

Zbigniew GACEK

PRZEGLĄD TENDENCJI ROZWOJOWYCH W WYSOKONAPIĘCIOWEJ TECHNICIE IZOLACYJNEJ

Streszczenie. W artykule dokonano bardzo skrótego przeglądu tendencji rozwojowych w wysokonapięciowej technice izolacyjnej. Rozważa się osiągnięcia pod względem materiałowym i konstrukcyjnym oraz postępy w badaniach izolacji sieci i wybranych urządzeń elektroenergetycznych.

REVIEW OF GROWTH TRENDS IN HIGH VOLTAGE INSULATING TECHNOLOGY

Summary. A very brief review of growth trends in high voltage insulating technology is given in the paper. Attainments in respect of material and constructional aspects and progress in insulation test techniques of high voltage power networks and choice power devices are considered.

1. WPROWADZENIE

Wysokonapięciowa technika izolacyjna w zastosowaniu do elektroenergetyki jest dziedziną wiedzy o właściwościach układów izolacyjnych występujących w sieciach oraz obwodach głównych urządzeń, maszyn i aparatów elektrycznych. Zaczęła się ona kształtować około sto lat temu, gdy pojawiły się pierwsze sieci wysokiego napięcia, a izolacja zaczęła decydować o ich funkcjonalności i niezawodności. Ze względu na dużą "odpowiedzialność techniczną" izolacji taka prawidłowość występuje również obecnie.

Szeroko rozumiana wysokonapięciowa technika izolacyjna obejmuje wiele zagadnień z zakresu projektowania, konstruowania, wytwarzania i użytkowania układów izolacyjnych. Coraz częściej wykorzystuje się doświadczenia wynikające z tzw. *nauki konstrukcji*, będącej rezultatem integrowania i systematyzowania wiedzy zgromadzonej w różnych obszarach konstruowania środków technicznych [4]. Istnieje również wyraźna tendencja do coraz szerszego stosowania algorytmicznych metod projektowania i konstruowania układów izolacyjnych. Jest

to związane z systematycznym postępowaniem w rozwoju techniki komputerowej i powszechnym dostępem do coraz doskonalszych mikrokomputerów. Zakres wspomagania komputerowego projektowania i konstruowania wysokonapięciowych układów izolacyjnych obejmuje już obecnie wiele działań operacyjnych.

Najbardziej dynamiczne zmiany w wysokonapięciowej technice izolacyjnej występują w zakresie zwiększania się możliwości praktycznego stosowania syntetycznych materiałów elektroizolacyjnych (gazowych, ciekłych i stałych), a także opanowania nowych technik izolowania linii napowietrznych i kablowych oraz rozmaitych urządzeń, maszyn i aparatów elektrycznych. Duże postępy osiągnięto również w zakresie badań wysokonapięciowych układów izolacyjnych, szczególnie badań diagnostycznych - wykonywanych podczas eksploatacji badanego obiektu.

W artykule dokonano skróconego przeglądu niektórych osiągnięć materiałowo-konstrukcyjnych w wysokonapięciowej technice izolacyjnej oraz postępów w badaniach izolacji wysokonapięciowych urządzeń elektroenergetycznych. Zakres rozważań nie obejmuje wielu szczegółowych zagadnień technicznych, technologicznych i pomiarowych.

2. NIEKTÓRE NOWOCZESNE MATERIAŁY ELEKTROIZOLACYJNE

Materiały odgrywają decydującą rolę w rozwoju techniki, a nawet cywilizacji. Dotyczy to również elektrotechniki i elektroenergetyki, gdyż postęp w zakresie konstruowania i wytwarzania urządzeń elektrycznych zależy w znacznej mierze od możliwości praktycznego stosowania materiałów elektrotechnicznych - w tym elektroizolacyjnych - o jak najlepszych cechach użytkowych i technologicznych. O jakości tych materiałów decydują surowce oraz parametry technologiczne, związane z procesami ich przetwarzania.

Współczesny konstruktor ma do dyspozycji ciągle rosnącą liczbę materiałów elektroizolacyjnych, które mogą pracować w warunkach rozmaitych obciążeń i narażeń. Poza materiałami tradycyjnymi, jak np. olej mineralny, porcelana elektrotechniczna lub papier kablowy, w wysokonapięciowej technice izolacyjnej stosuje się sprężony sześćfluorek siarki (SF_6), syntetyczne ciecze dielektryczne oraz wielkocząsteczkowe organiczne tworzywa sztuczne (plastomery i elastomery). Wprowadzenie do produkcji nowoczesnych tworzyw i technologii ich przetwórstwa należy uznać za jedno z najważniejszych osiągnięć elektrotechniki stosowanej, a szczególnie techniki izolacyjnej. Tworzywa te skutecznie zastępują tradycyjne materiały izolacyjne, a niekiedy pełnią również funkcje konstrukcyjne. Szeroka oferta chemii sprawia, że nieśmiało stosowane tworzywa sztuczne stają się czynnikiem napędowym wielu branży przemysłu elektrotechnicznego.

Sześćciofluorek siarki

Sprężony SF_6 jest podstawowym czynnikiem izolującym i chłodzącym w gazoszczelnych układach izolacyjnych (ang. GIS). Stosując ten gaz pod ciśnieniem od 0,2 MPa do 0,5 MPa można efektywnie wykorzystać jego bardzo dobre właściwości, a jednocześnie uniknąć niebezpieczeństwa przejścia gazu w stan ciekły podczas pracy rozdzielnic lub przewodu szynowego w warunkach napowietrznych. Korzystne właściwości elektryczne sprężonego SF_6 w układach elektrod o polu co najwyżej umiarkowanie nierównomiernym pozwalają na stosowanie niewielkich odstępów izolacyjnych. Dzięki temu uzyskuje się małe wymiary poprzeczne urządzeń - nawet o bardzo wysokich napięciach roboczych. SF_6 jest wykorzystywany również jako gasiwo w coraz powszechniej stosowanych wyłącznikach gazowych.

