

Uszkodzenie przepustu izolatorowego wysokiego napięcia transformatora blokowego - przyczyną dużej awarii w elektrowni

Streszczenie. Referat opisuje dużą awarię w elektrowni systemowej spowodowaną uszkodzeniem przepustu izolatorowego wysokiego napięcia 400 kV transformatora blokowego. Wykonana została szczegółowa analiza przyczyn powstania awarii, która była nagła, bez wcześniejszych symptomów i wystąpiła po raz pierwszy na takim elemencie i objawiając się poważnymi skutkami. Aby nie dopuścić do powstania podobnej awarii w przyszłości, wprowadzono radykalne techniczne środki zaradcze.

Abstract. This paper presents a large breakdown in a system power plant caused by the damage of bushing culvert of high voltage unit transformer of 400kV. A detailed analysis of the reasons of a breakdown occurrence was prepared. The damage was unexpected without any prior symptoms. It appeared for the first time on this element and revealed to such consequences. To prevent the occurrence of similar accidents in the future, introduced radical technical remedial measures. (**Damage of a bushing culvert of a high voltage unit transformer – reason of a large breakdown in power plant**)

Słowa kluczowe: transformator, uszkodzenie przepustu izolatorowego wysokiego napięcia, pożar transformatora, zalecenia.

Keywords: transformer, damage of a bushing culvert of a high voltage, transformer fire, recommendations

Wprowadzenie

W elektrowni systemowej, w procesie wytwarzania energii elektrycznej, transformator blokowy jest podstawowym urządzeniem bloku energetycznego. Skutkiem awaryjnego wyłączenia transformatora jest zawsze kosztowna przerwa produkcyjna. W czasie eksploatacji transformatorów dużą uwagę przywiązuje się ich diagnostyki pomiarowej, aby jak najwcześniej wykryć objawy pozwalające na podjęcie środków zaradczych w celu uniknięcia awarii ze wszystkimi jej konsekwencjami technicznymi i ekonomicznymi. Te ostatnie wiążą się przede wszystkim z naprawą lub wymianą uszkodzonej jednostki oraz utratą zysków z powodu braku produkcji. Najczęściej i najbardziej powszechnie stosowanym elementem diagnostyki jest analiza chromatograficzna DGA gazów rozpuszczonych w oleju. Dla przepustów izolatorowych transformatora w starszych wiekowie jednostkach, wczesne wykrywanie uszkodzeń jest utrudnione ze względu na ich cechy konstrukcyjne, trudności w ich przeprowadzaniu oraz brak precyzyjnych kryteriów oceny badań. Jednak postęp techniczny w tej dziedzinie jest coraz doskonalszy i umożliwia już realny monitoring przepustów izolatorowych dla wyeliminowania takich groźnych w skutkach awarii.

Powstanie awarii

Elektrownia w Rybniku posiada osiem typowych bloków energetycznych o mocy projektowej 200 MW, z których dwa nr 7 i 8 na napięciu 400 kV połączone są w tzw. duoblok z jedną linią 400 kV wyprowadzenia mocy. W dn. 25.03.2014 bloki pracowały odpowiednio z mocą 154 i 155 MW. Około godz. 13 na fazie L2 po stronie GN transformatora blokowego 8TB pojawił się gwałtowny wzrost prądu. Przyrost prądu do wartości 12,445 kA nastąpił w czasie 2,8 ms, co odnosząc się do prądu znamionowego transformatora 8TB jego wartość wyniosła: 33,5 x prąd znam. transformatora 8TB. Tak gwałtowny przyrost prądu wywołał natychmiastowe zadziałanie zabezpieczenia różnicowego oraz powiązanych pozostałych zabezpieczeń elektrycznych i wyłączenie wyłączników bloku 8, bloku 7, i linii 400 kV wyprowadzenia mocy. Przyczyną gwałtownego wzrostu prądu było zwarcie elektryczne jednofazowe fazy L2 strony 400 kV do ziemi, spowodowane uszkodzeniem przepustu izolatorowego transformatora 8TB.

