

Kazimierz Zakrzewski
Politechnika Łódzka, Łódź

TRANSFORMATORY NAJWIĘKSZYCH MOCY I NAPIĘĆ - - PROBLEMATYKA TECHNOLOGICZNA I BADAWCZA

HIGH POWER AND VOLTAGE TRANSFORMERS - - TECHNOLOGY AND RESEARCH

Abstract: The short history of transformer production development in Poland taking into account high power and high voltage transformers had been presented. The specific achievements of polish transformer industry in second part of XX century and share polish scientists were underlined. The basic applications of modern transformers with extreme parameters as a generator transformers, power transformers, high voltage direct current converter transformers, phase-shifting transformers, distribution transformers have been described in the paper. The mechanical, thermal and dielectric considerations have been underlined. The actual state and future development of transformer technology taking into account high temperature superconductors and nitrogen cooling of the windings. The actual research trends in the field of design procedure, especially methods of modeling and electromagnetic field and forces calculations, new measurement methods of diagnostics during exploitation e.g. frequency response analysis, partial discharges measurements, transformer oil investigation were cited.

1. Historia i stan obecny produkcji transformatorów w Polsce [7, 8, 9, 10, 11]

W 1917 r. dwaj bracia Stanisław i Feliks Jaroszyńscy założyli mały warsztat naprawy silników elektrycznych w Łodzi przy ul. Juliusza 14 (obecnie ul. Dowborczyków). W 1920 r. wynajęli większe pomieszczenie na terenie Elektrowni Łódzkiej przy ul. Przejazd 58 i zaczęli produkować pierwsze silniki elektryczne polskiej konstrukcji. W 1923 r. inż. Walenty Kopczyński, stryj znanego również konstruktora transformatorów mgr inż. Zbigniewa Kopczyńskiego, został zatrudniony u Braci Jaroszyńskich, jako kierownik techniczny S.A. Elektrobudowa. W 1935 r. zaprojektował on do wykonania przez Zakład kilka sztuk transformatorów suchych o przekładni 3000/125 V i mocach 20, 30 i 50 kVA. Zakład rozwijał się pomyślnie.

W 1926 r., już w nowych pomieszczeniach przy ul. Kopernika 56/58, rozpoczęto produkcję większych transformatorów o mocach do 200 kVA dla elektrowni w Łodzi, Poznaniu, Warszawie i Lwowie. W 1933 r. wykonano transformator trójzwojeniowy o mocy 3 MVA i napięciach 60/15/6 kV dla elektrowni Gródek. Aby można było przeprowadzić próby napięciowe w wytwórni, wykonano także transformator probierczy na napięcie 300 kV. W tym samym czasie rozwijała się produkcja transformatorów w fabryce w Żychlinie, działającej na licencji szwajcarskiej firmy BBC. W 1934 r.

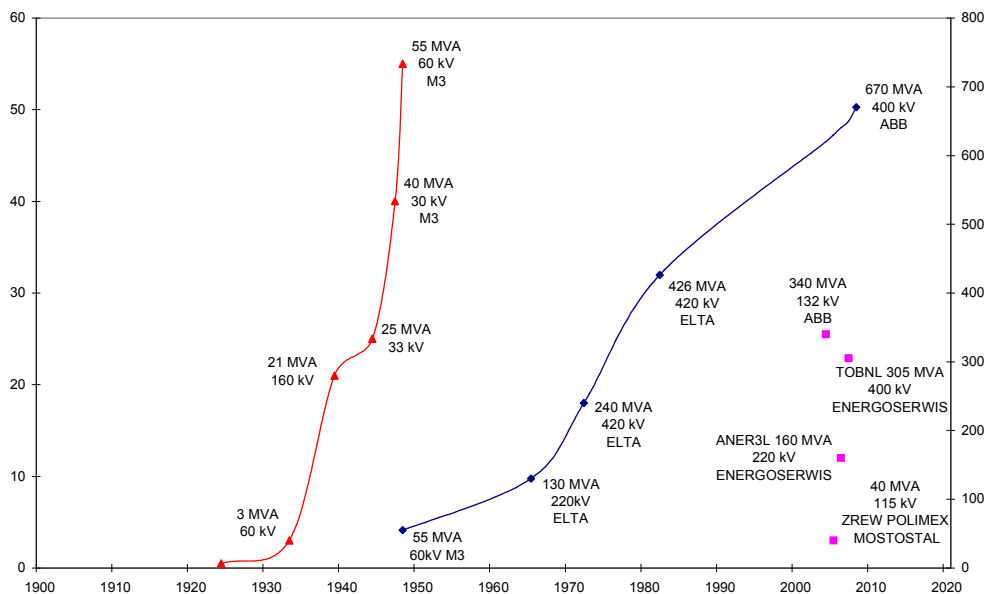
fabryka ta wygrała przetarg na transformator 12 MVA, 160 kV dla Zjednoczenia Elektrowni Okręgu Radomsko-Kieleckiego. Fabryka Elektrobudowa, przed II wojną światową, wyprodukowała największy transformator o mocy 21 MVA i przekładni 15/5 kV. W czasie okupacji niemieckiej, wykonano w Elektrobudowie transformator trójzwojeniowy o mocy 25 MVA i napięciach 33/5/5 kV dla elektrowni w Hanowerze.

Po upaństwowieniu fabryki w 1945 r., nastąpił dalszy rozwój produkcji transformatorów. W 1948 r. wyprodukowano transformator o mocy 40 MVA na 30 kV, w 1950 r. transformator trójzwojeniowy 40/20/30 MVA na napięcie 60 kV o mocy typowej 50 MVA (nagroda państwowa II-go stopnia).

Kolejny postęp, to transformatory 25/25/25 MVA oraz 48/48/48 MVA na napięcie 110 kV, których produkcję ukończono w 1954r. Dzięki usilnym staraniom prof. Eugeniusza Jezierskiego, Kierownika Katedry Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Politechniki Łódzkiej, zlokalizowano w Łodzi nową fabrykę transformatorów, przewidzianą w Narodowym Planie Gospodarczym na lata 1956-60, łącznie z fabryką aparatury trakcyjnej. Nazwa fabryki w skrócie – ELTA. Projektowaniem stacji prób i laboratorium wysokich napięć zajmowała się Katedra Maszyn Elektrycznych Politechniki

Łódzkiej oraz Zakład Wysokich Napięć Instytutu Elektrotechniki w Warszawie, kierowany przez doc. Zygmunta Hastermana. Zakupiona została licencja austriackiej firmy ELIN, dzięki której wykonano w 1965 r. transformator blokowy o mocy 130 MVA, 220 kV i autotransformator 160 MVA, 230 ±12%/120/10,5 kV. W tym samym czasie na terenie ELTY powstał Oddział Instytutu Elektrotechniki w Warszawie – Zakład Transformatorów, kierowany przez późniejszego prof. Macieja Kozłowskiego, wywodzącego się z Katedry Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Politechniki Łódzkiej. Zakład ten odegrał bardzo istotną rolę w rozwoju konstrukcji nowoczesnych jednostek transformatorowych, prowadząc prace studialne, badawcze i projektowe na użytek zamówień fabrycznych. Po wielu latach został przejęty przez Instytut Energetyki w Warszawie, a obecnie w okrojonej postaci zajmuje się diagnostyką i monitoringiem transformatorów. W 1966 r. powstał transformator blokowy polskiej konstrukcji o mocy 240 MVA, początkowo na napięciu 126 kV, a następnie na napięciu 250 kV (nagroda państwowa II-go stopnia). W 1971 r. wyprodukowano transformator blo-

