

Pomiary trajektorii iskry długiej w przestrzeni trójwymiarowej

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienia związane z pomiarami laboratoryjnymi trajektorii iskry długiej dla udarów piorunowych i łączeniowych o biegunowości dodatniej i ujemnej. Przedstawiono układ eksperymentalny umożliwiający wykonanie pomiarów iskry długiej w układach wysokonapięciowych kula-płyta oraz kula-kula, jak również w układach modelowych odzwierciedlających zjawisko przeskoku wzdłuż łańcucha izolatorowego. Opisana metoda badawcza może być również wykorzystana do prowadzenia pomiarów w układach wieloelektrodowych. Przedstawiony układ pomiarowy i sposób wykonania pomiarów iskry długiej umożliwiają wyznaczenie parametrów trajektorii wyładowań, co może zostać użyte do opracowania i weryfikacji modeli symulacyjnych wyładowań iskrowych z wykorzystaniem modelowania fraktalnego.

Abstract. The article presents aspects related to laboratory measurements of a long spark trajectory for lightning and switching strokes with positive and negative polarity. The paper presents an experimental setup that enables long spark measurements in conventional sphere-plate and sphere-sphere high-voltage systems, as well as in model systems reflecting the phenomenon of a discharge along the insulator chain. The described method can also be used to conduct measurements in multi-electrode systems. The presented measuring system and the method of long spark measurements make it feasible to determine the parameters of the discharge trajectory, which can be used to develop and validate the simulation models of spark discharges with the use of fractal modeling. (**Measurements of the trajectory of a long spark in three-dimensional space**).

Słowa kluczowe: wysokonapięciowe wyładowanie elektryczne, iskra długa, model fraktalny, trajektoria.

Keywords: high voltage electrical discharge, long laboratory spark, fractal model, trajectory.

Wstęp

Mechanizm rozwoju wyładowań elektrycznych jest złożonym procesem, w którym sposób tworzenia się kanału wyładowania jest uzależniony od czynników deterministycznych, takich jak np. pierwotny rozkład pola elektrycznego, oraz stochastycznych, do których można zaliczyć np. niejednorodną strukturę przestrzeni będącej ośrodkiem rozwoju wyładowania. Aktualnie istnieje wiele metod obliczeniowych pozwalających w sposób symulacyjny określać kierunek rozwoju wyładowania. Są to jednak głównie metody deterministyczne, takie jak np. model LPM (ang. *Leader Progression Model*) stosowany w ochronie odgromowej linii oraz stacji wysokich napięć [1]. Istotną wadą metod deterministycznych jest to, że przez brak uwzględnienia czynników losowych nie pozwalają one na badanie wielu, niekiedy mniej prawdopodobnych, jednak możliwych scenariuszy rozwoju wyładowania. Przykładem mogą być tutaj tzw. wyładowania boczne (ang. *latteral strikes*) [2], które zgonie z modelami deterministycznymi nie powinny mieć miejsca.

Istnieje grupa metod obliczeniowych dająca możliwość badania trajektorii rozwoju wyładowań elektrycznych z uwzględnieniem różnego rodzaju, trudno definiowalnych efektów stochastycznych. Obecnie wśród tych metod największą popularność zyskał tzw. model fraktalny (ang. *fractal model*). Badania prowadzone z wykorzystaniem tego modelu wykonywane są od wielu lat i skupiają się przede wszystkim na wyładowaniach piorunowych oraz zagadnieniu ochrony odgromowej systemów elektroenergetycznych, choć znane są również prace dotyczące badań wyładowań powierzchniowych [3-5] oraz drzewiastych [6-7]. Wnioski przedstawione w [1] pokazują, że skuteczność modelu fraktalnego nie odbiega od skuteczności uznanych w literaturze oraz normalizacji modeli EGM (ang. *Electro-Geometric Model*) i LPM (ang. *Leader Progression Model*).

