

Ryszard Malewski*, Hans-Jürgen Voss**

IZOLACJA WYSOKONAPIĘCIOWA PRZEKŁADNIKÓW

Streszczenie: Przedstawiono typowe rozwiązania układów izolacyjnych przekładników wysokonapięciowych z izolacją papierowo-olejową i gazową. Podano sposób działania przekładników napięciowych magnetycznych oraz pojemnościowych i porównano ich własności pomiarowe. Wymieniono różnice pomiędzy przekładnikami do pomiaru energii i do sterowania zabezpieczeniami.

Omówiono główne problemy eksploatacyjne przekładników WN: nader groźne eksplozje niektórych typów przekładników, stanowiące zagrożenie obsługi oraz aparatów pracujących na stacjach WN. Doraźny środek zaradczy stanowi sonda Hydran do ciągłej rejestracji zawartości wodoru w oleju przekładnika, która ostrzega o nadchodzącej awarii. Nowoczesne konstrukcje przekładników olejowych nie zagrażają eksplozją w przypadku uszkodzenia izolacji wewnętrznej. Oddzielne zagadnienie stanowi stopniowa zmiana przekładni pojemnościowych przekładników napięcia spowodowana starzeniem wysokonapięciowej części przekładnika.

Wprowadzenie światłowodowych torów łączności w liniach przesyłowych stopniowo zastępuje sygnalizację systemu zabezpieczeń i telefonię nośną na przewodach linii, a zarazem zmniejsza potrzebę użytkowania pojemnościowych przekładników napięcia do przenoszenia sygnałów wysokiej częstotliwości.

Nowe konstrukcje przekładników prądowych opartych o efekt magneto-optyczny Faraday'a zostały opracowane przez wiodące wytwórnie sprzętu i wprowadzone po próbnej eksploatacji przez takie przedsiębiorstwa jak *Tennessee Valley Authority* i *Hydro-Quebec*.

* Instytut Elektrotechniki, ul. Pożaryskiego, 04-703 Warszawa

** Ritz Messwandler

1. Klasyfikacja przekładników

Podstawową funkcją przekładnika jest wierne odtworzenie mierzonego wysokiego napięcia lub silnego prądu, tj. wartości modułu i fazy przebiegów sinusoidalnych a także kształtu przebiegu w stanie nieustalonym. Zakres mierzonych napięć rozciąga się od 1200 kV do 1 kV i od 100 kA do 10 A. Dokładność pomiaru określa klasa przekładników, która zawiera się w granicach od 0,1 do 3 i wyraża uchyb pomiarowy w procentach.

W tak szerokim zakresie napięć i prądów stosowane są różne rozwiązania konstrukcyjne przekładników. Omówienie ich własności i doświadczeń eksploatacyjnych wymaga pewnego usystematyzowania. Podział na grupy może być przeprowadzony przy zastosowaniu różnych kryteriów. Jednakże z punktu widzenia układu izolacyjnego narzuca się porównanie następujących typów, rodzajów izolacji wysokiego napięcia i zastosowania przekładników:

- przekładniki prądowe, napięciowe i kombinowane,
- przekładniki napięciowe pojemnościowe i magnetyczne,
- przekładniki w osłonie porcelanowej oraz z gumy silikonowej,
- przekładniki w izolacji papierowo-olejowej hermetyzowane i nie hermetyzowane,
- przekładniki w izolacji gazowej,
- przekładniki służące do pomiaru energii i do sterowania zabezpieczeniami.

Dla napięć stosowanych do przesyłu energii, tj. 110 kV, 220 kV, 400 kV a także 750 kV stosuje się tradycyjne przekładniki w izolacji papierowo-olejowej, ale w ostatnich latach coraz częściej wprowadzane są przekładniki izolowane gazem SF₆.

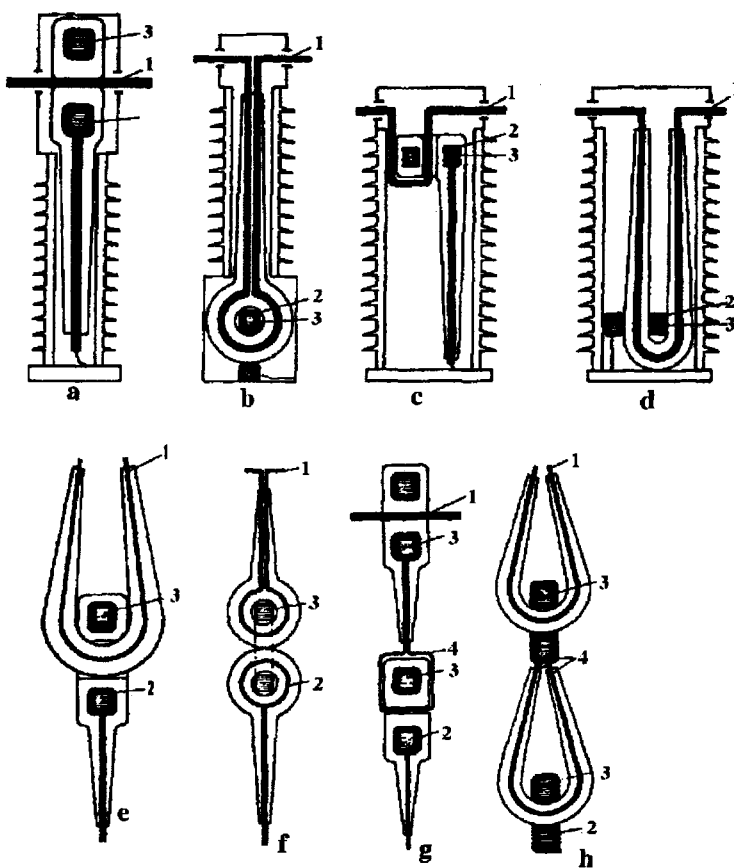
2. Układ izolacyjny przekładników prądowych

Na rysunku 1 przedstawiono różne rozwiązania konstrukcyjne przekładników prądowych w izolacji papierowo-olejowej.

Konwencjonalne przekładniki prądowe są wykonywane według dwóch konstrukcji: przepustowe (*feedthrough, eyebolt*) lub pętlicowe (*hairpin*). Zaletą pierwszego rozwiązania jest wysoka odporność na dynamiczne działanie prądu zwarcia oraz mniejsza impedancja wejściowa. Osłona zewnętrzna dawniej wykonywana wyłącznie z porcelany, jest obecnie oferowana również w postaci izolatora kompozytowego. Izolator taki składa się z rury izolacyjnej z włókna szklanego nasyczonego żywicą epoksydową, a zewnętrzna powierzchnia tej rury jest pokryta warstwą gumy silikonowej z kłozkami zwiększającymi drogę upływu.

Ponadto, średnica izolatora przekładnika przepustowego jest znacznie mniejsza od izolatora osłaniającego przekładnik prądowy typu pętlicowego, a więc mniejsza jest również objętość oleju wypełniającego przekładnik.

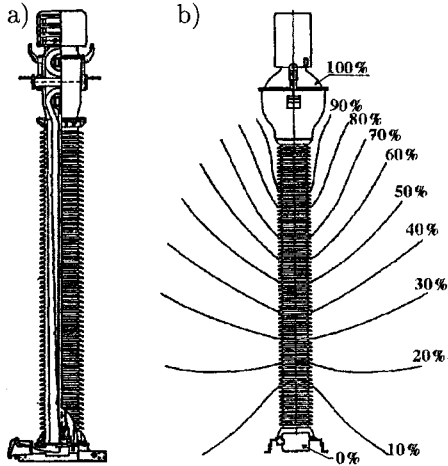
Na rysunku 2 pokazano konstrukcję przekładnika przepustowego, a rozkład napięcia wokół zewnętrznej jego powierzchni przedstawia rysunek 3. Rozkład wzdłuż powierzchni izolatora jest zbliżony do równomiernego dzięki sterowaniu za pomocą ekranów elektrostatycznych. Ekranry takie w postaci pasów folii aluminiowej są wkładane pomiędzy warstwy papieru podczas nawijania izolacji.



