ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 2004
Seria: ELEKTRYKA z. 189 Nr kol. 1629

Zbigniew GACEK, Tomasz RUSEK
Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów
Politechnika Śląska, Gliwice

PRZEGLĄD ROZWIĄZAŃ WYSOKONAPIĘCIOWYCH GAZOSZCZELNYCH PRZEWODÓW SZYNOWYCH

Streszczenie. W artykule dokonano przeglądu rozwiązań konstrukcyjnych wysokonapięciowych przewodów szynowych. Scharakteryzowano elementy składowe instalacji gazoszczelnych. Przedstawiono przykłady rozwiązań technicznych stosowanych na świecie oraz przedstawiono perspektywy rozwoju nowej generacji wysokonapięciowych gazoszczelnych przewodów szynowych.

REVIEW OF CONSTRUCTIONS OF HIGH VOLTAGE GAS-INSULATED LINES

Summary. Review of constructions of high voltage gas-insulated lines (GIL) is presented. A characteristic of main parts of GIL installation (conductor, outer shield, insulation and other accessories) and some examples of GIL on the world are described. At the end, the new 2nd generation of GIL are presented.

1. WPROWADZENIE

Przewody izolowane sprężonym SF_6 (GIL - Gas Insulated Lines) stosuje się do przesyłu dużych mocy na krótkie odległości od ponad 30 lat. Pierwszą taką instalację na świecie wybudowano w 1974 r. jako fragment stacji elektroenergetycznej przy elektrowni wodnej w Schluchseewerk (Niemcy) [4].

Zgodnie z danymi pochodzącymi z ankiety przeprowadzonej w 1993 r. przez Electricité de France ogólna długość zainstalowanych wówczas na świecie trójfazowych przewodów GIL wynosiła ok. 30 km.

Obecnie w wielu ośrodkach badawczych prowadzone są prace rozwojowe nad technologią przesyłu energii elektrycznej za pośrednictwem linii gazoszczelnych. Mimo wielu niewątpliwych zalet przewodów GIL rzadkością są przewody szynowe o długości kilku kilometrów. W praktycznych rozwiązaniach dominują układy o kilkusetmetrowej lub mniejszej długości, instalowane tam, gdzie nie jest możliwe zastosowanie innego rozwiązania. Względy ekonomiczne w postaci relatywnie wysokich nakładów inwestycyjnych są bezpośrednią przyczyną tego, że przewody GIL w najbliższym czasie mają nikłe szanse na tak szerokie stosowanie jak linie napowietrzne. Nie zmienia to faktu, że zastosowanie takich przewodów stanowi niekiedy jedyną możliwość zmodernizowania lub rozbudowania fragmentu układu elektroenergetycznego, a w szczególności zrealizowania połączeń z rozdzielnicami izolowanymi SF_6.

2. CHARAKTERYSTYKA PRZEWODÓW GIL

Zakres zastosowań gazoszczelnych przewodów szynowych jest bardzo szeroki [1]. Krótkie odcinki takich przewodów (rzędu kilkudziesięciu - kilkuset metrów) są stosowane głównie:

- jako połączenia rozdzielnic izolowanych SF_6 (GIS - Gas Insulated Substations) z transformatorami lub liniami napowietrznymi;
- jako połączenia między sekcjami szyn zbiorczych rozdzielnic;
- w elektroenergetycznych układach zasilających zakładów przemysłowych, szczególnie przy rozbudowie zakładu i braku miejsca dla nowych urządzeń elektroenergetycznych;
- w wielkich budynkach biurowych, administracyjnych i mieszkalnych jako połączenia sieci zasilającej z transformatorami instalowanymi w budynku;
- przy skrzyżowaniach bądź zbliżeniach linii elektroenergetycznych między sobą lub z innymi obiektami, zwłaszcza w elektrowniach.