Badania opublikowane w [8] pokazały, że model fraktalny może być również stosowany do symulacji wyładowań jakimi są iskry długie. W pracy [8] badana była wytrzymałość elektryczna układu ostrze-płyta o długości przerwy iskrowej wynoszącej 0.75 m, poddanego oddziaływaniu napięć udarowych piorunowych biegunowości dodatniej. Na podstawie analizy 50-procentowego napięcia przeskoku wykazano bardzo dobrą zgodność uzyskanych

wyników symulacji z wynikami badań eksperymentalnych, co wskazuje na możliwość wykorzystania modelowania fraktalnego do celów koordynacji izolacji wysokonapięciowych elementów systemu elektroenergetycznego. Zarówno opublikowane dotychczas prace [9], jak i doświadczenia wynikające z badań wykonywanych w Laboratorium Wysokich Napięć Instytutu Energetyki, pokazują, że wyładowania iskrowe będące skutkiem występowania przepięć udarowych (zwłaszcza łączeniowych), potrafią rozwijać się w sposób bardzo nieprzewidywany, co stanowi istotne wyzwanie z punktu widzenia skutecznej koordynacji izolacji. Rozwiązaniem może być wykorzystanie w obliczeniach konstruktorskich modelowania fraktalnego, dzięki któremu możliwe jest szacowanie prawdopodobieństwa wystąpienia niepożądanych przeskoku już na etapie projektowania układów izolacyjnych danego elementu systemu.

W celu opracowania prawidłowo działającego modelu symulacyjnego, potrzebne jest najpierw wykonanie kompleksowych badań pomiarowych obejmujących wszystkie rodzaje narażeń przepięciowych, na jakie zgodnie z obecnie przyjętymi wymaganiami [10] narażona jest aparatura pracująca w sieciach wysokich napięć.

W niniejszej publikacji omówiono sposób wykonywania pomiarów laboratoryjnych, które mogą być użyte do opracowania modelu symulacyjnego bazującego na założeniach modelowania fraktalnego.

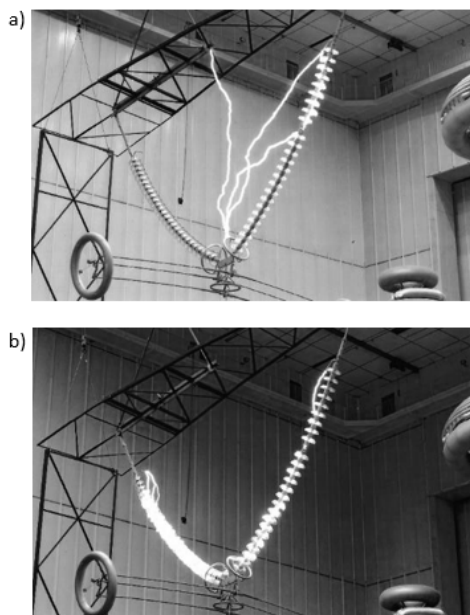
Założenia dotyczące warunków wykonywania pomiarów

Poniżej opisano założenia dotyczące własności układu pomiarowego, których spełnienie pozwala na otrzymanie trajektorii oraz wyznaczenie parametrów trajektorii wyładowań iskrowych. Przyjęto, że warunki wykonywania pomiarów powinny odwzorowywać warunki w jakich są eksploatowane układy będące przedmiotem procesu koordynacji izolacji. W przypadku, gdy rozważana jest wytrzymałość elektryczna aparatury pracującej w sieciach wysokich napięć, oznacza to, że pomiary będące źródłem danych służących do walidacji modeli symulacyjnych powinny być wykonane przy spełnieniu poniższych założeń.

Pierwsze założenie dotyczy rozmiarów odstępów izolacyjnych, gdyż mechanizm rozwoju kanału wyładowania zależy od jego długości. W przypadku badań dotyczących sieci EHV (ang. *Extra-High Voltage*) i UHV (ang. *Ultra-High*

Voltage) można przyjąć, że długość przerwy iskrowej stosowanej w trakcie pomiarów powinna zawierać się w granicach od około 3.3 m dla BSL = 1050 kV do nawet 9.5 m dla BSL = 1950 kV [11] (BSL, ang. *Basic Switching Impulse Insulation Level*).

Drugie założenie dotyczy przepięć będących źródłem wyładowań. Zgodnie z obecnie przyjętymi wymaganiami [10-11], elementy pracujące w sieciach wysokich napięć muszą być odporne na oddziaływanie przepięć szybkozmiennych takich jak udary piorunowe o kształcie 1.2/50 μ s oraz łączeniowe 250/2500 μ s. Dodatkowo, poza rodzajem udaru istotną rolę odgrywa również jego biegunowość, która ma znaczenie w przypadku, gdy kanał wyładowania rozwija się wzdłuż izolacji stałej, takiej jak np. łańcuchy izolatorowe (zob. rys.1).



