

Romuald Włodek¹

KIERUNKI ROZWOJOWE W EKSPLOATACJI UKŁADÓW IZOLACYJNYCH WYSOKIEGO NAPIĘCIA

Streszczenie: W referacie przedstawiono przegląd wybranych zagadnień, dotyczących aktualnego stanu problematyki eksploatacji urządzeń elektroenergetycznych. Dotyczą one narażeń eksploatacyjnych, znaczenia nowych konstrukcji i technologii oraz służących im badań materiałów, zagadnień utrzymania ruchu i diagnostyki wysokonapięciowej.

Słowa kluczowe: urządzenia elektroenergetyczne wysokiego napięcia, narażenia eksploatacyjne, awaryjność, diagnostyka wysokonapięciowa, materiały dielektryczne.

Referat wprowadzający

Otwierając obrady VIII. Sympozjum „Problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia” EUI'01 należy z głębokim żalem zauważyć, że tym razem nie weźmie już w nich udziału ś.p. Profesor dr hab. Jerzy Ranachowski. Zmarły w bieżącym roku Profesor służył w ciągu minionych lat zawsze swoją niezwykle cenną radą i pomocą przy organizacji tej serii Sympozjów, począwszy od pierwszego w 1972 roku w Krościenku. Wyrażając hołd nieobecnemu już dzisiaj Profesorowi Ranachowskiemu za Jego życzliwość i nieoceniony wkład merytoryczny w przygotowaniach i przebiegu poprzednich i również obecnego Sympozjum, poświęcamy Zmarłemu referat, przygotowany przez Jego najbliższych współpracowników i syna.

Eksplatacja układów izolacyjnych wysokiego napięcia jest procesem techniczno-organizacyjnym, w którym obiekty te podlegają działaniu zespołu narażeń wewnętrznych i zewnętrznych o charakterze fizycznym oraz działaniu zamierzonej ingerencji obsługi. W wyniku tego układy izolacyjne podlegają zmianom swoich właściwości eksploatacyjnych, których znajomość ma istotne znaczenie dla operacyjnej pracy systemu elektroenergetycznego.

Eksplatacja urządzeń elektrycznych jako element pracy systemu elektroenergetycznego powinna poprzez ich wysoką niezawodność zapewniać maksymalne zmniejszenie przerw dostawy energii elektrycznej. Niezawodność urządzeń zależy m.in. w znacznym stopniu od

¹ * Akademia Górniczo-Hutnicza, Zakład Elektroenergetyki, al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków

ich budowy, technologii i stosowanych do budowy materiałów i tematyka ta jest obszernie reprezentowana na obecnym Sympozjum EUI'01.

Ingerencja obsługi jako element procesu eksploatacji sprowadza się z jednej strony do czynności, związanych z prowadzeniem ruchu i pracami montażowymi i remontowymi, z drugiej zaś do różnych procedur, składających się na diagnostykę wysokonapięciową. Obydwie grupy problemów stanowią znaczną część programu Sympozjum.

W zakresie analizy narażeń reprezentowane są zarówno przebiegi pochodzenia atmosferycznego i związane z nimi problemy, jak i przebiegi łączeniowe i ich rola w szczególności w odniesieniu do transformatorów i kabli.

Miniony sezon burzowy w lecie 2001r. zaznaczył się wyjątkowo znaczną liczbą awarii, w tym bardzo poważnych, spowodowanych wylądowaniami atmosferycznymi. Zapewne bogate doświadczenia eksploatacyjne elektroenergetyki w tym zakresie dostarczą dużo materiału do opracowania, w każdym razie fakty te zwróciły uwagę na ważność tematyki ochrony odgromowej urządzeń elektroenergetycznych. Szeroki jest zakres problemów w tej dziedzinie: od teoretycznych problemów mechanizmów wylądowań i ich modelowania, poprzez określanie spodziewanych przebiegów indukowanych, szczególnie niebezpiecznych dla współczesnych systemów elektronicznych, aż po konkretne wskazania odnośnie konstrukcji elementów instalacji ochronnych. Tematyka ma swoją reprezentację na obecnym Sympozjum. Na przykład znaczny rozwój warystorowych ochronników przeciwprzebiegowych z tlenków metali znalazł wyraz w ich zastosowaniu w urządzeniach od niskich do najwyższych napięć, zwiększając perspektywy skuteczności ochrony, przy czym poszerza się również zakres urządzeń, do których mają one zastosowanie. Obserwuje się równocześnie zwiększenie zainteresowania metodami zarówno badań kontrolnych ochronników nie tylko według standardowych sposobów i wymagań, ale również przy użyciu nowych metod. Należą do nich badania wylądowań niezupełnych wewnętrznych, kontrola prądów upływu, monitoring temperatury i inne. W jakim stopniu znajdą one szersze zastosowanie, jest problemem do dalszych rozstrzygnięć. Tematyka ta jest reprezentowana również na obecnym Sympozjum EUI'01 kilkoma referatami.