Oleje syntetyczne

Oprócz olejów mineralnych - nadal szeroko stosowanych jako materiały elektroizolacyjne, nasycające, chłodzące i niekiedy gaszące - w niektórych urządzeniach elektroenergetycznych stosuje się również oleje syntetyczne. Nie są to już jednak toksyczne i niezdolne do biodegradacji chlorowane dwufenyle, zwane olejami PCB. Substytutami powyższych olejów są nietoksyczne i biodegradowalne ciecze dielektryczne, uzyskiwane na bazie węglowodorów aromatycznych (alkilobenzeny, alkilodwufenyloetany, alkilonaftaleny) oraz oleje estrowe. Niektóre z tych cieczy wytwarza się również w Polsce, np. syciwo kondensatorowe niechlorowane AKB (alkilokerylobenzen) i syciwo kondensatorowe estrowe pod nazwą handlową FDO.

Tworzywa sztuczne

Do grupy nowych materiałów elektroizolacyjnych stałych zalicza się niektóre tworzywa sztuczne, będące niekiedy wynikiem osiągnięć inżynierii materiałowej. Obserwuje się jednak zanik bezkrytycznej fascynacji wyłącznie ich nowoczesnością oraz wyraźną tendencję do wszechstronnego badania własności tych materiałów przed wprowadzeniem ich do eksploatacji. Niektóre z tworzyw sztucznych można już zaliczyć do materiałów "klasycznych", np. polietylen sieciowany, lane kompozycje epoksydowe lub folie polipropylenowe. Zakres zastosowania tych materiałów w wysokonapięciowej technice izolacyjnej ulega nadal rozszerzeniu.

Stopniowe wypieranie tradycyjnych materiałów izolacyjnych w elektroenergetyce nastąpiło najwcześniej w aparatach i rozdzielniach wewnątrzowych. Izolatory ceramiczne zostały zastąpione izolatorami z tzw. *lanych kompozycji epoksydowych*. Tendencja do zastępowania ceramiki i szkła przez tworzywa i kompozyty organiczne jest uzasadniona uzyskiwanymi dzięki temu oszczędnościami energii, a także coraz większymi możliwościami technicznymi i technologicznymi przemysłu chemicznego.

Organiczne tworzywa sztuczne są stosowane w przemyśle elektrotechnicznym od kilkadziesięciu lat. Wykorzystuje się je w różnych celach, ale tylko niektóre z nich służą do wytwarzania elementów wysokonapięciowych układów izolacyjnych pracujących w warunkach napowietrznych [20]. Najważniejsze spośród tych materiałów to:

- kauczuki etylenowo-propylenowo-dianowe (EPDM),
- kauczuki silikonowe (typu RTV i HTV),
- cykloalifatyczne żywice epoksydowe,
- nowe materiały kompozytowe, zwane w literaturze anglojęzycznej polymer concretes, czyli betonami polimerowymi (BP).

Kauczuki EPDM należą do grupy elastomerów syntetyzowanych z trzech różnych monomerów, a więc do tzw. terpolimerów. Jest to interesująca grupa materiałów izolacyjnych, wykazująca naturalną odporność na działanie różnorodnych czynników środowiskowych (w tym również promieniowania ultrafioletowego). Poprzez odpowiednie modyfikowanie woskami olefinowymi i węglowodorami parafinowymi można nadać powierzchni izolacyjnej trwale własności hydrofobowe. Modyfikowany EPDM nie traci tych własności w warunkach eksploatacyjnych, ponieważ odnawiają się one samorzutnie.

Kauczuki silikonowe są wykonywane w dwóch odmianach: jako tzw. kauczuki RTV (wulkanizowane w temperaturze pokojowej pod wpływem wilgoci zawartej w powietrzu) i tzw. kauczuki HTV (wulkanizowane w wysokiej temperaturze). Kauczuki silikonowe, szczególnie wulkanizowane na gorąco, wykazują trwałą elastyczność oraz są odporne na utlenianie, działanie pleśni i wielu czynników chemicznych. Pęcznieją one jednak pod wpływem węglowodorów aromatycznych. Do zalet kauczków silikonowych należy niewielka stratność dielektryczna, nieznaczna zależność tgδ od temperatury oraz duża przewodność cieplna i hydrofobowość. Znaczącą barierą w szerszym zastosowaniu tych kauczków i wytwarzanych z nich gum silikonowych jest ich wysoka cena.

Cykloalifatyczne żywice epoksydowe (cykloolefiny), będące jedną z trzech odmian żywic epoksydowych, stanowią podstawowy składnik lanych kompozycji epoksydowych (LKE). Żywice te - wytwarzane dla potrzeb wysokonapięciowej techniki izolacyjnej - charakteryzują się doskonałymi własnościami elektrycznymi oraz dobrą odpornością na łuk elektryczny, prądy pełzne, wyładowania niezupełne i promieniowanie ultrafioletowe. Są one jednak produkowane jedynie przez nielicznych wytwórców i mają wysoką cenę. Dlatego też poszukuje się nadal najlepszych sposobów takiej modyfikacji tanich i dostępnych dianowych żywic epoksydowych, która pozwoli na ich wykorzystanie również w warunkach napowietrznych. Dobre rezultaty w zakresie zwiększenia ich trwałości eksploatacyjnej i odporności na wyładowania pełzne uzyskano poprzez zastosowanie uwodnionych wypełniaczy mineralnych, eliminowanie słabych miejsc na granicach ziarn wypełniacza (silanowanie wypełniacza) i aktywną ochronę hydrofobowości powierzchni materiału (dzięki odpowiedniej modyfikacji składu LKE za pomocą poliolefin i wosków poliolefinowych).

