

Franciszek MOSIŃSKI

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki

Transformator to newralgiczny element systemu elektroenergetycznego

Streszczenie. W artykule omówiono historię wynalazku transformatora energetycznego, jego podstawowe zadania w systemie elektroenergetycznym oraz współczesne rozwiązania konstrukcyjne. Szczególnie uwypuklono problematykę transformatorów blokowych, izolacji sześciopłukiem siarki i zagadnienie transformatorów nadprzewodzących. Zarysowano problem oddziaływań ekologicznych transformatora.

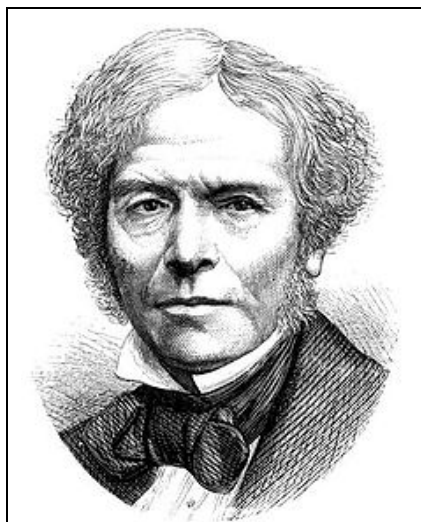
Abstract. *Paper deals with power transformers history, tasks and designs. Special attention were directed on generator transformers, power shifter and SF₆ insulation, cryogenic design and ecological problems of transformers.*

Słowa kluczowe. Transformator energetyczny, przesuwnik fazowy, oddziaływania ekologiczne, konstrukcja transformatora

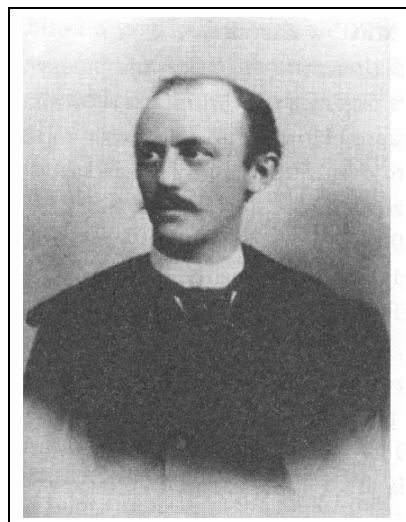
Key words. *Power transformers, phase shifter, ecology, transformer design*

HISTORIA

U podstaw teorii i budowy transformatorów energetycznych jest zjawisko indukcji elektromagnetycznej odkryte, w 1831 r., przez Michała Faradaya. Pierwszym transformatorem była zbudowana, w 1850 r., przez Heinricha Ruhmkorffa, cewka Rumkorffa. Nazwa transformator pojawiła się dopiero w roku 1885, w patencie zgłoszonym przez pracowników węgierskiej firmy Ganz. Natomiast jednym z pierwszych wynalazców transformatora trójfazowego był Michał Doliwo-Dobrowolski.



Rys. 1. Michał Faraday 1791 - 1867

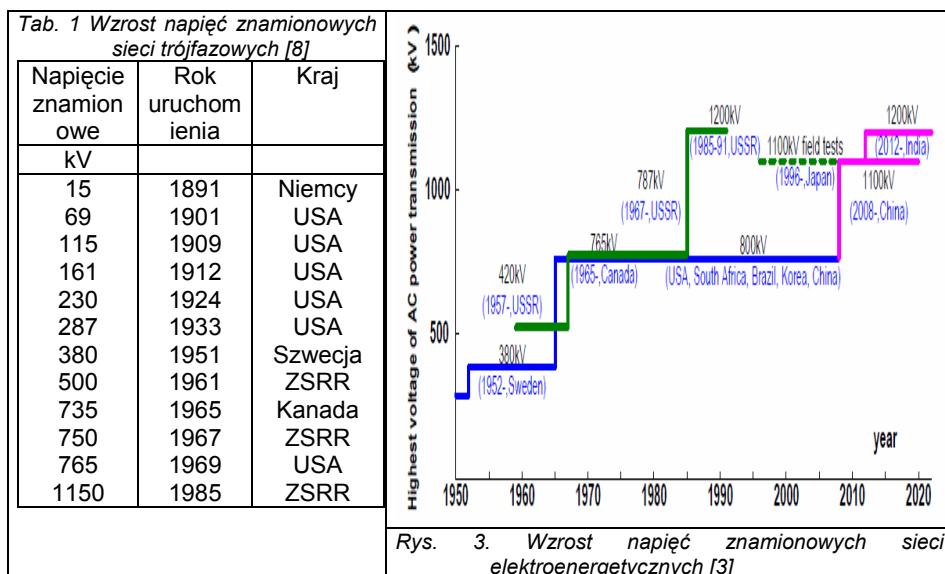


Rys. 2. Michał Doliwo-Dobrowolski 1862-1919

Michał Doliwo-Dobrowolski był obok Sebastiana Ferrantiego w Anglii oraz Mikołaja Tesli oraz Georga Westinghousa w Ameryce jednym z najbardziej znanych zwolenników koncepcji wytwarzania i przesyłu energii elektrycznej trójfazowego prądu przemiennego. Ich główni przeciwnicy Lord Kelvin w Anglii, Ernest Siemens w Niemczech i Thomas Edison w Ameryce lansowali koncepcję prądu stałego. Spór między tymi dwoma koncepcjami był określany jako 'bitwa o prąd' lub jako 'wojna akumulatora z transformatorem'. Zwycięstwo koncepcji prądu przemiennego było początkiem kariery transformatora energetycznego.

Firmy, które przyczyniły się do rozwoju konstrukcji transformatorów to budapeszteńska firma Ganz, gdzie w 1985 r. zbudowano pierwszy transformator trójfazowy, niemiecki koncern AEG (*Allgemeine Elektrizitäts-Gesellschaft*, 1987), amerykańska firma Westinghouse oraz General Electric (do 1892 Edison General Electric Company), która posiadając patenty na większość urządzeń elektrycznych zapewniała, sobie w tym czasie, pozycję monopolistyczną.

