

Ochrona ludzi i urządzeń – zagrożenie łukiem elektrycznym i możliwości jego ograniczenia

Jacek Glensk, Krzysztof Maźniewski, Edward Siwy, Rafał Sosiński
Michał Kaźmierczak

Streszczenie

W referacie przedstawiono problematykę zagrożenia porażeniem łukiem elektrycznym, które występuje w sieciach elektroenergetycznych na wszystkich poziomach napięciowych. Obecnie analizy takiego zagrożenia wykonywane są na świecie na podstawie dwóch norm: amerykańskiej NFPA 70E oraz międzynarodowej IEEE 1584. Wyniki takiej analizy określają energię cieplną oddziałującą na pracownika, granicę oddziaływania łuku (AFB - Arc Flash Boundary) oraz kategorię zagrożenia łukiem elektrycznym (ARC - Arc-Rated Category), decydującą o zestawie środków ochrony indywidualnej (PPE - Personal Protective Equipment) stosowanych w przypadku konieczności wykonywania prac przy urządzeniu pod napięciem. W referacie przedstawiono metodykę wykorzystywaną w takich analizach. Omówiono także skutki oddziaływania łuku na organizm ludzki i urządzenia oraz możliwości ograniczania zagrożenia na przykładzie rzeczywistych sieci. W szczególności przedstawiono wpływ zabezpieczenia łukochronnego typu ZŁ na poprawę bezpieczeństwa pracy ludzi i ochronę urządzeń.

1. Wstęp

Użytkownicy urządzeń elektrycznych narażeni są na porażenie prądem oraz obrażenia związane z wybuchem łuku elektrycznego. Do grupy szczególnie narażonych należą elektrycy i pracownicy utrzymania ruchu, obsługujący urządzenia, stacje, rozdzielnie lub rozdzielnice elektroenergetyczne. O ile zagadnienia związane ze sposobami ochrony przed porażeniem prądem są dobrze rozpoznane i uregulowane przepisami krajowymi, to zagrożenia związane z wybuchem łuku elektrycznego nie są w Polsce eksponowane i regulowane odrębnymi wytycznymi. W stosownych przepisach [1, 2, 4] podaje się np. minimalny odstęp, wyznaczający zewnętrzną granicę strefy prac w pobliżu napięcia z zastosowaniem stosownych środków ochrony indywidualnej. Odstęp ten związany jest jednak jedynie z poziomem napięcia znamionowego urządzenia lub instalacji elektrycznej i nie wynika z analizy zagrożenia łukiem elektrycznym. Problem ochrony przed łukiem elektrycznym częściowo poruszają normy dotyczące prac pod napięciem [4], jednak skupiają się one na wymaganiach stawianych odzieży ochronnej. Wybuch łuku elektrycznego niesie ze sobą natomiast szereg oddziaływań, których skutki często są wielokrotnie groźniejsze, niż zagrożenia związane z porażeniem prądem elektrycznym występującym w warunkach bezłukowych.

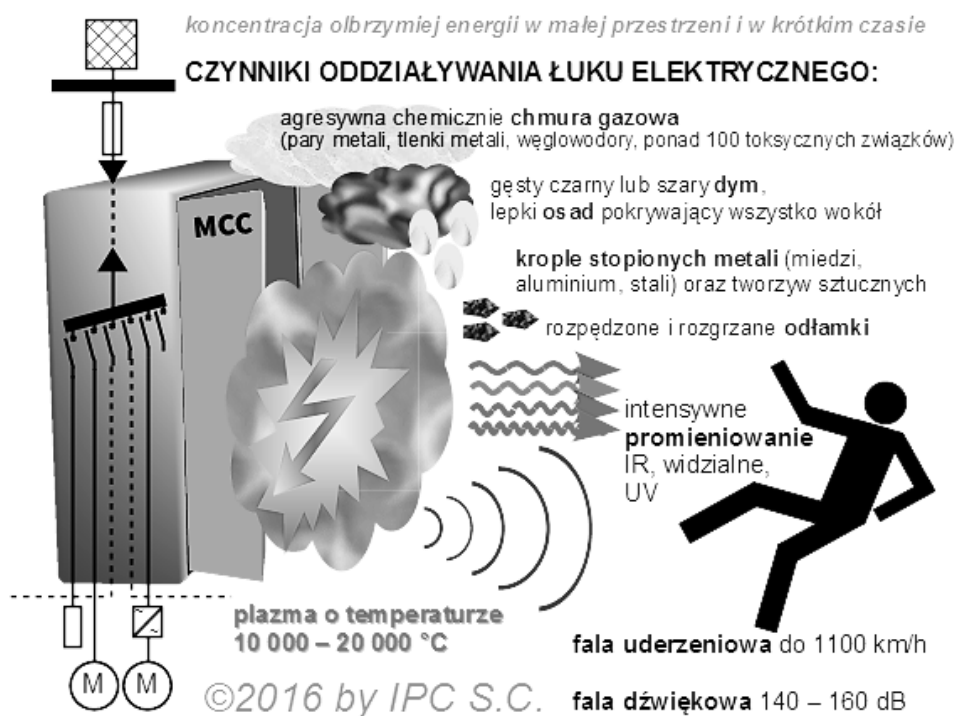
2. Oddziaływanie łuku elektrycznego

Najprościej ujmując, łuk elektryczny jest przepływem prądu w plazmie, czyli w kanale z całkowicie zjonizowanego gazu. Wybuch łuku elektrycznego jest gwałtownym wyzwoleniem energii (głównie cieplnej), związanej z przepływem prądu przez powietrze stanowiące część układu izolacyjnego. Największe zagrożenie łukiem elektrycznym występuje, gdy prace wykonywane są przy urządzeniu załączonym lub w pobliżu takiego urządzenia. Drzwi do szafy lub komory są wtedy zwykle otwarte dla ułatwienia obsługi, dostępu do punktów pomiarowych itp. Zainicjowanie łuku na zaciskach łączników, głowicach kablowych lub transformatorowych, pomiędzy szynami zbiorczymi rozdzielniczy itp. w ciągu kilkadziesiąt milisekund prowadzi do rozwinięcia pełnego trójfazowego zwarcia łukowego.

Najczęstsze bezpośrednie przyczyny wybuchu łuku, to: upuszczenie narzędzia, nieprawidłowo dobrany przyrząd, zakres lub funkcja pomiarowa, zbytne zbliżenie lub przypadkowe dotknięcie części czynnej, błędna czynność łączeniowa (np. operowanie wózkami przy zamkniętych stykach wyłącznika), głupota, brawura, źle przygotowana lub zorganizowana praca, zmęczenie, niedostateczna koncentracja, pośpiech.

inż. Jacek Glensk – Kierownik Działu Analiz Sieciowych,
dr inż. Krzysztof Maźniewski – Wiceprezes Zarządu, dr inż. Edward Siwy – Prezes Zarządu,
dr inż. Rafał Sosiński – Wiceprezes Zarządu – IPC Sp. z o.o.,
mgr Michał Kaźmierczak – Dyrektor Sprzedaży na rynku Przesyłu i Dystrybucji – Energotest sp. z o.o.

