ZESZYTY NAUKOWE POLITECHNIKI ŚLĄSKIEJ 1996
Seria: ELEKTRYKA z. 155 Nr kol. 1328

Janusz LACH
Zakład Energetyczny Kraków SA
Waldemar OLECH
Energopomiar Gliwice
Sławomir PARTYGA
ABB ELTA Łódź

TRANSFORMATORY ELEKTROWNI ROŻNÓW

Streszczenie. Przedstawiono zarys historii BBC w Polsce oraz produkcji transformatorów w zakładach Rohn-Zieliński Żychlin. Produkcja transformatorów o górnym napięciu 150 kV była w latach 30 dużym osiągnięciem technicznym. Stan techniczny transformatorów pochodzących z tych zakładów, a pracujących w Elektrowni Rożnów opisano na podstawie badań diagnostycznych przeprowadzonych w latach 1967 i 1995.

TRANSFORMERS IN WATER POWER PLANT ROŻNÓW

Summary. A brief story about BBC in Poland and transformer production in Rohn-Zieliński factory Żychlin is presented in the paper. Transformers production with HV up to 150 kV in 30ies were a great technical achievement. Report of technical state of Rohn-Zieliński transformers installed in Water Power Plant Rożnów is based on diagnostic tests carried out in the years 1967 and 1995.

1. BROWN BOVERI W POLSCE

Szwajcarskie Towarzystwo Akcyjne Brown Boveri (BBC) założone w 1891 r. w Baden szybko zyskało renomę światową kierując swoją ekspansję głównie do krajów europejskich.

Polskie Zakłady Elektryczne Brown Boveri S.A. powstały w 1921 r. z siedzibą w Warszawie, a współzałożycielem ich był uprzedni reprezentant BBC w Warszawie - inż. Zygmunt Okoniewski.

Niezbędne obiekty do rozpoczęcia produkcji spółka nabyła w Żychlinie i Ustroniu (później w Cieszynie). Uruchomienie fabryki w Żychlinie nastąpiło pod koniec 1922 roku, a początkowo produkowano tam silniki o mocy do 20 KM i transformatory do 200 kV·A. Pierwszy silnik wyprodukowany w Żychlinie zaprezentowano na trzecich Targach Wschodnich we Lwowie, a w 1925 roku już pełny zestaw wyrobów na Międzynarodowych Targach w Poznaniu. W następnych latach aż do kryzysowego roku 1930 fabrykę sukcesywnie rozbudowywano, a pracami kierowali dyrektorzy: inż. Stanisław Śliwiński, a od 1927 roku inż. Jerzy Korwin Gosiewski.

Po początkowych sukcesach fabryki na początku lat 30 znalazła się ona później w sytuacji kryzysowej i decyzją centrali szwajcarskiej nastąpiło jej zamknięcie w sierpniu 1931 roku.

W 1932 r. Z. Okoniewski wystąpił z propozycją nabycia nieczynnej fabryki w Żychlinie przez firmę "Rohn-Zieliński". Historia tej polskiej firmy sięga roku 1879 i wiąże się z powstaniem niewielkiego zakładu produkującego w Warszawie maszyny do szycia. W latach 20 wraz z jej rozwojem zmieniono nazwę firmy na "Spółka Akcyjna Zakłady Mechaniczne i Odlewnia Rohn-Zieliński i S-ka".

W wyniku starań Z. Okoniewskiego powstała w 1932 roku spółka "Zakłady Elektromechaniczne Rohn-Zieliński Spółka Akcyjna". Licencję Brown Boveri nabyła od BBC najpierw fabryka w Żychlinie, a później w Cieszynie. Prezesem zarządu był w latach 1932–36 Z. Okoniewski, a w latach następnych w skład zarządu wchodzili dyrektorzy: Karol Tymanek - przewodniczący oraz inż. Zygmunt Gogolewski i inż. Stanisław Skibiński (później Wacław Cisłowski). Fabryką w Żychlinie kierował do 1936 roku inż. Jerzy Gosiewski, później Wacław Cisłowski, a następnie inż. Zbigniew Grabiński. Inż. Z. Gogolewski pracował w Żychlinie najpierw jako konstruktor, a następnie jako dyrektor techniczny.