kowy dla Elektrowni Turów o mocy 240 MVA i napięciu GN 420 kV, w 1974 r. transformator sieciowy 250 MVA, 400/123 ±12%/31,5 kV. Wymagało to zainstalowania w fabryce, do prób, trójfazowej baterii kondensatorów o mocy 95 MVA_r, wspomagającej generator 35 MVA oraz skonstruowania dławika o jedno- i trójfazowej symetrycznej lub niesymetrycznej obciążalności, do równoległego połączenia z transformatorem badanym, stanowiącym duże obciążenie pojemnościowe dla generatora napięcia przemiennego indukowanego. W tej pracy udział wzięła także Katedra Maszyn Elektrycznych i Transformatorów Politechniki Łódzkiej. Zainstalowano nowy generator udarowy firmy HAEFELY, który pozwalał uzyskać: pioruny o parametrach 2400 kV, 240 kJ oraz przepięcia łączeniowe – 2280 kV, 215 kJ, z elektronicznym układem ucinającym i dzielnikiem napięcia. W 1984 r. powstał transformator blokowy (pięcikolumnowy) o mocy 426 MVA i przekładni 420/22 kV, a w 1985 r. autotransformator sieciowy regulacyjny 500 MVA, 410/245 ±10%/22 kV. Fabryka ELTA została sprywatyzowana i przejęta przez koncern ABB w 1992 r.



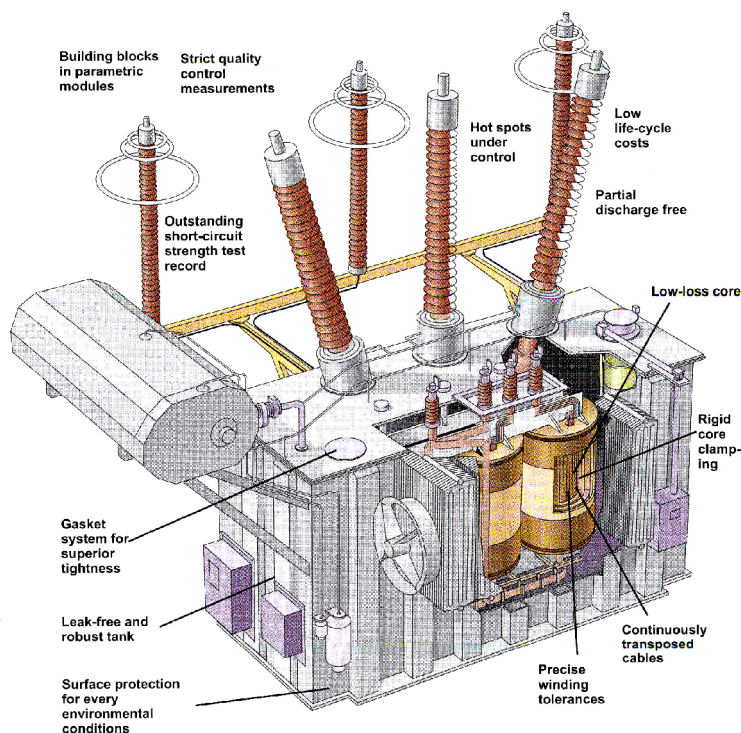
Rys. 1. Rozwój produkcji transformatorów największej mocy w Polsce w XX i XXI wieku

Uległa następnie modernizacji budowlanej posiadzka przystosowana do transportu na poduszce powietrznej. Zorganizowano nowe działy produkcyjne, zmieniono wyposażenie. Modernizacja umożliwiła produkcję transformatorów o mocy ponad 300 MVA. Uruchomiono Zakład Produkcji Elementów Izolacyjnych, dla wszystkich fabryk ABB w Europie, rozwijano produk-

cję transformatorów rozdzielczych olejowych i żywicznych. W 2004 r. wyprodukowano transformator blokowy o mocy 340 MVA, 132/17,5 kV dla elektrowni jądrowej SIZEWELLA, na wschodnim wybrzeżu Suffolk w Wielkiej Brytanii.

Największe osiągnięcia ostatnich lat, to:

- a) transformator blokowy 670 MVA, 400/20 kV dla Elektrowni Kozienice – pięciokolumnowy – ze względu na moc,
- b) transformator sieciowy 250 MVA, 500/121/38,5 kV- ze względu na napięcie.



Rys. 2. Konstrukcja transformatorów TRAFOS STAR (ABB) [2]

Należy również wymienić osiągnięcia firmy Energoserwis w Lublińcu, w zakresie projektowania oraz produkcji nowoczesnych jednostek transformatorowych. W 2006 r. wykonano transformator blokowy (pięciokolumnowy) 305 MVA, 400 kV, dla Elektrowni Turów. Układ izolacyjny wykonano przy współpracy ze szwajcarską firmą Weidmann (odpływ modułarny). W tym samym roku wykonano autotransformator 160 MVA, 220 kV o wzmocnionej wytrzymałości zwarciowej w porównaniu z uszkodzonym autotransformatorem firmy Elin o mocy 125 MVA, 220 kV. Firma ta wykonuje także transformatory sieciowe średniej mocy np. 40 MVA, 110 kV.

Firma Polimer Mostostal S.A. ZREW Transformatory w Łodzi, wykonuje nowe oraz modernizuje stare transformatory o mocach do 75 MVA i napięciach 121 kV, w tym także trójzwojeniowe np. 40/40/13 MVA, 115/16,5/6,6 kV.

Fabryka, o dużej tradycji, w Żychlinie oferuje transformatory trójfazowe o mocy do 90 MVA. Prowadzi także produkcję transformatorów małej mocy do 2,5 MVA oraz specjalizuje się w takich wykonaniach specjalnych jak trans-

formatory piecowe do 40 MVA, przekształtnikowe i trakcyjne do 10 MVA, itp.

W Polsce istnieje także szereg wytwórni produkujących transformatory rozdzielcze i specjalne o znacznie mniejszych mocach i napięciach górnych, w wykonaniu olejowym i żywicznym.

2. Podstawowe rodzaje transformatorów o parametrach ekstremalnych [1, 2, 18, 20]

Do podstawowych zastosowań transformatorów największych mocy i napięć należą:

2.1. Wyprowadzenie mocy z elektrowni

Wyprowadzenie mocy z generatorów elektrowni do sieci, wymaga transformacji stosunkowo niskiego napięcia generatora na wysokie napięcie przesyłowe, z możliwością regulacji napięcia wyjściowego pod obciążeniem. W celu realizacji tego zadania buduje się **transformatory podwyższające napięcie, zwane blokowymi**. Transformatory budowane na świecie mogą osiągać napięcia GN na poziomie 800 kV. W tych transformatorach jest stosowany z reguły układ połączeń uzwojeń YNd. Połączenie uzwojenia DN w trójkąt jest uzasadnione sto-

sunkowo małą impedancją dla składowej zerowej oraz mniejszą wartością prądów fazowych w stosunku do przewodowych. Uzwojenie GN ma skutecznie uziemiony punkt zerowy, co umożliwia obniżenie poziomu izolacji tego punktu względem początku uzwojenia. Transformator blokowy jest połączony szynoprzewodami na stałe z generatorem i wymaga ochrony przed przewzbudzeniem w stanie nagłego zrzućtu obciążenia. Należy zwrócić uwagę na konieczność ochrony przepięciowej uzwojenia DN w postaci odgromników wraz z kondensatorami między końcami uzwojenia i ziemią. Przepięcia indukowane są szczególnie niebezpieczne, jeśli uzwojenie DN jest odłączone od generatora.