Na obszerną grupę zagadnień konstrukcyjno-technologicznych składają się referaty dotyczące układów izolacji gazowej, transformatorów, kabli i izolacji linii napowietrznych, w tym specjalne zagadnienia wynikające z instalacji na nich torów telekomunikacyjnych.

Układy izolacyjne gazowe są już normalnym elementem budowy sieci elektroenergetycznych średnich i wysokich napięć. Po pierwotnej ekspansji układów z SF₆ nastąpiła pewna refleksja związana z obawami, wynikającymi z argumentów ochrony środowiska i aczkolwiek o ich zasadności nie można jeszcze wypowiadać się w pełni jednoznacznie, to niewątpliwie trzeba je brać pod uwagę. Fakt ten spowodował zainteresowanie poszukiwaniem rozwiązań kompromisowych, to znaczy zastosowaniem takiego materiału, który łączyłby korzystne charakterystyki izolacyjne SF₆ z brakiem jego wymienionych wad typu ekologicznego. Naturalnymi są do tego celu mieszaniny gazów, przede wszystkim sześciofluorku siarki z innymi gazami, wśród których obserwuje się ostatnio pewien renesans azotu. Problem ten wywołuje potrzebę badań układów izolacyjnych z mieszanin gazów zarówno pod względem klasycznych zagadnień wytrzymałości elektrycznej jak i różnych zagadnień dodatkowych jak współpraca z materiałami stałymi, stosowanymi na odstępniaki izolacyjne, detekcja wylądowań spowodowanych ruchem zanieczyszczeń, analiza produktów rozkładu i t. Tematyka ta znalazła również swoją reprezentację na obecnym Sympozjum EUI'01. Warto zwrócić uwagę przy tym na pojawiające się problemy o charakterze kompleksowym. Na przykład, przewidyując szersze wprowadzanie

diagnostyki kabli XLPE z użyciem niskich częstotliwości, bada się również tą techniką urządzenia GIS, do których mają być takie kable w układach sieciowych przyłączone. Układy izolacyjne gazowe są przy tym źródłem zespołu problemów elektrycznych, mechanicznych i cieplnych, których spełnienie wprowadza potrzebę optymalizowania zagadnień konstrukcyjnych. Problem ten znajduje się również w programie Sympozjum.

Izolacja napowietrzna z kompozytów polimerowych stopniowo znajduje wzrastające zastosowanie, w związku z czym tematyka procesów starzenia takich układów jest stale aktualna i prowadzona w wielu ośrodkach na świecie. Obok obszernych wyników badań eksperymentalnych zaczynają się pojawiać próby formułowania na ich podstawie modeli, opisujących te zjawiska tak, aby stopniowo określać możliwie adekwatne warunki badań. Towarzyszą temu pojawiające się pogłębione badania zjawisk powierzchniowych, uwzględniających skomplikowane procesy adhezji wilgoci i innych czynników w warunkach pola elektrycznego i lokalnych wyładowań, zmierzające do zwiększenia właściwości higrofobowych polimerów stosowanych na izolatory. Tematyka izolacji napowietrznej z polimerów kompozytowych inicjuje też szereg problemów z nią związanych, na przykład zagadnienia wytrzymałości mechanicznej, w tym korozja naprężeniowa rdzeni nośnych tych izolatorów.