Przewody GIL są niekiedy stosowane do budowy dłuższych odcinków linii elektroenergetycznych rzędu kilkuset lub nawet kilku tysięcy metrów. Najczęściej są to:

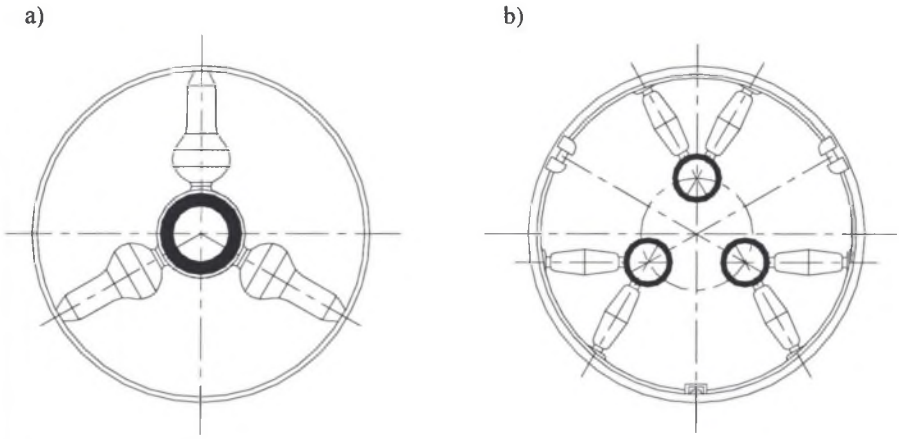
- połączenia transformatorów blokowych w elektrowniach z rozdzielniami wysokich i najwyższych napięć;
- wyprowadzenia mocy w szczególnie trudnych warunkach, np. z elektrowni wodnych;
- linie wysokiego napięcia doprowadzające energię elektryczną w głąb dużych zakładów przemysłowych bądź centrów dużych aglomeracji miejskich;
- linie w pobliżu lotnisk, gdzie zabronione jest budowanie linii napowietrznych;
- linie prowadzone przez tereny szczególnie chronione (np. tam, gdzie olej lub kabel stwarzają zagrożenie pożarowe albo skażenie terenu).

Dużą zaletą gazoszczelnych przewodów szynowych jest możliwość układania ich poziomo, pionowo lub pod dowolnym kątem bez żadnych ograniczeń ani ujemnych skutków. Są bezpieczne w eksploatacji, gdyż nie mają nieosłoniętych części pod napięciem. Wykazują dużą odporność na siły dynamiczne. W przypadku zastosowania osłon jednofazowych nie ma zagrożenia spowodowanego zwarciami międzyfazowymi. Gazoszczelne przewody szynowe nie są źródłem zakłóceń radioelektrycznych i odznaczają się bardzo dużą niezawodnością.

Podobnie jak rozdzielnice osłonięte z SF_6, gazoszczelne przewody szynowe buduje się albo jako urządzenia tzw. jednobiegunowe, gdy każda faza znajduje się w osobnej osłonie, albo tzw. trójbiegunowe, gdy wszystkie trzy fazy są we wspólnej osłonie (rys. 1). W dotychczasowych rozwiązaniach, szczególnie o wysokich i bardzo wysokich napięciach roboczych, przeważają zdecydowanie konstrukcje z oddzielnymi osłonami dla każdej z faz. Rozwiązania z trójfazową izolacją biegunów są stosowane od niedawna jedynie przez firmy, które zebrały już znaczne doświadczenia konstrukcyjne w tym zakresie. Ważną zaletą izolacji jednofazowej jest eliminacja zwarć trójfazowych, gdyż awarie i uszkodzenia ograniczane są tylko do jednego bieguna przewodu. Ewentualne nieszczelności powodują ubytek gazu wyłącznie w przedziale gazowym jednego bieguna.