2.1. Łączenie linii wysokich napięć prądu przemiennego

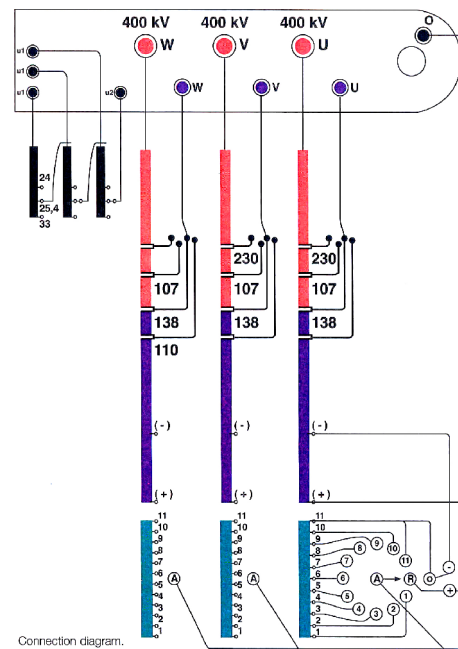
W tym celu buduje się transformatory i autotransformatory sprzęgające, zwane sieciowymi, podwyższające i obniżające napięcie wraz z regulacją napięcia pod obciążeniem.

Moc transformatorów sprzęgających może osiągać wartość 1000 MVA. W większości są to autotransformatory, jako rozwiązania oszczędnościowe.

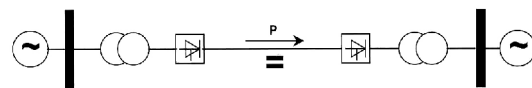
Najczęściej istnieje możliwość regulacji napięcia po obu stronach uzwojenia transformatora, co umożliwia regulację mocy biernej między połączonymi systemami. Izolacja uzwojeń jest stopniowana. W przypadku transformatorów, regulacja napięcia odbywa się dzięki uzwojeniom regulacyjnym dołączonym od strony punktu neutralnego. W przypadku autotransformatorów, regulacja następuje po stronie DN. Firma ABB opracowała tzw. Polytransformer, który jest autotransformatorem regulacyjnym o wielu przekładniach: 400/230, 400/138, 400/110 kV. Uzwojenie połączone w trójkąt ma napięcia: 33, 25,4, 24 kV. Moc przechodnia maksymalna 450 MVA. Układ połączeń YNad11.

2.3. Łączenie systemów prądu przemiennego i stałego

Wymaga to budowy transformatorów przekształtnikowych, zasilających z jednej strony układ prostownikowy połączony z linią przesyłową prądu stałego wysokiego napięcia (High Voltage Direct Current – HVDC) oraz transformujących napięcie falownikowe na napięcie wysokiego systemu odbiorczego.



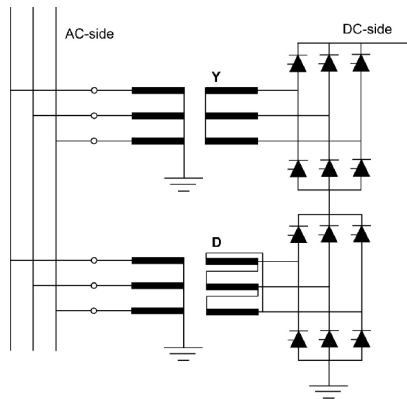
Rys. 3. Autotransformator sprzęgający uniwersalny POLYTRANSFORMER (ABB) [18]



Rys. 4. Układ przesyłowy HVDC [2]

Straty mocy przy takim przesyśle są mniejsze niż przy prądzie przemiennym, a poza tym można łączyć ze sobą systemy niesynchroniczne. Transformatory przekształtnikowe zapewniają izolację galwaniczną układu DC i AC. Ze względu na współpracę transformatora z przekształtnikiem pojawiają się nieparzyste harmoniczne prądu w uzwojeniach (5, 7, 13 i wyższe), które są powodem strat dodatkowych – obciążeniowych.

Na rysunku 5 przedstawiono schemat połączeń układu transformatorów z zaworami układu 12-pulsowego. Po stronie sieci zasilającej AC, nie występują w prądzie wyższe harmoniczne wspomnianych rzędów, gdyż zamykają się przez uzwojenia obydwu transformatorów, powiększając straty obciążeniowe. Harmoniczna 5-ta może osiągać nawet wartość 20% harmonicznej podstawowej. Na stacji przetwarzającej prąd stały na prądzie przemiennym istnieje w zasadzie możliwość przetwarzania prądu na dowolną częstotliwość narzuconą przez system AC. Jak wynika z rysunku 5, napięcia po stronie zaworów są przesunięte względem siebie o 30° . Napięcie wyprostowane w stanie jałowym wynosi



Rys. 5. Układ prostujący 12-pulsowy HVDC [2]

$$U_{DC} = \frac{6\sqrt{2}}{\pi} \cdot U_{AC} \cdot \cos \alpha \quad (1)$$

gdzie: U_{DC} – napięcie stałe wzdłuż szeregowo połączonych zaworów w mostkach, U_{AC} – napięcie międzyfazowe po stronie zaworów od strony transformatora (wartość skuteczna), α – kąt opóźnienia zapłonu (kąt sterowania).

Dla $\alpha = 0$, otrzymuje się $U_{DC} = 2,7 U_{AC}$. Podczas obciążenia $U_{DC} = 2,4 \div 2,5 U_{AC}$.

Uzwojenie od strony zaworu, w dolnym uzemnionym mostku, znajduje się na ok. $\frac{1}{4}$ potencjału linii DC, a uzwojenia od strony zaworu dla górnego mostka, na poziomie $\frac{3}{4}$ potencjału linii.

Rozkład napięcia między izolacją stałą i ciekłą transformatora przy prądzie przemiennym jest pojemnościowy. Oznacza to, że rozkład napięcia i natężenia pola elektrycznego jest określony, między innymi, przenikalnością materiałów. Przy prądzie stałym, rozkład ten jest określony przez rezystywność materiałów. Zastosowane materiały są te same, tzn. olej i produkty celulozy. Z uwagi na to, że rezystywność izolacji stałej jest znacznie większa niż oleju transformatorowego, prawie całe napięcie odkłada się na izolacji stałej. W konsekwencji, transformatory HVDC mają znacznie większe proporcje izolacji stałej (blisko trzykrotnie więcej) w porównaniu z transformatorami AC. Aktualne systemy przesyłowe DC przewidziane są na napięcia ± 600 kV. Transformatory są zaopatrzone w przełączniki zaczełów po stronie GN w celu regulacji napięcia wtórnego. Dodatkowo zachodzi konieczność dokładnego kontrolowania impedancji zwarcia transformatorów. Odchyłki impedancji, między poszczególnymi uzwojeniami fazowymi, nie mogą być większe niż $\pm 3\%$ od wartości średniej. Wymaganie to wynika z potrzeby eliminowania wyższych harmonicznych w układzie mostka 12-pulsowego.

