

Dr inż. Jerzy Arciszewski
Zakłady Energetyczne Okręgu Północnego
Bydgoszcz

WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE W URZĄDZENIACH ENERGETYCZNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA. OBSERWACJE EKSPLOATACYJNE.

W referacie przedstawiono zauważone w eksploatacji charakterystyczne uszkodzenia izolacji w urządzeniach energetycznych wysokiego napięcia, których przyczyną były wyładowania niezupełne. Opisano okoliczności powstawania uszkodzeń izolacji, oraz wskazano na niektóre, prawdopodobne przyczyny. Referat, nie stanowiąc dogłębnej analizy zjawisk, zwraca jedynie uwagę na niedoskonałości niektórych rozwiązań materiałowych i konstrukcyjnych.

1. Wstęp.

Obserwacje i badania eksploatacyjne urządzeń wysokiego napięcia oraz analiza uszkodzeń izolacji pozwalają niestety tylko w nielicznych przypadkach wyciągnąć wnioski odnośnie powstawania i skutków wyładowań niezupełnych. Rozmiar uszkodzeń izolacji wywołany prądem zwarciowym wyklucza możliwość odtworzenia mechanizmu destrukcji izolacji. Czasem jednak udaje się zauważyć skutki wyładowań niezupełnych przed powstaniem zwarcia. Umożliwia to wyciągnięcie wniosków i zastosowanie doraźnych środków zapobiegawczych.

Drugim źródłem informacji w tym zakresie są badania okresowe. Badania $tg \delta$ w funkcji napięcia pozwalają na wyciągnięcie pewnych wniosków dotyczących wyładowań niezupełnych występujących w badanej izolacji.

Próby napięciowe urządzeń wysokiego napięcia nasuwają szereg wniosków odnośnie skutków przeprowadzania takich prób, w postaci śla-

dów wyładowań niezupełnych, powstałych w wyniku pozornie pozytywnej próby.

2. Warunki napięciowe

W czasie eksploatacji urządzeń wysokiego napięcia wyładowania niezupełne mogą występować w następujących warunkach napięciowych:

- pod wpływem napięcia roboczego,
- w czasie przepięć,
- w czasie okresowych badań izolacji przy podwyższonym napięciu, a w szczególności podczas prób napięciowych.

Wyładowania powstające pod wpływem napięcia roboczego z natury rzeczy trwają ciągle i o ile będą miały odpowiednie warunki będą stopniowo niszczyły izolację, doprowadzając do przebiccia względnie do przeskoaku powierzchniowego. Z tego powodu wynika oczywiste wymaganie, by w izolacji ulegającej destrukcyjnemu wpływowi wyładowań niezupełnych nie powstawały one pod wpływem najwyższego dopuszczalnego napięcia roboczego.

W sieciach średnich napięć pracujących w kraju zwykle z niezziemionym bezpośrednio punktem zerowym, przy doziemieniu jednej fazy sieć może pracować dłuższy czas /od pół godziny do kilku godzin/. W tych warunkach pozostałe fazy "zdrowe" pracują pod napięciem o $\sqrt{3}$ wyższym w stosunku do ziemi. W tym czasie obserwuje się częściej niż zwykle uszkodzenia izolacji występujące nawet po dłuższym czasie od momentu doziemienia. Oznacza to, że wyładowania niezupełne pod wpływem podwyższonego napięcia mogą poczynić takie postępy, że mimo powrotu napięcia do stanu normalnego proces niszczenia jest podtrzymywany.

Próby napięciowe stanowią zawsze groźbę częściowego uszkodzenia izolacji. Próba napięciowa przeprowadzana jest w zależności od rodzaju urządzenia w czasie od 1 minuty do 20 minut. Czas próby jest dostatecznie długi, by wyładowania niezupełne, które przy napięciu pro-

bierczym mogą występować /i zwykle występują/, mogły poczynić znaczne zniszczenia.