Następstwem zwarcia elektrycznego była eksplozja w kadzi transformatora. Skutkiem siły eksplozji

w transformatorze, przyspawana górna pokrywa kadzi na ok. 50% jej obwodu została rozwarta na ok. 80 mm. Nastąpił wyrzut i wypływ oleju transformatorowego, który się zapalił, a następnie pożar objął cały transformator blokowy. Pożar w ciągu kilkunastu minut został ugaszony przez jednostki straży pożarnej (rys.1).



Rys.1. Pożar transformatora blokowego



Rys.2. Transformator bezpośrednio po ugaszeniu pożaru

Ponieważ uszkodzony transformator pracuje w układzie elektrycznym, w którym dwa bloki z dwoma transformatorami 8TB i 7TB pracują na jedną linię 400 kV, uszkodzenie jednego transformatora i spowodowany przepływ wysokich prądów zwarciovych, doprowadził do takiej degradacji technicznej drugiego transformatora, że wiązało się to z wymuszoną decyzją o jego wyłączeniu z eksploatacji.

Niestety, w wyniku awarii transformatora i jego pożaru, zniszczeniu uległa także część instalacji kablowych w maszynowni, poniżej poziomu transformatora oraz wystąpiło duże zadymienie hali maszynowni elektrowni.

Analiza przyczyn powstania awarii

W elektrowni powstała komisja mająca na celu wyjaśnienie przyczyn i powodów uszkodzenia transformatora (rys.2). Wystąpiono o ekspertyzy do autorytatywnych instytucji i firm. Początkowo spodziewano się, że skutkiem tak dużej siły eksplozji musi być zwarcie elektryczne na uzwojeniach transformatora. W fabryce, rozpoczęto systematyczny demontaż transformatora. Ponieważ olej transformatorowy kilkanaście minut się palił w rozwartej przestrzeni kadzi transformatora, oględziny uzwojeń i przestrzeni pod górną pokrywą były utrudnione. W wyniku dalszych demontaży i pomiarów, i po wyciągnięciu części aktywnej transformatora z kadzi ustalono, że nie wystąpiło zwarcie na uzwojeniach, pomiędzy nimi, ani uzwojeń do ziemi. Rozpoczęto szczegółowe badania przepustów izolatorowych 400 kV. Ponieważ w wyniku pożaru, części zewnętrzne przepustów zostały zniszczone, jakiegokolwiek pomiary elektryczne nie miały sensu. Rozpoczęto elementarny demontaż podejrzanego przepustu L2 w części, która znajdowała się w kadzi transformatora. Przepust izolatorowy z izolacją typu RIP (Resin Impregnated Paper) zbudowany jest na bazie tulei aluminiowej, na której nawinięta jest izolacja z bardzo cienkiego papieru nasyconego olejem. Jest to tzw. rdzeń kondensatorowy. Na papierze są strefy półprzewodzące z napyłonego węgla, których celem jest korzystne ukształtowanie rozkładu pola elektrycznego. W środkowej części rdzenia kondensatorowego umieszczony jest kołnierz metalowy, który służy do zamocowania przepustu w kadzi transformatora. Podczas montażu przepustu izolatorowego na transformatorze, przez środek tulei aluminiowej przeciąga się przewód z uzwojenia wysokiego napięcia i mocuje się go na górnym pierścieniu.

Odwijając poszczególne warstwy papieru izolacyjnego zauważono, że pomiędzy kołnierzem metalowym a dolną końcówką przepustu wytworzył się zwęglony kanał prądu upływu wzdłuż izolacji. Można zatem, z dużym prawdopodobieństwem odtworzyć kolejne fazy destrukcji, która doprowadziła do zniszczenia przepustu izolatorowego:

- zapoczątkowanie wyładowań niezupełnych w warstwach izolacji papierowej w rejonie kołnierza metalowego mocującego przepust
- zniszczenie w/w izolacji stworzyło warunki do przepływu prądu upływu
- poprzez zdrowe warstwy izolacji papierowej płynął prąd pojemnościowy, który także przepływał przez zniszczone warstwy izolacji i miejsca te przegrzewał prowadząc do ich zwęglenia
- prąd upływu przepływał poprzez półprzewodzące warstwy ekwipotencjalne (węglowe), wzdłuż izolacji papierowej, tworząc zwęglone kanały, aż do dolnego aluminiowego pierścienia przepustu, będącego na potencjale fazy L2.