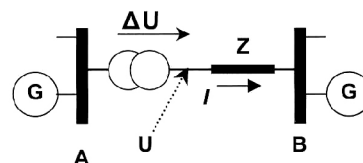
Jeżeli wymagania dotyczące ciężarów i wymiarów transformatorów trójfazowych nie mogą być spełnione, wtedy istnieje możliwość zastosowania trzech jednostek jednofazowych. Największa instalacja tego typu, firmy ABB, istnieje w USA (Sylmar East) o łącznej mocy 620 MVA i napięciu GN 230 kV.

2.4. Regulacja przepływu mocy w liniach przesyłowych i połączonych systemach

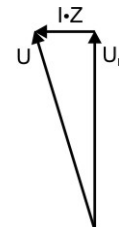
Do tego celu buduje się przesuwniki fazowe (Phase - Shifting Transformers, PSTs), umożliwiające regulację kąta przesunięcia napięcia wyjściowego transformatora względem napięcia zasilającego.

Transformatory te są używane do sterowania przepływem mocy czynnej między dwoma dużymi, niezależnymi systemami lub do wyrównywania obciążeń w liniach równoległych, o różnych impedancjach, łączących dwa systemy, jeśli rozkład mocy w liniach jest nierównomierny.

a)



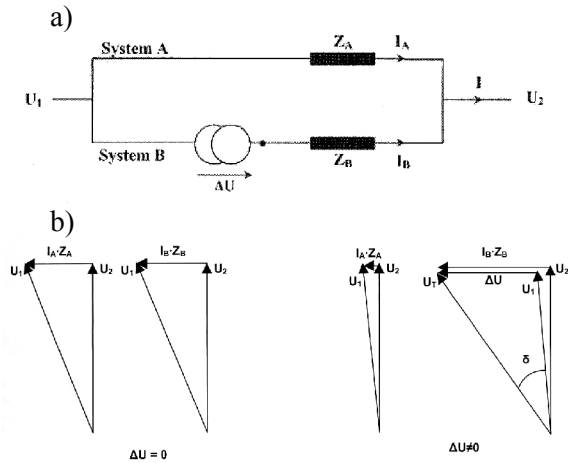
b)



Rys. 6. Linia z przesuwnikiem fazowym (a) i wykres wskazowy (b) [2]

W przypadku pierwszym, jak na rysunku 6a, aby moc czynna była przekazywana od sieci A do B, napięcie U za transformatorem musi wyprzedzać napięcie po stronie B. Impedancję transformatora pomijamy. Napięcia U_A i U_B są w przybliżeniu równe. Jeżeli impedancja linii Z jest równa reaktancji X , to wykres wskazowy przedstawiać się będzie jak na rysunku 6b. Jeżeli napięcie U opóźnia się względem U_B , to moc czynna przekazywana jest od strony A do B.

W przypadku dwóch linii (rys. 7), jeśli $\Delta U = 0$, to wskutek nierówności $Z_A < Z_B$, $I_A > I_B$, gdyż różnica $U_1 - U_2 = I_A Z_A = I_B Z_B$. Przyjmując, że



Rys. 7. Układ dwóch linii równoległych z przesuwnikiem fazowym (a) i wykresy wskazowe napięć (b) [2]

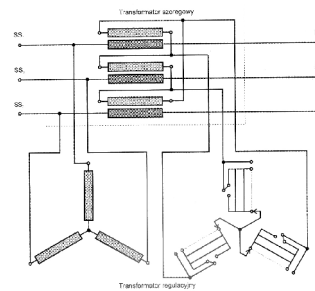
obydwie linie mają jedynie reaktancje, stwierdzamy, że aby doprowadzić do równości prądów, należy wprowadzić napięcie dodatkowe do linii B, zgodnie z rysunkiem 7b, które jest napięciem U_T poza transformatorem. Jeżeli $Z_B > Z_A$, to zwrot ΔU musi być przeciwny, aby zapobiec zbyt dużej wartości prądu I_B w stosunku do pożądanego obciążenia. Na kąt przesunięcia ma wpływ współczynnik mocy prądu obciążenia oraz impedancja transformatora. Należy zauważyć, że transformator spełniający rolę przesuwnika fazowego wpływa na wymianę mocy czynnej i biernej między systemami lub gałęziami (liniami łączącymi) systemów. Przykładowy schemat połączeń uzwojeń przesuwnika fazowego o regulacji kwadraturowej za pomocą jednego uzwojenia regulacyjnego (odwracalnego) przedstawia rysunek 8a.

Przesuwnik zawiera dwa transformatory, na dwóch różnych rdzeniach. Jeden transformator nosi nazwę transformatora dodatkowego-szeregowego, gdyż jedno z jego uzwojeń włączone jest w sieć, drugi nazywa się transformatorem wzbudającym lub regulacyjnym. Transformator regulacyjny ma dwa uzwojenia połączone w gwiazdę. Uzwojenie GN jest zasilane z sieci. Uzwojenie DN współpracuje z przełącznikiem zacsepów pod obciążeniem. Transformator regulacyjny może mieć jedno lub więcej uzwojeń o zmiennej liczbie zwojów. Transformator szeregowy ma po dwa niezależne uzwojenia na każdej kolumnie rdzenia. Jego uzwojenie nieskojarzone GN jest włączone w szereg z siecią, w której reguluje się przesunięcie fazowe. Przez to uzwojenie przepływa pełny prąd sieci. Uzwojenie DN jest skojarzone w trójkąt i zasilane

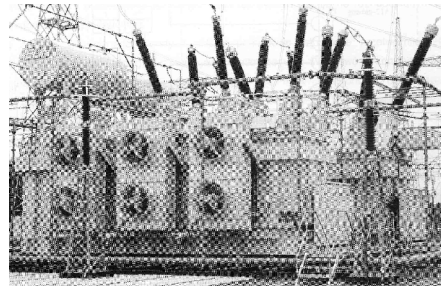
z uzwojenia regulacyjnego transformatora wzbudającego. Połączenie poszczególnych faz uzwojenia regulacyjnego oraz zasilanego z niego uzwojenia DN transformatora szeregowego jest takie, aby uzyskać przesunięcie fazowe równe $\pi/2$ względem napięcia sieci. Napięcie z uzwojenia GN transformatora wzbudającego, transformuje się do uzwojenia regulacyjnego i poprzez uzwojenie DN transformatora szeregowego, wytwarza żądane napięcie ΔU w uzwojeniu szeregowym.

Przy mniejszej mocy jednostek, oba transformatory znajdują się we wspólnej kadzi, przy większej oddzielnie.

a)



b)



Rys. 8. Schemat połączeń przesuwnika (a) i widok ogólny zestawu firmy ELIN (b) [20]

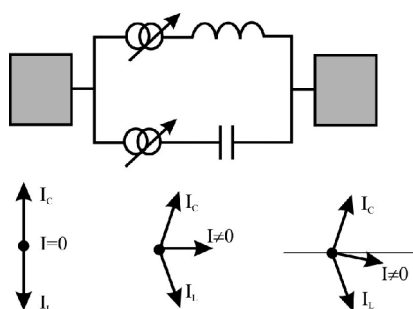
W Polsce, jednym z najważniejszych węzłów krajowego Systemu Energetycznego jest stacja 400/220/110 kV Mikułowa, niedaleko Elektrowni Turów. W tej stacji, od 2001 r. pracują dwa nowoczesne zespoły firmy ELIN, obejmujące w zestawie:

- autotransformator główny z podobciążeniową regulacją napięcia o mocy 500/500/75 MVA i przekładni 410/245 kV $\pm 10\%$ - 12%/15,75 kV, grupa połączeń YNa0d11, napięciu zwarcia GN-DN na zaczeple znamionowym 10%, zaczeple skrajny plusowy 11,4%, zaczeple skrajny minusowy 10,8%, waga ok. 293 t;
- przesuwnik fazowy o mocy przechodniej 500 MVA, mocy własnej każdego z transformatorów przesuwnika ok. 100 MVA, zakres regulacji kąta $\pm 10,1^\circ$, napięciu zwarcia widzia-

nym od strony uzwojenia szeregowego: zaczepek znamionowy ok. 0,9%, zaczepek skrajne ok. 1,9%, waga ok. 321 t.

