



Jan Strzałka*

ANALIZA WYBRANYCH PRZYPADKÓW USZKODZEŃ URZĄDZEŃ ELEKTRYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Streszczenie: W referacie przedstawiono analizę okoliczności, zakresu i przyczyn wybranych przypadków pożarów i awarii urządzeń elektrycznych.

Słowa kluczowe: urządzenia elektryczne, analiza awaryjności

1. Wstęp

W trakcie eksploatacji urządzeń elektrycznych występują losowe przypadki ich uszkodzeń, przy czym szczególnie duże koszty związane są z uszkodzeniami urządzeń wysokiego napięcia.

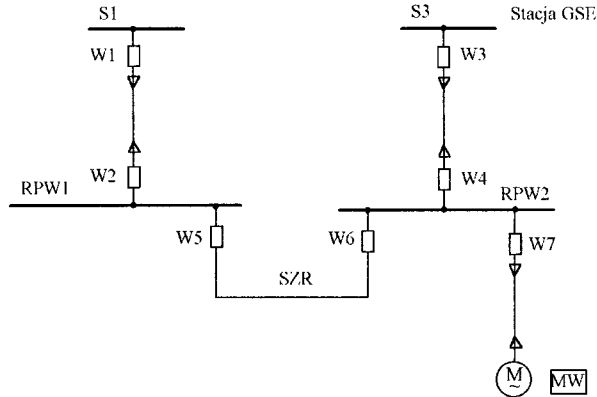
W literaturze technicznej można znaleźć liczne publikacje (na przykład [1]) przedstawiające syntetyczne analizy awaryjności poszczególnych grup urządzeń, takich jak: silniki, wyłączniki, przekładniki prądowe i napięciowe, kable itp. Natomiast do rzadkości należą pogłębione analizy poszczególnych przypadków uszkodzeń.

Niniejszy referat ma na celu częściowe wypełnienie tej luki. Przedstawiono w nim analizę okoliczności i przyczyn kilku przypadków uszkodzeń urządzeń elektrycznych wysokiego napięcia, z którymi autor zetknął się w trakcie kilkunastoletniej praktyki rzeczoznawcy SEP i biegłego sądowego.

* Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

2. Analiza przyczyn pożaru w rozdzielni potrzeb własnych 6 kV elektrociepłowni

Przedmiotem analizy jest rozdzielnia potrzeb własnych RPW2 pracująca w układzie pokazanym na rysunku 1 i służąca do zasilania urządzeń elektrycznych jednego z kotłów parowych.



Rys. 1. Uproszczony schemat układu zasilania rozdzielni RPW2

Jest to rozdzielnia wewnętrzna, wolnostojąca, szafowa typu ELMOBLOK III z pojedynczym systemem szyn zbiorczych. Rozdzielnia RPW2 zasilana jest podstawowo z sekcji S3 stacji GSE za pomocą linii kablowej 6 kV, a rezerwowo z usytuowanej w tym samym pomieszczeniu rozdzielni potrzeb własnych RPW1 zasilanej z sekcji S1 stacji GSE. Pomiedzy rozdzielniami RPW1 a RPW2 funkcjonuje układ automatyki SZR. Na rysunku 1 pokazany jest silnik napędu młyna węglowego o mocy 400 kW, zasilany z rozdzielni RPW2 który uległ awarii, połączonej z pożarem rozdzielni.

Do awarii doszło w okresie, gdy operator kotła dokonał z nastawni zdalnego załączenia wyłącznika W7 silnika młyna. Po stwierdzeniu, że prąd rozruchowy silnika nie spada i po zadziałaniu sygnalizacji przeciążeniowej silnika operator podjął nieudaną próbę odłączenia młyna. Próby takie w rozdzielni kontynuował elektryk zmianowy, który wcześniej zauważył dym wydobywający się z przyłącza silnika młyna.

Elektryk ten stwierdził też nieprawidłowości w pracy wyłącznika związane z charakterystycznym „syczeniem” oleju w jego kolumnach. W chwili, gdy podjął on próbę telefonicznego kontaktu z operatorem, nastąpiła eksplozja wyłącznika w polu zasilania silnika młyna, połączona z pożarem. W chwilę później nastąpił kolejny słabszy wybuch.

W wyniku pożaru w rozdzielni całkowitemu uszkodzeniu i znacznemu wypaleniu uległo wyposażenie pola silnikowego oraz sąsiednich pól rozdzielni. Działanie dynamiczne i termiczne prądu zwarciovego spowodowało liczne uszkodzenia oszynowania i izolatorów wsporczych w obszarze objętym awarią.

