

Janusz FLESZYŃSKI¹, Jerzy STANKIEWICZ², Adam TYMAŃ¹

Politechnika Wroclawska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii (1), Instytut Elektrotechniki, Oddział we Wrocławiu (2)

Krucze pęknięcia izolatorów kompozytowych

Streszczenie. *Problemowi kruchych pęknięć izolatorów kompozytowych w eksploatacji poświęca się wiele uwagi. W artykule przedstawiono: skalę i ważność problemu, mechanizm zjawisk, stosowane środki zaradcze oraz opracowaną metodę badania odporności rdzeni izolatorów na elektrolityczną korozję naprężeniową.*

Abstract. *(Brittle fracture of composite insulators).* In service a lot of attention is dedicated to the problem of brittle fracture of composite insulators. In a paper it was introduced: scale and validity of the problem, mechanisms of phenomena, applied countermeasures as well as work out method of testing insulator core resistance onto electrolytic stress corrosion.

Słowa kluczowe: linia elektroenergetyczna, izolator kompozytowy, rdzeń nośny, włókno szklane, korozja elektrolityczna, kruche pęknięcie.
Keywords: power line, composite insulator, FRP rod, glass fibre, electrolytic corrosion, brittle fracture.

Wstęp

Polimerowe izolatory kompozytowe, posiadające wiele zalet w stosunku do izolatorów ceramicznych i szklanych, są w eksploatacji w wielu krajach od ponad 40 lat, początkowo w elektroenergetycznych liniach rozdzielczych i następnie, z niewielkim stosunkowo opóźnieniem (około 10 lat), w liniach przesyłowych [1]. W latach 1970-tych, na początku zastosowania izolatorów kompozytowych w liniach przesyłowych, pojawił się bardzo poważny problem eksploatacyjny – zerwania izolatorów wskutek procesów korozji naprężeniowej prętów nośnych wykonanych z włókien szklanych i żywicy syntetycznej, najczęściej epoksydowej (pręty S-E). Zjawisko to nazwane zostało kruchym pęknięciem izolatorów (ang. *brittle fracture*). Pierwsze awarie mechaniczne izolatorów kompozytowych wystąpiły we Włoszech w liniach o napięciu 150 kV i w Republice Południowej Afryki w liniach o napięciu 275 kV i 400 kV. Awariom uległo 40 izolatorów pracujących przez krótki czas w warunkach obciążenia mechanicznego znacznie mniejszego od obciążeń znamionowych izolatorów [2,3].

Pojawienie się bardzo poważnego problemu spowodowało podjęcie na świecie intensywnych badań i prac materiałowo-technologicznych zmierzających do produkcji izolatorów kompozytowych o lepszych właściwościach, w szczególności w aspekcie odporności na procesy prowadzące do kruchych pęknięć. Izolatory takie, nazwane przez producentów izolatorami drugiej generacji, znalazły się w eksploatacji już w latach 1980-tych. Postęp materiałowo-technologiczny trwa nadal i obecnie produkowane izolatory zalicza się nawet do izolatorów trzeciej generacji. Dzięki temu występowanie przypadków kruchych pęknięć zostało znacząco zmniejszone, jednak nie wyeliminowane całkowicie [2-5].

W artykule przedstawiono skalę i ważność problemu kruchych pęknięć izolatorów kompozytowych, możliwe mechanizmy procesów oraz stosowane środki zaradcze. Opisano także metodę badania odporności prętów S-E na procesy korozji naprężeniowej, opracowaną we Wrocławiu w Instytucie Elektrotechniki. Metodę tę zilustrowano wynikami badań prętów wykonanych z włókien szklanych typu E i ECR (włókna odporne na korozję).