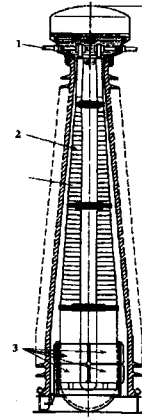
Rys. 1. Przekładniki prądowe wysokiego napięcia. Konstrukcja przekładnika: a) przepustowy, z izolowanym rdzeniem ustawionym pionowo w głowicy przekładnika, b) pętlicowy, z izolowaną szyną prądową i rdzeniem w kadzi w dolnej części przekładnika, c) z izolowanym rdzeniem ustawionym poziomo w górnej części izolatora, d) z izolowaną szyną prądową i rdzeniem ustawionym poziomo w dolnej części izolatora. Koncepcja układu izolacyjnego: e) z izolacją WN dzieloną pomiędzy szyną prądową i rdzeń z uzwojeniem wtórnym, f) z rdzeniem na połowie napięcia umieszczonym w połowie wysokości przekładnika, g) przekładnik kaskadowy z dwoma izolowanymi rdzeniami pierwszego i drugiego stopnia kaskady, h) przekładnik kaskadowy z izolowaną szyną prądową pierwszego i drugiego stopnia kaskady. Oznaczenia: 1 - szyna wiodąca prąd mierzony pod wysokim napięciem, 2 - uzwojenie wtórne przekładnika, 3 - toroidalny rdzeń magnetyczny, 4 - uzwojenie wtórne pierwszego stopnia przekładnika kaskadowego

Pokazano układ wewnętrznej izolacji wysokonapięciowej otaczającej rdzeń magnetyczny i uzwojenie wtórne, którego końce są wyprowadzone u podstawy przekładnika.

Widoczny jest wpływ sterowania rozkładem pola przez ekrany z folii aluminiowej nawinięte pomiędzy warstwami izolacji papierowej. Konstruktor dążył do uzyskania jednostajnego rozkładu wzdłuż kolumny przekładnika.



Rys. 2. a) Konstrukcja przepustowego przekładnika prądu produkcji firmy Ritz z izolowanym rdzeniem ustawionym pionowo w głowicy przekładnika, b) Rozkład pola elektrycznego na zewnątrz przepustowego przekładnika prądu [1]



Rys. 3. Konstrukcja pętlicowego przekładnika prądu produkcji firmy Messwandlerbau z izolowaną szyną (1) i rdzeniami (3) umieszczonym w dolnej części izolatora (4). Rozkład napięcia wzdłuż tej szyny jest sterowany za pomocą ekranów z folii aluminiowej (2) nawijanych wraz z kolejnymi warstwami papieru. Porcelanowy izolator ostłonny jest wypełniony olejem [2]

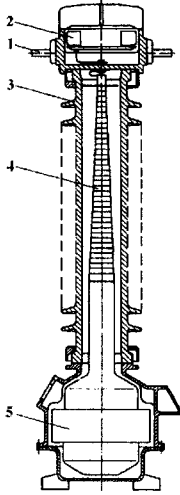
Odmierna jest konstrukcja przekładnika pętlicowego. W wielu modelach stosowana jest osłona porcelanowa, która ma znaczną średnicę u podstawy i zwęża się ku górze. W uziemionej kadzi umieszczone są rdzenie i uzwojenie wtórne. Zaletą takiego rozwiązania jest większa stabilność mechaniczna, wynikająca z nisko położonego środka ciężkości. Ponadto przekładnik pętlicowy jest bardziej odporny na wstrząsy, co ma istotne znaczenie w obszarach nawiedzanych przez trzęsienia ziemi. Widoczne są zakończenia kolejnych warstw oplotu papierowego który zwęża się ku górze, oraz znaczna średnica izolatora porcelanowego u jego podstawy.

3. Układy izolacyjne magnetycznych przekładników napięciowych

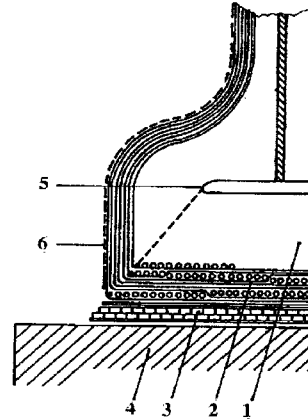
Magnetyczne przekładniki napięcia nastęrczają trudności konstruktorom układu izolacyjnego, zwłaszcza w przypadku wyższych napięć znamionowych. Główną trudność stanowi równomierne rozłożenie naprężeń w uzwojeniu złożonym z dziesiątków tysięcy zwojów bardzo cienkiego przewodu. Należy uwzględnić nie tylko rozkład napięcia proporcjonalny do liczby zwojów występujący przy częstotliwości sieciowej, ale również rozkład udarowy, który jest wymuszany przez przepięcia atmosferyczne w eksploatacji oraz podczas prób odbiorczych przekładnika.

Układ izolacyjny uzwojenia wysokiego napięcia składa się z dwóch części: izolacji pomiędzy warstwami uzwojenia, których szerokość zmniejsza się w miarę oddalania

warstwy od rdzenia, oraz ekranów sterujących rozkładem potencjału wzdłuż kolumny izolatora osłonnego. Równomierne rozłożenie napięcia wzdłuż kolumny izolatora osłonnego pozwala zmniejszyć jej długość, co bezpośrednio rzutuje na koszt przekładnika a także na jego wytrzymałość mechaniczną. Przykład konwencjonalnego rozwiązania układu izolacji wysokonapięciowej magnetycznego przekładnika napięcia pokazano na rysunku 4, a typowe rozwiązanie izolacji uzwojenia na rysunku 5.



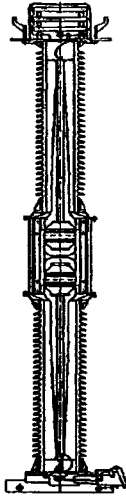
Rys. 4. Konstrukcja magnetycznego przekładnika napięcia produkcji firmy Siemens [2]: 1 – szyna pod wysokim napięciem, 2 – mieszki ekspansyjny wyrównujący ciśnienie oleju przy zmianach temperatury, 3 – porcelanowy izolator osłonny wypełniony olejem, 4 – przewód wysokiego napięcia w izolacji papierowej z ekranami z folii aluminiowej nawijanymi pomiędzy warstwami papieru, 5 – uziemiony rdzeń magnetyczny w kadzi przekładnika



Rys. 5. Sposób nawinięcia uzwojeń rdzeniu przekładnika napięcia: 1 – uzwojenie wysokiego napięcia złożone z wielu warstw o zmniejszającej się szerokości, 2 – izolacja papierowa oddzielająca poszczególne warstwy uzwojenia a także dzieląca każdą z warstw na sekcje, 3 – uzwojenie niskiego napięcia, 4 – rdzeń, 5 – ekran na potencjale zacisku wejściowego, 6 – zewnętrzna warstwa izolacji [1]

Konstruktorzy starają się podzielić napięcie na uzwojeniu pierwotnym przekładnika pomiędzy układy izolacyjne odpowiadające jednej sekcji uzwojenia. Umieszczenie rdzenia magnetycznego na potencjale równym połowie mierzonego napięcia, dzieli układ izolacyjny na górną i dolną sekcję. Każda z nich jest skonstruowana do pracy na połowie napięcia. Środkowa część uzwojenia jest nawinięta bezpośrednio na rdzeniu, natomiast zewnętrzna warstwa górnej cewki jest połączona do zacisku wejściowego pod wysokim napięciem. Zewnętrzna warstwa dolnej cewki ma uziemiony kraniec i na niej nawinięte jest uzwojenie wtórne. Konstrukcja takiego przekładnika jest pokazana na rysunku 6.

