

## Kalejdoskop energetyczno-ekologiczny



### Rozwój technologii urządzeń wysokiego napięcia z sześćciofluorkiem siarki

Od ponad 40 lat w elektroenergetyce stosowany jest sześćciofluorek siarki ( $SF_6$ ). Doskonałe własności izolacyjne i zdolność gaszenia łuku elektrycznego przesądziły o szerokim wykorzystaniu tego rzadkiego związku chemicznego w urządzeniach elektroenergetycznych wysokiego napięcia, zwłaszcza w wyłącznikach. W ostatnich latach urządzenia wypełnione tym medium coraz skuteczniej wypierają tradycyjne konstrukcje na bazie oleju.

Wytrzymałość elektryczna oraz przenikalność elektryczna  $SF_6$  nie ulega praktycznie zmianie w zakresie częstotliwości od kilku Hz do kilku GHz. Wyjątkowa odporność tego gazu na działanie łuku elektrycznego wynika ze zdolności do natychmiastowej rekombinacji cząsteczek po usunięciu przyczyny ich rozkładu (tj. samego łuku). Dodatkowo wysoka wartość ciepła właściwego

i niewielka lepkość sprzyjają szybkiemu odprowadzaniu wielkich ilości wydzielanego ciepła. Gaz ten jest nietoksyczny, niepalny i przy tym nie wywiera niszczącego oddziaływania na ozon zawarty w atmosferze.

Sześćciofluorek siarki, a ściślej jego mieszaniny z tlenem lub azotem, znalazł zastosowanie także w procesach wytwarzania materiałów półprzewodnikowych z udziałem wysokotemperaturowej plazmy. Ponadto  $SF_6$  wykorzystuje się w branży hutniczej w niektórych technologiach odlewania metali. Przy odlewaniu magnezu i aluminium mieszaniny na bazie tego gazu zapewniają atmosferę ochronną zapobiegając tworzeniu niepożądanych produktów reakcji.

Urządzenia elektryczne wypełnione sześćciofluorkiem siarki wykazują szereg cennych zalet praktycznych, z których szczególne znaczenie posiada kompaktowa budowa. Dzięki temu rozdzielnie te zajmują jedynie 10–15% przestrzeni wymaganej przez tradycyjne konstrukcje. Inną zaletą jest niska emisja hałasu. Z tych względów rozdzielnie na bazie  $SF_6$  stosuje się zwłaszcza w gęsto zaludnionych obszarach. Z kolei wyjątkowa szczelność wykonania skutecznie zabezpiecza nie tylko przed niepożądanym dostępem osób czy zwierząt, lecz także wnikaniem zanieczyszczeń pogarszających jakość działania. Dlatego też te hermetyczne konstrukcje są szczególnie cenione na terenach o wysokim zanieczyszczeniu lub zawilgoceniu powietrza, m.in. w zakładach chemicznych czy surowcowych, na obszarach pustynnych i nadmorskich. Bezcenne znaczenie ma wreszcie całkowite wyeliminowanie zagrożeń pożarowych.

Ustalono, że sześćciofluorek siarki utrzymuje się w atmosferze ziemskiej nie dłużej niż 3200 lat, lecz posiada zdolność wywoływania efektu cieplarnianego 22 000 razy większą od dwutlenku węgla. Z uwagi na znikomą zawartość tego gazu w powietrzu jego udział w wywoływaniu wspomnianego efektu nie przekracza 0,2%, przy czym tylko niewielki ułamek tej wartości przypisuje się jego wykorzystaniu w elektroenergetyce. Mimo to na Światowej Konferencji w Kioto w 1997 r. sześćciofluorek siarki zaliczono do gazów cieplarnianych i zobowiązano producentów i użytkowników do jego monitoringu. Dlatego też konstruktorzy wyłączników, rozdzielni, przekładników przywiązują wielką wagę do zapewnienia maksymalnej szczelności tych urządzeń.

