

doi:10.15199/48.2020.08.32

Pomiary i analiza wyładowań niezupełnych przy użyciu kamery wyładowań koronowych

Streszczenie. W artykule opisano metodę lokalizacji wyładowań niezupełnych z wykorzystaniem kamery wyładowań niezupełnych. Pozwala ona na szybkie wykrycie jednego z trzech wyładowań niezupełnych czyli wyładowań koronowych. Opisano również teorię powstawania wyładowań koronowych, oraz przedstawiono skutki działania wyładowań koronowych na osprzęt elektroinstalacyjny.

Abstract. The article describes the method of locating partial discharge using the partial discharge camera. It allows you to quickly detect one of three partial discharges or corona discharges. The theory of corona discharge was also described, and the effects of corona discharge on power lines were presented. (*Measurements and analysis of partial discharges by using a corona camera*).

Słowa kluczowe: wyładowania niezupełne, diagnostyka linii, wyładowania koronowe, izolacja powietrzna, kamera UV.

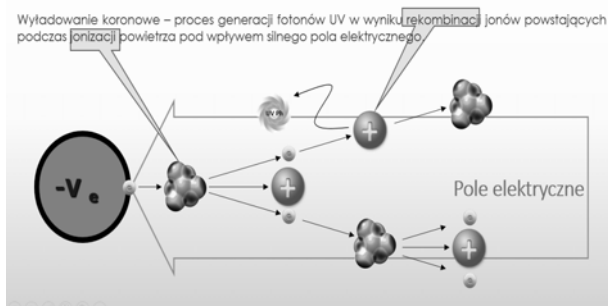
Keywords: partial discharges, lines diagnostics, corona discharges, air insulation, UV camera.

Wstęp

Przed służbami utrzymania ruchu stoi odpowiedzialne zadanie zapewnienia sprawnego działania systemu elektroenergetycznego. Awaryjne powodują ogromne straty wpływają również negatywnie na współczynniki niezawodności pracy sieci takie jak SAIDI oraz SAIFI. Powszechnie wiadomo, że taniej jest zapobiegać awariom, niż je usuwać. Ale jak dobrać sposób prowadzenia pomiarów, optymalny wobec potrzeb stale rozbudowującej się energetyki. Do głównych zadań służb inżynierskich, poza wykonywaniem prac remontowych, należą również działania prewencyjne. Mają one na celu zapobieganie pogorszeniu się stanu technicznego urządzeń elektroenergetycznych w ścisłym powiązaniu z diagnostyką. Zadania tego typu są realizowane m.in. poprzez monitorowanie wyładowań koronowych na osprzęcie linii średnich i wysokich napięć. Izolatory, szczególnie na liniach napowietrznych są narażone na szybsze procesy starzeniowe ze względu na zanieczyszczenie i warunki atmosferyczne. Wysoki poziom wilgotności przy jednoczesnym wystąpieniu zanieczyszczenia powodują powstawanie ścieżek przewodzących, które są źródłem częściowych wyładowań powierzchniowych i wyładowań koronowych. Dlatego w ostatnich latach obserwuje się rozwój technik monitorowania wyładowań koronowych za pomocą kamer UV [3, 10, 14, 15].

Opis zjawiska wyładowań koronowych

Wyładowanie koronowe jest procesem, w którym prąd zaczyna płynąć w neutralnym płynie, zwykle powietrzu z elektrody ulotowej podłączonej do wysokiego napięcia. Ruch ładunków jest możliwy dzięki jonizacji ośrodka, powodującej wytwarzanie plazmy wokół elektrody tak jak przedstawia rysunek 1 [2, 4, 6].