Najczęstsze pośrednie przyczyny wybuchu łuku, to: błędne zaprojektowanie systemu, przestarzałe urządzenia, wylądowania powierzchniowe na izolacji poprzez kurz, brud, pył, skropliny, problemy z zaciskami, brak dokładnych przeglądów i konserwacji, zwierzęta (gady, owady, gryzonie), uszkodzenie mechaniczne urządzenia lub narzędzia, korozja, starzenie izolacji, przepięcia (głównie atmosferyczne).



Rys. 1. Czynniki oddziaływania łuku elektrycznego

Łuk elektryczny oddziałuje na urządzenia, ciało poszkodowanego oraz otoczenie wieloma czynnikami jednocześnie (Rys. 1). Podstawowym czynnikiem decydującym o potencjalnie śmiertelnych obrażeniach pracownika jest oddziaływanie cieplne. Temperatura kolumny łukowej wzrasta do 10 000°C, a w szczególnych warunkach nawet do 20 000°C, powodując odparowanie wszystkich materiałów z jej najbliższego otoczenia oraz roztopienie wyposażenia rozdzielnic. Przykładowo miedź, przechodząc ze stanu stałego w gazowy, zwiększa swą objętość 67 000 razy, co oznacza, że odparowanie 1 cm³ szyn zbiorczych w rozdzielnicie skutkuje powstaniem prawie 7 m³ gazu. Powstaje ogromne ciśnienie, które w ciągu 5 ÷ 15 ms może wzrosnąć do 20 ÷ 30 t/m². Rozprężające się gazy tworzą falę uderzeniową, która jest w stanie wysadzić drzwi i pokrywy, rozerwać obudowy urządzeń. Fala ta jest także przyczyną urazów mechanicznych u osób na które działała, a jej dźwięk o natężeniu 140 ÷ 160 dB może być przyczyną trwałej utraty słuchu.

Wysoka emisja podczerwieni może wywołać poważne oparzenia radiacyjne, samozapłon odzieży (powodujący wtórne uszkodzenia wewnętrznych tkanek ciała) oraz innych łatwopalnych materiałów znajdujących się w pobliżu miejsca wypadku, a przez to zainicjowanie groźnego pożaru.

Szczególne niebezpieczeństwo dla oczu stanowi:

- promieniowanie podczerwone (780 ÷ 4000 nm) – które dociera aż do siatkówki i powoduje ogrzanie płynu soczewkowego, denaturację zawartych w nim białek, a przez to zaćmę; w niekorzystnej sytuacji może dojść do lokalnych uszkodzeń siatkówki,
- promieniowanie nadfioletowe (200 ÷ 380 nm) – które może przede wszystkim uszkodzić rogówkę, absorbującą ten typ promieniowania prawie w całości,
- silny błysk światła w paśmie widzialnym powodujący trwałe lub chwilowe oślepienie, uniemożliwiające lub mocno utrudniające samodzielną ewakuację z miejsca wypadku.

Wszystkie związki chemiczne znajdujące się w pobliżu kanału plazmowego rozpadają się i zostają jonizowane, a następnie pod wpływem wysokiej temperatury i ciśnienia wchodzi z sobą w złożone reakcje chemiczne, tworząc bardzo agresywną chemicznie oraz wysokotoksyczną gazową chmurę. Może ona poważnie uszkodzić drogi oddechowe i płuca człowieka. Pary metali wchodzi w reakcje z powietrzem atmosferycznym. Wraz ze stopniowym ochłodzeniem tworzą się tlenki metali. W ciągu dalszego ochładzania się powstaje czarny lub szary dym, pokrywający wszystko lepkim osadem.

Roztopiony przez łuk elektryczny metal zostaje rozpylony w postaci kropli. Małe krople, ze względu na małą pojemność cieplną, nie powodują istotnych oparzeń, jednak mogą uszkodzić oczy oraz pokryć metaliczną

warstwą nieosłoniętą skórę. Uszkodzone fragmenty wyposażenia rozdzielnic zostają wyrzucone w postaci drobnych, rozprószonych odłamków, szczególnie groźnych dla oczu. Przy wypadkach wysokoenergetycznych odłamki te są w stanie przebić odzież ochronną i ciało poszkodowanego.



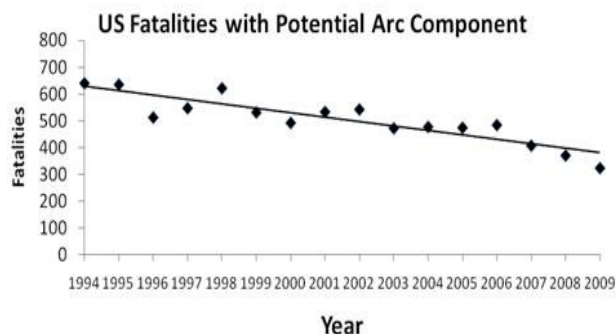
Rys. 2. Typowe obrażenia od łuku elektrycznego (źródło: www.medbc.com)

Należy podkreślić, że najczęściej występującym i najpoważniejszym urazem są oparzenia (Rys. 2). Całkowita energia wytworzona przez łuk elektryczny może być trzy do czterech razy większa, niż energia wytworzona podczas wybuchu ognia – i właśnie ta koncentracja dużej energii w krótkim czasie i w małej przestrzeni może mieć fatalne skutki dla pracowników znajdujących się w pobliżu. Dzieje się tak dlatego, że w przypadku łuku elektrycznego aż około 90% wytworzonego ciepła stanowi promieniowanie cieplne, co oznacza, że pracownik może doznać ciężkich oparzeń nawet wtedy, kiedy zdarzeniu nie towarzyszą płomienie lub jest ich mało.

3. Podstawowe wymagania normatywne

Zagrożenia od łuku elektrycznego dla ludzi i wyposażenia stanowią ważny aspekt bezpieczeństwa pracy. W Stanach Zjednoczonych zagadnienia te są prawnie zidentyfikowane jako zagrożenie zawodowe dla personelu. Od tego czasu wypadki związane z paleniem się łuku elektrycznego są identyfikowane jako odrębny rodzaj zdarzenia niż porażenie prądem elektrycznym.