Skala i ważność problemu

Dla szczegółowego rozpoznania skali i ważności problemu kruchych pęknięć izolatorów kompozytowych powołana została grupa robocza CIGRE i IEEE. Rozpoczęła ona działalność pod koniec lat 1990-tych i po kilkuletnich pracach

opublikowała zebrane dane [2, 3, 4]. Wynika z nich, że kruche pęknięcia liniowych izolatorów kompozytowych wystąpiły w wielu krajach na świecie, wykazanych w tabeli 1. Najwięcej kruchych pęknięć miało miejsce w USA, co niewątpliwie związane jest z wielką liczbą zainstalowanych w tym kraju izolatorów kompozytowych.

Tabela 1. Zdokumentowane kruche pęknięcia izolatorów kompozytowych

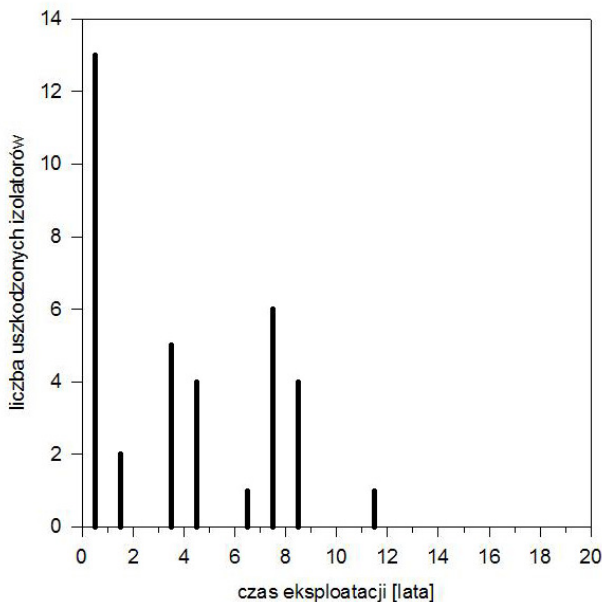
Kraj	Liczba kruchych pęknięć izolatorów
Australia	2
Austria	1
Chiny	5
Grecja	7
Izrael	3
Kanada	4
RPA	16
Szwajcaria	3
Szwecja	4
Tajlandia	2
USA	39
Włochy	24
Razem	110

W tabeli 2 podano liczby zdokumentowanych kruchych pęknięć izolatorów w zależności od napięcia linii elektroenergetycznych [2, 3]. Jak widać wysokość napięcia linii ma duże znaczenie. W liniach rozdzielczych o napięciu mniejszym od 100 kV kruche pęknięcia izolatorów są nieliczne.

Tabela 2. Kruche pęknięcia izolatorów kompozytowych w zależności od napięcia linii elektroenergetycznych

Napięcie linii	Liczba kruchych pęknięć izolatorów
< 100 kV	8
100 - 200 kV	39
> 200 kV	63

Istotne informacje dotyczą czasu pracy izolatorów do momentu wystąpienia kruchych pęknięć. Dane z USA przedstawia rysunek 1 [2, 3]. Dane te pokazują, że wszystkie przypadki kruchych pęknięć wystąpiły w pierwszych 12 latach eksploatacji izolatorów, przy czym liczba zerwanych izolatorów w pierwszym roku pracy była dominująca. Potwierdzają się zatem hipotezy zakładające, że problem kruchych pęknięć dotyczy krótkiego czasu eksploatacji izolatorów posiadających defekty, głównie produkcyjne.



Rys.1. Kruche pęknięcia izolatorów kompozytowych w USA

W badaniach ankietowych w USA starano się określić prawdopodobne przyczyny kruchych pęknięć izolatorów [2,3]. W 80 % analizowanych przypadków wskazano na defekty uszczelnienia w obszarach złącza potrójnego osłona-rdzeń-okucie. Do innych prawdopodobnych przyczyn należały: defekty osłony izolatorów oraz brak lub złe montowanie pierścieni sterujących rozkładem pola elektrycznego.

