



Tadeusz CZASZEJKO

Monash University, Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Melbourne, Australia

Nowe wymagania dla badań kwalifikacyjnych i badań typu kabli energetycznych wysokiego napięcia

Streszczenie. Próba kwalifikacyjna i próba typu kabli wysokiego napięcia to dwa rodzaje długotrwałych badań przeprowadzanych dla wykazania niezawodności konstrukcji niesprawdzonych jeszcze w warunkach eksploatacyjnych. Ich długotrwałość i koszt zniechęca często wytwórców do wprowadzania udoskonaleń. Zaistniała więc potrzeba rewizji obowiązujących norm międzynarodowych pod kątem możliwości skrócenia czasu trwania tych prób i racjonalizowania konieczności ich powtórki. Zagadnieniem tym zajęła się w CIGRÉ grupa robocza WG B1-06.

Abstract. (New requirements for prequalification and type testing of high voltage cables). Prequalification tests and type tests are long-term tests whose purpose is to verify reliability of high voltage cables in situations when their satisfactory performance is not yet proven by service history. The duration and associated costs of these tests are seen by cable makers as disincentive to introducing improvements. Therefore, there was a need for revising current international standards from the point of view of possible shortening of recommended tests and rationalising the need for their repetition. This task was undertaken by the CIGRÉ Working Group WG B1-06.

Słowa kluczowe: kable elektroenergetyczne, izolacja wytłaczana, próba kwalifikacyjna, próba typu.

Keywords: power cables, extruded insulation, prequalification test, type test.

Wstęp

Stały wzrost zapotrzebowania na energię elektryczną powoduje, że równocześnie rosną też wymagania na parametry eksploatacyjne kabli energetycznych. Podnosi się stale napięcie pracy nowych konstrukcji kabli z izolacją z wytłaczanego polietylenu sieciowanego (XLPE). Coraz większa moc przepustowa powoduje wzrost strategicznego znaczenia nowo budowanych połączeń kablowych. W tym kontekście, bardzo ważną staje się sprawa zapewnienia niezawodności operacyjnej zainstalowanych systemów kablowych, zwłaszcza tych na najwyższe napięcia. Oprócz samego kabla, na system taki składa się jeszcze osprzęt, jak głowice i mufy kablowe. Na niezawodność kabla ma wpływ jego konstrukcja, dobrana stosownie do przewidywanych warunków pracy, oraz jakość produkcji, głównie jakość izolacji. Instalacja samego kabla, jeśli przeprowadzona prawidłowo, nie ma na ogół decydującego wpływu na jego późniejsze zachowanie w warunkach eksploatacyjnych. Zapewnienie zaś jego niezawodności we współpracy z osprzętem jest nieco bardziej złożone. Oprócz jakości samej konstrukcji i materiałów, bardzo ważna jest jeszcze poprawność instalacji. Wszystkie te czynniki na raz, czyli jakość wszystkich części składowych systemu kablowego, jak też jakość ich instalacji, mogą być sprawdzone tylko za pomocą odpowiednich badań. Istnieje więc potrzeba na normy określające metody badań, i ich wymagania, przed dopuszczeniem systemu kablowego do eksploatacji. Takimi próbami dopuszczającymi są dwa rodzaje badań długoterminowych: badania kwalifikacyjne, po angielsku „prequalification test”, i badania typu, „type test”, zawarte w odpowiednich normach międzynarodowych. W wypadku kabli na najwyższe napięcia (EHV) z izolacją wytłaczaną, taką normą jest IEC62067, dotycząca kabli na napięcia od 150 kV ($U_m = 170$ kV) do 500 kV ($U_m = 550$ kV) i obowiązująca od października 2001 roku. Norma IEC60840 obowiązuje dłużej, bo od 1988 (początkowo jako IEC 840) i dotyczy kabli na wysokie napięcia (HV) od 30 kV ($U_m = 36$ kV) do 150 kV ($U_m = 170$ kV).

Od momentu wprowadzenia, normy te zostały przyjęte do użytku niemal powszechnie na całym świecie. Odpowiedniki Polskich Norm również się na nich opierają. W obu powyższych normach IEC zawarte są wymagania

badania typu (T), podczas gdy IEC62067 dodaje jeszcze wymagania badań kwalifikacyjnych (PQ). Czas potrzebny do wykonania takich badań jest znaczący, bo liczy się na tygodnie w wypadku próby typu i jest bliski roku w wypadku próby kwalifikacyjnej. Koszt ich przeprowadzenia jest także niebagatelny. Oba te czynniki powodują niechęć u wytwórców kabli i osprzętu do częstego wprowadzania udoskonaleń, bo pociąga to za sobą konieczność ponownych badań długoterminowych. Powstała opinia, że sytuacja taka hamuje do pewnego stopnia postęp technologiczny w przemyśle kablowym i kłóci się z potrzebą sprostania rosnącym wymaganiom eksploatacyjnym. W związku z tym, zaistniała konieczność ponownego spojrzenia na wymagania norm w stosunku do tych dwu badań. W tym celu Komitet Studiów B1 powołał w CIGRÉ Grupę Roboczą WG B1-06. Referat ten opisuje genezę i obecny postęp prac Grupy Roboczej.