Rozwój systemów zasilania w energię elektryczną wynikał z rozwoju konstrukcji transformatorów i jednocześnie ten rozwój stymulował. Obrazuje to tabela 1 i rysunek 3. We współczesnym systemie elektroenergetycznym napięcie i prąd są transformowane co najmniej dwukrotnie, a zwykle wielokrotnie. Stąd moc transformatorów kilkakrotnie przekracza moc generatorów, a znaczenie transformatora w systemie jest wielokrotnie i nie do przecenienia



ROLA W SYSTEMIE LEKTROENERGETYCZNYM

Transformator blokowy na przykładzie bloku o mocy 600 MW (700 MVA)

Transformator blokowy jest jednostką, której specyfiką jest duża przekładnia od napięcia znamionowego generatora do napięcia znamionowego linii przesyłowej magistralnej, zwykle brak konieczności regulacji napięcia (którą zapewnia generator) oraz praca ciągła w pobliżu mocy znamionowej. Poniżej rozpatrzono główne cechy transformatora blokowego na przykładzie analizy doboru jednostki do bloku 600 MW.

Nowe osiągnięcia w zakresie materiałów pozwalają obecnie na budowę jednostek blokowych o mocach powyżej 630 MVA bez przekraczania gabarytów i mas transportowych.

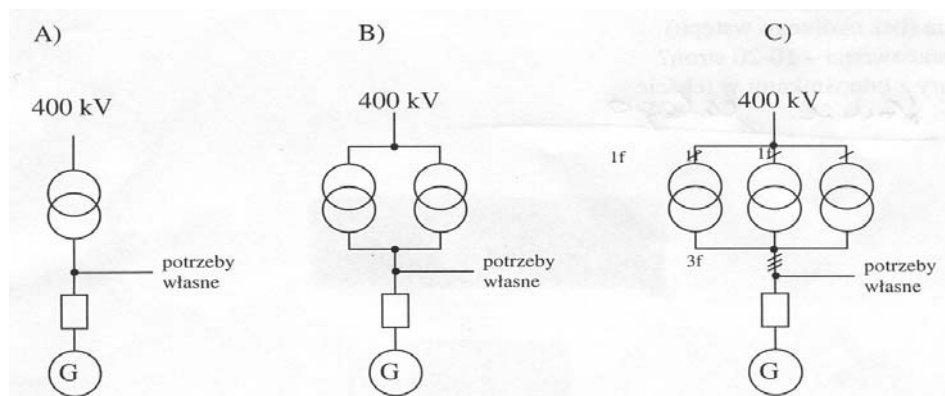
VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Postęp dotyczy głównie blach transformatorowych o obniżonej stratności (HB uzdatnianych laserowo) jak też przewodów transponowanych i zwykłych w izolacji papierowej bądź wykonanej z NOMEX-u. W warunkach krajowych głównym ograniczeniem jest wysokość transportowa ok. 4500 mm oraz masa transportowa ok. 350 ton. Dotychczasowy największy transformator blokowy zainstalowany w Polskim Systemie Energetycznym to transformator 630 MVA, 420/20 kV współpracujący z blokiem 500 MW. W latach 90 tych jednostka ta została zmodernizowana z podniesieniem mocy do 670 MVA. Przy zastosowaniu nowoczesnych blach transformatorowych wykonanie jednostki trójfazowej 700 MVA jest w warunkach krajowych wykonalne. Wykonanie jednostek trójfazowych o mocach ok. 1200-1300 MVA w renomowanych wytwórniach światowych jest technicznie możliwe. Obecnie dostępne powszechnie materiały czynne takie jak blacha transformatorowa uzdatniana laserowo pozwalają na pracę transformatora blokowego przy indukcjach 1,75 – 1,78 T i stratnościach 0,85-0,9 W/kg. W zakresie materiałów przewodowych powszechnym jest stosowanie przewodów transponowanych izolowanych papierem o zwiększonej odporności termicznej bądź taśmą poliamidową NOMEX. Dla zwiększenia intensywności chłodzenia stosowany jest system labiryntowego przepływu oleju w uzwojeniach (sterowany obieg oleju OD). Powszechnym jest też stosowanie przy projektowaniu transformatorów systemów komputerowych opartych o wieloletnie doświadczenie techniczne i eksploatacyjne.

Przykładowo:

1. ABB oferuje [4]: jednostki trójfazowe do mocy 1100 MVA, i ławy transformatorowe 3x500 MVA; Maksymalnie jednostki trójfazowe do mocy 1100 MVA; i ławy transformatorowe do 3x500 MVA
2. AREVA oferuje [5]: W rozważanym zakresie jednostki trójfazowe do mocy 1100 MVA, 27/415 kV oraz ławy 3x550MVA i napięciu 20/400 kV. Maksymalnie jednostki trójfazowe do mocy 1100MVA i ławy transformatorowe do 27/415 kV; 550MVA oraz 20/400 kV; 245 MVA i napięciu 18/765 kV

SGB-SMIT [6] (Holandia) oferuje: SGB-SMIT transformatory trójfazowe 700 MVA, 400/21 kV (1425 kV BIL – Basic Insulation Level; podstawowy poziom piorunowy izolacji). Maksymalnie 725 MVA, 420/27 kV



Rys. 4 Warianty konfiguracji transformatora blokowego bloku 600 MW: (a) transformator trójfazowy o mocy 100 %; (b) dwa transformatory pracujące równolegle o mocach 60 % każdy; (c) ława transformatorów jednofazowych o mocy 33,3 % każdy.