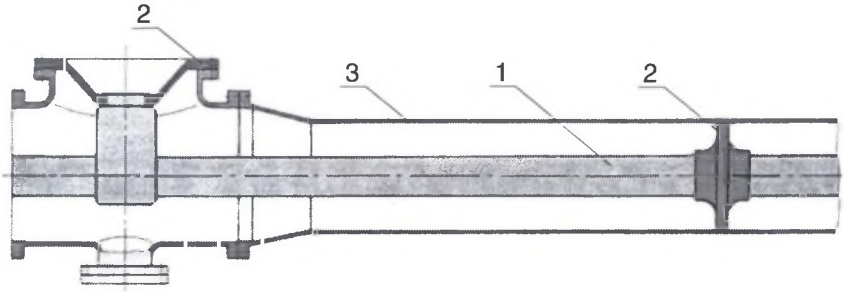
Jednobiegunowe przewody GIL, tworzące układ trójfazowy, są na ogół ułożone w jednej płaszczyźnie lub w układzie trójkąta równobocznego. Osłony zewnętrzne każdego z przewodów fazowych mogą być połączone lub niepołączone na obu końcach oraz w innych punktach pośrednich.

Przewody GIL są prefabrykowane w odcinkach o długości od 6 m do 18 m, najczęściej jednak 10 ÷ 14 m. Składają się z wielu przedziałów gazoszczelnych, oddzielonych od siebie izolatorami grodziowymi. Długość przedziału zależy od maksymalnego przyrostu ciśnienia SF_6 podczas zwarcia oraz skutków, jakie ono powoduje. W chwili wystąpienia zwarcia pomiędzy szyną przewodzącą a osłoną przewodu następuje gwałtowny wzrost ciśnienia gazu. Jego maksymalna wartość i szybkość narastania są proporcjonalne do energii łuku i odwrotnie proporcjonalne do objętości przedziału gazoszczelnego. Jeżeli po wystąpieniu zwarcia konieczna jest wymiana przedziału gazoszczelnego, to ma to tym mniejsze konsekwencje ekonomiczne, im krótszy jest przedział.



Rys. 1. Przykłady rozwiązań przewodów GIL: a) jednobiegunowe, b) trójbiegunowe
Fig. 1. Examples of GIL: a) unipolar buses, b) three-polar buses

Elementami składowymi gazoszczelnego przewodu szynowego są: szyna prądowa, osłona zewnętrzna, izolacja główna, izolacja stała i osprzęt dodatkowy [1, 5].



Rys. 2. Szkic przekroju podłużnego fragmentu jednobiegunowego przewodu GIL:
1 – tor prądowy, 2 – izolator odstępnikowy, 3 – osłona zewnętrzna
Fig. 2. The sketch of unipolar GIL: 1 – conductor, 2 – spacer, 3 – outer shield

2.1. Tor prądowy

Tor prądowy gazoszczelnego przewodu szynowego ma postać rury wykonanej na ogół z jednego ze stopów aluminium. Miedź jest stosowana rzadko ze względu na trudności w jej obrabianiu, głównie w łączeniu przez spawanie. Mimo bardzo dobrych właściwości elektrycznych ma ona gorsze właściwości mechaniczne, większą masę i jest droższa od stopów aluminium (stosowanych jako materiał szyn przewodzących). Grubość ścianki toru prądowego wynosi od 5 do 20 mm. W rozwiązaniu jednobiegunowym szyna ulokowana jest współosiowo w cylindrycznej obudowie. W rozwiązaniu trójbiegunowym szyny prądowe każdej fazy rozmieszczone są w obudowie symetrycznie względem osi obudowy, a odległości między nimi zależą od konkretnego rozwiązania przewodu GIL. Odcinki szyn prądowych łączy się stosując albo technikę spawania, albo wielostykowe połączenia tulipanowe (pełniące dodatkowo funkcję kompensatorów wydłużeń termicznych). Gdy poszczególne odcinki szyn prądowych łączy się za pomocą spawania, konieczne jest zainstalowanie dodatkowych układów ograniczających skutki wydłużeń szyny pod wpływem ciepła.

2.2. Osłona zewnętrzna

Obudowa gazoszczelnego przewodu szynowego wykonana jest ze stopów aluminium[1]. Grubość ścianki obudowy wynosi od 2 do 12 mm. Zewnętrzna powierzchnia osłony bywa niekiedy pokrywana cienką warstwą ochronną, która może pełnić różne funkcje (np. antykorozyjną, izolacyjną bądź estetyczną). W powłokę antykorozyjną, wykonaną najczęściej z winylu bądź polietylenu, wyposaża się przewody GIL przeznaczone do zakopania w ziemi. Niekiedy stosuje się ochronę katodową (czynną). Przewody przeznaczone do pracy w warunkach napowietrznych są malowane lub pokrywane cienką powłoką epoksydową. Stosowane są też przewody o gołej powierzchni zewnętrznej obudowy.

