

ROZWIĄZANIA TECHNICZNE ORAZ WYNIKI BADAŃ GIS NA ODDZIAŁYWANIE ŁUKU WEWNĘTRZNEGO , W ASPEKCIE BEZPIECZEŃSTWA EKSPLOATACJI TYCH URZĄDZEŃ W MORSKICH FARMACH WIATROWYCH..

WSTĘP

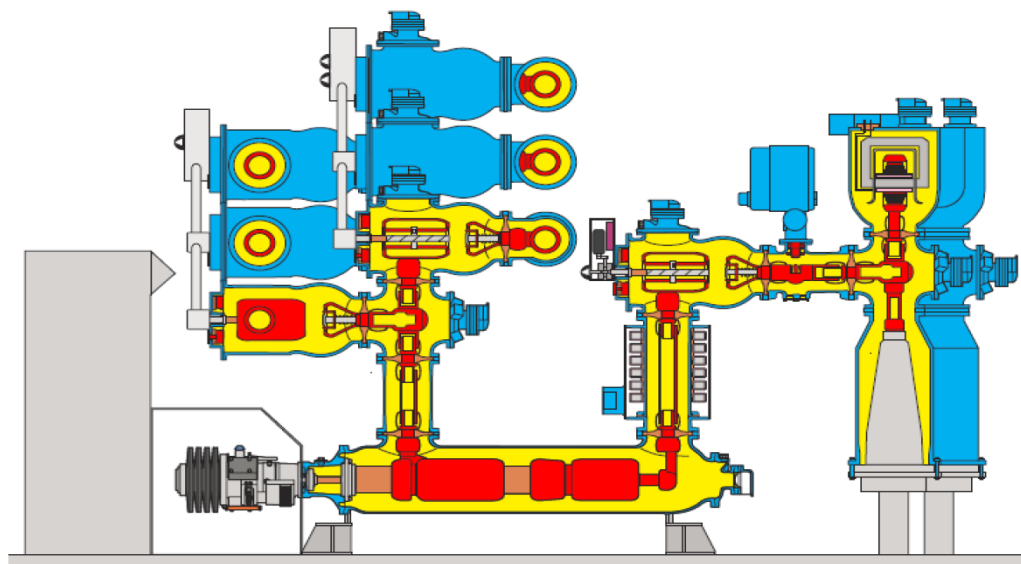
Każdy obiekt instalowany w kompleksie Morskiej Farmy Wiatrowej jest konstruowany w taki sposób , aby jego wymiary ograniczyć do absolutnego minimum, co jest związane z kosztem : materiałów (głównie odpowiedniej wytrzymałości stal) ; transportu oraz instalacji ciężkich i wielkogabarytowych komponentów w warunkach morskich , realizowanego przy pomocy wyspecjalizowanych jednostek pływających , skonstruowanych wyłącznie dla tego celu ; przechowywania komponentów przygotowanych do wysyłki na nabrzeżach portowych. Minimalizacja np. wymiarów obudowy tzw. „Top Unit”-u Morskiej Stacji Kolektorowej 66 kV/220 kV lub 275 kV, z kompletem urządzeń łączeniowych w postaci zestawów pól GIS (Gas Insulsted Switchgear) , oraz „Offshorowych” Transformatorów Mocy , prowadzi do bardzo ograniczonego miejsca wokół tych urządzeń . Dlatego przy wyborze GIS danego producenta dla zastosowania zarówno wewnątrz „Top Unit”-u Morskiej Stacji Kolektorowej , jak i w zespole Morskiej Turbiny Wiatrowej , należy zwrócić szczególną uwagę na zastosowane rozwiązania konstrukcyjne oraz wyniki badań laboratoryjnych GIS , potwierdzające skutki oddziaływania łuku wewnętrznego na elementy tego urządzenia (przypadek zwarcia wewnętrznego w GIS) , oraz na to w jaki sposób zminimalizowano narażenie zdrowia i życia personelu znajdującego się w pobliżu w/w urządzeń w przypadku wystąpienia tak ciężkiej awarii . Przedmiotem rozważań w poniższym studium będą aspekty związane ze zjawiskiem łuku wewnętrznego w GIS takie jak : rozwiązania konstrukcyjne wprowadzone w GIS produkcji ABB minimalizujące zagrożenie dla personelu ; skutki oddziaływania łuku wewnętrznego na elementy GIS ; porównanie wyników obliczeń przebiegów ciśnienia gazu w czasie , z wynikami pomiarów w przypadku przedziałów GIS wybranych do prób laboratoryjnych . Podstawą wyboru konkretnych przedziałów GIS do prób laboratoryjnych były obliczenia , przeprowadzone z zastosowaniem zaawansowanych metod symulacyjnych . Wyniki tych obliczeń będą przedstawione w dalszej części studium. Uwaga : wszystkie wartości ciśnień potwierdzone w niniejszym studium to wartości ciśnienia absolutnego.

1. Rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w przedziałach gazowych GIS produkcji ABB , mające na celu ochronę personelu stacyjnego , oraz pól GIS przed skutkami oddziaływania wewnętrznego zwarcia łukowego.

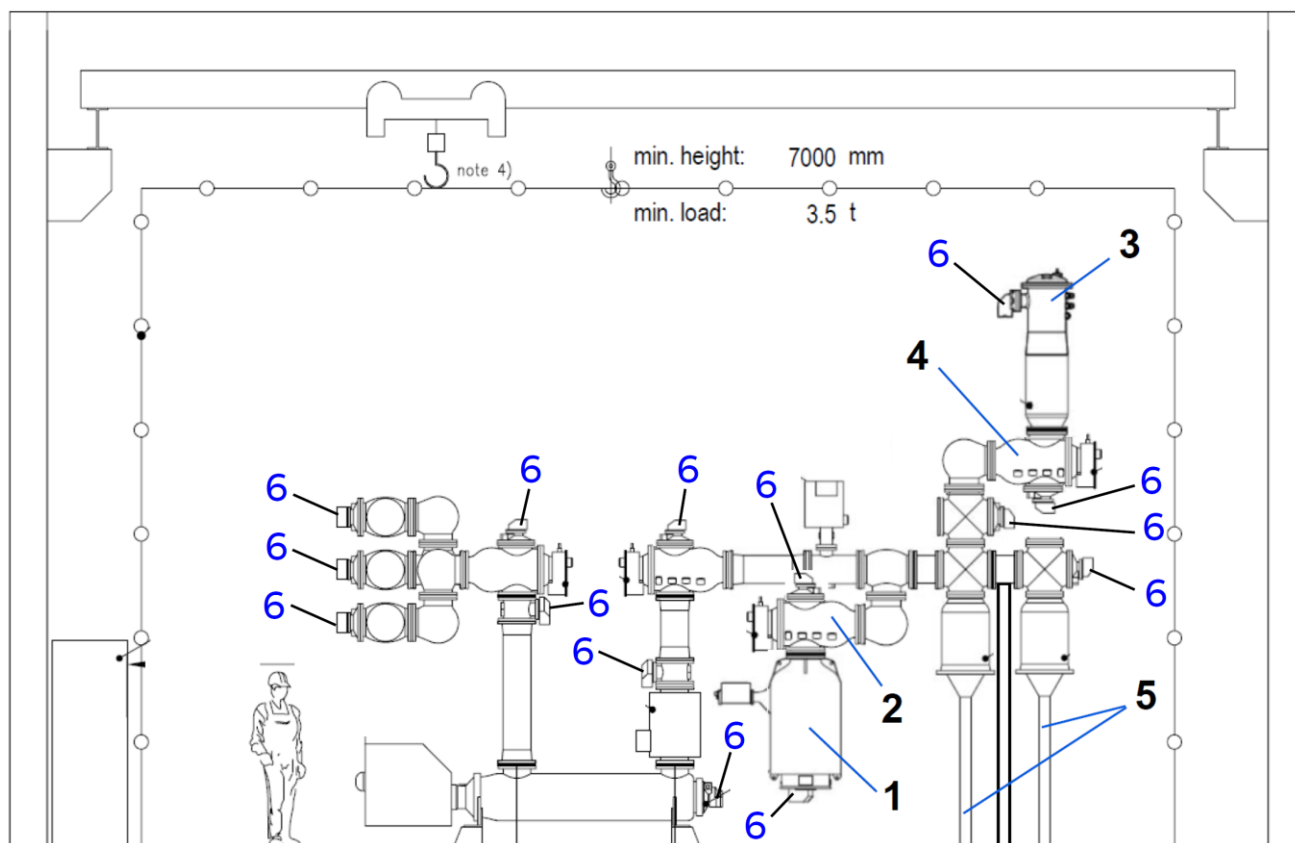
Rozwiązania konstrukcyjne zastosowane w przedziałach gazowych GIS powinny respektować wymagania w przypadku wystąpienia łuku wewnętrznego w GIS , zgodnie z Normą IEC/PN 62271-203 , tzn. :

- do rozerwania membrany bezpieczeństwa w czasie $t \leq 0,15s$ (150 ms) jest niedopuszczalna perforacja obudowy przedziału GIS ;
- podczas palenia się łuku elektrycznego w czasie 0,3 s (300 ms) , podtrzymywanego przez 100% znamionowego prądu zwarciovego wyłączalnego , jest niedopuszczalne oderwanie się elementów obudowy badanego przedziału GIS i ich odrzucenie w strefę przebywania personelu stacyjnego.

W przypadku rodziny GIS na napięcia od 72,5 kV ...do 800 kV produkcji ABB , jest przestrzegana zasada konstrukcyjna : jeśli dany przedział gazowy jest ograniczony izolatorami grodziowymi , a nie wsporczyami (z otworami w ścianie , patrz RYS. 2) , to taki przedział zawiera swój czujnik gęstości gazu SF₆ , oraz urządzenie ewakuacji gorących gazów w przypadku wystąpienia w nim łuku wewnętrznego (patrz RYS. 1a /1b ; RYS. 5 ; RYS. 14 oraz RYS. 15). W przypadku GIS na napięcia od 220 kV ...do 800 kV znajduje zastosowanie urządzenie pokazane na RYS. 5 . Przedziały GIS na napięcia od 72,5 kV ...do 145 kV oraz 170 kV , są wyposażane w elementy o innej konstrukcji (porównaj RYS. 5 z RYS. 15). Łuk elektryczny w przedziale GIS , wypełnionym gazem SF₆ porusza się z prędkością bliską prędkości dźwięku w tym gazie , która wynosi : 130 m / s , zatem w ciągu 10 ms , czyli półfali prądu zwarciovego , łuk może się przemieścić wewnątrz przedziału GIS o 1,3 m (1300 mm) ! Z powyższego wynika , że w bardzo krótkim czasie po zapłonie , łuk elektryczny może się zatrzymać tuż przy izolatorze grodziowym przedziału gazowego GIS , i aby

