

Ocena elektrycznych i mechanicznych parametrów izolatorów szklanych

SEDIVER

W artykule przedstawiono wyniki aktualnych doświadczeń eksploatacyjnych i testów laboratoryjnych przeprowadzonych na izolatorach szklanych zdemontowanych z linii wysokich napięć znajdujących się w różnych częściach świata, a będących w eksploatacji nie dłużej niż 40 lat. Wyniki testów mechanicznych i elektrycznych wyraźnie wskazują, że w przeciwieństwie do innych materiałów, z których wykonana jest izolacja w liniach wysokiego napięcia, szkło hartowane nie starzeje się pod wpływem normalnych warunków eksploatacyjnych i warunków otoczenia. Przegląd parametrów izolatorów SEDIVER wykonanych ze szkła hartowanego, pozyskanych z będących w eksploatacji linii wysokich napięć, pomaga również zrozumieć niektóre z kluczowych cech konstrukcyjnych niezbędnych do zapewnienia długookresowej sprawności i niezawodności linii wysokich napięć.

Do dziś większość operatorów energetycznych stoi w obliczu konieczności pilnej oceny stanu technicznego i poziomu niezawodności ich istniejących linii dystrybucyjnych i przesyłowych. Jednocześnie, rośnie liczba nowych, budowanych bądź planowanych linii WN. Dokonany przegląd właściwości izolatorów szklanych będących już w eksploatacji może być użytecznym przewodnikiem w wyborze właściwego rodzaju izolacji dla przyszłych projektów linii WN, które będą pracowały w ciągu najbliższych 40 lat.

Wprowadzenie

Niezależnie od rodzaju izolacji stosowanej w liniach napowietrznych, głównym tematem dyskusji pomiędzy naukowcami a osobami odpowiedzialnymi za

eksploatację linii jest zdolność laboratoriów do określenia spodziewanego czasu jej życia (4). Jest to szczególnie aktualne w odniesieniu do izolatorów polimerowych (silikonowych), które przez organiczny charakter ich materiału konstrukcyjnego są szczególnie podatne na procesy starzeniowe. Z drugiej strony, niejednorodna, krystaliczna struktura porcelany izolatorów ceramicznych jest głównym czynnikiem wpływającym na możliwość określenia czasu degradacji już na etapie ich produkcji (3). Wskazuje na to przeprowadzona mechaniczna i elektryczna ocena starej izolacji porcelanowej pozyskanej z czynnej linii (1), jak również zwiększona ilość przebitej, wyeksploatowanej izolacji porcelanowej wymienianej przez personel podczas prac eksploatacyjnych. Izolatory wykonane ze szkła hartowane-

go są powszechnie znane z ich mniejszej podatności na starzenie, w porównaniu do izolatorów polimerowych lub porcelanowych. Wynika to głównie z amorficznego charakteru szkła i właściwości nadanych mu podczas procesu hartowania. Jest to wynik kilku aktualnie prowadzonych badań podejmujących tematykę starzenia izolatorów ze szkła hartowanego, poddających ocenie ponad 500 milionów(!) sztuk izolatorów zainstalowanych w liniach WN na całym świecie, pracujących w nawet najbardziej ekstremalnych warunkach klimatycznych i środowiskowych.

W artykule przedstawiono szereg wyników badań przeprowadzonych w laboratorium SEDIVER R&D, a także w innych niezależnych laboratoriach, na izolatorach szklanych SEDIVER będących w eksploatacji nie dłużej niż 40 lat. Wy-

TYP IZOLATORA	ZNAMIONOWA WYTRZYMAŁOŚĆ MECHANICZNA (kN)	NAPIĘCIE (kV)	KRAJ	OKRES EKSPLOATACJI W LATACH	WARUNKI ŚRODOWISKOWE
U300	300	400	Iran	>20	wybrzeże/pustynia
1502	75	150	Holandia	>40	wybrzeże/wilgoć
F12/146	120	150	Holandia	30	wybrzeże/wilgoć
BS1513/140	114	132	Malezja	25-27	elektrownia/cementownia
BS12/140	114			20	ekstremalne zanieczyszczenie
BS1501/140	70			25	klimat tropikalny
N8R2	89	138	USA	30	Pn-Ws wybrzeże USA
N14R2	133	138	USA	30	Pn-Ws wybrzeże USA

Tab. 1: Opis próbek izolatorów oraz odpowiadających im warunków eksploatacji. Zdjęcia próbek zostały zamieszczone w końcowej części artykułu.

niki badań potwierdzają, że izolatory ze szkła hartowanego są wyraźnie odporne na degradację w czasie.

1. Wyniki dla izolatorów pracujących w liniach prądu zmiennego

Izolatory do oceny laboratoryjnej były eksploatowane w warunkach przedstawionych w tabeli 1.

Na uzyskanych próbkach izolatorów został przeprowadzony szereg badań. Zważywszy na ograniczoną ilość dostępnego materiału badawczego, niektóre testy nie zostały przeprowadzone na takich ilościach próbek, jakie są wymagane przez normy. Jednakże, w większości przypadków, uzyskane wyniki badań są całkowicie zgodne z wymaganiami norm i standardów. Badania te obejmują przeprowadzenie następujących testów:

- próbę wytrzymałości mechanicznej
- próbę wytrzymałości resztkowej
- próbę termomechaniczną
- próbę napięciem wytrzymywanym przemiennym o częstotliwości sieciowej, na sucho i w deszczu
- próbę napięciem udarowym
- próbę stromo narastającymi impulsami napięciowymi

Ocena mechaniczna

Próba wytrzymałości mechanicznej.