Szacunkowe obliczenia wykazały, że pod koniec 1997 roku w liniach elektroenergetycznych o napięciu powyżej 100 kV zainstalowane były ponad 3 miliony izolatorów kompozytowych. Wskaźnik awaryjności izolatorów kompozytowych wskutek kruchych pęknięć wynosi zatem około 0,005 % [3]. Wskaźnik ten jest stosunkowo niewysoki, mniejszy od wskaźnika uszkodzeń izolatorów kołpakowych. Problem jest jednak bardzo poważny. Zerwanie się izolatora kompozytowego na linii elektroenergetycznej prowadzić bowiem może do groźnych skutków związanych z opadnięciem przewodu wysokiego napięcia na ziemię.

Mechanizmy procesów

Mechanizm zjawiska kruchych pęknięć izolatorów kompozytowych jest w ogólnych zarysach znany. Powszechnie przyjmuje się, że jest związany z procesami elektrochemicznymi korozji elektrolitycznej włókien szklanych, prowadzącej do zmian strukturalnych materiału włókien i znacznego obniżenia ich właściwości mechanicznych. Szczególną rolę w mechanizmie odgrywa wymiana jonów na powierzchni rozdziału szkło-elektrolit. Typowa wymiana dotyczy jonów sodu znajdujących się w strukturze szkła na jony wodorowe pochodzące z elektrolitu. Proces rozwija się początkowo w powierzchniowych warstwach włókien szklanych, lecz z czasem oddziaływania elektrolitu postępuje w głąb szklanego materiału. W konsekwencji struktura włókien szklanych zostaje znacząco osłabiona, powstają w nich naprężenia wewnętrzne, rośnie ich kruchość [4].

Poważne kontrowersje dotyczą natomiast źródeł i rodzajów elektrolitów oddziałujących degradująco na rdzenie nośne izolatorów w eksploatacji, zgodnie z trzema aktualnymi modelami procesów.

Model I zakłada, że przyczyną kruchych pęknięć izolatorów kompozytowych są kwasy azotowe powstające wskutek wyładowań ulotowych w powietrzu w obecności wilgoci. Model ten ma wielu zwolenników, gdyż na jego słuszność wskazuje szereg faktów wynikających z analizy zdokumentowanych przypadków kruchych pęknięć. Należą do nich w szczególności:

- Wyraźne zwiększanie się prawdopodobieństwa kruchych pęknięć wraz ze wzrostem napięcia linii;
- Umiejscowienie zdecydowanej większości pęknięć izolatorów w pobliżu okuc znajdujących się pod wysokim potencjałem;
- Kruche pęknięcia izolatorów w liniach przesyłowych w przypadkach braku pierścieni sterujących rozkładem pola elektrycznego lub niewłaściwego ich zamontowania.

Wnikliwe dyskusje argumentów przemawiających za modelem I zawierają publikacje M. Kumosy i Jego współpracowników [5,6,7]. Należy dodatkowo zwrócić uwagę, że wyładowania ulotowe mogą rozwijać się nie tylko z okuc, lecz również z kropli wody na powierzchni izolatorów [8].

Model II, wysunięty niedawno przez C. de Tourreila, wskazuje natomiast na wewnętrzne pochodzenie kwasów [4]. Model zakłada bowiem, że źródłem kwasów jest nieprzereagowany utwardzacz żywicy epoksydowej rdzenia S-E, który w połączeniu z wilgocią penetrującą do wnętrza izolatorów tworzy aktywne chemicznie kwasy. Model ten został potwierdzony doświadczalnie w warunkach laboratoryjnych. W pracy [5] zwrócono jednak uwagę, że mechanizm może być słuszny jedynie dla żywicy epoksydowej, zaś większość przypadków eksploatacyjnych kruchych pęknięć dotyczy izolatorów z prętami nośnymi wykonanymi z włókien szklanych i żywicy poliestrowej.

Autorem modelu III jest R. Gorur [9,10]. Jego zdaniem pęknięcia prętów nośnych izolatorów nastąpić mogą nie tylko pod działaniem kwasów, lecz również pod działaniem samej tylko wody. Model został także uwiarygodniony wynikami badań laboratoryjnych. Przeciwno modelowi świadczą jednak liczne przypadki długotrwałej, bezawaryjnej pracy izolatorów z głębokimi uszkodzeniami elastomerowej osłony, odsłaniającymi rdzenie nośne [5].