Druga połowa lat 30 charakteryzuje się w Żychlinie znacznym rozszerzeniem asortymentu produkowanych wyrobów. Warto tu wspomnieć o:

- zespołach maszynowych (do łodzi podwodnych) oraz przemysłowych (np. papiernictwo, górnictwo),

- silnikach asynchronicznych dużej mocy np. 1360 KM,
- transformatorach wysokiego napięcia.

2. TRANSFORMATORY FIRMY "ROHN-ZIELIŃSKI" ŻYCHLIN

W latach 1932-38 inwestycje w fabryce żychlińskiej koncentrowały się na unowocześnianiu wyposażenia technicznego zakładów i opracowywaniu nowych technologii. Między innymi zainstalowano transformator probierczy 500 kV i dodatkowe urządzenia dla warsztatu mechanicznego. Było to konieczne z uwagi na przewidywany wzrost zapotrzebowania na transformatory wysokonapięciowe.

Produkcja transformatorów oparta na licencji Brown Boveri rozwinęła się gwałtownie; o ile w 1935 r. wyprodukowano 5 transformatorów o łącznej mocy 17400 kV·A i masie ponad 45 ton, to w 1937 r. zbudowano już 16 transformatorów o łącznej mocy 103900 kV·A i masie 300 ton. W tym samym czasie roczne zużycie oleju transformatorowego wzrasta z 37 ton do 200 ton.

W latach 30 rozpoczęto budowę linii 150 kV związanej z programem tworzenia COP. Pierwszy fragment planowanej linii Rożnów-Mościce-Starachowice-Warszawa uruchomiono w 1937 roku na odcinku Mościce-Starachowice.

Na dostawę transformatorów dla tej inwestycji rozpisano przetarg wygrany przez zakłady żychlińskie (startowało 11 firm, w tym 4 krajowe). Do tej pory największymi transformatorami wyprodukowanymi w Polsce były transformatory 6000 kV·A na napięcia 40 kV i 3000 kV·A o górnym napięciu 60 kV. Budowa dwóch transformatorów 12000 kV·A 150/6 kV oraz dwóch o mocy 11000 kV·A 150/30/6 kV była dużym wyzwaniem technicznym. Konstrukcja transformatorów oparta była na licencji, ale w biurze konstrukcyjnym w Żychlinie odbywała się twórcza adap-

tacja do warunków krajowych i powstały też własne rozwiązania. Z biegiem czasu ich udział wynosił do 50%.

Wygrany przetarg zaowocował również rozbudową hali montażowej i stacji prób, zainstalowaniem nowej suwnicy o udźwigu 50 t oraz nowej suszarni. Doposażono wydział mechaniczny w nożyce, prasy do cięcia i sztancowania blach, specjalne stanowisko do składania rdzeni, większe nawijarki i urządzenia do obróbki oleju. Realizacja zamówienia była uwarunkowana użyciem jak największej ilości materiałów krajowych oraz osiągnięciem parametrów wyrobów nie gorszych od analogicznych zagranicznych. Wykonane transformatory 12 MV·A pracowały w Zakładach Chemicznych Mościce i służyły do przekazywania do sieci 150 kV nadwyżek mocy z umiejscowionej tam elektrowni. Transformatory trójuzwojeniowe 11 MV·A służyły do rozbudowy sieci przesyłowej i rozdzielczej SN na terenie ZEORku, zasilającej zakłady budowane w ramach programu COP w rejonie Starachowic. W 1938 roku wykonano w Żychlinie największy transformator w międzywojennej Polsce o mocy 25 MV·A i górnym napięciu 37 kV. Dalsze zamówienia na transformatory dla Elektrowni Rożnów 16 MV·A (150+6×3,815/6,15 kV) nie zdążono zrealizować przed wybuchem wojny. Transformatory te wyposażone były w uzwojenia wyrównawcze o mocy 3 MV·A na napięcie 6 kV. Dostarczono je i uruchomiono na początku lat 40.