Tak więc prąd upływu zamykał się w obwodzie: uzwojenie GN napięcia transformatora, wyprowadzenie fazy L2, dolny pierścień aluminiowy, stożkowa powierzchnia rdzenia kondensatorowa, następnie poprzez kanał na powierzchni ekwipotencjalnej izolacji papierowej do tulei kołnierza montażowego przepustu i w konsekwencji do uziemionej kadzi transformatora. Prąd upływu doprowadził do zwarcia łukowego, które zainicjowało eksplozję gazów zgromadzonych w części podolejowej przepustu izolatorowego (rys.3). Zwarcie łukowe i eksplozja gazów spowodowała wytworzenie się olbrzymiego ciśnienia

doprowadzając do rozerwania kadzi transformatora, wyrzutu oleju transformatorowego i jego zapalenia.



Rys.3. Demontaż przepustu i widoczny kanał przewodzący na papierowym rdzeniu kondensatorowym

Diagnostyka przepustów izolatorowych 400 kV transformatora

Na uszkodzonym transformatorze zastosowane były przepusty izolatorowe o danych jak w tabeli. Z numerów fabrycznych przepustów, wynika że zostały wyprodukowane w 1981 r. Pomiary diagnostyczne przepustów jak i całego transformatora przeprowadza się podczas remontów bloku energetycznego średnio w odstępach 3-6 lat. Badania oleju transformatorowego DGA, przeprowadza się przynajmniej raz do roku i wg wskazań jednostki badawczej. Ostatnie badanie przepustów tego transformatora wykonano w maju 2012 roku, a więc nie całe 2 lata przed datą awarii.

Tabela 1. Dane i wyniki pomiarów przepustów transformatora

Przepust izolatorowy transformatora	Napięcie pom.[kV] / układ pomiarowy*	tg δ [%]	Cx [pF]
Micafil WTXF 420 RED 1550, 1000 A (faza 1A)	10 / UST	0,22	452,4
	1 / GST	0,19	3345
Micafil WTXF 420 RED 1550, 1000 A (faza 1B)	10 / UST	0,20	450,1
	1 / GST	0,18	3461
Micafil WTXF 420 RED 1550, 1000 A (faza 1C)	10 / UST	0,22	453,2
	1 / GST	0,22	3396

* UST - pomiar w układzie zacisk liniowy do izolowanego zacisku pomiarowego

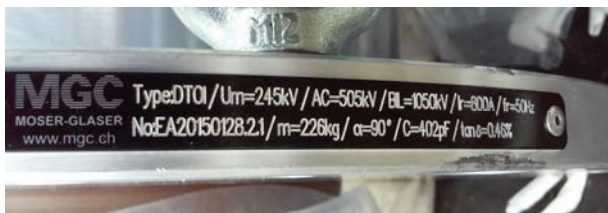
* GST - pomiar w układzie zacisk pomiarowy do uziemionego zacisku liniowego i kołnierza

Wyniki z badań zamieszone w tabeli uznane zostały jako pozytywne. Przepusty izolatorowe wyposażone są w zacisk pomiarowy pozwalający wykonać pomiar współczynnika stratności dielektrycznej tgδ oraz pojemności Cx przepustu. Jeszcze kilkanaście lat temu, do tych pomiarów nie przywiązywano szczególnej uwagi i nie interpretowano ich wyników. Obecnie od wykonawcy pomiarów żąda się szczegółowego protokołu i opinii technicznej. Na wynik pomiarów wpływ mogą mieć silne pola elektryczne sąsiednich transformatorów, warunków atmosferycznych w czasie badań, układu przewodów i aparatury pomiarowej. Przyjmuje się, że wartość tgδ nie powinien przekroczyć wartości 1,5. W r. 2012 przepusty izolatorowe były badane także z wykorzystaniem metod polaryzacyjnych, dla wskazania na ewentualną postępującą degradację izolacji. Ze względu na brak krzywych referencyjnych wykonano tylko analizę porównawczą.

