

Pożary transformatorów wysokiego napięcia

Streszczenie. Przedstawiono budowę izolatora przepustowego typu OPI wysokiego napięcia (rys. 2). Zwarcie wewnętrzne izolatora, w części na zewnątrz transformatora, powoduje pożar izolatora. Podano przykład takiego pożaru (rys. 3). Zwarcie wewnętrzne izolatora, w części zamkniętej w kadzi transformatora, powoduje eksplozję w kadzi i pożar transformatora. Podano przykład takiego pożaru (rys. 4). Transformator po pożarze nie nadaje się do remontu.

Abstract. The structure of the high voltage OPI bushing has been presented (Fig. 2). An internal short circuit of the insulator, in some part outside the transformer, causes fire of the insulator. An example of such a fire is given (Fig. 3). Internal short-circuit of the insulator, in the part closed in the transformer tank, causes an explosion in the tank and a fire of the transformer. An example of such a fire is given (Fig. 4). After a fire, the transformer cannot be renovated. (**Block Transformer Fires**).

Słowa kluczowe: transformator, izolator przepustowy, pożar.

Keywords: transformer, bushing, fire.

1. Budowa izolatora przepustowego typu OPI

Pożary transformatorów energetycznych inicjują izolatory przepustowe wysokiego napięcia typu OPI. Na rysunku 1 przedstawiono transformator blokowy z izolatorami przepustowymi wysokiego napięcia WN. Na kadzi bądź na pokrywie każdego trójfazowego transformatora WN blokowego i sieciowego są zabudowane trzy izolatory przepustowe WN i trzy izolatory przepustowe średniego napięcia ŚN, może być także izolator czwarty - zerowy.

a)



b)



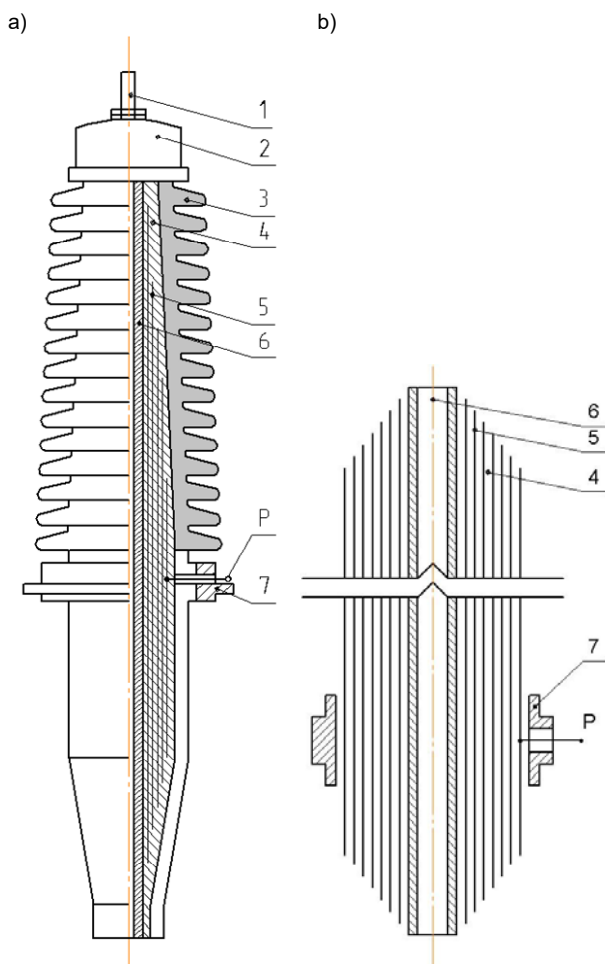
Rys.1. a) Transformator blokowy (zdjęcie Energoserwis SA, obecnie EthosEnergy), b) izolator przepustowy 400 kV typu OPI (zdjęcie własne)