Dalszy krok w kierunku podziału napięcia panującego na pierwotnym uzwojeniu przekładnika to wprowadzenie dwóch rdzeni umieszczonych na $2/3$ i $1/3$ napięcia.



Rys. 6. Konstrukcja przekładnika napięciowego produkcji firmy Ritz, z rdzeniem na potencjale pośrednim [1]. Wysokie napięcie pomiędzy tym rdzeniem a zaciskiem wejściowym i wyjściowym zostało równomiernie rozłożone wzdłuż dwóch osłonnych izolatorów porcelanowych. Rozkład napięcia jest sterowany przez system przewodzących ekranów wsuniętych pomiędzy warstwy papieru podczas nawijania izolacji

Powoduje to konieczność nawijania dodatkowego uzwojenia sprzęgającego te dwa rdzenie, jednakże ułatwia rozwiązanie problemu wytrzymałości dielektrycznej oraz pozwala na modułarną konstrukcję przekładnika. Poszczególne moduły o odpowiednio mniejszej wadze i wymiarach, są łatwiejsze przy produkcji, transporcie i montażu.

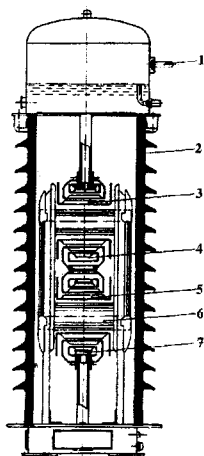
Konstrukcja takiego modułu jest pokazana na rysunku 7, razem ze schematem połączeń przekładnika kaskadowego przedstawionym na rysunku 8 [3].

4. Przekładniki kombinowane

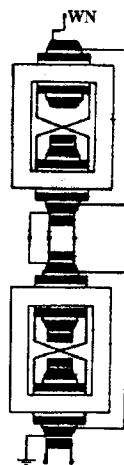
W wielu podstacjach przekładnik prądowy i napięciowy sąsiadują ze sobą i umieszczenie obydwu tych przyrządów w jednej obudowie pozwala na istotne zmniejszenie ich kosztu. Koncepcja przekładnika kombinowanego jest w zasadzie prosta (rys. 9). Jednakże istotnym zadaniem dla konstruktora jest takie usytuowanie ekranów z folii aluminiowej wplecionych pomiędzy warstwy papieru izolującego przekładnik prądowy i napięciowy, aby rozkład napięcia na obydwu przekładnikach był taki sam. Oczywiście, następuje tu odwrócenie kolejności ekranów, bowiem zewnętrzny (najkrótszy) ekran przepustowego przekładnika prądowego winien mieć ten sam potencjał co wewnętrzny (najdłuższy) ekran przekładnika napięciowego.

5. Pojemnościowe przekładniki napięcia

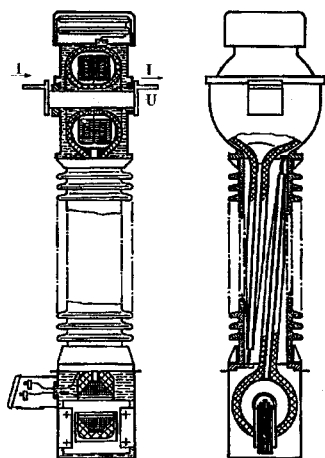
Wysoka dokładność magnetycznych przekładników napięcia i niezmienna w czasie przekładnia (określona stosunkiem ilości zwojów uzwojenia pierwotnego do wtórnego) predestynują je do stosowania w obwodach pomiarowych energii elektrycznej, gdzie uchyb pomiaru ma bezpośredni wpływ na wysokość faktury za sprzedaną energię. W sieciach przesyłowych ilość przekładników stosowanych do pomiaru energii stanowi zaledwie 10% przekładników służących do sterowania zabezpieczeniami i zarządzania



Rys. 7. Przekładnik napięcia produkcji firmy Haefely [3], z rdzeniem na potencjale pośrednim: 1 - zacisk wejściowy WN, 2 - osłonny izolator porcelanowy, 3 - uzwojenie o potencjale bliskim pośredniemu, 4 - uzwojenie o potencjale bliskim wejściowemu, 5 - uzwojenie o potencjale bliskim pośredniemu, 6 - rdzeń magnetyczny o potencjale pośrednim, 7 - uzwojenie wtórne o potencjale ziemi



Rys. 8. Schemat połączeń kaskadowego przekładnika napięcia z dwoma rdzeniami na $2/3$ i $1/3$ potencjału zacisku wejściowego [3]. Przekładnik pokazany na rysunku 7 stanowi połowę pokazanego tu schematu i układ kaskadowy powstaje przez ustawienie jednego członu na drugim



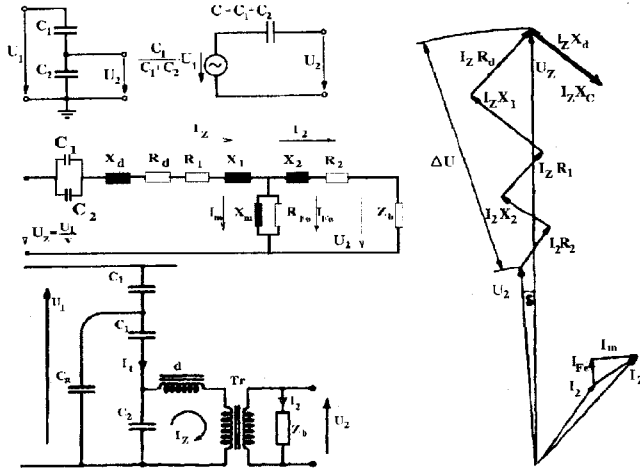
Rys. 9. Konstrukcja przekładnika kombinowanego, prądu i napięcia w jednym izolatorze osłonie osłonnym, produkcji firmy Ritz [1]. Rdzeń przekładnika prądowego umieszczono w głowicy pod wysokim potencjałem, a rdzeń przekładnika napięciowego w uzziemionej kadzi. Ekrany przewodzące wplecione pomiędzy warstwami izolacji papierowej ustalają dla obydwu przekładników taki sam równomierny rozkład napięcia wzdłuż kolumny izolatora

siecią. W tej sytuacji przedsiębiorstwo energetyczne może zaakceptować wyższy koszt magnetycznych przekładników napięcia.

Natomiast można uzyskać istotne oszczędności stosując do sterowania zabezpieczeniami znacznie tańsze przekładniki pojemnościowe. Ponadto, pojemnościowy przekładnik napięcia jest wykorzystywany jako kondensator sprzęgający do komunikacji

telefonicznej na liniach wysokiego napięcia. Przekładnik taki stanowi pojemnościowy dzielnik napięcia, którego dolny człon jest połączony równolegle z dławikiem dostrojonym do rezonansu na częstotliwości sieci. Przy częstotliwości sieciowej napięcie wyjściowe przekładnika zbliża się do mierzonego wysokiego napięcia podzielonego przez przekładnię.

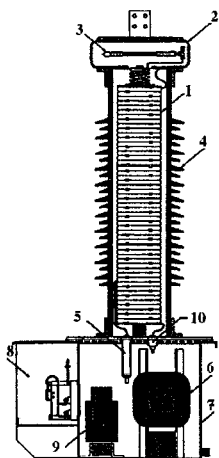
Do celów analizy obwodu dogodnie jest przekształcenie Thevenin'a, które pozwala na zastąpienie dolnego i górnego członu dzielnika szeregową pojemnością równoważną. Pojemność ta odpowiada równolegle połączonym obydwu członom dzielnika. Schemat zastępczy i wykres wektorowy pojemnościowego dzielnika napięcia przedstawiono na rysunku 10 a konstrukcję na rysunku 11.