Analiza przebiegu i skutków pożaru pozwala na stwierdzenie, że jego przyczyną było niewłaściwe zadziałanie wyłącznika na odpływie do silnika młyna. Jak wykazały

szczegółowe oględziny ocalałych części wyłącznika małoolejowego nastąpiło urwanie końcówki styku ruchomego jednej z faz, co spowodowało niepełne połączenie na pozostałych fazach (zamiast wejścia styków ruchomych w styki stałe tulipanowe na głębokość 40 mm nastąpiło zagłębienie tylko końcówki opalnej styku ruchomego na głębokość ok. 5 mm). Podanie dwóch faz na zaciski silnika spowodowało, że silnik ten pracował jako transformator, którego uzwojeniem pierwotnym były uzwojenia dwóch faz stojana silnika a uzwojeniem wtórnym klatka wirnika. Spowodowało to znaczny wzrost prądu w klatce, przegrzanie pakietu wirnika oraz wytopienia w połączeniach prętów z pierścieniami zwierającymi. Równocześnie nastąpił szybki wzrost temperatury jego uzwojeń, który spowodował wystąpienie zwarć międzyzwojowych oraz w efekcie wywołał zwarcie doziemne w silniku. Prąd zwarciovowy płynąc przez wyłącznik powodował wytopienie końcówek i trzpieni styków ruchomych oraz wystąpienie łuku elektrycznego, który powodując rozkład oleju wywołał eksplozję jednej z kolumn wyłącznika.

Wcześniejsze próby wyłączenia wyłącznika w polu silnikowym nie powiodły się najprawdopodobniej z powodu zgrzania (zespawania) styków ruchomych i stałych. Przepływ prądu zwarciovego do silnika spowodował zadziałanie zabezpieczeń nadprądowych RIT-20 na odpływie ze stacji GSE, które wyprzedziły wyłączenie pola dopływowego rozdzielni RPW2, ze względu na brak stopniowania czasów działania zabezpieczeń na obu końcach linii zasilającej rozdzielnię. Ww. wyłączenie spowodowało pobudzenie automatyki SZR rozdzielni RPW2 i podanie napięcia na jej szyny z rozdzielni RPW1. Ponowne załączenie napięcia od strony RPW1 spowodowało pogłębienie awarii (prawdopodobnie eksplozję kolejnej kolumny wyłącznika) oraz wyłączenie wyłącznika W5 w rozdzielni RPW1.

Awaria wykazała, że brak stopniowania czasowego zabezpieczeń na linii zasilającej rozdzielnię był poważną usterką techniczną, którą usunięto przez wprowadzenie częściowych zmian w nastawach i w wyposażeniu układów zabezpieczeń.

Pierwotną przyczyną pożaru w rozdzielni potrzeb własnych oraz awarii silnika było nieprawidłowe zadziałanie wyłącznika 6 kV spowodowane niesprawnością jednej z kolumn wyłącznika. Najprawdopodobniej było to spowodowane niestarannością przeprowadzonego pół roku wcześniej przeglądu i remontu wyłącznika.

Praktyka eksploatacyjna wyłączników małoolejowych 6 kV wskazuje na liczne awarie tych wyłączników spowodowane głównie nieodpowiednim stanem technicznym zestyku rozłącznego [2]. Szczególnego znaczenia w eksploatacji nabiera sprawa częstości przeglądów (remontów), które powinny wynikać z częstości łączeń oraz zakres tych remontów, przy czym szczególna uwaga powinna być zwrócona na stan i zużycie elementów zestyków rozłącznych.

3. Analiza przyczyn uszkodzenia silnika młylna

W jednej z Elektrociepłowni w lutym ubiegłego roku nastąpiła awaria silnika asynchronicznego klatkowego typu SZDVC198c o mocy 160 kW, na napięcie 6 kV stanowiącego napęd młylna węglowego.

Jako zabezpieczenie silnika zastosowany był zespół zabezpieczeń silników asynchronicznych wysokiego napięcia typu ZS-10 systemu SMAZ prod. REFA-Świebodzice.

Do czasu awarii silnik nie przechodził remontu kapitalnego, a jedynie jeden remont bieżący połączony z wymianą łożysk i czyszczeniem uzwojenia oraz trzy przeglądy.

