

Michał Kaźmierczak

Energotest sp. z o.o.

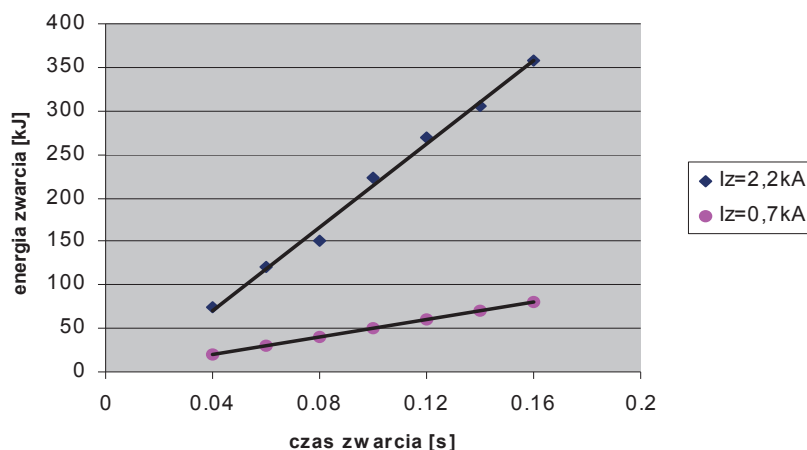
Zwarcia łukowe – doświadczenia eksploatacyjne w polskiej energetyce zawodowej i przemysłowej.

Wstęp – zwarcia łukowe ciągłe obecne i niebezpieczne

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 zwarciový wynosi od kilku do kilkudziesięciu kA. Wg danych Zakładu Bezpieczeństwa Pracy Instytutu Energetyki średnia częstość wypadków spowodowanych prądem z udziałem łuku elektrycznego zawiera się w zakresie 0,35 ... 0,45 wypadków na 1000 zatrudnionych. Należy pamiętać, że przytaczane statystyki dotyczą wyłącznie tej części wydarzeń, w których poszkodowani zostali ludzie. Wiele innych przypadków 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.

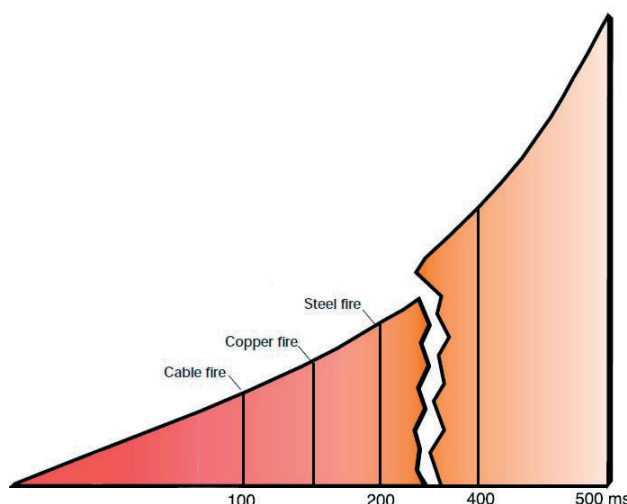
Wpływ czasu trwania na niszczącą energię zwarcia.

Dobrze znane i opisane są najważniejsze przyczyny powstawania zwarć łukowych – starzenie się materiałów, złe rozwiązania konstrukcyjne, warunki środowiskowe i te najczęstsze – błędy ludzkie (60 % wszystkich wypadków). Istnieje szereg teoretycznych opracowań opisujących model zwarcia łukowego oraz zjawisk, które mu towarzyszą. Energia cieplna zwarcia jest uzależniona od dwóch zmiennych - czasu jego trwania oraz poziomu prądu zwarciový, wg wzoru $Q=I^2 \cdot t$. Możemy mieć wpływ tylko na jeden z tych czynników – czas. Skracanie czasu trwania zwarcia jest jednym sposobem na ograniczanie niekorzystnych skutków zwarć łukowych. Poniżej przedstawiono wyniki prób przeprowadzonych w warunkach stanowiskowych dla prądów zwarciový 2,2 i 0,7 kA $U=3\text{ kV}$.