W 1990 r., w ramach międzynarodowej organizacji IEEE, skupiającej inżynierów z branży elektrycznej i elektronicznej, opracowana została metodyka wyznaczania stopnia zagrożenia porażeniem łukiem elektrycznym [1]. Wzrastająca świadomość zagrożenia wynikającego z porażenia łukiem elektrycznym oraz wysokie koszty leczenia poszkodowanych i idące za tym wysokie odszkodowania płacone przez przedsiębiorców w wyniku tych wypadków, spowodowały konieczność regulacji prawnych na terenie Stanów Zjednoczonych. W 2007 r. zostały wprowadzone przepisy, na mocy których pracodawca jest zobowiązany do określenia ryzyka porażenia łukiem elektrycznym, wyznaczenia i oznakowania stref zagrożenia, a także przeszkolenia pracowników w tym zakresie oraz zapewnienia im środków ochrony indywidualnej ograniczających zagrożenie do przyjętego poziomu. Przyjęto, że metodyka wyznaczenia stopnia zagrożenia oraz sposobu doboru środków ochrony indywidualnej będą zgodne z normą IEEE 1584 oraz normą amerykańskiego stowarzyszenia ochrony przeciwpożarowej NFPA 70E [2]. Warto zauważyć, że wymogi te dotyczą każdego zakładu z kapitałem amerykańskim niezależnie od lokalizacji – również poza obszarem Stanów Zjednoczonych. Zatem, pomimo że stosowanie zaleceń zawartych w publikacjach [1] i [2] nie jest obligatoryjne na terenie Polski, problem wykonywania analiz zagrożenia łukiem elektrycznym zaistniał na rynku krajowym. Na rysunku 3 przedstawiono efekty zastosowanej polityki bezpieczeństwa, tj. systematyczny spadek liczby ofiar oraz ograniczenie skutków wypadków z łukiem elektrycznym.



Rys. 3. Liczba poszkodowanych w wypadkach z łukiem elektrycznym oraz liczba ofiar śmiertelnych na skutek wypadków przy urządzeniach elektrycznych na przestrzeni lat w USA

Należy zwrócić uwagę, że **normy [1] i [2] koncentrują się głównie na cieplnym oddziaływaniu łuku elektrycznego** na wybrane powierzchnie ciała człowieka **przy ściśle określonej odległości pracy**, tj. na energii docierającej od źródła łuku do powierzchni twarzy i klatki piersiowej pracownika znajdującego się zwykle w odległości wyciągniętych rąk od szyn zbiorczych rozdzielnic.

Norma NFPA 70E wymaga od zakładów przemysłowych wdrożenia całego procesu zarządzania ryzykiem związanym z energią elektryczną. Obejmuje on m.in.:

- analizę zagrożeń od porażenia prądem oraz łukiem elektrycznym,
- określenie sposobów redukcji niebezpieczeństwa, ze szczególnym naciskiem na odłączanie i zabezpieczanie obwodów przed podjęciem pracy,
- oznaczenie miejsc niebezpiecznych,
- wdrożenie specjalnych procedur pracy, minimalizujących ryzyko wypadku (pisemne polecenia pracy; procedury lockout/tagout - odłączenia, zabezpieczenia i oznaczenia wszystkich źródeł energii; zatwierdzone i aktualne plany i instrukcje pracy),
- opracowanie procedur ratunkowych w razie wypadku,
- regularne szkolenia dla pracowników,
- obowiązek stosowania środków ochrony indywidualnej przed łukiem elektrycznym (PPE) oraz izolowanych i certyfikowanych narzędzi.

Podstawowym **celem odpowiednio dobranych środków ochrony indywidualnej jest jedynie ograniczenie obrażeń pracownika do poziomu uleczonego i dającego szansę na przeżycie**, tj:

- dopuszcza się oparzenia pierwszego stopnia na całej powierzchni ciała,
- dopuszcza się 50% ryzyko wystąpienia oparzeń drugiego stopnia na dużych powierzchniach ciała, tj. na głowie oraz klatce piersiowej,
- nie dopuszcza się oparzeń trzeciego stopnia (wymagających przeszczepu skóry i istotnie zwiększających ryzyko zgonu) na dużych powierzchniach ciała, tj. na głowie i klatce piersiowej,
- zakłada się konieczność dodatkowej ochrony rąk, które zwykle znajdując się bliżej źródła łuku przyjmują większą energię cieplną w czasie wypadku,
- zakłada się konieczność szczególnej ochrony wzroku oraz słuchu.

Kategoria zagrożenia łukiem elektrycznym - ARC	Energia zdarzenia (cal/cm ²)
1	1,2 ÷ 4
2	4 ÷ 8
3	8 ÷ 25
4	25 ÷ 40
X	> 40

Tabela 1. Energia zdarzenia dla poszczególnych kategorii zagrożenia (wg NFPA 70E)

Wg NFPA 70E środki ochrony indywidualnej przed oddziaływaniem łuku elektrycznego dobiera się zawsze do jednej z kategorii zagrożenia (ARC - **Arc-Rated Category**), tj. do określonego przedziału energii cieplnej pochodzącej z wybuchu łuku elektrycznego (energii zdarzenia - ang. *incident energy*). Od 2015 r. norma wyróżnia cztery kategorie zagrożenia (tabela 1) wyznaczające obszary, w których stosując określone środki ochrony indywidualnej możliwe jest wykonywanie prac na urządzeniu pod napięciem lub w warunkach zagrożenia łukiem elektrycznym.

Energia $E = 1,2 \text{ cal/cm}^2$ (5 J/cm^2), powoduje oparzenie drugiego stopnia na nieosłoniętej skórze. Przyjmuje się, że wartość ta wyznacza granicę ochrony przeciwłukowej, określaną też jako granica oddziaływania łuku (AFB - *Arc Flash Boundary*). Do wartości $1,2 \text{ cal/cm}^2$ nie jest wymagana specjalna odzież ochronna, a ochrona pracownika odbywa się na zasadach ogólnych dla elektryków. Odległość granicy oddziaływania łuku podaje się na odpowiednich etykietach ostrzegawczych. Wymagane jest również wyraźne jej oznakowanie oraz uniemożliwienie przypadkowego jej przekroczenia osobom bez wymaganych środków ochronnych (w czasie pracy przy urządzeniach elektrycznych, które nie zostały całkowicie odłączone od źródła zasilania).

Kategoria „X”, dla której energia zdarzenia $E > 40 \text{ cal/cm}^2$, w ogólnym przypadku oznacza zakaz pracy pod napięciem lub w warunkach umożliwiających porażenie łukiem elektrycznym. Powyżej 40 cal/cm^2 głównym czynnikiem powodującym obrażenia śmiertelne nie jest energia cieplna, ale kinetyczna fali uderzeniowej - powodująca u poszkodowanego pęknięcie kości żeber i czaszki, prowadzące do zmiążdżenia płuc i mózgu. Przyjęto zatem, że dla kategorii „X” nie istnieją środki ochrony indywidualnej dające wymierne szanse przeżycia.