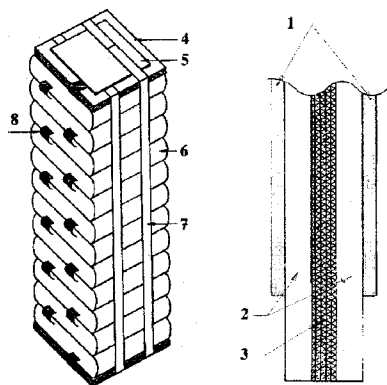
Rys. 10. Schemat zastępczy i wykres wektorowy pojemnościowego przekładnika napięcia (coupling capacitor voltage transformer — CCVT). C_1 — pojemność górnego członu dzielnika napięcia, C_2 — pojemność dolnego członu dzielnika napięcia, C_g — pojemność doziemna dzielnika, X_d — reaktancja i R_d — oporność dławika d dostrojonego do rezonansu, X_1 — reaktancja i R_1 — oporność uzwojenia pierwotnego oraz X_2 — reaktancja i R_2 — oporność transformatora Tr obniżającego, X_m — reaktancja magnesowania i R_{Fe} — oporność równoważna strat w żelazie transformatora obniżającego, Z_b — impedancja obciążenia, $U_2 = U_1/v$ — napięcie wejściowe równoważnego obwodu (Thevenin'a), U_2 — napięcie wyjściowe przekładnika, ΔU — uchyb amplitudowy i δ — uchyb kątowy przekładnika. Przy dostrojeniu dławika do rezonansu na częstotliwości sieciowej, pojemnościowy spadek napięcia $I_Z X_C$ jest równy spadkowi napięcia na reaktancji dławika $I_Z X_d$, i napięcie wyjściowe zbliża się do napięcia wejściowego [3, 4]

Człon wysokonapięciowy pojemnościowych przekładników napięcia składa się ze znacznej liczby zwijek kondensatorowych połączonych równolegle i szeregowo. Na rysunku 12 pokazano budowę stosu zwijek stanowiącego górną część dzielnika napięcia.

W przypadku przebicia izolacji jednej zwijki na ogół następuje przepalenie końcówek z cienkiej folii łączących tą zwijkę z pozostałymi i odcięcie uszkodzonej zwijki. Wyeliminowanie przebitej zwijki nie wytrąca przekładnika z normalnej pracy, jednakże jego pojemność ulega niewielkiej zmianie co z kolei powoduje zmianę przekładni.



Rys. 11. Konstrukcja pojemnościowego przekładnika napięcia produkcji firmy Ritz: 1 – stos zwijek kondensatorowych tworzących pojemność górnego członu dzielnika, 2 – wypełniona olejem głowica przekładnika, 3 – worek do absorbowania termicznych zmian objętości oleju, 4 – izolator osłonny wypełniony olejem, 5 – odczep pomiarowy dzielnika połączony do 6 – dławika dostrojonego do rezonansu, 7 – uziemiona kadź wypełniona olejem, 8 – komora zwieraka i końcówek obwodu wyjściowego, 9 – transformator obniżający [1]

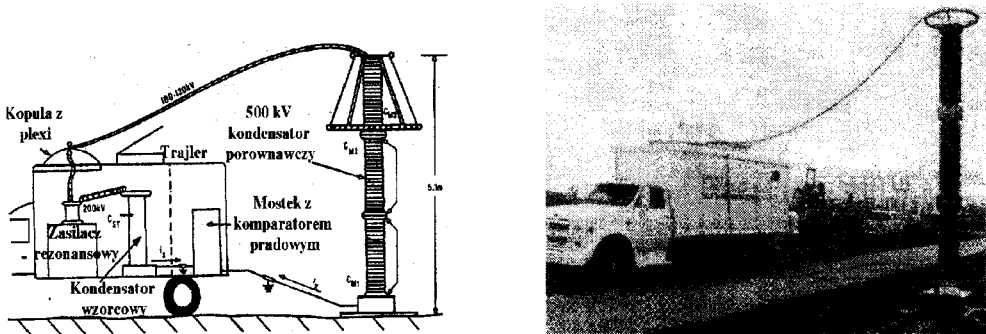


Rys. 12. Stos zwijek kondensatorowych tworzący górny człon dzielnika napięcia i przekrój izolacji jednej zwijki: 1 – folia aluminiowa stanowiąca okładki kondensatora, 2 – bibułka papierowa nasączona olejem, 3 – folia z polipropylenu, 4 – usztywniająca nakładka z preszpanu, 5 – elektroda krańcowa izolatora, 6 – zwijka kondensatorowa, 7 – taśmy izolacyjne wiążące stos zwijek, 8 – paski folii aluminiowej łączące poszczególne zwijki [1]

Na ogół przekładniki pojemnościowe są stosowane do sterowania systemu zabezpieczeń i niewielkie zmiany przekładni nie stanowią wówczas istotnego problemu. Jednakże służą one także do pomiaru napięcia niezbędnego do sterowania rozplywem mocy i rozkładem obciążeń, a wtedy błędny pomiar napięcia może mieć poważne konsekwencje.

Problem okresowej kalibracji przekładni pojemnościowych przekładników napięcia został rozwiązany po raz pierwszy w 1978 roku przez *National Bureau of Standards* (NBS) z Waszyngtonu, które opracowało i uruchomiło przewoźne laboratorium kalibracyjne [5]. W laboratorium znajduje się układ rezonansowy stanowiący źródło wysokiego napięcia do 200 kV, kondensator wzorcowy oraz mostek Scheringa z komparatorem prądowym. Wysokie napięcie jest wyprowadzone przez kopułę z pleksiglasu umieszczoną na dachu pojazdu. Kalibracja pojemnościowych przekładników napięcia na stacji jest dwustopniową procedurą. Najpierw kolejne człony trójczłonowego (przewoźnego) kondensatora porównawczego na napięcie 500 kV, są kalibrowane przy zasilaniu z układu rezonansowego. Następnie badany przekładnik jest porównywany do tego kondensatora przy zasilaniu napięciem z sieci przesyłowej.

Na rysunku 13 przedstawiono schemat laboratorium NBS oraz jego zdjęcie podczas kalibracji przekładnika w stacji WN.

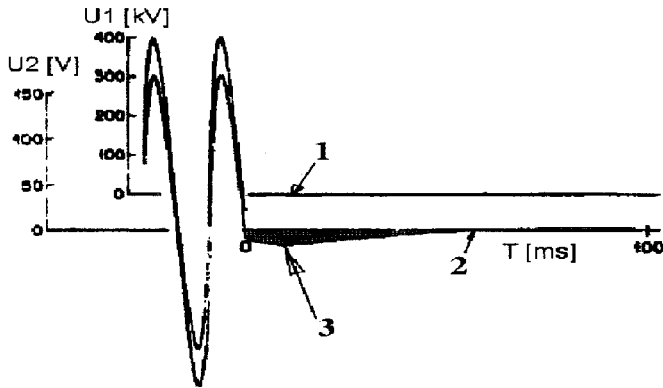


Rys. 13. Schemat przenośnego laboratorium National Bureau of Standards do kalibracji pojemnościowych przekładników napięcia zainstalowanych na podstacjach. Zdjęcie laboratorium podczas dokonywania kalibracji przekładnika [5]

Przenośne laboratorium NBS od lat przeprowadza okresową kalibrację pojemnościowych przekładników napięcia do 500 kV w wielu amerykańskich przedsiębiorstwach energetycznych. Zebrane przez nich doświadczenia skłoniły Polskie Sieci Elektroenergetyczne (PSE) do zakupu podobnego laboratorium ze szwajcarskiej firmy *Tettex*, i Oddział PSE w Poznaniu świadczy takie usługi na terenie kraju. Ostatnio to przenośne laboratorium zostało wyposażone także w aparaturę do pomiaru wyładowań niezupełnych.