Wykres 1. Energia 3-fazowego zwarcia łukowego w zależności od czasu trwania zwarcia

Na wykresie energia łuku rośnie proporcjonalnie do czasu trwania zwarcia. Współczynnik korelacji czasu trwania zwarcia i wyzwolonej energii wzrasta wraz ze wzrostem prądu zwarcia. W przypadku zwarć wysoko-energetycznych, o prądach zwarciovych na poziomie od kilku do kilkudziesięciu kA wzrost energii jest bardziej niż proporcjonalny. Na następnym wykresie szacowany jest zakres uszkodzeń dla tego typu zwarć.



Wykres 2. Zakres uszkodzeń cieplnych w zależności od czasu trwania zwarcia łukowego.

Na podstawie wykresu można stwierdzić, że pierwsze poważne skutki zwarć pojawiają się po przekroczeniu 100 ms. Każdy kolejny próg czasowy to coraz dalej idące skutki:

- 100 ms – zapalają się kable
- 150 ms – zapala się miedź
- 200 ms – zapala się stal
- 500 ms – następuje gwałtowny wzrost uwolnionej energii.

Trudno precyzyjnie przewidzieć zakres zniszczeń w przypadku realnego zwarcia łukowego w konkretnej rozdzielni. Dobrym sposobem na określenie zakresu zniszczeń jest prześledzenie większej ilości faktycznych przypadków. Jednak w literaturze niezmiennie rzadko można natrafić na tego typu opracowania. Jak było to już wspomniane, najczęściej informacje o zwarciach nie wychodzą poza bramy obiektów, w których miały miejsce. Niestety taki stan rzeczy ma niekorzystne konsekwencje z punktu widzenia poszerzania wiedzy o skutkach zwarć. Tym bardziej cieszy fakt, że na potrzeby powyższego artykułu, udało zdobyć się takie materiały z kilku różnych obiektów.

Poniżej znajdują się opisy zwarć łukowych, które miały miejsce na obiektach polskiej energetyki zawodowej i przemysłowej. Z uwagi na charakter informacji nazwy tych obiektów nie są podane. Są to obiekty takie jak: elektrociepłownie, zakłady energetyczne, zakłady chemiczne i huty. W każdym z przypadków przedstawiony jest opis wydarzenia, ze szczególnym określeniem czasu trwania zwarcia oraz uszkodzeń, które miały miejsce.

W części opisów, w celu pełniejszego przedstawienia sytuacji, pojawiają się także informacje dotyczące przyczyn powstania zwarcia lub sposobu działania automatyki zabezpieczeniowej. Te zagadnienia nie są jednak przedmiotem analizy.

Przypadki zwarć łukowych w polskiej energetyce zawodowej i przemysłowej

1. Rozdzielnia 6kV typu GIPO - zasilanie układu przechyłu konwertora w hucie.

Do zwarcia doszło w rozdzielni 6kV typu GIPO, która została wybudowana w latach 60-tych. Rozdzielnia zasila między innymi trzy układy przechyłu konwerterów (układ Leonarda), które przez pewien okres czasu były wyłączone. Jeden z konwerterów został odstawiony na dłuższy okres czasu. W momencie ponownego załączenia doszło do przebicia izolacji w polu zasilającym na przyłączy kablowym. Pojawiło się zwarcie łukowe jednofazowe, które po 100 ms przeszło w zwarcie trójfazowe. Prąd zwarciový 10kA zanikł po czasie 1,7 s. Najprawdopodobniej zadziałał wyłącznik w polu. Doszło jednak do pożaru, który trwał nawet po otwarciu wyłącznika. Po 2 minutach w polu objętym pożarem doszło do kolejnego zwarcia, tym razem po górnej stronie wyłącznika. Drugie zwarcie miało podobne parametry jak pierwsze – trwało 1,8 s. , a prąd zwarciový wynosił 10kA. Zwarcie zostało wyłączone w polu zasilającym w rozdzielni nadrzędnej. Z uwagi na trudne warunki panujące w budynku rozdzielni pożar udało się ugasić po godzinie.



Rys. 1. Prawdopodobne miejsce powstania zwarcia. Przyłącze kablowe.



Rys. 2. Odłącznik szyn, w polu w którym doszło do zwarcia.

