operation of electrical installations	NFPA 70E – Electrical Safety in the Workplace	GB 26860 – Safety work regulations for electric power industry
Łuk elektryczny (Arc Flash)	IEC 61482 – Arc flash protective clothing	IEEE 1584 – Arc-Flash Hazard Calculations + NFPA 70E	Brak dedykowanego standardu – stosowane podejścia pośrednie

Tabela 1 Podsumowanie standardów i wytycznych w zakresie instalacji magazynów energii

c. Procedury i instrukcje w Polsce

W celu zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa prawo w Polsce wymaga od nas szeregu instrukcji i procedur. Dotyczą one także instalacji magazynów energii:

- IOBP - Instrukcja Organizacji Bezpiecznej Pracy
- IEUEE - Instrukcja Eksploatacji Urządzeń Elektroenergetycznych
- IRiESD - Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej (dla OSDn)
- Instrukcje stanowiskowe i BHP
- PPN - Procedura Prac Pod Napięciem przy urządzeniach elektroenergetycznych (jeśli wymagana)

6. Zarządzanie ryzykiem

Skuteczne zarządzanie ryzykiem związanym z łukiem elektrycznym wymaga systematycznego podejścia, obejmującego następujące etapy:

- Ocenę zagrożenie od łuku elektrycznego
- Ocenę zagrożenia porażeniem prądem
- Ocenę stanu aparatury i instalacji
- Wstępny dobór wymaganych ŚOI
- Ocenę ryzyka oraz dobór wymaganych soi dla wykonywanych prac

Ocena zagrożenia - BESS



Rys. 8 Proces oceny zagrożenia łukiem dla BESS – opracowanie własne autora

Pierwszy etap procesu zarządzania ryzykiem polega na identyfikacji potencjalnych miejsc, w których może wystąpić zagrożenie łukiem elektrycznym. Daje nam to możliwość:

- określenie poziomu energii łuku elektrycznego
- strefy oddziaływania łuku elektrycznego (ang. Arc Flash Boundary)
- dalszych działań i rekomendacji

Po zidentyfikowaniu poziomu zagrożeń, należy ocenić ryzyko zagrożenia porażeniem, co mocno zależy od konstrukcji instalacji oraz wykonywanych prac np. poprzez:

- określenie napięć
- określenie wykonywanych prac w pobliżu napięcia
- określenie prac wykonywanych pod napięciem

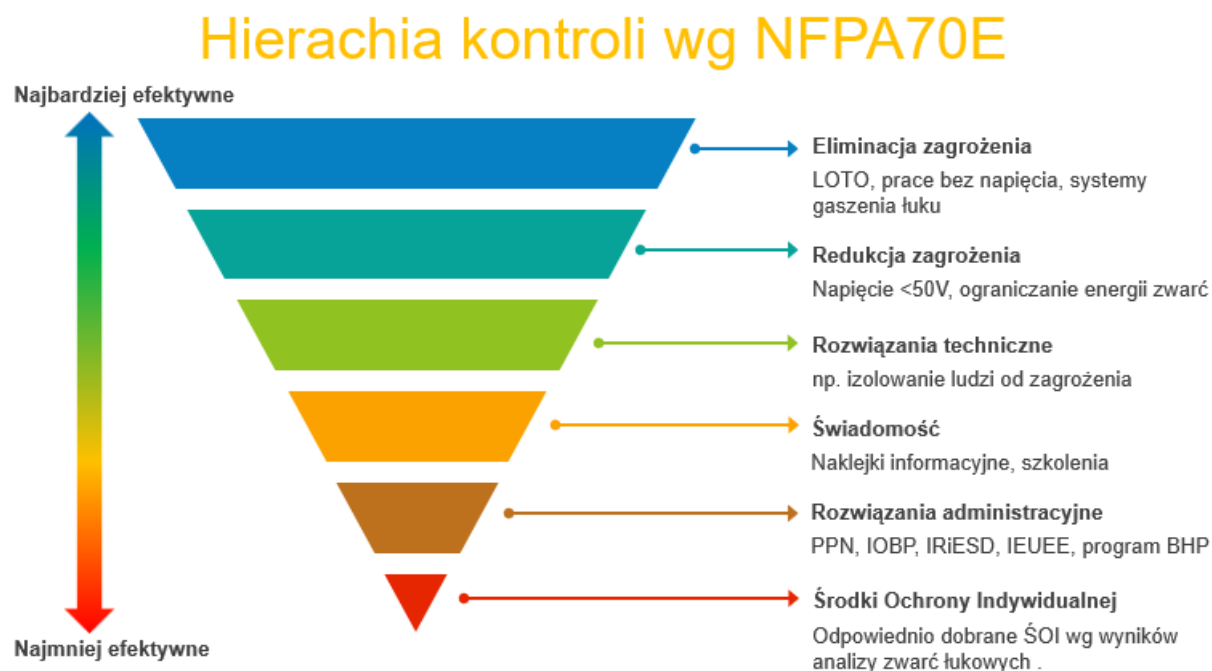
Następnie poprzez oszacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia zagrożeń elektrycznych dla poszczególnych czynności oraz prac eksploatacyjnych i możemy dostosować stosowanie ŚOI do:

- poziomu zagrożenia
- ekspozycji na to zagrożenie
- kondycji i stanu aparatury
- wykonywanych prac

Takie podejście opracowane przez MR Power Systems w formie metody „Uprozczonego doboru ŚOI oraz oceny ryzyka wykonywanych prac” z ang. (Simplified Task Based PPE Risk Matrix) pozwala na kontrolowanie stosowanych ŚOI podczas prac przy urządzeniach elektroenergetycznych.