Na rysunku 2 przedstawiono budowę izolatora przepustowego WN typu OPI (olej-papier-izolator). Izolację główną izolatora OPI stanowi rdzeń papierowy nasączony olejem transformatorowym. Papier izolacyjny jest nawinięty na rurkę metalową i jest umieszczony wewnątrz osłony porcelanowej. Rurka zwykle aluminiowa (czasem miedziana) służy do wyprowadzenia końcówki uzwojenia, tzw. bata. Na górze izolatora jest umieszczony zbiornik z olejem. Olej przenika do warstw papieru, nasycza papier i wypełnia przestrzeń rdzenia między rurką aluminiową i osłoną porcelanową. Rdzeń papierowy jest podzielony na n warstw. Podział ten tworzą powierzchnie ekwipotencjalne. Powierzchnie ekwipotencjalne wykonane są z folii aluminiowej. Powierzchnie ekwipotencjalne wyrównują rozkład natężenia pola elektrycznego w rdzeniu papierowym. Liczba warstw n w rdzeniu izolacyjnym zależy od napięcia izolatora. Przykładowe ilości warstw podano w tabeli 1. Na osłonie porcelanowej jest umieszczony kołnierz mocujący izolator do kadzi transformatora. Kołnierz, zwykle żeliwny, dzieli izolator na część zewnętrzną i wewnętrzną. Część zewnątrz ma talerze, które chronią izolator przed zwarcie powierzchniowym w czasie deszczu. Talerze są pokryte szkliwem lub teflonem i zabezpieczą izolator przed zabrudzeniem. Część wewnątrz umieszczona w kadzi transformatora jest gładka. Bezpośrednio za kołnierzem na części cylindrycznej jest umieszczony przekładnik prądowy. Rdzeń papierowy na obydwóch końcach ma kształt ściętego stożka - rys. 2b. Z pierwszej powierzchni ekwipotencjalnej, przylegającej do osłony porcelanowej, jest wyprowadzony punkt pomiarowy P (w energetyce jest oznaczany symbolem II). Punkt P jest wykorzystywany w badaniach diagnostycznych on-line izolatora przepustowego.

Tabela 1. Przykładowa liczba warstw ekwipotencjalnych rdzenia izolatora przepustowego [7]

Lp	Napięcie znamionowe kV	Liczba warstw n
1	123	28
2	245	42
3	400	60

Izolator przepustowy typu OPI o napięciu znamionowym 400 kV ma kilka metrów długości i waży około 1200 kg.



Rys.2. Izolator przepustowy wysokiego napięcia typu OPI: a) widok izolatora, b) rdzeń izolacyjny papierowy nasycony olejem. Oznaczenia:

- 1 – przyłącze WN – punkt pomiarowy A, w energetyce jest oznaczany symbolem I
- 2 – zbiornik olejowy,
- 3 – osłona porcelanowa,
- 4 – izolacja papierowa nasycona olejem transformatorowym,
- 5 – powierzchnie ekwipotencjalne, najczęściej folia Al,
- 6 – rurka aluminiowa do wyprowadzenia przewodu z uzwojenia,
- 7 – kołnierz mocujący do kadzi transformatora, jest to punkt pomiarowy K, w energetyce jest oznaczany symbolem III,
- P - punkt pomiarowy, w energetyce jest oznaczany symbolem II.

2. Pożar izolatora

Na rysunku 3 przedstawiono pożar izolatora transformatora blokowego o danych znamionowych: 240 kVA, 420/15,75 kV. Pożar był zainicjowany przez eksplozję izolatora wysokiego napięcia w części zewnętrznej i zapalenie się oleju.

