

## Analiza łuku elektrycznego awaryjnego i sposoby ograniczania jego skutków

*Energia cieplna, która jest wydzielana w łuku elektrycznym awaryjnym wewnątrz rozdzielnic, może być przyczyną licznych uszkodzeń znajdującej się tam aparatury. Stanowi również zagrożenie cieplne dla otoczenia – miejsc zlokalizowanych nawet w znacznej odległości od punktu zwarcia. Jest źródłem erozji elektrod oraz perforacji osłon rozdzielnic, umożliwiając tym samym emisję do otoczenia toksycznych związków chemicznych i par metali. Stwarza zagrożenia mechaniczne dotyczące możliwości rozerwania ścianek rozdzielnic. Jest także źródłem fal akustycznych, proporcjonalnych do pochodnej mocy łuku. Aby skutecznie zabezpieczyć urządzenia elektryczne znajdujące się wewnątrz rozdzielnic (osłony), otaczające środowisko oraz personel przed skutkami łuku awaryjnego, należy stosować zespolony system ochrony. Przedmiotem artykułu są zagadnienia łuku elektrycznego awaryjnego, skutki jego działania na otoczenie oraz wybrane sposoby ich ograniczania w rozdzielnicach osłoniętych średniego napięcia o izolacji powietrznej.*

### 1. WPROWADZENIE

---

Łukiem awaryjnym (zakłóceniovym) nazywamy niezamierzone wyładowanie energii elektrycznej w urządzeniach rozdzielczych, powstałe na przykład w wyniku:

- przebicia izolacji urządzenia elektrycznego z powodu wystąpienia w obwodzie przepięć atmosferycznych, łączeniowych [2, 9, 12],
- starzenia się izolacji lub istniejących wad ukrytych, uszkodzenia zestyków [10],
- błędnej czynności łączeniowej oraz niewłaściwej konserwacji i obsługi [4, 13],
- obecności gryzoni w obszarze toru prądowego itd.

Zwarcie łukowe awaryjne jest zdarzeniem rzadkim i niepowtarzalnym. Mimo stosowania w rozdzielnicach różnych systemów monitorujących, które mają na celu zwiększenie niezawodności zasilania odbiorców i poprawę bezpieczeństwa użytkowanych rozdzielnic, zwarcie takie może wystąpić tam z różnym prawdopodobieństwem [7, 8, 14, 17].

Znaczna ilość energii cieplnej, która jest wydzielana w łuku elektrycznym wewnątrz rozdzielnic, może być przyczyną licznych uszkodzeń zlokalizowanej tam

aparatury. Stanowi również zagrożenie cieplne dla otoczenia – miejsc znajdujących się nawet w znacznej odległości od punktu zwarcia. Zjawisko przemieszczania się łuku wzdłuż szyn rozdzielnic wynika z oddziaływania na niego sił elektromagnetycznych, przy czym prędkość przemieszczania się łuku (rzędu kilkudziesięciu m/s) zależy od prądu łuku i odległości między szynami. Napięcie łuku przemieszczającego się (ruchomego) jest jednak mniejsze od napięcia łuku stacjonarnego, stąd moc i energia zwarcia łukowego przemieszczającego się będą odpowiednio mniejsze [16].

Negatywnym skutkiem niekontrolowanego wyładowania łukowego może być także perforacja osłony rozdzielnic, a nawet jej rozerwanie (uszkodzenie drzwi, przegród) w wyniku wzrostu ciśnienia w jej wnętrzu. Wewnętrzny łuk awaryjny może być również przyczyną emisji toksycznych związków chemicznych i par metali na skutek bezpośredniego oddziaływania łuku na elementy izolacyjne urządzeń, w tym kabli. Część mocy kolumny łuku jest rozpraszana do otoczenia w postaci promieniowania elektromagnetycznego, stanowiącego w przypadku łuku otwartego zagrożenie dla ludzi, oraz może być przyczyną zakłóceń w telekomunikacji. Ogólnie rzecz biorąc, negatywnym skutkiem działania łuku awaryj-

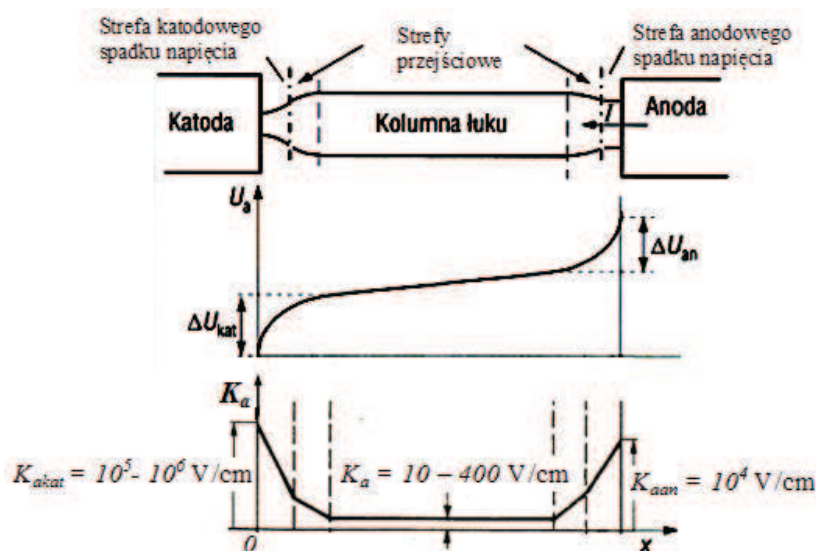
nego mogą być przerwy w zasilaniu energią elektryczną odbiorników, straty materialne oraz ciężkie obrażenia ciała aż do utraty życia.