Dyskusje argumentów pro i kontra tym modelom są bardzo aktualne. Ich forum stanowią konferencje oraz łamy specjalistycznych czasopism. Nie włączając się w tym artykule do ożywionej dyskusji należy jedynie wyraźnie podkreślić, że we wszystkich modelach podstawową rolę odgrywa penetracja wilgoci z zewnątrz do wnętrza izolatorów kompozytowych.

Środki zaradcze

Opanowanie problemu kruchych pęknięć izolatorów kompozytowych w eksploatacji może być osiągnięte przez:

- Zapewnienie szczelności osłon polimerowych, uniemożliwiających wnikanie wilgoci i kwasów do wnętrza izolatorów;
- Stosowanie do produkcji izolatorów prętów szklano-żywicznych, odpornych na elektrolityczną korozję naprężeniową.

Szczelność osłon elastomerowych rdzeni nośnych w długotrwałej eksploatacji izolatorów kompozytowych stanowi podstawowy element żądanej ich wysokiej jakości. Dla zapewnienia szczelności osłon szczególne znaczenie mają dobre uszczelnienia węzłów osłona-rdzeń-okucie. Ważna jest również grubość osłony. Zaleca się, aby na pniu izolatorów osłona miała grubość około 3 mm. Przy doborze dobrych materiałów elastomerowych i właściwej technologii

osłony są wówczas odporne na uszkodzenia mechaniczne i elektryczne oraz praktycznie uniemożliwiają dyfuzję wilgoci do wnętrza izolatorów.

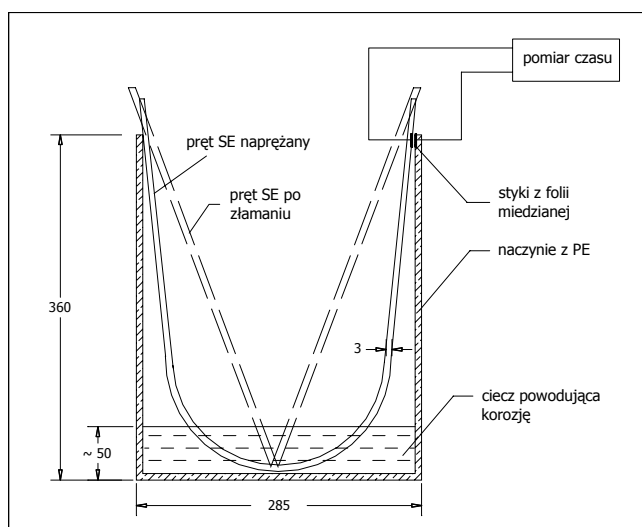
Intensywne badania materiałowe i prace technologiczne, podjęte wkrótce po pojawieniu się problemu kruchych pęknięć izolatorów, doprowadziły do opracowania włókien szklanych odpornych na procesy elektrolitycznej korozji naprężeniowej. Obecnie wielu producentów na świecie wytwarza takie włókna. Określone są one typem ECR i charakteryzują się, w stosunku do popularnych włókien typu E, wyeliminowaniem ze składu szkła tlenku boru (B_2O_3). Wykonanie z włókien ECR prętów odpornych na korozję wymaga także doboru odpowiedniej żywicy i utwardzacza oraz prawidłowej technologii, rzutujących na właściwości bardzo rozwiniętej powierzchni rozdziału włókna – żywica [11, 12].

Pierwsze izolatory z rdzeniami wykonanymi z włókien ECR zostały zainstalowane na liniach elektroenergetycznych w latach 1980-tych. Obecnie na świecie pracuje bardzo wiele takich izolatorów kompozytowych. Żaden z nich nie uległ jeszcze kruchemu pęknięciu [3].