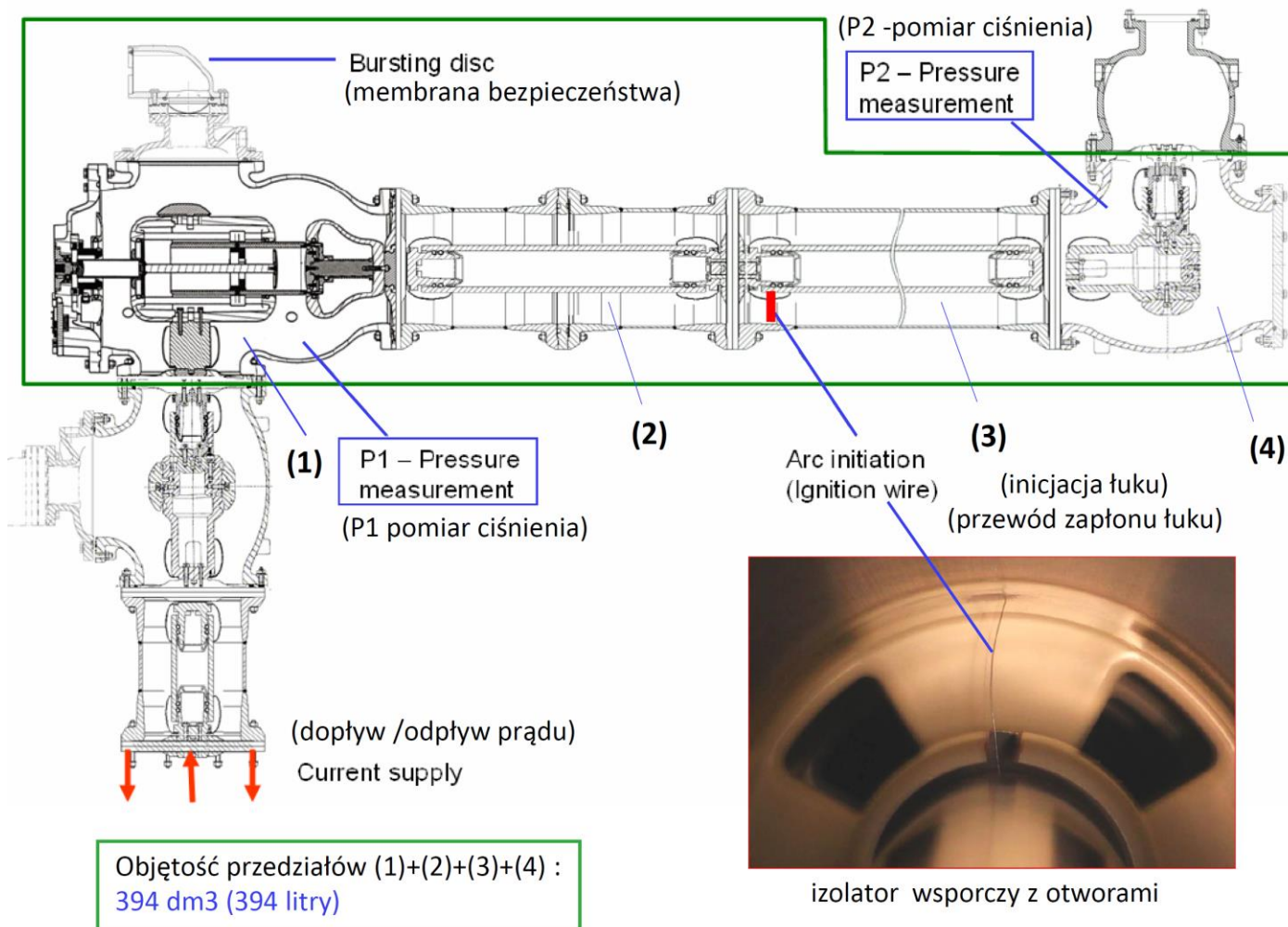


RYS. 1a. Widok pola rozdzielnicy GIS Typu ELK-14/300 na napięcia : 245 kV lub 300 kV , podwójnym układem szyn zbiorczych.



RYS. 1b. Przykład pola GISj typu ELK-14/300 , zoptymalizowanego dla zastosowań w Morskich Stacjach Kolektorowych 66 kV / 220 kV lub 66 kV / 245 kV , źródło : [1] .

- 1- przekładnik napięciowy (VT) podłączony do GIS poprzez odłączniko-uziemnik (* - trzy pozycje styku ruchomego)
- 2- odłączniko-uziemnik* zintegrowany z VT
- 3- ogranicznik przepięci ZnO podłączony do GIS poprzez odłączniko-uziemnik*
- 4- odłączniko-uziemnik* zintegrowany z ZnO
- 5- podłączenie dwóch kabli 220 kV do jednej fazy (redundancja kabli „eksportowych” 220 kV lub 275 kV)
- 6- urządzenie ewakuacji gorących gazów z poszczególnych przedziałów GIS (przypadek łuku wewnętrznego)



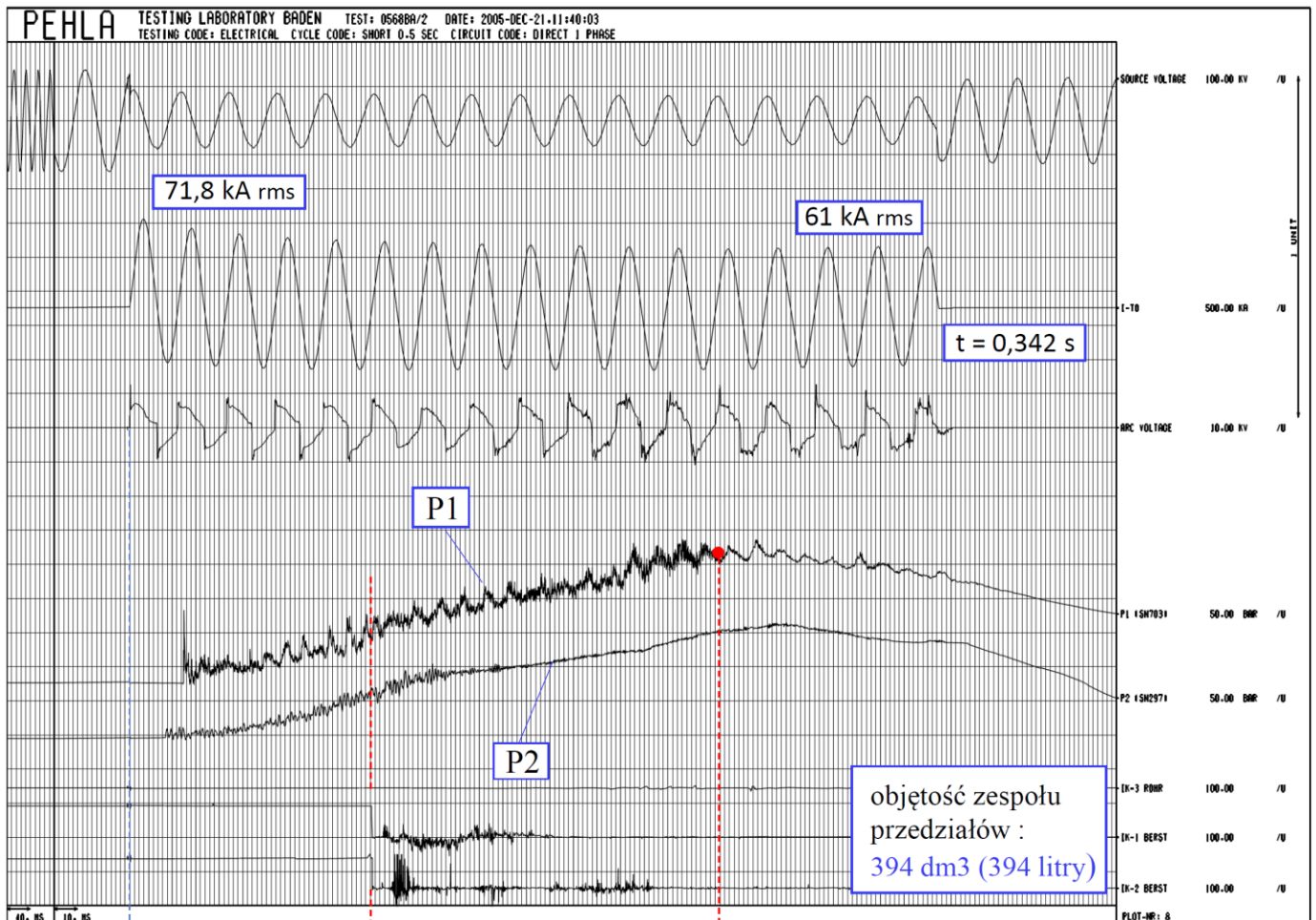
RYS. 2. Grupa przedziałów GIS typu ELK-14/300 z sumaryczną objętością 394 dm³, poddana próbom laboratoryjnym na oddziaływanie łuku elektrycznego, prąd zwarciový $I_{sc} = 65 \text{ kA rms}$, czas przepływu prądu 0,35 s, źródło: [6].

- (1) - przedział z trójpołożeniowym aparatem (funkcja odłącznika oraz uziemnika w jednym aparacie)
- (2) ; (3) - przedziały szyn zbiorczych (odcinki szyn podparte izolatorami z otworami)
- (4) - przedział łącznika kąтового

zapobiec perforacji obudowy, firma ABB stosuje odpowiednie pogrubienie ścianki obudowy przedziału w pobliżu izolatorów grodziowych (patrz RYS. 7). Aby zapewnić powtarzalność wartości ciśnienia, przy których zachodzi rozerwanie membrany bezpieczeństwa, należy ten komponent wykonać z materiału nie ulegającemu korozji, oraz zapewnić jego powtarzalną mikrostrukturę. Dodatkowo bardzo ważnym elementem technologii wytwarzania membrany bezpieczeństwa, jest spełnienie wysokich wymagań w zakresie gładkości powierzchni w miejscach przylegania elementu uszczelniającego, patrz RYS. 16.

2. Rezultaty prób laboratoryjnych w przypadku łuku wewnętrznego w przedziałach gazowych GIS typu ELK-14/300, oraz ich porównanie z wynikami obliczeń - ważne dla stosowania tego urządzenia w Morskich Stacjach Kolektorowych 66 kV /220 kV lub 245 kV.

Przed wykonaniem testów sprawdzających odporność GIS typu ELK-14/300 produkcji ABB, tzn. urządzenia stosowanego m.in. w Morskich Stacjach Kolektorowych 66 kV / 220 kV lub 245 kV, wykonano obliczenia z zastosowaniem zaawansowanych metod symulacyjnych, pozwalające otrzymać przebieg ciśnienia w czasie w przypadku przedziałów ELK-14/300, dla przypadków bardzo różniących się objętości, tzn. od 39 dm³ (litrów) ... do 4000 dm³ (rezultaty będą omawiane w dalszej części studium). Na podstawie tych obliczeń zdecydowano, że grupa przedziałów ELK-14/300 o sumarycznej objętości 394 dm³ (patrz RYS. 2), to obiekt badań w którym należy się spodziewać



Raport № PEHLA 0568 Ba

rozerwanie membrany
bezpieczeństwa
P = 1,22 MPa , po 102 ms

P1max = 2,45 MPa , po 250 ms

RYS. 3. Pomiar przebiegu ciśnienia w czasie - w dwóch różnych miejscach , po zapłonie łuku wewnątrz grupy przedziałów GIS typu ELK-14/300 , objętość 394 dm³ , patrz RYS. 2 , źródło : [6] .

P1 ; P2 – czujniki pomiaru ciśnienia (patrz RYS. 2)

najwyższego przyrostu ciśnienia generowanego przez łuk wewnętrzny , podtrzymywany przez prąd zwarciový o wartości 63 kA rms , przepływający w czasie nie krótszym od 0,3 s (300 ms) . Pomiar przebiegu ciśnienia w czasie wykonano przy zastosowaniu dwóch czujników ciśnienia , rozmieszczonych w dwóch różnych miejscach przedziałów (patrz RYS. 2 oraz RYS. 3) . Na podstawie oscylogramu pokazanego na RYS. 3 , można stwierdzić że :

- równoważny prąd zwarciový podtrzymujący łuk elektryczny wewnątrz grupy przedziałów GIS typu ELK-14/300 wynosił 65 kA rms (w początkowej fazie prąd 71,8 kA rms , a w końcowej 61 kA rms) i przepływał w czasie 0,342 s (wymagane parametry próby : 63 kA rms , czas 0,3 s) , zatem próba przebiegała przy zauważalnie wyższych parametrach , w odniesieniu do wymaganych przez Normę IEC/PN 62271-203 ;
- rozerwanie membrany bezpieczeństwa nastąpiło po czasie 102 ms , przy chwilowej wartości ciśnienia absolutnego P = 1,22 MPa (ciśnienie robocze przedziałów 0,6 MPa) ;
- maksymalna wartość zmierzonego ciśnienia wynosiła P1 max = 2,45 MPa , zmierzona po czasie 250 ms , licząc od zapłonu łuku w grupie przedziałów ELK-14/300 .