Skuteczne zarządzanie ryzykiem wymaga podejścia systemowego które zaczyna się od identyfikacji i określenia zagrożeń. W dalszych krokach naturalnie chcemy kontrolować oraz ograniczać ekspozycję na występujące zagrożenia. Tutaj z pomocą przychodzi Hierarchia Kontroli z standardu NFPA 70E-2024 obejmująca kolejność działań od najbardziej efektywnych do najmniej:

- eliminacja zagrożenia,
- redukcja energii,
- środki techniczne,
- świadomość i szkolenia,
- rozwiązania administracyjne,
- środki ochrony indywidualnej.



Rys. 9 Hierarchia kontroli wg NFPA70E, opracowanie własne autora

7. Podsumowanie

Magazyny energii wprowadzają nowy poziom złożoności zagrożeń elektroenergetycznych, wynikający z połączenia zwarć w obwodach DC, trudności w detekcji łuku elektrycznego, napięć powyżej 1000 VDC oraz ryzyka eskalacji zdarzeń do poziomu utraty bilansu cieplnego ogniów. Czynniki te powodują, że klasyczne podejście do bezpieczeństwa instalacji elektrycznych jest niewystarczające.

Zapewnienie bezpiecznej eksploatacji wymaga zintegrowanego podejścia obejmującego etap projektowania, eksploatacji instalacji oraz analizę zagrożeń i ryzyka. Ogólne traktowanie kontenerowych wersji magazynów energii bardziej jako produktów a nie jako instalacji stawia wyzwania w zakresie prowadzenia eksploatacji.

Literatura

- [1] Dyrektywa Rady 89/391/EEC z dnia 12 czerwca 1989 r. w sprawie wprowadzenia środków w celu poprawy bezpieczeństwa i zdrowia pracowników w miejscu pracy.
- [2] Rozporządzenie Ministra Energii z dnia 28 sierpnia 2019 r. w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy urządzeniach energetycznych (Dz.U. z 2019 Poz. 1830).
- [3] Obwieszczenie Ministra Klimatu i Środowiska z dnia 8 czerwca 2021 r. w sprawie ogłoszenia jednolitego tekstu rozporządzenia Ministra Energii w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy urządzeniach energetycznych
- [4] PN-EN 50110-1:2023 Eksploatacja urządzeń elektrycznych - Część 1: Wymagania ogólne.
- [5] IEC 61482-2 Live working - Protective clothing against the thermal hazards of an electric arc - Part 2: Requirements.
- [6] IEC 61482-1-1 Prace pod napięciem -- Odzież ochronna przed zagrożeniami termicznymi spowodowanymi łukiem elektrycznym -- Część 1-1: Metody badań.
- [7] NFPA 70E Handbook for Electrical Safety in the Workplace (2021).
- [8] IEEE 1584-2018 IEEE Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations.
- [9] ISSA Guide (2011) Guideline for the selection of personal protective equipment when exposed to the thermal effects of an electric fault arc.
- [10] DGV 203-077 (2021) Thermal hazards due to electric fault arcing Guide for the selecting personal protective equipment.
- [11] EPRI Technical Report (2011) Arc-Flash Phenomena in High Voltage Systems (15-800 kV).
- [12] Lee, R. (1982). The Other Electrical Hazard: Electric Arc Blast Burns. IEEE Transactions on Industry Applications, IA-18(3), 246-251.
- [13] Hoagland, H. (2013). Arc-Flash Hazard Analysis and Mitigation. Wiley-IEEE Press.
- [14] Phillips, J. (2018). Complete Guide to Arc Flash Hazard Calculation Studies. McGraw-Hill Education.
- [15] Gammon, T., & Matthews, J. (2001). The Historical Evolution of Arcing-Fault Models for Low-Voltage Systems. IEEE Industry Applications Conference.
- [16] Njema, George G., Ouma, Russel Ben O., Kibet, Joshua K., A Review on the Recent Advances in Battery Development and Energy Storage Technologies, Journal of Renewable Energy, 2024, 2329261, 35 pages, 2024. <https://doi.org/10.1155/2024/2329261>
- [17] Chen, Y.; Yuan, X.; He, C.; Gou, Q.; Yang, N.; Xie, G.; Zhang, K.; Yao, Y.; Hou, Y. Mechanistic Exploration of Dendrite Growth and Inhibition for Lithium Metal Batteries. Energies 2023, 16, 3745. <https://doi.org/10.3390/en16093745>
- [18] M. Ruta, "Arc Flash Risk Assessment: Experiences from Projects in Eu," 2024 IEEE IAS Electrical Safety Workshop (ESW), Tucson, AZ, USA, 2024, pp. 1-7, doi: 10.1109/ESW52258.2024.10752771.