Tabela 2. Podstawowe parametry 3 wariantów transformatora blokowego

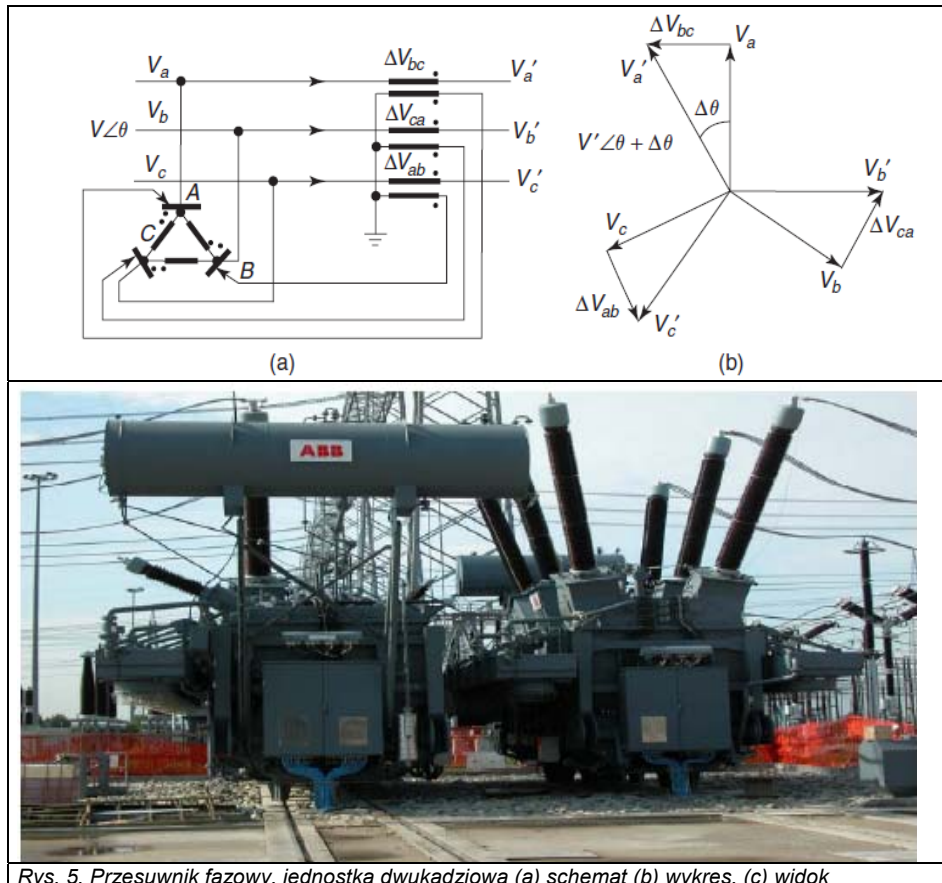
Parametr [jednostki]	Wariant		
	A	B	C
Moc znamionowa [MVA]	700	420	233
Przekładnia [kV/kV]	420/22	420/22	$\frac{420}{\sqrt{3}}/22$
Układ połączeń	YNd11	YNd11	li0
Napięcie zwarcia [%]	15	14	14
Straty jałowe [kW]	210	150	90
Straty obciążeniowe [kW] przy mocy znamionowej transformatora	1420	980	600
Straty obciążeniowe [kW] przy mocy znamionowej bloku	1420	680	600
Przybliżona masa całkowita [t]	375	270	170
Sprawność [%] przy $\cos\varphi = 0,9$			
100% mocy bloku	99,74	99,73	99,67
80% mocy bloku	99,78	99,77	99,71
60% mocy bloku	99,81	99,79	99,76

Transformator sprzęgający

- (a) Transformator sieciowe służące do łączenia ze sobą dwóch linii elektroenergetycznych wysokiego napięcia nazywane bywają transformatorami sprzęgającymi. Ich cechy charakterystyczne to mała przekładnia np. 220/400 kV czy 220/100 kV, oraz konieczność regulacji napięcia od obciążeniem. Transformatory te zwykle budowane są jako autotransformatory z regulacją po stronie DN lub z regulacją w punkcie gwiazdowym.
- (b) Inną klasą są transformatory sieciowe łączące sieci WN i SN o przekładni np. 110/15/24 kV itp. Są to zwykle transformatory trójzwojowe z regulacją przekładni pod obciążeniem po stronie DN.

Przesuwnik/regulator systemowy

Operator elektroenergetycznego systemu przesyłu energii elektrycznej ma problemy ze stratami energii, utrzymaniem poziomu napięcia w oddalonych punktach sieci. Optymalnym rozplywem mocy itp. Dla rozwiązania tych problemów współcześnie dostępnych jest kilka rozwiązań technicznych zwanych ogólnie systemami FACTS (Flexible Alternating Current Transmission Systems). Jednym z rozwiązań zaliczanych do FACTS są przesuwniki/regulatory systemowe. Są to bardzo duże jednostki transformatorowe, których specyfiką jest to, że jedno uzwojeń (główne) jest włączone w szereg z linią przesyłową, a pozostałe uzwojenia służą do zmiany kąta i wartości napięcia na wyjściu regulatora/przesuwnika. Jest cała gama rozwiązań tego typu jednostek, które mogą pełnić rolę tylko regulatora napięcia, tylko przesuwnika fazowego lub obie role jednocześnie. Na rysunku 5a pokazano schemat przesuwnika fazowego, a na rysunku 5b widok jednostki dwukadziowej spełniającej obie role.



Rys. 5. Przesuwnik fazowy, jednostka dwukadziowa (a) schemat (b) wykres, (c) widok

Transformator rozdzielczy

Napięcie sieci odbiorczych to napięcie niskie, w Polsce i Europie 220/400 V. Do zasilania sieci nn służą transformatory rozdzielcze, o przekładni SN/nn, z regulacją napięcia w stanie bezobciążeniowym. Ranga tych transformatorów wynika z dwóch przesłanek (a) jest ich bardzo dużo stąd każdy postęp w ich budowie jest daję duże korzyści; (b) są blisko użytkownika energii elektrycznej stąd wynikają problemy ekologiczne i problemy bezpieczeństwa np. pożarowego.