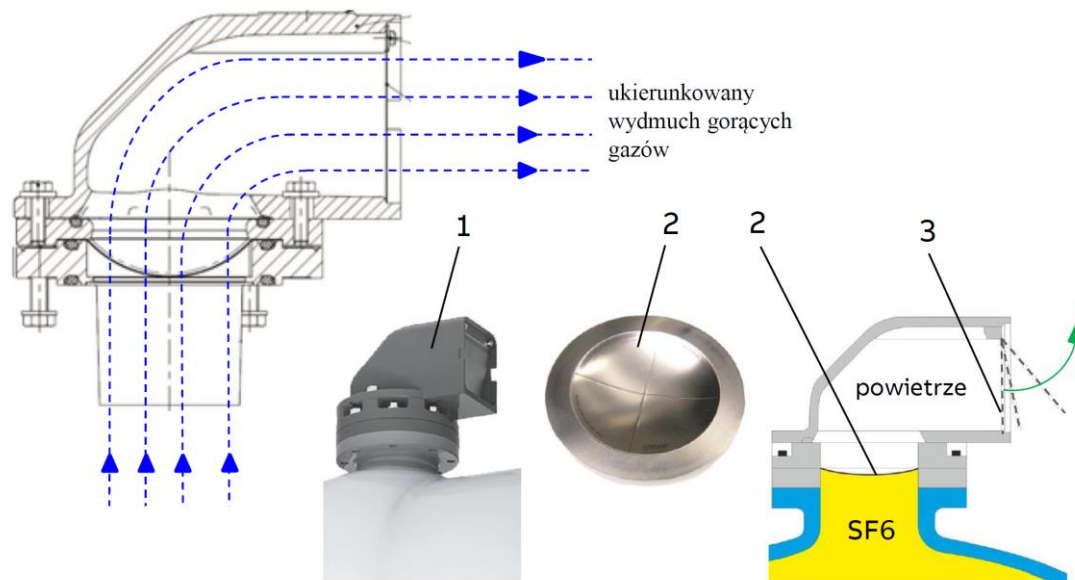
Po wykonaniu powyższej próby stan grupy przedziałów gazowych ELK-14/300 nie budził zastrzeżeń (patrz RYS. 4) . Dysponując zmierzonymi przebiegami czasowymi ciśnień P1 max oraz P2 max (patrz RYS. 3) , nałożono je na obliczony przebieg ciśnienia dla objętości 394 dm³ (patrz RYS. 6) , i widać względnie dużą zbieżność przebiegów ciśnienia P1 max oraz przebiegu obliczonego , zwłaszcza jak chodzi o ciśnienia maksymalne oraz moment czasowy ich występnia .



RYS. 4. Stan grupy przedziałów rozdzielnicy GIS typu ELK-14/300 (patrz RYS. 2) na napięcia 220 kV lub 245 kV po zakończeniu próby zwarciowej, z generacją ciśnienia gazu SF₆ przez łuk wewnętrzny (patrz RYS.3), źródło :[6].

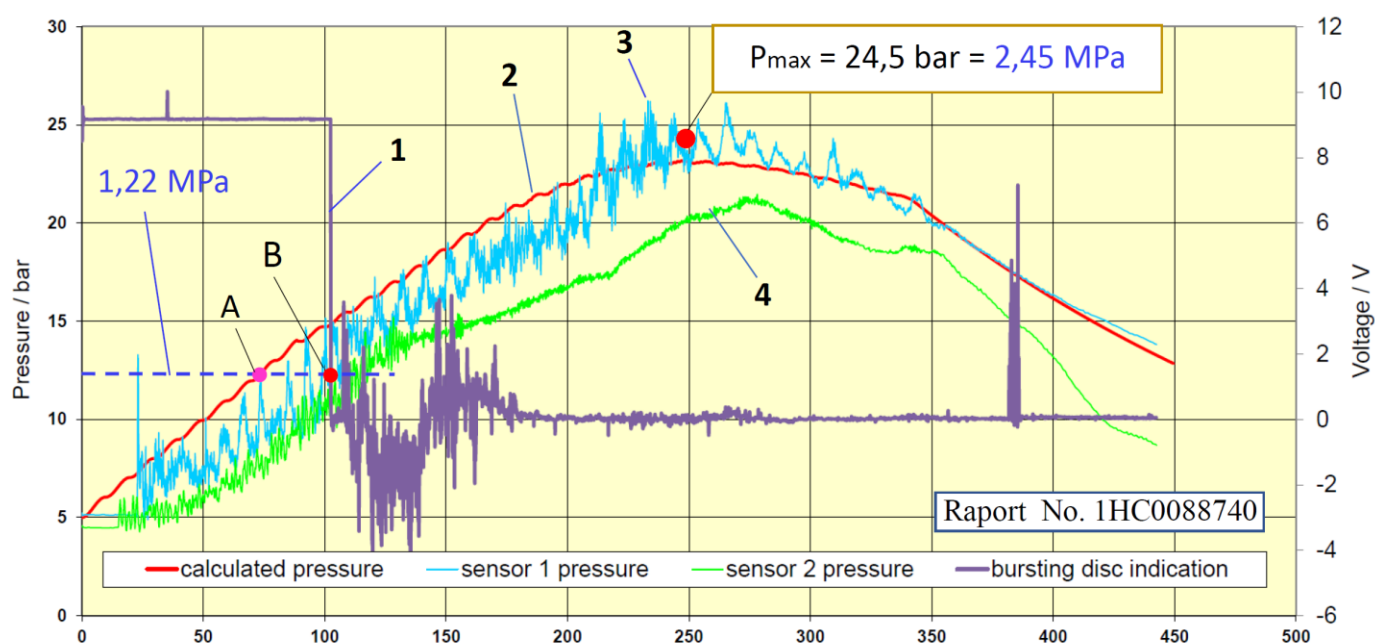
Jedynie chwile czasowe w jakich nastąpiło rozerwanie membrany bezpieczeństwa w przypadku obliczeń oraz pomiaru przebiegu ciśnienia, znacząco się różnią (patrz RYS. 6, punkt A : 73 ms, punkt B : 102 ms), ale nie ma to praktycznego znaczenia jak chodzi o bezpieczeństwo personelu pracującego na stacji.

Często można spotkać mylny pogląd oparty intuicją, że najwyższa wartość ciśnienia generowanego przez łuk wewnętrzny wystąpi w przedziale gazowym GIS z najmniejszą objętością (!?). Aby udowodnić eksperymentalnie, że jest to pogląd nieprawidłowy, wykonano próbę na oddziaływanie łuku wewnętrznego w przedziale ELK-VG3 M5 o objętości 40 dm³ (patrz RYS. 8), stosowanym w GIS typu ELK-3/420, czyli 10 razy mniejszym w porównaniu z zespołem przedziałów GIS typu ELK-14/300 o objętości 394 dm³ (patrz RYS. 2). Z pomiaru przebiegu ciśnienia, pokazanego na RYS. 9 wynika, że rozerwanie membrany bezpieczeństwa wystąpiło po bardzo krótkim czasie, wynoszącym 7,2 ms (w przedziale 394 dm³ po 102 ms). Prądy zwarciove w pełni porównywalne (40 dm³ - 64 kA rms, 394 dm³ - 65 kA rms). Po upływie 28 ms zmierzono maksymalną wartość ciśnienia $P_{max} = 2,05 \text{ MPa}$ (patrz RYS. 9), czyli znacząco mniejszą od $P_{1max} = 2,45 \text{ MPa}$ (patrz RYS. 3 - grupa przedziałów ELK-14/300 o objętości 394 dm³). Można to wyjaśnić tym, że przy małej objętości przedziału gazowego GIS, rozerwanie membrany bezpieczeństwa następuje po bardzo krótkim czasie od zaistnienia zwarcia. Rozerwanie membrany inicjuje szybki wyrzut gazu SF₆ i w takim przedziale szybko maleje gęstość gazu SF₆. Jeśli energia wydzielana w łuku elektrycznym jest porównywalna (prąd; czas palenia się łuku), to o wartości przyrostu ciśnienia w czasie, decyduje gęstość gazu we wnętrzu zbiornika. Wystarczy porównać czas palenia się łuku przy nienaruszonej membranie (do rozerwania membrany taka sama gęstość SF₆ w obydwu przedziałach), tzn. : 7,2 ms - przedział 40 dm³; 102 ms - grupa przedziałów 394 dm³, i niższa wartość ciśnienia P_{max} zmierzona w przedziale GIS o dziesięciokrotnie mniejszej objętości - nie może dziwić.



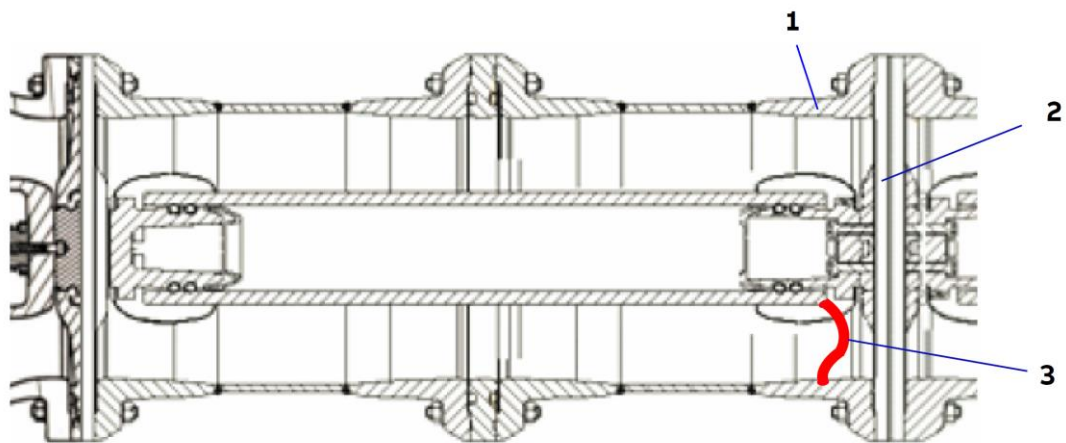
RYS. 5. Urządzenie dla ukierunkowanego wydmuchu gorących gazów w przypadku powstania łuku elektrycznego w przedziale GIS, zawierające kalibrowaną membranę bezpieczeństwa, rozwiązanie stosowane w GIS typu ELK-14/300, źródło: [6].

- 1- element ukierunkowanego wydmuchu gorących gazów, zamocowany na obudowie jednego z przedziałów GIS
- 2- kalibrowana membrana bezpieczeństwa (materiał – nikiel)
- 3- uchylna zasłotka, chroniąc membranę przed uszkodzeniem mechanicznym



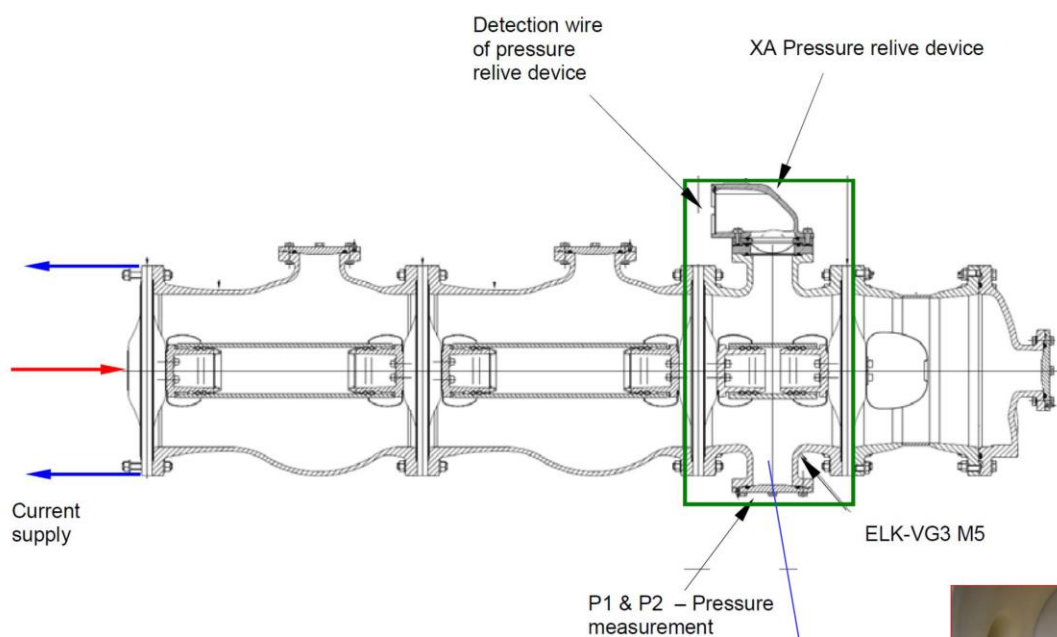
RYS. 6. Porównanie przebiegów przyrostu ciśnienia w czasie: przebiegi zmierzone oraz przebieg obliczony, po załamaniu łuku wewnątrz grupy przedziałów GIS typu ELK-14/300 - objętość 394 dm³ (patrz RYS. 2), źródło: [2]; [3]; [4]; [6].