Zupełnie realnym przedsięwzięciem wydaje się produkcja izolatorów z nowych materiałów kompozytowych, zwanych *betonami polimerowymi* (BP). Są to materiały składające się z odpowiednio dobranych wypełniaczy mineralnych, organicznego lepiszcza i dodatków specjalnych. Z uwagi na wysoką zawartość wypełniaczy (70-90% wagowo) i możliwość utwardzania w temperaturze pokojowej (małą energochłonność procesu) koszt izolatora z BP jest bardzo niski - szacunkowo 5-10% ceny porównywalnego izolatora porcelanowego. Izolatory z BP wytwarza się już w kilku krajach (USA, Brazylii i Wielkiej Brytanii) i instaluje powoli w wysokonapięciowych liniach napowietrznych (obecnie do 230 kV).

Wielkocząsteczkowe związki organiczne uzyskiwane na drodze syntezy chemicznej są coraz częściej stosowane do wytwarzania nowoczesnych materiałów izolacyjnych (w postaci płyt, taśm, ceratek, folii), będących elementami izolacji wewnętrznej urządzeń, maszyn i aparatów elektrycznych. Niektóre z tworzyw sztucznych są stosowane do izolowania kabli, cewek i uzwojeń oraz do wypełniania pustych przestrzeni w mufach kablowych i kondensatorach. Są one ponadto używane do produkcji lakierów i emalii elektroizolacyjnych. Coraz szerzej stosuje się rozmaite kompozycje materiałowe i materiały kompozytowe - uzyskiwane za pomocą technologii nasycania, klejenia lub prasowania (np. papiery przesycone żywicami, laminaty, tłoczywa itd.). Przykładami nowoczesnych materiałów warstwowych (laminatów), stosowanych jako izolacja maszyn i urządzeń elektrycznych, są taśmy *szkloflex* (laminat giętki z tkaniny szklanej i folii poliestrowej, sklejonych żywicą poliuretanową) oraz *Epoksterm 6* (laminat z papieru mikowego i tkaniny szklanej, sklejonych żywicą poliuretanową).

Dotychczasowe doświadczenia wskazują, że zakres stosowania syntetycznych materiałów izolacyjnych będzie ulegać zwiększeniu, a nowe organiczne tworzywa sztuczne będą wykorzystywane coraz częściej w postaci cienkowarstwowej (folie, taśmy, laminaty) oraz jako kompozyty. W odróżnieniu od lat siedemdziesiątych, nowinki materiałowe traktuje się jednak obecnie znacznie bardziej odpowiedzialnie. Zastosowanie nowych materiałów jest poprzedzone wszechstronnymi badaniami laboratoryjnymi, a często również terenowymi - wykonywanymi w rzeczywistych warunkach eksploatacyjnych.

3. POSTĘPY W ZAKRESIE TECHNIKI IZOLOWANIA W ELEKTROENERGETYCE

Bardzo istotny i nadal daleki od zadowalającego rozwiązania problem zwiększenia niezawodności izolacji zewnętrznej i wewnętrznej urządzeń elektroenergetycznych próbuje się rozwiązywać w różny sposób, przede wszystkim jednak poprzez wprowadzenie nowych jakościowo rozwiązań konstrukcyjnych i materiałowych układów izolacyjnych.

W przypadku izolacji zewnętrznej dobre rezultaty można uzyskać wprowadzając do eksploatacji tzw. *izolatory kompozytowe*, składające się z rdzenia nośnego (najczęściej szklano-

epoksydowego), metalowych okuć i izolacyjnej osłony zewnętrznej, wykonywanej z hydrofobowego elastomeru syntetycznego (najczęściej kauczuku silikonowego lub kauczuku EPDM). Izolatory kompozytowe są już obecnie dość szeroko stosowane w liniach wysokich i najwyższych napięć - szczególnie w USA, Kanadzie i Australii [7].

W przypadku izolacji wewnętrznej stosuje się różnorodne rozwiązania techniczne, technologiczne i materiałowe. Gwarantują one dużą żywotność izolacji, m.in. ze względu na zmniejszenie do minimum intensywności wyładowań niezupełnych (wnz). W praktyce eksploatacyjnej obserwuje się tendencję do stosowania różnorodnych taśm izolacyjnych i półprzewodzących oraz syntetycznych folii elektroizolacyjnych - na ogół o bardzo dobrych właściwościach elektrycznych, cieplnych i mechanicznych. Dotyczy to w szczególności izolacji niektórych maszyn elektrycznych, głowic i muf kablowych oraz nowoczesnych kondensatorów energetycznych.

Bardzo realna wydaje się możliwość dalszego zmniejszenia wymiarów nie tylko niekonwencjonalnych układów izolacji wewnętrznej (np. gazowej ciśnieniowej w rozdzielnicach i przewodach szynowych izolowanych SF₆), ale również układów izolacji zewnętrznej (w liniach napowietrznych i stacjach elektroenergetycznych). Jest to związane z możliwością obniżenia napięć probierczych i oszczędniejszej koordynacji izolacji. Wiąże się to z kolei przede wszystkim z coraz powszechniejszym stosowaniem bardzo skutecznych beziskiernikowych ograniczników przepięć, czyli ochronników z warystorami zawierającymi tlenki metali (zwykle tlenek cynku). Aparaty te mogą być stosowane zarówno do ochrony przed przepięciami piorunowymi i łączeniowymi, jak i przepięciami dorywczymi o długich czasach trwania (rzędu kilku milisekund). W najbliższej przyszłości ten rodzaj ochronników wpływowych będzie prawdopodobnie powszechnie stosowany do ochrony przed wszystkimi rodzajami przepięć.