Nowe konstrukcje i technologie, wprowadzane w urządzeniach elektroenergetycznych, skłaniają w wielu przypadkach do nowelizacji dotychczasowych modeli i charakterystyk układów izolacyjnych a nieraz do bardziej kompleksowego na nie spojrzenia. Na przykład znaczny w ostatnich latach rozwój technik telekomunikacyjnych w liniach napowietrznych zainicjował potrzebę zbadania różnych aspektów, wynikających z montażu na nich przewodów światłowodowych, które swoją obecnością zmieniają z jednej strony charakterystyki powietrznego układu izolacyjnego, z drugiej zaś same stają się obiektem narażeń elektrycznych. Problematyka ta jest dość wyraźnie i z różnych stron przedstawiana na obecnym Sympozjum EUI'01.

Odnotować należy szereg nowych konstrukcji w asortymencie żył kablowych i różnych typów przewodów linii napowietrznych. Przewody napowietrzne ze stopów aluminiowych o znanych korzystnych właściwościach mechanicznych stwarzają nowe możliwości w zakresie projektowania przeseł linii napowietrznych. Wśród nowości polskiego przemysłu kablowego godne odnotowania jest uruchomienie produkcji kabli do przenośnych linii 110kV, służących elektroenergetyce w warunkach remontowych, budowlanych i in.

Szczególne narażenia, jakie w porównaniu do zwykłych transformatorów, pracujących w systemie elektroenergetycznym występują w eksploatacji transformatorów, zasilających sieć trakcyjną, skłaniają do opracowania zarówno specjalnej dla nich konstrukcji, jak i zastosowania odpowiednich materiałów, odpornych na znaczne przeciążenia cieplne. Temat ten reprezentowany jest na Sympozjum a jego wyniki w dziedzinie propozycji nowych materiałów mogą zapewne być wykorzystane również w innych urządzeniach elektroenergetycznych, o podobnych wymaganiach odnośnie narażeń.

Do najważniejszych operacyjnych warunków utrzymania ruchu systemu elektroenergetycznego należy zagadnienie prac pod napięciem. Organizacja, technika i wyposażenie sprzętowe do tego celu stoją już na bardzo wysokim poziomie i liczne kadry zostały w tym zakresie wyszkolone w kraju w sposób systematyczny. Tematowi temu, otwierającemu grupę zagadnień, dotyczących problemów techniczno-organizacyjnych w eksploatacji, poświęcony jest referat na obecnym Sympozjum.

Stale podnoszona w kraju wysoka awaryjność linii kablowych (referowana m.in. na dwu poprzednich Sympozjach EUI'97 i EUI'99) jest również prezentowana obecnie, przy czym

porównanie jej z odnośną dla linii napowietrznych daje możliwość bardziej syntetycznego spojrzenia i podkreśla jeszcze znaczenie poprawy awaryjności w liniach kablowych.

Diagnostyka urządzeń wysokiego napięcia obejmuje metodykę podejmowania decyzji o aktualnym stanie danego urządzenia pod względem niezawodnego spełniania jego funkcji eksploatacyjnych oraz ewentualnie określania przewidywanego czasu dalszej pracy.

Problematyka ta jest prezentowana na Sympozjum zarówno od strony podstaw metodycznych, jak i szeregu technik badawczych.

Techniki badawcze w diagnostyce, zmierzające do wydobycia informacji różnego rodzaju (elektryczne, chemiczne, fizykalne) o aktualnym stanie układu są pierwszym etapem procedury diagnostycznej. Jej drugim etapem jest sformułowanie wniosku co stanowi w większości przypadków trudność z powodu najczęściej niepełnych informacji oraz braku pełnej znajomości modelu danego obiektu i działających w nim ciągów przyczyn i skutków różnych narażeń, wykazujących do tego często właściwości synergizmu. Zaangażowane zostały dlatego w diagnostyce wysokonapięciowej metody rozwijane w teorii podejmowania decyzji, jak logika zbiorów rozmytych, systemy samouczące się, sieci neuronowe i inne. Można oczekiwać efektów tych prac w formie profesjonalnych programów kończących procedury pomiarowe na konkretnych urządzeniach. Diagnostyka stanu urządzeń może być zatem traktowana jako etap procedury strategii obsługi eksploatacyjnej układów izolacyjnych. Warto w tym miejscu przypomnieć, że w referacie wprowadzającym do Sympozjum EUI'97 zwrócona była uwaga na możliwość i celowość skorzystania z metod, znanych w teorii profilaktyki urządzeń technicznych, z uwzględnieniem specyfiki urządzeń elektroenergetycznych w celu minimalizacji kosztów eksploatacji. Pojawienie się tej tematyki na obecnym Sympozjum EUI'01 wskazuje więc na aktualność takiego podejścia a dalsze prace w tym kierunku zapewne wskażą zarówno jego zalety jak i wady oraz niezbędne uwarunkowania.