3. Izolacja w kablach

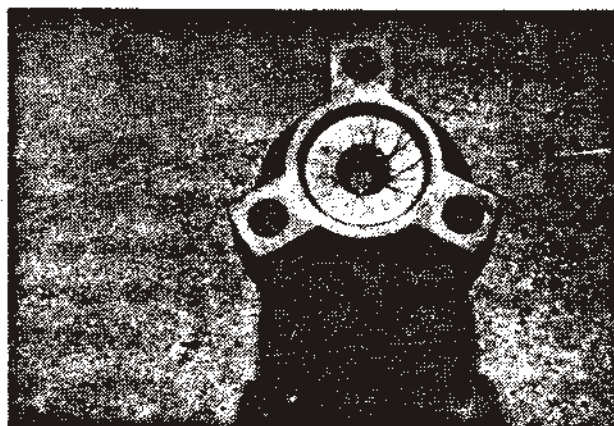
Wyładowania niezupełne niewątpliwie poprzedzają większość uszkodzeń kabli. Miejscowe osłabienia izolacji doprowadzają stopniowo do wyładowań niezupełnych. Zaobserwowano wyładowania w izolacji papierowo-olejowej kabla rozwijające się w sposób charakterystyczny - wzdłuż warstw papieru na drodze znacznie dłuższej niż grubość izolacji. Proces ten trwa długo i możliwe jest zjawisko kumulacji w czasie kolejnych przepięć. Dotychczas nie stosuje się w eksploatacji powszechnie metod, które by pozwalały wykryć rozwijające się wyładowania w kablu. Próby napięciowe napięciem stałym stosowane w ubiegłych latach jako badania okresowe nie dawały pozytywnych rezultatów w postaci obniżenia awaryjności sieci kablowej. Obserwowano, że kilka dni po próbie napięciowej ulegał uszkodzeniu kabel, bez jakichkolwiek przyczyn zewnętrznych. Zjawisko to wydaje się potwierdzać obawy odnośnie możliwych skutków próby napięciowej zwłaszcza, że czas trwania próby dla kabli wynosi 20 minut.

4. Wyładowania niezupełne w wyłącznikach.

Dążenie do nieprzerwanej dostawy energii elektrycznej odbiorcom spowodowało wprowadzenie układów samoczynnego załączania rezerwy /SZR/. W tym układzie izolacja komory wyłącznika pracuje w szczególnie niekorzystnych warunkach. W niektórych przypadkach komory mogą być narażone na podwójną wartość napięcia, gdy wyłącznik w układzie SZR dołączony jest do dwu systemów pracujących niesynchronicznie. Ciągłe utrzymywanie napięcia między otwartymi biegunami wyłącznika stwarza dla niektórych typów wyłączników warunki do powstawania wyładowań niezupełnych. W wyłącznikach małoolejowych pracujących w tych warunkach stwierdzono uszkodzenia izolacji komór. Analiza wykazała,

że przyczyną były wyładowania niezupełne powstające z pierścienia metalowego otaczającego styk nieruchomy. Niekorzystny rozkład pola elektrycznego w tym miejscu powodował rozwój wyładowań, czemu sprzyjał zanieczyszczony i częściowo zawilgocony olej. Na powierzchni elementów komór powstają pod wpływem wyładowań niezupełnych ślady pełzne doprowadzające z czasem do pełnego zwarcia wewnątrz komory między otwartymi biegunami. Zjawisko to zaobserwowano w wyłącznikach VEL - 110.

Rys.1 przedstawia fotografię górnego elementu komory z widocznymi śladami wyładowań. Należy zaznaczyć, że element ten wykonany jest z wypraski fenolowo-formaldehydowej. Materiał ten wykazywał dużą odporność / 80 s/ na wyładowania pełzające badane metodą wysokonapięciową /PN-64/E-04442/. Nasuwa się wniosek, że za powstawanie śladów wyładowań na tym elemencie odpowiedzialny jest przede wszystkim olej. Tego rodzaju zjawisk nie zaobserwowano w przypadku wyłączników powietrznych



Rys.1. Element komory wyłącznika VEL-110 ze śladami wyładowań powierzchniowych

5. Ciągła w łącznikach.

Do poruszenia tego problemu skłoniło ciągle powtarzanie się kłopotów eksploatacyjnych związanych z wszelkiego rodzaju dźwigniami i ciągłami w odłącznikach wewnętrznych oraz rozłącznikach. Wylądowania niezupełne powstające na niewłaściwie dobranych elementach inicjują powstawanie ścieżek pełzających a następnie zwarcie. Na rys.2 przedstawiono dźwignię od wyzwalacza stosowaną w rozłącznikach typu LHTCI produkcji NRD. Widoczne ślady wylądowań pełzających rozpoczynają się od ostrej krawędzi podkładki metalowej, - a więc typowy błąd konstrukcyjny. Blizsze badania wskazały również na drugą przyczynę powstawania wylądowań. Emalia, którą pokryta była dźwignia wykazywała niższą odporność na wylądowania pełzające niż niezbyt zresztą dobry materiał podstawowy /rezokart/.