Służby techniczne zakładu, muszą gromadzić wyniki pomiarów, gdyż zdarza się, że w wyniku przetargów, każdy cykl pomiarów wykonuje inna firma pomiarowa. Ocena dalszej przydatności technicznej przepustów wynika z porównania wyników z poprzednich pomiarów, trendów danych, ewentualnie porównanie wyników z innymi jednostkami.

Nowe zalecenia modernizacyjne dla transformatorów blokowych w kontekście uszkodzenia przepustu izolatorowego

Wprowadzono zalecenie konieczności wymiany wszystkich przepustów izolatorowych na transformatorach blokowych, podczas zaplanowanych remontów, ze wskazaniem na izolację zewnętrzną przepustów z gumy silikonowej. Zaletą gumy silikonowej jest, że w przypadku eksplozji przepustu nie dochodzi do rozrzucaenia odłamków porcelany i wtórnych uszkodzeń innych urządzeń, bądź ewentualnego zranienia ludzi. Izolatory te, są także znacznie lżejsze w stosunku do tradycyjnych izolatorów porcelanowych. Nowe przepusty posiadają suchą izolację (RIP) i składają się z papieru, który jest owinięty impregnowaną żywicą epoksydową w próżni. Długość życia takiego izolatora wynosi ponad 35 lat. Obecnie producenci nowych przepustów izolatorowych, na tabliczkach znamionowych przepustów podają także wyjściowe wartości tgδ i Cx zmierzone podczas prób fabrycznych. Ułatwi to późniejsze pomiary i porównania. W dokumentacji technicznej producenta, szczegółowo podane są także wartości tgδ i Cx, jakie winny wynosić w trakcie kolejnych pomiarów eksploatacyjnych. Przepusty izolatorowe wyposażone są w zaciski pomiarowe, w tym z możliwością pomiarów online. W związku z wymianą przepustów w elektrowni, niżej podano taki przykład dla przepustu 220 kV (rys.4).

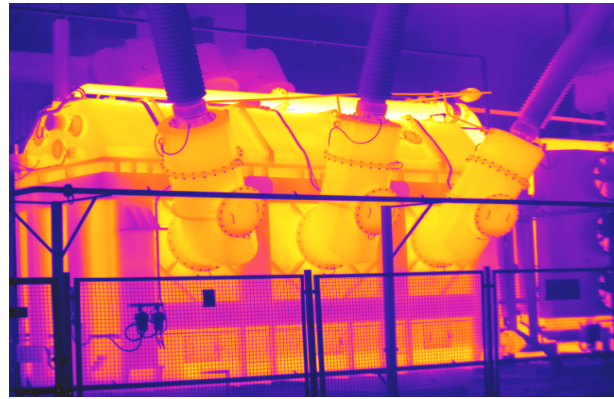


Rys.4. Przykład nowego oznaczenia przepustu izolatorowego

Zalecono wprowadzenie systemów monitoringu online transformatorów blokowych z pomiarem zawartości gazów i wody rozpuszczonych w oleju oraz kontrolą stanu przepustów izolatorowych. Postęp techniczny umożliwił rozwój nowoczesnych układów monitoringu online transformatora. Zastosowane urządzenie posiada możliwość analizy online zawartości gazów i wilgoci w oleju transformatora. Analizuje się pomiar zawartości wodoru (H₂), tlenku węgla (CO), acetylenu (C₂H₂) i etylenu (C₂H₄) oraz wody rozpuszczonej w oleju. O ile wodór (H₂) jest gazem pojawiającym się przy prawie każdym rozwijającym się uszkodzeniu transformatora, a tlenek węgla (CO) sygnalizuje uszkodzenie izolacji stałej, to pojawienie się acetylenu (C₂H₂) precyzuje rodzaj efektu: przegrzanie, wyładowania niezupełne lub łuk elektryczny o wysokiej energii. Urządzenie umożliwia monitoring przepustów izolatorowych poprzez pomiar współczynnika stratności tgδ lub współczynnika mocy (PF). Urządzenie wyświetla wyniki miejscowo na wyświetlaczu i przesyła dane do komputerowej sieci technicznej zakładu (rys.5).