Firma ABB opatentowała tzw. regulator mocy międzyfazowej (Interface Power Controller), przedstawiony ideowo na rysunku 9.

W układzie tym, prąd między punktem A i B rozdziela się na gałąź indukcyjną i pojemnościową tak dostrojone, że przepływ mocy między gałęziami jest blokowany, jeżeli między gałęziami nie ma przesunięcia fazowego. Realne sterowanie mocą osiąga się poprzez wprowadzenie symetrycznego przesunięcia fazowego w obydwu gałęziach.



Rys. 9. Układ zwany Interface Power Controller (ABB) [1]

Przy zdefiniowanej asymetrii przesunięcia fazowego, układ może działać jako źródło mocy biernej lub przestać działać. Jako filtr, może ograniczać ewentualne prądy awaryjne, przewodząc wyselekcjonowany prąd obciążenia. Jeżeli potrzebny jest tylko wzrost lub zmniejszenie przepływu mocy, jeden z przesuwników fazowych może być wyeliminowany z powyższego układu.

3. Technologia transformatorów mocy

Transformatory mocy podlegają od lat, może powolnym, ale postępującym usprawnieniom, wpływającym na niezawodność pracy, zmniejszenie strat przez wprowadzenie ulepszonych materiałów i wyposażenia oraz doskonalenie procesów wytwórczych.

3.1. Rdzenie magnetyczne [14]

W celu ograniczenia strat w rdzeniach stosuje się blachy stalowe-krzemowe o grubości 0,23-0,3 mm i domenach drobnoziarnistych zorientowanych. W miarę potrzeb wykorzystuje się inne rdzenie z blachy krzemowej zimnowalcowanej o kryształach zorientowanych (CRGO Cold Grain Oriented Silicon Steel). Rdzenie amorficzne nie znalazły zastosowania w transformatorach największych mocy, ze względu na

trudności wykonania rdzenia o dużej wytrzymałości mechanicznej i braku dostępności taśm o odpowiednio dużych wymiarach w płaszczyźnie rdzenia. Producenci stali, koncentrują się obecnie na redukcji różnorodności odmian, właściwości oraz różnych wymiarów zrolowanej blachy.

3.2. Materiały przewodowe

Większość transformatorów ma uzwojenia miedziane. Uzwojenia formowane są różnie. Najczęściej stosowane są układy przewodów dwu- lub trzykrotnie przeplecionych oraz kable transponowane, w których zachodzi ciągła zmiana pozycji przewodów w przekroju kabla (Continuously Transposed Cable CTC). Wiązane żywicą przewody transponowane, owijane papierem lub oplotem bawełnianym, pokryte warstwą srebra lub bez niej, są stosowane rutynowo dla zwiększenia wytrzymałości mechanicznej, zwłaszcza podczas zwarć. Kosztowne kable transponowane zapewniają obniżenie strat obciążeniowych.

3.3. Układy izolacyjne - ciecze i izolacja stała [11, 14, 15]

Większość transformatorów jest wypełniana olejem, a izolacja uzwojeń oparta jest na celulozie. Jest to układ stosunkowo niezawodny i tani. Wprowadzone do eksploatacji oleje mineralne izoparafinowe mogą przy niezmienniej lepkości pracować w niskich temperaturach i mają lepsze właściwości odprowadzania ciepła. Syntetyczne oraz naturalne estry ciekłe, to nowe materiały, mniej szkodliwe dla środowiska, przy ewentualnym wypływie z kadzi. Mają one lepsze powinowactwo chemiczne do wilgoci (wody) niż oleje mineralne i nadają się szczególnie do układów izolacyjnych zawierających celulozę. Zarówno izoparafiny i estry nie zawierają siarki, co również należy zapisać na ich korzyść. W transformatorach stosuje się także dobrze wysuszony materiał izolacyjny stały, pochodzenia celulozowego. Poprawiono znacznie wytrzymałość termiczną papieru oraz zwiększono jego gęstość poprzez silne sprasowanie, a przez to jego wytrzymałość mechaniczną.

3.4. Wytwarzanie transformatorów [14]

Produkcja transformatorów największych mocy i napięć ma charakter jednostkowy lub małoseryjny. O ile system cięcia blach jest w dużym stopniu zautomatyzowany, to składanie blach

rdzenia odbywa się ręcznie. Nawijanie uzwojeń w większości odbywa się na nawijarkach pionowych, chociaż w dalszym ciągu używane są nawijarki poziome. Promieniowa ścisłość uzwojeń jest zapewniona przez urządzenia do naciągu przewodów i doświadczenie nawijaczy. Czasami podczas nawijania stosuje się nacisk osiowy. Cewki i uzwojenia fazowe są suszone z tzw. odparowaniem dla uzyskania jednolitego wysuszenia. Mogą być suszone bez ciśnienia lub pod ciśnieniem, jak również z impregnacją olejową zapewniającą stabilność procesu suszenia. Czasochłonny jest montaż i połączenia końcówek uzwojeń, zwłaszcza podczas lutowania twardego.

Obróbka oleju wymaga dokładnego osuszenia, odgazowania i usunięcia drobnych zanieczyszczeń stałych. Transformatory są wyposażone w izolatory przepustowe, przełączniki zaczepów pod obciążeniem, przekładniki prądowe, konserwatory oleju i wskaźniki temperatury. Izolatory przepustowe kondensatorowe mogą być bezolejowe i olejowe, epoksydowe z papierem nasączonym żywicą i rdzeniem porcelanowym, osłonami z gumy silikonowej i polimerów. Przełączniki zaczepów pod obciążeniem są często wbudowywane do wnętrza transformatora w obudowie hermetycznej w postaci szczelnego cylindra z żywicy epoksydowej wzmocnionego włóknem szklanym. Olej przełącznika nie styka się z olejem transformatora. Nowe rozwiązania zawierają próżniowe układy gaszeniowe, co przedłuża trwałość przełącznika. Przełączniki zaczepów ze stykami pracującymi w oleju wyposażone są często w układy filtrujące. Olej odsiarczony i odwodniony zmniejsza opalanie styków. Układy ochrony oleju są zaopatrzone w konserwatory z komorami powietrznymi, z osłoną azotową i hermetyzowaną kadzią. Zastosowano generatory azotu, wykorzystujące technologię membran separacyjnych. W ten sposób zlikwidowano konieczność ciągłej wymiany butli z ciekłym azotem.

Szczególnym problemem jest transport transformatorów największych mocy i napięć. Ciekawym rozwiązaniem transportu w stanie demontażu transformatora i składanie na miejscu przeznaczania opracowała firma Hitachi [6].