Izolacja linii napowietrznych

Polska jest jednym z ostatnich krajów europejskich, gdzie jeszcze buduje się elektroenergetyczne linie napowietrzne niskiego i średniego napięcia z przewodami gołymi, instalowanymi na ciężkich żelbetowych słupach. Można jednak przypuszczać, że w najbliższej przyszłości linie te będą budowane prawie wyłącznie jako linie z przewodami izolowanymi (cienką warstwą odpowiednio spreparowanego polietylenu sieciowanego, uodpornionego na działanie promieniowania ultrafioletowego) i instalowane na lekkich słupach drewnianych lub konstrukcjach strunobetonowych wirowanych, a także na fasadach budynków. Ten ostatni przypadek odnosi się do linii niskiego napięcia z przewodami izolowanymi samonośnymi, głównie w warunkach miejskich. Coraz bardziej uzasadnione jest również stosowanie linii z przewodami izolowanymi średniego napięcia, a w wyjątkowo trudnych warunkach terenowych i środowiskowych - nawet krótkich odcinków linii napowietrznych 110 kV w fińskim systemie konstrukcyjnym PAS(SAX), znacznie tańszych od tradycyjnych linii kablowych.

Unowocześnienia wymagają linie napowietrzne wysokich i najwyższych napięć, m.in. w związku z trudnościami terenowymi i prawnymi w uzyskaniu nowych tras linii, dążeniem do zwiększania ich zdolności przesyłowej oraz koniecznością ograniczenia oddziaływania linii na środowisko. Istnieje tendencja do budowania linii wielotorowych, instalowanych na wąskogabarytowych konstrukcjach wsporczych. Linie te są coraz częściej wyposażane w przewody odgromowe typu OPGW, będące także nośnikami światłowodów (służących do telekomunikacji i telesterowania).

Z powodu wyższych cen elektroenergetyczne izolatory kompozytowe nie stanowią jeszcze znaczącej konkurencji dla tradycyjnych izolatorów liniowych (porcelanowych i szklanych). Należy jednak podkreślić, że różnica w cenach wykazuje tendencję malejącą - szczególnie w przypadku linii bardzo wysokich napięć. Niektóre z właściwości osłonowych tworzyw polimerowych stosowanych w tych izolatorach (np. hydrofobowość) mogą zadecydować, że izolatory kompozytowe zaczną powoli zastępować rozwiązania tradycyjne. Rysuje się także możliwość wprowadzenia do eksploatacji innych konstrukcji izolatorów kompozytowych, szczególnie stacyjnych (np. z rdzeniem ceramicznym i pokryciem silikonowym lub fluoroetanowym). Dotyczy to również izolatorów z betonów polimerowych, pokrywanych cienką warstwą pokrycia hydrofobowego (w postaci kauczuku silikonowego typu RTV lub HTV).

Izolatory przepustowe

Dość zaskakujące tendencje występują obecnie w zakresie rozwoju konstrukcji wysokonapięciowych izolatorów przepustowych aparatuowych, wyposażonych w sterowane pojemnościowo układy izolacji wewnętrznej. Są to tzw. *przepusty kondensatorowe*, które przez ostatnie 20-30 lat wykonywano prawie wyłącznie jako konstrukcje o izolacji papierowo-żywicznej (twardej). Konstrukcja przepustów o izolacji wykonanej z papieru powlekanego żywicą jest bowiem znacznie prostsza i łatwiejsza do uszczelnienia, a przy tym - znacznie mniej wrażliwa na utratę szczelności. Rozwój produkcji takich przepustów został jednak parę lat temu zahamowany wskutek wprowadzenia do zbioru wymagań atestacyjnych bardzo ostrego kryterium dopuszczalnej intensywności wyładowań niezupełnych.

Tym też można tłumaczyć wyraźną tendencję do ponownego stosowania izolacji papierowo-olejowej (miękkiej) w przepustach aparatuowych, szczególnie transformatorowych. Tylko taki bowiem rodzaj izolacji stwarza szansę sprostania wymaganiom związanym z dopuszczalnym poziomem intensywności wzn. Przewaga techniczno-ekonomiczna przepustów o izolacji miękkiej nad równoważnymi rozwiązaniami konstrukcyjnymi o izolacji twardej jest jednak co najmniej dyskusyjna. Nie wynika ona z dotychczasowych doświadczeń eksploatacyjnych, lecz raczej z niezbyt dotąd udokumentowanych poglądów o rzeczywistej szkodliwości oddziaływań wzn o niewielkiej intensywności na izolację twardą.

Izolacja linii kablowych

Tendencje rozwojowe w zakresie izolacji kabli elektroenergetycznych średniego i wysokiego napięcia są w dużej mierze związane z dążeniem do dalszego zmniejszenia strat dielektrycznych oraz wydatnego zwiększenia niezawodności linii kablowych. Dąży się więc do uproszczenia izolacji i stosowania materiałów izolacyjnych o niewielkim współczynniku strat dielektrycznych. Szeroko stosuje się polietylen sieciowany (XLPE), a niekiedy również izolację warstwową, składającą się z papieru kablowego i cienkiej folii elektroizolacyjnej (głównie polipropylenowej). W celu zmniejszenia ryzyka wystąpienia zjawiska *drzewienia wodnego* w izolacji kabli średniego i wysokiego napięcia stosuje się rozmaite metody ich uszczelniania. Najszerze zastosowanie znajdują obecnie kable o izolacji z polietylenu XLPE i ta tendencja staje się coraz wyraźniejsza.