Łączna emisja  $SF_6$  z czynnych urządzeń elektroenergetycznych na całym świecie wyniosła około 0,5% z ogólnej masy używanego w nich gazu rzędu 4000 ton. Najbardziej zaawansowane konstrukcje umożliwiają utrzymanie strat na poziomie 0,1%. Większe ilości – około 2,5% – są tracone w trakcie produkcji, dystrybucji, montażu itp. Zapewnieniu szczelności służy nie tylko precyzyjny montaż fabryczny, ale i późniejsza ciągła kontrola ciśnienia gazu wewnątrz zbiornika. Normalne ciśnienie robocze zawiera się w granicach 0,45–07 MPa. W razie jego spadku wbudowany czujnik pobudza alarm. Ciągły postęp w dziedzinie konstrukcji urządzeń wysokiego napięcia sprawił, że najnowsze ich rozwiązania zużywają nawet 85% mniej  $SF_6$  w porównaniu ze swoimi poprzednikami. Również dzięki wykorzystaniu lepszych materiałów (stali, żeliwa i aluminium) udało się wydłużyć średni czas między awariami tych urządzeń do 400–1000 lat, co świadczy o ich wyjątkowej niezawodności. Bezpieczeństwu eksploatacji urządzeń na bazie  $SF_6$  i minimalizacji jego wpływu na środowisko naturalne służą rygorystyczne przepisy obsługi i remontów. W zasadzie aparaty wypełnione tym medium nie wymagają ingerencji personelu przez okres rzędu 25 lat, po którym przewidziane jest wykonanie badania (rewizji wewnętrznej). Przez cały ten czas wewnętrzny filtr zapewnia utrzymanie niezbędnej czystości gazu. Po otwarciu urządzenia sześćciofluorek siarki musi zostać oczyszczony na miejscu lub dostarczony bez ubytków do producenta.

Energetycy twierdzą, że obecnie brak jest alternatywy dla tego medium bez znacznego pogorszenia strat i wskaźników eksploatacji urządzeń wysokiego napięcia. Przesądza to o dalszej ekspansji omawianej technologii z jednoczesną postępującą redukcją emisji  $SF_6$  do atmosfery, która to kwestia nie przestaje wzbudzać obaw obrońców środowiska naturalnego.

Oprac. P. Olszowiec

W. Degen „Handling SF6”, *Power Engineering International* 11/2003

## Zastosowanie kabli wysokiego napięcia do budowy maszyn elektrycznych

W ostatnich latach w technologii materiałów izolacyjnych zaszły gruntowne zmiany, które umożliwiły około 2-krotny wzrost dopuszczalnej wartości natężenia pola elektrycznego występującego w izolacji uzwojeń urządzeń średniego i wysokiego napięcia. Wprowadzono nowe rodzaje izolacji, m.in. sześćciofluorek siarki  $SF_6$  i różne tworzywa sztuczne.

Najnowszym osiągnięciem w tej dziedzinie okazało się zastosowanie izolacji polietylenowej, sprawdzonej w układach kablowych przesyłu i rozdziału energii elektrycznej, do uzwojeń maszyn i transformatorów energetycznych wysokiego napięcia.

Rozwój technologii kabli elektroenergetycznych rozpoczął się w latach 80. XIX wieku wraz z upowszechnianiem instalacji oświetleniowych, natomiast od początku XX wieku przystąpiono do budowy podziemnych sieci kablowych. Z biegiem lat zmieniały się materiały izolacyjne kabli: guma naturalna, gutaperka, wosk, juta, konopie, bawełna, żywica, asfalt. Przy wyższych napięciach roboczych wprowadzono ciśnieniowe kable olejowe. Obecnie stosuje się dwa główne rodzaje izolacji kabli wysokiego napięcia, a mianowicie papierową i polimerową. Wśród tych ostatnich najszersze zastosowanie znalazły kable w izolacji z usieciowanego polietylenu (ang. XLPE), które po zdominowaniu układów rozdzielczych torują sobie drogę również do sieci przesyłowych, a ostatnio do maszyn elektrycznych. Zapoczątkowało to rozwój nowego typu generatora o nazwie Powerformer, suchego transformatora Dryformer, a ostatnio silnika Motorformer.

W tradycyjnych generatorach energetycznych uzwojenia stojana wykonane są z izolowanych prętów o przekroju prostokątnym. Taki kształt prętów uzwojeń wywołuje na ich krawędziach wzrost natężenia pola, które jest źródłem powstawania wyładowań niezupełnych i ulotu uniemożliwiających dalsze podnoszenie napięcia generatora powyżej poziomu 30–35 kV. W odróżnieniu od konwencjonalnych generatorów uzwojenia, Powerformera wykonano z kabli w wytłaczanej izolacji z polietylenu usieciowanego (XLPE).

Okrągłe żyły zapewniają równomierny rozkład pola elektrycznego na jej powierzchni, zaś kształt żłobka dopasowano do ułożenia szeregu kabli kolejnych zwojów w izolacji o narastającej wytrzymałości. Rozwiązanie to zapewniło wzrost dopuszczalnego natężenia pola do 15 kV/mm. Generator o napięciu roboczym znacznie przekraczającym 100 kV można przyłączyć bezpośrednio do sieci wn bez transformatora podwyższającego (blokowego). Jednocześnie, dzięki zwiększonemu napięciu, wielokrotnie zmniejszyła się wartość prądu stojana wymagana dla uzyskania założonej mocy generatora.