3.5. Wytrzymałość zwarciova transformatorów [5, 11]

Najbardziej popularną konstrukcją są transformatory „rdzeniowe”, o rdzeniu ustawionym w pozycji pionowej kolumn. Mają one uzwoje-

nia cylindryczne. Siły powstające podczas zwarcia powodują, że uzwojenie zewnętrzne jest rozciągane, a uzwojenie wewnętrzne ściskane pod wpływem sił promieniowych. W przypadku różnic wysokości uzwojeń powstają składowe osiowe siły, dążące do wzajemnego przesunięcia uzwojeń wzdłuż osi kolumny. Transformatory o parametrach ekstremalnych nie mogą być badane w wytwórni w stanie zwarcia przy pełnym napięciu, z powodu braku odpowiednich możliwości zasilania. Dlatego wymagają odpowiednich obliczeń na etapie projektowania i właściwego zaprojektowania układu uzwojeń. Istotną rolę odgrywa wytrzymałość mechaniczna tulei izolacyjnych, klinów podłużnych i przekładek izolacyjnych poprzecznych. Szczególnie ważna jest wytrzymałość mechaniczna przewodów uzwojenia GN na rozerwanie. Siły osiowe są przenoszone na podkładki rozmieszczone promieniowo, pierścienie prasujące i na końcach uzwojeń przenoszone są na belki jarzmowe. Siły te ściskają materiał przekładek, co z czasem powoduje luz w uzwojeniach. Skutkiem sił osiowych może dojść do deformacji (przekrzywienia) przewodów profilowych w uzwojeniach, z powodu zwiększonego nacisku na powierzchnie mniejszego boku przewodów składowych wiązki.

Bardziej odporny na siły zwarciove jest układ z tzw. płaszczową konstrukcją rdzenia, który obejmuje uzwojenia w pozycji poziomej, a cewki swym układem przypominają uzwojenia krążkowe. Wtedy, siły mają głównie charakter osiowy, ale działając na dużej powierzchni cewek spiralnych są łatwiejsze do opanowania[2].

3.6. Wytrzymałość dielektryczna [3, 4, 19]

Sprawa właściwej izolacji transformatora, zwłaszcza przeznaczonego na największe napięcia, jest przedmiotem głębokich studiów na etapie projektowania. Transformator musi długotrwale znosić natężenia pól elektrycznych przemiennych, być odpornym na przepięcia atmosferyczne (udarowe-piorunowe) i przepięcia łączeniowe sieciowe. Szczególną troską jest rozkład napięcia udarowego, w pobliżu zaatakowanego zacisku liniowego transformatora. Wymaga to odpowiedniego wzmocnienia i kształtowania układu izolacyjnego, wraz z ekranami elektrostatycznymi. Jak wspomniano wcześniej izolacja uzwojeń jest oparta na celulozie miękkiej nasyconej olejem, papierze twardym (preszpanie) oraz oleju wypełniającym

wnętrze transformatora. Obliczenia rozkładów pól mają charakter polowy z wykorzystaniem równania Laplace'a.

Rozkład natężeń pól elektrycznych przy prądzie przemiennym ma charakter pojemnościowy. Wszelkie szczeliny powietrzne w układzie izolacyjnym mogą stanowić zaczyn wyładowań niezupełnych, które mogą doprowadzić w przyszłości do lokalnego przebicia izolacji. Obserwuje się także z tego powodu awarie układu izolacyjnego izolatorów najwyższych napięć.

3.7. Wytrzymałość termiczna [19]

Zagadnienie nagrzewania i chłodzenia transformatorów, w sensie globalnym, jest rozwiązywane jak dotychczas z dobrym skutkiem. Dotyczy to układu kanałów chłodzących uzwojenia i rdzenia wewnątrz transformatora, wspomaganie chłodzenia naturalnego za pomocą oleju w sposób wymuszony przepompowywaniem oraz nadmuchem wentylatorowym na radiatory. Problemem pozostają miejsca wzmożonego nagrzewania wskutek strat generowanych polem magnetycznym rozproszenia w stalowych częściach konstrukcyjnych i fragmentach uzwojeń transformatora. Miejsca lokalnych przegrzań mogą stanowić przyczynę rozwoju znacznie większych awarii transformatora, dlatego „poszukiwanie” tych miejsc na etapie projektowania odgrywa bardzo istotną rolę. Zagadnienie to łączy się bezpośrednio z obliczeniami elektromagnetycznymi transformatora.

3.8. Kierunki działań przyszłościowych o charakterze materiałowym [14, 26]

Prowadzi się badania nad zmniejszeniem stratności blach oraz zmniejszeniem właściwości magnetostrykcyjnych, w celu obniżenia poziomu hałasu wzbudzonego rdzenia magnetycznego. W USA prowadzone są badania nad blachami o znacznie większych indukcjach nasycenia. Pracuje się nad metodami niezależnego sterowania hałasem poprzez aktywną lub pasywną kompresję drgań magnetostrykcyjnych. Minimalizacja strat w rdzeniu ma duże znaczenie ekonomiczne, gdyż wymienione straty wydzielają się zawsze w stanie wzbudzenia transformatora.

Prowadzone są badania dotyczące drugiej generacji taśm nadprzewodnikowych, wysokotemperaturowych (High Temperature Superconductors HTS), wykorzystujący tlenek itrowo-barowo-miedziany (YBCO), z przeznaczeniem

na uzwojenia transformatorów. Umożliwi to zwiększenie gęstości prądu w uzwojeniach, lecz wymagać będzie umieszczenia uzwojeń w kąpeli ciekłego azotu. Specjalny program badawczy został uruchomiony pod patronatem Ministerstwa Energetyki USA. Przewiduje się opracowanie cieczy izolacyjnych – niepalnych, nieszkodliwych dla środowiska poprzez możliwość rozkładu biologicznego. Nowe oleje powinny być odporne na utlenianie i mieć lepsze właściwości termiczne, przy odpowiednich właściwościach dielektrycznych.

W odniesieniu do izolacji stałej, pracuje się nad zastosowaniem poliamidów włóknotwórczych, polietermidem (PEI), siarczkiem polifenylenu (PPS), polietylenu, naftalatu (PEN), papierem laminowanym polipropylenem (PPLP), polietylenem, itp. Duże nadzieje wiąże się z materiałami tworzonymi w ramach tzw. nanotechnologii. Wykazują one dużą odporność na prądy pełzające i mają dużą wytrzymałość elektryczną. Przy drobnych uszkodzeniach podlegają samoregeneracji.

Transformatory eksperymentalne nadprzewodnikowe wykorzystują ciekły azot jako ciecz chłodzącą i izolacyjną. Prowadzone są także prace w zakresie stabilizacji dielektryków stałych nasycanych ciekłym azotem.

4. Problematyka badawcza

Aktualne zagadnienia badawcze, które dotyczą transformatorów obejmują sferę projektowania, badań w wytwórni i niezwykle istotnej gospodarczo sfery eksploatacji.

Podstawowe wymagania, które musi spełnić transformator w czasie pracy dotyczą wytrzymałości mechanicznej, elektrycznej i termicznej. Na czoło wysuwają się zatem zagadnienia elektromagnetyczne, będące przyczyną powstawania strat podstawowych i dodatkowych, sił zwarciovych w wyniku ewentualnych awarii, zagadnienia wytrzymałości dielektrycznej, związane z rozkładem pól potencjalnych i rozkładów powstających w wyniku elektryzacji strumieniowej, a także zjawiska związane z wyładowaniami niezupełnymi. Zagadnienia nagrzewania i skutecznego chłodzenia transformatorów, a zwłaszcza właściwej obciążalności w różnych warunkach klimatycznych są przedmiotem ciągłych badań

Szczególną rolę odgrywa diagnostyka transformatorów wchodząca w zakres zarządzania eksploatacją transformatorów. Ten kierunek badań jest intensywnie rozwijany w sensie metodolo-

gicznym i narzędziowym. Należy podkreślić, że w Polsce zagadnienia monitoringu transformatorów, badań okresowych czystości i wytrzymałości oleju, łącznie z analizą chromatograficzną, badania stanu przepustów wysokiego napięcia, itp. są przedmiotem szczególnej troski.