Przedmiotem artykułu są zagadnienia łuku elektrycznego awaryjnego, skutki jego działania na otoczenie oraz wybrane sposoby ich ograniczania w rozdzielnicach osłoniętych średniego napięcia o izolacji powietrznej. Ograniczenie skutków zwarcia awaryjnego i jego niekorzystnego oddziaływania na otaczające środowisko przez zapewnienie urządzeniom elektrycznym „łukoodporności” jest zagadnieniem szczególnie aktualnym i ważnym [3, 5, 6, 7, 16].

## 2. ŁUK AWARYJNY SWOBODNY W ROZDZIELNICACH OSŁONIĘTYCH

W rozdzielnicach osłoniętych o izolacji powietrznej oraz w obszarze osprzętu kablowego SN

mamy do czynienia z łukiem swobodnym. Wyładowanie łukowe jest jednym z rodzajów samoistnych wyładowań elektrycznych w gazach w wyniku ich zjonizowania [1, 3, 9, 16]. Do przyczyn prowadzących do zjonizowania gazu można zaliczyć: jonizację zderzeniową (występującą pod wpływem pola elektrycznego), jonizację cieplną (zachodzącą pod wpływem bardzo wysokiej temperatury) oraz jonizację powierzchniową (związaną z podgrzaniem materiału elektrod). Łukiem elektrycznym nazywamy kolumnę łukową nagranych do wysokiej temperatury i zjonizowanych gazów, przez którą przepływa prąd  $I$  wskutek ruchu jonów i elektronów pod wpływem pola elektrycznego. Przykładowy schemat budowy łuku elektrycznego prądu stałego, rozkład potencjału między elektrodami oraz gradientu napięcia łuku (natężenia pola elektrycznego) w przestrzeni międzyelektrodowej przedstawiono na rys. 1.



Rys. 1. Przykładowy schemat łuku swobodnego w powietrzu i przebiegi podstawowych wielkości wzdłuż kolumny łukowej:  $U_a$ ,  $K_a$  – napięcie i gradient napięcia łuku [16]

W łuku elektrycznym płonącym między elektrodami katodą i anodą możemy wydzielić stopę katodową składającą się ze strefy katodowego spadku napięcia oraz strefy przejściowej, kolumnę łukową oraz stopę anodową utworzoną ze stref anodowej oraz przejściowej. Strefa katodowego spadku napięcia  $\Delta U_{kat}$  o grubości około  $10^{-6}$  m jest wypełniona jonami dodatnimi, których koncentracja powoduje spadek napięcia wynoszący średnio 5-20 V oraz gradient napięcia łuku rzędu  $10^5-10^6$  V/cm.

Kolejną strefą łączącą się z kolumną łukową jest strefa przejściowa, w której średnica łuku wzrasta do średnicy kolumny łukowej (rzędu kilku mm). Kolumna łukowa zajmuje największą część łuku i od-

znacza się równomierną koncentracją jonów dodatnich i elektronów. Objawia się to stałym gradientem napięcia łuku wynoszącym około 10-400 V/cm, przy czym wartość ta zależy od intensywności chłodzenia łuku. Dolne wartości gradientu napięcia łuku dotyczą łuku awaryjnego swobodnego, praktycznie o pomijalnym chłodzeniu. We wnętrzu kolumny łuku i w pobliżu jego powierzchni temperatura wynosi ok. 6000-1000 K, natomiast temperatura gazu w pewnej odległości od rdzenia łuku, wewnątrz osłony, jest znacznie niższa i wynosi ok. 2000 K.