Oprócz uchybu pomiarowego wartości napięcia przemiennego spowodowanego zmianą przekładni, pojemnościowy przekładnik napięcia zniekształca przebieg rejestrowany w stanie nieustalonym. Wynika to z rezonansowego charakteru obwodu przekładnika, w którym energia jest na przemian składowana w indukcyjności dławika i pojemności dzielnika napięcia. W przypadku zwarcia w sieci wysokiego napięcia w pobliżu przejścia sinusoidy napięcia przez zero, na wyjściu przekładnika pojawi się dodatkowy przebieg spowodowany rozładowaniem energii zgromadzonej w dławiku. Może to spowodować błędne działanie zabezpieczeń, jeśli amplituda dodatkowego przebiegu osiągnie znaczną wartość. Przykład rejestracji napięcia w chwili zwarcia doziemnego podczas przejścia napięcia przez zero pokazano na rysunku 14.

Inny przypadek stwierdzony doświadczalnie podczas operacji łączeniowych w stacji WN stanowi zjawisko rezonansu pomiędzy indukcyjnością dławika i pojemnością kondensatorów, które sterują rozkładem napięcia na komorach gaszących otwartego wyłącznika WN. Podczas otwierania odłącznika w stacji WN, wyłącznik już jest otwarty i na schemacie zastępczym przedstawia sobą pojemność, która jest na ogół mniejsza od pojemności górnego członu przekładnika. Połączenie szeregowe pojemności górnej części przekładnika z pojemnością kondensatorów wyłącznika WN powoduje, że dominuje mniejsza z dwóch. Ta wypadkowa pojemność może być pobudzona do oscylacji z indukcyjnością dławika przy kolejnych zapłonach łuku na biegunach odłącznika.



Rys. 14. Uchyb pomiaru pojemnościowego przekładnika napięcia, podczas rejestracji stanów przejściowych. Zwarcie przy przejściu mierzonego napięcia (1) przez zero wywołuje sygnał wyjściowy (2), z charakterystycznym odkształceniem (3), które zostało spowodowane przez wydzielenie się energii zgromadzonej w dławiku rezonansowym [4]

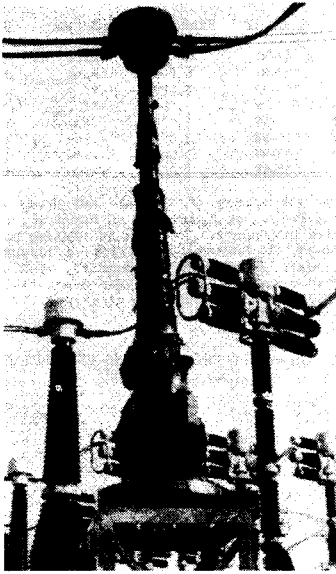
Konstruktorzy oferują różne systemy zapobiegania drganiom rezonansowym pojemnościowego przekładnika napięcia, polegające na wprowadzeniu elementów półprzewodnikowych, które mają tłumić ten rezonans. Skuteczność takich systemów w dużym stopniu zależy od koncepcji takiego systemu i odporności jego elementów na przepięcia.

6. Eksplozje przekładników w osłonie porcelanowej

Przebite izolacji wewnętrznej i szybko rozwijający się kanał wyładowania łukowego powoduje powstanie fali uderzeniowej w nieściślimym oleju. Gęstość oleju zarejestrowana na czole fali uderzeniowej ponad dwukrotnie przekracza jego normalną gęstość. Fala uderzeniowa rozsadza od wewnątrz osłonę porcelanową i nadaje jej fragmentom wielkie przyspieszenie. Wydzielona energia jest dostatecznie duża aby rozrzuć ciężkie odłamki porcelany na odległość do stu metrów. Efekt dynamiczny takiej awarii jest porównywalny do eksplozji granatu wystrzelonego z moździerza. Na rysunku 15 pokazano zdjęcie przekładnika prądowego po eksplozji.

Jednym z pośrednich rozwiązań było umieszczenie rury z nasyconego żywicą włókna szklanego wewnątrz izolatora porcelanowego. Rura taka była umieszczona blisko wewnętrznej ścianki izolatora i w przypadku przebicia izolacji i wyładowania łukowego przejmowała pierwszą falę uderzeniową. Rura na ogół ulegała zniszczeniu, jednakże związana z tym praca absorbuje energię fali i zapobiega rozerwaniu izolatora porcelanowego.

Eksplozji izolatora można również zapobiec przez odpowiednią konstrukcję przekładnika prądowego. W tym celu najbardziej naprężana część izolacji wewnętrznej przekładnika, tj. rdzeń i uzwojenie wtórne, jest umieszczona w metalowej kadzi, według systemu firmy Ritz. Przebite izolacji wysokonapięciowej wewnątrz kadzi może



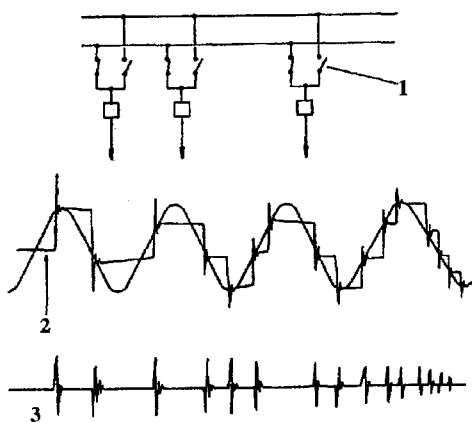
Rys. 15. Widok pętlicowego przekładnika prądu z izolowaną szyną i rdzeniami umieszczonymi w uziemionej kadzi po eksplozji. Na skutek przebicia izolacji wewnętrznej powstała fala uderzeniowa w oleju, która spowodowała eksplozję osłony porcelanowej i rozrzucenie jej fragmentów. Odłamki porcelany znajdowano w odległości przekraczającej 100 m [6]

ją uszkodzić, jednakże nie powoduje rozerwania izolatora porcelanowego i rażenia ludzi, bądź sąsiednich aparatów odłamkami izolatora.

Zastąpienie izolatora porcelanowego kompozytowym eliminuje niebezpieczeństwo gwałtownej eksplozji i rażenia odłamkami obsługi stacji a także zainstalowanych w pobliżu aparatów WN. Przebicie izolacji wewnętrznej takiego przekładnika powoduje zniszczenie izolatora kompozytowego, ale nie ma wtedy gwałtownej eksplozji takiej jaka może wystąpić w przypadku izolatora porcelanowego.

Francuskie przedsiębiorstwo energetyczne *Electricité de France* — (EdeF) postanowiło wprowadzić do specyfikacji technicznych na dostawę nowych przekładników dodatkowe wymaganie, polegające na wielokrotnym przykładaniu udarów normalnych. Poziom napięcia probierczego jest niższy niż przy próbie udarowej, ale za to udary są przykładane do izolacji przekładnika przy dużej szybkości powtarzania. Ta nowa próba ma odzwierciedlać warunki panujące w eksploatacji podczas kolejnych zapłonów łuku przy zamykaniu łącznika. Zdaniem ekspertów EdeF, takie wymaganie winno skłonić konstruktorów do opracowania układu izolacyjnego odpornego na przebicie w warunkach normalnej eksploatacji. Na rysunku 16 przedstawiono mechanizm powstawania powtarzalnych, krótkotrwałych przepięć zagrażających izolacji przekładnika.