4.1. Problematyka elektromagnetyczna w projektowaniu [11, 14, 23, 24, 25]

Współczesna technika komputerowa pozwala na przedstawienie poszczególnych elementów transformatora, lub części jego układów, a także widoku zewnętrznego w konwencji trójwymiarowej, z możliwością obrotu i specjalnego podświetlenia obiektu. Do tego służą, między innymi, programy komercyjne AUTOCAD i AUTODESK. Transformator składa się z uzbrojonego rdzenia, uzwojeń, przełącznika zaczepów, sieci przewodów łączeniowych i wyprowadzeń, które można odwzorować z dość dużą dokładnością pod względem proporcji wymiarowych.

Rdzeń transformatora składa się z ogromnej ilości blach magnetycznych, przeplatanych w narożach, najczęściej tworzących rdzenie wieloramowe. Każda warstwa blach stanowi wydzielony obwód magnetyczny. Trójwymiarowa analiza pola elektromagnetycznego z uwzględnieniem rozwiązań w poszczególnych warstwach przekracza możliwości obecnych trójwymiarowych programów obliczeniowych w rodzaju ANSYS, FLUX, OPERA i innych. Modele traktujące rdzeń jako element jednolity, wymagają określenia zastępczych - równoważnych przenikalności i przewodności elektrycznych rdzenia, co jest obecnie przedmiotem prac badawczych. Szczególnym węzłem rdzenia są naroża, w których zaplatane są blachy, gdzie zmiana kierunku strumienia powoduje zwiększone straty mocy.

Znacznie lepiej przedstawiają się obecne możliwości obliczeniowe pól rozproszenia. Obszary rdzenia można traktować w przybliżeniu jako pozbawione prądów wirowych, o przenikalności magnetycznej dążącej do nieskończoności. Najczęściej wprowadza się do obliczeń fragmenty transformatora. Wynika to najczęściej z symetrii obiektu. Można także rozpatrywać węzły elektromagnetyczne w postaci wyizolowanej, zwłaszcza wtedy, gdy mają odmiennie wyprowadzenia przewodów, inne odstępy od kadzi i pokrywy, itp. Spotyka się obecnie trójwymiarowe rozwiązania pól z wykorzystaniem pakietów komercyjnych dla po-

trzeb wyznaczania lokalnych strat w częściach konstrukcyjnych, ekranach, czy też określania rozkładu sił zwarciovych w uzwojeniach nieuszkodzonych i uszkodzonych [22, 25].

Niezwykle ważne jest obliczenie na etapie projektowania rozkładów napięć i natężeń pola elektrycznego w układzie izolacyjnym transformatora, ze względu na kryteria wytrzymałości na przebicie. Obliczenia te, w konwencji trójwymiarowej, wykonuje się również dla istotnych fragmentów transformatora lub węzłów izolacyjnych w rodzaju wyprowadzeń z obszarów wysokiego napięcia. W wyniku obliczeń projektowych, udaje się skonstruować uniwersalną izolację stałą, wyprowadzenia mocy na wysokim napięciu, czego przykładem może być modułarny układ izolacyjny odpływu 400 kV transformatora blokowego [3, 4], czy też izolacja ceramiczna przekładnika kombinowanego [12]. Należy zwrócić uwagę na potrzebę aplikacji metod polowych do rozwiązywania rozkładów pól w dielektrykach stałych i ciekłych, w warunkach pola przepływowego, wywołanego przykładowo w transformatorach HVDC.

Stosowane oprogramowanie, w większości wykorzystuje metodę elementu skończonego FEM (Finite Element Method), rzadziej metodę elementu brzegowego BEM (Boundary Element Method), czy też metodę różnic skończonych FDM (Finite Difference Method) [21, 22].

Należy wyraźnie podkreślić, że transformatory o mocach ekstremalnych mają znaczne wymiary geometryczne (kilka metrów wysokości i kilkanaście długości). Siatka przestrzenna (zależna od liczby węzłów) pokrywająca obszar transformatora, możliwa do wykorzystania, nie zapewnia wysokiego stopnia dyskretyzacji geometrycznej. Dlatego autor proponuje posłużyć się modelem transformatora w zmniejszonej skali wymiarów liniowych [23]. Przy narzuconej granicznej liczbie węzłów, powinno to wpłynąć na wzrost dokładności obliczeń, ze względu na powiększony stopień dyskretyzacji. Już obecnie, obliczenia trójwymiarowe, wymagają zastosowania coraz szybszych komputerów. Metody komputerowe powinny rozwijać się w kierunku badania nie tylko możliwych, ale także dopuszczalnych uproszczeń geometrycznych obiektów, bez większego uszczerbku na dokładności obliczeń parametrów całkowitych pola.

Nie ustają prace nad transformatorami nadprzewodnikowymi. Opracowywane metody

obliczeń elektromagnetycznych, muszą uwzględniać kryteria magnetyczne, prądowe i ciepłe utraty nadprzewodnictwa w projektowaniu dopuszczalnej obciążalności transformatorów.

4.2. Badania diagnostyczne w eksploatacji [19]

Transformatory o mocach ekstremalnych należą do I grupy urządzeń, od których zależy niezawodność pracy systemów elektroenergetycznych. W czasie transportu, instalowania oraz podczas pracy są narażone na przejściowe lub stałe działanie czynników elektromagnetycznych, mechanicznych, termicznych, atmosferycznych, które mają wpływ na kondycję urzą-

Tabela 1

Problemy	Techniki diagnostyczne	Miejsce wykonania	Stan obecny techniki diagnost.	Skuteczność diagnost.
Mechaniczne	1. Prąd wzbudzenia	W	P	S
	2. Impuls niskonapięciowy	W	P	M
	3. Analiza odpowiedzi częstotliwościowej	W	P	D
	4. Pomiar indukcyjności rozproszenia	W	P	S/D
	5. Pojemność	W	P	D
Termiczne	ANALIZA GAZÓW W OLEJU			
	6. Chromatografia gazowa	E	P	D
	7. Równoważna metoda wodorowa	E	P	S
	POGORSZENIE IZOLACJI PAPIEROWO-OLEJOWEJ			
	8. Chromatografia cieczy, metod DP	E	R	S/D
	9. Analiza furamowa	E	R	S/D
	DETEKCJA PUNKTÓW GORĄCYCH			
Dielektryczne	10. Czujniki inwazyjne	E	R	M
	11. Tomografia w podczerwieni	E	P	D
	ANALIZA OLEJU			
	12. Zawilgocenie, wytrzymałość elektryczna, rezystywność, itp.	E	P	S
	13. Przekładnia zwojowa	W	P	M
	WYŁADOWANIA NIEZUPEŁNE			
	14. Metoda akustyczna	E	R	S/D
15. Metoda elektryczna	E	R	S/D	
	16. Wskaźnik mocy i pojemności	W	P	D
	17. Odpowiedź częstotliwościowa dielektryka	W	P	D