Tło historyczne

Od czasu wprowadzenia do produkcji w latach sześćdziesiątych kabli wysokiego napięcia z wytłaczaną izolacją polietylenową następuje w tej dziedzinie ciągły postęp technologiczny. Ze skromnych początków, czasem nieudanych, zastosowania wytłaczanego polietylenu w kablach średniego napięcia, 6,6-11 kV, poprzez pierwsze instalacje wysokonapięciowe do 150 kV w Europie i Japonii w latach 70-tych, doszliśmy obecnie do użytkowania systemów kablowych z izolacją polietylenową na napięcia pracy nawet powyżej 500 kV.

Instalacje na najwyższe napięcia (EHV) stają się coraz bardziej powszechne i coraz więcej wytwórców jest w stanie produkować tego rodzaju kable. Oznacza to, że nieustannie wprowadza się na rynek nowe konstrukcje kabli i osprzętu przy równoczesnym niedostatku danych jak sprawdzają się one długoterminowo w warunkach eksploatacyjnych. Wytwórcy zawsze prowadzili na nowych wyrobach swoje własne badania długotrwałe i oferowali ich wyniki potencjalnym klientom. W krajach wiodących w tej dziedzinie, takich jak Francja czy Japonia, długotrwałe próby dopuszczające znormalizowane były na długo przed wprowadzeniem norm międzynarodowych IEC. Poszczególne normy krajowe były jednak bardzo niejednolite. Na przykład, we Francji poddawano kable próbie 250 cykli

termicznych w ciągu 6000 godzin pod napięciem $1,73U_0$, podczas gdy w Japonii stosowano półroczną próbę pod napięciem $K_I \cdot 1,72U_0$ ($K_I = 1,32$ lub $1,41$) z 24-godzinny cykl termiczny (minimum 8 godzin w temperaturze 90°C lub 105°C). W Belgii natomiast stosowano 100 cykli termicznych pod napięciem $2U_0$. W dobie szerokiej międzynarodowej wymiany handlowej i powiększania się grona wytwórców w różnych stronach świata zaistniała potrzeba ujednoczenia norm dla badań długotrwałych. Tak doszło do powstania obecnych standardów IEC60840 [1] i IEC62067 [2].



Fot. 1: Próba typu kabla 132 kV, 1600 mm² Cu - pętla gotowa do pomiaru poziomu wyładowań niepełnych w Olex Australia.

Pierwszą wprowadzoną normą międzynarodową była norma IEC840, przemianowana później na IEC60840, która oprócz badań rutynowych wprowadziła konieczność badania typu dla kabli na napięcia w kategorii HV, to jest od 30 kV do 150 kV. W roku 1999 opublikowane zostało wydanie drugie tej normy, w którym wprowadzono wymaganie próby typu również dla osprzętu kablowego. Kolejne wydanie, to jest trzecie - opublikowane w roku 2004, dodaje jeszcze konieczność badania typu dla kompletnego systemu kablowego, w odróżnieniu od wymaganych wcześniej osobnych badań poszczególnych podzespołów.

W tym samym mniej więcej czasie, grupa robocza WG 21-03 pracowała pod auspicjami CIGRE nad zaleceniami dotyczącymi badań kwalifikacyjnych, typu i rutynowych dla kabli na najwyższe napięcia (EHV) o zakresie od 150 kV do 400 kV. Zalecenia te opublikowane były wprawdzie w grudniu 1993 [3,4]. Potem rozszerzono zakres napięć do 500 kV [5,6]. Następstwem tych prac grupy roboczej WG21-06 było powstanie pierwszego wydania normy IEC62067 opublikowanego w grudniu 2001 [2].