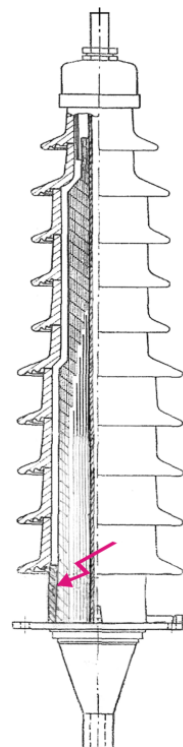
a)



b)



c)



Rys.3. a) pożar izolatora (zdjęcie z Elektrowni), b) zwęglenie papieru (zdjęcie własne), c) miejsce zwarcia w części zewnętrznej izolatora

W transformatorze palił się sam izolator (rys. 3a). Oględziny izolatora spalonego pozwoliły ustalić przyczynę i przebieg awarii. Transformator i izolatory przepustowe miały 35 lat. W rdzeniu papierowo – olejowym, w części zewnętrznej izolatora, był pęcherzyk powietrza i w tym miejscu występowały wylądowania niezupełne. Wylądowania te z latami eksploatacji doprowadziły do zwęglenia się papieru i powstanie „gniazda” – rys. 3b. Gniazdo to z czasem powiększało się. Powierzchnie ekwipotencjalne sprowadzają potencjał gniazda pod kołnierz izolatora. Przebicie rdzenia izolatora występuje zawsze pod kołnierzem - rys. 3c i następuje zwarcie izolacji.

Prąd zwarcia w sposób gwałtowny powoduje wyparowanie oleju i powiększenie ciśnienia pary oleju. Cylinder porcelany ma grubość około 20 mm, ciśnienie pary oleju rozrywa go, w tym przypadku jest to część zewnętrzna cylindra izolatora. Odłamki porcelany są rozrzucone i uszkadzają sąsiednie izolatory. Papier nasycony olejem i pary oleju zapalają się od łuku elektrycznego, izolator pali się. W tym przypadku kadzi transformatora nie rozszczelniła się i olej w kadzi nie zapalił się.

3. Pożar transformatora

Na rysunku 4 przedstawiono płonący transformator blokowy o danych znamionowych: 270 kVA, 420/15,75 kV. Układ połączenia uzwojenia YNd.

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi sygnałów prądu wzbudzenia generatora i napięć fazowych w fazach L1, L2, L3 bloku energetycznego w czasie awarii.

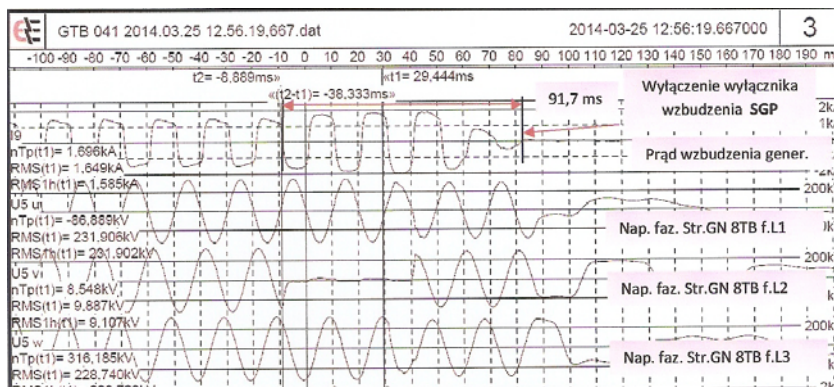


Rys.4. Płonący transformator (zdjęcie otrzymane z Elektrowni)

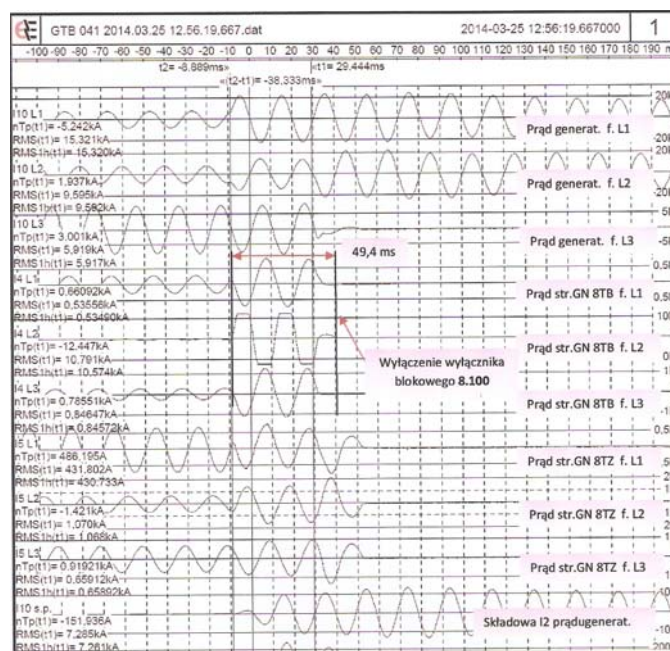
Przebieg napięcia fazy L2 zanika do zera na czas 2,5 okresu i pojawia się ponownie. Dowodzi to, że po czasie około 50 ms wyłącznik blokowy wyłączył blok od linii