Inż. Zygmunt Gogolewski wywarł znaczny wpływ na poziom techniczny produkowanych transformatorów. Rozpoczął on pracę w Żychlinie w 1926 roku; w latach 1928-34 był szefem biura technicznego, odpowiedzialnym za opracowanie konstrukcji i technologii produkowanych wyrobów, a następnie do wybuchu wojny dyrektorem technicznym.

Za utrzymanie sprawności działania warsztatów odpowiedzialne było "biuro ruchu". Poziom zatrudnienia w Żychlinie sięgał w 1939 roku 1000 osób. Dyrektor techniczny zakładu inż. Zygmunt Gogolewski w tym czasie był wychowawcą i wzorem do naśladowania dla rzeszy pracowników na ogół bez niezbędnych doświadczeń zawodowych, zaangażowanych w produkcję wyrobów na poziomie europejskim. Wiele jego patentów wykorzystywano w fabryce żychlińskiej, a niektóre z nich zostały przejęte do zastosowania również przez licencjodawcę szwajcarskiego.

Szereg transformatorów produkcji przedwojennej i wojennej zakładów w Żychlinie po przełączeniu na 110 kV pracuje nadal w energetyce tylko przy nieznacznym obniżeniu mocy znamionowej (ze stosunku napięć wynikałaby konieczność zmiany o ponad 25%). Uzasadnione jest pytanie: jakie czynniki decydują o ich długowieczności? Zgodnie z dokumentacją BBC rdzenie transformatorów wykonywane były z blachy gorącowalcowanej o grubości 0,4 mm i stratności 1,3-1,45 W/kg, a były łączone na styk. Uzwojenia stosowano cylindryczne z podziałem na 3 części i gęstości prądu nie przekraczającej 3 A/mm^2. W celu złagodzenia asymetrii wyprowadzenia zaczepów wykonano z elementów skrajnych lub też stosowano uzwojenia wyrównawcze. Uzwojenia były powlekane olejoodpornym lakierem piecowym; docisk zapewniono za pomocą sprężyn. Stosowano klasyczny układ izolacji

głównej składającej się z tulei i kołnierzy bakelitowych. Na kliny, pierścienie dociskowe, klocki wsporcze i trzymacze odpływów używano drewna bukowego impregnowanego olejem. Warto dodać, że do transformatorów stosowano krajowy olej Państwowej Fabryki Olejów Mineralnych "POLMIN", produkowany z wysokojakościowej ropy naftenowej. Obowiązujące już wówczas przepisy określały charakterystyki oleju przygotowanego do napełniania transformatorów, wymagając prócz odpowiednich wartości wskaźników fizykochemicznych, również wartość napięcia probierczego określoną na wyższą od 150 kV/cm. W celu uzyskania tych wartości prowadzono obróbkę oleju polegającą m.in. na doprowadzeniu go do stanu wrzenia. W porównaniu do konstrukcji transformatorów z lat 50, w których używano jeszcze blachy gorącowalcowanej, ale o stratności 1,3-0,93 W/kg i zaplatanym rdzeniu, transformatory wyprodukowane przez Żychlin mają wprawdzie straty stanu jałowego wyższe o 30-50%, ale mniejsze straty obciążeniowe o 15-20%, co powoduje, że łączne straty są i tak korzystniejsze o 5-10%.

Na sukces długotrwałej, bezawaryjnej pracy omawianych transformatorów złożyło się wiele czynników, a m.in. poprawna selekcja materiałów, dokładne i staranne wykonanie montażu oraz właściwa kontrola międzyoperacyjna i ostateczna. Dla przykładu wystarczy podać, że wykonywano podwójną ilość potrzebnych elementów w celu przeprowadzania badań niszczących na połowie egzemplarzy. Napięcie probiercze wolnozmienne uzwojenia GN wynosiło 350 kV. Wszystko to zaowocowało uzyskaniem wysokiej niezawodności pracy transformatorów. W latach 60 [1] było to już prawie 30 lat w eksploatacji, obecnie ponad 50. Analizę przyczyn długowieczności można znakomicie prowadzić na przykładzie transformatorów Elektrowni Rożnów. Co prawda, ich praca nie jest ciągła, tylko przerywana, ale nieregularne cykle pracy nie zawsze sprzyjają utrzymaniu dobrego stanu izolacji.