Najbardziej rozpowszechnionymi sposobami łączenia poszczególnych elementów obudowy przewodu szynowego są połączenia śrubowe (za pośrednictwem kołnierzy) i spawanie. Stosowane są specjalne technologie spawania, aby do wnętrza przewodu GIL nie dostało się podczas operacji łączenia jakiekolwiek zanieczyszczenie. Również w obudowach gazoszczelnych przewodów szynowych stosuje się specjalne rozwiązania zapobiegające negatywnym skutkom rozszerzalności cieplej, najczęściej mieszkowe kompensatory wydłużeń.

2.3. Izolacja główna

Izolacją główną w gazoszczelnych przewodach szynowych jest albo czysty sześciofluorek siarki, albo jego mieszanina z azotem sprężone do ciśnienia 0,2÷0,7 MPa. Izolacja gazowa stanowi niemal doskonałe medium izolacyjne w różnego rodzaju wysokonapięciowych urządzeniach elektroenergetycznych, np. w wyłącznikach, rozdzielnicach izolowanych GIS i przewodach GIL.

SF_6 wykazuje doskonałe właściwości elektroizolacyjne, a także dobre właściwości termiczne przydatne do gaszeniu łuku. Zastosowanie tego elektroujemnego gazu pozwoliło na znaczne obniżenie zużycia materiałów i terenu wymaganego na budowę urządzeń elektroenergetycznych dzięki zmniejszeniu ich wymiarów. Dodatkowymi zaletami SF_6 są jego chemiczna trwałość, nietoksyczność i niepalność. Jest on stosowany przy ciśnieniach nie powodujących przechodzenia w stan ciekły, co pozwala uniknąć problemów związanych z kondensacją. Jest też stosunkowo tani.

Właściwości izolacyjne tego gazu są wrażliwe na wady i zakłócenia w przestrzeni izolowanej. Dlatego należy unikać wysokich naprężeń pola elektrycznego skupiając szczególną uwagę na projektowaniu powierzchni przewodników i izolacji stałej. W niektórych przypadkach konieczne jest zastosowanie ekranów sterujących rozkładem pola elektrycznego. Należy również szczególnie dbać o staranność wykonania i montażu elementów konstrukcyjnych.

Ostatnio konstruktorzy przewodów GIL pracują nad zastąpieniem czystego SF_6 mieszaniną z azotem. Chodzi przede wszystkim o aspekt ekologiczny tego rozwiązania. Mieszaninę taką, o minimalnej zwartości SF_6, można stosować jedynie w gazoszczelnych przewodach szynowych. Nad wykorzystaniem takich mieszanin prowadzone są intensywne prace badawcze.

2.4. Izolacja stała

Izolacja stała stanowi jeden z najbardziej istotnych elementów konstrukcyjnych gazoszczelnego przewodu szynowego [1, 5]. Poza funkcją izolacyjną spełnia zadania mechaniczne, zapewniając prawidłową pozycję toru prądowego względem osłony zewnętrznej, a także dzieląc wnętrze przewodu na hermetyczne względem siebie przedziały gazowe. Izolacja gazowa przewodu GIL przedzielona izolacją stałą należy do układów izolacji kombinowanej, zbudowanej z bardzo różniących się między sobą materiałów, w dodatku

[1] Niedawno rozpoczęto prace badawcze nad zastosowaniem polimerów jako materiału osłon przewodów szynowych [3].

uwarstwionych równolegle. Wynikają z tego określone konsekwencje, które konstruktorzy przewodów szynowych muszą uwzględniać przy projektowaniu wiedząc, że tego elementu nie da się z konstrukcji wyeliminować. Zastosowanie izolatorów stałych obniża wytrzymałość elektryczną układu izolacyjnego obiektu, gdyż są one źródłem zakłócenia rozkładu silnego pola elektrycznego między szyną prądową a obudową. Obszary o najwyższej temperaturze wewnątrz przewodu GIL podczas jego normalnej pracy występują w miejscach styku izolatora z torem prądowym. Oznacza to, że izolacja stała stanowi przeszkodę w oddawaniu ciepła powstającego w szynie prądowej do otoczenia.