Testy zostały przeprowadzone zgodnie z normą IEC 60383. Mechaniczne

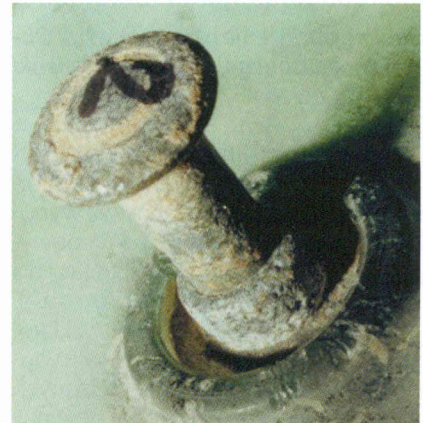
obciążenie niszczące zostało wyznaczone dla około 40 próbek, pochodzących z różnych warunków eksploatacji, jak pokazano w załączniku A.

Biorąc pod uwagę fakt, że wszystkie badane izolatory charakteryzowały się różnymi wartościami znamionowej obciążalności mechanicznej, graficzne podsumowanie badań, przedstawione na wykresie 1, pokazuje zbiorcze zestawienie wyników testu odniesione procentowo do znamionowej wytrzymałości mechanicznej. Z przedstawionego wykresu jasno wynika, że wszystkie uzyskane wyniki przekraczają znamionową wytrzymałość mechaniczną, a ponadto nie ma dowodów na istnienie zależności wartości obciążalności mechanicznej od czasu trwania okresu eksploatacji izolatorów.

Niektóre izolatory miały znaczną korozję trzpienia. Ta sytuacja odpowiada niektórym najniższym (ale wciąż ponad znamionową wytrzymałością mechaniczną nowego izolatora) wartościom obciążenia niszczącego, wyznaczonego podczas testu porównawczego. Izolatory te były eksploatowane w ekstremalnych warunkach klimatycznych jak pokazano na zdjęciu nr 2. Zjawisko to uznawane jest za główną przyczynę końca żywotności izolatorów kołpakowych. Jednak w ciągu ostatnich 25 lat główni producenci zaczęli dostarczać izolatory, które mają być instalowane w silnie zanieczyszczonym, powodującym korozję, środowisku. Izolatory te posiadają mocowaną na trzonku ochronną cynkowaną tuleję (jak poka-



Zdj. 2: Korozja szyjki trzpienia po ponad 20 latach pracy w ciężkich warunkach (Iran)



Zdj. 3: Cynkowana ochronna tuleja zapobiegająca korozji szyjki trzpienia

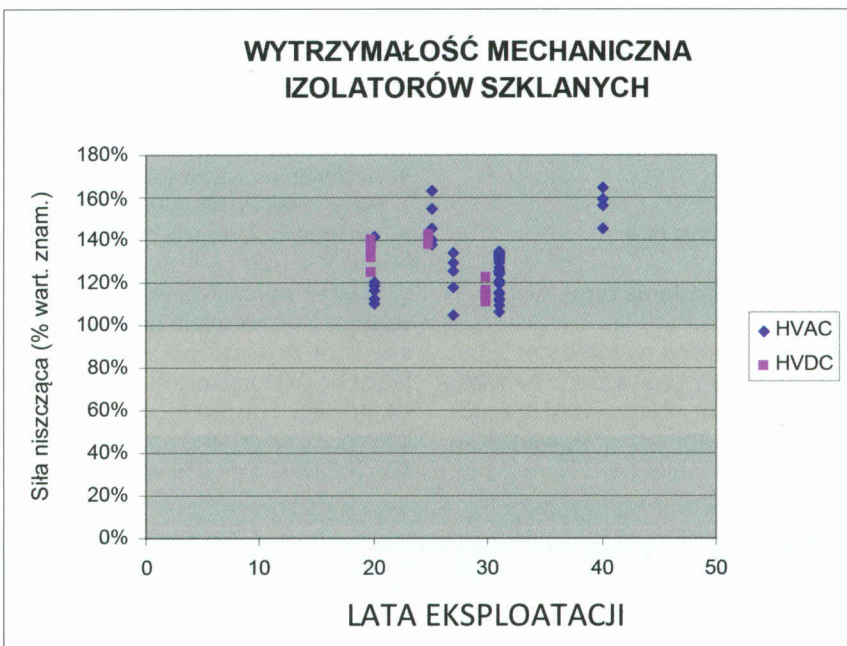
zono na zdjęciu nr 3), która całkowicie eliminuje zjawisko degradacji trzpienia przez korozję z upływem czasu.

Zrozumienie zjawiska korozji trzpienia pozwoliło na uniknięcie przyczyny starzenia osprzętu oraz okuć izolatora. W odniesieniu do dielektryka, nie stwierdzono jakichkolwiek zmian parametrów nowych i starych izolatorów, co wynika z zalet, jakie posiada amorficzna struktura szkła uzyskiwana podczas procesu hartowania kloszy izolatorów. Więcej informacji przedstawiono w punkcie 4.