przesyłowej 400 kV. Czas wystąpienia doziemienia i czas wyłączenia bloku potwierdzają także sygnały prądów generatora i prądów po stronie GN transformatora w fazach: L1, L2, L3 oraz składowa symetryczna przeciwna prądu I_2 – rys.6. Zabezpieczenie bloku działało sprawnie, a czas wyłączenia, wynoszący 2,5 okresu napięcia, jest krótki. Między generatorem i transformatorem nie ma wyłącznika. Zwarcie fazy L2 do ziemi wystąpiło wewnątrz transformatora. Zwarcie jednofazowe w transformatorze po stronie GN, z uzwojeniami transformatora połączonymi w układ YNd wymusza dwufazowy prąd zwarcia w generatorze. Dwufazowy prąd zwarcia generatora ma składową symetryczną przeciwną I_2 równą składowej symetrycznej zgodnej I_1 . Wyłączenie prądu wzbudzenia generatora musi nastąpić szybko aby generator nie uległ awarii. W tym przypadku prąd wzbudzenia wyłączono po 91,7 ms – rys.5. Wyłączenie prądu wzbudzenia nie powoduje natychmiastowego zanik strumienia magnetycznego wzbudzenia, który zmniejsza się według funkcji wykładniczej. Tak więc dwufazowy prąd zwarcia płynie dalej, lecz jego amplituda zmniejsza się, widoczne jest to na rys.6, wraz ze spadkiem strumienia magnetycznego wzbudzenia.

Na rysunku 7 przedstawiono zewnętrzne skutki awarii.

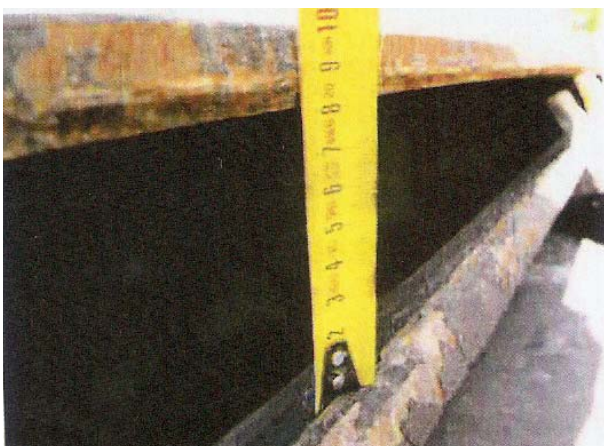


Rys.5. Przebiegi prądu wzbudzenia generatora i napięć fazowych L1, L2, L3 w czasie awarii (skan otrzymany z Elektrowni)



Rys.6. Przebiegi prądów generatora i prądów transformatora po stronie GN w fazach: L1, L2, L3 oraz składowa symetryczna przeciwna prądu I_2 (skan otrzymany z Elektrowni)

a)



b)



c)



d)