Do uszkodzenia silnika doszło w trakcie nieudanej próby uruchomienia silnika, którego wirnik uległ zablokowaniu przez element metalowy, który przedostał się do młyna wraz z węglem. Ponieważ przez około pół minuty silnik nie zaczął się obracać, a amperomierz wskazywał niezmiennie pobór dużego prądu rozruchowego, operator dokonał odłączenia silnika. W trakcie przeprowadzonych bezpośrednio po tym oględzin na stanowisku silnika stwierdzono wydostawanie się dymu ze skrzynki przyłączeniowej i wyczuwalny zapach spalonej izolacji. Po zdemontowaniu i rozebraniu silnika stwierdzono wystąpienie przerw i wytopień ok. 30% prętów klatki rozruchowej wirnika przy obu pierścieniach oraz powierzchniowe uszkodzenia izolacji czoł uzwojenia stojana w wyniku termicznego oddziaływania uszkodzonej klatki wirnika.

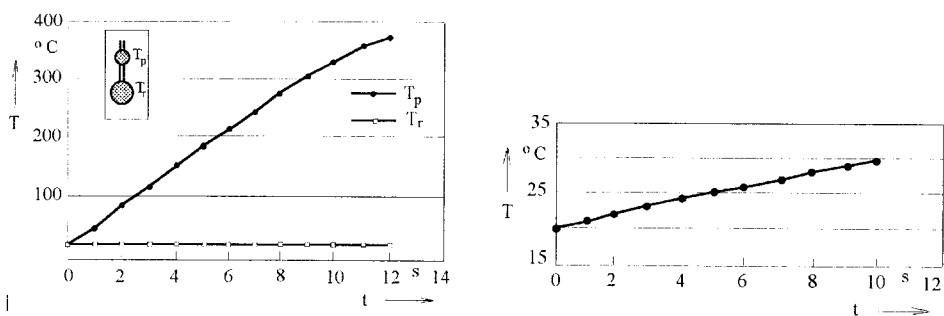
Bezpośrednią przyczyną uszkodzenia silnika było przeciążenie termiczne przy próbie rozruchu silnika z zablokowanym wirnikiem. Utrzymujący się stan przeciążenia prądowego silnika nie spowodował zadziałania zabezpieczeń typu ZS-10 systemu SMAZ, które jako zabezpieczenia starszego typu (oparte na technice półprzewodnikowej) nie posiadało modułu zabezpieczenia od zablokowanego wirnika bądź wydłużonego rozruchu. Po awarii silnika Elektrociepłownia rozpoczęła prowadzoną sukcesywnie akcję unowocześniania zabezpieczeń silników WN wprowadzając mikroprocesorowe zespoły zabezpieczeń typu ZS-M1 produkcji REFA.

Najpoważniejsze uszkodzenia wystąpiły w wirniku maszyny i spowodowane były przebiegiem procesu nagrzewania uzwojeń stojana i klatki wirnika. Określenie przyrostów temperatur w uzwojeniach silnika jest zagadnieniem bardzo złożonym z teoretycznego punktu widzenia, z uwagi na konieczność uwzględnienia w analizie takich czynników, jak zmiany rezystancji uzwojenia wirnika spowodowane zjawiskiem wypierania prądu do klatki rozruchowej zewnętrznej, zwiększeniem gęstości prądu w klatce rozruchowej czy zmianą parametrów materiałowych z temperaturą. Analiza taka wymaga również znajomości szczegółowych danych konstrukcyjnych silnika.

Przykładowe krzywe nagrzewania silnika dwuklatkowego przedstawiono na rysunku 2 [3]. Z rysunku tego wynika, że najbardziej narażonym termicznie elementem silnika jest klatka wirnika, której pręty w krótkim czasie osiągają temperatury graniczne. Uzwojenie stojana osiąga w tym stanie pracy przyrosty temperatur nie przekraczające dopuszczalnych.

Zakres uszkodzeń analizowanego silnika potwierdził prezentowane w literaturze modelowe analizy teoretyczne. Odnotowane uszkodzenia stojana mają charakter uszkodzeń wtórnych, spowodowanych termicznym oddziaływaniem uszkodzonej klatki wirnika.

Należy zwrócić uwagę, że uszkodzenie termiczne klatki rozruchowej i częściowo stojana silnika nastąpiło pomimo wyposażenia silnika w zabezpieczenia ZS-10 posiadające moduł zabezpieczenia przeciążeniowego nadmiarowo-prądowego, jednak reagującego na prąd stojana.