Problemy ekologiczne współczesnych transformatorów rozdzielczych rozwiązują tzw. stacje transformatorowe kontenerowe, gdzie zapewniona jest ochrona przeciwporażeniowa zwierzę i ludzi, ochrona gruntu przed wylanie oleju oraz wytłumienie szumów akustycznych. Przykład stacji transformatorowej kontenerowej pokazano na rysunku 6.

ROZWIĄZANIA KONSTRUKCYJNE

- Transformator olejowy

Klasycznym rozwiązaniem transformatora energetycznego jest transformator z izolacją papierowo-olejową. Mineralny olej transformatorowy stanowi wówczas środek

impregnujący izolację papierową, jest medium izolacyjnym i jednocześnie środkiem chłodzącym. Rysunek 8a pokazuje zasadnicze elementy układu izolacji papierowo-preszpanowej, jak tuleje kliny, pierścienie, przekładki itd., a rysunek 8b ilustruje koncepcję klasycznego transformatora olejowego. Dla transformatorów na najwyższe moce i najwyższe napięcia jest to rozwiązanie jedyne.



Rys.6. Transformator rozdzielczy w 'słupie ogłoszeniowym'

Rys.7. Widok transformatora typu DRYFORMER z uzwojeniami nawiniętymi kablem XLPE [8]

- Transformator żywiczny

Przy niezbyt wielkich mocach rzędu 100 MVA i mniejszych możliwe są inne rozwiązania konstrukcyjne, ogólnie ujęte nazwą transformatory suche. Jedno z rozwiązań transformatora suchego znane pod firmową (ABB) nazwą Resibloc ilustruje rys 9.

- Dryformer

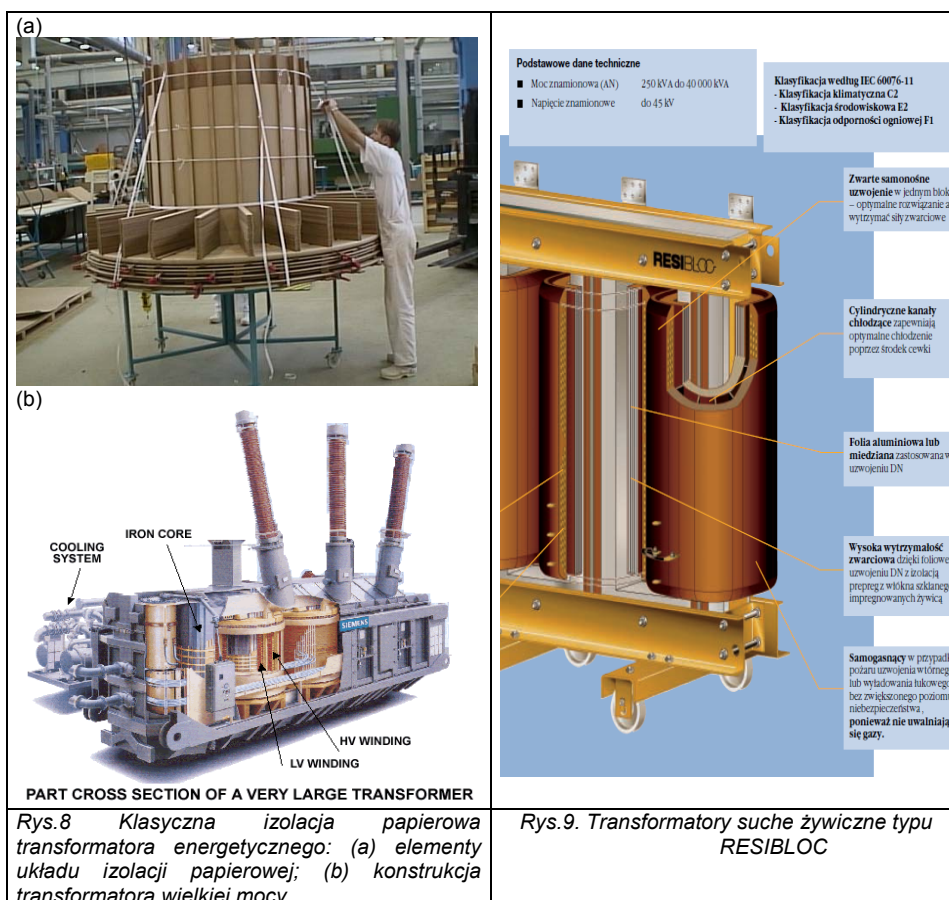
Od 2000 r wprowadzono do eksploatacji nową klasę transformatorów, których uzwojenia GN nawijane są kablami z izolacją z polietylenu sieciowanego. Napięcie GN do 220 kV moce rzędu kilkudziesięciu MVA, chłodzenie powietrzne. Transformator nie posiada kadzi. Osobliwością jest to, że przekrój przewodu nawojowego (kabla) jest kołowy w odróżnieniu od klasycznego przewodu o przekroju prostokątnym. Transformator nie wymaga przepustów gdyż kabel nawojowy można bezpośrednio połączyć z dowolną linią kablową lub napowietrzną. Widok transformatora typu Dryformer pokazano na rysunku 7.