- 1 - moment rozerwania membrany bezpieczeństwa (wartość zmierzona)
- 2 - przebieg ciśnienia gazu SF₆ w czasie (wartość obliczona)
- 3 - przebieg ciśnienia gazu SF₆ w czasie (wartość zmierzona, miejsce pomiaru P₁, patrz RYS. 2)
- 4 - przebieg ciśnienia gazu SF₆ w czasie (wartość zmierzona, miejsce pomiaru P₂, patrz RYS. 2)
- A - moment rozerwania membrany bezpieczeństwa - obliczony przebieg ciśnienia (73 ms)
- B - moment rozerwania membrany bezpieczeństwa - zmierzony eksperymentalnie (102 ms)



RYS. 7. Przykład przedziału szyn zbiorczych GIS typu ELK-15/300 (patrz RYS. 2) , źródło : [6].

- 1- elementy z pogrubionymi ściankami (pogrubienie dla eliminacji perforacji obudowy przez łuk wewnętrzny)
- 2- izolator grodziowy przedziału gazowego
- 3- łuk wewnętrzny w bezpośrednim sąsiedztwie izolatora grodziowego - po przemieszczeniu się we wnętrzu przedziału gazowego GIS



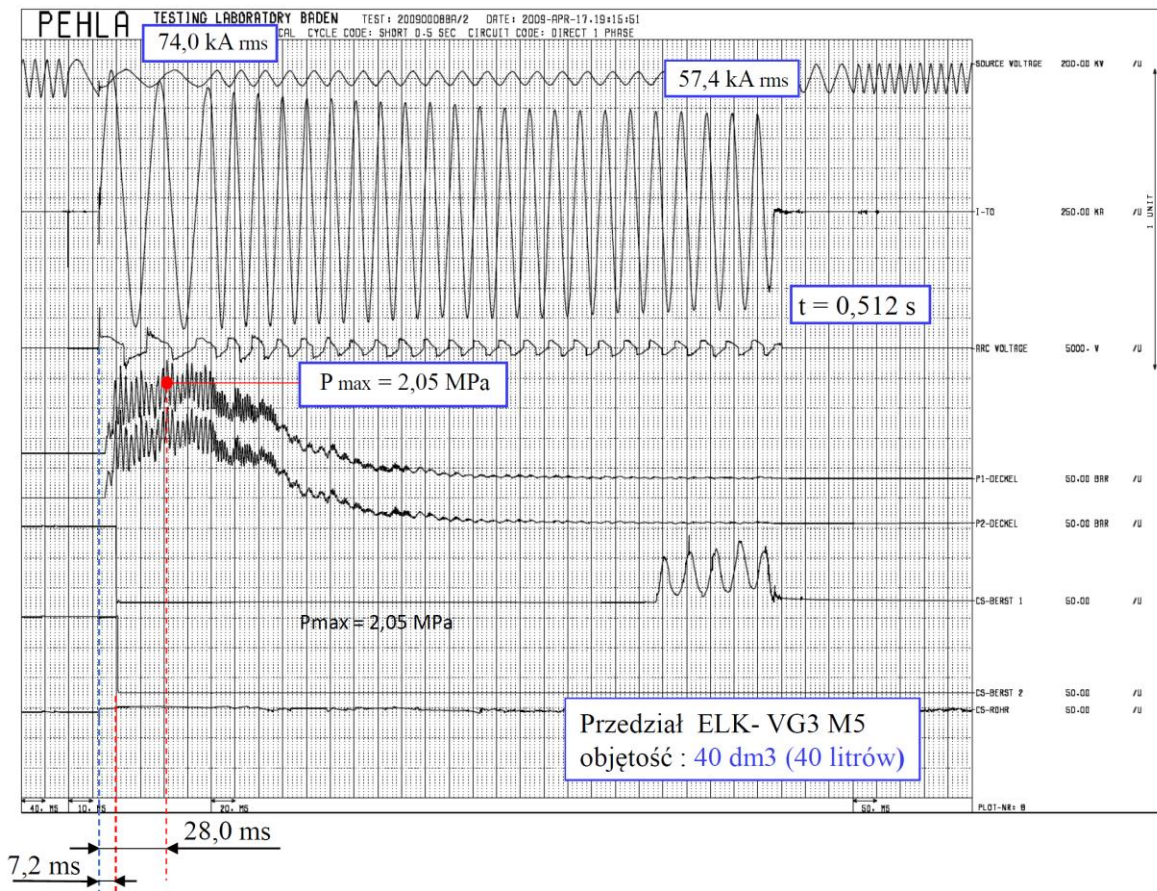
Przedział GIS : ELK-VG3 M5 , objętość 40 dm³ (40 litrów)

Raport Badań № PEHLA 0908 Ba-2



Przewód dla inicjacji łuku wewnętrznego

RYS. 8. Obiekt badań dla testu : łuk wewnętrzny na przedziale ELK-VG3 M5 z minimalną objętością , równą 40 dm³ (40 litrów) , stosowany w GIS typu ELK-3/420 , źródło : [7] .



Prąd równoważny łuku wewnętrznego: **64 kA rms**

Czas trwania zwarcia : **0.5 s**

Czas do rozerwania membrany bezpieczeństwa : **7.2 ms**

Cisnienie w momencie rozerwania membrany bezpieczeństwa : **1.48 MPa**

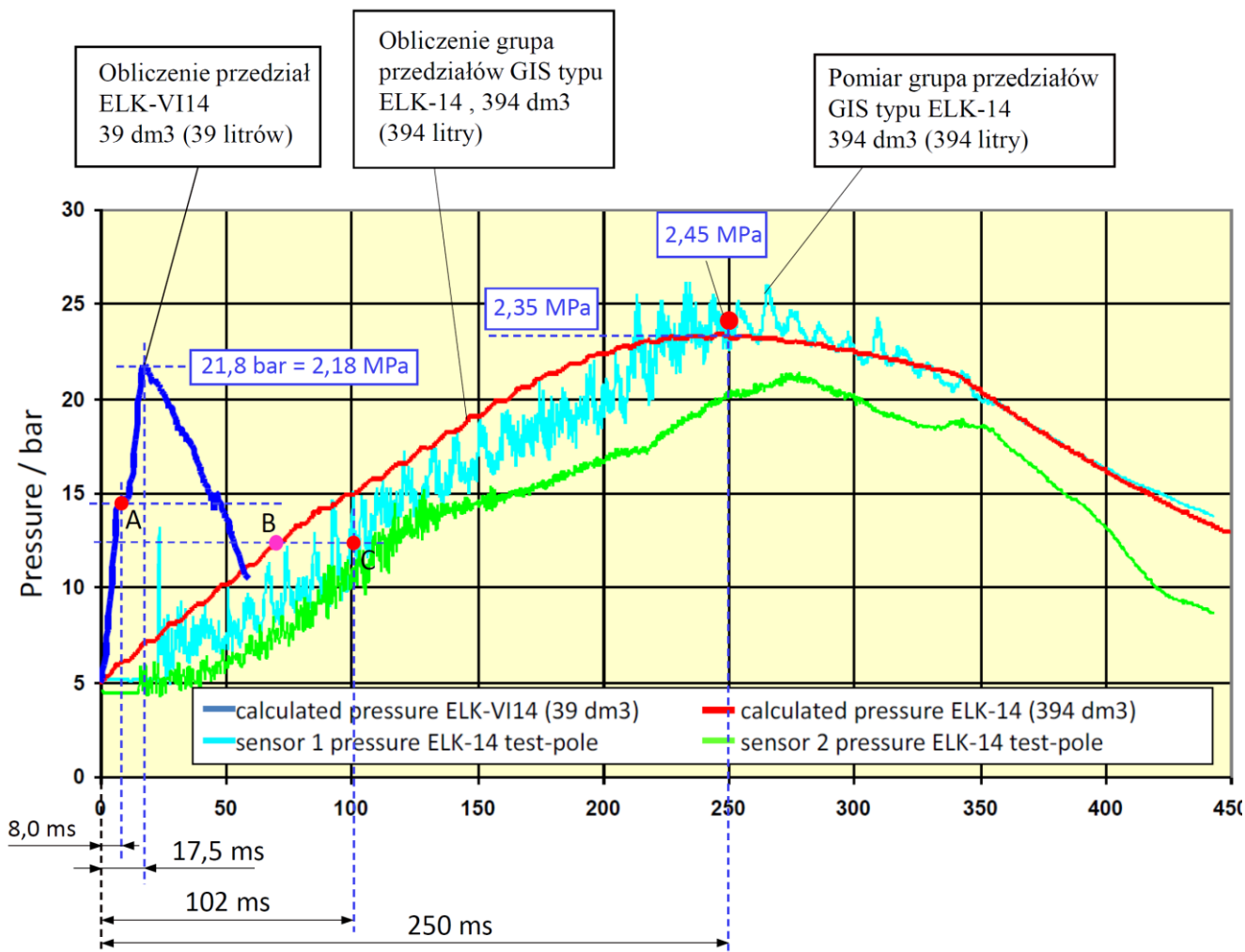
Maksymalne ciśnienia zmierzone w dwóch miejscach przedziału : **2.05 MPa**
2.02 MPa

RYS. 9. Przebieg ciśnienia gazu SF₆ czasie , generowanego w przypadku łuku wewnętrznego w przedziale ELK-VG3 M5 z objętością 40 dm³ (40 litrów) , stosowanym w GIS typu ELK-3/420 , patrz RYS. 8 , źródło : [7] .

Wyniki pomiarów przyrostu ciśnienia w przypadku łuku wewnętrznego w przedziale gazowym ELK-VG3 o bardzo małej objętości wynoszącej 40 dm³ , stosowanym w GIS typu ELK-3/420 , zainicjowały wykonanie obliczeń ciśnienia dla równie małego przedziału ELK-VI 14 , stosowanego w GIS typu ELK-14/300 . Rezultaty obliczeń dla przedziału ELK-VI 14 pokazano na RYS. 10. Jeśli porównamy przebieg ciśnienia zmierzonego w przedziale ELK-VG3 (patrz RYS. 9) , z parametrami przebiegu obliczonego dla przedziału ELK-VI 14 (patrz RYS. 10) , to należy zauważyć , że :

- moment rozerwania membrany w przypadku przebiegu zmierzonego oraz obliczonego , praktycznie się nie różni ;
- ciśnienia w momencie rozerwania się membrany , pomiar : 1,48 MPa , obliczona wartość – identyczna ;
- zmierzone ciśnienie maksymalne P max = 2,05 MPa ; obliczona wartość P max = 2,18 MPa .