Próba wytrzymałości resztkowej

Dane zebrane w wyniku badań przeprowadzonych na Uniwersytecie Stanowym w Arizonie (3) wskazują na szczególny przypadek izolatorów szklanych, które zostały pozyskane z czynnej linii WN na północno-wschodnim wybrzeżu USA. Dla izolatorów tych, przebadanych w liczbie 25 sztuk, uzyskane wyniki wytrzymałości resztkowej stanowiły powyżej 97% wartości początkowych.

Średnie obciążenie niszczące, wyznaczone podczas prób wytrzymałości resztkowej, dla badanych próbek pozostających ponad 30 lat w eksploatacji, osiągnęło poziom przekraczający po-



Wykres 1: Znormalizowane wyniki badań odniesione do procentowej wartości obciążalności mechanicznej próbek (wytrzymałość znamionowa mechaniczna nowego izolatora wynosi 100%)

TYP	OKRES EKSPLOATACJI (w latach)	ZNAMIONOWA WYTRZYMAŁOŚĆ MECHANICZNA (kN)	WYTRZYMAŁOŚĆ RESZTKOWA, ŚREDNIO (kN)	ODCHYLENIE STANDARDOWE (kN)
N8R2	>30	89	104,4	10,2
N14R2	>30	133	165,7	8,4

Tab. 2: Wyniki próby wytrzymałości resztkowej izolatorów pozyskanych z linii w USA po 30 latach ich eksploatacji (testy zgodnie z ANSI C29 2)

czątkowe wartości znamionowe, wyznaczane zgodnie z normą ANSI C29-2. Wyniki badań przedstawia Tabela 2. Według standardu ANSI C29-2, kryterium akceptacji wymaga zgodności z następującą formułą:

$$\text{Średnie obciążenie niszczące} > (1,2 \text{ Obciążenia próbne}) + 1,645 \text{ odchylenia standardowego}$$

Uzyskane wyniki badań dla obu przypadków zapewniają niezwykle komfortowy margines bezpieczeństwa wynoszący odpowiednio 48% i 76% powyżej normalnych kryteriów akceptacji dla nowych izolatorów wg ANSI.

Wysokiej jakości izolatory szklane SEDIVER, w warunkach bardziej rygorystycznych testów, prowadzonych w oparciu o normę IEC 60797, powinny standardowo wytrzymać przynajmniej 80% początkowej wartości. Ponadto, w testach przy zwykłych warunkach mechanicznych obciążeń niszczących, wytrzymałość resztkowa powinna pozostać ponad wymaganą wartość.

Wytrzymałość elektryczna resztkowa elementów stanowiących pozostałość po zniszczonych kloszach (zwanymi potocznie „ogryzkami”) została oceniona na podstawie testu napięciem znamionowym przemiennym o częstotliwości sieciowej na sucho, przy ustalonej wytrzymałej wartości napięcia 12 kV - 20kV. Jak pokazano na zdjęciu 4, łuk elektryczny znajduje się zawsze na zewnątrz uszkodzonego elementu klosza, eliminując ryzyko łuku wewnętrznego.

Wyniki te pokazują, że rozbite szkło izo-



Zdj. 4: Łuk elektryczny pozostający na zewnętrznej warstwie elementu potłuczonego izolatora szklanego

latora nie stanowi zagrożenia dla linii, ponieważ pozostające po uszkodzeniu elementy szklane wytrzymują duże obciążenia mechaniczne bez ryzyka wewnętrznego przebicia. Jest to zasadnicza różnica w porównaniu z porcelaną, która raz uszkodzona może prowadzić do różnego typu chaotycznych zachowań izolatora. Stąd też, w zaistnieniu takiej sytuacji, wymagana jest szybka reakcja służb eksploatacji.

Próba termomechaniczna

Jako dodatkowe procedury oceny, niektóre jednostki izolatorów zostały poddane testom cieplnym, przeprowadzanym w oparciu o normę IEC 60575. Testy prowadzono na 5 szt. izolatorów zainstalowanych od 27 lat na linii napowietrznej 132 kV w Malezji. Wytrzymałość znamionowa izolatorów wynosiła 114 kN.

Zastosowane obciążenie: 60% znamionowej wytrzymałości mechanicznej
Cykle temperatury: od -30°C do +40°C

Wyniki badań są następujące:

Średnie obciążenie niszczące po cyklach termomechanicznych: = 146,1 kN
Odchylenie standardowe: S = 10,4 kN
Obliczone kryterium $Q_s = 3,08 > 1,4$ (aktualne kryterium akceptowalności zgodne z IEC $Q_s = 3,08 > 1,4$)
Badane izolatory są w pełni zgodne z wymogami dotyczącymi nowych izolatorów i nie wykazują żadnych oznak starzenia.

Ocena elektryczna

Elektryczne badania typu

Jak przedstawiono na zdjęciu nr 5, badania typu były prowadzone na wielu izolatorach, a uzyskane wyniki są zgodne z określonymi wcześniej wartościami. Specyfika szkła hartowanego ja-



Zdj. 5: Elektryczne badania typu izolatorów BS1513 po 27 latach pracy na linii 132 kV w Malezji.

ko materiału dielektrycznego sprawia, że pęknięcia nie rozprzestrzeniają się wewnątrz szkła (patrz punkt 4). Dlatego, nie jest możliwe znalezienie przebitego izolatora, który byłby wykonany ze szkła hartowanego. A zatem wyniki testów elektrycznych są zgodne z pierwotnymi wynikami (badanie napięciem o częstotliwości sieciowej na sucho i w deszczu, badanie znamionowym napięciem wytrzymałym udarowym piorunowym).