- Izolacja SF₆

Pierwsze prace nad konstrukcją transformatorów izolowanych gazem SF₆ pod ciśnieniem podjęto w połowie lat 60-tych (między innymi w Polsce). W przypadku transformatorów rozdzielczych ogólna koncepcja i konstrukcja transformatora pozostaje bez większych zmian i jedynie przy mocach powyżej 2500 kVA konieczne jest stosowanie wymuszonego obiegu SF₆ ze względu na mniejszą pojemność cieplną w porównaniu z olejem. Dużo bardziej złożonym zagadnieniem są transformatory na duże moce i wysokie napięcia. Koncepcja takiego transformatora powstała w USA pod koniec lat 70-tych natomiast praktycznie zrealizowano ją tylko w Japonii gdzie motywuje się to

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

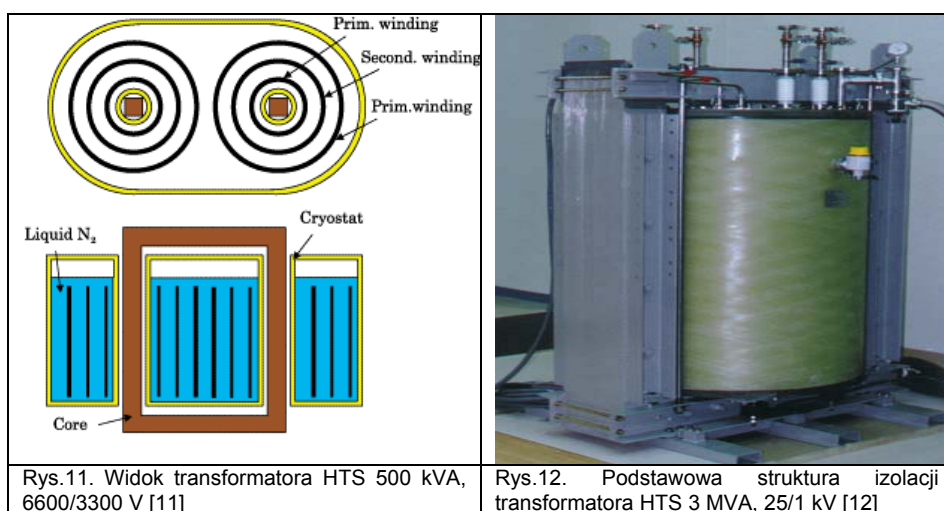
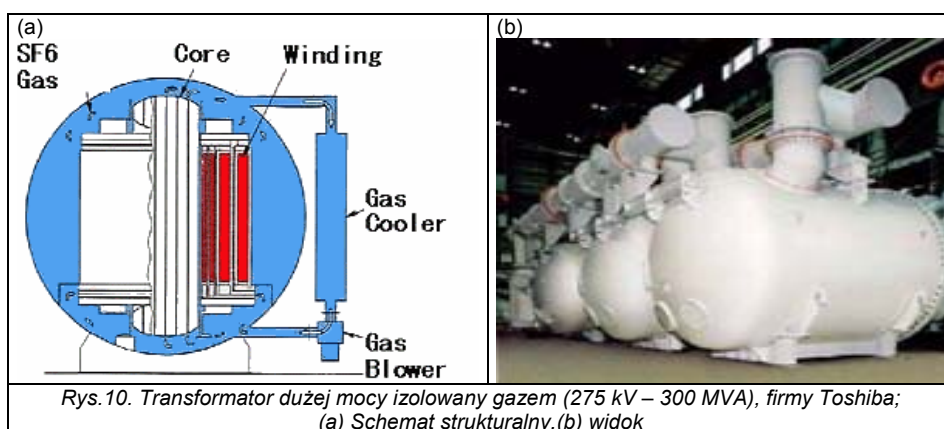
dwoma podstawowymi argumentami: (1) szeroko wprowadzane stacje elektroenergetyczne izolowane SF₆ stają się bardziej spójne i bezpieczniejsze pod względem pożarowym, jeśli również transformator jest izolowany gazem a nie olejem; (2) wzrost zapotrzebowania na energię w dużych aglomeracjach miejskich wymusza wprowadzanie do miast stacji elektroenergetycznych najwyższych napięć, a wymogi ochrony środowiska i ceny terenów miejskich są przyczyną, że najkorzystniejszym rozwiązaniem są stacje podziemne.



Transformatory izolowane SF₆ są odporne na pożar lub wybuch, zapewniają zmniejszenie szumów akustycznych i we współpracy z rozdzielnicą SF₆ nie wymagają skomplikowanych przepustów. Podstawowe parametry dotychczas wyprodukowanych trójfazowych transformatorów na napięcia 275 kV zestawiono w tabeli 3. Koncepcję firmy Toshiba i widok transformatora tej firmy pokazuje rysunek 10. Trzej konkurujący ze sobą producenci transformatorów opracowali trzy różne konstrukcje transformatorów izolowanych gazem SF₆ niemal w tym samym czasie wykonując przy okazji obszerne badania naukowe.

Według Toshiba – lidera technologii SF₆ – transformatory izolowane gazem mają następujące zalety:

1. Niepalność. Transformatory izolowane gazem, z zastosowaniem SF₆ jako medium izolacyjnego i chłodzącego, pozwalają usunąć wszelkie zabezpieczenia pożarowe z otoczenia; Temperatura zapłonu: olej mineralny 155 °C, Rtemp 312 °C, olej silikonowy 340 °C, ciecze roślinne 360 °C, SF₆ 444 °C;
2. Niewybuchowość kadzi. Kadź ciśnieniowa wytrzymuje ciśnienie jakie może wystąpić przy wewnętrznym uszkodzeniu;
3. Kompaktość. Poprzez bezpośrednie połączenie z wyłącznikiem gabaryty podstacji mogą być minimalizowane;
4. Łatwość instalowania. Brak zabiegów w związanych z zalewaniem cieczą;
5. Łatwość eksploatacji. Trzeba jedynie mierzyć ciśnienie gazu



- Transformator kriogeniczny

Podstawowe zalety transformatorów nadprzewodzących to: zmniejszony koszt transformacji wskutek zmniejszonych strat i zwiększona sprawność; jednakże sprawność konwencjonalnych transformatorów jest także duża, zatem sprawność jako jedyna zaleta

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

to za mało; zaletą może być brak rdzenia; wykorzystanie jako ogranicznik prądów zwarcia po przejściu do pracy w temperaturze normalnej; mniejsza masa; mała indukcja 0.2 – 0.3 T; zmniejszone oddziaływanie na środowisko; wzrost przepustowości sieci przesyłowej wskutek zmniejszenia impedancji.