Powyższe porównanie , wykonane dla przedziałów gazowych o bardzo małej objętości (39 dm³ versus 40 dm³) , oraz przedstawione wcześniej dla objętości grupy przedziałów 394 dm³ , jednoznacznie dowodzą tego , że aparat obliczeniowy stosowany w firmie ABB , pozwala wiarygodnie obliczyć przebiegi czasowe ciśnienia w przypadku powstania łuku wewnętrznego w przedziałach GIS - z bardzo różniącą się objętością , i dzięki czemu jest możliwe określenie tzw. „krytycznej” objętości przedziału gazowego lub grupy przedziałów GIS , w którym będzie generowany największy przyrost ciśnienia , i taki obiekt badań należy przygotować do testów laboratoryjnych . W przypadku GIS typu ELK-14/300 , stosowanego m.in. w Morskich Stacjach Kolektorowych 66 kV / 220 kV lub 245 kV taka objętość wynosiła 394 dm³. W celu wyznaczenia granicznej objętości przedziału w GIS typu ELK-14/300 , gdzie jeszcze może nastąpić rozerwanie membrany bezpieczeństwa , w przypadku przepływu prądu zwarciovego o wartości 63 kA rms w czasie 0,3 s , wykonano szereg obliczeń przebiegów ciśnienia gazu SF₆ , w przypadku łuku wewnętrznego w przedziałach gazowych o objętościach : od 108 dm³ ... do 4000 dm³ (patrz RYS. 11) . Przebiegi pokazane na RYS. 11a ; 11b ; 11c ; 11d , potwierdzają wcześniej opisaną prawidłowość : im mniejsza objętość przedziału tym szybsze rozerwanie membrany bezpieczeństwa (patrz punkt A) ; objętość „krytyczna” w której jest generowane najwyższe



RYS. 10. Porównanie przebiegów ciśnienia gazu SF₆ - zmierzonych oraz obliczonych , generowanych przez łuk wewnętrzny , w przypadku przedziałów gazowych GIS typu ELK-14/300 - z dziesięciokrotnie różniącą się objętością , źródło : [2] ; [3] ; [4] ; [6]. .

A - moment rozerwania membrany bezpieczeństwa - obliczony przebieg ciśnienia (8,0 ms)

B - moment rozerwania membrany bezpieczeństwa - obliczony przebieg ciśnienia (73 ms)

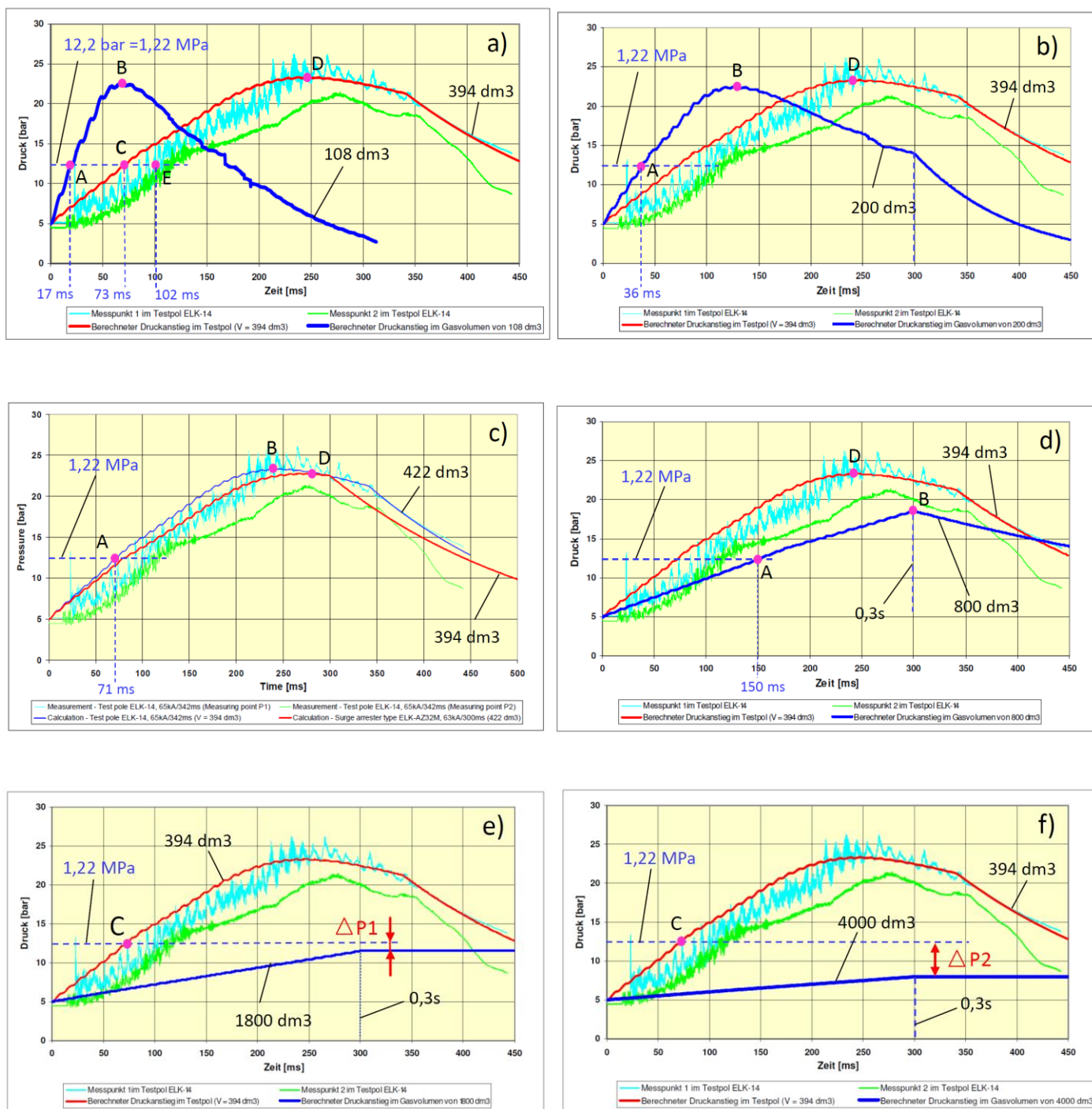
C - moment rozerwania membrany bezpieczeństwa - zmierzony eksperymentalnie (102 ms)

ciśnienie gazu 394 – 422 dm³ (patrz RYS. 11c , punkty B oraz D) ; po przekroczeniu objętości 1800 dm³ wzrost ciśnienia SF₆ w tym przedziale gazowym będzie na tyle mały (patrz RYS. 11e) , że może nie nastąpić rozerwanie membrany bezpieczeństwa (!) , jeśli rozważamy podtrzymanie łuku przy : przepływie prądu o wartości 63 kA rms ; czasie przepływu : 0,3 s (300 ms). To spostrzeżenie jest tym bardziej aktualne dla jeszcze większej objętości przedziału gazowego GIS np. 4000 dm³ (patrz RYS. 11f) . Charakterystyka przedstawiona na RYS. 12 , to wynik dużej liczby obliczeń , wykonanych w ABB dla przedziałów gazowych GIS typu ELK-14/300 , poczynając od objętości 39 dm³ a kończąc na przedziale 4000 dm³ (np. bardzo długi GIL - Gas Insulated Link).

W przypadku kompletnej rodziny GIS produkcji ABB , w tym i dla GIS typu ELK-14/300 , przyjęto założenie konstrukcyjne , polegające na stosowaniu urządzenia ukierunkowanego wydmuchu gorącego gazu (patrz RYS. 5) we wszystkich przedziałach gazowych (!) , ograniczonych izolatorami grodziowymi , niezależnie od ich objętości , zakładając , że czas palenia się łuku elektrycznego może być dłuższy od 0,3s (300 ms) , czyli czasu rekomendowanego przez z Normę IEC/PN 62271-203 , w przypadku badań odporności GIS na oddziaływanie łuku wewnętrznego.

3. Łuk wewnętrzny w przypadku GIS na napięcia 72,5 kV ...145 kV z trzema fazami w jednej obudowie, wyniki badań laboratoryjnych GIS typu ELK-04 produkcji ABB , stosowanego w Morskich Stacjach Kolektorowych , oraz w jednostkach Morskich Turbin Wiatrowych dużej mocy .

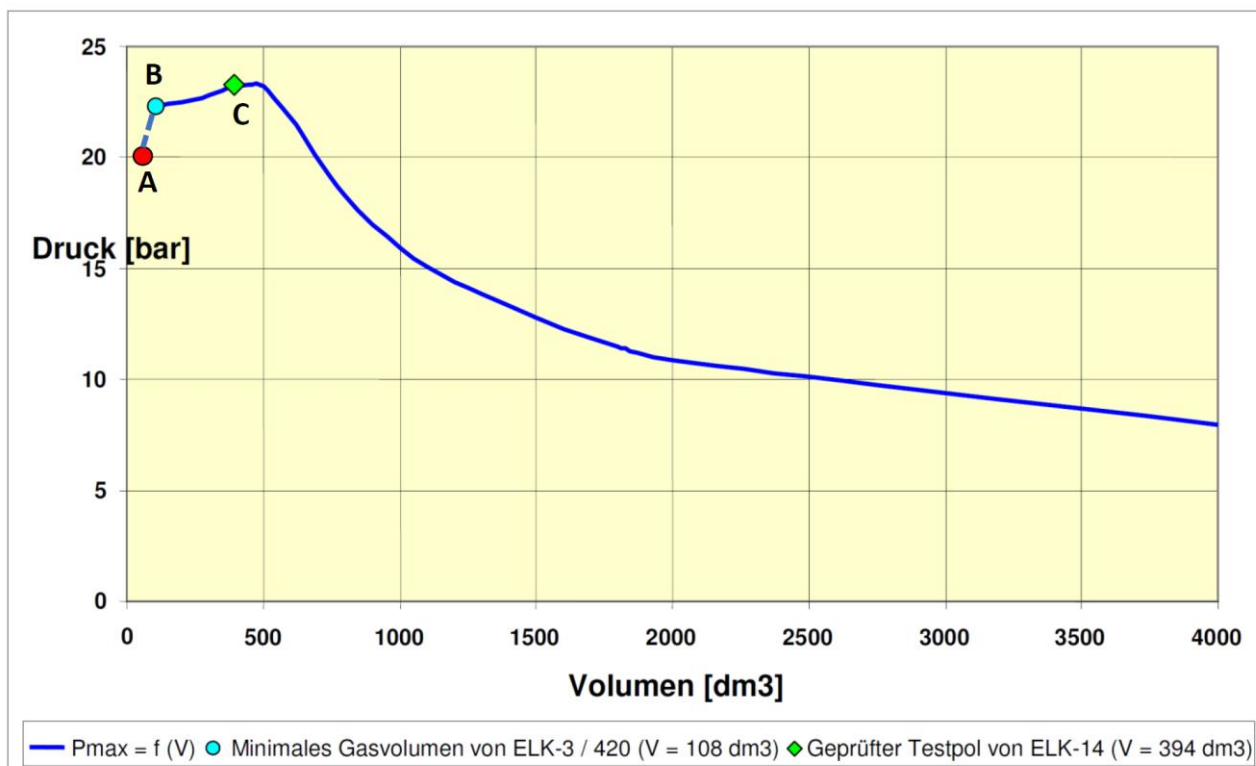
Firma ABB jako pierwsza zaoferowała kompaktowe pola GIS z trzema fazami w jednej obudowie przedziałów gazowych (patrz RYS. 13 oraz RYS. 14) w 1992 roku (!) . Po wygaśnięciu zastrzeżeń patentowych wiele firm skopiowało ten standard konstrukcyjny , i obecnie to rozwiązanie jest oferowane przez wiele innych firm . Rozważając odporność



RYS. 11. Wyniki obliczeń przebiegów ciśnienia gazu SF6 w przypadku wystąpienia łuku wewnętrznego w przedziałach GIS typu ELK-14/300, w szerokim zakresie zmian objętości przedziałów : od 108 dm3 (108 litrów) ... do 4000 dm3, odniesione do wyników pomiarów przedziału o objętości 394 dm3 , źródło : [2] ; [3] ; [4] ; [6].

tego typu konstrukcji GIS na oddziaływanie łuku wewnętrznego należy bezwzględnie zwrócić uwagę , czy i w jaki sposób zostały przeprowadzone próby laboratoryjne w przypadku w/w GIS . Dla tego typu konstrukcji jest niedopuszczalne wykonanie w/w prób z jednofazowym prądem zwarciovym , podtrzymującym palenie się łuku wewnętrznego . Zgodnie w wymaganiami Normy IEC/PN 62271-203 w przypadku GIS z trzema fazami przedziałów w jednej obudowie , należy zainicjować zwarcie tójfazowe w badanym przedziale , i łuk wewnętrzny należy podtrzymywać przy pomocy prądu zwarciovego trójfazowego (!) . Przedział gazowy ELK-TE 04 (patrz RYS. 17 - objętość przedziału 600 dm3) stosowany GIS typu ELK-04 na napięcia 72,5 kV ...170 kV , poddano próbie na oddziaływanie łuku wewnętrznego (patrz RYS. 18) , podtrzymywanego prądem trójfazowym w czasie 0,32 s . Prądy zastępcze poszczególnych