Podsumowanie:

Czas trwania zwarcia: 1,7s i 1,8 s.

Prąd zwarciovowy: 10kA

Zniszczenia: Kompletnie zniszczone trzy pola.

Przestoje: Znaczny obszar o charakterze produkcyjnym nie był zasilony przez ponad 24 godziny.

Straty: ponad pół miliona PLN

2. Rozdzielnica okapturzona 6kV potrzeb własnych w elektrociepłowni.

Do zwarcia doszło w okapturzonej, trzysekcyjnej rozdzielnicy typu ELMOBLOK (rozdzielnica z lat 70). Najbardziej prawdopodobną przyczyną powstania pożaru było zwarcie na izolatorze przepustowym w pobliżu przyłącza szyn w jednym z pól. Początkowo było to zwarcie jednofazowe, które przerodziło się w zwarcie trójfazowe. Bezpośrednie działania prądów zwarciovowych oraz ognia wystąpiło w pięciu polach. W pozostałych polach ujawniły się skutki działania temperatury, dymu, oraz prowadzonej akcji gaszenia pożaru – pokrycie urządzeń proszkiem gaśniczym. Zwarcie zostało wyłączone na poziomie sekcji przez zabezpieczenie nadprądowe w nastawionym czasie 1,4s. Zaistniały prąd zwarciovowy osiągnął wartość 15kA.



Rys. 3. Miejsce powstania zwarcia. Przyłącze szyn.



Rys. 4 i 5. Uszkodzone pole - widok na przednią elewację.

Podsumowanie:

Czas trwania zwarcia: 1,4 s.

Prąd zwarciovowy: 15kA

Zniszczenia: Kompletnie zniszczone jedno pole. Całkowite uszkodzenia obwodów wtórnych i częściowo uszkodzona aparatura pierwotna w 2 sąsiadujących polach. Mniejsze uszkodzenia w kilku polach dalej oddalonych od miejsca zwarcia. Wszystkie pola wymagały przeprowadzenia szczegółowego czyszczenia, uszkodzona została obudowa rozdzielni.

Straty: całość strat oszacowana na poziomie ponad 300 000 PLN.

3. Rozdzielnica 6kV Zakład chemiczny

Zwarcie powstało w 6kV rozdzielnicy typu otwartego w czasie uruchamiania napędu silnikowego. W czasie rozruchu doszło do pęknięcia szyny na fazie L2. W konsekwencji nastąpił zapłon łuku zwarcia jednofazowego, które przeszło w zwarcie trójfazowe. Wyłączenie nastąpiło w czasie 2,5 sekundy.



Rys. 6. Miejsce zwarcia: przyłącze szyn

Podsumowanie

Czas trwania zwarcia: 2,5 s.

Prąd zwarciovowy: brak danych (Moc zwarciovowa na szynach 150 MVA)

Zniszczenia: Kompletnie zniszczone jedno pole,

Przestoje: 2 sekcje rozdzielni wyłączone przez 4 godziny

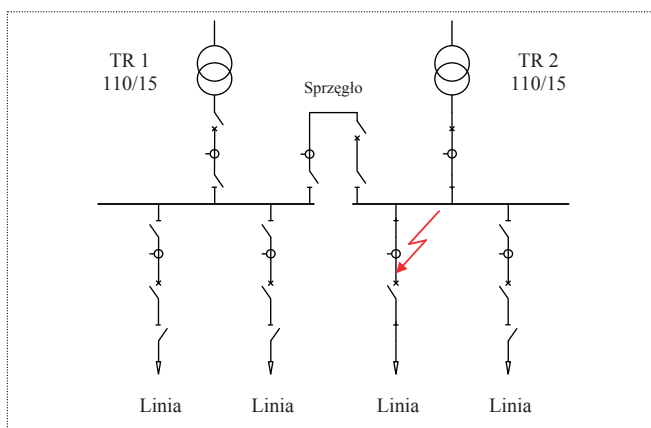
Straty: na poziomie 100 tys. PLN

4. Rozdzielnia otwarta 15 kV – zakład energetyczny.

Stacja wybudowana ponad 30 lat temu, z napowietrzną rozdzielnią 110kV w układzie H4.