Wymagania obecnych norm IEC

Według obecnych norm, wymaganie próby typu dotyczy kabli w obu kategoriach napięciowych, HV i EHV. Celem tej próby, według IEC60840 §12, jest demonstracja poprawnej pracy całego systemu kablowego. Zakres wymaganych badań jest w obu kategoriach napięciowych bardzo podobny. Głównym punktem próby typu jest próba napięciowa z cyklicznym grzaniem (*heating cycle voltage test*) połączona z badaniem wytrzymałości impulsowej i poziomu wyładowań niepełnych. Minimalny czas cyklu

nagrzewania wynosi 24 godziny i wymaga się najmniej 20 cykli przy ciągle przyłożonym napięciu równym $2 \cdot U_0$. Jeżeli system kablowy o danym przekroju żyły, napięciu znamionowym i rodzaju konstrukcji przeszedł próbę typu, to próba ta jest również ważna dla systemów o innych przekrojach żyły, napięciach znamionowych i konstrukcji pod warunkiem, że (IEC68040, §12.1 i IEC62067, §12.2):

- grupa napięciowa nie jest wyższa od tej, dla której zostało przeprowadzone badanie;
- przekrój żyły jest nie większy od testowanego;
- kabel i osprzęt mają ten sam rodzaj konstrukcji co testowany system;
- obliczone natężenie pola elektrycznego na powierzchni wewnętrznej i zewnętrznej izolacji kabla, w głównej izolacji osprzętu i na jej krańcach są nie większe niż ich odpowiedniki w badanym już raz kablu i osprzęcie.

Konieczność prób kwalifikacyjnych dotyczy obecnie tylko kabli na najwyższe napięcia (EHV). Według IEC62067 §3.2.4., próba kwalifikacyjna to próba przeprowadzona przed dostarczeniem na rynek systemu kablowego nowego typu w celu zademonstrowania, że zapewniona jest niezawodna *długotrwała* praca takiego systemu. Badanie kwalifikacyjne przeprowadzane jest jednokrotnie, chyba, że nastąpiła poważna zmiana w elementach systemu w związku z wprowadzeniem nowego materiału, procesu produkcyjnego czy w związku ze zmianą rodzaju konstrukcji. Według IEC62067 §13.1, jeżeli wytwórca kabli przeprowadził próbę kwalifikacyjną na danym systemie kablowym, to wytwórca ten kwalifikuje się jako dostawca systemów kablowych o tym samym lub niższym napięciu znamionowym tak długo, jak natężenie pola elektrycznego obliczone na zewnętrznej powierzchni izolacji jest równe lub niższe od tego jakie istniało w zatwierdzonym już raz systemie.

Podobnie jak w próbie typu, głównym celem próby kwalifikacyjnej jest sprawdzenie napięciowej wytrzymałości impulsowej i poziomu wyładowań niepełnych po napięciowej próbie z grzaniem cyklicznym. Tym razem, norma wymaga najmniej 180 cykli termicznych przy napięciu równym $1,7 \cdot U_0$ przyłożonym na okres nie krótszy niż 8760 godzin. W tym czasie nie powinno nastąpić przebicie izolacji w żadnym z badanych elementów systemu.

Konieczność prób kwalifikacyjnych

Podstawowym zadaniem grupy roboczej WG B1-06 było rozpatrzenie procesu postępowania w wypadku wprowadzenia zmian konstrukcyjnych w uprzednio zakwalifikowanym systemie kablowym. Grupa robocza miała odpowiedzieć, w jakich wypadkach możliwe jest zaaprobowanie modyfikacji bez konieczności przeprowadzania pełnych prób długoterminowych. W poszukiwaniu odpowiedzi, w pierwszej kolejności należało przyjrzeć się bliżej obecnym próbom tego rodzaju, to jest próbom typu i kwalifikacyjnej. Próba kwalifikacyjna, jako najdłuższa i najbardziej kosztowna, otrzymała w sposób naturalny najwięcej uwagi. Zadano sobie przy tym następujące, bardziej podstawowe pytania:

- Czy przeprowadzanie prób kwalifikacyjnych, (PQ tests) jest wciąż konieczne;
- Czy do wymagań normy IEC60840, to jest w kategorii napięciowej HV, należy dodać próbę kwalifikacyjną, taką jak w IEC62067;

By odpowiedzieć sobie na pierwsze zagadnienie, należy w pierwszej kolejności podsumować cele prób kwalifikacyjnych. Najważniejszym ich zadaniem jest przetestowanie niezawodności nowo zaprojektowanego systemu kablowego w warunkach zbliżonych do normalnych warunków

eksploatacyjnych. Procedura testów jest taka, że nie tylko starzenie izolacji przy cyklicznych zmianach temperatury, ale też umiejętność montażu akcesoriów i kabla poza laboratorium mają wpływ na wynik. Ci wytwórcy kabli, których wyroby przeszły przez podobne próby mieli możliwość nauczyć się z nich wiele, zwłaszcza przez rozwiązywanie powstałych w czasie prób problemów. Wiedza ta nie jest jednak szeroko rozpowszechniana i na ogół, wytwórcy zachowują ją na swój własny użytek. Doświadczenia laboratoriów badawczych zajmujących się próbami długotrwałymi wskazują na to, że akcesoria, a także czasem i kable, wciąż stwarzają problemy podczas prób kwalifikacyjnych. Wydaje się więc, że stan technologii izolacji z polietylenu sieciowanego (XLPE) ciągle nie dorósł jeszcze do takiego poziomu by kompetencje wszystkich wytwórców uznać z góry za wystarczające i nie wymagać na nie dodatkowego dowodu. W związku z tym, grupa robocza uważała, że przedwcześnie jest jeszcze rozważać całkowite zaniechanie w normach wymagania próby kwalifikacyjnej.