Testy stromo narastającymi impulsami napięciowymi

Testy stromo narastającymi impulsami napięciowymi zostały (Steep front impulse) przeprowadzone na 10 próbkach z Malezji, które były eksploatowane przez okres 27 lat. Parametry testu:

- nachylenie czoła impulsu napięciowego większe niż 2500 kV/μs,
- zmienna polaryzacja co pięć prób.

W trakcie wykonywanych badań nie wystąpiło uszkodzenie próbek. Zatem, inaczej niż w porcelanie, w której rozwijające się mikropęknięcia mogą w czasie prowadzić do przebicia klosza, w izolatorach ze szkła hartowanego rozwoju takich zjawisk nie obserwuje się.

	ESDD Mg/cm ²	NSDD Mg/cm ²
Górna powierzchnia	0,077	24
Dolna powierzchnia	0,06	29

Tab. 3: Poziom zanieczyszczeń na 27 letnich izolatorach pozyskanych z linii 132 kV pracującej w Malezji (ESDD – równoważnik powierzchniowej gęstości osadu soli; NSDD – powierzchniowa gęstość osadów nierozpuszczalnych)

Test zabrudzeniowy

Na łańcuchu izolatorowym, pracującym w Malezji na linii Rawang – WHO, przeprowadzono dodatkowy test zabrudzeniowy. Zgodnie ze zdjęciem nr 6, poziom zanieczyszczenia na analizowanym łańcuchu był szczególnie wysoki. Zmierzone wartości poziomu zanieczyszczeń na badanej jednostce uwzględnia Tabela 3.

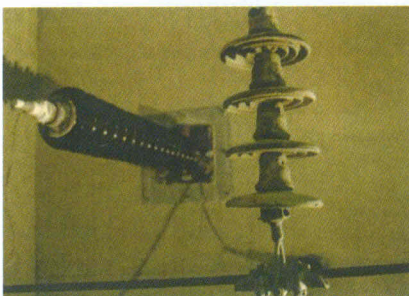
Badanie zanieczyszczenia zostało wykonane zgodnie z normą IEC 60507 (Zdjęcie nr 7). W ramach badania określono wytrzymawaną wartość napięcia 15kV/izolator (faza-ziemia). Wartość ta potwierdza, że po 27 latach pracy izolatora w linii 132 kV, łańcuch był w stanie pracować normalnie mimo skrajniego poziomu powierzchniowej gęstości osadów nierozpuszczalnych NSDD, pokrywających jego powierzchnię.

2. Izolatory pracujące przy prądzie stałym HVDC

Wysokie napięcie prądu stałego wymaga stosowania określonego zestawu parametrów konstrukcyjnych opisanych w normie IEC 61325. Wspomniana nor-



Zdj. 6: Zanieczyszczenie nagromadzone na 27 letnich izolatorach – linia 132 kV w Malezji (poblizie cementowni)



Zdj. 7: Widok komory mgielnej w trakcie badań zabrudzeniowych

ma została opublikowana w 1995 roku i bardzo wiele linii HVDC zostało zbudowanych przed tą datą. Od tego momentu producenci zmuszeni byli dostosować swoje konstrukcje do wymagań nowej normy. Poniższy rozdział pokazuje parametry izolatorów ze szkła hartowanego pozyskanych z czynnych linii prądu stałego HVDC po dekadach eksploatacji. Tabela 4 zawiera szczegółowe informacje dotyczące testowanych izolatorów.

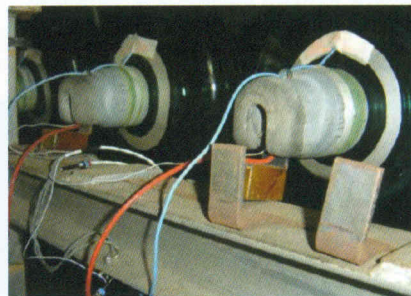
Specyfika oceny wyeksploatowanych izolatorów dedykowanych wysokiemu napięciu prądu stałego (HVDC) tkwi w zdolności prądu stałego do generowania strukturalnego zubożenia materiału dielektrycznego. Ten aspekt pomoże lepiej zrozumieć amorficzną strukturę szkła.

2.1. Migracja jonów

Główną cechą materiału dielektrycznego pracującego pod napięciem stałym jest zdolność do utrzymania w czasie migracji jonowej generowanej przez prąd jednokierunkowy. To zjawisko opisane jest w rozdziale 18 normy opisane w normie IEC 61325.

Po około 30 latach eksploatacji, badane izolatory testowano zgodnie ze wspomnianą powyżej procedurą, która służy do opisu 50-letniej aktywności jonowej. Po pomiarze rezystancji układu, parametry testowe zostały wyregulowane w taki sposób, aby ustalić warunki jakie obowiązują przy testowaniu nowych izolatorów (Zdjęcia nr 8 i 9). Badania prowadzone były przy napięciu 70kV DC i temperaturze +90°C.