Rys.1. Wyładowania zarejestrowane podczas badań wytrzymałości elektrycznej napięciem udarowym łączeniowym układów izolacyjnych 400 kV: a) biegunowość dodatnia, b) biegunowość ujemna, [12], [16]

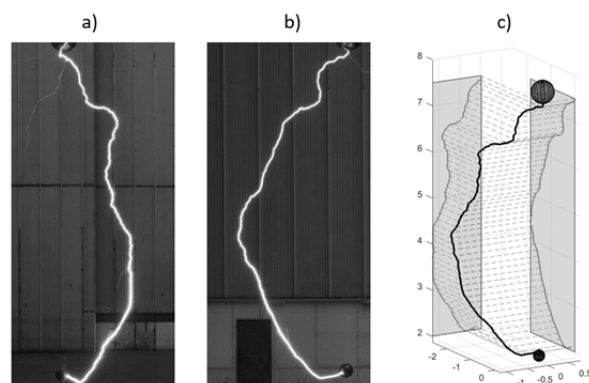
Trzecie założenie dotyczy konfiguracji przestrzennej badanych układów. Z praktycznego punktu widzenia można przyjąć, że większość eksploatowanych układów izolacyjnych to układy złożone, składające się z jednej elektrody wysokonapięciowej (np. przewód fazowy linii) oraz wielu elektrod uziemionych (np. elementy konstrukcyjne słupów lub ściany hal przeksztaltnikowych w stacjach HVDC [9]). Konieczne jest zatem wykonanie pomiarów zarówno w prostych układach dwuelektrodowych, modelujących główną przerwę izolacyjną (np. obszar między osprzętem ekranującym) oraz w układach wieloelektrodowych pozwalających na sprawdzenie czy model umożliwia prawidłowe oszacowanie prawdopodobieństwa wyładowania do różnych elementów układu izolacyjnego (np. wyładowanie do konstrukcji słupa, zob. rys.1).

Układ pomiarowy

Prezentowany w niniejszej pracy sposób wykonywania badań opierał się na generowaniu wyładowań iskrowych oraz rejestracji przebiegu kanału wyładowania w przestrzeni trójwymiarowej. Do wytwarzania udarów napięciowych wykorzystano 25 stopniowy generator Marxa pozwalający na uzyskanie napięć udarowych o wartości maksymalnej do 4100 kV w przypadku udarów piorunowych oraz 2800 kV w

przypadku udarów łączeniowych. Pomiar napięcia wykonano układem pomiarowym składającym się z dzielnika pojemnościowego Haefely CRS 4500 kV oraz rejestratora napięć udarowych Dr. Strauss (200 MS/s, 14 bit). Całkowita rozszerzona niepewność pomiaru napięcia w tym układzie nie przekraczała $\pm 0,97\%$ (współczynnik rozszerzenia $k=2$, prawdopodobieństwo rozszerzenia $p=95\%$) i została ona oszacowana dla maksymalnych wartości napięć probierczych wykorzystywanych podczas badań, tj. 3400 kV dla udarów piorunowych oraz 2300 kV dla udarów łączeniowych.

Do pomiaru trajektorii wyładowania wykorzystano dwa zsynchronizowane ze sobą aparaty fotograficzne (Nikon D750), rejestrujące obraz kanału wyładowania w dwóch prostopadłych do siebie płaszczyznach. Ze względu na silne oddziaływanie pola elektrycznego powstającego podczas wyładowania, aparaty zostały umieszczone w specjalnie przygotowanych do tego celu ekranowanych i uziemionych obudowach. Sterowanie oraz akwizycja danych były wykonywane za pośrednictwem złącz światłowodowych. Dzięki jednoczesnej rejestracji obrazu w dwóch różnych kierunkach możliwe było odtworzenie trajektorii kanału wyładowania w przestrzeni trójwymiarowej (zob. rys.2).