Fot. 2: Próba typu kabla 132 kV, 1600 mm² Cu - pętla główna i kontrolna podczas próby nagrzewania cyklicznego, Olex Australia.

Próba kwalifikacyjna dla systemów kablowych w kategorii napięciowej HV, 36-170 kV, nie jest obecnie wymagana przez normy międzynarodowe. Wieloletnie doświadczenia eksploatacyjne, trwające 25 lat i więcej, z tego typu kablami nie wskazują na większe problemy z ich niezawodnością. Skąd więc potrzeba ewentualnej zmiany? Bardziej technologicznie zaawansowani wytwórcy próbują wprowadzać do produkcji kable o pocienionej izolacji, a więc o zwiększonym stresie, tak zwane „*slim design*”. *Slim design* ma kilka ważnych zalet. Z punktu widzenia instalacji, zwiększa upakowanie kabla na jednej szpul, a więc obniża ilość potrzebnych muf przy danej długości linii. Pozwala też na zainstalowanie kabli o większej obciążalności prądowej w ograniczonej przestrzeni, jak w przepustach. Pocieniona izolacja poprawia równocześnie sprawność termiczną kabla. By to wszystko osiągnąć, natężenia pola elektrycznego w pocienionym kablu zbliżają się do poziomów takich, jakie są spotykane w kablach należących do kategorii napięciowej EHV, a więc podlegających normie IEC62067, w której to normie przewidziana jest próba kwalifikacyjna. Mowa tu nie tylko o poziomie roboczym natężenia pola elektrycznego. Chodzi zwłaszcza o natężenia pola, jakie występują w czasie prób napięciem udarowym. Istnieje więc argument podobny do tego, jaki był użyty w wypadku kabli EHV, to jest, że niezawodność systemów HV z pocienioną izolacją nie jest jeszcze wystarczająco sprawdzona w warunkach eksploatacyjnych. Z tego to powodu grupa robocza WG B1-06 zaleca, żeby wprowadzić w IEC60840 dodatkowe wymaganie na próbę kwalifikacyjną. Próbie tej miałyby podlegać te systemy

kablowe, w których obliczeniowe natężenie pola elektrycznego przekracza wielkość 4 kV/mm na powierzchni zewnętrznej izolacji lub 8 kV/mm na powierzchni żyły. Procedura próby ma być taka sama jak w normie IEC62067 to znaczy, że badać należy cały system, a nie tylko pojedyncze podzespoły, stosować 180 cykli termicznych pod napięciem $1,73U_0$ oraz zakończyć badania napięciową próbą impulsową i badaniem poziomu wyładowań niezupełnych.

Proponowane zmiany

Skoro potwierdzono konieczność zachowania próby kwalifikacyjnej w kategorii napięciowej EHV, i dodano jej wymagania do kategorii napięciowej HV, to należało rozważyć, czy istnieje konieczność uaktualnienia obecnie obowiązujących norm. Celem tych uaktualnień miałyby być, w miarę możliwości, usprawnienie prób, ale także wyjaśnienie dotychczasowych nieścisłości. Zwrócono głównie uwagę na takie sprawy jak:

- czy czas trwania próby kwalifikacyjnej może być skrócony;
- proces postępowania, jeżeli nastąpi uszkodzenie jakiejś części podczas trwania próby długotrwałej;
- czy konieczne jest przeprowadzanie końcowej napięciowej próby wytrzymałości impulsowej po próbie długotrwałej PQ;
- jaki zakres zmian konstrukcyjnych kabla i osprzętu powoduje konieczność ponownego przeprowadzenia próby typu, lub nawet próby kwalifikacyjnej;