3. WYNIKI POMIARÓW TRANSFORMATORÓW W ELEKTROWNI ROŻNÓW

3.1. Pomiary wykonane w roku 1967

Praca dorywcza transformatorów wbrew pozorom nie jest łatwa dla urządzeń ze względu na możliwość absorbcji wody z powietrza do oleju przy stale zmieniających się temperaturach, co może przyspieszyć proces starzenia izolacji włóknistej. Możliwość taka w Rożnowie istniała, dopóki nie dokonano w roku 1965 hermetyzacji transformatorów. W żadnym z badanych transformatorów nie wymieniono oleju w trakcie eksploatacji, a jedynie w miarę potrzeby dolewano.

W ramach badania izolacji wykonano pomiary opornościowych wskaźników izolacji R_{60}, R_{60}/R_{15}, R_{300}, współczynnika stratności tg δ, pojemności C_{50} oraz pomiary elektrycznych i chemicznych własności oleju.

W tabeli 1 przedstawiono zestawienie ważniejszych wyników pomiarów wskaźników izolacji wykonanych induktorem 2,5 kV oraz wysokonapięciowym mostkiem Scheringa przy napięciu 5 kV.

Tabela 1

Wyniki pomiarów izolacji pracujących dorywczo transformatorów w Elektrowni Rożnów

Typ i nr transformatora	Układ połączeń	Wskaźniki izolacji				Temp. oleju °C
		R_{60}	R_{60}/R_{15}	R_{300}	tg δ	
		MΩ	-	MΩ	%	
TRF Ku 16000/150 nr 7684	GN-DN+Z	1750	1,25	2500	0,87	30
	DN-GN+Z	900	1,31	1450	1,06	
jw. nr 7716	GN-DN+Z	1900	1,34	2350	0,68	30
	DN-GN+Z	1250	1,56	1850	0,72	
jw. nr 7717	GN-DN+Z	800	1,54	1150	2,63	28
	DN-GN+Z	580	1,93	1200	2,23	
jw. nr 7718	GN-DN+Z	800	1,54	1250	1,77	28
	DN-GN+Z	580	1,85	1300	2,05	

Niektóre wyniki pomiarów własności oleju o najgorszych i przeciętnych własnościach zestawiono w tabeli 2. Pomiar tgδ oleju wykonywano przy napięciu 5 kV i częstotliwości 50 Hz, a oporność w naczyniu firmy Thomson przy użyciu induktora 5 kV typu *Megger*.

Tabela 2

Wyniki pomiarów własności oleju

Typ i nr transform.	tg δ	R_{300}	U(p)	Temp. oleju	Liczba kwasowa
	%	MΩ	kV	°C	mg KOH/g
TRF Ku 16000/150 nr 7718	0,25	4200	48	20	0,173
	1,2	650	-	50	

Wyniki pomiarów wskaźników izolacji i oleju wskazują na zadowalający stan izolacji transformatorów, zgodny z wymaganiami *"Instrukcji eksploatacji transformatorów mocy"*.

Osiągnięte wyniki eksploatacyjne transformatorów, mogące konkurować z osiągnięciami przodujących firm europejskich, świadczyły o dobrej technologii stosowanej w zakładzie wytwórczym.

3.2. Pomiary wykonane w roku 1995

Kompleksowe badania transformatorów zainstalowanych w Elektrowni Rożnów zostały wykonane w listopadzie 1995 r. w celu pełnej oceny stanu technicznego transformatorów i oleju izolacyjnego.