W budynku mieści się 32-dwu polowa, dwusekcyjna rozdzielnia 15kV. Rozdzielnia, w której doszło do omawianego zdarzenia, posiada rzadziej stosowany układ aparatury - przekładniki prądowe w polach odpływowych znajdują się pomiędzy szynami, a wyłącznikiem. Zwarcie łukowe zostało wywołane przez gryzonie w obszarze za przekładnikami, a przed wyłącznikiem. Mogło ono być wyłączone w czasie 300ms przez zabezpieczenie szyn, gdyby nie fakt, że zostało zidentyfikowane jako zwarcie w polu odpływowym poprzez zabezpieczenie nadprądowe. W rezultacie tego nastąpiła nieudana próba selektywnego wyłączenia. W związku z tym, że do zdarzenia doszło za przekładnikami, ale przed

wyłącznikiem, jego otwarcie nie wyłączyło zwarcia. Zostało ono wyłączone dopiero przez zabezpieczenie szyn w czasie 1,5 s.



Rys. 7. Lokalizacja miejsca zwarcia - pole odpływowe, obszar pomiędzy przekładnikami prądowymi, a wyłącznikiem.

Na skutek zwarcia doszło do uszkodzenia wyłącznika oraz przyłączy szyn.



Rys. 8 i 9. Widok uszkodzeń w celce pola - okopcone kolumny wyłącznika i ściany celki, uszkodzone szyny wyłącznika



Rys. 10. Plamy stopionego aluminium, oraz spalone szczątki gryzonia, który wywołał zwarcie

Podsumowanie:

Czas trwania zwarcia: 1,4 s.