Rozważając możliwość skrócenia próby kwalifikacyjnej, kluczowym zagadnieniem jest stwierdzić, czy może się to odbyć bez obniżenia wartości próby jako testu na niezawodność. Doświadczenia z wielu przeprowadzonych dotąd badań PQ pokazują, że nie da się ustalić dokładnego momentu, po którym prawdopodobieństwo przebicia izolacji można uznać za niewielkie. Badane kable, a częściej akcesoria, mogą ulec awarii w każdej chwili z równym prawdopodobieństwem w czasie rocznej próby. Podobnie, w wypadkach kiedy w czasie trwania próby kwalifikacyjnej sprawdzano regularnie poziom wyładowań niezupełnych, zanotowano możliwość nagłego ich wzrostu w każdym momencie, niezależnie od czasu jaki upłynął. Oznacza to, że współczynnik awaryjności jest wielkością w przybliżeniu stałą. Z drugiej strony wiadomo też, że niektóre z tych systemów kablowych, pomimo przetrwania próby typu (to jest 20 cykli termicznych), nie były w stanie wytrzymać warunków próby kwalifikacyjnej (180 takich cykli). A więc nie da się zastąpić próby kwalifikacyjnej próbą typu. Nie widać też, jak dotąd, innych danych wskazujących na możliwość zredukowania ilości cykli termicznych bez równoczesnego ryzyka obniżenia rygoru próby. Można natomiast rozważyć możliwość skrócenia czasu próby napięciowej. Wiadomo jest, że największym narażeniem w czasie próby kwalifikacyjnej są naprężenia termiczne w izolacji i żył kabla wywołane cykliczną zmianą temperatury. Naprężenia te powodują powstawanie szczelin w izolacji na granicy z osprzętem i to jest najczęstszą przyczyną awarii w czasie prób. Starzenie izolacji pod wpływem napięcia nie jest czynnikiem decydującym. Z tego powodu grupa robocza uważała, że całkowity czas trwania próby kwalifikacyjnej można skrócić z 8760 godzin do takiego czasu, jaki jest niezbędny do wykonania 180 cykli termicznych. Najkrótszy zalecany czas trwania jednego cyklu to 24 godziny (8 godzin na nagrzewanie + 16 godzin na chłodzenie), a więc czas trwania całej próby może być zmniejszony do 4320 godzin. Oszczędność ze skrócenia całkowitego czasu próby polega nie tyle na zmniejszeniu kosztu bezpośredniego wykonania samej próby, co na

znacznym skróceniu czasu potrzebnego do dopuszczenia nowego wyrobu na rynek.

Kolejnym zagadnieniem, które wymagało rozwiązania jest brak w obecnych normach zaleceń postępowania w wypadku, gdy nastąpi uszkodzenie jednego z elementów osprzętu przed ukończeniem czasu trwania próby. Nie jest to problem, do którego łatwo jest znaleźć ujednolicone rozwiązanie. Wiele zależy od tego, w którym momencie trwania próby nastąpi uszkodzenie. Jeżeli nastąpi ono na początku, to strata czasowa jest niewielka i można uszkodzony element, taki jak mufa, naprawić lub wymienić, po czym rozpocząć próbę ponownie. Jeżeli uszkodzenie nastąpi pod koniec trwania próby, to uszkodzoną część można wówczas naprawić lub wymienić w celu dokończenia próby na pozostałych elementach. Uszkodzona część musi jednak potem przejść osobną, pełną próbę kwalifikacyjną by być zatwierdzona jako składnik przebadanego systemu. W wypadku uszkodzenia osprzętu w mniej więcej połowie czasu trwania testu, postępowanie powinno być podobne, to znaczy można kontynuować próbę po dokonaniu naprawy. Istnieje tylko kwestia jak postąpić z badaniem wytrzymałości impulsowej, wymaganym na koniec próby kwalifikacyjnej. Jeżeli istnieje taka możliwość, to można przeprowadzić próbę impulsową po ukończeniu początkowo wymaganego czasu starzenia. W ten sposób ukończy się próbę nieuszkodzonych elementów systemu i przynajmniej te elementy mogą być zatwierdzone do eksploatacji. Kontynuowany jest wówczas test wymienionej, czy naprawionej wcześniej części, do momentu aż przejdzie ona wymaganą ilość cykli termicznych oraz końcową próbę impulsową. Trzeba jednak zaznaczyć, że opcja taka nie jest możliwa do wykonania w wypadku, gdy próby impulsowej nie da się przeprowadzić na całkowitej długości badanej pętli. W związku z tymi i podobnymi trudnościami, zaleca się żeby wytwórcy kabli zawarli ze swoimi klientami szczegółowe porozumienie na temat jak postępować w takich sytuacjach. Napięte terminy inwestycyjne często nie pozwalają oczekiwać z budową linii na całkowite zakończenie przeciągających się prób.