Tendencję tę obserwuje się również w przypadku kabli bardzo wysokich i najwyższych napięć. Głównie ze względów ekologicznych następuje bowiem dość wyraźne zmniejszenie zainteresowania projektantów i konstruktorów tradycyjną izolacją papierowo-olejową. W istniejących liniach kablowych wprowadza się specyficzne systemy zabezpieczeń, alarmujące o uszkodzeniach kabli olejowych (działające na zasadzie śledzenia zmian ciśnienia oleju). Ciekawą propozycją rozwiązania izolacji kabli najwyższych napięć jest zastosowanie tzw. *laminatu PPL*, czyli laminatu papierowo-polipropylenowego przesyconego olejem [5]. Dokonuje się również prób mających na celu zastąpienie oleju kablowego gazem obojętnym, stanowiącym specyficzne "syciwo" dla takiej izolacji warstwowej.

Duże postępy notuje się w rozwiązaniach układów izolacyjnych osprzętu kablowego, szczególnie muf i głowic. W przypadku kabli średniego napięcia, a coraz częściej również 110 kV, są to rozwiązania prefabrykowane, lekkie, osłonięte przed szkodliwym wpływem czynników klimatycznych i środowiskowych. Zasadnicze części izolacji takich muf i głowic kablowych są wykonywane z syntetycznych taśm elektroizolacyjnych, w tym również zimnokurczliwych. Rozkład pola elektrycznego w takich układach jest zazwyczaj dość dokładnie wysterowany. Podobnie jak w przypadku kabli, istnieje wyraźna tendencja do sukcesywnego wycofywania z eksploatacji muf i głowic tradycyjnych, głównie olejowych.

Izolacja kondensatorów energetycznych

Obserwuje się wzrastający popyt na rozmaite kondensatory energetyczne, zarówno do kompensacji mocy biernej, jak i przeznaczonych do nowoczesnych układów energoelektronicznych (szczególnie tyrystorowych). We współczesnych kondensatorach energetycznych szerokie zastosowanie znajdują elektroizolacyjne folie syntetyczne (głównie polipropylenowe, rzadziej poliestrowe), uwarstwione z bibulką kondensatorową lub występujące samodzielnie - po odpowiednim ukształtowaniu powierzchni. Dzięki wprowadzeniu niskostratnych folii z tworzyw sztucznych i biodegradalnych syciw (dostatecznie odpornych na wzn) zwiększono kilkakrotnie robocze natężenie pola elektrycznego w porównaniu z konstrukcjami konden-

satorów z lat sześćdziesiątych, obniżono kilkakrotnie straty dielektryczne, a jednocześnie zwiększono moc znamionową i wskaźnik gęstości mocy biernej. Dalsze postępy w rozwoju konstrukcji kondensatorów energetycznych są uzależnione od szerszego zastosowania izolacji wykonanej tylko z szorstkiej folii polipropylenowej dwukierunkowo orientowanej.

Izolacja transformatorów energetycznych

Poza stosowaniem coraz lepszych materiałów izolacyjnych, dominującą tendencją w zakresie izolacji wysokonapięciowych transformatorów energetycznych jest nie tyle rozwój nowatorskich rozwiązań konstrukcyjnych (np. transformatorów gazowych bardzo dużej mocy), ale przede wszystkim wprowadzanie coraz bardziej efektywnych metod diagnozowania długotrwale eksploatowanych transformatorów ([3], [10] i [11]). Zmniejszyły się bowiem naciski, aby zwiększać moce i napięcia znamionowe transformatorów, ale w wielu krajach intensywnie rozwija się diagnostyka urządzeń elektroenergetycznych o dużej odpowiedzialności technicznej. Postęp w tej dziedzinie wyraża się przede wszystkim we wprowadzaniu nowych, bardziej precyzyjnych metod diagnostycznych (np. oceny stanu izolacji olejowej na podstawie zawartości furfuranów) oraz stosowaniu technik komputerowych do przetwarzania wyników pomiarów i edytowania diagnoz o stanie izolacji transformatora. Coraz częściej są bowiem stosowane systemy komputerowe, które umożliwiają rejestrację wybranych wielkości w czasie rzeczywistym (ang. *on-line*) oraz interpretację wyników pomiarów poprzez tworzenie baz danych i ich statystyczną obróbkę.

Problem opanowania wnz w transformatorach energetycznych został w znacznym stopniu rozwiązany dzięki: postępom w zakresie obliczeń rozkładu pola elektrycznego, poprawie właściwości materiałów izolacyjnych, ścisłemu nadzorowi procesu produkcji, ulepszeniu procesu suszenia papieru, poprawie procesów projektowania, wprowadzeniu do norm odbiorczych wymagań dotyczących poziomu wnz, odróżnieniu wnz szkodliwych od nieszkodliwych dla izolacji transformatora, efektywnemu wykorzystaniu informacji technicznych do doskonalenia technologii produkcji.

W różnych ośrodkach badawczych trwają prace, mające na celu znalezienie skutecznych środków zaradczych przeciwko negatywnym skutkom elektryzacji statycznej w bardzo dużych transformatorach z chłodzeniem kierowanym strumieniem oleju ([12], [13] i [16]). Stwierdzono bowiem liczne awarie takich transformatorów, spowodowane elektryzacją statyczną ich układów izolacyjnych. Przypuszcza się, że elektryzacja jest wywołana przez procesy generacji, przenoszenia i akumulacji ładunków elektrostatycznych w izolacji olejowej.