Bardzo dużo nakładów na prace naukowo-techniczne poświęconych jest stale transformatorom jako obiektom w systemie elektroenergetycznym o bardzo wysokim stopniu wymaganej niezawodności. W związku z tym zagadnienia różnych procedur diagnostycznych są jednymi z najważniejszych w dziedzinie problemów eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Rozwój badań odbywa się tutaj równocześnie w różnych kierunkach. Obok doskonalenia metod analizy gazów i związków furfuranowych jako produktów degradacji izolacji i daleko posuniętych możliwości korelowania ich wyników z przyczynami oraz uzupełniania baz danych tworzących systemy eksperckie, obserwuje się rozwój metod elektrycznych opartych na przetwarzaniu i interpretacji sygnałów. Służą one do detekcji dwóch grup defektów w konstrukcji transformatora: uszkodzeń w układzie izolacyjnym, generujących wyładowania niezupełne i deformacji uzwojeń z powodu działań dynamicznych prądów zwarciovych. Do realizacji drugiego celu najbardziej skuteczną, jak się uważa, byłaby możliwość wykorzystania funkcji przenoszenia transformatora jako obiektu. Podstawową trudnością jest tutaj opanowanie wpływu zakłóceń, na tle których pojawia się sygnał użyteczny. Różne metody przetwarzania sygnałów jak transformaty (np. Fouriera, falkowe, Gabora) z dziedziny częstotliwości do dziedziny czasu rozwijane są w związku z tym intensywnie, zmierzając do zredagowania pewnego rodzaju katalogu sygnałów skorelowanych z rodzajami defektów. Do tego ostatniego celu bada się możliwości wykorzystania funkcji Kohonena dla powiązania funkcji przenoszenia z topologią miejsc uszkodzeń w uzwojeniach. W technice badań wyładowań niezupełnych zagadnienia mają podobny charakter: filtracji sygnału i jego interpretacji, przy czym same sygnały są pochodzenia elektrycznego lub akustycznego. Do metod elektrycznych lecz o zupełnie odmiennej zasadzie należy technika rozpoznawania

kształtu przebiegu czasowego napięcia powrotnego. Jest ona metodą zastępczą w stosunku do teoretycznego rozpoznania pełnej funkcji przenoszenia układu izolacyjnego, co jak wiadomo dostarczyłoby pełnej informacji o strukturze układu lecz jest technicznie niezwykle trudne. Technika pomiaru napięcia powrotnego dysponuje już profesjonalnymi urządzeniami a jej zakres zastosowania obejmuje różne urządzenia wysokiego napięcia (transformatory, maszyny elektryczne, w pewnym zakresie kable). Najwyższą formą techniki diagnostycznej są pomiary *on line* i monitoring, który znajduje zastosowanie do obiektów o szczególnej ważności (urządzenia GIS, duże transformatory). Elementem takiego monitoringu są na przykład układy do detekcji optycznej miejsc przegrzania w transformatorkach, znajdujące szczególne zastosowanie w konstrukcjach transformatorów suchych.

W technice diagnostycznej do kabli wysokiego napięcia można zanotować takie metody jak monitoring zawilgocenia lub czujniki do rejestracji wyładowań niezupełnych, wskazujące na znaczenie jakie przywiązuje się do znajomości stanu tych linii. Do rutynowych badań kabli znajdują zastosowanie metody rozładowania rezonansowego z rejestracją kształtu napięcia wraz z nałożonymi impulsami od wyładowań oraz wspomniane już metody detekcji wyładowań przy zasilaniu napięciem o niskiej częstotliwości, zwykle 0,1 Hz. Można w związku z tym zwrócić uwagę, że rozwijająca się technika badań przy niskich częstotliwościach inspirowuje prace nad mechanizmami relaksacji dielektrycznej w warunkach układów technicznych, w których nie można pominąć wpływu przewodnictwa jonowego oraz niesymetrycznej budowy. Temat ten podniesiony i przedstawiony został również obecnie.