Tabela 3: Parametry transformatorów trójfazowych izolowanych gazem SF₆ [10]

Parametry	Mitsubishi	Hitachi	Toshiba	Hyundai Heavy Industries Co., Ltd. (Korea)
Rok budowy	1990	1989	1991	2000
Moce [MVA]	15/30/33.75 ^a	100	300/300/90	20/faza
Chłodzenie	GNAN/GFAN ^b	LF ^b	LF ^b	GDWF
Napięcia [kV]				
GN	288.75÷275÷260.25	275	275±27.5	154√3±1.25·10%
SN	-	-	66	
DN	11	33	21	23/√3
Układ połączeń	Yd	Yd	Yyd	
Częstotliwość [Hz]	50	60	50	60
Klasa izolacji	Δt = 75°C	E	B	E
Impedancja zwarcia [%]	31	22	22	
Ciśnienie SF ₆ [MPa]	0.24 przy 20°C	0.45	0.40	1.2 ~ 1.4 kg/cm ² przy 20 °C
Zakłócenia [dB(A)]	55	63	85	
Napięcia probiercze GN [kV]				BIL/AC
przemienne	460	460	1.5E(1h)- 2E(1min)-1.5E(1h)	650/275 HV
łączeniowe	850	-	-	350/140 HVN
piorunowe	1050	1050	950	150/50 LV(N)

a - dla pracy w ciągu 8 h, b: G - gaz (SF₆), L - ciecz (C₈F₁₆O), A - powietrze, W- woda, N - obieg naturalny, F - obieg wymuszony.

Technologia nadprzewodnictwa może być oparta o hel lub o azot. W pierwszym przypadku będzie to nadprzewodnictwo niskotemperaturowe (Low Temperature Superconducting - LTS), a w drugim wysokotemperaturowe (High Temperature Superconducting - HTS). Istnieje pogląd, że krytyczna gęstość prądu, przy której następuje utrata nadprzewodnictwa, jest dla nadprzewodników HTS (np. Bi₂Sr₂Ca₂Cu₃O₁₀ – BSCCO) silnie zredukowana w obecności pola magnetycznego. Stąd trudno jest zbudować transformator o odpowiednio silnym polu magnetycznym z zakresu 0.2 do 0.3 T. Tym niemniej oprócz badań nad konstrukcją transformatorów LTS są równolegle prowadzone badania nad konstrukcją transformatorów HTS. Nauka ma jeszcze bardzo wiele do powiedzenia zarówno w zakresie rodzajów i właściwości materiałów nadprzewodzących jak i w zakresie wykorzystania tej technologii do budowy urządzeń elektroenergetycznych, w tym transformatorów. Podstawową ideę transformatora nadprzewodzącego typu HTS pokazano na rysunku 11, a widok na rysunku 12.

EKOLOGIA

Transformator energetyczny jest urządzeniem nie stwarzającym szczególnie dokuczliwych problemów ekologicznych. Tym niemniej współczesne przemiany świadomości społeczeństw wymuszają proekologiczne spojrzenie na każde urządzenie techniczne, szczególnie jeśli występuje powszechnie i w dużej liczbie egzemplarzy. Do zagadnień ekologicznych związanych z budową i eksploatacją transformatorów należy zaliczyć: straty mocy, ochronę gruntów, ochronę zwierząt i ludzi, hałas i wibracje.

- Straty mocy

30% strat przesyłowych to straty w transformatorach, co stanowi 2% wyprodukowanej energii elektrycznej. W liczbach bezwzględnych wygląda to jeszcze bardziej przekonywująco. Autorzy [3] podają, że w roku 2003 globalna populacja przemysłowych transformatorów rozdzielczych była szacowana na 100 000 do 150 000 jednostek, o ogólnej mocy 100 do 150 GVA i globalnych stratach około 10 TWH/a. Jest to liczba duża i tę wielkość energii elektrycznej trzeba wyprodukować po to by została stracona w procesie przesyłu energii elektrycznej, w transformatorze rozdzielczym. Do tego trzeba dodać straty mocy w dużych transformatorach sieciowych i blokowych gdzie straty mocy liczone są w megawatach [MW].

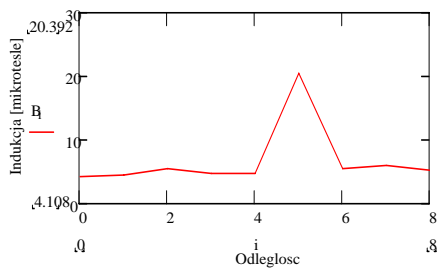
Każde działanie zmierzające do oszczędności energii elektrycznej jest działaniem proekologicznym gdyż zmierza do ograniczenia produkcji energii elektrycznej, a więc do zmniejszenia chemicznych i elektromagnetycznych oddziaływań na środowisko naturalne. Jest to szczególnie istotne w Polsce, gdzie niemal cała energia elektryczna jest uzyskiwana ze spalania węgla (brunatnego i kamiennego), co szczególnie naraża środowisko na zanieczyszczenia chemiczne.

Straty energii w transformatorze można ograniczyć na etapie projektu, na etapie doboru i eksploatacji transformatora, oraz można je utylizować poprzez wykorzystanie np. do celów grzewczych.

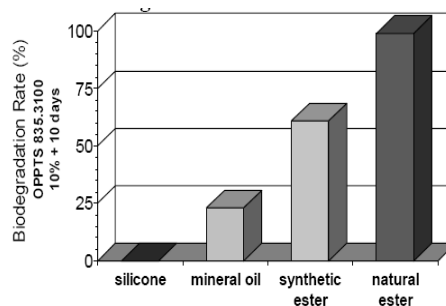
- Pole elektromagnetyczne

Przy częstotliwości 50 Hz - gdzie zawsze jesteśmy w tzw. polu bliskim - można oddzielnie rozpatrywać obie składowe, magnetyczną i elektryczną pola elektromagnetycznego.