Doświadczenia eksploatacyjne amerykańskich przedsiębiorstw energetycznych wskazują na częste występowanie gwałtownych eksplozji niektórych typów przekładników o izolacji olejowej z osłoną z porcelany. Jednym z głównych czynników skłaniających przedsiębiorstwa energetyczne do przedsięwzięcia odpowiednich działań dla zapobieżenia takim awariom była postawa związków zawodowych, które zapowiedziały przerwanie prac na stacji i wydanie zakazu wstępu członków związku na jej teren, jeśli problem ten nie zostanie rozwiązany. Zrealizowanie tej groźby spowodowało by



Rys. 16. Kolejne zapłony łuku na zamykającym się łączniku WN wywołują krótkotrwałe powtarzające się przebiegi naprężające izolację przekładnika. Niektóre przedsiębiorstwa energetyczne wymagają wprowadzenia prób odbiorczych odtwarzających przebiegi pojawiające się w eksploatacji. Próby takie polegają na wielokrotnym przyłożeniu serii szybko następujących po sobie uderów normalnych do izolacji WN przekładnika i zostały wprowadzone jako wymaganie do niektórych specyfikacji technicznych transformatora [1]

w krótkim czasie wyłączenie z ruchu wielu stacji i elektrowni, a zatem katastrofę energetyczną w skali Stanu bądź Prowincji.

Firma *Doble* rozesała do różnych przedsiębiorstw energetycznych ankietę z zapytaniami o eksplozje przekładników w eksploatacji [7]. Na ankietę odpowiedziało 13 przedsiębiorstw, które opisały 34 gwałtowne eksplozje wolnostojących przekładników prądowych [6]. Niektóre z tych odpowiedzi zacytowano poniżej aby przedstawić rzeczywisty obraz doświadczeń eksploatacyjnych amerykańskich przedsiębiorstw energetycznych w zakresie przekładników:

- „zarejestrowano 16 wybuchów przekładników prądowych prawdopodobnie spowodowanych przebiegiem o wysokiej częstotliwości wywołanym przez otwarcie odłącznika”,
- „szereg takich przekładników wykazywał wysoką zawartość wodoru w oleju. Przekładnik był odgazowany dwa dni przed wybuchem. Eksplozja miała gwałtowny przebieg i osłona porcelanowa była rozrzucona na odległość 100 jardów (~90 m). Przebite izolacji prawdopodobnie zaczęło się od wylądowań ślizgowych (tracking) wzdłuż jednej a potem następnych warstw izolacji”
- przekładnik eksplodował skutkiem przebicia izolacji. Bezpośredni kontakt gazu i oleju w małej komorze ekspansyjnej spowodował rozpuszczenie azotu w oleju i następnie pojawienie się go w postaci małych pęcherzyków (bubbles) przy powierzchni izolacji papierowej”
- izolacja została przebita, przekładnik eksplodował i wybuchł pożar”.

Analiza uszkodzonych przekładników polegająca na rozebraniu układu izolacyjnego wskazała na karbonizację i częściowe wypalenie warstw powierzchniowych izolacji papierowej w okolicy zakończenia ekranów elektrostatycznych wykonanych z taśmy półprzewodzącej [8]. Zapoczątkowanie tego procesu jest przypisywane szybko narastającym przebiegiem wywołanym otwarciem (lub zamknięciem) odłącznika [9, 10].

Doświadczenia przedsiębiorstwa energetycznego *Tennessee Valley Authority* (TVA) wskazują, że okresowe pomiary zawartości wodoru w oleju oraz tgδ izolacji przekładników nie są dostatecznie częste aby wykryć nader szybko postępujący proces utraty wytrzymałości dielektrycznej izolacji. Jedynym skutecznym sposobem

zapobiegania wybuchom przekładników jest ciągły pomiar zawartości wodoru w oleju [11, 12]

Do podobnych wniosków prowadzą pomiary zawartości wodoru w oleju przekładników prowadzone przez *Ontario-Hydro* [13]. Dzięki ciągłej rejestracji zawartości wodoru za pomocą sondy wodorowej „Hydran” w oleju izolacji przekładnika, zdołano w porę wyłączyć go z ruchu i uniknąć eksplozji.

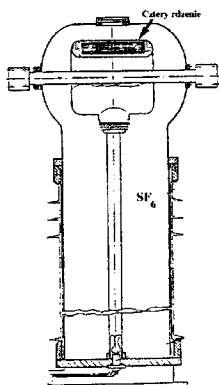
Wnioski wyciągnięte przez przedsiębiorstwo *TVA* można uszeregować jak następuje:

- najczęstsze wybuchy zarejestrowano w przypadku pętlicowych przekładników prądowych, produkowanych przez określone wytwórnie, którym przypisywano wadliwą konstrukcję izolacji WN przekładnika,
- koszt wybuchu 500 kV przekładnika prądowego szacuje się na \$500,000. — włączając koszty pośrednie: uszkodzenie innych sąsiadujących aparatów WN, gaszenie pożaru trwającego kilka godzin i usunięcie kontaminacji, utracone dochody z powodu przerwy w dostawie energii, problemy związane ze związkami zawodowym pracowników obsługi stacji,
- okresowa analiza zawartości gazów palnych w oleju nie wystarcza do dostatecznie wczesnego wykrycia przekładnika zagrażającego eksplozją. Jedynie ciągły pomiar zawartości wodoru oraz automatyczna sygnalizacja nadmiernego i szybkiego powiększania się zawartości wodoru umożliwia wyłączenie przekładnika z ruchu i zapobiega eksplozji,
- planowane jest zastępowanie przekładników pętlicowych, przez przekładniki przepustowe w kompozytowej osłonie izolacyjnej, która nie zagraża wybuchem w przypadku przebicia izolacji,
- przy zakupie nowych przekładników preferowana jest izolacja gazowa (SF_6), a w dalszej perspektywie przekładniki oparte o efekt magneto-optyczny Faraday'a oraz efekt Sagnac'a.

7. Przekładniki o izolacji gazowej

Wprowadzenie izolacji gazowej SF_6 do przekładników wysokiego napięcia eliminuje niebezpieczeństwo gwałtownej eksplozji i rażenia odłamkami porcelany, co stanowi nader istotny czynnik przy wyborze rodzaju izolacji przez przedsiębiorstwa energetyczne. Na ogół wytrzymałość dielektryczna izolacji gazowej jest tak dobrana, że napełniony przez wytwórnię przekładnik może pracować przez 10 lat bez potrzeby uzupełniania gazu. Stopniowe obniżanie się ciśnienia gazu skutkiem przecieków jest starannie kontrolowane, a w przypadku awarii następuje uruchomienie alarmu sygnalizującego nadmierny ubytek ciśnienia.

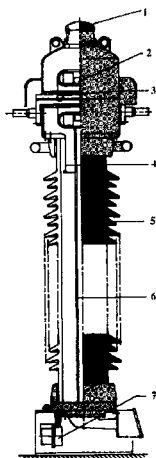
Koncepcja układu izolacji przepustowego przekładnika prądowego jest pokazana na rysunku 17, gdzie szyna prądowa pod wysokim napięciem oraz owinięty ekranem elektrostatycznym zestaw uziemionych rdzeni tworzą klasyczny układ walców koncentrycznych. Izolator osłonny może być wykonany jako ceramiczny bądź kompozytowy. Te ostatnie są nadal nieco droższe, jednakże przewiduje się zrównanie cen kiedy wzrośnie ilość zamówień na izolatory kompozytowe.



Rys. 17. Uproszczony szkic przepustowego przekładnika prądu izolowanego gazem SF_6 . Przedstawiono głowicę przekładnika i kolumnę izolacyjną wypełnioną gazem pod ciśnieniem. Izolator osłonny z materiału kompozytowego, tj. wewnętrzna rura z włókna szklanego nasyczonego żywicą i zewnętrzne klosze z gumy silikonowej

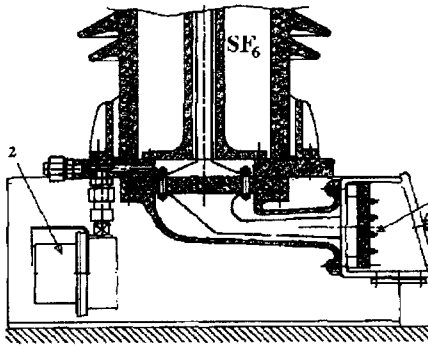
Przepustowy przekładnik prądowy produkcji włoskiej firmy *Passoni & Villa* pokazano na rysunkach 18 i 19. W tym przypadku zastosowano porcelanowy izolator osłonny oraz głowicę z membraną działającą w przypadku nadciśnienia gazu. Z uwagi na obniżenie wytrzymałości dielektrycznej izolacji, konstruktorzy starają się unikać izolatorów (*spacers*) umieszczonych w obszarze o wysokich napięciu dielektrycznym. W konsekwencji muszą rozwiązać trudny problem mechanicznego podparcia ciężkich rdzeni magnetycznych zamocowanych na wierzchołku długiej metalowej rury związanej jedynie z podstawą przekładnika.