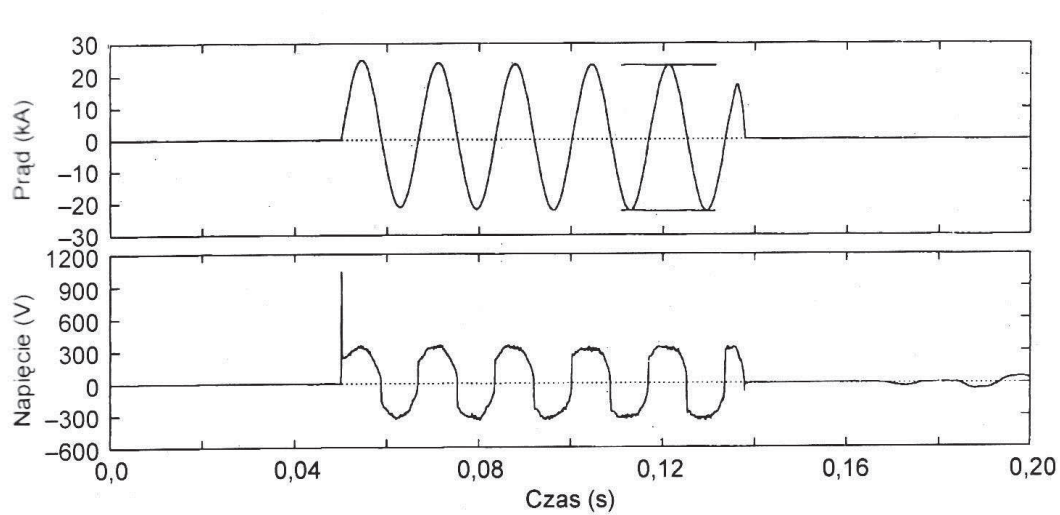
Przestrzeń przy anodzie zajmuje strefa anodowego spadku napięcia  $\Delta U_{an}$ , wynoszącego ok. 1-10 V. Strefa ta jest wypełniona głównie elektronami i jest

poprzedzona strefą przejściową, w której następuje zmniejszanie się średnicy łuku. Pomimo mniejszego gradientu łuku ruchliwość elektronów powoduje, że anoda nagrzewa się do wyższej temperatury niż katoda (dla anody miedzianej temperatura ta wynosi ok. 2500 K).

W przypadku łuku prądu przemiennego obraz zjawisk praktycznie nie ulega zmianie – z tym tylko, że dla prądu o częstotliwości na przykład 50 Hz elektrony zmieniają swoją biegunowość 100 razy na sekundę. Ponadto w czasie palenia się łuku temperatura

kolumny i jej średnica będą się zmieniały wraz ze zmianą chwilowej wartości prądu, przy czym występuje w tym przypadku kilkunastostopniowe przesunięcie maksimum temperatury łuku w stosunku do maksimum natężenia prądu elektrycznego.

Całkowite napięcie łuku awaryjnego jest sumą spadków napięcia przede wszystkim w strefach przyelektrodowych oraz na kolumnie łukowej. Charakterystyczne przebiegi prądu i napięcia łuku swobodnego  $SN$ , podane w publikacjach [7, 8], przedstawiono przykładowo na rys. 2.



Rys. 2. Prąd i napięcie łuku swobodnego  $SN$  o średniej długości ok. 65 mm [7]

Dla tego rodzaju przebiegów, w których napięcie łuku swobodnego jest zbliżone do prostokątnej fali w „fazie” z przebiegiem prądu, przyjmuje się z pewnym uproszczeniem, że gradient napięcia łuku  $K_a$  jest praktycznie niezależny od prądu chwilowego [7]. I tak dla łuku o długości kilkudziesięciu centymetrów i prądów do ok. 5 kA wartość gradientu  $K_a$  wynosi ok. 15 V/cm, zaś przy prądzie 20 kA osiąga wartość ok. 20 V/cm.

W obliczeniach dokładniejszych wartości napięcia łuku awaryjnego  $SN$ , a więc i gradientu napięcia  $K_a$ , uwzględnia się wpływ zarówno odległości między elektrodami (szynami), jak i wartości prądu zwarcioowego. Wpływ prądu na napięcie łuku jest znaczny, zwłaszcza w przypadku łuku stacjonarnego, gdzie wzrost napięcia jest związany ze znacznym wydłużeniem palącego się łuku w wyniku silnego oddziaływania elektrodynamicznego na niego. Asymetria prądu zwarcioowego nie powoduje natomiast istotnych zmian napięcia łuku.

Wartość napięcia pojedynczego łuku swobodnego w powietrzu, określana jako spadek napięcia na pojedynczym łuku, mającego kształt fali dwustronnych impulsów prostokątnych o amplitudzie równej wartości zastępczej  $U_{av}$  można w przybliżeniu wyznaczyć

z zależności empirycznych [7, 17]. Przykładowo dla łuku o długości  $d_a$  od 12,5 do 100 mm (a nawet do 300 mm) oraz wartości skutecznej prądu łuku  $I_a$  od 1 do 30 kA wartość zastępczą (wirtualną) napięcia łuku  $U_{av}$  w voltach można obliczyć ze wzoru [7]:

$$U_{av(V)} = 35 + 1,6d_{a(mm)} + 6,6I_{a(kA)} \quad (1)$$

W obliczeniach praktycznych przyjmuje się, że długość łuku  $d_a$  palącego się w urządzeniach  $SN$  jest równa 15 mm/kV, natomiast zniekształcenia przebiegu prądu są pomijalne. W przypadku urządzeń  $nm$  zakłada się, że długość palącego się łuku jest równa w przybliżeniu odstępowi elektrod (szyn). Rozpatrując zwarcia trójfazowe z ziemią (możliwa obecność jednoczesna kilku łuków), obliczoną ze wzoru (1), wartość zastępczą łuku  $U_{av}$  należy zmniejszyć o ok. 10% ze względu na gorsze chłodzenie takiego łuku w stosunku do zwarcia jednofazowego.