Składowa elektryczna jest ekranowana przez każdą transformatora i może pochodzić jedynie od wyprowadzeń, w przypadku gdy transformator jest podłączony do linii napowietrznej.



Rys.13. Wartość składowej magnetycznej pola elektromagnetycznego wokół transformatora 100 MVA, w pobliżu powierzchni kadzi, na wysokości 2 m; składowa elektryczna pola w zakresie 50 Hz do 100 kHz około 100 V/m



Rys.14. Porównanie stopnia biodegradalności czterech powszechnie stosowanych cieczy izolacyjnych [14]

Składowa magnetyczna pochodzi od strumienia rozproszenia (strumień główny zamyka się w rdzeniu) i ma niewielką wartość rejestrowaną bezpośrednio na powierzchni kadzi.

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010

Na rysunku 13 pokazano wyniki badań własnych. Jak widać rejestrowane wartości są znacznie poniżej ekspozycji społecznych dopuszczalnych na poziomie 1 kV/m dla składowej elektrycznej i 75 μ T (60 A/m) dla składowej magnetycznej.

- **Zakłócenia akustyczne**

Obowiązujące normy poziomu hałasu dopuszczają dla terenów przemysłowych hałas w granicach od 40 do 65 dB(A) w dzień i od 30 do 50 dB(A) w nocy.

Transformator jest źródłem hałasu głównie z dwóch przyczyn: magnetostrykcji rdzenia i pracy wentylatorów przy chłodzeniu wymuszonym. Problem ten winien być dostrzegany już na etapie projektowania transformatora, gdyż rejestrowane poziomy hałasu generowanego przez transformatory najwyższych napięć i mocy mogą przekraczać 80 dB(A).

Stosowanie nowych gatunków blach transformatorowych i zmniejszanie indukcji w nowoczesnych rozwiązaniach przyczyniło się do zmniejszenia poziomu hałasu poniżej 70 dB(A) [4]. Głoszone są nawet poglądy, że hałas powodowany przepływem prądu (od strat obciążeniowych), wskutek ograniczenia hałasu powodowanego magnetostrycją rdzenia, może stać się problemem pierwszoplanowym.

- **Zagrożenia chemiczne**

Oddzielnym zagadnieniem związanym z ochroną ludzi jest toksyczność ciekłych mediów izolacyjnych, używanych w transformatorach. Powszechnie stosowany mineralny olej transformatorowy ma wskaźnik zagrożenia ekologicznego dwukrotnie większy niż woda (w stanie czystym i bez domieszek polichlorobifenyli (PCB)). Oleje zestarzone mogą zawierać jednak znaczące ilości policyklicznych związków aromatycznych, które mają właściwości rakotwórcze. Wskaźnik zagrożenia ekologicznego może wówczas wzrosnąć nawet trzykrotnie w porównaniu z olejami świeżymi. Chociaż olej nie wymaga ostrzegawczego oznakowania (czaszka ze skrzyżowanymi pieszczelami) to, szczególnie zestarzony, nie może być traktowany jako ekologicznie niegroźny. Wylewanie oleju do gleby jest zawsze niedopuszczalne, a kontakt poprzez skórę może być szkodliwy. Oleje w stanie dostawy powinny mieć atest na zawartość polichlorobifenyli (PCB, poniżej 50 ppm). Przekroczenie 50 ppm powinno wymagać oznakowania o zagrożeniu. Oleje o zawartości powyżej 50 ppm nadają się jedynie do unieszkodliwienia [9].

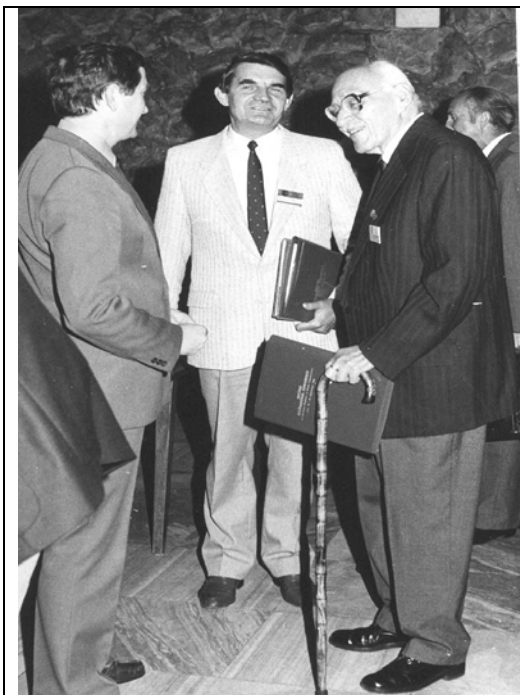
W transformatorach niepalnych stosuje się obecnie oleje silikonowe, złożone estry organiczne (np. Midel) lub inne oleje syntetyczne. Ciecze te są mało lub bardzo mało toksyczne i w dużej mierze biodegradowalne. Dla porównania, olej mineralny określany jest jako słabo toksyczny i biodegradowalny. Rysunek 14 porównuje biodegradalność różnych cieczy izolacyjnych stosowanych w transformatorach.

Działaniem proekologicznym jest również zastępowanie mediów ciekłych izolacją gazową (transformatory suche, transformatory z SF₆). Dotyczy to w szczególności transformatorów rozdzielczych, a uzasadnione jest zarówno wzrostem bezpieczeństwa pożarowego jak i maleniem zagrożenia ludzi i gleby. W przypadku izolacji SF₆ pojawiają się jednak nowe (mniejsze) problemy ekologiczne, związane m.in. z toksycznością produktów jego rozkładu i przenikaniem gazu do atmosfery.