Ekwiwalent 50-letni powinien odpowiadać zgromadzonemu ładun-



Zdj. 8: Przygotowanie układu do pomiaru migracji jonowej



Zdj. 9: Komora badawcza migracji jonowej

kowi o wartości 153 C. Na tym etapie testów, badania przebiegały bez nieoczekiwanych zdarzeń, a izolatory pozostały w nienaruszonym stanie. Test był kontynuowany do osiągnięcia skumulowanego poziomu ładunku odpowiadającego ekwiwalentowi 100-letniemu. W trakcie badań pojawiło się tylko jedno pęknięcie charakterystyczne dla okresu 86-letniego. To, w połączeniu już z 30 latami w eksploatacji badanych izolatorów, demonstruje niezawodne działanie szkła, wykraczające daleko poza normalny oczekiwany czas życia linii przesyłowych i to w szczególnie trudnych warunkach jakim jest działanie prądu stałego.

2.2 Ocena mechaniczna

Podobnie jak dla prądu zmiennego, zostało przeprowadzonych kilka testów izolatorów prądu stałego, obejmujących: badania wytrzymałości mechanicznej, badania wytrzymałości resztkowej zgodnie z IEC 60797, oraz testy termomechaniczne zgodnie z normą IEC 60575 ze wzmocnionym cyklem cieplnym.

Załącznik A punkt 1 opisuje znormalizowane rezultaty badań mechanicznych jako procent znamionowej wytrzymałości mechanicznej. Z przedstawionych wyników jasno wynika, że podobnie jak przy prądzie przemien-

TYP	ZNAMIONOWA WYTRZYMAŁOŚĆ MECHANICZNA (kN)	LINIA kV	KRAJ	OKRES EKSPLOATACJI (lat)	WARUNKI EKSPLOATACJI
F16P	160	500	Brazylia	>20 i >25	Tropikalny obszar Itapui
F18P	160	500	Brazylia	>20 i >25	Tropikalny obszar Itapui
N18P	180	600	USA	30	Pn-Zd USA

Tab. 4: Opis izolatorów z linii HVDC wykorzystanych podczas badań (2)

nym, nie występuje degradacja materiału izolatora w czasie.

Wcześniej poczynione wyjaśnienia, dotyczące zjawiska korozji szyjki trzonka i efektu ochronnego tulei ocynkowanej, warto wesprzeć dowodami skuteczności metody ochronnej dla tych zjawisk, montowanych na elementach pracujących w warunkach prądu stałego – przy którym zjawiska korozji są bardziej intensywne. Próbkę izolatorów pozyskane z Brazylii (Itaipu) wykazują na doskonałe zabezpieczenie od strony trzonka, nawet po więcej niż 20 latach pracy w warunkach tropikalnych (odpowiednie dane liczbowe przedstawiono w załączniku B). Korozja widoczna na okuciu niektórych próbek nie miała wpływu na wytrzymałość mechaniczną. Warto nadmienić, że współcześnie produkowane izolatory prądu stałego są wyposażone w cynkowy kołnierz (podobny jak montowany na trzpieniu) także na okuciu, celem zapobiegania korozji. Izolatory wykorzystane 20-30 lat temu nie posiadały takich rozwiązań.

2.3 Ocena termomechaniczna

Wyniki uzyskiwane dla izolatorów ze szkła hartowanego, pozyskanych z eksploatacji w warunkach prądu stałego po wielu latach ich pracy, oceniano uwzględniając ostrzejsze warunki w zakresie cykli termicznych (wahania temperatury od -50°C do $+50^{\circ}\text{C}$). Testy termomechaniczne (Zdjęcie 10) wykazują pełną zgodność z normami stosowanymi do nowych izolatorów.

2.4 Próba wytrzymałości resztkowej

Ten test przeprowadzony został na próbkę 15 izolatorów (o wytrzymałości znamionowej 180kN), które pozostawały w eksploatacji przez 30. lat. Przewodzone badania były zgodne z normą IEC, przy bardziej restrykcyjnych warunkach niż zakłada to standard ANSI (patrz poprzedni rozdział do badań AC). W wyniku prowadzonych testów, 9 izolatorów pękło na trzpieniu. Najniższa wartość siły, przy której wystąpiło uszkodzenie trzpienia wyniosła 200 kN. Dla pozostałych 6 izolatorów wysunięto trzpienie a najmniejsza uzyskana dla nich wartość siły niszczącej wyniosła 176,1 kN.

Dla powyższych izolatorów, obliczeniowe kryterium akceptowalności kształtuje się następująco:

Średnie obciążenie niszczące: $\bar{X} = 192,4 \text{ kN}$
Odchylenie standardowe: $\sigma = 8,5 \text{ kN}$

Najniższa wartość wytrzymałości resztkowej wynosi 97,7% znamionowej wytrzymałości mechanicznej, czyli znacznie powyżej jakichkolwiek standardowych wymagań dla tego typu testu. Metoda obliczeniowa dla wysuniętych trzpieni, prowadzona według wymagań IEC, dała następujące rezultaty:

$(0,65 \cdot 180 + 1,654 \cdot \sigma) = 196,7 \text{ kN}$
 $k = 0,99$

Badania wytrzymałości resztkowej testowanych, podlegających wieloletniej

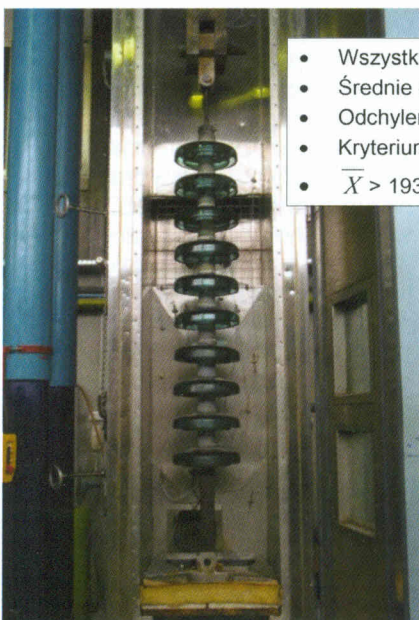
eksploatacji izolatorów, prowadzone zgodnie z IEC 60797 (Zdjęcie nr 11), dają rezultaty znacznie powyżej standardowych wymogów oraz zbliżone do wartości znamionowej nowych i nieuszkodzonych izolatorów.

3. Wnioski

Wnioski zebrane poniżej dotyczą izolatorów szklanych dla prądu zmiennego (AC) jak i stałego (DC):

- W ekstremalnym środowisku korozyjnym, izolatory podlegające długiej eksploatacji (stare) mogą przejawiać występowanie zjawisk korozyjnych na trzpieniu. Redukcja siły mechanicznej może wystąpić w skrajnych warunkach. Ten szczególnie problem eksploatacyjny został rozwiązany ponad 20 lat temu poprzez stosowanie tulei z czystego cynku, nałożonych na trzpień. Ochrona ta całkowicie wyeliminowała występowanie korozji trzpienia
- Sam dielektryk nie wykazuje oznak starzenia. Zarówno mechaniczne jak i elektryczne osłabienie materiału nie wystąpiło na przestrzeni 40 lat jego eksploatacji. Badane izolatory były narażone na duże zanieczyszczenia, jak również na szczególny rodzaj obciążenia jakim jest migracja jonowa występująca przy pracy w warunkach prądu stałego.

Poniższy rozdział opisuje główne czynniki, wyjaśniając, dlaczego szkło hartowane się nie starzeje



- Wszystkie wartości powyżej wartości znamionowych
- Średnie obciążenie niszczące: 209,1kN
- Odchylenie standardowe 10,8kN
- Kryterium akceptowalności: $1,2 \cdot 10,8 + 180 = 193$
- $\bar{X} > 193 \text{ kN}$

Zdj. 10: Testy termomechaniczne na izolatorach HVDC po 30 latach pracy



Zdj. 11: Test wytrzymałości resztkowej po cyklach termicznych na 30 letnich izolatorach HVDC



4. Struktura materiałowa szkła hartowanego

Szko hartowane jest materiałem amorficznym bez struktury krystalograficznej. W rzeczywistości, szkło zachowuje się jak ciecz nawet w temperaturze pokojowej. Ta fundamentalna cecha dielektryka wyjaśnia dlaczego szkło się nie starzeje. (5)(6)

Mikropęknięcia, nieodłącznie związane z porcelaną (3), w miarę upływu czasu, pod wpływem naprężeń mechanicznych lub termomechanicznych, powiększają się i stają się w konsekwencji elementami krytycznymi materiału izolacyjnego z punktu widzenia jego wytrzymałości elektrycznej lub mechanicznej. Tymczasem hartowane szkło nie zawiera takich mikropęknięć.

Gdy płynne szkło jest poddawane formowaniu na kształt klosza dielektrycznego, zostaje szybko schłodzone w wymuszonym strumieniu zimnego powietrza. Powstający gradient temperatury w całej objętości szkła będzie generował równoważny gradient naprężeń wewnętrznych, tworząc tym samym siły ściskające na powierzchni izolatora, które są równoważone przez siły rozciągające wewnątrz klosza izolatora (patrz rys.12)

Kiedy szklany klosz jest schłodzony, stała siła ściskająca utrzymuje się, wzmacniając materiał poprzez osiągnięcie wysokiej wytrzymałości mechanicznej, ale co ważniejsze, ten „ściśnięty” klosz izolatora jest odporny na powstawanie jakichkolwiek mikropęknięć. Ponieważ starzenie materiału izolacyjnego jest

bezpośrednio związane z propagacją mikropęknięć, stąd też naturalnym jest, że szkło poddane procesom hartowania nie jest podatne na procesy starzeniowe.

Każda sytuacja, kiedy nadmierna siła mogłaby wywołać lokalne naprężenia powyżej poziomu „ochronnego” działania siły ściskającej, będzie skutkowałą roztrzaskaniem klosza pozostawiając szklane odłamki, zwane potocznie „ogryzkami”, których właściwości opisano w rozdziale 1. To „zero – jedynkowe” zachowanie izolatorów szklanych jest ich unikalną cechą i zaletą dla służb eksploatacyjnych prowadzących oględziny linii.