Analiza eksperymentalna trójfazowych zwarć łukowych w rozdzielnicach wskazuje, że zwarcia awaryjne trójfazowe rozpoczynają się zwykle od zwarć jednofazowych doziemnych lub dwufazowych [7, 17]. Powstawaniu zwarć trójfazowych sprzyjają

uziemięte elementy konstrukcji lub tory prądowe zasilane z innych faz znajdujące się w obszarze działania łuku. Łuk awaryjny pod wpływem sił elektromagnetycznych (także sił unoszenia) przemieszcza się wzdłuż torów prądowych (np. szyn zbiorczych, przyłączy aparatów elektrycznych) do ich krańców lub zostaje zatrzymany przez zabudowane w rozdzielnicach przegrody izolacyjne. Siły elektromagnetyczne działające na poszczególne łuki są zmienne z podwójną częstotliwością sieci i są skierowane od źródła, natomiast szybkość przemieszczania się łuku zależy od wartości prądu łuku i konfiguracji torów prądowych.

### 3. OCENA ZAGROŻEŃ SPOWODOWANYCH ŁUKIEM AWARYJNYM

Energia cieplna wydzielana w awaryjnym łuku elektrycznym może powodować znaczne uszkodzenia urządzeń znajdujących się wewnątrz i na zewnątrz rozdzielnic, a także stanowić zagrożenie dla otoczenia [9]. Szczególnie niebezpieczny rodzaj erozji występuje w przypadku łuku nieruchomego palącego się między elementem toru prądowego a ścianką osłony z blachy stalowej, która może ulec perforacji. Z kolei perforacja osłony rozdzielnic umożliwia emisję do otoczenia toksycznych związków chemicznych i par metali, powstałych w wyniku bezpośredniego oddziaływania łuku na aparaturę, konstrukcje oraz elementy izolacyjne. Zagrożenia mechaniczne dotyczą możliwości rozerwania ścianek osłony oraz innych elementów metalowych rozdzielnic (drzwi, przegrody itp.). Wiąże się one z gwałtownym narastaniem ciśnienia wewnątrz rozdzielnic, proporcjonalnego do energii pobieranej przez łuk z sieci. Palący się łuk awaryjny jest także źródłem fal akustycznych, proporcjonalnych do pochodnej z mocy łuku, których poziom uderzeń dźwiękowych może stwarzać zagrożenie dla słuchu.

Skutki palącego się łuku zależne są od wartości prądu i czasu trwania zwarcia, a także od szybkości przemieszczającego się łuku. Przyjmuje się wg [6], że jeśli energia łuku nie przekracza 100 kJ, to szkody wyrządzone w rozdzielnicach są pomijalnie małe. Stąd jednym z istotnych sposobów ograniczania skutków zwarć awaryjnych jest skracanie czasu trwania zwarć znacznie poniżej 100 ms.

Oszacowanie podstawowych parametrów energetycznych łuku awaryjnego umożliwia ocenę stopnia uprzednio wymienionych zagrożeń w czasie  $t$  trwania zwarcia. Określenie ich w wybranym dowolnie przedziale czasu palenia się łuku (od granicy dolnej  $t_d$  do granicy górnej  $t_g$ ) obejmuje obliczenie wartości sku-

tecznej prądu łuku  $I_a$ , prądu łuku średniego wyprostowanego  $I_{ar}$ , przebiegu prądu łuku w stanie przejściowym  $i_a$ , mocy średniej łuku  $P_{a,t_g-t_d}$  oraz energii elektrycznej  $W_{a,t_g-t_d}$  pobranej przez pojedynczy łuk z sieci. Obliczeń tych dokonuje się przy użyciu wzorów [7]:

$$P_{a,t_g-t_d} = \frac{U_{av}}{t_g - t_d} \int_{t_d}^{t_g} |i_a| dt = U_{av} I_{ar,t_g-t_d} \quad (2)$$

$$W_{a,t_g-t_d} = U_{av} \int_{t_d}^{t_g} |i_a| dt = U_{av} Q_{a,t_g-t_d} \quad (3)$$

gdzie:

$Q_{a,t_g-t_d}$  – ładunek przepływający przez łuk,

$I_{ar,t_g-t_d} = \frac{Q_{a,t_g-t_d}}{t_g - t_d}$  – prąd łuku średni półokresowy.