Nowym korzystniejszym parametrem elektrycznym towarzyszy wyższa sprawność maszyny wskutek obniżonych strat cieplnych w przewodach uzwojeń. Prototyp Powerformera o danych znamionowych 11 MVA, 45 kV i 600 obr/min pracuje w szwedzkiej elektrowni wodnej *Porjus* od 1998 r.

Nowa technologia uzwojeń wysokonapięciowych wkroczyła także do transformatorów energetycznych, w których materiałem izolacyjnym jest najczęściej olej mineralny i papier. Wadą izolacji olejowo-papierowej, mimo doskonałych własności dielektrycznych i cieplnych, jest natomiast zagrożenie pożarowe i wybuchowe oraz kłopotliwa gospodarka olejowa. Poważną niedogodność konwencjonalnych transformatorów energetycznych stanowi także długotrwały i kosztowny proces obróbki termicznej i próżniowej izolacji i poszczególnych podzespołów. Względy te skłoniły konstruktorów do poszukiwań innych rozwiązań pozbawionych opisanych wad. Nowe konstrukcje tzw. suchych transformatorów wykorzystujące jako izolację sześćciofluorek siarki oraz włókna szklane lub epoksydowe nie spełniły jednak wymagań i oczekiwań użytkowników. Dopiero najnowsze rozwiązanie wzorowane na rozwiązaniach

generatorów Powerformer umożliwia eliminację wspomnianych zagrożeń dla bezpieczeństwa i niezawodności pracy urządzenia. Podobnie jak w generatorze Powerformer postęp polega nie tylko na zmianie materiału izolacji, lecz także na odmiennej strukturze układu izolacyjnego. Pierwszy transformator nowej generacji o nazwie Dryformer, przeznaczony do prób i badań, był jednostką jednofazową o mocy 10 MVA i przekładni 52/17 kV. Następnym Dryformer o mocy 20 MVA i napięciach 140/6,6 kV zainstalowano w szwedzkiej elektrowni wodnej *Lottefors*.

Podobnie jak Powerformer, silnik synchroniczny nowej generacji o nazwie Motorformer jest również przystosowany do bezpośredniego włączenia do sieci wn. Uruchomiony w 2001 r. prototypowy układ Motorformera o mocy 6,5 MW zasilono z sieci 42 kV obniżając straty energii o 25%. Następne dwa silniki o mocy 40 MW zainstalowano w sprężarkowni na platformie wydobywczej gazu na Morzu Północnym. Maszyny te są zasilane z sieci 56 kV przez przekształtniki do regulacji prędkości obrotowej. Silniki bardzo wysokiego napięcia produkcji *ABB* nie mają odpowiednika na rynku maszyn elektrycznych. Najwyższe napięcie produkowanych na świecie silników elektrycznych nie przekraczało dotychczas 15 kV.

Konstruktorzy Motorformera wybrali synchroniczny typ maszyny, mimo znacznie częstszego stosowania silników asynchronicznych. Przesądziły o tym wyższe osiągalne moce (ponad 100 MW w porównaniu z maksymalnie 20 MW), szersza szczylna ułatwiająca budowę oraz możliwość regulacji mocy biernej. Istotne różnice konstrukcyjne w porównaniu z tradycyjnymi silnikami synchronicznymi dotyczą tylko stojana. Podobnie jak w Powerformersie pręty stojana zastąpiono kablami z polietylenu usieciowanego również o cylindrycznym przekroju. Dla nowych uzwojeń stojana przewidziano sprawdzone metody chłodzenia, tj. powietrzem, a przy większych prądach – destylatem. Graniczną wartością napięcia dla tych uzwojeń ma być według specjalistów 150 kV, lecz za ekonomicznie uzasadniony poziom napięcia roboczego uznaje się 20 kV. Do najważniejszych zalet silników nowej konstrukcji w porównaniu z tradycyjnymi silnikami synchronicznymi i asynchronicznymi średniego napięcia należą oszczędność miejsca, większa moc i niezawodność przy wyższej sprawności oraz prostszy i tańszy układ.