Szczelność poszczególnych przedziałów gazowych zapewniają izolatory grodziowe. Zależnie od napięcia znamionowego przewodu, wymagań mechanicznych i elektrycznych stosowane są dwa rozwiązania takich izolatorów: izolator kielichowy (w literaturze anglojęzycznej nazywany również izolatorem stożkowym) oraz izolator dyskowy.

Izolator kielichowy charakteryzuje się większą drogą upływu, a co za tym idzie - większą wytrzymałością elektryczną. Jego dodatkową zaletą są lepsze właściwości mechaniczne w porównaniu z izolatorem dyskowym. W związku z większym zużyciem materiału oraz skomplikowaną technologią wykonania izolatory kielichowe używane są na ogół w urządzeniach gazoszczelnych o napięciu znamionowym 420 kV i większym.

Izolatory dyskowe mają nieco gorsze właściwości elektryczne i mechaniczne, lecz charakteryzują się znacznie prostszą technologią wytwarzania. Dla takich izolatorów szczególnie wielkiego znaczenia nabiera prawidłowe zaprojektowanie kształtu, dzięki czemu można uniknąć dużych odkształceń pola elektrycznego w pobliżu szyny prądowej.

Odpowiednio perforowane izolatory kielichowe oraz dyskowe mogą spełniać w przewodzie GIL funkcje izolatorów odstępnikowych. Nie jest wtedy konieczne stosowanie tak grubych ścianek izolatorów, bo nie na nich spoczywa obowiązek zapewnienia wystarczającej wytrzymałości na udarowy wzrost ciśnienia występujący podczas zwarć wewnętrznych. Znacznie częściej funkcję odstępnikową pełnią jednak izolatory niepełne (np. trójelementowe). Są one rozmieszczane przeważnie co 120° wokół osi szyny prądowej, choć niekiedy można spotkać rozwiązania z jednym izolatorem odstępnikowym.

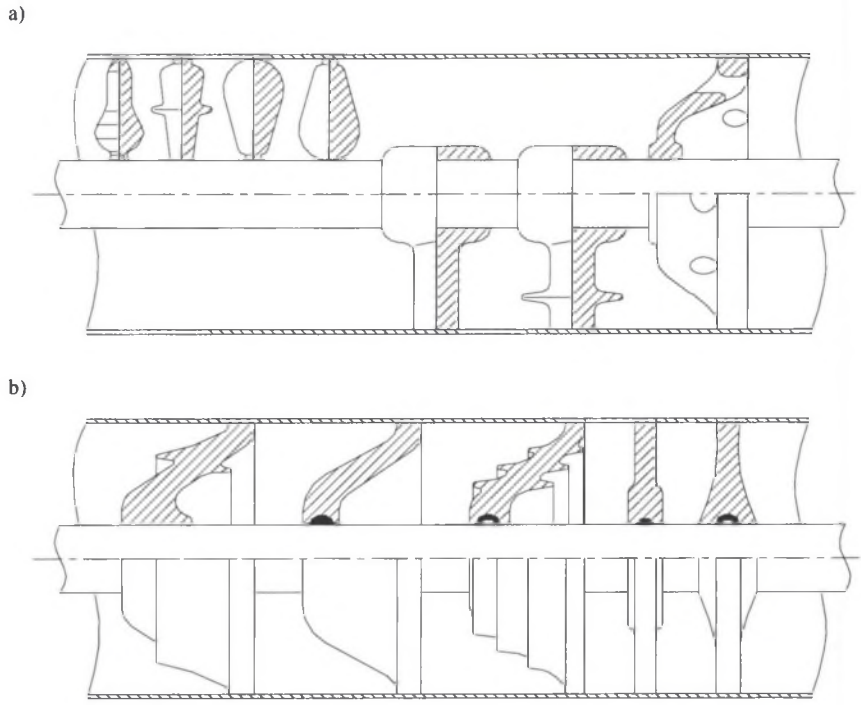
Izolatory stosowane w przewodach GIL wykonuje się zazwyczaj z tzw. lanych kompozycji epoksydowych, których podstawowym składnikiem jest żywica epoksydowa. Kompozycje te spełniają w wystarczającym stopniu wymagania elektryczne, mechaniczne i cieplne stawiane takim układom izolacji bezpowietrznej. SF_6 nie może stykać się z materiałami zawierającymi krzem, w związku z czym nieprzydatne są w tym przypadku takie materiały, jak szkło czy porcelana elektrotechniczna. Materiał izolatora musi również charakteryzować się odpornością na działanie fluorowodoru oraz kwasu siarkowego[2]. Z lanych kompozycji epoksydowych można produkować izolatory o złożonych kształtach, a dostępne obecnie środki modyfikujące stwarzają możliwość uzyskania kompozycji o licznych zaletach użytkowych. Żywice epoksydowe stanowią po utwardzeniu materiał izolacyjny o dużej rezystancji i małym współczynniku strat dielektrycznych. Charakteryzują się znaczną wytrzymałością mechaniczną i cieplną oraz bardzo dobrą przyczepnością do większości materiałów.