Izolacja maszyn elektrycznych

Postęp w zakresie izolowania wysokonapięciowych maszyn elektrycznych polega przede wszystkim na wprowadzaniu coraz bardziej nowoczesnych materiałów izolacyjnych. Dotyczy to w szczególności izolacji żłobkowej (zwojowej i międzywarstwowej) stojanów dużych maszyn elektrycznych, w tym również generatorów. W praktyce stosowane są obecnie specy-

ficzne materiały kompozytowe (np. papiery mikowe i poliamidowe), materiały warstwowe (np. mikanity, mikafolie, płyty warstwowe i rozmaite taśmy mikowe) oraz różne ceratki i taśmy nasycane lakierami. Wynika to z ogólnoświatowej tendencji do zmniejszania gabarytów maszyn, co narzuca z kolei konieczność poszukiwania nowych tworzyw o coraz wyższej temperaturze pracy (ciepłoodporności) oraz stosowania coraz efektywniejszych metod odprowadzania ciepła [19]. Ciepłoodporność i wynikająca stąd tzw. *klasa izolacji* jest jedną z najważniejszych właściwości technicznych izolacji wewnętrznej każdej maszyny elektrycznej. W celu zwiększenia trwałości maszyny dość często stosuje się materiały zapewniające wyższą klasę izolacji, niż to wynika z przewidywanych przyrostów temperatury uzwojeń i magnetowodów.

Izolacja gazowa ciśnieniowa

Coraz powszechniej stosuje się wysokonapięciowe urządzenia elektroenergetyczne izolowane sprężonym SF_6 . Są to rozdzielnie gazoszczelne (produkowane obecnie na szeroką skalę przez wyspecjalizowane firmy w wielu krajach) oraz gazoszczelne wielkoprądowe przewody szynowe. Rozdzielnice ze sprężonym SF_6 są już rozwiązaniami w pełni dopracowanymi pod względem konstrukcyjnym. W praktyce spotyka się zarówno rozdzielnice o izolacji jednobiegunowej (każda faza w oddzielnej obudowie), jak również trójbiegunowe (wszystkie fazy we wspólnej osłonie). Rozdzielnice gazoszczelne stają się powoli konwencjonalnymi urządzeniami elektrycznymi, a ich zastosowanie jest uzasadnione przede wszystkim w aglomeracjach miejskich oraz w obszarach o dużym narażeniu zabrudzeniowym (rejonach przemysłowych i nadmorskich). Pierwsze dwie rozdzielnice izolowane sprężonym SF_6 (o górnym napięciu znamionowym 110 kV) zostały zainstalowane również w Polsce.

Korzystną alternatywą dla tradycyjnych kabli elektroenergetycznych wysokiego i bardzo wysokiego napięcia mogą się stać gazoszczelne przewody szynowe izolowane sprężonym SF_6 . Odnaczają się one bowiem zdolnością do przenoszenia znacznie większych mocy, małymi kosztami eksploatacji i dużą niezawodnością, a poza tym - nie stanowią znaczącego zagrożenia dla otoczenia. Gazoszczelne przewody szynowe można wykorzystywać do przesyłania i rozdziału energii elektrycznej w obrębie jednego lub kilku obiektów elektroenergetycznych.

4. POSTĘPY W ZAKRESIE BADAŃ IZOLACJI

Cel, zakres, miejsce i metody wykonywania badań wysokonapięciowych układów izolacyjnych są bardzo zróżnicowane. Badania izolacji wykonuje się zarówno w specjalistycznych laboratoriach materiałowych lub naukowych i fabrycznych laboratoriach wysokich napięć, jak i w warunkach eksploatacyjnych. W tym ostatnim przypadku chodzi o sprawdzenie stanu technicznego izolacji po wykonaniu montażu oraz w miarę upływu czasu

eksploatacji i - ewentualnie - o poprawienie niektórych czynności montażowych lub wykonanie stosownych zabiegów profilaktycznych.

Laboratoryjnym i eksploatacyjnym badaniom izolacji przypisuje się bardzo duże znaczenie, gdyż ich wyniki są najbardziej wiarygodnym i ostatecznym sprawdzianem obliczeń projektowo-konstruktorskich oraz rzeczywistych parametrów technicznych i jakościowych izolacji. Istnieje wyraźna potrzeba poprawy efektywności i zwiększenia wiarygodności tych badań. Dotyczy to szczególnie badań diagnostycznych izolacji wewnętrznej transformatorów i innych urządzeń elektroenergetycznych, mających na celu:

- wykrywanie objawów stanów zagrażających awarią, aby co najmniej ograniczyć rozmiar uszkodzeń i uniknąć zniszczenia obiektu,
- śledzenie naturalnego (powolnego) starzenia się izolacji, co umożliwia wyznaczenie przedziału czasu do jej regeneracji lub wymiany.

W obu przypadkach istotne znaczenie mają metody pomiarowe oraz - nie mniej ważne - wartości kryterialne mierzonych wielkości. Pozwalają one uznać stan izolacji za bezpieczny, alarmowy lub niebezpieczny dla dalszej pracy obiektu (np. transformatora energetycznego). Coraz większego znaczenia nabiera ciągle obserwowanie zmian wybranych wielkości i parametrów, czyli tzw. *monitoring* ([1] i [17]). Wiele wysiłków kieruje się na opracowanie nowych metod pomiarowych, umożliwiających ciągły (on-line) pomiar wielkości mierzonych dotychczas wyłącznie metodami laboratoryjnymi (off-line).