Oprac. P. Olszowiec  
na podstawie materiałów firmy *ABB*

## Ultraczyste paliwo węglowe

Naukowcy w krajach wysoko rozwiniętych prowadzą intensywne poszukiwania nowych technologii energetycznej utylizacji węgla kamiennego. Australia, największy eksporter tego surowca na świecie, przoduje w badaniach nad nowym, ultraczystym paliwem z węgla, które nadawałoby się do bezpośredniego spalania w silnikach tłokowych i turbinach gazowych. Prace w tym zakresie rozpoczęto na początku lat 80. XX wieku. Pierwszym paliwem z węgla najwyższej czystości zwanym skrótowo UCC (ultra clean coal) była wodna zawiesina pyłu węglowego o zawartości ok. 0,5% popiołu. Obecnie uzyskiwane w Australii ultraczyste paliwo węglowe spełnia warunki niezbędne do spalania w turbinach gazowych.

Nowe paliwo węglowe nie zastąpi zwykłego węgla kamiennego w tradycyjnych kociach, lecz ma stać się konkurencyjną alternatywą dla oleju opałowego i gazu ziemnego w urządzeniach energetycznych, w których nie stosowano dotychczas węgla. Staraniem australijskich i japońskich firm zbudowano doświadczalną instalację w Cessnock (Australia).

Układ ten wytwarza 350 kg/h ultraczystego węgla realizując następujące etapy procesu chemicznego oczyszczania węgla kamiennego: przygotowanie surowca, wysokociśnieniowe ługowanie, przemywanie kwasem i wodą, regenerację kaustyczną i wytwarzanie produktów ubocznych. Otrzymywane sproszkowane paliwo zawiera poniżej 0,2% popiołu dzięki alkalicznemu i kwasowemu przemywaniu, które powoduje wyflukowanie minerałów bez utraty własności węgla. Do procesu używa się węgla, kwasu siarkowego i wapna, zaś jego produktami są ultraczysty węgiel, a także gips i związki krzemu, które znajdują zastosowanie w przemyśle materiałów ceramicznych. W zakładach *Takasago* koncernu *Mitsubishi* przeprowadzono udane testowanie spalania ultraczystego węgla w turbinie gazowej typu MHI 501G. Dalsze próby mają ustalić skutki obecności śladowych ilości związków sodu i tytanu oraz pozostałości popiołów, które w ogóle nie występują w gazie ziemnym. W razie korzystnego wyniku testów planuje się wybudowanie w 2008 r. kompletnej instalacji pilotażowej nowej technologii bloku węglowego na bazie turbiny gazowej o mocy 6 MW.

Celem rozwoju produkcji UCC jest osiągnięcie wysokich sprawności produkcji energii elektrycznej na poziomie dotychczas dostępnym w układach zintegrowanego bloku gazowo-parowego. Technologia ta ma stać się równie czystą, lecz tańszą i bardziej stabilną cenowo alternatywą dla gazu ziemnego. Przy bezpośrednim spalaniu węgla w turbinie sprawność przemiany wzrasta z ok. 38% w tradycyjnych blokach cieplnych do ok. 53%. Nową technologię można także wykorzystać do rozproszonej generacji energii elektrycznej i ciepłej. Ultraczysty węgiel można będzie użyć również dla szybkiego (interwencyjnego) uzyskiwania mocy szczytowych we wspomnianych turbinach gazowych. Wreszcie UCC znajdzie także zastosowanie zamiast gazu ziemnego na blokach obecnie określanymi jako gazowo-parowe.

Wyższa sprawność spalania UCC wyraźnie obniży emisję dwutlenku węgla w stosunku do konwencjonalnych elektrowni węglowych. Spalanie tego paliwa w turbinie na bloku gazowo-parowym będzie źródłem emisji CO<sub>2</sub> mniejszej o około 25% niż w obecnych kociach węglowych. Najprawdopodobniej w dającej się przewidzieć przyszłości ceny gazu ziemnego będą wciąż wyższe od kosztów wytwarzania UCC w przeliczeniu na jednostkę wartości opałowej nośnika. Przy cenie 3,0–3,5 USD/GJ nowe paliwo węglowe jest znacznie tańsze od ceny gazu oscylującej wokół 5 USD/GJ, a także oleju opałowego 4–6,5 USD/GJ. Zapewne ceny UCC będą także mniej podatne na wahania od paliw węglowodorowych z uwagi na znacznie bogatsze światowe zasoby węgla.

Dla ludzkości zagrożonej brakiem dostępu do taniej i czystej energii wprowadzenie węgla do turbin dotychczas zarezerwowanych wyłącznie dla gazu oznacza więc kolejną opcję jego wydajnej i ekologicznej utylizacji.

Oprac. P. Olszowiec  
na podstawie materiałów firmowych