2.5. Osprzęt dodatkowy

Poza elementami podstawowymi w konstrukcji przewodów GIL występuje ponadto osprzęt dodatkowy, do którego zalicza się m.in.:

- kompensatory wydłużeń,
- czujniki ciśnienia,
- zawory,
- elementy mocujące,
- konstrukcje wsporcze

[2] Powstanie takich związków chemicznych w przewodzie szynowym jest wprawdzie mało prawdopodobne, ale możliwe podczas wewnętrznego zwarcia łukowego.



Rys. 3. Przykładowe kształty izolatorów stosowanych w przewodach GIL:
a) odstępnikowe, b) grodziowe
Fig. 3. Examples of shapes of GIL insulators: a) spacers, b) barriers

oraz urządzenia umożliwiające prowadzenie gospodarki gazem (SF_6). Należą do nich m.in.:
- przenośne i stacjonarne urządzenia służące do operacji wymiany i napełniania gazem przedziałów gazoszczelnych;
- urządzenia do oczyszczania i osuszania SF6;
- urządzenia do pomiaru zawartości wilgoci w SF6;
- urządzenia ostrzegające o obecności gazu SF6 w atmosferze;
- wykrywacze ulotu gazu.

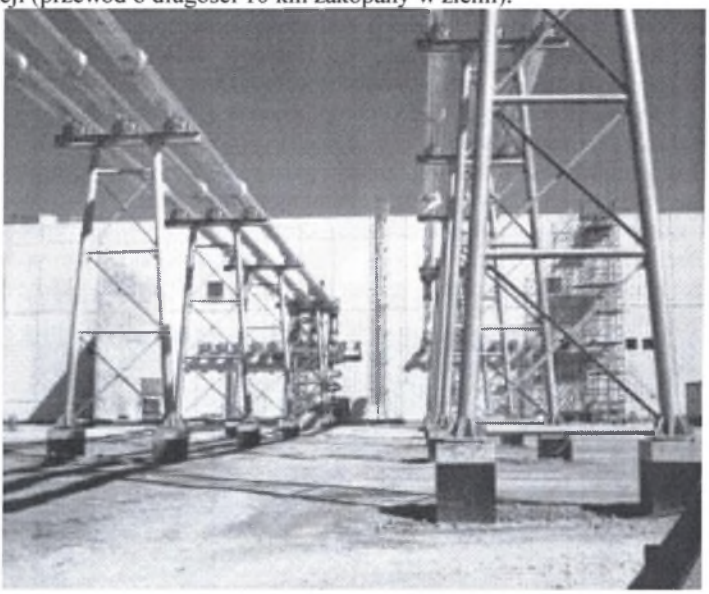
W celu połączenia gazoszczelnych przewodów szynowych z innymi elementami SEE wykorzystuje się izolatory przepustowe (SF_6-powietrze, SF_6-olej).

