

Ocena poprawności montażu osprzętu kablowego w kablach SN z izolacją XLPE pod kątem występowania wyładowań niezupełnych

Streszczenie. W artykule zaproponowano metodę diagnostyki linii kablowych SN z wykorzystaniem analizy fazowo – rozdzielczej po montażu osprzętu kablowego. Program badań obejmował próby dla kabla XRUHAKXS 1x240/25 z wykorzystaniem metody elektrycznej i wymuszenia napięciem probierczym sinusoidalnie zmiennym. W wyniku przeprowadzonych pomiarów wyznaczono wartości ładunku pozornego oraz ich obrazy fazowo-rozdzielcze. Przedstawione wyniki eksperymentu wykazały wpływ zamodelowanego uszkodzenia w mufie kablowej SN na poziom mierzonych wyładowań niezupełnych. W ramach zrealizowanych prac dokonano także próby oceny i wskazania miejsca uszkodzenia badanego osprzętu kablowego.

Abstract. The article proposes a method of diagnosing MV cable lines with the use of phase-distribution analysis after the installation of cable accessories. The test program included tests for the XRUHAKXS 1x240/25 cable using the electrical method and excitation with a sinusoidal alternating test voltage. As a result of the performed measurements, the values of apparent charge and their phase-resolution images were determined. The presented results of the experiment showed the influence of the modeled damage in the MV cable joint on the level of the measured partial discharges. As part of the work carried out, attempts were also made to assess and indicate the location of damage to the tested cable accessories. (*Assessment of the correctness of installation of cable accessories in MV cables with XLPE insulation in terms of partial discharges*).

Słowa kluczowe: linia kablowa SN, wyładowania niezupełne, diagnostyka, osprzęt kablowy.

Keywords MV cable line, partial discharges, diagnostics, cable accessories.

Wstęp

Linie kablowe średniego napięcia (SN) są bardzo ważnym elementem sieci energetycznej tzw. Operatorów Systemów Dystrybucyjnych (OSD). Budowane są tam, gdzie nie ma możliwości budowy linii napowietrznych. Zasilają one głównie odbiorców w obszarach silnie zurbanizowanych o dużej gęstości zaludnienia, gdzie przerwa w dostawie energii elektrycznej, związana z awarią, może mieć bardzo negatywne skutki. Obecnie budowane linie kablowe SN z izolacją XLPE wypierają kable z izolacją PILC oraz szczególnie awaryjne kable z izolacją z polietylenu plastycznego (PE) [1, 2].

Jedną z przyczyn awarii elektroenergetycznych linii kablowych SN są uszkodzenia osprzętu kablowego (rys.1). Na tą sytuację mają wpływ przede wszystkim anomalie pracy sieci (zwarcia, przeciążenia) i związane z nimi efekty cieplne [3, 4]. Z tego względu powinno się dążyć do jak najwyższej jakości i trwałości wykonania muf i głowic kablowych. Obecny rozwój technologii i materiałów szczególnie sterujących wykorzystywanych w konstrukcjach osprzętu kablowego umożliwia uproszczenie procesu jego montażu. Pomimo starań producentów i zespołów elektromonterów wykonujących prace montażowe nadal występują problemy z przekroczeniem dopuszczalnych wartości natężenia pola elektrycznego E i pojawiania się wyładowań niezupełnych (WNZ) w obszarach głowic i muf kablowych SN na pewnej populacji linii kablowych SN.



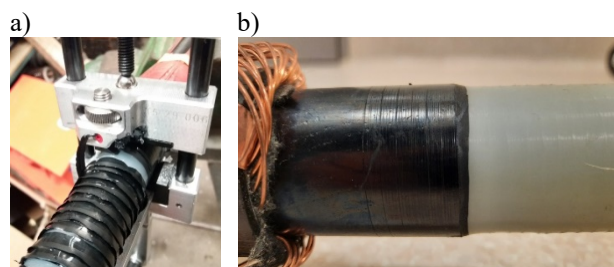
Rys.1. Przykład uszkodzonej mufy kablowej wykonanej na kablu typu XRUHAKXS 1x240/50 mm²

Prowadzone aktualnie na świecie prace badawcze skupiają się na ocenie możliwości rozpoznawania defektów kabli i osprzętu kablowego w izolacji XLPE [5–7], a

prowadzone przez OSD diagnostyka kabli SN oparta jest w głównej mierze na pomiarach WNZ oraz współczynnika stratności dielektrycznej (tgδ) [8, 9]. Od pewnego czasu prowadzi także się badania eksperymentalne nad alternatywnymi metodami monitorowania WNZ w czasie rzeczywistym za pomocą metod HF i UHF (poza normą IEC60270) [10–12].