Dla rozwiązania eksploatacyjnego problemu kruchych pęknięć izolatorów kompozytowych w liniach przesyłowych bardzo ważne jest również ograniczenie wyładowań ulotowych przez dobrze zaprojektowaną, wykonaną i zainstalowaną armaturę sterującą rozkładem pola elektrycznego w pobliżu okuć. Ta możliwość jest już dobrze wykorzystywana, w dużej mierze dzięki nowoczesnym technikom cyfrowych obliczeń pola elektrycznego.

Metoda badania prętów

Wśród wielu różnych badań niezbędnych dla oceny izolatorów kompozytowych badania odporności prętów szklano-żywicznych na procesy elektrolitycznej korozji naprężeniowej mają istotne znaczenie [11, 12]. Prosta metoda takich badań została opracowana we Wrocławskim Oddziale Instytutu Elektrotechniki, który jest jednym z nielicznych krajowych producentów izolatorów kompozytowych. W metodzie tej, nazwanej metodą „napiętego łuku”, badania wykonuje się na próbkach prętów szklano-żywicznych o średnicy 3 mm i długości 90 cm. Wykonane próbki wygina się i umieszcza w pojemniku z cieczą narażającą w sposób pokazany na rys. 2. Miarą odporności na korozję naprężeniową jest czas upływający od początku próby do momentu uszkodzenia próbki.



Rys.2. Ilustracja metody „napiętego łuku”

Dla oceny metody przeprowadzono badania próbek prętów S-E wykonanych z dwóch rodzajów włókien szklanych – typu E i ECR: E/1200 P 139 Vetrotex i ECR/R25 H Owens Corning. Do wykonania próbek użyto również: żywicy epoksydowej–Epidian 6, utwardzacza–Lindride, przyspieszacza–DY-062. Cieczami narażającymi były: jedno-normalny wodny roztwór kwasu azotowego i mieszanina wody z utwardzaczem w proporcji 100 g utwardzacza na 1000 g wody dejonizowanej (mieszanina przygotowana 4 doby przed próbą w celu wytworzenia się kwasów).

Uzyskane wyniki badań zestawia tabela 3.

Tabela 3. Wyniki badań odporności prętów S-E na korozję naprężeniową

Próbka		Narażenia testowe	Czas do uszkodzenia	Średni czas do uszkodzenia
Nr	Typ szkła	Roztwór	godziny	godziny
1	E	$H_2O + HNO_3$	3,1	3,1
2			4,3	
3			2,2	
4			2,8	
5	ECR	$H_2O + HNO_3$	>100	> 100
6			>100	
7			>100	
8	E	$H_2O +$ utwardzacz	11,1	18,9
9			19,6	
10			24,2	
11			20,7	
12	ECR	$H_2O +$ utwardzacz	>100	> 100
13			>100	
14			>100	

Wykonane badania umożliwiły ocenę metody. Jest ona pozytywna. Metoda charakteryzuje się bowiem prostotą i chyba wystarczającą selektywnością.

Poznaczymy natomiast wynikiem badań jest potwierdzenie słuszności modelu II, przedstawionego w rozdziale 3, zakładającego korodujące działanie wodnego roztworu utwardzacza żywicy epoksydowej na pręty S-E.

Wnioski

- Awaryjność liniowych izolatorów kompozytowych wskutek kruchych pęknięć rdzeni nośnych jest obecnie stosunkowo nieduża. Uwzględniając jednak groźne skutki spowodowane zerwaniem się izolatora kompozytowego i opadnięciem przewodu wysokiego napięcia na ziemię uważa się, że problem jest poważny.
- Mechanizm kruchych pęknięć jest związany ze znanymi procesami elektrolitycznej korozji naprężeniowej włókien szklanych rdzeni izolatorów. Poważne kontrowersje dotyczą natomiast źródeł i rodzajów elektrolitów, zgodnie z trzema aktualnymi modelami procesów.
- Rozwiązanie problemu kruchych pęknięć wymaga wysokiej jakości izolatorów kompozytowych. Produkowane izolatory powinny posiadać szczelną elastomerową osłonę rdzeni nośnych, uniemożliwiającą wnikanie wilgoci i kwasów do wnętrza izolatorów w długotrwałej ich eksploatacji. Rdzenie izolatorów przeznaczonych do linii przesyłowych powinny być wykonane z włókien szklanych typu ECR, odpornych na procesy elektrolitycznej korozji naprężeniowej.
- Celowe są próby odporności prętów szklano-żywicznych na procesy elektrolitycznej korozji naprężeniowej, wykonywane w ramach badań konstruktorskich izolatorów kompozytowych. Próby takie umożliwia prosta metoda, przedstawiona w artykule.