Rys.2. Wylądowania pełzające na dźwigni rozłącznika typu LHTCI.

W celu doraźnego rozwiązania problemu przeprowadzono badania wpływu pokrycia emalią różnych materiałów izolacyjnych, z którego wyciągnięto następujące wnioski:

- emalia pokrywająca materiał izolacyjny w zależności od właściwości może w znacznym stopniu zarówno podwyższyć jak i obniżyć odporność na wyładowania peizające badane metodą kropłową /PN-56/E-4407/ oraz metodą wysokonapięciową /PN-64/E-04442/
- przy elementach izolacyjnych wykazujących zbyt niską odporność na wyładowania można sytuację poprawić drogą pokrycia elementu odpowiednio dobraną emalią.

W opisany wyżej przypadku pokryto dźwignie emalią glistalową SP-3. Po tym zabiegu nie stwierdzono dalszych, tego rodzaju uszkodzeń.

6. Elementy z żywic epoksydowych.

W wielu elementach wykonanych z materiału żywica epoksydowa-włókno szklane stwierdzono skutki wyładowań niezupełnych w zakresie charakterystycznym dla tego typu materiału. Znana jest również niska odporność tego materiału na wyładowania niezupełne potwierdzona badaniami i odporności na wyładowania peizające.

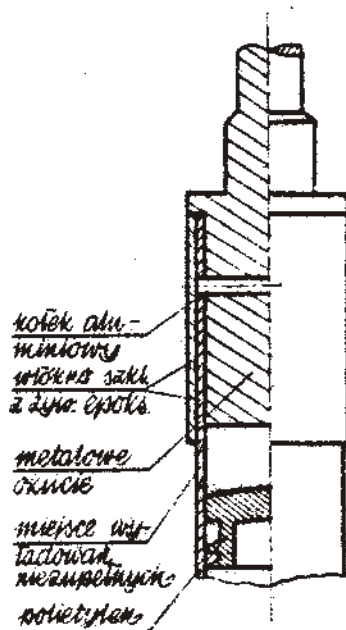
Niżej przedstawiono wybrane przykłady skutków wyładowań niezupełnych w tego rodzaju izolacji.

a/ Wylłączniki typu A - 20 małowojowe na napięcie znamionowe 15 kV. Tuleja zawierająca komorę wykonana jest z materiału: tkanina szklana-żywica epoksydowa. Po próbie napięciowej w fabryce i przekazaniu do eksploatacji w krótkim czasie powstaje wzdłuż tulei przeskok. W związku z tym na pozostałych wylłącznikach powtórzone próbie napięciową w wyniku czego stwierdzono:

- większość wylłączników nie wytrzymała próby
- na niektórych tulajach, po pozornie pozytywnym wyniku próby stwierdzono punktowe zciemnienia i wypalenia izolacji w pobliżu okuć. Reklamowane tuleje wymieniane zostały przez wy -

twórcę /na tuleje z analogicznego materiału/. Wyłączniki te po przejściu z wynikiem pozytywnym próby napięciowej pracują dobrze.

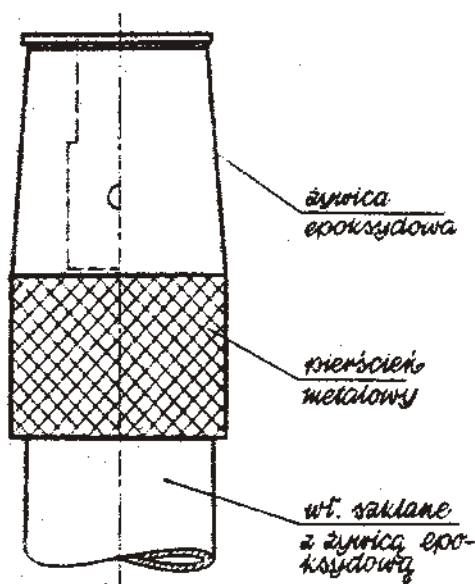
- b/ Drążki izolacyjne, manipulacyjne służące do obsługi urządzeń na napięcie znamionowe 220 kV firmy "Fameca" - Francja. Podczas próby napięciowej przy górnym okuciu wystąpiły miejscowe zaciemnienia izolacji wskazujące na działanie wskrośnych wyładowań niezupełnych. Niezależnie od spraw materiałowych przyczyną wpływającą na to zjawisko jest niewłaściwe rozwiązanie konstrukcyjne. Przekrój zakończenia drążka przedstawiono na rys.3.