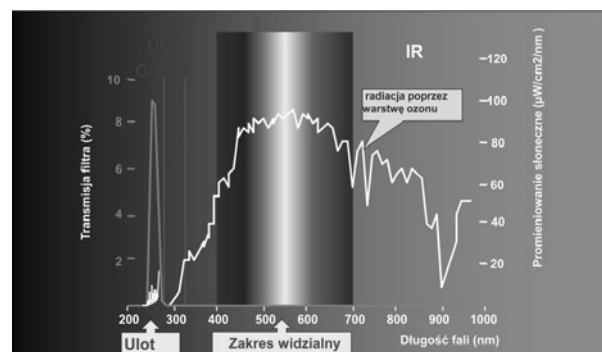
Rys.1. Mechanizm wyładowań koronowych [12, 13]

Powstające jony noszą ładunek elektryczny do obszaru niższego potencjału otaczającego elektrodę zbiorczą lub rekombinują tworząc ponownie neutralne atomy. Jeżeli elektroda ulotowa ma bardzo mały promień krzywizny, bo jest zaostzona lub ma postać cienkiego przewodu, wokół niej wytwarza się duży gradient potencjału. W takiej sytuacji może dojść do wyładowania w postaci iskry lub łuku elektrycznego. Jeżeli napięcie jest na tyle niskie, że nie pozwala na powstawanie kanału plazmy, ale dość wysokie, aby medium uległo częściowej jonizacji, powstaje wyładowanie koronowe [2,4]. Warunki niezbędne do wystąpienia wyładowania koronowego wyrażane są równaniem postaci:

$$(1) \quad U_0 = m_0 g_0 \delta r \ln\left(\frac{S}{r}\right)$$

gdzie: U_0 – napięcie ulotu, m_0 – współczynnik nieregularności przewodów, r – promień przewodu, S – odległość między przewodami, δ – współczynnik gęstości, g_0 – krytyczny gradient potencjału [1, 2, 4]

W normalnych warunkach powietrze wokół przewodników zawiera cząstki zjonizowane i obojętne utrzymujące pewną równowagę. Jednak przy zastosowaniu wyższych napięć w powietrzu wokół przewodnika powstaje gradient potencjału, który indukuje intensywną jonizację. Natężenie pola elektrostatycznego wokół przewodnika jest nierównomierne: ma maksymalną siłę na powierzchni przewodnika. Gdy poziom napięcia w przewodniku wzrasta, a natężenie pola krytycznego zbliża się do około 30 kV na cm, pojawiają się początkowe wyładowania, ale tylko na powierzchni przewodnika. Widmo wyładowań obrazuje rysunek 2 [2, 4].

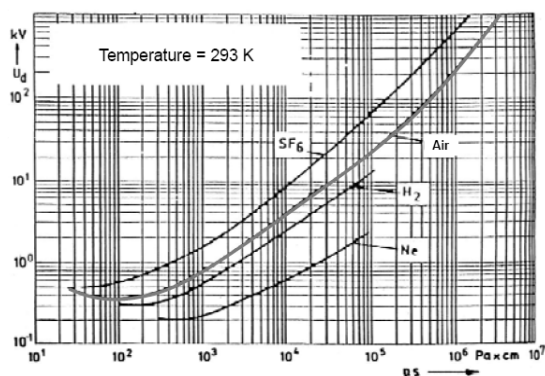


Rys.2. Widmo elektromagnetyczne wyładowań koronowych [12, 13]

Jeśli napięcie zostanie zwiększone, nastąpi jonizacja lawinowa. W rosnącym polu elektrycznym wolne elektrony szybko przemieszczają się do i z przewodnika przez przemienne pole elektryczne, uzyskując wystarczającą energię kinetyczną, aby wydobyć więcej elektronów i jonów z neutralnych cząsteczek, z którymi się zderzają. Energia wykorzystywana do ekstrakcji elektronów jest następnie rozpraszana jako fotony UV, gdy elektrony i jony są przyciągane do siebie i rekombinują (rys.1) w celu utworzenia neutralnej cząsteczki. Ten proces jonizacji (rekombinacji) kumuluje się, powodując powstanie korony lub iskier między przewodami [1, 2, 6, 7, 12, 13].