Pomiary termowizyjne pozwalają na zdiagnozowanie zagrożeń i uniknięcia znacznych strat. Dają natychmiastowy wynik, gdyż mogą być wykonywane w trakcie eksploatacji. Pomiary termowizyjne są wykonywane od dawna, jednak

obecnie zwrócono na nie w szczególny nacisk, i analizę pomiarów poprzez porównania.



Rys.5. Przykład diagnostyki termowizyjnej transformatora



Rys.6. Przykład diagnostyki termowizyjnej przepustów izolatorowych

Zalecenie zastosowania przegród budowlanych oddzielenia przeciwpożarowego (ściany). Do tej pory stosowane były przegrody oddzielenia przeciwpożarowego pomiędzy transformatorami stojącymi bezpośrednio obok siebie. Obecnie celem dostosowania elektrowni do nowych wymogów przeciwpożarowych, wprowadza się przegrody oddzielenia budowlanego z trzech stron, jak pokazano na zdjęciu. Wykonane są one ze specjalizowanych elementów budowlanych, o wysokiej precyzji wykonania.



Rys.7. Nowe ściany oddzielenia przeciwpożarowego

Wnioski

Awarie spowodowane przez uszkodzenie przepustu izolatorowego transformatora są awariami a dużym zasięgiem działania i dużych negatywnych skutkach technicznych i ekonomicznych, jak przedstawiono w niniejszym referacie.

Przyczyną uszkodzenia przepustu izolatorowego fazy L2 transformatora blokowego 8TB, było zwarcie elektryczne w warstwach izolacji papierowej części kondensatorowej,

między dolnym kołnierzem przepustu a kołnierzem mocującym przepust do kadzi transformatora

Awaria przepustu izolatorowego wystąpiła nagle i nie mogła być przewidziana, gdyż nie posiada zabezpieczeń przed uszkodzeniami przepustów izolatorowych.

Łuk elektryczny zwarcia zainicjował eksplozję gazów, która spowodowała rozszczelnienie kadzi, wyrzut oleju na zewnątrz i jego zapalenie.

Analiza działania zabezpieczeń elektrycznych w pełni potwierdziła szybkość i funkcjonalność oraz prawidłowość ich działania.

W eksploatacji transformatorów, należy dążyć wszelkimi środkami, aby zapobiegać uszkodzeniom przepustów izolatorowych transformatora, a w konsekwencji poważnym awariom transformatorów.

W celu uchronienia się przed podobnym przypadkiem w przyszłości, zaleceniem zakładowej komisji awaryjnej jest sukcesywna wymiana przepustów izolatorowych, co wykonano już na transformatorach GN 400 kV 7TB i 8TB podczas ich produkcji oraz w dalszej kolejności na transformatorach blokowych GN 220 kV, a kolejno na 110 kV, ze wskazaniem na przepusty o zewnętrznej izolacji wykonanej z gumy silikonowej.

Postanowiono zastosować na wszystkich transformatorach blokowych system monitoringu online do nadzoru stanu technicznego przepustów izolatorowych GN oraz system oznaczania zawartości gazów oleju transformatorowym. Dwustanowe alarmy sygnalizowane są na nastawni blokowej, a analiza trendów odbywać się będzie w wydzielonej aplikacji w zakładowej komputerowej sieci technicznej.

LITERATURA

- [1] Wizje lokalne, protokoły i raporty pomiarowe – własne, zakładowe
- [2] Protokół badania awarii CUW/IOR/14/0012_PRT
- [3] Ekspertyza EM-1T/129/14 "Ustalenie przyczyn awarii oraz zakresu uszkodzeń transformatorów blokowych 7TB i 8TB". ENERGOPOMIAR-ELEKTRYKA
- [4] Przepust izolatorowy TRAWESCA-DTOI - instrukcja techniczna
- [5] MTE System monitoringu HYDROCAL 1005

Autor: inż. *Bolesław Słowiński*, starszy specjalista ds. elektrycznych EDF Polska S.A., ul. Podmiejska, 44-207 Rybnik, E-mail: boleslaw.slowinski@edf.pl.