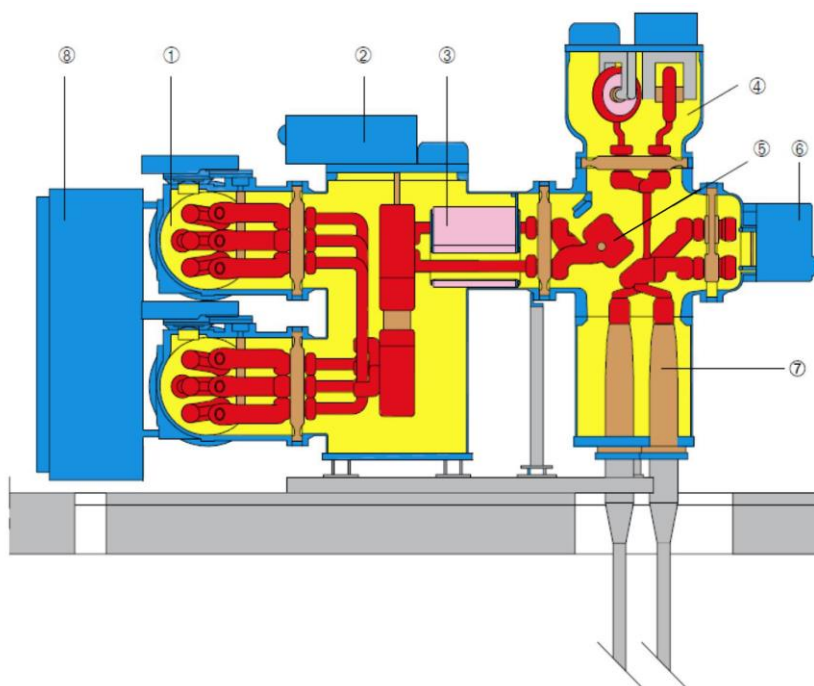
faz wynosiły : R /65 kA rms ; S /69 kA rms ; T /65 kA rms . Pomyślnie zakończona próba laboratoryjna była ostrzejsza w odniesieniu do wymagań Normy IEC/PN 62271-203 (wymagane parametry 63 kA rms , t = 03 s).



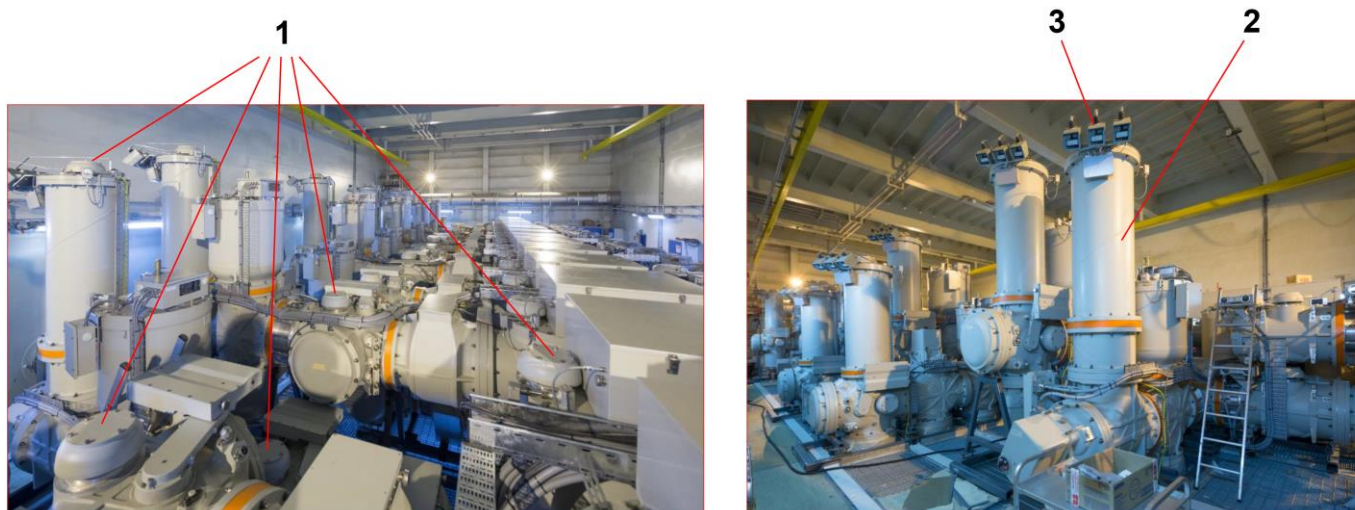
RYS. 12. Charakterystyka zależności ciśnienia gazu SF₆ w przedziałach GIS w funkcji ich objętości, sporządzona na podstawie obliczeń wykonanych dla GIS typu ELK-14/300 produkcji ABB, źródło : [2] ; [3] ; [4] ; [6] ; [7].

Punkty A ; B ; C na charakterystyce to wynik prób laboratoryjnych

- 1 – Przedział szynowy z kombinowanym odłącznikiem-uziemiającym
 - 2 – Wyłącznik - 3 fazy wyłącznika wewnątrz jednej obudowy
 - 3) – Przekładnik prądowy
 - 4) – Przekładnik napięciowy
 - 5) – Kombinowany odłącznik-uziemiając od strony linii
 - 6) – Szybki uziemiając w przedziale kablowym
 - 7) – Przedział kablowy
 - 8) - Szafa sterowania
- - gaz SF₆ wewnątrz przedziałów

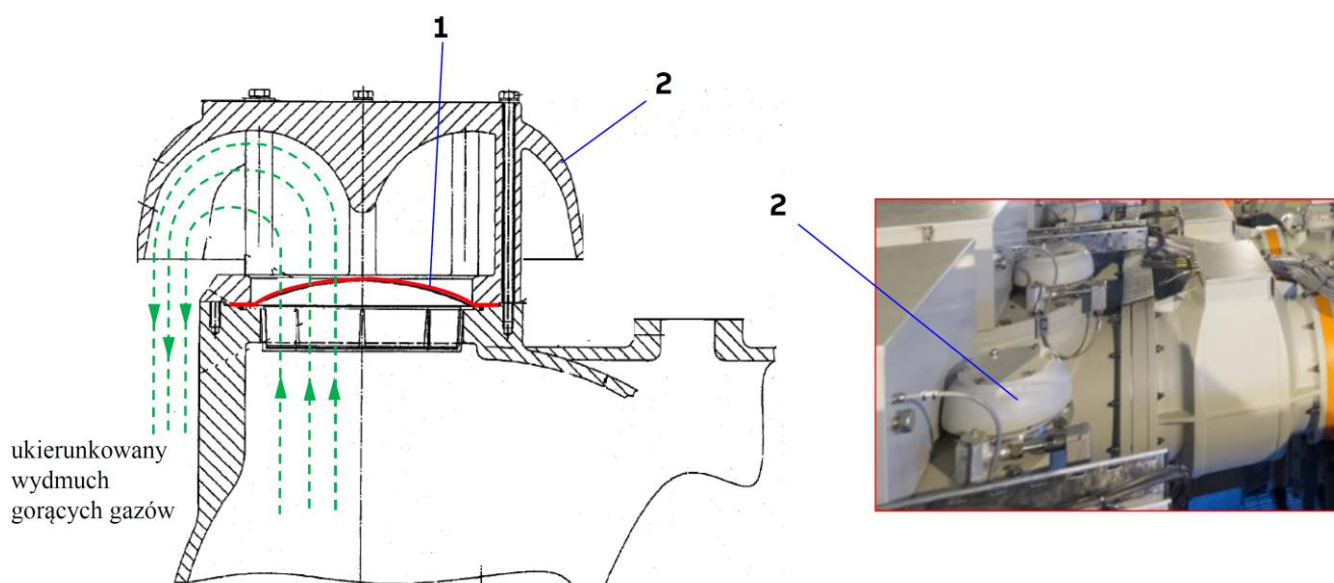


RYS. 13. Główne elementy pola rozdzielnic na napięcia znamionowe Un = 72,5 kV ...145 kV typu ELK-04, produkcji ABB, wykonaniu standardowym.



RYS. 14. Przykład wielopolowej rozdzielnicy w izolacji gazowej typu ELK-04, zainstalowanej w morskiej Stacji Kolektorowej HVAC wielkiej mocy po stronie 66 kV (prąd szyn zbiorczych 4000 A, prąd wyłączalny 63 kA rms), źródło : [1].

- 1- elementy ukierunkowanego wydmuchu gorących gazów po rozerwaniu membrany bezpieczeństwa
- 2- ograniczniki przepięć ZnO trzech faz we wspólnej obudowie
- 3- liczniki zadziałań ograniczników ZnO w poszczególnych fazach

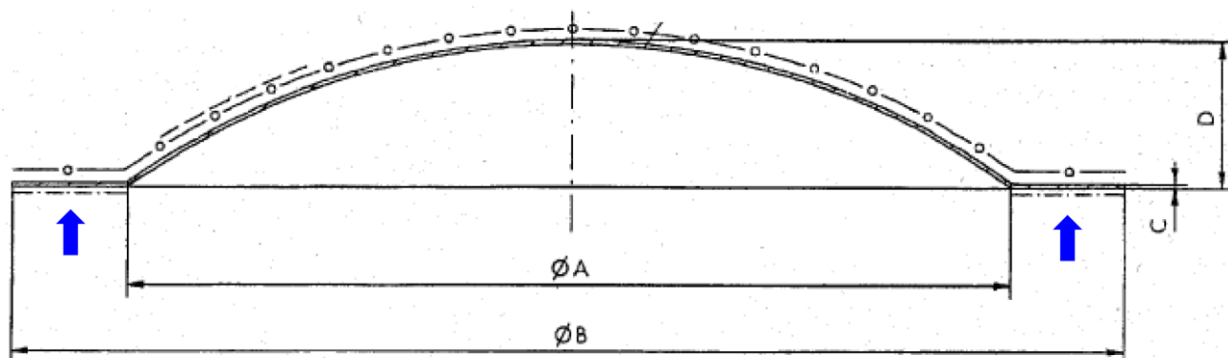


RYS. 15. Zasada działania urządzenia dla ukierunkowanego wydmuchu gorących gazów, wyposażone w membranę bezpieczeństwa, stosowane w przedziałach GIS typu ELK-04 na napięcia : 72,5 kV ... 145 kV, źródło : [5].