4. Metodyka analizy zagrożenia łukiem elektrycznym

W celu wykonania zgodnej z normami [1] i [2] identyfikacji stref zagrożenia oraz określenia odpowiednich środków bezpieczeństwa należy dysponować kompletem informacji o analizowanej sieci tj. dane do obliczeń wielkości zwarciovych, typy i nastawy urządzeń automatyki zabezpieczeniowej oraz możliwe warianty pracy sieci. Konieczne jest zatem wytypowanie punktów systemu rozdziału energii elektrycznej podlegających analizie, obliczenie w nich wartości *prądu trójfazowego zwarcia metalicznego* I_k (zgodnie z normą [3]) oraz wykonanie studium współdziałania aparatury zabezpieczającej.

Metodyka analizy zagrożenia łukiem elektrycznym zawarta jest głównie w normie [1], gdzie bazując na empirycznym oraz teoretycznym modelu łuku przedstawiono algorytmy pozwalające określić wymagane parametry, energię zdarzenia oraz zasięg oddziaływania łuku. Przedstawione procedury dotyczą sieci trójfazowych o napięciu przemiennym i są zróżnicowane dla obliczeń sieci nN i SN (model empiryczny) i obliczeń dla sieci na każdym poziomie napięciowym (model teoretyczny, dla napięć powyżej 15 kV - model Lee). W normie nie zawarto procedur obliczeniowych dla sieci 1-fazowych o napięciu przemiennym i sieci prądu stałego.

Obliczenia prądu zwarcia 3-fazowego przy zwarciu metalicznym (bezlukowym), mogą wskazywać na szybszą odpowiedź urządzeń zabezpieczających (zgodnie z ich charakterystyką prądowo-czasową). Wyniki takich obliczeń mogą dawać fałszywą wartość energii łuku (zdarzenia) i zasięg strefy oddziaływania łuku elektrycznego. Niezmiernie ważne jest zatem, aby poprawnie określić wartość spodziewanego prądu zwarcia łukowego (prąd łuku I_a) dla rzeczywistej impedancji układu, tj. uwzględniając również impedancję łuku. Jest to szczególnie istotne przy zastosowaniu zabezpieczeń nadmiarowo-prądowych o charakterystyce prądowo-czasowej zależnej (niewielka zmiana prądu może powodować znacznie różnice w czasach zadziałania zabezpieczeń) i przy napięciach niższych niż 15 kV. Należy przy tym zauważyć, że wartość prądu łuku ulega dynamicznym zmianom w trakcie trwania procesu wyładowania, a modele pozwalające wyznaczyć tą wartość są przybliżone. Wobec powyższego, w pełnych analizach zagrożenia łukiem elektrycznym energia zdarzenia jest również określana dla zredukowanej o 15% wartości spodziewanego prądu łuku, a do dalszych obliczeń brany jest wówczas wariant dający większą energię. Ogólny wzór określający spodziewany prąd łuku przedstawiono poniżej:

$$\log_{10}(I_a) = A + C_1 \cdot I_k^n + C_2 \cdot U_n + C_3 \cdot G + C_4 \cdot U_n \cdot \log_{10}(I_k^n) - C_5 \cdot G \cdot \log_{10}(I_k^n),$$

gdzie: I_a – prąd trójfazowego zwarcia łukowego,

A – współczynnik zależny od miejsca wystąpienia łuku (łuk otwarty/zamknięty),

$C_1 - C_5$ – stałe,

G – odstęp pomiędzy elektrodami, szynami zbiorczymi, głowicami,

U_n – napięcie nominalne sieci, w której pracuje urządzenie.

Mając prawidłowo określony prąd łuku oblicza się *znormalizowaną energię zdarzenia* (dla *znormalizowanego czasu wyłączenia i typowej odległości pracy*), a następnie przelicza się ją odpowiednio dla rzeczywistej *odległości pracy* D oraz *czasu trwania zagrożenia* t_a . Czas ten rozumiany jest jako czas palenia się łuku, czyli od chwili rozpoczęcia wyładowania łukowego do jego całkowitego zgaszenia (obejmuje czas reakcji i działania zabezpieczeń). Przyjmuje się zwykle, że odległość pracy jest mierzona od źródła łuku do powierzchni twarzy i klatki piersiowej pracownika znajdującego się zwykle w odległości wyciągniętych rąk od szyn zbiorczych rozdzielnic, typowe odległości pracy przedstawiono w tabeli 2. Ogólny wzór na znormalizowaną energię zdarzenia przedstawiono poniżej:

$$\log_{10}(E_n) = K_1 + K_2 + C_1 \cdot \log_{10}(I_a) + C_2 \cdot G,$$

gdzie: E_n – znormalizowana energia łuku (dla 0,2 s oraz 610 mm),

K_1 – współczynnik zależny od miejsca wystąpienia łuku,

- K_2 – współczynnik zależny od sposobu uziemienia sieci,
 $C_1 - C_2$ – stałe,
 G – odstęp pomiędzy elektrodami, szynami zbiorczymi, głowicami.

Klasa urządzeń elektrycznych	Typowa odległość pracy* (mm)
aparatura łączeniowa 15 kV	910
aparatura łączeniowa 5 kV	910
niskonapięciowa aparatura łączeniowa	610
niskonapięciowe szafy napędów (MCC) i tablice rozdzielcze	455
kable	455
inne	do określenia na miejscu

*) Typowa odległość pracy jest sumą odległości między pracownikiem stojącym naprzeciw urządzenia oraz odległości między frontem urządzenia a potencjalnym źródłem łuku elektrycznego w jego wnętrzu.

Tabela 2. Typowe odległości pracy dla różnych klas urządzeń elektrycznych (wg [1] i [2])

Na podstawie energii zdarzenia określa się kategorię zagrożenia ARC. Oznacza to, że kategoria ARC związana jest z założoną odległością pracy i zmiana tej odległości skutkować może zmianą kategorii.

Następnie oblicza się granicę oddziaływania łuku (AFB) wyznaczającą strefę, w której energia cieplna przekracza wartość $1,2 \text{ cal/cm}^2$ (5 J/cm^2) i może wywołać natychmiastowe oparzenie drugiego stopnia na nieosłoniętej skórze. W strefie tej obowiązuje stosowanie środków osobistej ochrony przeciwłukowej. Strefa taka zawsze powinna być wygradzona przed dostępem przypadkowych i niechronionych osób podczas prac prowadzonych na urządzeniach, które nie zostały całkowicie odłączone od źródła zasilania.

Przykładowe wyniki analizy zagrożenia łukiem elektrycznym przedstawiono w tabeli 3.

Lp.	Miejsce analizy	U_r (kV)	I_k'' (kA)	I_a (kA)	t_a (s)	E (cal/cm ²)	D (cm)	AFB (cm)	ARC wg [2]	Uwagi
1	R-A	0,4	8,38	4,28	6	80,2	45,7	589,2	X	
2	T-A_nN	0,4	19,6	8,52	0,3	8,4	45,7	149,4	3	
3	R-B	0,4	7,81	4,04	0,5	6,3	45,7	124,8	2	
4	R-C	0,4	1,89	1,28	0,07	0,3	45,7	17,7	0	

Uwaga: Kategoria "0" obowiązywała do 2015 roku, pokazano ze względów poglądowych.