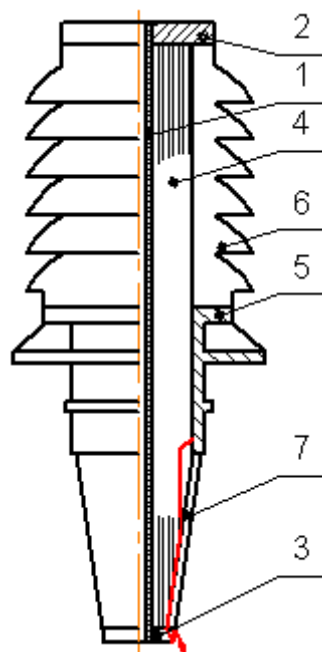
Rys. 7. Skutki pożaru: a) pokrywa kadzi jest podniesiona na 80 mm (zdjęcie z firmy EthosEnergy), b) spalony izolator, c) kanał zwęglonej izolacji fazy L2, d) opalony pierścień izolatora fazy L2 (b, c, d - zdjęcia własne)

Z analizy sygnałów z zabezpieczeń elektrycznych bloku, zarejestrowanych w czasie awarii transformatora, wynika, że początek awarii był związany z zanikiem napięcia w fazie L2 górnego napięcia (420 kV) – rys. 5. Transformator

pracował 36 lat, 12 lat przed awarią transformator był remontowany. W czasie remontu wymieniono olej na nowy, izolatorów przepustowych nie zmieniano.

Warunki do wystąpienia eksplozji wewnątrz transformatora musiały być dwa równocześnie spełnione: pierwszy to mieszanka wybuchowa gazów w kadzi, a drugi to iskra bądź łuk elektryczny inicjujący zapalenie:

- w przestrzeni kadzi nad olejem były zgromadzone gazy palne: wodór (H_2), tlenek węgla (CO), węglowodory (CH_4 , C_2H_2 , C_2H_4 , C_2H_6 , C_3H_6 , C_3H_8), plus tlen (O_2) w powietrzu, w proporcjach wybuchowych,
- wewnątrz kadzi, na pierścieniu izolatora wystąpiło iskrzenie bądź łuk, które zainicjowało eksplozję.



Rys. 8. Kanał przepływu prądu przez rdzeń izolacyjny

Kadź transformatora nie była hermetyczna. Powietrze między pokrywą i olejem pozostało w czasie wlewania oleju do kadzi i dostawało się także z atmosfery. Gazy palne wydzielają się z rozkładu układu izolacyjnego uzwojeń i oleju.

Wyładowania niezupełne w pęcherzyku powietrza rdzenia izolacyjnego spowodowały miejscowe zwęglenie papieru. Zwęglone „gniazdo” z czasem powiększało się i było na tyle duże, że warstwy „zdrowego” papieru zostały przebite. Krater na części wewnętrznej izolacji papierowej wskazuje miejsce zwarcia izolatora (rys. 7b).

Oględziny zewnętrzne uszkodzonego izolatora fazy L2 wskazywały, że między wyprowadzeniem fazy L2, a pierścieniem aluminiowym izolatora wystąpiło iskrzenie bądź łuk, które zainicjowało eksplozję, gdyż wewnętrzny pierścień aluminiowy izolatora fazy L2 jest opalony (rys. 6d), a wewnętrzna powierzchnia kołnierza jest ciemna od łuku elektrycznego. Ten sam pierścień izolatora fazy L3 ma powierzchnię gładką, nieopaloną. Dowodzi to, że pod izolatorem fazy L2 była największa temperatura, tu było ognisko eksplozji, świadczy o tym powierzchniowe nadtopienia aluminium.

Kolejne fazy zjawiska, które doprowadziło do zniszczenia izolatora:

- zaczęło się od wyładowań niezupełnych w środkowych warstwach izolacji papierowej w wewnętrznej części izolatora,

- z upływem czasu następowało zwarcie sąsiednich powierzchni ekwipotencjalnych, powstaje zwęglone „gniazdo”, które zwiera najpierw jedną a z upływem lat kilka warstw papieru,
- poprzez zdrowe warstwy izolacji papierowej płynie prąd upływu pojemnościowy, który jest stosunkowo duży, a między zwartymi powierzchniami ekwipotencjalnymi prąd płynie wzdłuż powierzchni ekwipotencjalnych i przegrzewa je powodując powierzchniowe zwęglone ścieżki,
- przy dostatecznie dużej liczbie zwartych powierzchni ekwipotencjalnych natężenie pola elektrycznego powoduje przebicie izolacji do kotłierza i awarię izolatora.