Największy postęp uzyskano w zakresie rozwoju diagnostyki dużych transformatorów energetycznych, w tym również izolacji wewnętrznej. Wyraża się on przede wszystkim we wprowadzaniu nowych, coraz bardziej precyzyjnych metod pomiarowych i w coraz powszechniejszym stosowaniu technik komputerowych do oceny wyników pomiarów i wydawania jednoznacznych diagnoz o stanie technicznym transformatora. Podstawowym narzędziem diagnostycznym staje się powoli skomputeryzowany system monitoringu, uzupełniony elementami systemów ekspertowych.

Podobne tendencje obserwuje się w przypadku wysokonapięciowych gazoszczelnych układów izolacyjnych (GIS), występujących w coraz bardziej rozpowszechnionych rozdzielnicach i przewodach szynowych izolowanych sprężonym SF_6 [2]. Proponuje się rozmaite diagnostyczne metody pomiarowe (elektryczne, chemiczne, akustyczne), służące do wykrywania i oceny szkodliwości rozmaitych defektów. Taka ocena jest dokonywana coraz częściej na podstawie wyników pomiarów wnz, wykonywanych w warunkach eksploatacyjnych metodami elektrycznymi lub akustycznymi. Skutkiem wyladowań elektrycznych w SF_6 (w obecności nawet śladowych ilości wody i tlenu) jest bowiem tworzenie się silnie trujących fluorków i agresywnego fluorowodoru, a następnie kwasu siarkowego. Trwają prace nad metodami wykrywania i oceny określonych rodzajów wnz oraz nad zastosowaniem systemów ekspertowych i metody sieci neuronowych do wyznaczania czasu życia izolacji. Rozważa się celowość szerokiego wprowadzenia monitoringu gazoszczelnych układów izolacyjnych.

Jednym z ważniejszych źródeł informacji o stanie technicznym izolacji są powstające w niej wyladowania niezupełne. Współcześnie problem wnz jest istotny dla większości wysokonapięciowych układów izolacyjnych. W transformatorach, kondensatorach, urządzeniach izolowanych sprężonym SF_6 , maszynach elektrycznych i innych pomiary wnz są wykonywane zarówno podczas prób odbiorczych, jak i profilaktycznych badań diagnostycznych w czasie eksploatacji ([10] i [21]).

Powszechne dążenie do zmniejszania wymiarów wysokonapięciowych urządzeń, maszyn i aparatów elektrycznych powoduje, że ich izolacja pracuje w coraz silniejszym polu elektrycznym, a pomiary wnz stają się ponownie ważnym zadaniem technicznym. Zmieniło się jednak podejście do pojęcia "wyladowania niezupełne", gdyż rozszerzono je na wszystkie etapy zjawiska - od początkowej nierównowagi energetycznej w izolacji, aż do końcowego wyladowania niezupełnego. Zaczęto również zajmować się defektami izolacji o wymiarach mikronowych w gazoszczelnych i próżniowych układach izolacyjnych ([8], [9] i [10]). Mimo wieloletnich badań problem dogłębnego poznania natury wnz jest nadal aktualny. Powszechnie stosowane mierniki wnz wyposaża się w coraz bardziej rozbudowaną aparaturę rejestracyjno-diagnostyczną, począwszy od liczników impulsów i wielokanałowych analizatorów amplitudy, aż po samouczące się sieci neuronowe. Kontrola i ograniczenie do minimum wyladowań niezupełnych są bowiem istotnymi sposobami zwiększania trwałości i niezawodności większości urządzeń elektroizolacyjnych wysokiego napięcia.

5. PODSUMOWANIE

- W wysokonapięciowej technice izolacyjnej dokonują się znaczące przemiany jakościowe i ilościowe, mimo wyraźnej tendencji do ograniczania dalszego wzrostu napięć znamionowych i mocy przesyłowych sieci elektroenergetycznych.
- Coraz szerzej wykorzystuje się doświadczenia wynikające z tzw. nauki konstrukcji oraz wprowadza się technikę wspomagania komputerowego do projektowania i konstruowania układów izolacyjnych.
- Istnieje wyraźna tendencja do wprowadzania nowoczesnych syntetycznych materiałów elektroizolacyjnych i technologii ich przetwórstwa. Dotyczy to gazów i cieczy dielektrycznych, a przede wszystkim organicznych tworzyw sztucznych. Tworzywa te służą do wytwarzania różnorodnych wyrobów użytkowych w postaci płyt, taśm, folii, laminatów, tłoczyw itd.
- Znaczące postępy osiągnięto w zakresie techniki izolowania linii napowietrznych (izolatory kompozytowe, przewody izolowane XLPE), linii kablowych (kable o izolacji z XLPE), nowoczesnego osprzętu kablowego (taśmy izolacyjne i półprzewodzące) i kondensatorów

energetycznych (izolacja papierowo-foliowa lub wyłącznie foliowa, przesycona biodegralnym syciwem).

- Poza stosowaniem coraz lepszych materiałów elektroizolacyjnych, dominującą tendencją w zakresie izolacji wysokonapięciowych transformatorów energetycznych, dużych maszyn elektrycznych (generatorów) oraz gazoszczelnych rozdzielnic i przewodów szynowych jest nie tyle rozwój nowatorskich rozwiązań konstrukcyjnych, ile wprowadzanie coraz lepszych metod diagnozowania stanu technicznego tych urządzeń.
- Znaczące postępy uzyskano w zakresie poprawy efektywności i zwiększenia wiarygodności badań izolacji. Dotyczy to w szczególności badań diagnostycznych izolacji wewnętrznej niektórych urządzeń elektroenergetycznych, wykonywanych podczas ich eksploatacji. W przypadku dużych transformatorów podstawowym narzędziem diagnostycznym jest skomputeryzowany system monitoringu, uzupełniony elementami systemów ekspertowych.