Badania skutków działania wyładowań niezupełnych w polimerach przechodziły przez różne etapy, w których analizowano efekty degradacji chemicznej, zmian charakterystyk elektrycznych narażanej powierzchni i inne. Ostatnio badanie efektów degradacji powierzchni możliwe stało metodami profilografii za pomocą promieniowania laserowego. Zapewne może ta technika stanowić cenne uzupełnienie dotychczasowych metod w tej dziedzinie.

W tematyce mechanizmów starzenia dielektryków obserwuje się nadal prace nad rozwojem wielowymiarowych modeli opisujących skutki zespołu narażeń. Znajomość energii aktywacji poszczególnych procesów jest tutaj zasadniczym problemem oraz znajomość funkcji, wiążących procesy synergistyczne. Obok tych prac teoretycznych rozwijane są modele empiryczne, oparte na dostatecznie obszernym materiale doświadczalnym. Można oczekiwać z kolei wykorzystania wyników tego drugiego nurtu jako źródeł danych o wielkościach fizykalnych materiałowych, wykorzystywanych następnie do weryfikacji modeli teoretycznych. Prace takie znalazły się również w programie obecnego Sympozjum. Badania wpływu zniekształceń napięcia zasilającego w warunkach eksploatacyjnych na układ izolacyjny wiążą tę tematykę z aktualnym problemem jakości energii elektrycznej. Szerokie wprowadzanie układów energoelektronicznych spowodowało bowiem zainteresowanie niekorzystnymi efektami generowanych przez nie zniekształceń napięć i prądów w sieciach. Prowadzą one z jednej strony do pogorszenia jakości energii elektrycznej i jest to – z uwagi na obowiązujące w tej dziedzinie normy – problem dla operatorów sieci elektroenergetycznych, ale efekt ten jest również niekorzystny dla układów izolacyjnych, dla których zniekształcone napięcie zasilające stanowi dodatkową fizykalną przyczynę możliwości inicjowania wyładowań niezupełnych. Problem ten znajduje swój wyraz w literaturze a i na obecnym Sympozjum EUI'01 jest reprezentowany.

Kontynuuje się badania w zakresie fizykalnych podstaw materiałów izolacyjnych w ich technicznym wykonaniu. Prace nad mechanizmami procesów relaksacyjnych w różnych warunkach działań pola elektrycznego i temperatury znajdują się w programie Sympozjum. Ich

znaczenie wskazuje się dla praktycznych technik diagnostycznych, wśród których przykładami są pomiary napięć powrotnych lub pomiary przy obniżonych częstotliwościach. Rozwija się badania nad mechanizmem działania destrukcyjnego wyładowań niezupełnych, przy czym w szczególności poświęcono tym razem uwagę roli energii cieplnej, wydzielonej w akcie wyładowania w dielektryku.

Przegląd tematyki referatów zgłoszonych na obecne Sympozjum EUI'01 wskazuje zatem na szeroki i równomierny udział kilku zagadnień, które składają się na najważniejsze problemy eksploatacji układów izolacyjnych wysokiego napięcia. Można je podzielić na następujące grupy:

- Narażenia eksploatacyjne: elektryczne, cieplne, mechaniczne
- Postępy w konstrukcji i technologiach a narażenia eksploatacyjne
- Problemy torów telekomunikacyjnych w liniach napowietrznych wysokiego napięcia,
- Awaryjność urządzeń, problemy techniczno-organizacyjne w eksploatacji
- Badania materiałów, problemy diagnostyki
- Mechanizmy fizyczne w układach izolacyjnych

Materiały obecnego Sympozjum wykazują w wielu punktach znaczne rozwinięcie tematów referowanych na Sympozjach poprzednich a niektóre przedstawiają nowe zagadnienia, które będą mogły stanowić inspirację dalszych badań.