3. STAN AKTUALNY

Gazoszczelne przewody szynowe produkowane są jedynie przez kilka dużych firm światowych. Przykładowo, firma Siemens posiada już ponad dwudziestoletnie doświadczenia w zakresie tej technologii [6]. Jako pierwsza przekroczyła poziom napięcia 400 kV, oddając do eksploatacji odcinek 4 km linii w systemie GIL. Linia ta została zainstalowana w tunelu kablowym i służy do zasilania stacji pomp.

Inne przykłady typowych linii GIL to: instalacja Chinon we Francji (525 m, 420 kV) oddana do eksploatacji w 1980 r. oraz linia Claireville w Kanadzie (550 kV) wybudowana dla Ontario Hydro w 1978 r. [2]. Znacznie dłuższe są linie wykonywane obecnie:
- w Japonii (przewód GIL o długości 3,3 km na napięcie 275 kV, zainstalowany w tunelu);
- w Arabii Saudyjskiej (przewód GIL o długości około 6 km na napięcie 420 kV zainstalowany na estakadzie, rys. 4);

- w Niemczech (przewód GIL o długości 5,5 km zainstalowany w tunelu);
- we Francji (przewód o długości 10 km zakopany w ziemi).



Rys. 4. Przewód GIL 420 kV zainstalowany w Arabii Saudyjskiej
Fig. 4. GIL construction of 420 kV in Saudi Arabia

O zastosowaniu przewodów GIL w Polsce, przynajmniej w najbliższych latach, decydować będą względy ekonomiczne. Przewody GIL mogą okazać się jednak najkorzystniejszym rozwiązaniem techniczno-ekonomicznym przy rekonstrukcji lub modernizacji krajowych elektrowni i elektrociepłowni, gdzie często występują kłopotliwe skrzyżowania i zbliżenia linii z innymi urządzeniami. Mogą być również przydatne przy rozbudowie elektroenergetycznych układów zasilających w zakładach przemysłowych o ograniczonym terenie.

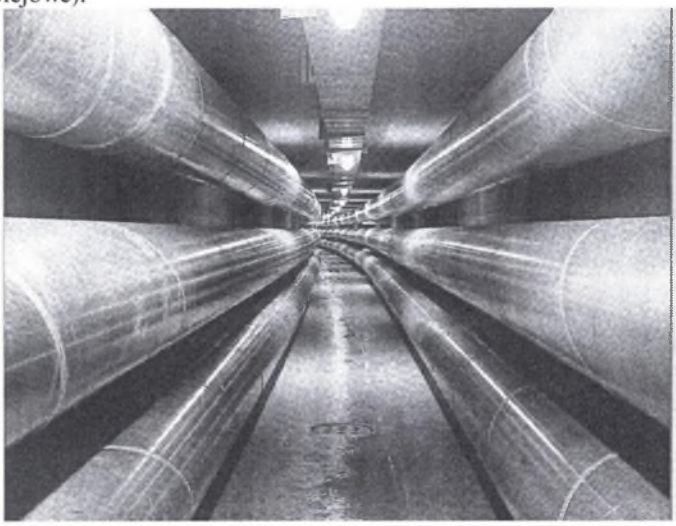
Prace nad krajowymi konstrukcjami przewodów osłoniętych z izolacją gazową SF_6 rozpoczęto w 1986 r. w ramach Centralnego Programu Badań Podstawowych 02.18. W pracach tych, koordynowanych przez Instytut Elektroenergetyki Politechniki Warszawskiej, brały udział Politechnika Śląska oraz Politechnika Poznańska. Opracowano oryginalne metody obliczeniowe i wykonano, we współpracy z katowickim przedsiębiorstwem „Elektrobudowa", próbny odcinek gazoszczelnego przewodu szynowego w jednofazowej osłonie aluminiowej na napięcie znamionowe 110 kV i prąd znamionowy 1250 A. Prace w tym zakresie kontynuowano w latach 1991-1995. Był to tzw. celowy projekt badawczy, zlecony Politechnice Warszawskiej przez Komitet Badań Naukowych, w ramach którego zaprojektowano i wykonano wspólnie z firmą „Holduct" z Pszczyny prototypowy 165-metrowy odcinek jednobiegunowego gazoszczelnego przewodu szynowego o napięciu roboczym 123 kV i prądzie znamionowym 1250 A. Projekt ten miał pozwolić na zebranie doświadczeń konstrukcyjnych i technologicznych umożliwiających optymalizację rozwiązań oraz obniżenie kosztów produkcji. W ten sposób miały być stworzone podstawy do szerszego wprowadzenia połączeń z izolacją gazową SF_6 w energetyce krajowej.