Rozkład potencjału wzdłuż kolumny izolatora jest sterowany za pomocą jednego tylko ekranu, stanowiącego przedłużenie głowicy wewnątrz izolatora. Obecność tego ekranu przesuwają w dół linie ekwipotencjalne i pozwala na uzyskanie niemal równomiernego rozkładu potencjału na powierzchni izolatora,

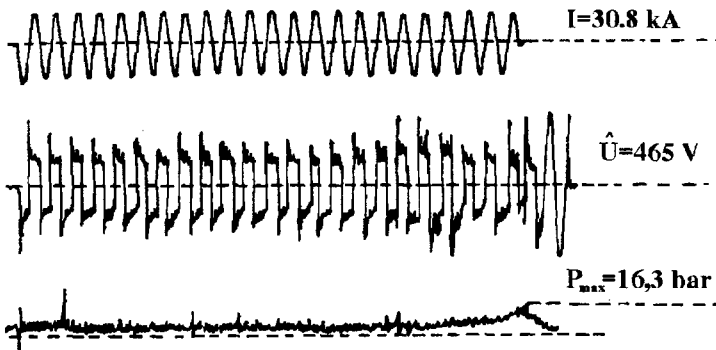


Rys. 18. Konstrukcja przepustowego przekładnika prądu produkcji firmy *Passoni & Villa*, izolowanego gazem SF_6 . 1 – membrana stanowiąca zawór bezpieczeństwa, 2 – rdzenie magnetyczne o potencjale ziemi, 3 – szyna z mierzonym prądem, 4 – wewnętrzny ekran sterujący rozkładem pola wzdłuż izolatora, 5 – ceramiczny izolator osłonny, 6 – rura wsporcza podtrzymująca rdzenie w głowicy przekładnika. 7 – manometry i zawór uzupełniania gazu [14]

Prąd zwarcia nagrzewa szynę prądową i powoduje przyrost ciśnienia gazu. Próby przeprowadzane przez wytwórnictwo wykazują, że ciśnienie gazu nie przekracza dopuszczalnego poziomu podczas zwarcia w sieci i gwarantują poprawne działanie prze-



Rys. 19. Konstrukcja dolnej części przepustowego przekładnika prądu izolowanego gazem SF_6 . 1 – płyta izolacyjna z zaciskami wyjściowymi, 2 – manometr oraz zawór uzupełniania gazu w przekładniku [14]



Rys. 20. Przyrost ciśnienia w przepustowym przekładniku prądu izolowanym gazem SF_6 podczas pomiaru prądu zwarcia ok. 30 kA. Nieznaczny wzrost ciśnienia ok. 10 bar został wywołany przez nagrzewanie się szyny prądowej [14]

kładnika. Przebieg prądu i ciśnienia gazu w przekładniku podczas próby zwarciowej pokazano na rysunku 20.

8. Niekonwencjonalne przekładniki optyczne

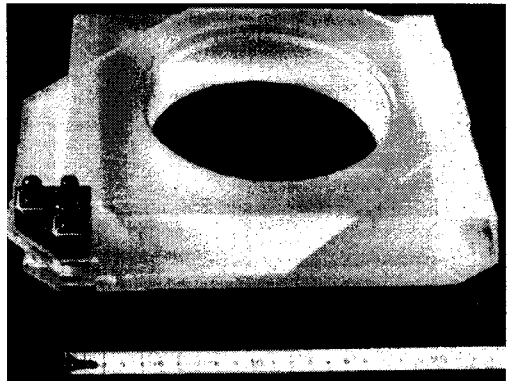
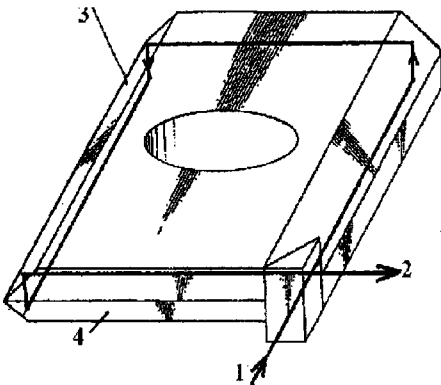
Wprowadzenie zabezpieczeń opartych o elementy półprzewodnikowe wyeliminowało potrzebę przenoszenia przez przekładnik znacznej mocy niezbędnej dla działania tradycyjnych przekaźników elektromechanicznych. Zadaniem nowoczesnych przekładników jest dostarczenie tym elektronicznym przekaźnikom sygnału będącego wierną repliką napięcia lub prądu po stronie pierwotnej. Drugim wymaganiem stawianym przekładnikom jest wysoka niezawodność, bowiem awaria bądź błędne wskazania przekładnika mogą mieć ogromne konsekwencje praktyczne, np. nie wyłączenie zwarcia przez wyłącznik i zniszczenie transformatora mocy [15, 16].

Koncepcja wykorzystania zjawiska magneto-optycznego w diamagnetycznym szkle flintowym została zaproponowana w latach 50 i prototyp takiego przekładnika prądowego został wykonany przez firmę *Merlin-Gerin*. Od tej pory wiodące wytwórnie

aparatów WN zbudowały kilkanaście różnych typów magneto-optycznych przekładników prądowych oraz przekładników napięciowych opartych o zjawisko Pockelsa w kryształach elektrooptycznych [17]. Szereg takich prototypów pracuje od kilku lat w stacjach WN różnych przedsiębiorstw energetycznych. W Ameryce TVA śledzi zachowanie w eksploatacji serii magneto-optycznych przekładników opracowanych przez firmę *Westinghouse*.

Dotychczas najlepsze wyniki próbnej eksploatacji uzyskano w przypadku magneto-optycznych przekładników prądowych, w których modulator jest wykonany z jednego bloku odpowiednio oszlifowanego szkła flintowego. Modulator taki pokazano na rysunku 21.

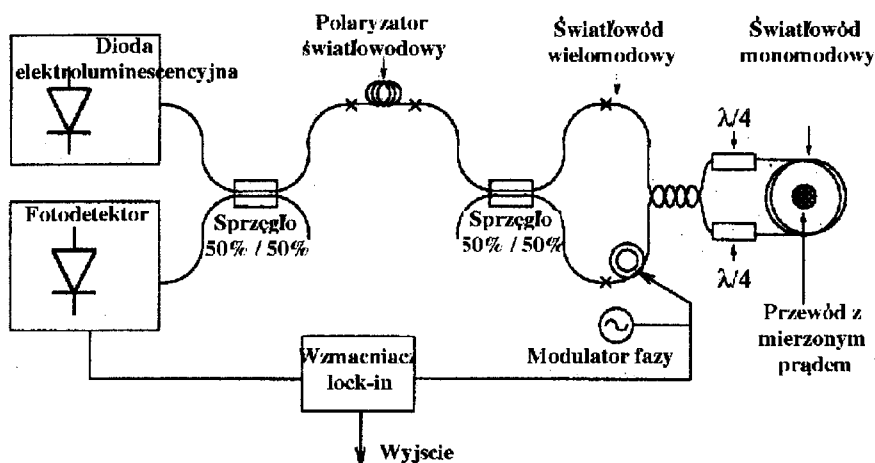
W przekładniku optycznym informacja jest przesyłana promieniem światła bądź światłowodem pomiędzy elementami znajdującymi się pod WN a uziemioną podstawą przekładnika. Układ izolacyjny stanowi kolumna izolatora osłonnego zazwyczaj wypełniona gazem SF₆. Równomierny rozkład napięcia wzdłuż powierzchni izolatora jest uzyskiwany przez odpowiednie ukształtowanie elektrody WN otaczającej głowicę przekładnika.