Prąd zwarciovowy: 8kA

Zniszczenia: Uszkodzone oszynowanie wyłącznika, uszkodzone obwody wtórne

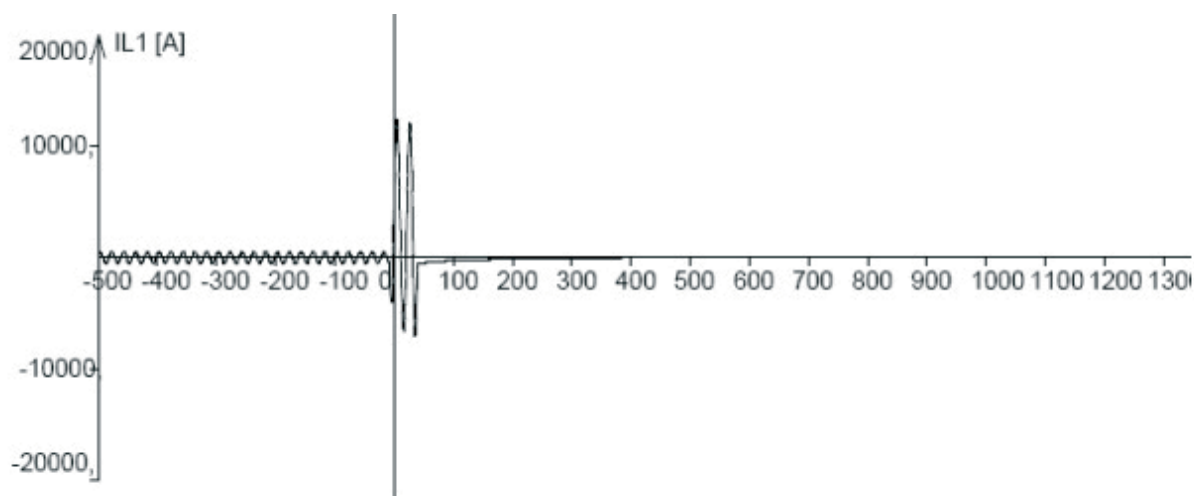
Straty: kilkadziesiąt tysięcy PLN

5. Rozdzielnia otwarta 15 kV – zakład energetyczny (zabezpieczenie łukoochronne).

W poprzednim punkcie został opisany przypadek zwarcia łukowego w rozdzielni 15kV w jednym z zakładów energetycznym. W tej samej rozdzielni w odstępie czasowym 2 lat doszło do kolejnego zwarcia. W tym czasie w rozdzielni zostało zainstalowane światłowodowe zabezpieczenie łukoochronne. Miał tu miejsce rzadki zbieg okoliczności, gdyż do zwarcia doszło w tym samym polu co poprzednio. Zwarcie zostało zidentyfikowane przez zabezpieczenie łukoochronne, impuls wyłączający został wygenerowany w czasie 10ms, a wyłączenie nastąpiło w czasie 50ms. W związku z tym, że w polu, które zostało wyłączone nie doszło do żadnych fizycznych śladów zwarcia, pojawiły się wątpliwości co do zasadności zadziałania zabezpieczenia światłowodowego, jednak rejestracje zakłóceń potwierdziły zaistniały prąd zwarcowy na poziomie 12kA. Po zdjęciu blokady z zabezpieczenia, w krótkim okresie czasu pole zostało ponownie załączone. Do oględzin pola doszło dopiero po kilku dniach. W ich wyniku udało się ustalić przyczynę zwarcia, którą ponownie okazał się gryzoń.



Rys. 11. Miejsce, w którym doszło do zwarcia – obszar pomiędzy komorami wyłącznika.



Rys. 12. Przebieg prądu zwarcowego fazy L1.

Podsumowanie:

Czas trwania zwarcia: 0,05 s.

Prąd zwarciovowy: 12kA

Zniszczenia: Brak jakichkolwiek uszkodzeń.

Możliwość natychmiastowego ponownego załączenia zasilania.

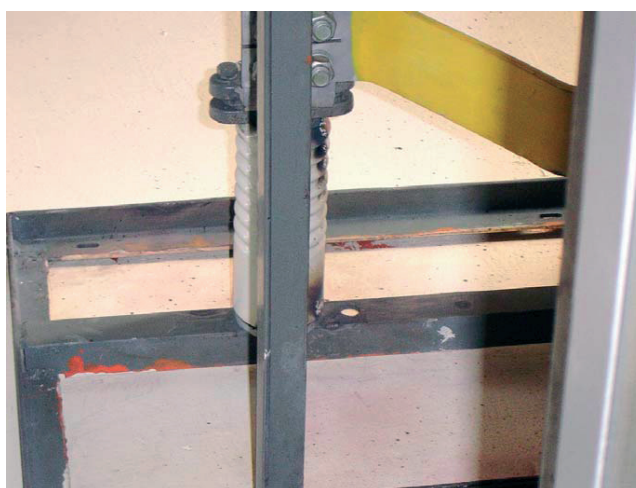
Straty: brak

6. Rozdzielnia otwarta 15kV – zakład energetyczny (zabezpieczenie łukoochronne). Zwarcie w polu sprzęgła.

Kolejny rozpatrywany przypadek dotyczy stacji 110/15kV wyposażonej w światłowodowe zabezpieczenie łukoochronne zainstalowane na dwusekcyjnej rozdzielnicy średniego napięcia. W momencie zdarzenia rozdzielnica była zasilana przez transformator (TR1) zasilający pierwszą sekcję i pracowała z zamkniętym sprzęgłem. Do zwarcia łukowego doszło w wyniku uszkodzenia izolatora wsporczy szyn zbiorczych w polu sprzęgła w obszarze sekcji drugiej. Zwarcie zostało zidentyfikowane przez zabezpieczenie łukoochronne i wyłączone poprzez otwarcie sprzęgła. Zwarcie na szynach sekcji 2 przestało być zasilane po czasie ok. 40 ms (wliczając czas własny wyłącznika) od momentu wystąpienia zakłócenia i wzrostu prądu. Prąd zwarcia płynący przez przekładniki sprzęgła wynosił ok. 8 kA.



Rys. 13. Miejsce zwarcia – uszkodzony izolator wsporczy



Rys. 14. Uszkodzony izolator wsporczy

Podsumowanie:

Czas trwania zwarcia: 0,04 s.

Prąd zwarciov: 8kA

Zniszczenia: Brak uszkodzeń wywołanych łukiem.

Konieczność wymiany pękniętego izolatora wsporczo.