Pytanie o potrzebę przeprowadzania próby wytrzymałości impulsowej na koniec testu kwalifikacyjnego powstało na tle takim, że według zaleceń normy próba impulsowa przeprowadzana jest na jednym, lub więcej, odcinku kabla wyciętym z pętli głównej. Oznacza to praktycznie, że osprzęt poddany próbie długotrwałej nie jest i tak na koniec sprawdzany napięciem udarowym. Sytuacja ta stoi w sprzeczności z celem badań kwalifikacyjnych, jakim jest sprawdzenie niezawodności całego systemu, a nie tylko kabla. Z tego powodu, grupa robocza zaleca zmianę w normie IEC62067 tak, żeby wymagana była próba wytrzymałości impulsowej na całej pętli, a nie tylko na odcinku kabla wyciętym z tej pętli. Próbę na odcinku wciąż można dopuścić, ale tylko w warunkach, gdy test na całej pętli nie jest możliwy do wykonania ze względów technicznych. Sytuacja taka może wystąpić, gdy pętla kablowa poddana próbie kwalifikacyjnej zainstalowana jest z dala od generatora udarowego.

Najbardziej złożonym zadaniem w pracach grupy roboczej było ustalenie zaleceń, jaki zakres zmian konstrukcyjnych w kablach i osprzęcie jest dozwolony w ramach zatwierdzonej już próby typu, lub próby kwalifikacyjnej, a jakie zmiany powodują potrzebę powtórzenia takiej próby. Możliwe rodzaje modyfikacji zaliczyć można do dwóch kategorii, takich jak zmiana podstawowych wymiarów kabla czy osprzętu oraz zmiana materiałów czy technologii użytych do ich produkcji. Na przykład, wytwórca ma zatwierdzoną próbami i wprowadzoną do produkcji konstrukcję kabla 220 kV z żyłą miedzianą segmentową o przekroju 1500 mm², otrzymał natomiast zamówienie na kabel na to samo napięcie

i obciążalność prądową, z tym, że żyła ma być wykonana ze skręcanych drutów aluminiowych. Mamy tu do czynienia z dwójką modyfikacją: ze zmianą materiału żyły kabla oraz ze zwiększeniem średnicy wewnętrznej izolacji (ze względu na konieczną zmianę przekroju żyły). W związku z tym powstaje pytanie, czy należy powtórzyć próbę kwalifikacyjną i próbę typu dla tej nowej konstrukcji kabla, czy też poprzednio przeprowadzone próby kwalifikacyjne i typu są dalej ważne mimo wprowadzonych zmian.

Obie obecnie obowiązujące normy IEC podają dozwolony zakres zmian wymiarów izolacji, w ramach którego to zakresu próba typu jest dalej ważna. Zakres ten znany jest pod angielską nazwą „Range of type approval” (IEC60840, §12.1 i IEC62067, §12.2). Poszerzenie granic dopuszczalnych zmian wymiarowych ułatwiłoby niewątpliwie proces akceptacji nowych konstrukcji. Granice te wytyczone są głównie wielkością zmiany natężenia pola elektrycznego na zewnętrznej i wewnętrznej powierzchni izolacji kabla i w osprzęcie na granicy z izolacją kabla. W ramach prac grupy roboczej przeprowadzono w związku z tym analizę wpływu zmian wymiarów izolacji kabla na napięcie zapłonu wyładowań niezupełnych w szczelinach. Rozpatrzono dwa najważniejsze praktycznie przypadki szczelin: sferyczna wtrącina gazowa przy powierzchni wewnętrznej izolacji i płaska szczelina na powierzchni zewnętrznej izolacji. Sferyczna wtrącina gazowa odpowiada w tym wypadku defektowi powstałemu w kablu w czasie produkcji, podczas gdy płaska szczelina na powierzchni zewnętrznej odpowiada defektowi powstałemu przy montażu osprzętu. Wzięto przy tej analizie pod uwagę dwa rodzaje zmian konstrukcyjnych: zmniejszenie grubości izolacji („slim design”) przy niezmiennym rozmiarze żyły oraz powiększenie rozmiaru żyły bez zmiany grubości izolacji. W ten sposób, biorąc pod uwagę zmianę natężenia pola elektrycznego w defektach pod wpływem tych zmian wymiarowych oraz zależności wynikające z krzywej Paschena, obliczono największy dopuszczalny rozmiar defektu wolnego od wyładowań. Z obliczeń tych wynikało, że poszerzenie obecnie dozwolonych granic zmian wymiarowych izolacji doprowadziłoby do nieosiągalnych praktycznie ograniczeń w dopuszczalnych wymiarach wtrącin i szczelin. Na przykład, zmniejszanie grubości izolacji o 5% wymagałoby ograniczenia dopuszczalnego rozmiaru szczeliny płaskiej o 21%. Inaczej mówiąc, przy danej jakości montażu osprzętu nastąpiłby 21% wzrost prawdopodobieństwa powstania wyładowań niezupełnych. Takie ryzyko jest zdaniem grupy roboczej niedopuszczalne i dlatego nie zalecono poszerzenia zakresu dozwolonych zmian wymiarowych.