LITERATURA

1. Allan D., Corderoy B.: Transformer Insulation Condition Monitoring, Life Assessment and Life Extension Techniques in Australia. CIGRE 1992 Session, rep. 12-101.
2. Boeck W. et al.: Diagnostic Methods for GIS Insulating Systems. Working Group 15.03. CIGRE 1992 Session, rep. 15/23-01.
3. Breen G.: Essential Requirements to Maintain Transformers in Service. On behalf of Study Committee 12. CIGRE 1992 Session, rep. 12-103.
4. Dietrych J.: System i konstrukcja. WNT, Warszawa 1993.
5. Endersby T. M., Gregory B., Swingler S. G.: The Application of Polypropylene Paper Laminate Insulated Oil Filled Cable to EHV and UHV Transmission. CIGRE 1992 Session, rep. 21-307.
6. Gacek Z., Pieńkowski A., Rusiński J., Skomudek W.: Elektroenergetyczne linie napowietrzne z przewodami izolowanymi. Wyd. PTPiREE, Poznań 1995.
7. Gasperowicz A., Stankiewicz J.: Tendencje rozwojowe, aktualne zagadnienia konstrukcyjno-technologiczne izolatorów kompozytowych. Prace Nauk. Inst. Elektrotechniki i Elektrotechnologii Pol. Wrocławskiej nr 28 (konf. nr 7), 1994, ss. 133-139.
8. Gulski E., Kreuger F. H.: Diagnostics of Insulating Systems Using Statistical Tools. IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, vol. 27, № 1, Febr. 1992, pp. 82-92.
9. Gulski E., Kreuger F. H.: Diagnostics of Insulating Systems Using Statistical Tools. IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, Baltimore 1992, pp. 292-296.
10. Kaźmierski M., Kulikowski J.: Zagadnienia eksploatacji transformatorów na XXXIV Sesji CIGRE. Przegląd Elektrotechniczny z. 7/1993, ss. 156-160.
11. Kaźmierski M., Pinkiewicz I., Domżałski T.: Nowoczesna diagnostyka transformatorów energetycznych. Energetyka nr 9/1994, Biul. Inst. Energetyki, ss. 36-42.

12. Kędzia J.: Badania elektryzacji statycznej mineralnych olejów izolacyjnych. WSI Opole, Studia i Monografie, z. 23, Opole 1988.
13. Kozłowski M.: O zagrożeniu dużych transformatorów wskutek elektryzacji statycznej. Przegląd Elektrotechniczny z. 1/1993, ss. 8-10.
14. Kreuger F. H., Moshuis P. H. F., Gulski E.: Evaluation of Discharge by Fast Detection and Statistical Analysis. CIGRE 1994 Session, rep. 15-106.
15. Opydo W., Ranachowski J.: Właściwości elektryczne próżniowych układów izolacyjnych przy napięciu przemiennym. IPPT PAN, Warszawa-Poznań 1993.
16. Poittevin J., Sapet J.: Preventive Detection of Electrostatic Phenomena in Transformers. CIGRE 1992, rep. 15/12-01.
17. Provazana J. H. et al.: Transformer Condition Monitoring - Realizing an Integrated Adaptive Analysis System. CIGRE 1992 Session, rep. 12-105.
18. Skubis J.: Emisja akustyczna w badaniach izolacji urządzeń elektroenergetycznych. IPPT PAN, Warszawa 1993.
19. Stephan G. E., Liptak G., Schuler G.: An Improved Insulation System for the Newest Generation of Stator Windings of Rotating Machines. CIGRE 1994 Session, rep. 11-101.
20. Sundhar S. et al.: Polymer Insulating Materials and Insulators for High Voltage Outdoor Applications. IEEE Int. Symp. on Electrical Insulation, Baltimore 1992, pp. 222-228.
21. Zaengl S. W., Lehman K., Albiez M.: Conventional PD Measurement Techniques used for Complex HV Apparatus. IEEE Trans. on Electrical Insulation, vol. 27, N^o 1, Febr. 1992, pp. 15-27.
22. Zalewski J.: Dielektryki kondensatorów energetycznych. WSI Opole, Studia i Monografie, z. 20, Opole 1988.

Recenzent: dr hab. inż. Janusz Fleszyński, prof. Pol. Wrocławskiej

Wpłynęło do Redakcji dnia 13 października 1995 r.

Abstract

The article contents a brief review of growth trends in high voltage insulating technology applied in electrical power engineering. The most dynamic changes are observed in the field of use of new synthetic insulating materials (gaseous, liquid or solid ones) as well as in the field of new insulating techniques in overhead and cable lines and divers power devices and apparatus overcoming. Significant progress has been achieved in the field of insulation test technique. It concerns especially diagnostic tests performed during operating conditions of the tested object. The scope of considerations doesn't include many detailed technical, technological and measuring problems.

Several modern electroinsulating materials applied in electrical power engineering are discussed: hexafluoride sulphur, some synthetic liquids, extruded polyethylene, divers synthetic rubbers (EPDM and silicone ones), cycloaliphatic epoxide resins and the so called polymer concretes. These materials are applied to made of insulating systems assigned for divers power equipment: gas-tight buses, overhead lines, condensers, power cables, overhead line and station insulators.

The sufficient reliability of external and internal insulating systems may be achieved by means of new constructional and material solutions as well as specific and sophisticated diagnostic techniques. These techniques are treated as preventive tests and - simultaneously - an efficient maintenance policy which has considerable influence on the reliability and availability of the power networks. Larger and larger practical importance has so called "monitoring" of large power transformers and high voltage metalclad stations. Many efforts are aimed at new measuring methods for choice quantities measurement in the on-line manner. Expert systems also appears as a mean of faults diagnosis.