Czynniki wpływające na poziom wyładowań koronowych w przewodniku

1. Warunki atmosferyczne - ponieważ korona powstaje w wyniku jonizacji cząsteczek powietrza, stan fizyczny atmosfery (rys.3.) wpływa na powstanie korony: ciśnienie, temperatura, wilgotność itp., które wpływają na gęstość elektronów. Aby pojawiła się korona, wartość gradientu potencjału na przewodniku musi być równa wytrzymałości powietrza na przebicie (równ.1). Wartość ta jest wprost proporcjonalna do gęstości powietrza co zostało przedstawione na rysunku 3 [2, 4, 5, 12, 13].



Rys.3. Zależność napięcia przebicia różnych gazów w funkcji ciśnienia [2, 13]

2. Rozmiar i kształt przewodnika - rozmiar i waga sprzętu elektrycznego drastycznie zmniejszyła się na przestrzeni lat, wymagając mniejszych połączeń wysokiego napięcia w takim profesjonalnym sprzęcie i urządzeniach. Nieuniknioną konsekwencją zmniejszenia średnicy przewodnika jest tworzenie się korony. Skrócona żywotność materiałów izolacyjnych (fot. 2, 3, 5) nakłada ograniczenia na miniaturyzację i wybór materiałów. Konwencjonalne kable wysokiego napięcia o dużych rozmiarach, gdy są mocno zgięte, są jeszcze bardziej podatne na naprężenia koronowe (w punktach zgięcia) i wczesne uszkodzenie. Korona zależy od wielkości pola elektrycznego i jednorodności. Jeśli pole jest nierównomierne, wzrost napięcia spowoduje najpierw wyładowanie w punktach o największym natężeniu pola elektrycznego, czyli punktach zginających się i o ostrych krawędziach. Nierówność powierzchni przewodnika zmniejsza wartość napięcia przebicia. W ten sposób splecione przewody o nieregularnych powierzchniach dają więcej korony niż przewody stałe. Jednak wszystkie przewody stosowane w liniach napowietrznych są skręcone w celu zwiększenia elastyczności. Zanieczyszczenia na przewodach same w sobie nie zmieniają drastycznie krytycznego napięcia przebicia ($m_0 = 0,98-0,92$ dla zabrudzonych przewodów), jednak jeśli brud zostanie osadzony nierównomiernie na powierzchni przewodu, wpłynie to na regularność pola elektrycznego i prowadzi do emisji wyładowania

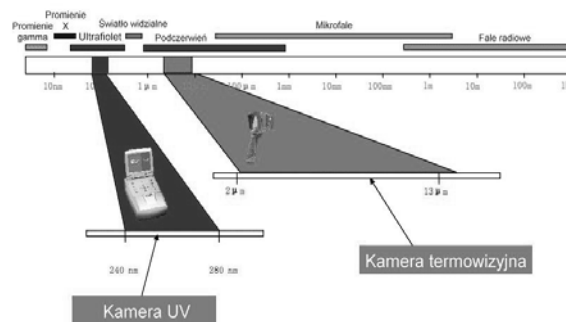
koronowego. W zanieczyszczonych obszarach krople deszczu, które gromadzą się na dolnej stronie przewodów, wysychają z powodu ciepła przewodnika, pozostawiając resztki brudu / soli [2, 4, 5, 12, 13].

3. Odstęp między przewodnikami - duża odległość między przewodnikami zmniejsza naprężenia elektrostatyczne i redukuje koronę. Jeśli odstęp między przewodnikami są duże w porównaniu do ich średnic, może nie występować żaden efekt koronowy [2, 4, 5, 12, 13].

4. Napięcie sieciowe - napięcie ma duży wpływ na zjawiska koronowe. Przy niskim napięciu powietrze otaczające przewodnik nie ulega zmianie, a zatem nie powstaje korona. Jednak na powierzchni przewodnika występuje napięcie elektrostatyczne [2, 4, 5, 12, 13].