Wartość skuteczną prądu łuku  $I_a$  w stanie ustalonym (przy pominięciu odkształceń przebiegu prądu) można wyznaczyć z zależności:

$$I_a = I_k^n \left\{ - \left[ \frac{0,9\sqrt{3}U_{av}}{cU_{sn}} \right] \cos \varphi_z + \sqrt{1 - \left[ \frac{0,9\sqrt{3}U_{av}}{cU_{sn}} \right]^2 (1 - \cos^2 \varphi_z)} \right\} \quad (5)$$

gdzie:

$I_k^n$  – wartość początkowej składowej okresowej prądu zwarcia [A],

$U_{sn}$  – napięcie znamionowe (międzyprzewodowe) sieci [V],

$c$  – współczynnik napięciowy, dla SN:  $c = 1,0 - 1,1$ ,

$\varphi_z$  – argument impedancji obwodu zwarcia.

Przybliżony przebieg prądu łuku w stanie przejściowym (przy pominięciu niewielkiego wpływu składowej nieokresowej) można przedstawić w postaci:

$$i_a = \sqrt{2} I_a [\sin(\omega t + \alpha - \varphi_a) + \exp(-t/\tau_a) \sin(\alpha - \varphi_a)] \quad (6)$$

gdzie:

$\varphi_a$  – argument impedancji

$$\varphi_a = \arccos \left[ \frac{I_a}{I_k^n} \cos \varphi_z + \frac{0,9\sqrt{3}U_{av}}{cU_{sn}} \right] \quad (7)$$

$\tau_a$  – stała czasowa zwarcia łukowego

$$\tau_a = \frac{t_g \varphi_a}{\omega} \quad (8)$$

W obwodach *SN* współczynnik mocy zwarcia łukowego jest na ogół większy od 0,15. Dla czasów trwania zwarcia rzędu kilkudziesięciu ms można już praktycznie pominąć wpływ asymetrii prądów płynących w trzech fazach i przyjmując, że prądy te zawierają wyłącznie sinusoidalną składową okresową. Średnią moc oraz funkcję energii elektrycznej pobranej z sieci przez trójfazowy łuk w czasie trwania zwarcia  $t$  można wówczas przedstawić odpowiednimi wzorami [7]:

$$P_{a,3f} = 2,7U_{av}I_a \quad (9)$$

$$W_{a,3f} = 2,7U_{av}I_a \cdot t \quad (10)$$

Ogólnie rzecz biorąc, energia elektryczna pobierana z sieci przez łuk awaryjny służy do podtrzymania jego wysokiej temperatury oraz bieżącego pokrywania strat łuku związanych z przekazywaniem ciepła przez przewodnictwo i konwekcję do otoczenia. Z punktu widzenia oceny negatywnych skutków palącego się łuku awaryjnego w rozdzielnicy szczególnie istotna jest jednak wielkość energii cieplnej wydzielanej w łuku. Jest ona bowiem źródłem wielu zagrożeń.

Erozja elektrod będąca efektem oddziaływania łuku na elektrody jest zależna przede wszystkim od ładunku przepływającego przez łuk oraz od czasu palącego się łuku nad danym obszarem elektrody [1]. Łuk awaryjny w urządzeniach o izolacji powietrznej może przemieszczać się przede wszystkim pod wpływem sił elektromagnetycznych wzdłuż elementów toru prądowego. Przed jego zgaszeniem zostaje na ogół jednak zatrzymany przez przeszkodę w postaci np. przegrody izolacyjnej lub pali się nieruchomo na krańcach toru prądowego. W przypadku łuku ruchomego, z uwagi na stosunkowo krótki jego czas oddziaływania na dany obszar elektrody, mamy do czynienia na ogół ze śladową erozją. Wynika to stąd, że energia cieplna dostarczona do stopy łuku i następnie do elektrody w takich warunkach może okazać się niewystarczająca do spowodowania erozji elektrod. Natomiast z punktu widzenia wielkości erozji elektrod przypadek łuku nieruchomego jest najbardziej niekorzystnym jego stanem. Powierzchnia elektrody pod plamką i w jej otoczeniu ulega wówczas gwałtownemu podgrzewaniu, tworząc warstwę roztopionego metalu, który następnie odparowuje. Jeśli jedną z elektrod jest blacha stalowa osłony rozdzielnicy, to w trakcie palenia się łuku nieruchomego może ona ulec perforacji w wyniku postępującej erozji.

W przypadku zwarcia łukowego jednofazowego czas do perforacji  $t_{per}$  (w sekundach) takiej elektrody może być określony z zależność [7]:

$$t_{per} = \frac{6d_{sr}h}{\delta_{v,pp}I_{ar,tper}} \quad (11)$$

gdzie:

- $I_{ar,tper}$  – prąd łuku średni wyprostowany uśredniony w przedziale od 0 do  $t_{per}$  [A],
- $h$  – grubość blachy stalowej [mm],
- $d_{sr}$  – średni odstęp międzyelektrodowy (dla urządzeń *SN* można przyjmować początkowy odstęp międzyelektrodowy) [mm],
- $\delta_{v,pp}$  – współczynnik erozji objętościowej blach stalowych przed perforacją (wartość średnia – 538 mm<sup>3</sup>/kC).