Rys.2. Pomiar trajektorii wyładowania: a-b) obrazy rejestrowane przez aparaty fotograficzne, c) zrekonstruowany kanał wyładowania

Pomiary wykonane były wewnątrz hali Laboratorium Wysokich Napięć Instytutu Energetyki, o wymiarach wewnętrznych 40x40x33m, dzięki czemu możliwe było zachowanie wymaganych odległości pomiędzy elementami układu pomiarowego, a elementami konstrukcyjnymi hali laboratoryjnej (najbliższe obiekty nie będące częścią układu pomiarowego znajdowały się w odległości nie mniejszej niż 1.5 krotna długość przerwy izolacyjnej układu pomiarowego [14]).

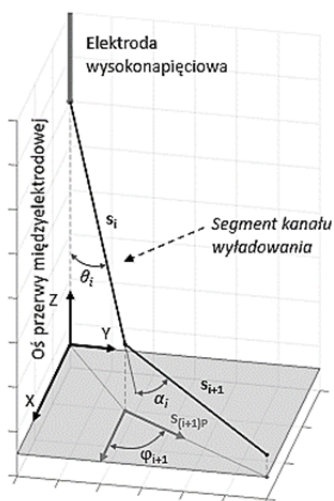
W trakcie badań rejestrowano warunki atmosferyczne mające wpływ na wytrzymałość elektryczną badanych przerw izolacyjnych. We wszystkich badanych przypadkach zastosowanie współczynnika poprawkowego K_f , obliczonego zgodnie z wymaganiami normy IEC 60060-1:2010, nie wpływało na wartość napięcia probierczego o więcej niż 3%.

Wielkości opisujące trajektorię iskry długiej

Badania wykonane w zaprezentowanym układzie laboratoryjnym pozwalają na uzyskanie danych pomiarowych umożliwiających opracowanie i weryfikację poprawności działania modeli symulacyjnych opartych o założenia metody fraktalnej. Dzięki wykonanym pomiarom możliwe jest wyznaczenie wielkości liczbowych opisujących trajektorię wyładowania.

Pierwszym parametrem jest wymiar fraktalny, będący podstawową wielkością stosowaną do opisu wyników symulacji prowadzonych z wykorzystaniem modelowania fraktalnego. W przypadku wyładowań elektrycznych, wymiar fraktalny wyznaczany jest najczęściej metodą pudełkową (ang. *box-counting method*).

Drugim parametrem jest krętość kanału wyładowania opisująca kształt trajektorii. Wielkość ta jest obliczana przy założeniu, że kanał wyładowania składa się z kolejno połączonych ze sobą segmentów. Istnieje zatem możliwość wyznaczenia kątów pomiędzy poszczególnymi segmentami (kąt α , zob. rys.3), osią wyładowania (kąt θ , zob. rys.3) lub wybraną płaszczyzną odniesienia (kąt φ , zob. rys.3).



Rys.3. Kąty opisujące krętość wyładowania według definicji przedstawionej w [15]

Trzecim parametrem jest średnia odległość kanału wyładowania od osi, jaką stanowi dany izolator. Jak wykazały wykonane pomiary, wielkość ta pozwala ocenić w jak dużym stopniu izolacja stała wpływa na trajektorię rozwoju wyładowania.

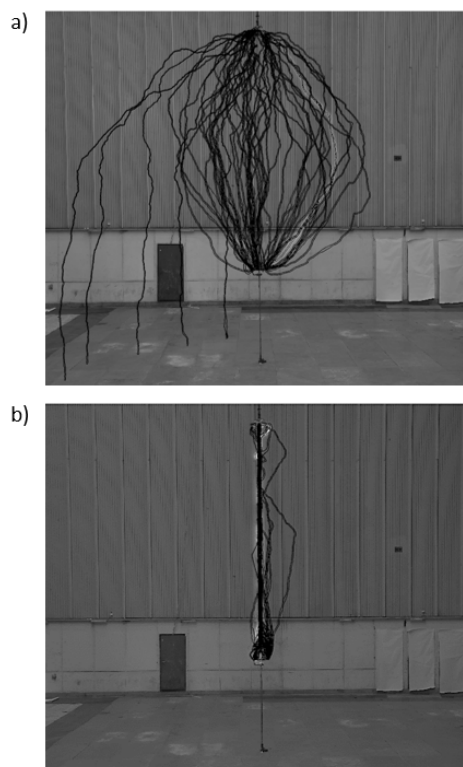
Ostatnim parametrem odnoszącym się do trajektorii jest prawdopodobieństwo/częstość wyładowania do różnych elementów układów wieloelektrodowych. Parametr ten jest wykorzystywany w przypadku badań układów złożonych, składających się z minimum czterech elektrod pomiarowych.