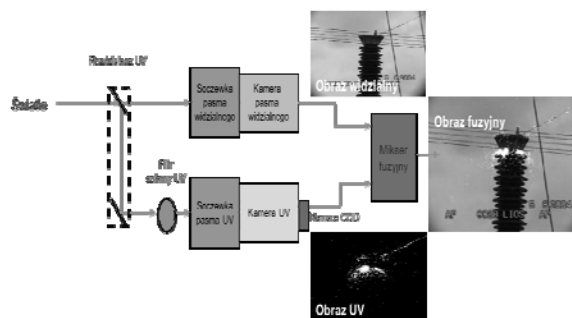
Pomiary z wykorzystaniem kamery UV

W przypadku termografii różnica temperatur jest głównym kryterium określającym dotkliwość usterki (rys.4). Problem polega na tym, że należy to rozważyć jak najszybciej [7, 8]



Rys.4. Fale elektromagnetyczne różnych długości [11]

Z koroną sytuacja jest inna: ponieważ nie ma przyjętych standardów i dyrektyw, tak jak w IR, interpretacja danych koronowych wymaga wiedzy i doświadczenia. Inżynier konserwacji musi zostać przeszkolony w rozpoznawaniu pilnych przypadków. Ważne jest, aby zdać sobie sprawę, że pomimo opcji zliczania kamera jest narzędziem do lokalizowania i pozycjonowania wyładowania koronowego i wyładowania łukowego. W przypadku wyładowania koronowego lokalizacja jest równie ważna jak siła. Budowę kamery UV przedstawia rysunek 5 [9, 10, 12, 13].



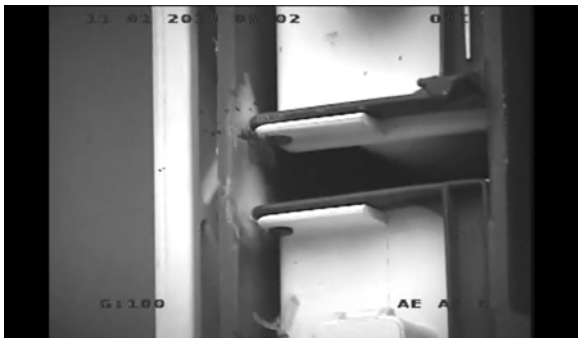
Rys.5. Budowa kamery UV [12, 13]

W PGE Dystrybucja S.A. Rejon Energetyczny Lublin-Miasto od kilku lat wykorzystuje kamery wyładowań niepełnych do inspekcji swojej sieci. Na fotografii 1 przedstawiono kamerę wykorzystywaną przez pomiarowców. Pomimo iż nie jest to jak na tą chwilę wymagane takie pomiary stały się nieodłącznym elementem zabiegów eksploatacyjnych. Poniższe przykłady obrazują jak ważne są to pomiary dla utrzymania niezawodności dostaw energii.



Fot. 1. Kamera UV Daycor microm (fot. Durak S., Gustaw M.)

W pierwszym przykładzie badania poddana została Rozdzielnica SN zainstalowana w złączu kablowym ZKSN o numerze 1831 w Lublinie. Oględziny wykonywane zgodnie z czasokresem zostały wzbogacone o pomiar kamerą UV typu Ofil UVolle produkcji izraelskiej. Na fotografii nr 2 widać wyraźnie wyładowania koronowe, których przyczyną jest degradacja materiału izolacyjnego. Należy również zwrócić uwagę, iż pomiary były wykonywane w warunkach dużej wilgotności co dodatkowo komplikuje detekcję wyładowań. Decyzja służb inżynierskich o bezwzględnej wymianie uszkodzonej rozdzielniczy zapobiegła nieuniknionej awarii i wielogodzinnej przerwy w dostawie energii w mieszkaniowej części Lublina.



Fot.2. Wyładowania koronowe na rozdzielni SN (fot. Durak S., Gustaw M.)