Podsumowanie

Podczas opisywanych testów badano izolatory szklane ze szkła hartowanego, pracujące od ponad 40 lat w liniach wysokich napięć, zlokalizowanych w różnych krajach, w różnych warunkach klimatycznych i środowiskowych. Wyniki pokazują, że :

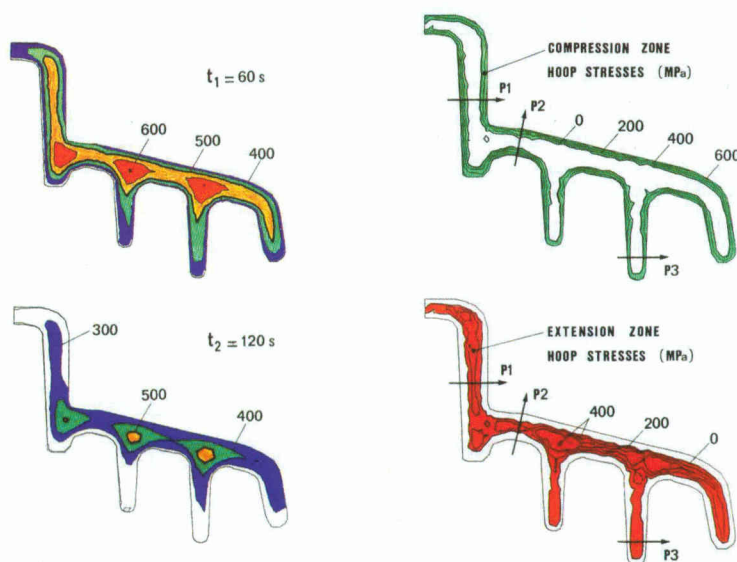
1. Parametry mechaniczne izolatorów szklanych pozostają powyżej ustalonej wartości i na poziomie podobnym do nowych izolatorów, nawet po ponad 40 latach eksploatacji! Mimo korozji występującej na trzonku w kilku testowanych izolatorach (ograniczonej do kilku starych izolatorów jeszcze bez cynkowej tulei ochronnej na trzpieniu, stosowanej obecnie w obszarach o silnym zanieczyszczeniu), badane izolatory wykazują wytrzymałość mechaniczną prze-

wyszającą wartość początkową.

2. Nie zaobserwowano żadnego jakiegokolwiek obniżenia parametrów elektrycznych nawet u izolatorów starszych niż 40 lat.
3. Uzyskane wyniki to naturalna konsekwencja połączenia struktury szkła z procesem hartowania, który powstrzymuje generowanie i rozwój mikropęknięć w dielektrycznym kloszu. Ta odporność na degradację jest powodem, dla którego izolatory szklane utrzymują pierwotne parametry w czasie.
4. Utrzymanie pożądanych właściwości w czasie eksploatacji izolatorów poddanych warunkom pracy przy prądzie stałym było podobne jak w przypadku izolatorów pracujących w liniach prądu zmiennego.
5. Wyniki badań jednoznacznie wskazują, że dla izolatorów szklanych będących w eksploatacji od ponad 40 lat nie stwierdzono oznak starzenia, wpływających na ich parametry elektryczne lub mechaniczne

Bibliografia

- [1] A. Mishra, R. Gorur, S. Venkataraman, D. Kingsbury Condition assessment of porcelain and toughened glass insulators from residual strength tests (CEIDP 2006)
- [2] L. F. Ferreira, J.M. George HVDC toughened glass insulators (World Conference & Exhibition on Insulators Rio de Janeiro May 2007)
- [3] NGK Technical Guide (Cat N° 91R)
- [4] CIGRE WG B2-03 Guide for the assessment of old cap and pin and long rod transmission line insulators made of porcelain and glass : what to check and when to replace (CIGRE Brochure Thématique 2006 N° 206)
- [5] R. Parraud, H. Pekly Long term performance of toughened glass insulators on AC and DC transmission lines improvement field experience and recommendation (CIGRE International Workshop Rio June 1998)
- [6] R. Parraud, D. Dumora Long term reliability of toughened glass insulators for overhead lines (1st Magarebi Symposium Tripoli April 1995)
- [7] D. Dumora, H. Saisse, B. Knosp, J. Goudeau, C. Licht Thermal tempering study of glass insulators by means of a finite element modellization.(14th International Congress on Glass India 1986)



Rys. 12. Termiczny profil hartowania szklanego klosza tworzącego równowagę między siłą ściskającą (warstwa wierzchnia) i siły rozciągające (w środku)

Załączniki ►

Załącznik A:

Streszczenie wyników testów mechanicznych prowadzonych na izolatorach ze szkła hartowanego, poddanych wieloletniej eksploatacji na czynnych liniach