Dostępnych jest stosunkowo niewiele publikacji przedstawiających wyniki oceny i analiz wpływu sposobu i jakości montażu osprzętu kablowego na występujące w kablach SN wyładowania elektryczne. Przedmiotem niniejszej publikacji jest zatem zwrócenie uwagi na aspekty poprawnego sposobu montażu głowic kablowych, co przekłada się bezpośrednio na generowanie i rozwój wewnętrznych WNZ w całej linii kablowej SN. Przeprowadzane w ramach podjętego eksperymentu próby jednoznacznie wykazały, że błędne wykonanie mufy lub głowicy kablowej ma bezpośredni wpływ na jej dalszą niezawodną pracę.

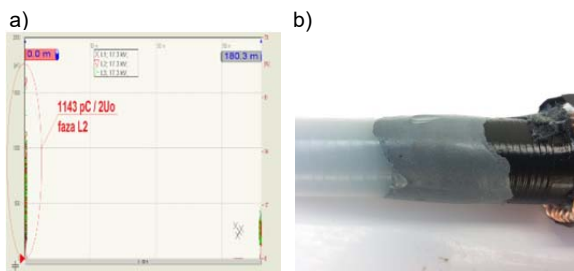
Podczas prac montażowych dotyczących przygotowania kabli SN do montażu osprzętu kablowego w terenie zauważono, że np. niektóre ze stosowanych narzędzi do usuwania ekranu wytłaczanego na izolacji roboczej kabla uszkodzają tą powierzchnię (rys.2).



Rys.2. Proces przygotowania kabla SN do montażu osprzętu: a) narzędzie do usuwania zewnętrznego ekranu na izolacji kabla, b) uszkodzona powierzchnia ekranu po użyciu narzędzia

Przeprowadzone oględziny na nowo wykonanych głowicach kablowych SN, lecz niedopuszczonych do eksploatacji, wielokrotnie wykazały uszkodzenia

powierzchni ekranów i deformacje mantys sterujących (rys.3).



Rys.3. Przykład błędnego wykonania konektorowej głowicy kablowej SN: a) wynik próby diagnostycznej kabla z głowicą, b) uszkodzenie powierzchni ekranu i taśmy sterującej przez monterów przy montażu elementów głowicy

Prezentowane powyżej uszkodzenia są bardzo trudne do usunięcia bez ponownego przygotowania kabla do montażu, co wiąże się z wycięciem kolejnego jego odcinka. Niestety, w warunkach terenowych nie zawsze jest taka możliwość, gdyż wiąże się to z podciągnięciem zapasu kabla, oczywiście jeżeli został on pozostawiony.

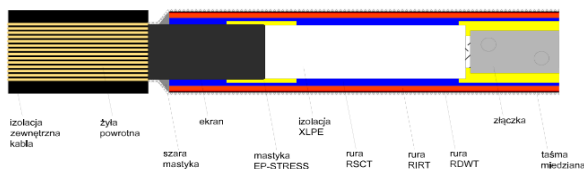
W niniejszym artykule podjęto próbę weryfikacji wpływu uszkodzeń ekranu kabla z izolacją XLPE na poziom generowanych w obrębie mufy kablowej SN wyładowań elektrycznych. Głównym celem zrealizowanych w ramach artykułu badań było zwrócenie uwagi na poprawność montażu muf i głowic kablowych SN. Z obserwacji autorów publikacji wynika, że zagadnienia te są niestety dość często pomijane i lekceważone przy budowie linii kablowych SN. Wykonany eksperyment jednoznacznie wykazał, że jednym z najsłabszych elementów linii kablowych są jej połączenia i zakończenia, a występujące w kablach WNZ generowane są zwykle w niepoprawnie zmontowanych mufach i głowicach.

Przyjęta metodologia pomiarowa

Badania mające na celu określenie wpływu jakości przygotowania kabla SN do montażu przeprowadzono z użyciem termokurczliwej mufy typu 24-EPJ-1/120-240 firmy Energy Partners (rys.4) i odcinka kabla typu XRUHAKXS 1x240/25 z izolacją z polietylenu usieciowanego (XLPE) wraz z ekranem półprzewodzącym wytłaczanym (rys.5).