Perforacja osłony w rozdzielnicach *SN* ma miejsce najczęściej w sytuacji, gdy zwarcie łukowe jednofazowe zapoczątkowane w obszarze pomiędzy układem torów prądowych oraz elektrodą płaską (np. uziemioną blachą stalową osłony), rozwinie się w ustabilizowany łuk trójfazowy. Z uwagi jednak na to, że stopa takiego łuku przemieszcza się zwykle po większej powierzchni elektrody płaskiej niż stopa łuku jednofazowego, perforacja blachy następuje nieco później niż w przypadku łuku jednofazowego o tym samym natężeniu. Zatem dla przypadku zwarcia trójfazowego z ziemią i uwzględnieniu w obliczeniach wartości średniej współczynnika erozji blachy stalowej  $\delta_{v,pp}$ , czas do perforacji  $t_{per}$  blachy można wyznaczyć z zależności [7]:

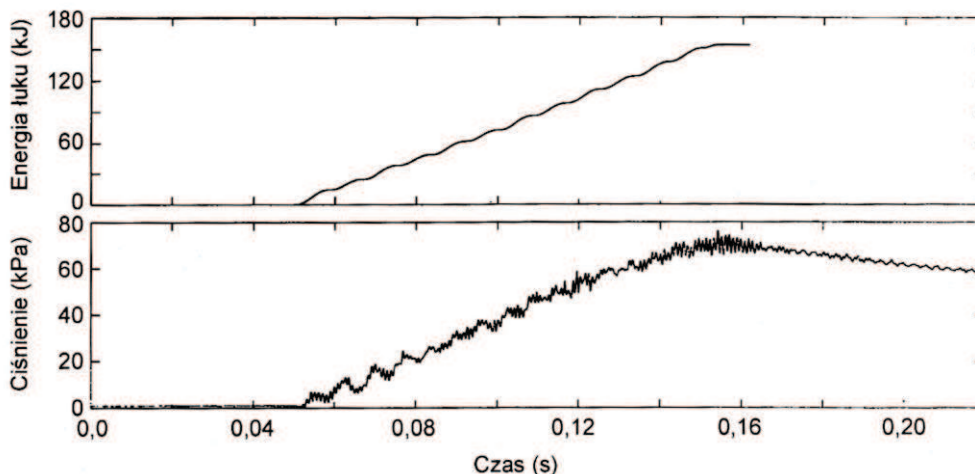
$$t_{per} = 14 \cdot 10^{-3} \frac{d_{sr}h}{I_{ar,3f,tper}} \quad (12)$$

gdzie:

- $I_{ar,3f,tper}$  – prąd łuku średniego wyprostowanego, średniego dla zwarcia trójfazowego [kA].

Perforacja osłony stanowi ponadto poważne zagrożenie dla środowiska, gdyż umożliwia wydostanie się do otoczenia produktów pierwotnych i wtórnych łuku awaryjnego w postaci par metali pochodzących z erozji elektrod, gorących i toksycznych gazów, dymów itp. Stężenie tych produktów i czas ich ekspozycji może stanowić zagrożenie dla zdrowia i życia, jeśli zostaną przekroczone ich wartości dopuszczalne [7]. Stąd w opracowaniach konstrukcyjnych osłon rozdzielnic należy dążyć do wydłużenia czasu do perforacji  $t_{per}$  blach, np. przez stosowanie podwójnych ich ścianek.

Przyrost ciśnienia wewnątrz rozdzielnicy jest przede wszystkim funkcją energii  $W_a(t)$  pobieranej z sieci przez łuk i przetwarzanej na ciepło (rys. 3). Ponadto dodatkowe ilości ciepła mogą pochodzić z reakcji egzotermicznych produktów łuku z otaczającym go



Rys. 3. Przykładowe przebiegi energii łuku i przyrosty ciśnienia dla elektrod miedzianych [7]

tlenem z powietrza. Obecność aparatury i wyposażenia w przedziałach wpływa natomiast na pewne obniżenie temperatury i ciśnienia wewnątrz osłon przedziałów rozdzielnic. W dalszej części artykułu przedstawiono ocenę wpływu zwarć łukowych na przyrost ciśnienia w osłonach szczelnych i izolowanych, które posiadają nieszczelności w postaci wąskich szczelin (np. pomiędzy drzwiami), natomiast nie są wyposażone w klapy bezpieczeństwa lub membrany unoszące się bądź rozrywające w przypadku gwałtownego wzrostu ciśnienia wewnątrz przedziałów rozdzielnic, jeśli łuk pali się daleko od osłony.