Straty: kilkaset PLN

7. Rozdzielnica zamknięta 6kV elektrociepłownia (zabezpieczenie łukoochronne)

W wyniku niewłaściwego montażu głowicy kablowej w przedziale przyłączeniowym jednego z pól tej rozdzielnicy doszło najpierw do przegrzania się izolacji, a następnie do jej uszkodzenia, co doprowadziło do powstania zwarcia łukowego. Początkowo było to zwarcie jednofazowe, które następnie przerodziło się w zwarcie dwufazowe. Prąd zwarciov na poziomie 15kA. Rozdzielnica była wyposażona w zabezpieczenie łukoochronne (typu ZŁ). Zwarcie zostało wyłączone w czasie 0,05 s.



Rys. 15. Miejsce zwarcia – przedział przyłączeniowy.

Podsumowanie:

Czas trwania zwarcia: 0,05 s.

Prąd zwarciov: 15kA

Zniszczenia: Uszkodzona głowica kablowa przyłączy.

Ściany przedziału nie zostały nawet okopcone.

Straty: kilkaset PLN

Podsumowanie

W referacie zostało przedstawionych siedem przypadków zwań łukowych. Pod względem czasu trwania można je zaklasyfikować do dwóch grup:

- 4 zdarzenia, gdzie impuls wyłączający został inicjowany przez zabezpieczenia nadprądowe z czasami łącznymi zwarcia na poziomie od 1,4s do 2,5s
- 3 zdarzenia, gdzie impuls wyłączający był inicjowany bezzwłocznie (poniżej 10ms) przez światłowodowe zabezpieczenia łukoochronne (typu ZŁ) z czasami łącznymi zwarcia na poziomie 40-50 ms

Przedstawione zdarzenia w pełni potwierdzają wyliczenia teoretyczne i wyniki badań w warunkach stanowiskowych i pokazują ścisły związek pomiędzy czasem trwania, a skalą uszkodzeń wywołanych przez zwarcie łukowe.

- W wypadku zwarć łukowych trwających 40-50 ms dochodzi do nieznacznych, bądź żadnych uszkodzeń, które mają wpływ na pracę rozdzielni – można mówić o blisko 100% ochronie przed skutkami zwarć.
- W literaturze można natrafić na teoretyczne opracowania rozwiązań mających na celu jeszcze większe skracanie czasu zwarcia, gdzie łuk gaszony jest w ciągu kilku milisekund poprzez zastosowanie dedykowanych urządzeń gaszących. W kontekście wysokiej skuteczności ochrony urządzeń SN dzięki skróceniu czasu trwania łuku do poziomu 40-50 ms, zasadność ponoszenia dużych dodatkowych nakładów w tym kierunku wydaje się nie uzasadniona.
- Pokazane przypadki zwarć łukowych trwających ponad sekundę obrazują ogromne uszkodzenia rozdzielni, gdzie straty mogą sięgać setek tysięcy złotych, a życie ludzkie znajduje się w poważnym zagrożeniu. Zabezpieczenia nadprądowe z nastawioną zwłoką czasową przekraczającą jedną sekundę stanowiły w zaprezentowanych przykładach zerową ochronę przed skutkami zwarć łukowych.

Literatura

1. „Doświadczenia eksploatacyjne związane z łukoodchronnym zabezpieczeniem ZŁ-firmy Energotest” mgr inż. Tomasz Sęk, mgr inż. Aleksander Gawryał ENION S.A. – Oddział w Tarnowie, mgr Michał Kaźmierczak Energotest Sp. z o.o.
2. „Zwarcia ciągle obecne”, doc. hab. dr inż. Lech Mikulski - Instytut Energetyki Warszawa, inż. Hubert Karski - Centralny Instytut Ochrony Pracy Warszawa
3. „Łukoodporność rozdzielnic SN w świetle przepisów międzynarodowych oraz badań silnoprądowych” dr inż. Albert Gmitrzak - Instytut Elektrotechniki Warszawa, mgr inż. Jarosław Tąkiel - ABB Sp. z o.o.
4. „Skuteczne metody eliminacji zwarć i ograniczania ich skutków” mgr inż. Zbigniew Kochel, inż. Franciszek Rodoń, mgr inż. Mariusz Talaga Energotest-Energopomiar Sp. z o.o.