Kadłub i punkt zerowy N gwiazdy uzwojenia GN są uziemione. Wartość prądu determinowała tylko impedancja obwodu zwarciegogo fazy L2.

Eksplozja wewnątrz kadzi spowodowała zerwanie śrub mocujących pokrywę z kadzią, wygięcie pokrywy i odkształcenie kadzi. Szczelina między pokrywą a kadzią w miejscu maksymalnym wynosiła 80 mm. Stożkowa tuleja porcelanowa w izolatorze fazy L2 została zniszczona. Odkłamki porcelany izolatora L2 zniszczyły tuleję porcelanową fazy L1 i uszkodziły zewnętrzne warstwy papieru rdzenia izolacyjnego faz L1 i L2. W fazie L3 tuleja porcelanowa została uszkodzenia miejscowo, jednak nie została rozerwana. Pokruszone odłamki porcelany z izolatorów L1 i L2 opadły na dno kadzi. Pożar transformatora oblanego olejem spowodował zniszczenie zewnętrznych talerzowych cylindrów porcelanowych w fazach L1 i L2, które popękały i rozsypały się. Zewnętrzne warstwy papieru rdzenia w fazach L1 i L2 zostały opalone. W fazie L3 cylinder zewnętrzny został osmolony dymem, jednak nie został mechanicznie uszkodzony.

4. Skutki pożaru transformatora

Pomiary rezystancji izolacji uzwojeń i rezystancji izolacji między pakietami blach rdzenia dały wynik negatywny. Uzwojenia i rdzeń transformatora muszą być wymienione na nowe. Kadź transformatora, po eksplozji i pożarze także nie nadaje się do ponownego wykorzystania, potwierdziły to oględziny i pomiary komory kadzi. Transformator zakwalifikowano do złomowania.

LITERATURA

- [1] Bernat J., Gawron S., Glinka T., Polak A.: Diagnostyka on-line izolatorów przepustowych. *WN. Energetyka* ISSN 0013-7294. Nr 4/2022, ss. 175-180
- [2] Bernat J., Glinka T., Mních M., Wilk M.: Układ do diagnostyki izolatorów przepustowych typu OPI. *Patent PL 235587* z dnia 24.04.2020
- [3] Buchacz J., Szymański Z., Warczyński P.: Wybrane metody diagnostyki stanu technicznego izolatorów przepustowych z izolacją papierowo-olejową. *Materiały konferencyjne: Zarządzanie Eksploatacją Transformatorów*. Energopomiar-Elektryka, 2010, ss. 143–156
- [4] Glinka T., Drak B., Kapinos J.: Uszkodzenia izolatora przepustowego i awaria transformatora. *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, ISSN 0239-3646. Nr 2/2015, ss. 135-140
- [5] Glinka T., Szymaniec S.: Eksploatacja i diagnostyka maszyn elektrycznych i transformatorów. *Wydawnictwo WNT*, ISBN 978-83-01-20735-9. 2019 r.
- [6] Kapinos J.: Zagrożenia eksploatacyjne transformatora energetycznego spowodowane uszkodzeniem przepustu izolatorowego. *Napędy i Sterowanie*. ISSN 1507-7764. Nr 5/2013, ss. 60-65
- [7] Kazimierski M., Olech W.: Diagnostyka techniczna i monitoring transformatorów. *Wydawnictwo: Energopomiar-Elektryka*. ISBN 978-83-916040-5-2. Gliwice 2013 r.
- [8] Łukaszewski J.: Uszkodzenia izolatorów zagrożeniem dla transformatora i otoczenia. *BOT Elektrownia Bełchatów*. www.igeos.pl/doc/2007/11/.../5
- [9] Ramowa Instrukcja Eksploatacji Transformatorów. *Energopomiar-Elektryka*. ISBN 978-83-916040-4-5. Gliwice, 2012 r.