- 1- membrana bezpieczeństwa
- 2- element sterujący wydmuchem gorących gazów (kierunek, tłumienie fali odbitej)

Przedział gazowy ELK-TE 04 (patrz RYS. 17) nie został wybrany do prób laboratoryjnych przypadkowo. Obliczenia wskazały, że w przypadku próby z łukiem wewnętrznym - podtrzymywanym przez prąd trójfazowy o wartości 63 kA rms - w czasie 0,3 s, przy objętości przedziału ok. 600 dm³, należy się spodziewać maksymalnego przyrostu ciśnienia. Dodatkowymi argumentami za wyborem takiego obiektu badań były :

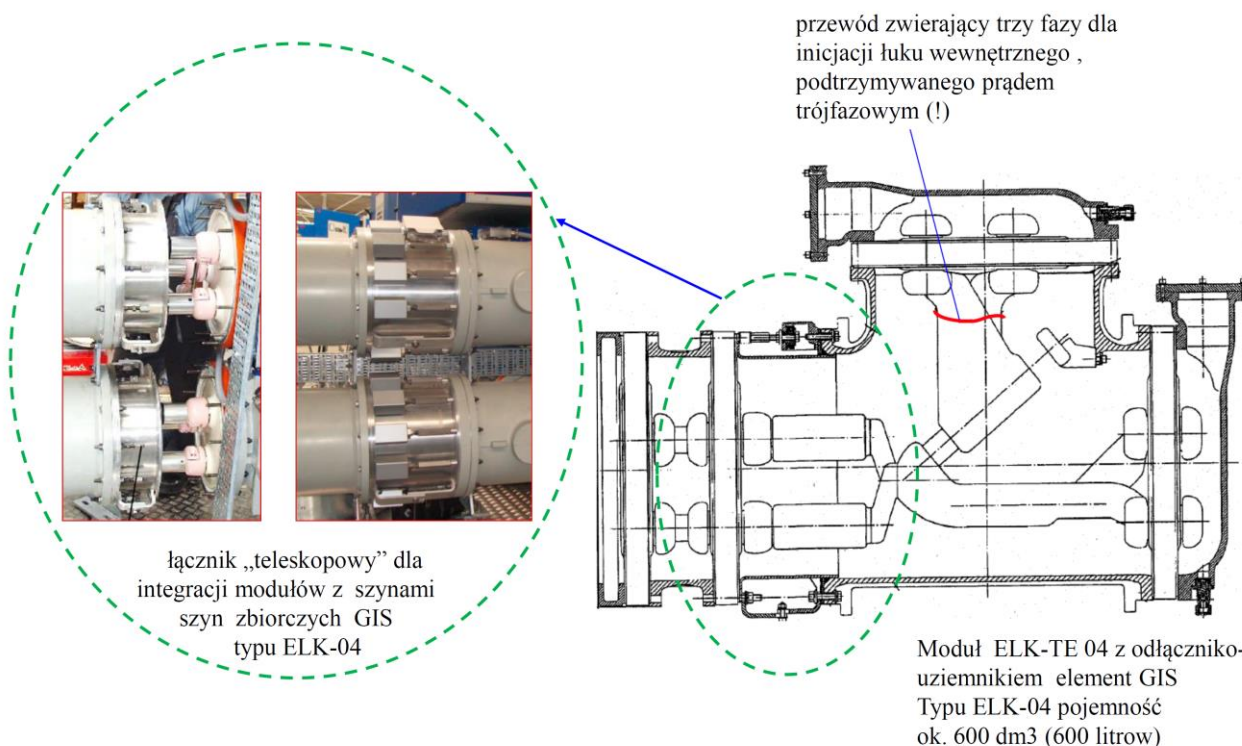
-- względy konstrukcyjne , gdyż przedział ELK-TE 04 zawiera element obudowy typu „teleskopowego” (patrz RYS. 17) , ułatwiający montaż szyn zbiorczych ELK-04 na miejscu , oraz prace serwisowe w polu ELK-04 , i sprawdzenie zachowania się takiej konstrukcji w sytuacji wysokiego ciśnienia , generowanego przez łuk wewnętrzny było bardzo ważnym celem technicznym ;



RYS. 16. Kształt membrany bezpieczeństwa używanej w GIS typu ELK-04 , materiał : nikiel , kalibrowana grubość oraz zawężona tolerancja dla odchyłek wymiarów , źródło : [5] .

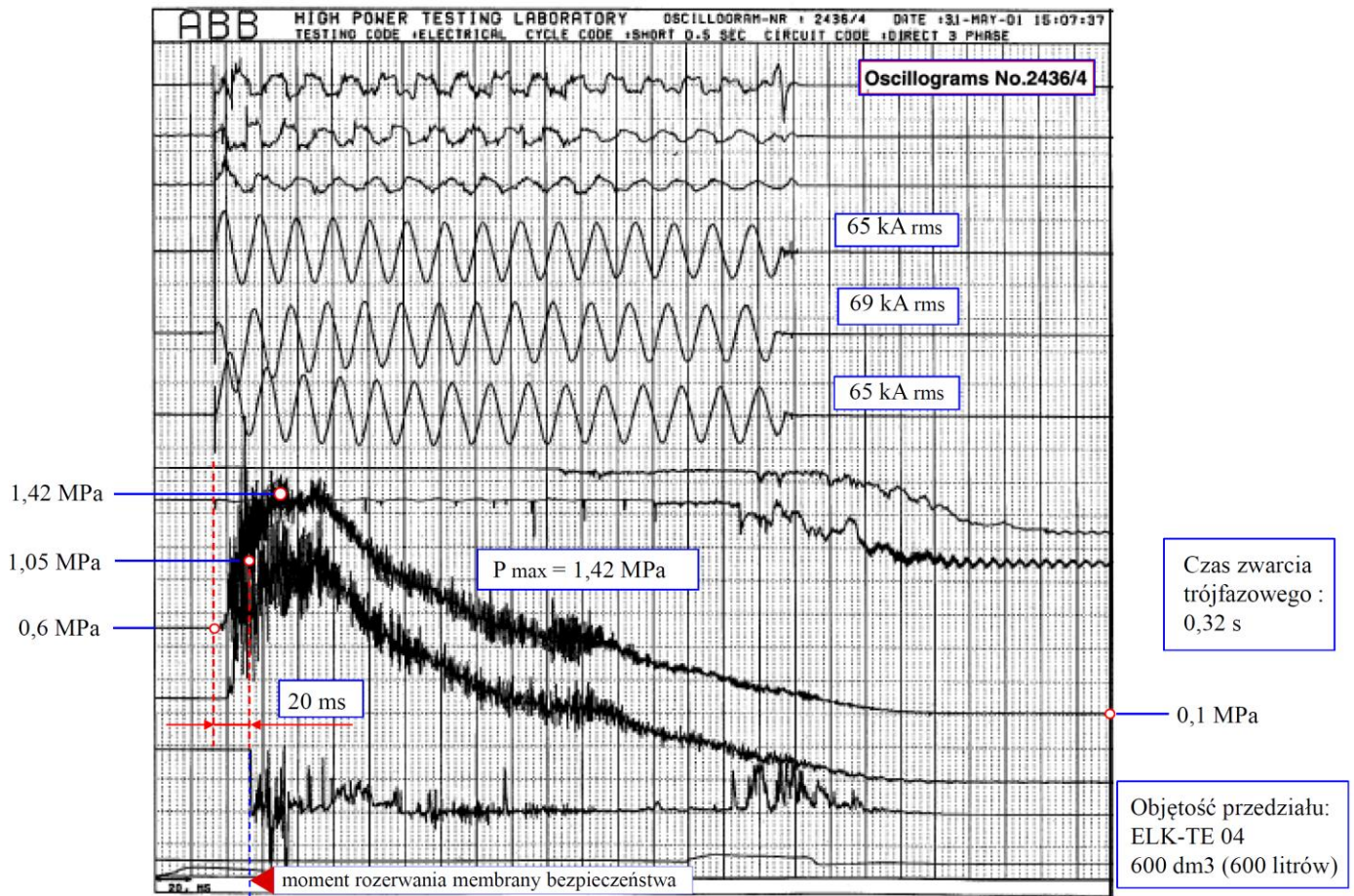
- wymiar y C ; D zmienne w zależności od ciśnienie rozerwania membrany

↑ - powierzchnia chroniona z wysokim stopniem gładkości



RYS. 17. Przedział ELK-TE 04 stosowany w GIS typu ELK-04 na napięcia : 72,5 kV ... 145 kV, poddany trójfazowej próbie zwarciowej ze względu na oddziaływanie łuku wewnętrznego (objętość 600 dm³), źródło : [5].

-- względy funkcjonalne : przedział ELK-TE 04 zawiera trójpołożeniowy aparat : położenie No. 1 załączony - przewodzi prąd roboczy ; położenie No. 2 - bezpieczna przerwa izolacyjna (funkcja odłącznika) ; położenie końcowe No. 3 - uziemienie (funkcja uziemiennika) , a statystyki związane z prawdopodobieństwem powstania łuku wewnętrznego w GIS dowodzą , że najbardziej prawdopodobnym miejscem powstania łuku wewnętrznego w GIS , jest przedział zawierający uziemiennik .



RYS. 18. Rejestracja parametrów trójfazowej próby zwarciowej ze względu na oddziaływanie łuku wewnętrznego na przedział ELK-TE 04 (objętość 600 dm³), stosowany w GIS typu ELK-04 na napięcia: 72,5 kV ... 145 kV, źródło: [5].

Wyniki pomiarów laboratoryjnych wykonanych na przedziale ELK-TE 04 o objętości ok. 600 dm³, potwierdzone oscylogramem, pokazanym na RYS. 18, są następujące:

- rozerwanie membrany bezpieczeństwa po czasie 20 ms, przy wartości chwilowej ciśnienia $P = 1,05 \text{ MPa}$, i warto ten rezultat porównać z grupą przedziałów GIS typu ELK-14/300 o objętości 394 dm³ (próba jednofazowa, bo każda faza ELK-13/300 posiada swoje przedziały gazowe), gdzie rozerwanie membrany bezpieczeństwa zarejestrowano po czasie 102 ms (pięciokrotnie dłuższym), przy wartości chwilowej ciśnienia 1,22 MPa (patrz RYS. 3 oraz RYS. 6);
- maksymalne ciśnienie w przedziale ELK-TE 04 wyniosło 1,42 MPa, i tę wartość zmierzono po upływie 38 ms od momentu pojawienia się łuku elektrycznego, a w przypadku grupy przedziałów GIS typu ELK-14/300 maksymalne ciśnienie osiągnęło wartość 2,45 MPa, po czasie $t = 250 \text{ ms}$ (ponad sześciokrotnie dłuższym!).

Z powyższego porównania rezultatów pomiarów ciśnień generowanych przez łuk wewnętrzny w rozważanych przedziałach GIS jasno wynika, że zdecydowanie szybciej narasta ciśnienie w przypadku konstrukcji GIS, w której trzy fazy znajdują się w jednej - wspólnej obudowie, i dla tego typu GIS testy laboratoryjne polegające na generacji łuku w przedziale gazowym przy przepływie prądu zwarciowej trójfazowego - nie podlegają dyskusji (!).

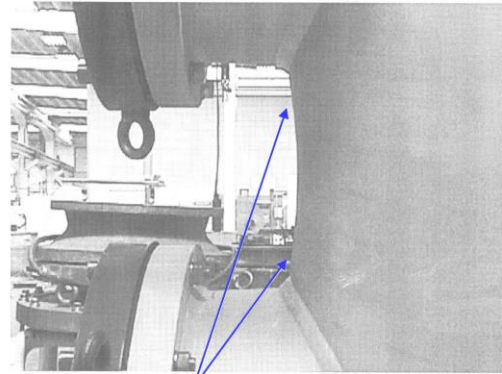
Wyniki prób sprawdzających zachowanie się przedziałów gazowych GIS w przypadku łuku wewnętrznego, należy odnieść do rezultatów badań, sprawdzających ich wytrzymałość w przypadku ciśnienia statycznego (np. próba wodna). Przykład takiego testu w przypadku obudowy przedziału wyłącznikowego rozdzielnic GIS typu ELK-04 pokazano na RYS. 19. Rezultat tego testu można uznać „spektakularnym”, ponieważ przy wysokim ciśnieniu statycznym $P_{\text{stat}} = 2,35 \text{ MPa}$ (prawie czterokrotnie wyższe od roboczego, $P_{\text{rob}} = 0,6 \text{ MPa}$), zaobserwowano: „wypchnięcie” uszczelki typu „O”-ring, zamontowanej w kanałku kołnierza obudowy; widoczne deformacje ścianek bocznych obudowy w pobliżu spawów; brak rozwarstwień czy mikropęknięć w spawach oraz w materiale obudowy (stop aluminium, blacha walcowana). Jeśli założyć, że w przedziale wyłącznikowym ELK-04 (objętość 1100 dm³) w przypadku wystąpienia łuku wewnętrznego, ciśnienie nie przekroczy wartości 1,42 MPa, czyli zmierzonej w przedziale ELK-TE 04 (patrz RYS. 17 oraz RYS. 18) z objętością 600 dm³, to relacja: ciśnienie statyczne versus zmierzone ciśnienie generowane w przypadku łuku wewnętrznego, wynosi: $100\% \times 2,35 \text{ MPa} / 1,42 \text{ MPa} = 162\%$. Zasadność takiego założenia potwierdzono wiarygodnymi obliczeniami.