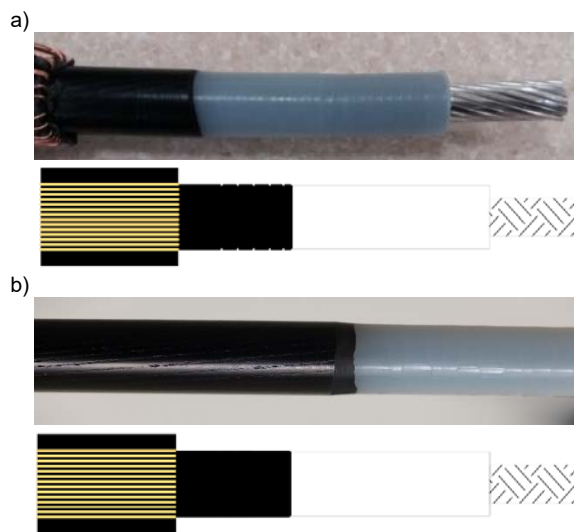
Rys.4. Mufa kablowa typu 24-EPJ-1/120-240 po montażu w terenie



Rys.5. Model przekroju badanej mufy kablowej wykonanej na kablu XRUHAKXS 1x240/25 bez rury osłonowej RIMT

Badany odcinek kabla zakończono obustronnie głowicami kablowymi typu 24-EPOT-1/70-240/(U), które zostały wykonane, tak aby nie wprowadzały dodatkowych zakłóceń do układu pomiarowego. Analiza wyników badań kalibracyjnych nie wykazała przekroczenia wartości ładunku pozornego powyżej 10 pC dla napięcia probierczego wynoszącego dwukrotność napięcia znamionowego (U_0).

Po przeprowadzonej kalibracji, kabel przecięto na dwie części, które następnie połączono z wykorzystaniem mufy 24-EPJ-1/120-240. Na potrzeby eksperymentu badawczego użyto dwa modele kabla z różnym przygotowaniem ekranu półprzewodzącego, który zdjęto korowarkami o odmiennym stanie technicznym (rys.6).



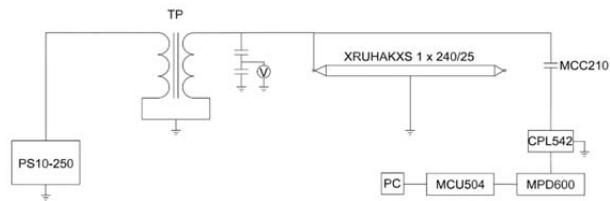
Rys.6. Modele zakończenia kabla typu XRUHAKXS 1x240/25 mm²: a) z uszkodzoną powierzchnią ekranu, b) bez uszkodzonej powierzchni ekranu

Badania weryfikujące obejmowały próby kabla XRUHAKXS 1x240/25 z wykorzystaniem metody elektrycznej (ME) i wymuszenia napięciem probierczym (U_p) sinusoidalnie zmiennym o częstotliwości 50 Hz dla trzech wartości napięć: 12, 20 i 24 kV, odpowiadającym napięciom U_0 , $1,73 U_0$ oraz $2 U_0$, które mogą wystąpić w rzeczywistej sieci elektroenergetycznej SN. Próby przeprowadzono dla dwóch następujących konfiguracji pomiarowych:

- kabel XRUHAKXS 1x240/25 mm², 12/20 kV z głowicami 24-EPOT-1/70-240/(U) i uszkodzoną powierzchnią ekranu w miejscu montażu mufy 24-EPJ-1/SWS – próby z mastykami sterującymi EP-STRESS 30, rurą sterującą RSCCT oraz kompletnie złożoną mufą,
- kabel XRUHAKXS 1x240/25 mm², 12/20 kV z głowicami 24-EPOT-1/70-240/(U) bez uszkodzeń powierzchni ekranu w miejscu montażu mufy 24-EPJ-1/SWS – próby z mastykami sterującymi EP-STRESS 30, rurą sterującą RSCCT oraz kompletnie złożoną mufą.