Tabela 3. Wyniki analizy łukowej w wybranych punktach pola zasilającego

5. Metody ograniczania zagrożenia łukiem elektrycznym

5.1. Minimalizacja ryzyka inicjacji łuku elektrycznego

Podstawowymi środkami minimalizującymi ryzyko wybuchu łuku elektrycznego są:

- regularne przeglądy i pomiary urządzeń elektrycznych, w celu ujawnienia kluczowych nieprawidłowości prowadzących do awarii:
 - oględziny – identyfikujące uszkodzenia mechaniczne, ślady gryzoni, zaleganie kropli itp.,
 - pomiary izolacji – identyfikujące uszkodzenia wewnętrzne oraz procesy starzeniowe,
 - przeglądy termowizyjne – identyfikujące problemy ze złączami, wentylacją, przeciążaniem lub nierównomiernym obciążeniem,
 - pomiary napięć, prądów, rezystancji – potwierdzające symetrię układu zasilania,
- regularna konserwacja urządzeń, zapewniająca im bezawaryjną pracę:
 - usuwanie kurzu i innych zanieczyszczeń z powierzchni izolacyjnych,
 - inne czynności zgodne z wymogami producenta lub przepisami eksploatacyjnymi,
- izolowanie części czynnych:
 - zastosowanie dodatkowych osłon (np. na zaciski kablowe),
 - dbanie o zamykanie i zabezpieczanie drzwi rozdzielnic,
- zastosowanie rozdzielnic w wykonaniu łukoodpornym,

- wypracowanie procedur ograniczających do niezbędnego minimum wszelkie prace pod napięciem oraz w pobliżu napięcia,
- wymiana urządzeń przestarzałych i niebezpiecznych, np. rozdzielnic z gołymi szynami zbiorczymi, szkolenia dla pracowników na temat zagrożeń oraz prawidłowej eksploatacji urządzeń.

5.2. Zwiększenie odległości pracy

Przyjmuje się, że energia cieplna maleje (w przybliżeniu) odwrotnie proporcjonalnie do kwadratu odległości od kolumny łukowej. Dlatego podstawową metodą ograniczania narażenia na potencjalne oparzenia od łuku elektrycznego jest zwiększenie odległości pracy, tj. odległości od potencjalnego źródła łuku do twarzy i tułowia pracownika.

Zawsze tam, gdzie tylko jest to możliwe, zalecane jest wykorzystanie urządzeń do pracy zdalnej, szczególnie przy czynnościach o podwyższonym ryzyku powstania wylądowania łukowego tj.:

- wykonywanie operacji łączeniowych – np. przez zdalnie sterowane mechanizmy wykonawcze, które mogą być sprzężone z systemem SCADA,
- obsługa członów wysuwnych wyłączników – np. przy pomocy urządzeń typu RRS - *Remote Racking System*,
- pomiary – np. przez założenie elementów systemu do zdalnego odczytu w stanie beznapięciowym, umożliwiającego wykonywanie pomiarów (odczytu i sterowania urządzeniami) ze strefy znajdującej się poza zasięgiem oddziaływania łuku.

W przypadku rozdzielnic nN najtańszym i dość skutecznym sposobem jest takie przeszkolenie pracowników, by zachowywali zawsze maksymalną możliwą odległość od części czynnych rozdzielnic, tj. pracowali zawsze w odległości w pełni wyciągniętych rąk.

Dla punktów gdzie kategoria „X” obliczona została dla typowej odległości pracy równej 455 mm lub 610 mm można zaproponować dalsze zwiększenie odległości pracy - odpowiednio do znormalizowanych 610 mm lub 910 mm. W przypadku odległości pracy wynoszącej 910 mm zachodzi konieczność zastosowania dodatkowych specjalistycznych narzędzi (m.in. drążków izolacyjnych), jednakże jeżeli przyjęcie takiej odległości spowoduje obniżenie kategorii zagrożenia łukiem do poziomów umożliwiających dobór środków ochronnych to możliwe stanie się wykonanie przynajmniej niektórych prac pod napięciem lub w pobliżu napięcia (np. potwierdzenie odłączenia urządzenia, przegląd termowizyjny itp.).

5.3. Skrócenie czasu palenia się łuku

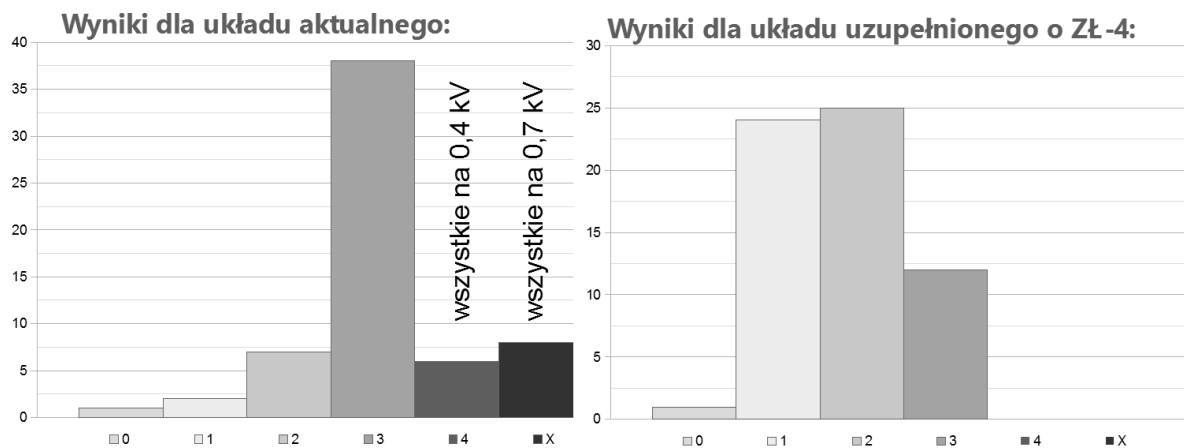
Przyjmuje się, że energia cieplna docierająca do pracownika jest wprost proporcjonalna do czasu palenia się łuku elektrycznego przy wyłączeniu obwodu do 0,3 s. Dla czasów powyżej 0,3 s przyjmuje się wykładniczy przyrost energii zdarzenia. Zatem kolejną metodą ograniczenia energii łuku jest skrócenie czasu wyłączenia obwodu zasilającego łuk. Jest to możliwe do osiągnięcia przez:

- korektę nastaw zabezpieczeń zwarciovych, która najczęściej wymaga wykonania dodatkowej analizy całego systemu zabezpieczeń nadprądowych w celu określenia, w których punktach i o jaką wartość można skorygować nastawy, aby spełnić kryteria dostatecznej ochrony przeciwłukowej z zachowaniem odpowiedniej selektywności i pewności zasilania procesu technologicznego,
- zastosowanie zabezpieczenia różnicowego rozdzielnic, pozwalającego na bezzwłoczne odcięcie zasilania w przypadku zidentyfikowania zwarcia wewnątrz rozdzielnic,
- zastosowanie zabezpieczenia łukochronnego, które bazując równocześnie na kilku kryteriach (np. na zapadzie napięcia, błysku światła i natężeniu fali dźwiękowej) potrafi zidentyfikować wybuch łuku elektrycznego oraz podać sygnał na wyłącznik w ciągu pojedynczych milisekund.