ABB CESHPQ		Prüfprotokoll: nach EN 50052 Inspection report: to EN 50052		Dat./Aussteller CESHPQ 20.08.01 / Heuer	
Nr. GPFQ 00.2.011		Bearbeitete Alu-Schweißteile processed Alu-welding parts		Vis.	Blatt/Anz. 1/1
Wiederholungsprüfung [] repeat-test: Schaltgerätee- bzw. Anlagenteil: LS - Gehäuse switchgear/plant part Zeichnungs-Nr. Rohteil: drawing no. unfinished part 1HDG 141 101 Zeichnungs-Nr. Fertigteile: drawing no. assembly units AlMg4,5Mn W28 Material: Vorgeschriebener Berstdruck: > 23,0 bar prescribed bursting pressure		Musterprüfung/Abnahme [X] type sample test Lieferant: TE - Ganz - Röck Rt. Supplier Änd. Änd. Fabrik - Nr.: 7238 / 1 factory Erreichter Berstdruck: 23,5 bar achieved bursting pressure			Änd. A
Lfd.Nr.	Qualitätsmerkmal quality-feature	Prüfvermerk test result	Lfd.Nr.	Qualitätsmerkmal quality-feature	Prüfvermerk test result
1	Maßüberstimmung dimension	i.O.	4	Poren pores	i.O.
2	Oberflächengüte surface quality	i.O.	5	mechanische Werte mechanical value	i.O.
3	Mikroporen micro-pores	i.O.	6	Gasdichtigkeit gas-tightness	i.O.
Bei 23,5 Bar hat sich der Dichtgummi aus der Abpressplatte gedrückt. Schrauben: M16 8.8 Leichte Verformung im Bereich der Dome (siehe Bild)					
Prüfer: inspektor Hr. Imhof					
Verformung: deformation					
Druck [bar]	2,0	3,0	4,0	5,0	6,0
MP 1					
MP 2					
MP 3					
Freigabe CESHPQ release	Bedingungen erfüllt? conform to requirements		ja [X]	nein []	
Datum	15.08.01	15.08.01		Sonstige Daten siehe GPFQ 00.2.003	
Unterschrift					
Vorteiler	CES/HGA2 - HE - HD1				Änderungsdatum: 12.12.00

➔ Po zakończeniu badań wytrzymałościowych na rozzerwanie obudowy przedziału wyłącznikowego GIS 72,5 - 145 kV typu ELK-04 z ciśnieniu statycznym $P_{stat.} = 2,35 \text{ MPa}$, nie stwierdzono pęknięć w obudowie przedziału wyłącznikowego GIS 72,5-145 kV typu ELK-04

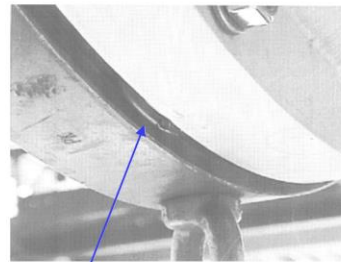
Bilder zum Berstversuch
Ident Nr. 1HDG 141 101
Lieferant: TE - Ganz - Röck Rt.

15.08.01



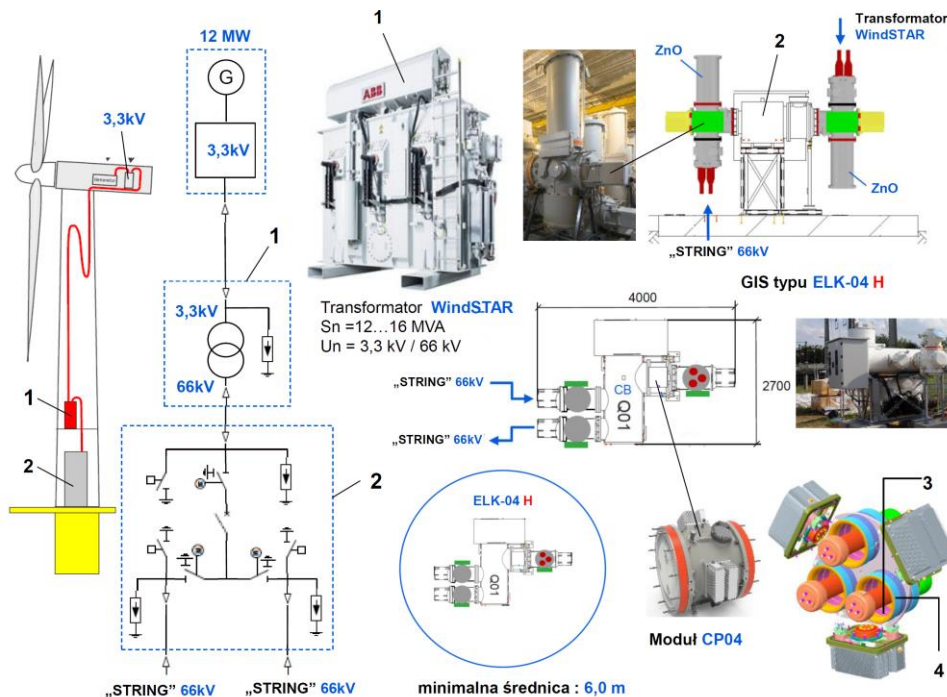
Verformung

➔ przy $P_{stat.} = 2,35 \text{ MPa}$ widoczne deformacje ściany bocznej obudowy przedziału wyłącznikowego w pobliżu spawów, ale bez uszkodzenia szwów spawów



➔ przy $P_{stat.} = 2,35 \text{ MPa}$ stwierdzono wypchnięcie „O”-ringu z kanału kołnierza obudowy przedziału wyłącznikowego

RYS. 19. Rezultaty próby na wytrzymałość mechaniczną obudowy przedziału wyłącznikowego GIS typu ELK-04 na napięcia : 72,5 kV ... 145 kV , przy ciśnieniu statycznym , źródło : [8] .



RYS. 20. Pole w wykonaniu „specjalnym” typu ELK-04 H , z sensorami pomiarowymi U/I , przeznaczone dla wyprzewodzenia mocy z Morskiej Turbiny Wiatrowej 10 ... 12 MW , podłączonej do kabla morskiego 66 kV , źródło : [1] .

1- transformator podwyższający 3,3 kV/ 66 kV typu WindSTAR , z biodegradowalną cieczą izolacyjną (w przypadku morskiej turbiny 12 MW , moc transformatora WindStar 16 MVA)

2- pole rozdzielnic GIS 66 kV ($U_n = 72,5 \text{ kV}$) typu ELK-04 H , z horyzontalnym położeniem obudowy wyłącznika

3- sensory napięciowe (U) w module CP04 dla cyfrowego wykonania pola GIS typu ELK-04 H

4- sensory prądowe (I) w module CP04 (cewki Rogovskiego)

Wyżej przedstawione próby z prądem zwarciovym trójfazowym (patrz RYS. 18) , potwierdzające odporność GIS typu ELK-04 na oddziaływanie łuku wewnętrznego , nabierają szczególnego znaczenia w przypadku zastosowania GIS typu ELK-04 H , w obwodzie wyprowadzenia mocy z zespołu Morskiej Turbiny Wiatrowej (patrz RYS. 20) , gdyż to pole jest instalowane pod transformatorem podwyższającym , gdzie jest ważny kierunek ewakuacji gorących gazów z przedziału GIS (patrz RYS. 14 oraz RYS. 15) , oraz ze względu na bardzo małe pomieszczenie , ograniczone średnicą u podstawy zespołu : obecnie ok. 10m , w przypadku Morskiej Turbiny Wiatrowej o mocy 12 MW.

4. WNIOSKI

-- Rodzina GIS na napięcia od 72.5 kV do 300 kV produkcji ABB , to urządzenia bezpieczne dla personelu obsługującego Morskie Stacje Kolektorowe 66 kV / 220 kV lub 275 kV, oraz Morskie Turbiny Wiatrowe ze względu na wewnętrzne zwarcie łukowe , ponieważ to stwierdzenie jest poparte pozytywnymi wynikami badań laboratoryjnych na łuk wewnętrzny , zgodnych z Normą IEC/PN 62271-203, oraz wynikami wiarygodnych obliczeń potwierdzonych eksperymentalnie.

-- Próby laboratoryjne , przeprowadzone zgodnie z wymaganiami Normy IEC/PN 62271-203 w pełni potwierdziły spełnienie wymagań tego standardu , w przypadku prób przeprowadzonych na przedziałach gazowych GIS produkcji ABB , gdyż nie stwierdzono ani jednego przypadku perforacji obudowy w czasie trwania próby , tzn. w czasie $t = 0,3s$, zalecanym dla przepływu prądu zwarciovego , podtrzymującego łuk elektryczny . W oparciu wyniki w/w testów można odpowiedzialnie zarekomendować zastosowanie tych urządzeń w Morskich Stacjach Kolektorowych 66 kV / 220 kV lub 245 kV , oraz w Morskich Turbinach Wiatrowych . Norma IEC/PN 62271-203 dopuszcza perforację obudowy , po czasie $t = 0,15s$ (dwa razy krótszym od 0,3s) , jeśli podczas przepływu prądu zwarciovego w czasie $t = 0,3 s$ nie oderwie się żaden z elementów GIS , zamocowanych na zewnątrz obudowy przedziału gazowego GIS, narażając tym samym na niebezpieczeństwo personel obsługujący dana stację.

-- Dla danej konstrukcji przedziałów gazowych GIS , oraz określonych parametrów związanych z generacją łuku wewnętrznego (wartości prądów zwarciovych ; czas trwania zwarcia) istnieje tzw. „krytyczna” objętość przedziału (to nie przedział o najmniejszej objętości !) , i taki przedział należy wyodrębnić w oparciu o wyniki wiarygodnych obliczeń przebiegów ciśnienia w czasie . Przedział gazowy GIS , wyselekcjonowany na w/w drodze , powinien być poddany próbom laboratoryjnym na oddziaływanie łuku wewnętrznego. Taki sposób postępowania jest praktykowany w firmie ABB.

-- W konstrukcji GIS produkowanych w firmie ABB , w tym i dla Morskich Stacji Kolektorowych 66 kV / 220 kV lub 245 kV dużych mocy , przyjęto zasadę : w każdym z przedziałów gazowych GIS , ograniczonych izolatorami grodziowymi jest zastosowane urządzenie dla ukierunkowanego wydmuchu gorących gazów , włączając takie przedziały jak np. GIL (Gas Insulated Link) , w których objętość gazu może przekraczać 2000 dm³. W tak dużym przedziale może nie wystąpić rozerwanie membrany bezpieczeństwa , jeśli czas przepływu nawet dużego prądu zwarciovego (np. 63 kA rms) nie przekracza 0,3 s (czas rekomendowany przez Normę IEC/PN 62271-203). Założono , że w realnych systemach sieciowych zdarzają się przypadki bardzo długiego czasu , po jakim zostanie wyłączone zwarcie , np. $t \geq 0,5 s$ (!) , i tak długo palący się łuk elektryczny , może doprowadzić do rozerwania membrany bezpieczeństwa w przedziale gazowym GIS o objętości przekraczającej 2000 dm³, co uchroni personel stacji przed niebezpieczeństwem , oraz ograniczy rozległość uszkodzeń w tym przedziale gazowym.

Literatura :

- [1] A. Gul , ”Innowacyjne rozwiązania zastosowane w Kompleksie Morskich Farm Wiatrowych Wielkiej Mocy, z uwzględnieniem wymagań dla zabezpieczenia morskiej sieci kablowej prądu stałego” , strona SEP , 2019 rok.
- [2] ABB Report No. 1HC0088740 “Fault Arc Withstand Capability ELK-VI14”.
- [3] ABB Report No. 1HC0039213 ”Verification of internal arc fault performance at the current of 63 kA and duration 300 ms”
- [4] ABB Report No. 1HC004700 “Storlichtbogenfestigkeit der GIS Typ ELK-3”
- [5] Type Test Report : PEHLA , No. HASH640751 E
- [6] Type Test Report : PEHLA 0568Ba , No. HASH640991EU
- [7] Type Test Report : PEHLA 0908Ba , No. HASH641265
- [8] Report ABB / CES/HPQ : No. GPFQ 00.2.011