Rys. 2. Krzywe nagrzewania uzwojeń silnika dwuklatkowego w czasie zwarcia: a) dla prętów wirnika, b) dla uzwojenia stojana, T_p – temperatura klatki pracy, T_r – temperatura klatki rozruchowej

4. Analiza przyczyn pożaru w tunelu kablowym

Przedmiotem analizy jest tunel kablowy, przebiegający na przeważającej części swej długości wzdłuż Walcowni jednego z zakładów hutniczych. Jest to typowy, pełnowymiarowy tunel, posiadający po dziesięć pól kablowych po obu stronach i między nimi korytarz umożliwiający swobodne przejście. W tunelu prowadzone jest kilkanaście kabli energetycznych 6 kV i po kilkadziesiąt kabli energetycznych i przewodów oponowych niskiego napięcia oraz kabli sterowniczych, sygnalizacyjnych i teletechnicznych.

Tunel jest własnością wspomnianej Walcowni, która prowadzi również jego eksploatację. Do tego zakładu należy też większość kabli biegnących w tunelu, a zasilających urządzenia elektryczne Walcowni. Część kabli jest własnością Wydziału Sieci Elektrycznych, a część Zakładu Automatyki.

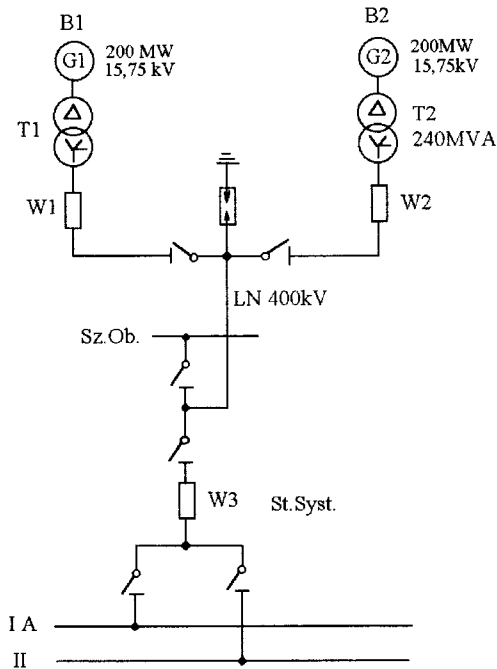
W sierpniu ub. roku w godzinach południowych wystąpił pożar w tunelu w bezpośrednim sąsiedztwie piły międzyoperacyjnej zasilanej silnikiem klatkowym, głębokołobkowym o mocy 315 kW i napięciu 3×500 V. Pożar spowodował wypalenie i termiczne uszkodzenie na długości od kilku do dwudziestu metrów prowadzonych w tunelu kabli siłowych i sterowniczych zasilających urządzenia ciągu walcowniczego Walcowni oraz sąsiednich obiektów. Uszkodzeniu uległy również kable teletechniczne sieci łączności teletechnicznej oraz obwody sygnalizacji pożarowej. Bezpośrednio po trwającej około godziny akcji gaśniczej przystąpiono do oceny skutków pożaru oraz do ich usuwania w celu przywrócenia zasilania. Pierwszoplanowym zadaniem pracujących kolejno brygad kablowych i grup pomiarowych było odtworzenie linii kablowych 6 kV oraz przywrócenie zasilania urządzeń ciągu walcowniczego. Usuwanie skutków pożaru polegało na dokonywaniu „wstawek” na długości około 20 m przywracających zdolność ruchową tych kabli lub wymianie całych końcowych odcinków, w przypadku kabli zasilających urządzenia zlokalizowane blisko miejsca pożaru. O rozmiarach skutków pożaru świadczy fakt, że poszkodowane jednostki organizacyjne Huty oszacowały koszty pożaru na łączną kwotę ponad 100 tys. zł.

Jako przyczynę pożaru kabli w tunelu kablowym uznano łukowe zwarcie międzyprzewodowe na jednym z czterech kabli łączących silnik piły międzyoperacyjnej ze

stycznikownią, a jako najbardziej prawdopodobną przyczynę zwarcia — przetarcie izolacji przy przepięści stropowym, na skutek drgań kabli spowodowanych działaniem sił elektrodynamicznych przy udarowych obciążeniach rozruchowych.

5. Analiza okoliczności i przyczyn awarii wyłącznika 420 kV

Przedmiotem analizy jest wyłącznik W2 na napięcie 420 kV zainstalowany w polu odpływowym bloku B2 jednej z Elektrowni. Blok ten współpracuje w układzie duobloku z rozdzielnią 400 kV dużej stacji systemowej poprzez wspólny wyłącznik sieciowy W3 zainstalowany w tej stacji (rys. 3).



Rys. 3. Uproszczony schemat powiązania duobloku ze stacją systemową

Analizowany wyłącznik jest dwukomorowym wyłącznikiem z sześciofluorkiem siarki SF₆ na prąd znamionowy 4000 A i prąd znamionowy wyłączalny 40 kA z napędem hydraulicznym.