Rys.3. Drążek izolacyjny firmy "Fameca".
Przekrój górnego okucia.

Wyładowania w izolacji powstają w miejscu skupienia linii sił pola elektrycznego, które wynika z umieszczenia okucia

wewnątrz drążka. Zewnętrzne umieszczenie okucia stosowane w drążkach produkcji krajowej /rys.4/ w znacznym stopniu łagodzi natężenie pola w tym miejscu.



Rys.4. Drążek izolacyjny UDI- "Aktywizacja".
Górne okucie.

Ponadto, z obu tych przykładów można wyciągnąć wspólny wniosek:

- dla izolacji szklano-epoksydowej próba napięciowa winna być stosowana tylko dla takich urządzeń, przy których możliwe jest jednoznaczne stwierdzenie braku częściowego uszkodzenia izolacji.

Niedostrzeżone, częściowe uszkodzenie stanowi groźbę awarii.

7. Izolacja generatorów.

Złożoność zjawisk w izolacji uzwojeń generatorów energetycznych powoduje, że brak jest jednoznacznych kryteriów określających stopień zagrożenia izolacji przez wyładowania niezupełne. Materiał i typ izo-

lacji, technologia wykonania, pokrycia półprzewodzące na wyprowadzeniach uzwojeń ze żłobków wpływają w zasadniczy sposób na powstawanie, poziom i charakter wyładowań niezupełnych. Trudne jest odróżnienie wyładowań, które są wstępem do uszkodzenia, od wyładowań, które zawsze występują w tym typie izolacji i nie stanowią zagrożenia, a tworzą swego rodzaju "poziom szumów".

W tablicy 1 zestawiono wyniki pomiarów $tg\delta$ wybranych generatorów reprezentujących trzy grupy, na które podzielono generatory pod względem wytrzymałości izolacji.

Porównując wartości można zauważyć wzrost $tg\delta$ na fazach, które uległy uszkodzeniu, zwłaszcza w przypadku generatora T 2 - GD I, generator T 1 - E1 odznacza się natomiast wysoką wartością $tg\delta$ przy napięciu fazowym. Oznacza to, że przy napięciu fazowym występowały intensywne wyładowania niezupełne.

W pozostałych grupach generatorów wnioski nie są tak jednoznaczne. W generatorach T4- E1 oraz T5 - E1 fazy przebite miały nieco większe wartości $tg\delta$ zwłaszcza przy napięciach fazowych, jednakże różnice te są nieznaczne.

W grupie c/ ujęte generatory, które po długoletniej eksploatacji wytrzymały bez przebicia próbę napięciową o bardzo wysokim napięciu $2,5 U_n$, a więc powyżej napięcia probierczego stosowanego dla nowych generatorów. Wartości $tg\delta$, zwłaszcza w przypadku T 3- GD I sugerują, że wyładowania niezupełne mogą grozić przebiciem izolacji.

Z powyższej analizy wynika, że wyładowania niezupełne w widoczny sposób wiążą się z uszkodzeniami izolacji, jednakże na podstawie badań $tg\delta$ jest trudno trafnie przewidzieć zagrożenie izolacji.

Tablica 1. Wyniki pomiarów tgδ izolacji generatorów.

Ip.	Generator	faza	tgδ mierzony przy napięciu		
			0,25 U _n	U _r	0,75 U _n
a/ Generatory, w których izolacja przebiła w czasie normalnej pracy					
1.	T 1 - E1	R	2,95	5,7	8,4
		S	2,35	5,3	9,4
		E1	3,2	5,9	9,7
2.	T 2 - Gd I	R	1,9	2,0	3,1
		S	2,2	2,6	3,5
		E1	4,7	4,9	5,3
b/ Generatory, w których izolacja przebiła w czasie okresowej próby napięciowej /1,5 U _n /					
3.	T 4 - E1	R	1,5	1,7	2,9
		S	1,5	1,8	3,1
		E1	1,5	1,6	3,8
4.	T 5 - E1	R	2,0	2,5	3,6
		S	2,3	2,7	3,5
		E1	2,1	2,7	3,65
c/ Generatory, które po długoletniej eksploatacji wytrzymały próbę napięciem 2,5 U _n					
5.	T 3r- Gd I	R	2,6	3,0	6,0
		S	3,0	3,2	5,2
		E1	2,8	3,2	5,2
6.	T 3w- Gd I	R	3,5	4,3	8,1
		S	3,7	4,2	8,4
		E1	3,3	3,7	5,6

x/ faza, na której izolacja uległa przebiciu