Przykładowe wyniki pomiarów

Wykonane pomiary wykazały, że trajektoria iskry dłużej jest uzależniona zarówno od rodzaju udaru, jak i jego biegunowości. Dzięki porównaniu przyjętych parametrów, możliwe jest dokonanie klasyfikacji rodzaju wyładowania: znając biegunowość wyładowania możliwe jest określenie jego rodzaju (udar piorunowy lub łączeniowy), a znając rodzaj udaru możliwe jest określenie jego biegunowości.

Należy jednak zaznaczyć, że przedmiotem analizy nie są pojedyncze wyładowania, lecz całe populacje wyładowań. Wynika to z faktu, że mechanizm rozwoju wyładowania jest zjawiskiem stochastycznym, i w związku z tym analiza wyników pomiarów musi być prowadzona w oparciu o narzędzia statystyczne. Z matematycznego punktu widzenia najlepszym rozwiązaniem byłoby wykonywanie serii pomiarowych składających się z możliwie jak największej liczby wyładowań. Ze względów praktycznych liczba wyładowań w serii zawsze jest ograniczona. Czynniki ograniczającymi są zmienne warunki atmosferyczne oraz odstęp czasowy pomiędzy kolejnymi wyładowaniami. Ze względu na zmiany temperatury oraz wilgotności, istotne jest, aby pomiary dla

danej konfiguracji były wykonane w jak najkrótszym czasie, tak aby warunki atmosferyczne były w przybliżeniu stałe dla każdego wyładowania wchodzącego w skład populacji. Z drugiej strony, konieczne jest zachowanie odpowiednio długiego czasu pomiędzy kolejnymi wyładowaniami, tak aby było możliwe pełne odbudowanie wytrzymałości elektrycznej przerwy iskrowej oraz aby pozostające w powietrzu ładunki elektryczne nie wpływały na rozwój kolejnego wyładowania. Mając na uwadze te ograniczenia przyjęto, że jedna seria pomiarów składała się z około 40 bądź około 50 wyładowań. W trakcie wszystkich pomiarów wykonano 55 serii, w których zarejestrowano w sumie blisko 2400 wyładowań. Wykonano 12 serii w układach podstawowych typu kula-płyta oraz kula-kula, 39 serii dla konfiguracji wieloelektrodowych oraz 4 serie w układach modelowych odzwierciedlających zjawisko przeskoku wzdłuż łańcucha izolatorowego.

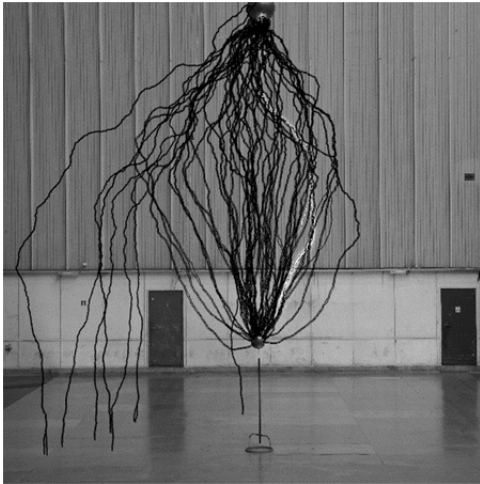


Rys.4. Przykładowe populacje wyładowań łączeniowych: a) biegunowość dodatnia, b) biegunowość ujemna

Dokonując analizy krętości wyładowań powstałych w układach podstawowych zauważono, że krętość iskier będących następstwem udarów o biegunowości dodatniej jest wyższa niż w przypadku udarów biegunowości ujemnej. Taka sama prawidłowość dotyczy rodzaju udaru, ponieważ wykazano, że udary łączeniowe skutkują tworzeniem się kanałów wyładowania o większej krętości niż ma to miejsce w przypadku udarów piorunowych. Dokładne różnice pomiędzy poszczególnymi typami wyładowań przedstawiono w [13]. Warto zauważyć, że wartości kątów α oraz θ wyznaczone na podstawie wykonanych pomiarów zachowują dużą zgodność z wynikami przedstawionymi w literaturze. Przykładowo dla wyładowań łączeniowych otrzymanych w układzie kula-płyta o długości przerwy iskrowej 3.3 m oraz 5.5 m, wartość kąta θ wynosiła odpowiednio $(22.6^\circ \pm 14.1^\circ)$ oraz $(22.5^\circ \pm 14.5^\circ)$, podczas gdy literatura podaje $(20.9^\circ \pm 20.9^\circ)$ [15] lub $(23.9^\circ \pm 19^\circ)$ [17].