Kraj	Długość eksploatacji (w latach)	Obciążalność znamionowa (kN)	Obciążenie niszczące	Wskaźnik wytrzymałości	Typ uszkodzenia
IRAN	20	300	425	142%	uszkodzony kołpak
IRAN	20	300	355	118%	uszkodzony sworzeń
USA	30	90	101	112%	uszkodzony kołpak
USA	30	90	119	132%	uszkodzony kołpak
USA	30	90	109	121%	uszkodzony kołpak
USA	30	90	116,5	129%	uszkodzony kołpak
USA	30	90	118	131%	uszkodzony kołpak
USA	30	90	121,4	135%	uszkodzony kołpak
USA	30	90	114,3	127%	uszkodzony kołpak
USA	30	90	113	126%	uszkodzony kołpak
USA	30	90	118,3	131%	uszkodzony kołpak
USA	30	90	103,6	115%	uszkodzony kołpak
USA	30	133	171,7	129%	uszkodzony sworzeń
USA	30	133	141,4	106%	uszkodzony sworzeń
USA	30	133	177,9	134%	uszkodzony sworzeń
USA	30	133	165	124%	uszkodzony sworzeń
USA	30	133	165,9	125%	rozbite szkło
USA	30	133	166,8	125%	rozbite szkło
USA	30	133	158,8	119%	uszkodzony sworzeń
USA	30	133	177,9	134%	uszkodzony sworzeń
USA	30	133	177,5	133%	uszkodzony sworzeń
USA	30	133	152,6	115%	rozbite szkło
Malaysia	25	70	96,5	138%	uszkodzony kołpak
Malaysia	25	70	108	154%	uszkodzony kołpak
Malaysia	25	70	114	163%	uszkodzony kołpak
Malaysia	25	70	98	140%	uszkodzony kołpak
Malaysia	25	70	102	146%	uszkodzony kołpak
Malaysia	20	114	137	120%	uszkodzony kołpak
Malaysia	20	114	128	112%	uszkodzony kołpak
Malaysia	20	114	132	116%	uszkodzony kołpak
Malaysia	20	114	125	110%	uszkodzony kołpak
Malaysia	20	114	137	120%	uszkodzony kołpak
Malaysia	27	114	134	118%	uszkodzony kołpak
Malaysia	27	114	147	129%	uszkodzony kołpak
Malaysia	27	114	143	125%	uszkodzony kołpak
Malaysia	27	114	119	104%	uszkodzony kołpak
Malaysia	27	114	152,5	134%	uszkodzony kołpak
Netherlands	40	75	119,5	159%	uszkodzony kołpak
Netherlands	40	75	123,2	164%	uszkodzony kołpak
Netherlands	40	75	109	145%	uszkodzony kołpak
Netherlands	40	75	117	156%	uszkodzony kołpak
Netherlands	30	120	133,7	111%	uszkodzony sworzeń
Netherlands	30	120	130,8	109%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	204,5	114%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	200,3	111%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	204,6	114%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	203,5	113%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	203,4	113%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	220,7	123%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	200	111%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	208,8	116%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	208,5	116%	uszkodzony sworzeń
USA DC	30	180	203,7	113%	uszkodzony sworzeń
BRAZIL DC	25	160	226	141%	uszkodzony sworzeń
BRAZIL DC	25	160	220,2	138%	uszkodzony kołpak
BRAZIL DC	25	160	225	141%	uszkodzony sworzeń
BRAZIL DC	25	160	227,3	142%	uszkodzony kołpak
BRAZIL DC	25	160	227,2	142%	uszkodzony kołpak
BRAZIL DC	20	160	224,3	140%	uszkodzony kołpak
BRAZIL DC	20	160	217,2	136%	uszkodzony sworzeń
BRAZIL DC	20	160	217,5	136%	uszkodzony kołpak
BRAZIL DC	20	160	199,5	125%	uszkodzony kołpak
BRAZIL DC	20	160	210,2	131%	uszkodzony kołpak

Załącznik B: Opis próbek wykorzystywanych podczas badań



Izolator szklany, nr ref. BS1513, po 27 latach eksploatacji w Malezji



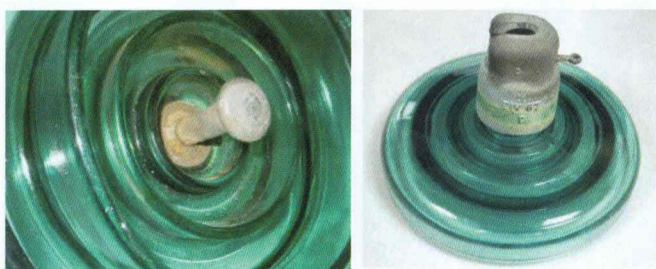
Izolator szklany, nr ref. U300, po 30 latach eksploatacji w Iranie



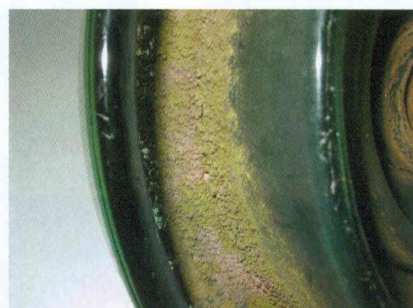
Izolator szklany, nr ref. N14R2 po 30 latach eksploatacji w USA



Izolator szklany, nr ref. 1502, po 40 latach eksploatacji w Holandii



Izolator szklany, nr ref. F18P po 30 latach eksploatacji w USA przy napięciu 500 kV DC



Nagromadzone zanieczyszczenie na izolatorze z Brazylii (Itaipu)
Parametry zabrudzenia: ESDD: 0.4mg/cm² i NSDD: powyżej 2 mg/cm²



Izolator szklany, nr ref. F16P, po 25 latach eksploatacji przy napięciu 600kV DC in Itaipu Brazil. (drugi rysunek przedstawia skuteczność ochronną złączki cynkowej montowanej na trzpieniu)

Jean-Marie George,
Scientific Director of SEDIVER

Tłumaczenie: ENERVISION
(www.enervision.pl) ■