Przykład wpływu zabezpieczenia przeciwłukowego na kategorię ARC przedstawiono w tabeli 4 oraz na rys. 4.

Lp.	Miejsce analizy	U _r (kV)	I _k '' (kA)	D (mm)	I _a (kA)	t _k * (s)	t _k ** (s)	E* (cal/cm ²)	E** (cal/cm ²)	AFB* (cm)	AFB** (cm)	ARC*	ARC**
1	A	10	47,97	910	45,33	0,3	0,06	25,76	5,15	160,3	71,67	4	2
3	C	10	45,30	910	42,85	0,3	0,06	24,24	4,85	155,7	69,65	3	2
6	F	10	44,61	910	42,21	0,1	0,06	7,95	4,77	89,23	69,12	2	2
*) Bez uwzględnienia zabezpieczenia przeciwłukowego (uwzględnione tylko wyzwalacze nadprądowe).													
**) Przy zadziałaniu zabezpieczenia przeciwłukowego.													

Tabela 4. Wpływ zabezpieczenia łukochronnego na kategorię ARC w wybranych punktach analizy



Rys. 4. Rozkład kategorii zagrożenia łukiem elektrycznym na elementach Rozdzielni Potrzeb Własnych Elektrowni - symulacja uzupełnienia rozdzielnic nN o zabezpieczenie łukochronne

6. Światłowodowe zabezpieczenie łukochronne typu ZŁ

Światłowodowe Zabezpieczenia Łukochronne **typu ZŁ** zapewniają błyskawiczne wykrycie zwarcia i impulsowanie na wyłączenie zasilania zagrożonego obiektu. Zabezpieczenia generują impuls wyłączający w czasie nie przekraczającym 10 ms. Oznacza to, że zwarcie można wyłączyć – w zależności od rodzaju wyłącznika - w czasie nie przekraczającym 60 ms (zazwyczaj 30-50 ms). Wyłączenie zwarcia w takim czasie minimalizuje w szczególności oddziaływanie termiczne i chemiczne, chroniąc zdrowie i życie ludzi, zapobiegając zniszczeniu urządzeń, a tym samym ogranicza, ew. przerwy w procesach technologicznych związane z brakiem zasilania, a więc minimalizuje straty finansowe.

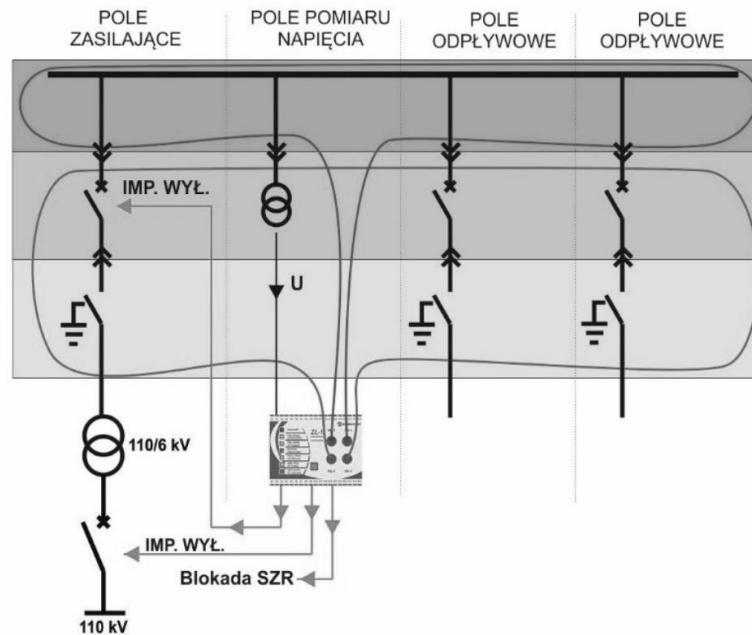
Zabezpieczenia ZŁ identyfikuje zwarcie w oparciu o dwa kryteria. Pierwszym jest pojawienie się światła o określonej długości fali, drugim jest spadek napięcia do zadanej wartości (najczęściej 0,6-0,7 U_n). Kryterium to wybrano nie przypadkowo. Zabezpieczenia oparte o kryterium prądowe posiadają bowiem dwie istotne wady. Pojawiają się tzw. strefy martwe (poniżej lub powyżej przekładnika prądowego, w zależności od kierunku przepływu prądu). Wystąpienie zwarcia w tej strefie nie jest identyfikowane przez zabezpieczenie. Ponadto w rozdzielnicach z wieloźródłowym zasilaniem stosowanie kryterium prądowego stwarza poważne trudności w prawidłowym nastawianiu prądu rozruchowego zabezpieczenia zależnego od konfiguracji pracy rozdzielni. Zabezpieczenia typu ZŁ przeznaczone są do wszelkich urządzeń elektrycznych, w których istnieje ryzyko wystąpienia łuku elektrycznego, a w szczególności rozdzielnic SN i nn oraz stacji transformatorowych zarówno otwartych, jak i obudowanych transformatorów suchych.

W zależności od potrzeb dostępne są trzy wersje zabezpieczeń ZŁ do ochrony:

- rozdzielnic typu otwartego,
- transformatorów suchych,
- rozdzielnic typu okapturzonego.

6.1. Ochrona rozdzielnic typu otwartego

Do ochrony rozdzielnic typu otwartego stosuje się zabezpieczenie typu ZŁ-1, w którym detektorem światła łuku elektrycznego są pętle światłowodowe.



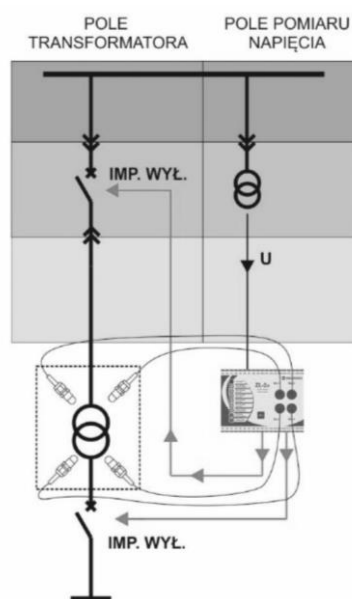
Rys. 5. Idea instalacji zabezpieczenia typu ZŁ-1 do ochrony rozdzielni typu otwartego

Zabezpieczenie typu ZŁ-1 posiada możliwość podłączenia 2 pętli światłowodowych, z których każda może mieć standardowo do 60 metrów długości. Jedną z pętli rozciąga się wzdłuż szyn, a drugą do ochrony przedziału wyłącznikowego i przyłączy. Przykładowy sposób rozciągnięcia pętli został przedstawiony na rysunku 5. W momencie detekcji łuku zabezpieczenia wyłącza zasilanie całej sekcji, niezależnie od miejsca powstania zwarcia.