Badany model kabla z założoną mufą kablową zasilany był z transformatora probierczego TP o przekładni 0,22/110 kV poprzez programowalny pulpit sterowniczy PS10-250. Do pomiarów WNZ wykorzystano system MPD 600 firmy Omicron, w skład którego wchodził bezstratny kondensator sprzęgający MCC210 o pojemności 1 nF, czwórnik CPL542 o pojemności 30 μ F oraz jednostka MPD 600. Akwizycja sygnałów pomiarowych oraz sterowanie realizowane były w trybie "on-line" przez komputer PC i moduł MCU 504 (rys.7).

Wykonanie pomiarów WNZ poprzedzono wybraniem częstotliwości i szerokości pasma pomiarowego. Pasma to zostało dobrane eksperymentalnie celem uzyskania najkorzystniejszego poziomu sygnału w stosunku do szumu tła. Przyjęte pasmo pomiarowe było wspólne dla wszystkich badanych zgodnie z normą IEC 60270 modeli. Próby dla każdej z konfiguracji rozpoczynano od kalibracji całego układu pomiarowego. Uzyskane dane pomiarowe o czasie rejestracji 1 minuty były następnie przetwarzane i analizowane za pomocą programu Omicron Software for MPD oraz pakietu MATLAB.



Rys.7. Schemat wykorzystanego układu pomiarowego

Analiza otrzymanych wyników pomiarowych

W wyniku przeprowadzonych z użyciem metody ME pomiarów uzyskano wartości ładunków średnich (Q_{avg}) i maksymalnych (Q_{max}) oraz obrazy fazowe WNZ (PRPD) dla poszczególnych prób. Uzyskane w trakcie eksperymentu wyniki przedstawiono w tabelach 1, 2 oraz na rysunkach 9–11.

Tabela 1. Wyniki pomiarów ładunku Q w zależności od napięcia probierczego U_p dla kabla XRUHAKXS 1x240/25 z uszkodzeniem ekranu półprzewodzącego

U_p [kV]	Mastyka EP-STRESS 30		Rura RSCT		Mufa kompletna	
	Q_{avg} [pC]	Q_{max} [pC]	Q_{avg} [pC]	Q_{max} [pC]	Q_{avg} [pC]	Q_{max} [pC]
12	167	283	58	281	36	200
20	436	739	118	386	108	206
24	632	1123	155	452	148	301

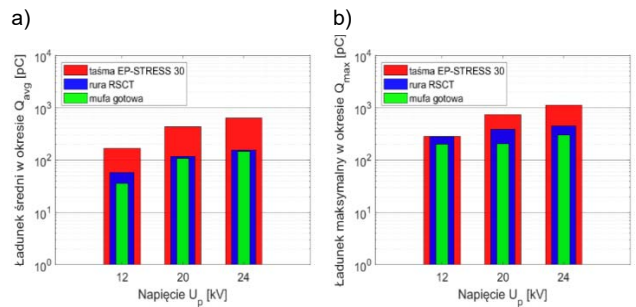
Tabela 2. Wyniki pomiarów ładunku Q w zależności od napięcia probierczego U_p dla kabla XRUHAKXS 1x240/25 bez uszkodzenia ekranu półprzewodzącego

U_p [kV]	Mastyka EP-STRESS 30		Rura RSCT		Mufa kompletna	
	Q_{avg} [pC]	Q_{max} [pC]	Q_{avg} [pC]	Q_{max} [pC]	Q_{avg} [pC]	Q_{max} [pC]
12	126	351	12	21	7	13
20	281	512	17	59	7	15
24	383	680	64	174	9	16

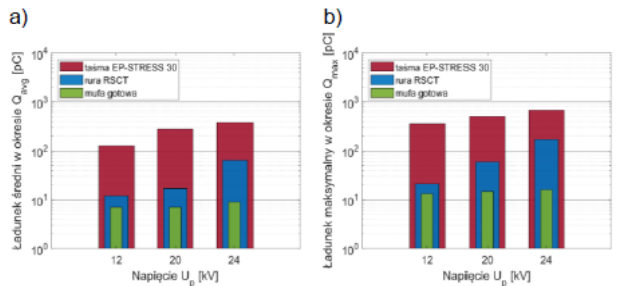
Na podstawie zrealizowanych pomiarów w konfiguracji z mastykami (taśmami sterującymi) EP-STRESS 30, analiza PRPD wykazała formowanie się WNZ w ujemnym półokresie z jednakową intensywnością 30 zdarzeń/s i amplitudą ok. 200 pC dla kabla z uszkodzoną i bez uszkodzonej powierzchni ekranu półprzewodzącego w zakresie kątów fazowych 210°- 230° i $U_p = 12$ kV. Takie wzorce WNZ mogą świadczyć o występowaniu pustej przestrzeni pomiędzy mastyką a powierzchnią ekranu, co jest następstwem niepoprawnego uformowania taśmy sterującej przez monter lub formowaniem się wyładowań typu koronowego. Zwiększanie napięcia zasilania do 20 kV spowodowało pojawienie się WNZ w dziedzinach kąta fazy 0°-90° i 180°-270° z większą amplitudą i intensywnością w ujemnym półokresie, co można zinterpretować jako pojawienie się wyładowań typu powierzchniowego (rys. 10a, 11a).