Zmiany wymiarowe dotyczą w zasadzie tylko modyfikacji grubości lub średnicy wewnętrznej izolacji i ich wpływ daje się stosunkowo łatwo zanalizować obliczeniami teoretycznymi. Natomiast analiza zmian materiałowych nie poddaje się najczęściej tak łatwo obróbce obliczeniowej. Ponadto, ilość potencjalnych modyfikacji tego typu jest wielokrotnie większa, bo może dotyczyć nie tylko zmian rodzaju materiałów żyły głównej i powrotnej, izolacji, ekranów półprzewodzących, żakietu zewnętrznego itd., ale także, na przykład, zmiany takiej jak zastąpienie na linii produkcyjnej starej wtryskarki wytłaczającej izolację na nową. Wpływ tego typu zmian na działanie systemu kablowego i określenie ich dopuszczalnego zakresu nie da się określić numerycznie. Dlatego, zamiast analizy obliczeniowej przeprowadzono dokładną analizę funkcji spełnianych przez możliwe wszystkie elementy kabli, i osprzętu, oraz określono rodzaj zagrożenia dla bezawaryjnej pracy w razie nie spełnienia danej funkcji. Sporządzono w ten sposób tabele zawierające dziesiątki pozycji ujmujących wszelkie funkcje elementów zarówno kabli jak też osprzętu oraz wskazujące, które próby

przewidziane przez normy należy przeprowadzić dla sprawdzenia czy dana funkcja jest spełniona. By podać prosty przykład, tabele podają, iż jedną z cech izolacji jest jej odporność na zginanie, a jej funkcją jest zdolność wytrzymania przyłożonego napięcia. Sprawdzanie wytrzymałości na zginanie jest częścią próby typu. Zgodnie z IEC60840, §12.3, lub IEC62067, §12.4, kabel poddaje się w tym celu wstępnie próbie zginania (sprawdzenie cechy), po czym mierzy się poziom wyładowań niezupełnych przy odpowiednim napięciu (sprawdzenie funkcji), oraz na koniec, przeprowadza się oględziny zewnętrzne.

Przeprowadzając tak szczegółową analizę funkcjonalną zidentyfikowano również potrzebę wprowadzenia do norm szeregu nowych prób, w sumie dwudziestu sześciu, dotąd w nich nie ujętych. Większość z tych nowych prób proponuje się przeprowadzać jako część badań doświadczalnych, pozostałe zaś jako próby kontroli jakości. Na przykład, stwierdzono potrzebę wprowadzenia próby zwarciowej, jako jednego z badań doświadczalnych. Próba zwarciowa ma sprawdzić, między innymi, czy nie nastąpi przekroczenie dopuszczalnej temperatury izolacji kabla podczas zwarcia, albo czy nie wystąpi przegrzanie połączeń metalicznych przewodów w mufach czy głowicach. Innym przykładem nowej próby może być zaproponowane badanie zawartości wilgoci w wytłaczanych ekranach zewnętrznych i wewnętrznych. Ma się to badanie przeprowadzać w ramach próby kontroli jakości, żądanej często przez odbiorców, a jak dotąd, nie ujętej w normach.

Analiza funkcjonalna stanowić ma pierwszy krok procedury ustalającej, czy konieczne jest powtórzenie prób długotrwałych na całym systemie kablowym. Na podstawie tej analizy określić można, czy w wyniku wprowadzonej modyfikacji nie nastąpiło zwiększenie ryzyka awarii systemu. Jeżeli stwierdzi się możliwość wzrostu ryzyka, to należy ocenić jego stopień, jako ryzyko małe lub duże. Jeżeli ryzyko jest ocenione jako duże, to należy powtórzyć próbę kwalifikacyjną i próbę typu. Jeżeli ryzyko jest małe, to trzeba rozważyć, czy próba typu jest wystarczająca do jego wyeliminowania. Jeżeli tak, to należy przeprowadzić próbę typu. Jeżeli nie, to trzeba powtórzyć odpowiedni zakres badań doświadczalnych by wykazać, że nie ma zwiększenia ryzyka i poprzeć to pełną próbą typu. Grupa robocza opracowała cały system tego rodzaju postępowania i dla jasności, zilustrowała go praktycznym przykładem.