Wyłącznik został zainstalowany i oddany do eksploatacji w połowie 1993 r. Na początku stycznia bieżącego roku w okresie synchronizacji bloku B2 z siecią nastąpiła awaria wyłącznika W2 polegająca na eksplozji kolumn łukowych środkowej fazy wyłącznika. Awaria ta nastąpiła zaledwie po około 600 cyklach pracy wyłącznika. Po rozpaleniu kotła i uzyskaniu odpowiednich parametrów pary uruchomiono turbogenerator, który osiągnął prędkość znamionową. Po załączeniu wyłącznika wzbudzenia generatora podnoszono stopniowo napięcie generatora do wartości znamionowej. Za-

łączono kolumnę synchronizującą i po stabilizacji układu pobudzono synchronizator do działania. Bezpośrednio po tym nastąpiły pobudzenia i niepobudzenia kolejnych zabezpieczeń, co zostało odnotowane na rejestratorach bloku. Po pobudzeniu sygnału „niskie ciśnienie SF₆ wyłącznika bloku” nastąpiła silna eksplozja fazy wyłącznika W2. Zdziałanie zabezpieczeń spowodowało wyłączenie wyłącznika sieciowego W3 w stacji systemowej i wyłączenie mocy 170 MW. Nastąpiło to dopiero po rozwinięciu się uszkodzenia wyłącznika, po około 14 sekundach od wystąpienia zakłócenia.

W wyniku awarii zostały uszkodzone komory łukowe fazy środkowej, których szczątki zostały rozrzucone po stacji w promieniu do ok. 15 m. Oględziny szczątków izolatorów rozerwanych komór łukowych nie wykazywały śladów przepływu prądu po ich zewnętrznej powierzchni. Po awarii przeprowadzono oględziny, badania i próby funkcjonalne faz R i T wyłącznika, które wykazały wynik pozytywny. Zaszła więc konieczność wymiany środkowej fazy wyłącznika, co nastąpiło po ok. 5-ciu dniach, a koszt usunięcia awarii oszacowano na ponad 160 tys. zł.

Awaria ta wystąpiła w momencie synchronizacji bloku z siecią, a więc w chwili, gdy na stykach wyłącznika miała miejsce obecność napięcia 400 kV od strony sieci i identycznego co do wartości skutecznej napięcia od strony wzbudzonego generatora.

Najprawdopodobniej przyczyną awarii było rozszczelnienie komory gazowej wyłącznika, co spowodowało obniżenie własności izolacyjnych w izolatorze jego komory łukowej. Spowodowany tym przeskok iskrowy i przepływ prądu w tej fazie spowodował wzrost ciśnienia wewnątrz komory i dynamiczne uszkodzenie fazy wyłącznika. Przeskokom łukowym, utrzymującym się przez co najmniej kilkanaście sekund towarzyszyły silne rozbłyski obserwowane przez obsługę bloku za oknami maszynowni.

Jak wynika z [1], gdzie przedstawiono analizy oparte na Raportach CIGRE, wyłączniki jednociśnieniowe z sześciofluorkiem siarki są urządzeniami, których liczba awarii jest ok. 60% niższa w porównaniu do wyłączników innych typów. Z przeprowadzonych badań ankietowych w 21 krajach wynika, że na 18 tysięcy wyłączników z SF₆ 45 wyłączników uległo awarii połączonej z pożarem lub eksplozją. Liczba awarii wzrasta wraz ze wzrostem napięcia znamionowego i dla grupy napięciowej 300-500 kV względna liczba awarii wynosi 1,21 na 100 wyłączniko-lat.

Literatura

- [1] **Paniecki W.:** *Niezawodności wyłączników wysokonapięciowych eksploatowanych w systemie elektroenergetycznym.* Przegląd Elektrotechniczny, nr 11, 1996, s. 289–293
- [2] **Matuszyński T.:** *Doświadczenia eksploatacyjne z wyłącznikami małoolejowymi w obwodach elektrycznych o napięciu 6 kV.* Wiad. Elektrotechniczne, nr 11, 1995, s.435–439
- [3] **Mróz J., Płoszyńska J., Rut R.:** *Ochrona silnika klatkowego dużej mocy przed uszkodzeniem w czasie rozruchu.* Wiad. Elektrotechniczne, nr 5, 1997, s. 239–241

ANALYSIS OF SELECTED FAILURES IN HIGH VOLTAGE ELECTRIC DEVICES

Analysis of circumstances ranges and causes of selected fires and other failures in electric devices is presented.