Analiza wartości Q_{avg} i Q_{max} wykazała zwiększone ich wartości na powierzchni kabla z uszkodzonym ekranem. Niejednorodność pola elektrycznego w obszarze mikrostrzy na uszkodzonej powierzchni, których nie zamaskowały mastyki sterujące, spowodowała dwukrotne zwiększenie się poziomu ładunku, przy wartości U_p powyżej 12 kV.

W układzie z zamontowaną rurą sterującą RSCT, dla układu z prawidłowo przygotowaną powierzchnią kabla i $U_p = 20$ kV, zarejestrowano symetryczne WNZ w obydwóch półokresach w dziedzinie fazy ok. 30 i 100° oraz 210 i 280° o bardzo małej amplitudzie i intensywności (rys. 11b). Na uwagę zasługuje powtórzenie się formy WNZ ze wcześniejszej konfiguracji badawczej w ujemnym półokresie.

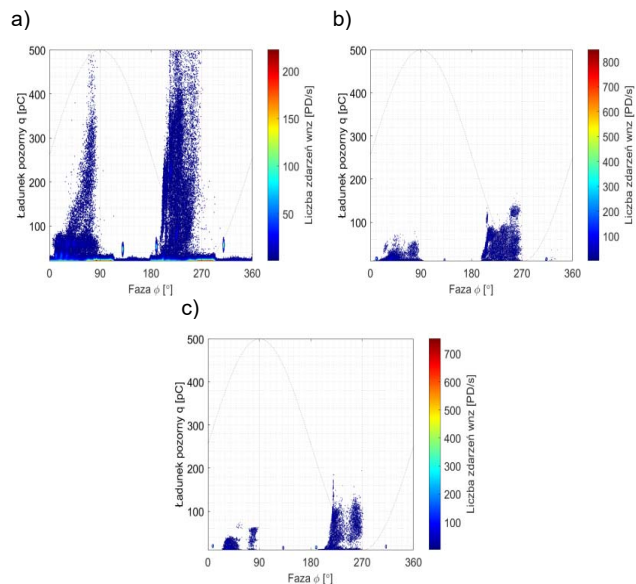


Rys.8. Zmierzona wartość ładunku Q dla kabla z uszkodzoną powierzchnią ekranu półprzewodzącego: a) Q_{avg} , b) Q_{max}



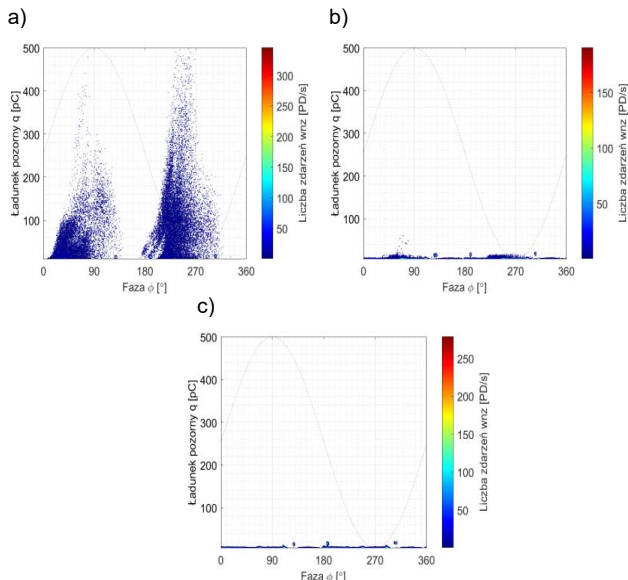
Rys.9. Zmierzona wartość ładunku Q dla kabla bez uszkodzonej powierzchni ekranu półprzewodzącego: a) Q_{avg} , b) Q_{max}