Wymienione powyżej procedury postępowania oparte na analizie funkcjonalnej pomagać mają w powzięciu decyzji o tym, jakiego rodzaju testom należy poddać system kablowy w wypadku poważniejszych modyfikacji zwłaszcza, jeśli spowodowały one zmianę konstrukcji kilku składników systemu. Na przykład, wymieniona poprzednio zmiana rodzaju materiału i typu konstrukcji żyły kabla pociągnie za sobą najprawdopodobniej konieczność zastosowania innego rodzaju mufy i głowicy. W takim wypadku, zaistnieje najpewniej potrzeba powtórzenia badania typu, a może nawet badania kwalifikacyjnego. Co natomiast zrobić, jeżeli chcemy wprowadzić ulepszoną konstrukcję głowicy do zakwalifikowanego i dobrze sprawdzonego w warunkach eksploatacyjnych systemu kablowego? Według obecnie obowiązujących norm, należałoby powtórzyć badanie kwalifikacyjne, które normalnie trwa około roku. Taka perspektywa nie jest z pewnością zachętą do częstego wprowadzania modernizacji. Dlatego grupa robocza rozważyła możliwość, i zaproponowała wprowadzenie, nowego rodzaju badania skróconego nazwanego badaniem rekwalifikacyjnym (*requalification test*). Argument przemawiający za możliwością skrócenia czasu próby w tym wypadku jest podobny do tego, jaki zastosowano

uzasadniając proponowane skrócenie czasu próby kwalifikacyjnej. Wiadomo, że najgroźniejszym efektem wpływającym na końcowy wynik badania jest kurczenie się izolacji pod wpływem cyklicznych zmian temperatury, a nie starzenie napięciowe. Dlatego próba rekwalifikacyjna składać się ma z dwóch części. Na początek, badany zespół kablowy poddać należy sześćdziesięciu cyklom nagrzewania bez przyłożonego napięcia. Potem, żeby wykazać, że cykliczna zmiana temperatury nie wpłynęła szkodliwie na integralność układu izolacyjnego, przeprowadzić należy próby elektryczne, takie jak zalecane w próbie typu. To znaczy, należy poddać badany zespół próbie napięciem udarowym oraz pomiarowi poziomu wyładowań niezupełnych.

Podsumowanie

Prace grupy roboczej WG B1-06 potwierdzają, że badania kwalifikacyjne i badania typu są wciąż niezbędnym elementem w procesie wprowadzania do eksploatacji niezawodnych, nowych konstrukcji elektroenergetycznych systemów kablowych wysokiego napięcia. Ponieważ są to badania czasochłonne i kosztowne, gdzie to możliwe, proponuje się skrócenie czasu trwania prób. Postuluje się też bardziej zrjonalizowane podejście do wymaganych badań w wypadku modyfikacji konstrukcyjnych wprowadzonych do uprzednio przetestowanych kompletnych systemów, czy też ich elementów. W tym celu grupa robocza wnioskuje wprowadzenie nowego rodzaju badania, to jest badania rekwalifikacyjnego. Opracowano też cały system analizy funkcjonalnej, którego celem ma być pomoc w podejmowaniu decyzji o tym, jakiego rodzaju badania są konieczne w wypadku konkretnych zmian konstrukcyjnych wprowadzonych zarówno w kablu jak też w akcesoriach. Zaproponowano też wprowadzenie próby kwalifikacyjnej jako nowego wymagania w ramach normy IEC60840. Wszystkie te postulaty przedłożone zostały w końcu czerwca 2005 do zatwierdzenia w CIGRÉ przez Komitet Studiów B1. Jak zwykle w takich wypadkach, można przewidywać, że przynajmniej część z tych zaleceń trafi do nowych wydań odpowiednich norm IEC.

LITERATURA

- [1] IEC 60840, Ed1 1998, Tests for Power Cables with Extruded Insulation of Rated Voltages above 30 kV (U = 36 kV) up to 150 kV (U = 170 kV)
- [2] IEC 60840, Ed3, 2004-04, Power Cables with extruded insulation and their accessories for rated voltages above 30 kV (U = 36 kV) up to 150 kV (U = 170 kV) – Test methods and requirements
- [3] CIGRÉ Working Group 21.03, Recommendations for electrical tests type, sample and routine, on extruded cables and accessories at voltages >150 (170) kV and 400 (420) kV, *Electra*, 151 (1993).
- [4] CIGRÉ Working Group 21.03, Recommendations for electrical tests prequalification and development on extruded cables and accessories at voltages > 150 (170) kV and 400 (420) kV, *Electra*, 151 (1993).
- [5] CIGRÉ Working Group 21.03, Recommendations for electrical tests (type, special and routine) on extruded cables and accessories at voltages > 150 (170) kV and 500 (525) kV, CIGRÉ Study Committee 21, Doc 97.08 (1997).
- [6] CIGRÉ Working Group 21.03, Recommendations for electrical tests prequalification and development on extruded cables and accessories at voltages > 150 (170)kV and 500 (525) kV, CIGRÉ Study Committee 21, Doc 97.07 (1997).

Autor: dr Tadeusz Czaszejko, Department of Electrical and Computer Systems Engineering, Building 35, Monash University, VIC 3800, Australia, E-mail: t.czaszejko@eng.monash.edu.au