Analiza wymiaru fraktalnego pokazała, że różnice pomiędzy poszczególnymi rodzajami wyładowań są

bardziej subtelne niż ma to miejsce w przypadku krętości. Niezależnie od rodzaju elektrod, w przypadku biegunowości ujemnej wymiar fraktalny populacji wyładowań piorunowych jest większy niż wyładowań łączeniowych, a różnica jest na poziomie 11% ($D_b(F)_{SI-} = 2.037$ $D_b(F)_{LI-} = 2.286$). Podobna prawidłowość występuje również w przypadku biegunowości dodatniej, przy czym obserwowane różnice są mniejsze (w przybliżeniu 3.5%) i można je zaobserwować wyłącznie w układzie kula-kula (w układzie kula-płyta mierzone różnice są mniejsze niż błąd pomiaru).



Rys.5. Wyładowania łączeniowe o biegunowości dodatniej zarejestrowane w układzie kula-kula

Porównując ze sobą wyładowania tego samego rodzaju, można zauważyć, że dla udarów łączeniowych wymiar fraktalny wyładowań o biegunowości dodatniej jest większy niż dla biegunowości ujemnej. Różnice są bardziej widoczne w układzie kula-płyta (różnice na poziomie 10%) niż ma to miejsce w układzie kula-kula (różnice na poziomie 3%). W przypadku wyładowań piorunowych tendencja jest jednak odwrotna. Wymiar fraktalny wyładowań piorunowych o biegunowości dodatniej jest około 4% mniejszy niż dla wyładowań piorunowych o biegunowości ujemnej (obserwacja ta dotyczy wyłącznie układu kula-kula, gdyż w układzie kula-płyta mierzone różnice są mniejsze niż błąd pomiaru, który wynosi 2.5 %).

Wykonane pomiary wykazały natomiast bardzo duże różnice w sposobie rozwoju wyładowań dodatnich i ujemnych, powstających w otoczeniu modelu łańcucha izolatorowego.

Na rys.4 pokazano zestawienie 50 wyładowań o biegunowości dodatniej (a) oraz 50 wyładowań o biegunowości ujemnej (b), zainicjowane przez udary łączeniowe. Analiza jakościowa pokazała, że wyładowania ujemne rozwijają się niemal wyłącznie na powierzchni badanego obiektu. Podczas gdy w przypadku wyładowań dodatnich, wprowadzenie obiektu do przerwy iskrowej praktycznie nie zmienia trajektorii rozwoju wyładowania. Na rys.5 pokazano rozkład wyładowań zarejestrowanych w układzie kula-kula, gdzie w przerwie między elektrodami nie znajdowała się żadna izolacja stała. Ilościowo zjawisko to można zaobserwować wyznaczając średnie odchylenie od osi wyładowania, wynoszące w tym przypadku 0.84 m dla biegunowości dodatniej oraz zaledwie 0.04 m dla biegunowości ujemnej.

Wnioski

W artykule przedstawiono układ pomiarowy oraz sposób wykonania pomiarów iskry długiej umożliwiający uzyskanie kompleksowych danych w zakresie opisu trajektorii

wyładowań powstałych wskutek przepięć piorunowych oraz łączeniowych obu biegunowości. Przedstawiony układ pomiarowy odwzorowuje typowe narażenia przepięciowe występujące w systemach elektroenergetycznych EHV i UHV. Układ pomiarowy umożliwia uzyskanie danych które mogą być użyte do dokonania klasyfikacji populacji wyładowań. Wyniki pomiarów uzyskane w przedstawionym układzie mogą być wykorzystane do weryfikacji działania modeli symulacyjnych bazujących na założeniach modelowania fraktalnego.