LITERATURA

- [1] Fleszyński J., Elektroenergetyczne izolatory kompozytowe, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2001), nr.2, 29-33
- [2] IEEE Task Force Report: Brittle fracture in nonceramic insulators, *IEEE Trans. on Power Delivery*, Vol. 17, No. 3, (2002), 848-856
- [3] De Turreil C., Schmuck F. (on behalf of CIGRE Working Group B2.03), Brittle fractures of composite insulators – field experience, occurrence and assessment, *Electra*, No. 214, (2004), 40-47
- [4] De Turreil C., Schmuck F. (on behalf of CIGRE Working Group B2.03), Brittle fractures of composite insulators – failure mode chemistry, influence of resin variations and search for a simple insulator evaluation test method, *Electra*, No. 215, (2004), 17-23
- [5] Kumosa M., Kumosa L., Armentrout D., Causes and potential remedies of brittle fracture failure of composite (non-ceramic) insulators, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, (2004), Vol. 11, No. 6, 1037-1048
- [6] Kumosa M., Kumosa L., Armentrout D., Can water cause brittle fracture failures of composite non-ceramic insulators in the absence of electric fields?, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, (2004), Vol. 11, No. 3, 523-533
- [7] Chughtai A., Smith L., Kumosa L., Kumosa M., FTIR analysis of non-ceramic composite insulators, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, (2004), Vol. 11, No. 4, 585-596
- [8] Phillips A., Childs D., Schneider H., Aging of non-ceramic insulators due to corona from water drops, *IEEE Trans. on Power Delivery*, (1999), Vol. 14, 1081-1089
- [9] Montesions J., Gorur R., Mobasher B., Kingsbury D., Mechanism of brittle fracture in non-ceramic insulators, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, (2002), Vol. 9, No. 2, 236-243
- [10] Gorur R., Brittle fracture in composite insulators; Do we now know enough to distinguish fact from fiction?, *Insulator News and Market Report*, (2002), Vol. 10, No. 2, 52-58
- [11] Kuhl M., FRP rods for brittle fracture resistant composite insulators, *IEEE Trans. on Dielectrics and Electrical Insulation*, (2001), Vol. 8, No. 2, 182-190
- [12] Armentrout D., Kumosa M., McQuarrie T., Boron-free fibers for prevention of acid induced brittle fracture of composite insulator GRP rods, *IEEE Trans. on Power Delivery*, (2003), Vol. 18, No. 3, 684-692

Autorzy: prof. dr hab. inż. Janusz Fleszyński, Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, pl. Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, E-mail: Janusz.Fleszyński@pwr.wroc.pl
dr inż. Adam Tymań, Politechnika Wrocławska, Instytut Podstaw Elektrotechniki i Elektrotechnologii, pl. Grunwaldzki 13, 50-377 Wrocław, E-mail: Adam.Tyman@pwr.wroc.pl
mgr inż. Jerzy Stankiewicz, Instytut Elektrotechniki Oddział we Wrocławiu, ul. M. Skłodowskiej-Curie 55/61, 50-369 Wrocław, E-mail: Stankiewicz@iel.wroc.pl

Artykuł opracowano w ramach projektu badawczego nr 3 T10B 097 28 pt. „Badania elektroenergetycznych izolatorów kompozytowych w aspekcie optymalizacji ich kształtu i parametrów konstrukcyjnych”, finansowanego przez Departament Badań Naukowych Ministerstwa Nauki i Informatyzacji.