Sugerowane jest także impulsowanie na wyłącznik w rozdzielni nadrzędnej co wyklucza strefę martwą zabezpieczenia w polu zasilającym przed wyłącznikiem. W momencie zadziałania ZŁ-1 blokuje również automatkę SZR. Zabezpieczenie ZŁ-1 jest stosowane w rozdzielniach typu otwartego do ochrony złożonych układów zasilania nn i SN – wielosystemowych i wielosekcyjnych.

6.2. Ochrona transformatorów suchych

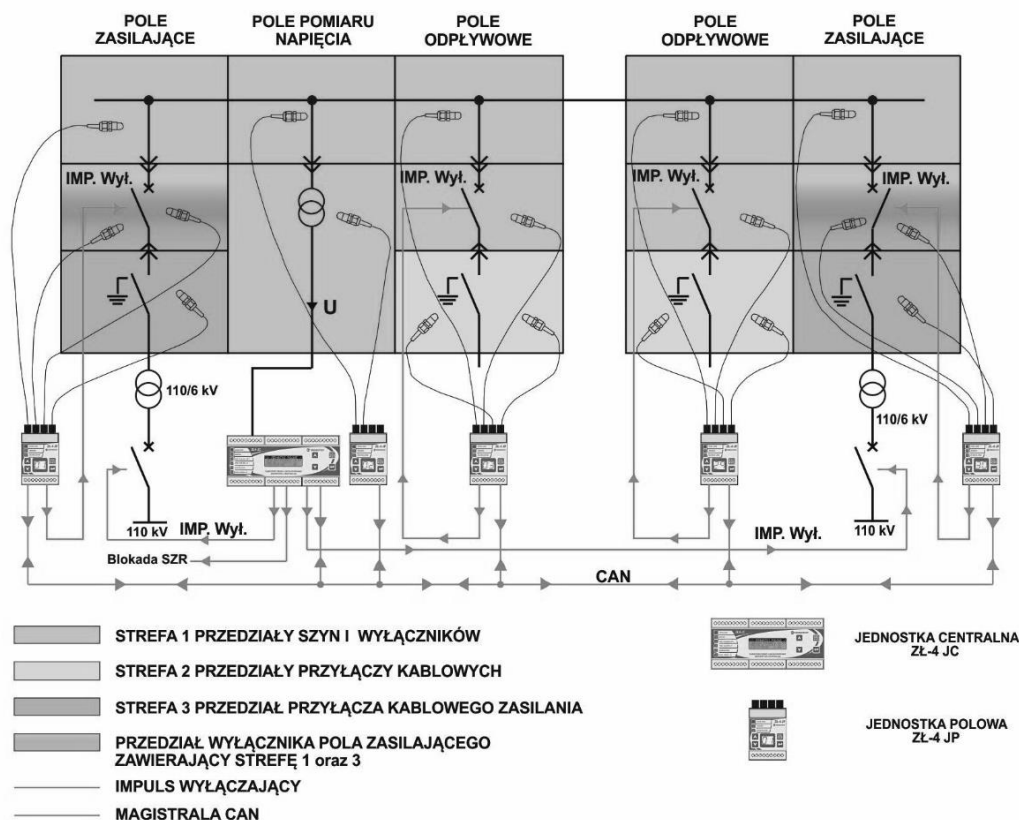
Do ochrony transformatorów suchych stosuje się zabezpieczenie typu ZŁ-2, w którym detektorem światła łuku elektrycznego są 4 czujniki czołowe. Idea instalacji zabezpieczenia ZŁ-2 do ochrony transformatorów suchych została przedstawiona na rysunku 6.



Rys. 6. Idea instalacji zabezpieczenia typu ZŁ-2 do ochrony transformatora

6.3. Ochrona rozdzielnic okapturzonych

Do ochrony rozdzielnic typu zamkniętego stosuje się zabezpieczenie typu ZŁ-4. Jest to zabezpieczenie o budowie rozproszonej, w którym podobnie, jak ma to miejsce w przypadku ZŁ-2 detektorem światła łuku elektrycznego są światłowodowe czujniki czołowe. Zabezpieczenie składa się z jednostki centralnej i małych jednostek polowych skomunikowanych szybką magistralą CAN. Jednostka centralna jest odpowiedzialna za detekcję obniżenia napięcia. Jednostki polowe są wyposażone w styk wyłączający oraz 4 czujniki czołowe. Czujniki czołowe są wprowadzane do poszczególnych przedziałów rozdzielnicy, dzięki czemu zabezpieczenie ZŁ-4 umożliwia selektywne wyłączanie poszczególnych pól, w zależności od miejsca zwarcia. Jeżeli zwarcie powstanie w przedziale szynowym lub wyłącznikowym, to zostaje otwarty wyłącznik pola zasilającego całą rozdzielnicę, jeżeli zaś w przedziale przyłączeniowym - wyłączone zostaje tylko pole, w którym wystąpiło zwarcie. Dzięki budowie rozproszonej rozwiązanie to jest szczególnie ekonomiczne do ochrony wielopolowych rozdzielni okapturzonych. Schemat podłączenia zabezpieczenia ZŁ-4 w rozdzielni okapturzonej został przedstawiony na rysunku 7.



Rys. 7. Idea instalacji zabezpieczenia typu ZŁ-4 do ochrony rozdzielnic okapturzonych.

Światłowodowe zabezpieczenia łukochronne ZŁ charakteryzuje się szeregiem zalet:

- bardzo krótki czas zadziałania (<10 ms),
- selektywność wyłączania poszczególnych pól,
- brak stref martwych (niechronionych),
- łatwość nastawiania wartości rozruchowych szczególnie w rozdzielnicach zasilanych z kilku źródeł,
- możliwość swobodnego konfigurowania układu zabezpieczeń (można impulsować kilka wyłączników),
- łatwość montażu zarówno w nowych jak i istniejących rozdzielniach,
- samoczynne przechodzenie do pracy jednokryterialnej przy zaniku napięcia pomocniczego,
- funkcja auto testowania dostępna zarówno dla pętli światłowodowej, jak i czujników czołowych.

Zabezpieczenia ZŁ przeszły z pozytywnym wynikiem próby zwarciove w Instytucie Energetyki oraz Instytucie Elektrotechniki. Przeprowadzone badania potwierdzają jednoznaczność celowości stosowania zabezpieczeń ZŁ. Zabezpieczenia ZŁ pracują już na setkach obiektów w elektroenergetyce i przemyśle w kraju i za granicą.