W latach 1996-1998 „Elektrobudowa" S.A. Katowice, we współpracy m.in. z IEiSU Politechniki Śląskiej, przygotowała fragment prototypowego odcinka przewodu szynowego o najwyższym napięciu roboczym 123 kV. Prace te jednak nie doprowadziły do zastosowania polskich rozwiązań w krajowym SEE, a wobec braku zainteresowania ze strony krajowych wytwórców nie są obecnie kontynuowane.

4. PODSUMOWANIE

Obecnie na świecie prowadzone są prace nad nową generacją przewodów GIL (the 2nd generation GIL), które mają być stosowane jako elementy układów elektroenergetycznych przeznaczonych dla dużych miast i ważnych obiektów. Przykładami zastosowania są przewody szynowe w centrum wystawowym PALEXPO w Genewie (Szwajcaria) oraz projektowany przewód w Bangkoku (Tajlandia) [4].

W tych rozwiązaniach stosowana jest izolacja gazowa ciśnieniowa w postaci mieszaniny SF_6/N_2. Charakteryzują się one dużym prądem znamionowym (PALEXPO – 2000 A, Bangkok – 4000 A), a zatem dużą mocą dostarczaną do centrów dużych miast oraz możliwością realizacji zasilania w ekstremalnych warunkach. Przewody GIL układane są w specjalnie wykonywanych tunelach lub tunelach wykorzystujących istniejącą infrastrukturę miast (drogi, metro, linie kolejowe).



Rys. 5. Przewód GIL nowej generacji w centrum wystawowym PALEXPO w Genewie
Fig. 5. The 2nd generation GIL at PALEXPO in Geneva

Z analiz prognostycznych wynika, że stosowanie przewodów GIL nowej generacji z wykorzystaniem instalacji podziemnych będzie koniecznością dla takich wielkich metropolii jak: Berlin, Londyn, Paryż, Nowy Jork, Tokio, Seul, Meksyk. Instalacje podziemne mogą być również wykorzystywane do krótkich połączeń podmorskich, np. kanał La Manche. Perspektywy rozwoju tej technologii są bardzo duże, tym bardziej, że instalacje GIL wykorzystują już istniejące konstrukcje podziemne.

LITERATURA

1. Gacek Z.: Kształtowanie wybranych wysokonapięciowych układów izolacyjnych stosowanych w elektroenergetyce. Wydawnictwo Pol. Śląskiej, Gliwice 2002.
2. Guillen M., Bertrand M.: Optimized Gas-Insulated Transmission Lines. Proc. of JICABLE 99, A3.2.
3. Herbert F., Meinecke B.: Dimensioning Criteria and Test Results For a Polymer Enclosed Gas Insulated Line. 21/33-01 Cigre 2000.
4. Koch H., Schoeffner G.: Gas-Insulated Transmission Line (GIL). Electra No. 211, December 2003.
5. Napowietrzna izolacja wysokonapięciowa w elektroenergetyce. Praca zbiorowa pod red. Z. Pohla. Oficyna Wydawnicza Pol. Wrocławskiej, Wrocław 2003.
6. Schuette A., Koch H.: Gas-Insulated Transmission Lines (GIL). Type Tests and Prequalification. Proc. of JICABLE 99, A3.1.

Wpłynęło do Redakcji dnia 7 kwietnia 2004 r. Recenzent: Prof. dr hab. inż. Zbigniew Pohl