Rys. 21. Modulator magneto-optyczny przekładnika prądowego wykorzystującego efekt Faradaya. Szkic pokazuje zasadę działania modulatora, w którym promień spolaryzowanego światła obiega przewód z mierzonym prądem przechodzący przez otwór w modulatorze. Boczne powierzchnie modulatora są szlifowane pod tak dobranym kątem, że wewnętrzne odbicia promienia nie naruszają jego stanu polaryzacji. 1 - promień światła wchodzący do modulatora, 2 - promień wychodzący z modulatora, 3 - boczna powierzchnia szlifowana pod odpowiednim kątem, 4 - modulator. Poniżej pokazano zdjęcie takiego modulatora, wykonanego z jednego bloku szkła [18]

Od kilku lat prowadzone są próby zastąpienia klasycznego modulatora polaryzacji światła przez pole magnetyczne, wykonanego z bloku szkła flintowego, przez modulator z włókna szklanego nawiniętego na przewód z mierzonym prądem [19].

Aczkolwiek prace nad takim urządzeniem są jak dotychczas na etapie budowy prototypu, jednakże ta koncepcja spełnia szereg wymagań stawianych przekładnikom WN, a mianowicie: w pełni pasywny (bez zasilania elektrycznego) układ modulujący umieszczony w części przekładnika znajdującej się pod WN, brak elementów



Rys. 22. Schemat ideowy optycznego przekładnika prądowego wykorzystującego zjawisko Faraday'a. Zastosowano technologię światłowodową opracowaną przy budowie żyroskopu optycznego Sagnac'a [19]

optycznych wymagających sztywnego ustawienia i justowania drogi promienia światła i odporność na wibracje mechaniczne kolumny przekładnika.

Elementy układu optycznego, takie jak polaryzatory, sprzęgła, płytki ćwierćfalowe są obecnie dostępne w wykonaniu kompatybilnym z technologią światłowodową. Takie podzespoły optyczne zostały opracowane dla żyroskopów optycznych stosowanych do systemu nawigacyjnego rakiet balistycznych. Jednakże obecnie są one dostępne w handlu i stąd powstała koncepcja przekładnika prądowego wykorzystującego efekt Faraday'a w układzie optycznym żyroskopu działającego na zasadzie zjawiska Sagnac'a.

Na rysunku 22 przedstawiono układ optyczny prototypowego przekładnika prądowego opartego o zjawisko Faraday'a i wykorzystującego światłowodowe elementy układu optyczne wynalezione dla żyroskopu Sagnac'a. Zastosowane są światłowodowe sprzęgła przepuszczające np. 50% światła z jednego włókna do drugiego, polaryzatory światłowodowe, oraz inne klasyczne elementy układu optycznego wykonane w technologii włókien szklanych.

9. Wnioski

- Gwałtowne eksplozje przekładników o izolacji olejowej w porcelanowej osłonie były jednym z bardziej poważnych problemów w eksploatacji amerykańskich jak również europejskich sieci przesyłowych.
- Doraźne rozwiązanie tego problemu polega na ciągłym monitorowaniu zawartości wodoru w oleju przekładnika i automatycznym systemie alarmowym reagującym na nagły wzrost zawartości wodoru.

- Stopniowo wprowadzane są przekładniki w osłonie kompozytowej oraz przekładniki w izolacji gazowej SF₆.
- Jako rozwiązanie przyszłościowe rozważane są przekładniki optyczne wykorzystujące elementy technologii żyroskopów światłowodowych.
- Zagadnienie starzenia i stopniowej zmiany przekładni pojemnościowych przekładników napięcia zostało rozwiązane przez okresową kalibrację przekładników w stacji WN przy zastosowaniu przewoźnego laboratorium kalibracyjnego.

Literatura

- [1] **Voss H.-J.:** *Instrument Transformers for High Voltage Substations*, International Conference 'Transformer 97', Kołobrzeg, 8-10 maja 1997
- [2] **Kind D., Karner H.:** *High-Voltage Insulation Technology*, Vieweg, Braunschweig/Wiesbaden, 1985
- [3] **Matthias L.:** *Instrument Transformers*, pamflet firmy Haefely, Bazylea, 1987
- [4] **Malewski R., Douville J., Train D., Lucas H.R.:** *Measurements of Transient Response of EHV Capacitor Voltage Transformers*, IEEE-PES-A-78608-2, 1978
- [5] **Hillhouse D.L., Petersons O., Sze W.C.:** *A Prototype System for On-Site Calibration of Coupling Capacitor Voltage Transformers (CCVT's)*, IEEE Trans. Vol. PAS-98, No. 3, 1979, p. 1026
- [6] **Boyle J.R., Cummings H., Arp B.:** *The Tennessee Valley Authority's (TVA's) Experience and Action Plans with Freestanding Oil-Filled Current Transformers (CT's)*, IEEE Trans. Vol. PWRD-3, No. 4, 1988, p. 1769
- [7] **Current Transformer Failures in Service**, Dobbie Conference, Boston, Mass., 1985
- [8] **Saily J.:** *Multiple Explosions of Current transformers due to Poor Quality of Materials used and Inadequate Acceptance Tests*, CIGRE Symposium, Vienna, 1987, Paper 1020-01
- [9] **Dolan E., Gilles D., Kimbark E.W.:** *Ferro-Resonance in Transformer Switched with an EHV Line*, IEEE trans. Vol. PAS-91, No. 5, 1972, p. 1273
- [10] **Aggarwal R.P., et al.** *Failure of Electromagnetic Voltage Transformers due to Sustained Over-Voltage on Switching; An In-Depth Field Investigation and Analytical Study*, IEEE Trans. Vol. PAS-100, No. 11, 1981, p. 4448
- [11] **Gibeault J-P.:** *The Hydran Solution to Diagnosing Transformer Trouble*, Electricity Canada, No. 2., February, 1984
- [12] **Gibeault J-P., Kirkup J.:** *Early Detection and Continuous Monitoring of Dissolved Key Fault Gases in Transformers and Shunt Reactors*, E/EIC '95 Conference, Chicago, Ill., Sept. 20, 1995
- [13] **Kurtz M., Stone G. C., Daechsel P., Gupta B. K.:** *Fault Anticipator for Substation Equipment*, IEEE Trans. Vol. PWRD-2, No 3, 1978, s. 772
- [14] *SF₆ Current Transformers*, katalog firmy Passoni & Villa, Mediolan, 1995
- [15] **Hebner R., Malewski R., Cassidy E.:** *Application of Optical Methods to high Voltage Measurements*, IEEE Proceedings, Vol. 65, No. 11, 1977, p. 1524
- [16] **IEEE, PES, Power System Instrumentation & Measurements Committee, Working Group on Emerging Technologies & Fiber Optic Sensor Group:**

- Optical Current Transducers for Power Systems: A Review*, IEEE Trans. Vol. 9, No. 4, 1994, p. 1778
- [17] **Malewski R.**: *High Voltage Current Transformers with Optical Signal Transmission*, Optical Engineering, Vol. 20, No. 1, 1981, p. 54
- [18] **Fujimoto T.**, et al.: *Development of an Optical Current Transformer for Adjustable Speed Pumped Storage Systems*, IEEE Trans. Vol. PWRD-12, No. 1, 1997, s. 45
- [19] **Davis C.M.**: *Phase-modulated fiber-optic current transformer/voltage transformer*, EPRI Final Report EL-7421, Research Project 2734-3, 1991. Herndon, VA., Optical Technologies, Inc.