Autorzy: mgr inż. Michał Molas, Instytut Energetyki, ul. Mory 8, 01-330 Warszawa, E-mail: michal.molas@ien.com.pl; dr hab. inż. Marcin Szewczyk, prof. uczelni, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, Instytut Elektroenergetyki, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: marcin.szewczyk@pw.edu.pl.

LITERATURA

- [1] CIGRE WG C4.26, "Evaluation of lightning shielding analysis methods for EHV and UHV DC and AC transmission lines," Technical Brochure 704, Oct. 2017.
- [2] Takami, Jun, and Shigemitsu Okabe. "Characteristics of direct lightning strokes to phase conductors of UHV transmission lines." *IEEE Transactions on Power Delivery* 22.1 (2006): 537-546.
- [3] Niemeyer, Lucian, Luciano Pietronero, and Hans J. Wiesmann. "Fractal dimension of dielectric breakdown." *Physical Review Letters* 52.12 (1984): 1033
- [4] Femia, N., L. Niemeyer, and V. Tucci. "Fractal characteristics of electrical discharges: experiments and simulation." *Journal of Physics D: Applied Physics* 26.4 (1993): 619.
- [5] Ioannidis, A. I., et al. "Development of a fractal-based model for simulating streamer flashover of insulating surfaces." 2021 IEEE Conference on Electrical Insulation and Dielectric Phenomena (CEIDP). IEEE, 2021.
- [6] Hariharan, M., and Sharanya Srinivas. "Stochastic Modelling of Electrical Tree Progression in Modern High Voltage Power Cables." *International Journal of Computer Applications* 149.7 (2016).
- [7] Rodríguez-Serna, Johnatan M., Ricardo Albarracín-Sánchez, and Isabel Carrillo. "An improved physical-stochastic model for simulating electrical tree propagation in solid polymeric dielectrics." *Polymers* 12.8 (2020): 1768.
- [8] Ioannidis, A. I., et al. "Fractal-Based Approach for Modelling Electric Breakdown of Air Gaps: An Application to a 75 cm Positive Rod-Plane Gap." *The International Symposium on High Voltage Engineering*. Springer, Cham, 2019.
- [9] Ming, Li, et al. "Intriguing observation on the breakdown trajectory of large air-gaps under switching impulse voltages." *16th Int'l. Sympos. High Voltage Eng. (ISH)*. Vol. 100. 2009.
- [10] PN-EN IEC 60071-1:2020-04 *Koordinacja izolacji -- Część 1: Definicje, zasady i reguły*
- [11] "IEEE Recommended Practice for Overvoltage and Insulation Coordination of Transmission Systems at 1000 kV AC and Above," in *IEEE Std 1862-2014*, vol., no., pp.1-68, 18 July 2014
- [12] Mackiewicz, M. (2018). *Analiza rozplywów przepięć w sieciach elektroenergetycznych w aspekcie wytrzymałości układów izolacyjnych przy niestandardowych narażeniach przepięciowych* [Rozprawa doktorska, Politechnika Opolska]. Baza Wiedzy Politechniki Opolskiej.
- [13] M. Molas, M. Szewczyk, „Experimental Evaluation of 3D Tortuosity of Long Laboratory Spark Trajectory for Sphere-Sphere and Sphere-Plane Discharges under Lightning and Switching Impulse Voltages,” *Energies* 2021, 14, 7409. DOI: <https://doi.org/10.3390/en14217409>
- [14] PN-IEC 383-2:1997 *Izolatory do linii napowietrznych o znamionowym napięciu powyżej 1000 V -- Łańcuchy izolatorów i łańcuchy izolatorów z osprzętem do sieci prądu przemiennego -- Definicje, metody badań i kryteria odbioru*
- [15] Diaz, Oscar, et al. "Experimental study of leader tortuosity and velocity in long rod-plane air discharges." *IEEE Transactions on Dielectrics and Electrical Insulation* 23.2 (2016): 806-812.
- [16] A. Wielonek, *Archiwum Laboratorium Wysokich Napięć Instytutu Energetyki (IEn)*
- [17] S. Gu, N. Xiang, J. Chen, W. Chen, S. Xie, and J. He, "3D Channel tortuosity of long air gap discharge," in 543 7th Asia-Pacific International Conference on Lightning