Zakres przeprowadzonych badań na miejscu zainstalowania w Elektrowni objął:

- wykonanie pomiarów wskaźników izolacji: rezystancji R_{300}, pojemności i współczynnika stratności uzwojeń tgδ oraz prądów magnesujących i rezystancji uzwojeń,
- pobranie próbek oleju do analiz.

Badanie oleju w laboratorium Energopomiaru przeprowadzono oznaczając:

- skład i koncentrację gazu rozpuszczonego w oleju w celu określenia obecności wolno rozwijających się uszkodzeń wewnętrznych (przegrzań, iskrzeń, wyładowań zupełnych, niezupełnych itp.),
- wskaźników dielektrycznych i fizykochemicznych w zakresie obowiązującym dla olejów eksploatowanych w transformatorach o mocy do 100 MV·A.

Z uwagi na wyjątkowo długi okres użytkowania oleju i związaną z tym konieczność bardziej wnikliwej kontroli, prócz tego wykonano badania dodatkowe: wskaźnika polarności ε-n^2 i napięcia powierzchniowego σ oleju.

Obydwa te oznaczenia dają pełny obraz zmian starzeniowych w oleju i dlatego są bardzo przydatne w określeniu okresu jego dalszej zdolności eksploatacyjnej.

Uzyskane rezultaty badań zestawiono w tabelach 3 i 4.

W tabeli 3 zestawiono wyniki pomiarów wskaźników izolacji R_{300} i tgδ w temperaturze pomiaru i po przeliczeniu wartości na umowną temperaturę 30°C. Uzyskane wartości z dużym zapasem spełniają obowiązujące wymagania.

Najsłabsze wyniki wykazuje transformator TR4, co może być związane z większym niż w pozostałych jednostkach zawilgoceniem izolacji papierowo-olejowej.

Porównując uzyskane wartości z otrzymanymi podczas pomiarów wykonanych ok. 30 lat wcześniej, stwierdza się niewielkie zmiany. Wyniki badań podstawowych parametrów dielektrycznych i fizykochemicznych olejów pobranych z transformatorów blokowych TR1÷TR3 spełniają wymagania stawiane olejom w eksploatacji. Jedynie w transformatorze blokowym TR4 stwierdzono większy niż w pozostałych przypadkach poziom zawartości wody rozpuszczonej w oleju (przekraczający wartość przyjętą za dopuszczalną).

Tabela 3

Wyniki pomiarów wskaźników izolacji transformatorów zainstalowanych w Elektrowni Rożnów

Wskaźniki izolacji mierzone w układzie		TRANSFORMATOR							
		TR 1		TR 2		TR 3		TR 4	
		nr ZY 7884		nr ZY 7716		nr ZY 7717		nr ZY 7718	
		wartość przy 20°C	przeliczone na 30°C	wartość przy 2°C	przeliczone na 30°C	wartość przy 3°C	przeliczone na 30°C	wartość przy 2°C	przeliczone na 30°C
GN-DN,E	R_{300}[MΩ]	4100	2583	8250	2310	5500	1540	4350	1220
	tgδ	0.0099	0.014	0.0042	0.0109	0.0055	0.0143	0.0061	0.0159
GN-DN,Z	R_{300}[MΩ]	1.4	882	3200	896	2150	600	1800	500
	tgδ	0.0097	0.0137	0.0041	0.0107	0.0057	0.0148	0.0057	0.0149
DN-GN,Z	R_{300}[MΩ]	1200	756	2900	812	1900	530	1400	390
	tgδ	0.0101	0.0142	0.0044	0.0114	0.009	0.025	0.0085	0.0221

Pomiary wykonano w listopadzie 1995 r.

Oznaczenia: GN, DN, uzwojenia górnego i dolnego napięcia

R_{300} - rezystancja zmierzona po upływie 300 s od chwili przyłożenia napięcia pomiarowego

tgδ - współczynnik stratności dielektrycznej.