Przebieg przyrostów ciśnienia  $p^*(t)$  w szczelnej, cieplnie izolowanej osłonie, w której pali się łuk swobodny i cała jego energia  $W_a(t)$  przekazywana jest równomiernie do otaczającego powietrza w postaci ciepła, możliwy jest do obliczenia ze wzoru [7]:

$$p^*(t) = k_t \frac{\kappa - 1}{V_g} W_a(t) \quad (13)$$

gdzie:

$k_t$  – współczynnik przekazywania ciepła; przykładowe wartości współczynnika w warunkach łuku swobodnego, wyznaczone dla elektrod: Cu–Cu = 0,48, Al–Al = 0,63, Fe–Fe = 0,36,

$V_g$  – objętość szczelnej i izolowanej osłony (objętość gazu netto wewnątrz osłony),

$\kappa$  – wykładnik adiabaty.

Jako górną granicę nadciśnienia dla osłon stosowanych w praktyce przyjmuje się wartość ciśnienia eksplozji  $p_{eks}^* = 30 \cdot 10^3$  Pa. Tematyka wpływu energii łuku swobodnego na przyrosty temperatury i ciśnienia w osłonach zarówno szczelnych, cieplnie izolo-

wanych, jak i wentylowanych rozdzielnic, a także obliczenia wytrzymałości mechanicznej elementów rozdzielnic, dokonane w oparciu o przeprowadzone badania eksperymentalne i symulacyjne, są przedstawione w publikacjach [7, 17].

#### 4. OGRANICZANIE SKUTKÓW DZIAŁANIA ŁUKU AWARYJNEGO

Aby skutecznie zabezpieczyć urządzenia elektryczne znajdujące się wewnątrz rozdzielnic (osłony), a także otaczające go środowisko oraz pracowników przed skutkami łuku awaryjnego, należy stosować zespolony system ochrony. System ten powinien zapewnić ochronę bezpośrednią i pośrednią.

Ochrona bezpośrednia jest w praktyce realizowana przez umieszczanie urządzeń elektrycznych w osłonach (rozdzielnicach) szczelnych i cieplnie izolowanych. Aby zabezpieczyć osłony przed ich ewentualną perforacją lub rozerwaniem się, stosowane są dodatkowe środki, takie jak: podwójny system ścianek osłony, wzmocnienia wytrzymałości mechanicznej drzwi, klapy i membrany bezpieczeństwa oraz szyby pancerne. Ponadto w miejscach, gdzie łuk ma tendencje do zatrzymywania się, montowane są wewnątrz w osłonach stalowe elementy wydatne w celu stworzenia punktu zaczepienia dla palącego się łuku, co ma ograniczać ewentualną perforację blach osłony.

Celem ochrony pośredniej (wspomagającej) jest ograniczanie energii trójfazowych zwarć łukowych do poziomu, przy którym nie wystąpią istotne szkody w osłonie (rozdzielnic). Wśród wielu sposobów minimalizacji skutków termicznych i elektrodynamicznych zwarć awaryjnych [3, 6, 11, 12] należy wymienić kilka najistotniejszych.

- 1) Ograniczanie wartości prądu spodziewanego, W sieciach  $SN$  sposób ten jest realizowany zwykle przez stosowanie transformatorów o wysokiej wartości napięcia zwarcia lub dodatkowo instalowanie dławików przeciwzwarciowych. Wadami takiego rozwiązania są jednak wyższe koszty urządzeń, zwiększone straty energii i pogorszenie jej jakości.
- 2) Skracanie czasu łukowego przez szybko działające wyłączniki lub bezpieczniki ograniczające prąd. Ograniczeniami w szerszym stosowaniu takiego rozwiązania w układach  $SN$  są stosunkowo niewielkie prądy znamionowe bezpieczników (nieprzekraczające 200 A) oraz ich dolna zdolność wyłączania.
- 3) Kriogeniczne ograniczniki prądu. Zaletą takiego rozwiązania jest to, że impedancja ogranicznika w stanie normalnego przewodzenia jest bliska zerowej wartości, zaś w stanie przeciążenia lub zwarcia łukowego impedancja dynamicznie wzrasta i prąd w obwodzie jest ograniczany do wartości prądu znamionowego. Prąd ten z kolei musi być wyłączany przez inny dodatkowy wyłącznik. Wadą takiego zestawu ograniczającego jest jego cena.
- 4) Zwieranie łuku awaryjnego, które polega na zbocznikowaniu (metalicznym połączeniu) miejsca zwarcia od strony źródła zasilania przez łącznik szybki. W wyniku takiej operacji łączeniowej łuk awaryjny gaśnie w bardzo krótkim czasie, zaś prąd zwarciaowy płynący przez utworzone połączenie metaliczne jest wyłączany przez wyłącznik zasilający dany obwód. Mechanizm wyzwalający i napędowy takiego łącznika szybkiego jest pobudzany przez układ elektroniczny, który reaguje na chwilową wartość prądu lub na jego pochodną. Czasy własne łączników szybkich (np. załączników zwarciaowych) średniego napięcia na ogół nie przekraczają kilkunastu ms [10]. Aby uniknąć przypadkowego załączenia łącznika szybkiego, mechanizm łącznika jest dodatkowo sterowany przez czujniki wrażliwe na promieniowanie łuku a nieczułe na światło naturalne lub sztuczne [3, 4, 14]. Układy tego rodzaju mimo ponoszonych dodatkowych kosztów związanych z ich instalowaniem są stosowane w praktyce.