7. Podsumowanie

W zakładach przemysłowych o rozbudowanych sieciach elektroenergetycznych, obowiązuje zwykle procedura lockout/tagout (LO/TO). Wymaga ona odłączenia źródła zasilania przed przystąpieniem do wykonywania naprawy elementu sieci, zablokowania możliwości ponownego podłączenia zasilania przez osoby nieupoważnione oraz opisanie założonej blokady (osoba plus przyczyna założenia blokady). Teoretycznie do wypadku może więc dojść jedynie w przypadku, gdy pracownicy bez wyraźnej konieczności (łamiąc procedury) wykonują prace pod napięciem lub w pobliżu napięcia.

Występują jednak sytuacje, kiedy wykonywanie prac pod napięciem lub w pobliżu napięcia jest bezwzględnie konieczne. Istnieje wówczas szczególne zagrożenie wyładowaniem łukowym. Jednym z takich przypadków są dokonywane operacje łączeniowe (np. odłączanie urządzeń spod napięcia). Najlepiej jest, jeżeli operację taką można wykonać zdalnie. Jeżeli jednak jest to niemożliwe, to osoba, która ma wykonywać określone prace, musi być odpowiednio przeszkolona i znać właściwe sposoby zabezpieczania się przed zagrożeniem wyładowaniem łukowym – niezbędne przy wykonywaniu określonych prac.

Właściwe procedury odcinania zasilania i blokowania załączenia, a także oznaczania miejsca pracy zawieszkami informacyjnymi, obejmują głównie sprawdzenie braku napięcia oraz stosowanie uziemień. Czynności sprawdzania braku napięcia wymagają także odpowiedniego przeszkolenia osób wykonujących te prace oraz stosowania sprzętu ochrony indywidualnej dobranego do kategorii zagrożenia wyładowaniem łukowym.

Analizy zagrożenia łukiem elektrycznym wykonywane na bazie norm [1] i [2] pozwalają zwiększyć bezpieczeństwo pracy personelu. Można przypuszczać, że w związku z rosnącą świadomością tego zagrożenia będą wykonywane coraz częściej. Aby jednak wyniki takich analiz znalazły właściwe zastosowanie, we wszystkich analizowanych punktach sieci elektroenergetycznej należy umieścić odpowiednie oznakowanie, a pracownikom uprawnionym do przekraczania granicy oddziaływania wyładowania łukowego zapewnić odpowiednie środki ochrony indywidualnej oraz ubranie ochronne adekwatne do kategorii zagrożenia wyładowaniem łukowym.

Należy również być świadomym, że wyniki analizy łukowej pozostają ważne przy stanie sieci zgodnym z dokumentacją techniczną, na podstawie której analiza była wykonywana. Zmiana układu pracy lub wyposażenia sieci, powodująca w szczególności zmianę mocy zwarciovych, a także zmiana systemu zabezpieczeń wymusza ponowną analizę zagrożenia wyładowaniem łukowym w elementach systemu.

Jak pokazują przedstawione w referacie przykłady, jedną z najskuteczniejszych metod ograniczania skutków oddziaływania łuku jest skrócenie czasu jego palenia się. Zasadniczą rolę pełni tutaj odpowiednia koordynacja i dobór zabezpieczeń. Uzupełnienie istniejącego systemu o zabezpieczenia łukochronne może w znacznym stopniu przyczynić się do poprawy poziomu bezpieczeństwa w sieci elektroenergetycznej.

Światłowodowe zabezpieczenia łukochronne typu ZŁ to najszybsze, najbardziej precyzyjne w porównaniu do innych rozwiązań, np. do zabezpieczeń opartych o detekcję wzrostu ciśnienia. Są zainstalowane w setkach obiektów na tysiącach urządzeń (rozdzielnice, transformatory suche) w elektrowniach i elektrociepłowniach, stacjach elektroenergetycznych sieci rozdzielczej oraz w wielu zakładach przemysłowych w kraju i zagranicą. Znany jest ich skuteczne zadziaływanie w kilkudziesięciu przypadkach. Kilku osobom uratowały one życie. Rzeczywiste efekty wszystkich zainstalowanych zabezpieczeń są z pewnością znacząco większe. Biorąc pod uwagę uzyskiwane efekty: ochronę życia i zdrowia ludzi oraz minimalizację strat związanych z uszkodzeniami urządzeń i przerwami w dostawie energii, celowość stosowania tych zabezpieczeń jest niekwestionowana.

W polskiej energetyce zawodowej i przemysłowej każdego roku dochodzi do kilkudziesięciu awarii, którym towarzyszą wysoko energetyczne zwarcia łukowe. Są to zwarcia pojawiające się zazwyczaj w rozdzielniach średniego napięcia, gdzie prąd zwarciovych wynosi od kilku do kilkudziesięciu kA. Wiele przypadków zwarć łukowych nie jest podawanych do wiadomości, a część z nich jest ukrywana. Należy podkreślić, że przypadki zwarć łukowych miały miejsce w zdecydowanej większości obiektów energetyki zawodowej i przemysłowej w Polsce i że są to zjawiska niezwykle niebezpieczne. Co roku występuje kilkadziesiąt takich wypadków i niestety kilka kończy się śmiercią.

Literatura

- [1] The Institute of Electrical and Electronics Engineers Inc., IEEE Standard 1584™-2002 – *Guide for Performing Arc-Flash Hazard Calculations*, ISBN: 0-7381-3352-3.
- [2] National Fire Protection Association, NFPA 70E® -2015 – *Standard for Electrical Safety in the Workplace*, ISBN: 978-145590926-1.
- [3] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN 60909-0 – *Prądy zwarciovych w sieciach trójfazowych prądu przemiennego – Część 0: Obliczanie prądów*, ISBN: 83-236-8657-2.

- [4] *Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dn. 28 marca 2013 w sprawie bezpieczeństwa i higieny pracy przy urządzeniach energetycznych*, Dz.U. 2013 nr 0 poz. 492 2013.10.24.
- [5] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN 61482-1-1:2009 - wersja angielska: *Prace pod napięciem - Odzież ochronna przed zagrożeniami termicznymi spowodowanymi łukiem elektrycznym - Część 1-1: Metody badań - Metoda 1 - Określanie parametrów łuku (ATPV i EBT50) dla materiałów trudnopalnych na ubrania*.
- [6] Polski Komitet Normalizacyjny, PN-EN 61482-1-2:2015-04: *Prace pod napięciem -- Odzież ochronna przed zagrożeniami termicznymi spowodowanymi łukiem elektrycznym -- Część 1-2: Metody badań - - Metoda 2: Określanie klasy ochrony przed łukiem elektrycznym materiałów i odzieży przy zastosowaniu wymuszonego i ukierunkowanego łuku elektrycznego (komora probiercza)*.