Tabela 4

Wyniki badań oleju z transformatorów zainstalowanych w Elektrowni Rożnów

RODZAJ ANALIZY	TRANSFORMATOR			
	TR 1	TR 2	TR 3	TR 4
	nr Zy 7884	nr Zy 7716	nr Zy 7717	nr Zy 7718
Barwa Wygląd	5 klarowny zawiera osad	7 klarowny zawiera osad	7 lekko mętny zawiera osad	7 lekko mętny zawiera osad
Zawartość wody met. K. Fischera [g/t]	32	31	35	44
Liczba kwasowa [mg KOH/g]	0.13	0.19	0.25	0.28
Temperatura zapłonu [°C]	143	144	148	142
Napięcie przebicia [kV]	49	48	48	41
Względne odchylenie standardowe [%]	11.9	17.7	18.2	18.8
Rezystywność w temp. 50°C [Ω·m]	1,7x1010	1,1x1010	7,0x109	8,6x109
Współczynnik strat dielektrycznych tgδ w temp. 50°C	0.0106	0.0161	0.0246	0.0198
Wskaźnik polarności ε-n^2	0.0986	0.0703	0.0875	0.0818
Napięcie powierzchniowe [mN/m]	16	17	15	15
ANALIZA CHROMATOGRAFICZNA				
H_2 - wodór	68	103	102	113
CH_4 - metan	7	26	17	19
C_2H_6 - etan	4	18	10	11
C_2H_4 - etylen	5	9	8	9
C_2H_2 - acetylen	1	1	1	1
C_3H_8 - propan	2	11	6	8
C_3H_6 - propylen	4	6	6	8
C_4H_{10} - butany	1	2	2	3
C_4H_8 - butyleny	-	-	-	-
CO - tlenek węgla	302	450	444	533
CO_2 - dwutlenek węgla	3754	5890	6124	7741
powietrze	72052	66084	67080	71454
Suma gazów palnych	394	626	596	715
Całkowita zawartość gazu [ppm]	76200	72600	73800	79900

Niestety, badania dodatkowe wskaźnika polarności $\varepsilon - n^2$ i napięcia powierzchniowego σ wykazały bardzo duży stopień zestarzenia oleju we wszystkich transformatorach blokowych kwalifikując go do wymiany. Potwierdza to obecność wytrącającego się osadu z oleju. Analiza chromatograficzna gazu rozpuszczonego w oleju w badanych przypadkach wykazała małe zawartości gazów palnych, a skład i koncentracja gazów świadczy o braku jakichkolwiek symptomów uszkodzeń wewnętrznych transformatorów. Stwierdzone nieznaczne (śladowe) zawartości gazów palnych są wynikiem naturalnego procesu starzenia.

3.3. Wnioski ogólne

Transformatory zainstalowane w Elektrowni Rożnów przed 50 laty mają nadal zadowalający stan techniczny, jedynie olej z uwagi na długotrwałą eksploatację należy przewidywać do wymiany. Świadczy to dobrze zarówno o ich producencie, jak i personelu eksploatacyjnym elektrowni. Porównanie zakresu badań eksploatacyjnych w latach 60 i 90 jest dobrą ilustracją drogi, jaką przebyła diagnostyka techniczna w naszym kraju.

LITERATURA

1. Partyga S.: Wyniki badań izolacji transformatorów krajowej produkcji po 30-letniej eksploatacji. Energetyka nr 2/67.
2. Partyga S.: Diagnostyka techniczna transformatorów. Konferencja "Badania diagnostyczne transformatorów". Ustroń 1975.
3. Partyga S., Olech W.: Znowelizowane zasady eksploatacji transformatorów. Praca FPTE Energopomiar, 1978/79.
4. Olech W.: Ocena stanu technicznego transformatorów po długoletniej eksploatacji i możliwości jej uzdatnienia. Konferencja "Izolacja transformatorów", SEP, Gliwice 1992.
5. Olejniczak H.: Współczesne problemy oceny jakości olejów izolacyjnych nowych i użytkowanych. Seminarium, Siczki k. Radomia 1993.
6. Partyga S.: ABB w Polsce. WE nr 11/94.

Recenzent: Dr hab. inż. Jerzy Hickiewicz, prof. WSI Opole

Wpłynęło do Redakcji dnia 15 marca 1996 r.