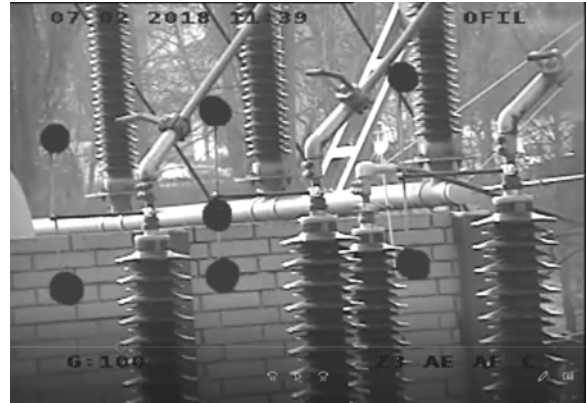
Kolejnym przykładem zastosowania kamer wyładowań koronowych jest pomiar wykonany w złączu kablowym ZKSN o numerze 1450. Pomiar zostały wykonane na moście wykonanym z szynoprzewodów łączącym dwie sekcje 15 kV. Co zostało zobrazowane na fotografii 3.



Fot.3. Wyładowania koronowe na moście SN, (fot. Durak S., Gustaw M.)

W tym przypadku korzyści płynące z pomiarów wyładowań koronowych były podwójne. Ponownie pozwoliły na uniknięcie awarii w sieci elektroenergetycznej. Były również niepodważalnym dowodem, który zmusił wykonawcę do naprawy gwarancyjnej. Należy również dodać iż badany obiekt znajduje się w przemysłowej części Lublina zwanej „strefą ekonomiczną” i jakiegokolwiek przerwy w tej części miasta mają kolosalny wpływ na współczynniki niezawodności SAIDI i SAIFI.

Ostatnim przykładem jaki należy przedstawić to pomiar wykonany na obiekcie typu GPZ – główny punkt zasilający co przedstawia fotografia 4.



Fot.4. Wyładowania koronowe na antenie nadawczej (fot. Durak S., Gustaw M.)

W zaistniałej sytuacji pomiar został wykonany z powodu uciążliwości jakimi były zakłócenia fal radiowych w bliskiej okolicy oraz towarzyszący im hałas. W wyniku przeprowadzonych badań stwierdzono, że przyczyna nie tkwi w obiekcie energetycznym, lecz w antenie nadawczej. Pozwoliło to na uniknięcie kosztownych i bezpodstawnych odszkodowań ze strony PGE.

Wnioski

W układach elektrycznych średniego i wysokiego napięcia nieuniknione są wyładowania koronowe, ale można ją kontrolować, jeśli zostaną odpowiednio wcześniej wykryte. Pomimo braku standardów, które interpretują wyniki zliczania, wyniki są przydatne do porównywania intensywności koron, obserwowania trendów defektów powodujących koronę oraz do priorytetowego traktowania prac konserwacyjnych [12, 13].



Fot.5. Uszkodzenie na powierzchni izolatora [13]

Korona generuje żrący ozon, tlenki azotu, a w wilgotnych warunkach kwas azotowy, który uszkadza końcówkę izolatora i zmienia właściwości izolatora (fot.5). Wyładowanie koronowe zakłóca transmisje radiowe i generuje hałas, który wywołuje skargi (fot.4).

W badaniu przeprowadzonym przez CEPRI – China Electric Power Research Institute, który został zaprezentowany na konferencji SPIE przeanalizowano zastosowanie wykorzystywanych w oddziale lubelskim PGE Dystrybucja S.A. kamer DayCor® Superb firmy Ofil. Celem badań było ustalenie zasad działania uwzględniających wpływ czynników zewnętrznych, takich jak: odległość inspekcji, kąt inspekcji, ustawienia wzmocnienia kamery i warunki otoczenia. W badaniu stwierdzono, że podczas przeprowadzania porównawczej kontroli kamery koronowej warunki powinny być utrzymywane na podobnym poziomie (jeśli nie identyczne) i zawsze dokumentowane. Zastosowanie kamer do detekcji UV jest wskazane tam, gdzie niezawodność i pewność zasilania są kluczowe. Korzyści płynące z ich wykorzystania kamer UV [12,13]:

- nieniszcząca technika pomiaru
- bezpieczna, niezawodna, czuła w dowolnych warunkach
- oświetlenia
- redukcja kosztów utrzymania ruchu
- unikanie nieplanowanych wyłączeń
- wydłużenie czas życia urządzeń w tym drogiej aparatury wysokonapięciowej takiej jak rozdzielnice średniego napięcia
- wykrywanie źródeł zakłóceń radioelektrycznych.

Autorzy: dr hab. inż. Janusz Partyka, prof. PL, Politechnika Lubelska, Wydział Elektrotechniki i Informatyki, Katedra Urządzeń Elektrycznych i Techniki Wysokich Napięć, ul. Nadbystrzycka 38a, 20-618 Lublin, E-mail: j.partyka@pollub.pl; mgr inż. Sławomir Durak, mgr inż. Mariusz Gustaw, PGE Dystrybucja S.A. Oddział Lublin, ul. Garbarska 21a, 20-340 Lublin, E-mail: slawomir.durak@pgedystrybucja.pl, mariusz.gustaw@pgedystrybucja.pl

LITERATURA

- [1] Florkowska B., Florkowski M., Zydrón P., Measurements and analysis of partial discharges in high voltage insulating systems at exploitation stresses AGH University of Science and Technology, Dept. of Electrical and Power Engineering, Kraków 2010 (in Polish).
- [2] Florkowska B., Furgał J., Technika wysokich napięć, podstawy teoretyczne i laboratorium, rok wydania: 2017
- [3] Czech J., Eksploatacyjny nadzór urządzeń – praktyczne metody realizacji, Utrzymanie ruchu, 2/2012, 12-14
- [4] Grill P., *Electrical Power Equipment Maintenance And Testing*, Second Edition, CRC Press 2009
- [5] Ruff D., How the DayCor Camera saved BPA's Bacon, case study that demonstrates the usefulness of the DayCor camera in solving a tricky transmission problem, UGM 2004 USA
- [6] Frącz P., Analiza powtarzalności pomiarów sygnałów optycznych emitowanych przez wyładowania elektryczne w izolacji powietrznej, *Przegląd Elektrotechniczny*, 86 (2010), no. 7, 128-130
- [7] Łatka M., Piechota T., Electric power quality assessment based on thermographic measurements, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), no. 2, 140-143
- [8] Madura H., Sosnowski T., Bieszczad G., Termowizyjne kamery obserwacyjne - budowa, zastosowania i krajowe możliwości realizacji, *Przegląd Elektrotechniczny*, 90 (2016), no. 9, 5-8
- [9] Frącz P., Urbaniec I., Foltys J., Comparison of two methods for detection of UV signals emitted by PD on HV insulators made of porcelain, *Przegląd Elektrotechniczny*, 92 (2016), no. 8, 102-104
- [10] Kuniewski M., Zydrón P., Konieczny W., Riches M., Zastosowanie bardzo szybkiej kamery UV dla obserwacji rozwoju wyładowań elektrycznych w układzie elektrod ostrzeplaszczysta, *Przegląd Elektrotechniczny*, 94, no. 10/2018, 148-151
- [11] <https://www.sonel.pl> 01.05.2019
- [12] <https://www.ofilsystems.com>, 12.05.2019
- [13] <https://poltradedtech.com>, Przemysław Widziewicz, materiały szkoleniowe dla PGE Dystrybucja S.A., Lublin maj 2019
- [14] PN-EN 60270:2003P Wysokonapięciowa technika probiercza - Pomiary wyładowań niezupełnych
- [15] N SEP-E-004 Wydanie II Elektroenergetyczne i sygnalizacyjne linie kablowe. Projektowanie i budowa