Zbyt krótki czas pomiędzy montażem rury sterującej, a pomiarem WNZ, spowodował niewystarczające jeszcze uformowanie się mastyki sterującej EP-STRESS 30. W przypadku układu z uszkodzoną powierzchnią ekranu zarejestrowano natomiast wyraźny wzrost amplitudy WNZ wraz ze wzrostem U_p dla kątów fazy 10°-90° i 190°-270° (rys.10b). Zarejestrowany przebieg może być efektem występowania WNZ typu powierzchniowego, które generowane są wzdłuż powierzchni izolacji przylegającej do zakończenia ekranu półprzewodzącego.



Rys.10. PRPD dla kabla z uszkodzoną powierzchnią ekranu półprzewodzącego i napięcia probierczego 20 kV: a) mantyna EP-STRESS 30, b) rura sterująca RSCT, c) kompletna mufa

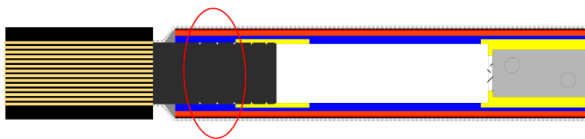
Analizując wartości Q_{avg} uzyskane dla przypadku kabla z poprawnie przygotowaną powierzchnią ekranu i $U_p = 20$ kV należy stwierdzić, że ich poziom zmniejszył się do wartości poziomu tła. Większa wartość ładunku maksymalnego wynika z punktowych zdarzeń WNZ zarówno w dziedzinie amplitudy i fazy.



Rys.11. PRPD dla kabla bez uszkodzonej powierzchni ekranu o napięcia probierczego 20 kV: a) mantyna EP-STRESS 30, b) rura sterująca RSCC, c) kompletna mufa

Dla scenariusza połączenia kablowego, wykonanego z użyciem kompletnej mufy, w przypadku kabla z nieuszkodzoną powierzchnią ekranu, nie zarejestrowano WNZ powyżej poziomu tła (rys.11c). Pojawiające się punktowe WNZ o maksymalnej amplitudzie 16 pC wynikają z zakłóceń pracy transformatora probierczego TP i innej aparatury użytej do badań. Dla porównania, dla układu z zamodelowanym uszkodzeniem ekranu, przy $U_p=12$ kV zarejestrowano przebiegi o bardzo wąskiej dziedzinie kąta fazy $250^\circ-270^\circ$ oraz intensywności w ujemnym półokresie o średniej amplitudzie 36 pC. Zwiększenie wartości U_p kolejno do 20 kV i 24 kV spowodowało natomiast pojawienie się WNZ o zbliżonej amplitudzie, jak w przypadku poprzedniej konfiguracji, czyli z założoną rurą RSCC. W tym scenariuszu zmianie uległa jednak dziedzina fazy mierzonych WNZ, odpowiednio: $35^\circ-90^\circ$ i $220^\circ-270^\circ$ dla napięcia 20 kV oraz $20^\circ-90^\circ$ i $205^\circ-270^\circ$ (rys. 10b i rys. 10c).

Przeprowadzone badania jednoznacznie wykazały, że pomimo poprawnego nałożenia rury sterującej RSCC na uszkodzony ekran półprzewodzący kabla XRUHAKXS 1x240/25 nie jest możliwe zniwelowanie jego nierówności, które powstały na skutek użycia nieodpowiedniego narzędzia korującego (rys. 13).



Rys.13. Model badanej mufy kablowej wykonanej na kablu XRUHAKXS 1x240/25 z uszkodzonym ekranem półprzewodzącym

Należy podkreślić, że rura sterująca RSCC nie jest na tyle plastyczna, jak taśma EP-STRESS 30, aby w pełni wypełnić mikro uszkodzenia ekranu mufowanego kabla SN. W uszkodzeniach ekranu mogą tworzyć się zatem kawery powietrzne, w których wstępuje znacznie wyższe natężenia pola elektrycznego, czego negatywną konsekwencją może być generacja i relatywnie szybki rozwój WNZ, a ostatecznie awaria danej linii kablowej.

Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań dotyczących problematyki poprawności i staranności montażu osprzętu

kablowego, w aspekcie ograniczania występowania WNZ w głowicach i mufach SN. Wykonane próby eksperymentalne jednoznacznie wykazały, że błędne usunięcie ekranu półprzewodzącego z izolacji kabla SN, np. poprzez użycie przez monter wyeksploatowanego narzędzia (korowarki), może prowadzić do generacji WNZ o relatywnie dużej intensywności i wartości mierzonego ładunku. Otrzymane przez autorów wyniki wskazują, że jednym z kluczowych czynników mogących wpłynąć na obniżenie awaryjności eksploatowanych linii kablowych jest zachowanie odpowiednich standardów jakościowych podczas montażu osprzętu kablowego SN. Standardy te powinny dotyczyć nie tylko przestrzegania odpowiednich instrukcji instalatorskich, czy poprawnego doboru narzędzi monterskich, ale także zapewnienia właściwych warunków technicznych (niskie zawilgocenie, dodatnia temperatura otoczenia, dbałość o czystość powierzchni kabla i elementów osprzętu) w trakcie zakładania muf i głowic kablowych SN.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Sebastian Borucki, Politechnika Opolska, Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: s.borucki@po.edu.pl; dr hab. inż. Andrzej Cichoń, Politechnika Opolska Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: a.cichon@po.edu.pl; dr inż. Michał Kunicki, Politechnika Opolska, Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: m.kunicki@po.edu.pl; mgr inż. Jacek Rybarz, Politechnika Opolska Katedra Elektroenergetyki i Energii Odnawialnej, ul. Prószkowska 76, 45-758 Opole, E-mail: jacekrybarz@poczta.fm.

LITERATURA

- [1] Hvidsten S., Holmgren B., Adeen, L., Wetterstrom, J., Condition assessment of 12-and 24-kV XLPE cables installed during the 80s. Results from a joint Norwegian/Swedish research project, *IEEE El. Ins. Mag.*, 21 (2005), 17-23
- [2] Gulski E., Smit JJ., Wester FJ., PD knowledge rules for insulation condition assessment of distribution power cables. *IEEE Trans. on Diel. and El. Ins.*, 12 (2005), 223-239
- [3] Bragatto T., Cerretti A., D'Orazio L., Gatta F. Massimo, Geri A., Maccioni M., Thermal Effects of Ground Faults on MV Joints and Cables, *Energies*, 12 (2019), 3496
- [4] Ghaderi A., Mingotti A., Peretto L., Tinarelli R., Effects of Temperature on MV Cable Joints Tan Delta Measurements, *IEEE Trans. on Instr. and Measur.*, 68 (2019), 3892-3898
- [5] Espin-Delgado A., Letha Shimi S., Ronnberg SK., Bollen Math HJ., Failure of MV Cable Terminations Due to Supraharmonic Voltages: A Risk Indicator. *IEEE Open Journal of Industry Applications*, 1 (2020), 42-51
- [6] Montanari Gian C., Partial discharge detection in medium voltage and high voltage cables: maximum distance for detection, length of cable, and some answers. *IEEE El. Ins. Mag.*, (2016), No. 32, 41-46
- [7] Shafiq M., Kiitam I., Kauhaniemi K., Taklaja P., Kutt L., Palu I., Performance comparison of PD data acquisition techniques for condition monitoring of medium voltage cables, *Energies* 13 (2020), 4272
- [8] Gulski E., Smit JJ., Wester FJ., PD knowledge rules for insulation condition assessment of distribution power cables. *IEEE Trans. on Diel. and El. Ins.*, 12 (2005), 223-239
- [9] Siodła K., Rakowska A., Noske S., The Proposal of a New Tool for Condition Assessment of Medium Voltage Power Cable Lines, *Energies*, 14 (2021), 4116
- [10] Shafiq M., Kauhaniemi K., Robles G., Isa M., Kumpulainen L., Online condition monitoring of MV cable feeders using Rogowski coil sensors for PD measurements, *El. Power Syst. Res.*, 167 (2019), 150-162
- [11] Alvarez F., Garnacho F., Ortego J., Sanchez-Uran Miguel A., Application of HFCT and UHF sensors in on-line partial discharge measurements for insulation diagnosis of high voltage equipment, *Sensors* 15 (2015), 7360-7387
- [12] Kunicki M., Cichoń A., Borucki S.: Measurements on partial discharge in on-site operating power transformer: a case study, *The Institution of Engineering and Technology, IET Gener., Transm. & Distrib. Jour.*, 12(2018), pp. 2487 – 2495.