ŁÓDZKA SZKOŁA I POLSKI PRZEMYSŁ TRANSFORMATOROWY

Wzrost napięć przesyłowych linii elektroenergetycznych jaki nastąpił od początku lat 50-tych ubiegłego wieku na całym świecie spowodował wzrost problemów związanych z izolacją transformatorów energetycznych. W Łodzi w fabryce ELTA w roku 1965

wyprodukowano pierwszy transformator na napięciu GN 220 kV, a w roku 1971 wyprodukowano pierwszy transformator na napięciu GN 420 kV (240 MVA dla Elektrowni Turów).



Rys. 15. Prof. Eugeniusz Jezierski – gość honorowy II Konferencji Izolacyjnej, w rozmowie, z Prodziekanem Wydziału Elektrycznego PŁ, doc. R. Nowiczem i autorem



Rys. 16. Prof. Zygmunt Hasterman (1906-1986) w 1955 pracował w Zakładzie Wysokich Napięć Instytutu Elektrotechniki, od 1966 do 1976 r kierownik Katedry Wysokich Napięć Politechniki Łódzkiej; twórca polskiej szkoły projektowania izolacji transformatorów energetycznych

W roku 1966 na PŁ powstała samodzielna Katedra Wysokich Napięć utworzona i kierowana przez prof. Zygmunta Hastermana (1906-1986) i której działalność ukierunkowana była na współpracę z Fabryką Transformatorów i Aparatury Trakcyjnej ELTA w Łodzi. Prof. Z. Hasterman był jedną z wiodących osób w zespole projektującym pierwszy polski transformator 420 kV (zespół uzyskał nagrodę państwową I stopnia). Wszystkie te uwarunkowania stanowiły o tym, że na kolejnych konferencjach transformatorowych zagadnienia projektowania i badania izolacji papierowo-olejowej transformatorów energetycznych zajmowały coraz to więcej miejsca i w końcu ostatnie trzy łódzkie konferencje transformatorowe (1984, 1987, 1990) zorganizowane z inicjatywy i przy wiodącym udziale pracowników i kierownika Katedry Wysokich Napięć PŁ prof. Zdzisława Szczepańskiego (1919-1986) miały nazwę „International Conference on Insulation Problems in Power Transformers”. Konferencje te gromadziły od 150 do 250 inżynierów i naukowców z całego świata.

Obecnie łódzka fabryka transformatorów jest własnością koncernu ABB. W ramach fabryki działają trzy nowoczesne jednostki: zakład transformatorów mocy, zakład transformatorów rozdzielczych oraz zakład produkcji układów izolacyjnych.

VI Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2010



WNIOSKI

Transformator elektryczny w ogóle, a transformator energetyczny w szczególności to urządzenie o różnorodnych zastosowaniach i o wielu rozwiązaniach konstrukcyjnych. Biorąc pod uwagę, że moc zainstalowanych w systemie elektroenergetycznym transformatorów jest wielokrotnie większa od mocy generatorów, należy stwierdzić, że znaczenie transformatora jest nie do przecenienia i że ponad stuletnie wysiłki naukowców i techników zmierzające do udoskonalenia transformatora są uzasadnione i dalekie do zakończenia.

LITERATURA

1. Dąbrowski M. – „Początki rozwoju transformatorów”, Ośrodek Wydawnictw Naukowych, Poznań 2005
2. Kosztaluk R.: Technika badań wysokonapięciowych. T.I, T.II, WNT, Warszawa 1985.
3. Broszura CIGRE 362 – „Technical Requirements for Substation Equipment exceeding 800 kV. Field experience and technical specifications of Substation Equipment up to 1200 kV”, WG A3.22, December 2008
4. ABB Transformers Power Transformers - The largest installed base worldwide, Copyright © 2006 ABB, <http://www.abb.com/transformers>,
5. AREVA Power Transformers and Reactors for Power Generation and Transmission Networks, Products - L2 - HV Transformers & Reactors - 0779 - EN - © - AREVA – 2004, <http://www.areva-td.com/contactcentre/>
6. SGB Starkstrom, SMIT Transformers – “Transformatory wielkiej mocy”, www.smittransformers.com, sgb@sgb-trafo.de,
7. Mosiński F., Wiśniewski J., Buchta J., Zbudniewek A. – “Konfiguracja układu wyprowadzenia mocy z bloku referencyjnego na nadkrytyczne parametry pary”, IX Konferencja “ELEKTROWNIE CIEPLNE. Eksploatacja - Modernizacje - Remonty”, Stok 2009, str. 123
8. ABB update 33/2001 Management Information von ABB in Deutschland http://www.mitegro.de/mitegro/3/Hersteller/abb/abb_upd_3301.pdf
9. Transformatory rozdzielcze suche żywiczne RESIBLOC® 250 kVA do 40 000 kVA [http://www.05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/8be68ad7da33158ec125736200234656/\\$File/1LDE000017%20RESIBLOC%20broszura%20polski.pdf](http://www.05.abb.com/global/scot/scot252.nsf/veritydisplay/8be68ad7da33158ec125736200234656/$File/1LDE000017%20RESIBLOC%20broszura%20polski.pdf)

10. Mosiński F. – „Transformatory energetyczne z izolacją SF₆” Forum ‘Transformatory Energetyczne’ 18-19 listopada 2008, Łódź
11. http://www.wtec.org/loyola/scpa/03_07.htm
12. http://www.rtri.or.jp/infoce/qr/2001/v42_3/news2.html
13. Mosiński F. - „Izolacja transformatorów nadprzewodzących”, V Konferencja Transformatory Energetyczne i Specjalne, Kazimierz Dolny 13-15 października 2004, str. 29-39
14. Mosiński F. – „Transformatory wczoraj, dziś i jutro”, referat na XI Ogólnopolskich Dniach Młodego Elektryka, Łódź kwiecień 2009, http://sep.p.lodz.pl/prezentacje/11_Transformatory.pps

Autor: prof. dr hab. inż. Franciszek Mosiński, Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki (I-15), ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź E-mail: franciszek.mosinski@p.lodz.pl