## 5. PODSUMOWANIE

Energia cieplna wydzielana w awaryjnym łuku elektrycznym może powodować znaczne uszkodzenia urządzeń znajdujących się zarówno wewnątrz, jak i na zewnątrz rozdzielnic, a także stanowić zagrożenie dla otoczenia.

Wielkość energii cieplnej wydzielanej w palącym się łuku awaryjnym decyduje o negatywnych skutkach i skali zagrożeń związanych z oddziaływaniem łuku na środowisko.

Aby skutecznie zabezpieczyć urządzenia elektryczne znajdujące się wewnątrz rozdzielnic (osłony), a także otaczające go środowisko oraz pracowników przed skutkami łuku awaryjnego, należy stosować zespolony system ochrony, oparty na ochronie bezpośredniej i pośredniej.

Aby uniknąć poważnych zniszczeń rozdzielnic oraz ograniczyć zagrożenie dla ludzi i środowiska, czas trwania zwarcia łukowego powinien być ograniczony do wartości znacznie poniżej 100 ms.

### Literatura

1. Borkowski P.: *Erozja łukowa styków łączników elektrycznych*. WPI, Łódź 2013.
2. Ciok Z.: *Procesy łączeniowe w układach elektroenergetycznych*. WNT, Warszawa 1983.
3. Gmitrzak A., Poniecki W., Sibilski H.: *Odporność rozdzielnic średniego napięcia na działanie łuku wewnętrznego*. Wiadomości Elektrotechniczne 2000, nr 6.
4. Kaźmierczak M.: *Zwarcia łukowe – doświadczenia eksploatacyjne w polskiej energetyce zawodowej i przemysłowej*. Elektroenergetyka 2011, nr 2(8).
5. Klajn A.: *Nowe możliwości ochrony rozdzielnic okapturzonych przed łukiem zakłóceniovym*. Materiały IV Konferencji Naukowo-Technicznej pt. „Sieci Elektroenergetyczne w Przemysle i Energetyce SIECI 2000”, Wrocław 2000, s. 169-174.
6. Klaus A., Schau H.: *An approach for calculating the active Power of arcing faults in MV busbar systems, based on power arc tests*. Materiały 9. Int. Symposium on “Short-Circuit Currents in Power Systems”, Cracow, TUL, Lodz 2000, s. 303-310.
7. Koch B., Maksymiuk J.: *Łukoodporność rozdzielnic osłoniętych i symulacja zwarć łukowych*. OWPW, Warszawa 2007.
8. Koch B.: *Zwarcia łukowe*. Elektroinstalator 2002, nr 3, 5 i 6.
9. Królikowski C.: *Inżynieria łączenia obwodów elektrycznych wielkiej mocy*. WPP, Poznań 1998.
10. Kulas S.: *Tory prądowe i układy zestykowe*. Seria Wydawnicza: Postępy Techniki Wysokich Napięć, t. 29, Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2008.
11. Kulas S., Kolimas Ł.: *Analiza natężenia pola elektrycznego w wieloprądowych układach stykowych na przykładzie uziemnika szybkiego*. Przegląd Elektrotechniczny 2008, nr 7, s. 178-181.
12. Maksymiuk J.: *Aparaty elektryczne*. WNT, Warszawa 1997.
13. Markiewicz H.: *Urządzenia elektroenergetyczne*. WNT, Warszawa 2008.
14. Maziarz S., Szynol J.: *Badanie warunków eliminacji zagrożenia stworzonego przez zwarcia łukowe wewnątrz rozdzielnic i stacji transformatorowych*. Przegląd Elektrotechniczny 2001, nr 3.
15. Miedzinski B., Wisniewski G., Kharin S.N., Nouri H.: *Possibility of Control of Transition of Switching Arc DC into Glowing*. Proc. of the Pakistan Academy of Science, 2012, no. 49(30), pp.173-180.
16. Partyka R.: *Badanie skutków zwarć łukowych w rozdzielnicach osłoniętych*. WPG, Gdańsk 2006.
17. Wactor M., Olsen T., Ball C.: *Strategies for mitigating the effects of internal arcing faults in medium-voltage metal-enclosed switchgear*. Transmission and Distribution Conference and Exploitation 2001 IEEE/PES, vol. 1, pp. 323-328.

Artykuł został zrecenzowany przez dwóch niezależnych recenzentów.