Legenda:

W – wytwórnia, baza remontowa, E – eksploatacja, P- stosowana powszechnie, R – rozwijana, D- duża, S – średnia, M – mała

Odsyłamy czytelnika do pracy [19], w której można znaleźć także podobne sposoby przeznaczone do badań przepustów wysokiego napięcia oraz szereg fachowych informacji dotyczących programów badań i aparatury pomiarowej. W problematyce badań diagnostycznych, istnieją także bogate doświadczenia polskie, prezentowane szczególnie na krajowych konferencjach transformatorowych [16, 17].

dzeń i czas życia. W szczególności, badania diagnostyczne podczas eksploatacji, dotyczą stanu izolacji. Mogą być one wykonywane okresowo z zastosowaniem konwencjonalnych i nowych, rozwijających się metod badawczych, a także mogą być przeprowadzane w trakcie stałego monitoringu transformatorów i ich wyposażenia. W pracy [19] zestawiono najbardziej znane techniki pomiarowe, konwencjonalne i będące w stanie rozwoju, stosowane w diagnostyce transformatorów, obejmujące skutki zakłóceń mechanicznych, termicznych i dielektrycznych. Przytoczono je w tabeli 1.

5. Zakończenie

Transformatory najwyższych mocy i napięć, stanowią istotny element systemów elektroenergetycznych, należąc do odpowiedzialnych i bardzo drogich zasobów majątku spółek odpowiedzialnych za produkcję i rozdział energii elektrycznej. Istotną rzeczą jest niezawodność zasilania i jakość energii. Wpływają na to po-

prawność konstrukcji urządzeń, wykorzystująca doświadczenia naukowe i praktyczne w procesie projektowania i produkcji transformatorów, oraz właściwa eksploatacja wraz z badaniami diagnostycznymi. W obecnym czasie, badaniom diagnostycznym poświęca się w sposób uzasadniony dużo uwagi.

6. Literatura

- [1] *ABB Phase Shifting Transformers* – ABB Transformatoren GmbH, Bad Honnef 2000
- [2] *ABB Transformer Handbook*, ABB Management Services Ltd, Zurich 2007
- [3] Bernhardt H. i inni: *Modularny układ izolacyjny odpływu 400 kV transformatora blokowego*, Mat. VI Konferencji Naukowo-Technicznej Transformatory Energetyczne i Specjalne, Kazimierz Dolny 11-13 października 2006, ss. 55-57
- [4] Bernhardt H. i inni: *Transformator blokowy 305 MVA, 400/15,75 kV z nowoczesnym układem izolacyjnym*, Mat. XV Konferencji Energetyki, Zamek Ryn 5-7.09.2007, ss. 137-143
- [5] Bertagnolli G.: *The ABB approach to short circuit duty of Power transformers*, ABB Management Services, Zurich 2006
- [6] Hiroyuki S., Kazuyuki K.: *Large-Capacity Disassembled-transport Transformers*, Hitachi Review, vol. 49 (2000), No 2, pp. 88-92
- [7] Jabłoński M.: *Powstanie rozwój fabryki transformatorów energetycznych w Łodzi*, Przegląd Elektrotechniczny, Rok LXXXI 12'2005, ss. 43-50
- [8] Jabłoński M.: *Rola Politechniki Łódzkiej w rozwoju łódzkiego ośrodka transformatorowego*, Przegląd Elektrotechniczny, LI (1975), nr 3, ss. 99-101
- [9] Jezierski E.: *Polskie osiągnięcia naukowo-techniczne w dziedzinie transformatorów w latach 1945-1963*, Przegląd Elektrotechniczny, Rok XL (1964), nr 10, ss. 421-425
- [10] Kopczyński Z., Lelonkiewicz J.: *Rozwój produkcji transformatorów dużej mocy w FTAIT ELTA*, Wiadomości Elektrotechniczne, 1985, nr 11-12 (648-649), ss. 243-245
- [11] Kozłowski M.: *Ważniejsze problemy naukowo-techniczne w dziedzinie transformatorów*, Przegląd Elektrotechniczny LI (1975) nr 3, ss. 105-115
- [12] Leśniewska E.: *Application of 3D field analysis for modelling the electric field distribution in ceramic insulator of HV combined instrument transformer*, Journal of Electrostatics 51-52 (2001), pp. 610-617
- [13] Masato Enokinozo i inni: *Dynamic vector magnetohysteretic E and S model considering eddy current effect*, The International Journal for Computation and Mathematics in Electrical and Electronic Engineering, COMPEL, vol. 28, No 1, 2009, pp.85-97
- [14] Metha S. i inni: *Power transformers technology review and assessments*, Electra CIGRE February 2008, (tłumaczenie na język polski w czasopiśmie Urządzenia dla energetyki Nr 4/2008, ss. 24-29)
- [15] Mosiński F.: *Zagadnienia izolacyjne w treściach łódzkich konferencji transformatorowych*, Energetyka 58 (2005), nr 10, ss. 701-712
- [16] Olech W. i inni: *Efektywność wykrywania uszkodzeń transformatorów na podstawie badań metodą SFRA (doświadczenia krajowe)*, Materiały VI Konferencji Naukowo-Technicznej Transformatory Energetyczne i Specjalne, Kazimierz Dolny 1-3 października 2008, ss. 103-116
- [17] Pinkiewicz I., Szymański Z.: *Izolatory przepustowe wysokiego napięcia - awarie, diagnostyka, ewidencja*, Materiały VI Konferencji Naukowo-Technicznej Transformatory Energetyczne i Specjalne, Kazimierz Dolny, 11-13 października 2008, ss. 277-286
- [18] *The Polytransformer-the Multivoltage Substation Power Transformer*, ABB, Asea Brown Boveri Madrid 2007
- [19] *Service Handbook for transformers*, ABB Menagements Services Ltd Transformers, Zurich 2007
- [20] Sobocki R. i inni: *Regulacja przesyłu mocy między systemami za pomocą zestawu transformatorów z regulacją modułu i fazy napięcia*, XV Konferencja Energetyki, Zamek Ryn 5-7.09 .007, ss. 144-157
- [21] Sykulski J. K. i inni: *Computational Magnetics*, Chappman and Hall, London –Madras, 1995, stron 373
- [22] Tomczuk B.Z.: *Metody numeryczne w analizie pola układów transformatorowych*, Oficyna Wydawnicza Politechniki Opolskiej, Opole 2007, stron 218
- [23] Zakrzewski K.: *Modelowanie pól elektromagnetycznych w projektowaniu transformatorów*, Przegląd Elektrotechniczny, Rok LXXVIII 3'2002, ss. 59-63
- [24] Zakrzewski K.: *Additional losses in transformer structural parts in the light of growth law*, Proceedings of XIX Symposium Electromagnetic Phenomena in Nonlinear Circuits, June 28-30, Maribor Slovenia, pp. 71-73
- [25] Zakrzewski K., Tomczuk B., Koterias D.: *Simulation of forces and 3D field arising during Power autotransformer fault due to electric arc in HV winding*, IEEE Transactions on Magnetics, New York, USA, vol.38, No 2, March 2002, pp.1153-1156
- [26] Zakrzewski K.: *Zjawisko nadprzewodnictwa i jego zastosowanie w transformatorach*, Materiały Forum ABB Transformatory energetyczne, Łódź 18-19 listopada 2008, ss. 53-76