

# Nowoczesne rozwiązania techniczne i ich wpływ na wybrane parametry transformatora blokowego regulacyjnego typu TOBNRLa 290000/400

**Streszczenie.** Kilkudziesięcioletnia aktywność na rynku transformatorowym, zdobyte dzięki temu olbrzymie doświadczenie przy wykonywaniu remontów, modernizacji i produkcji nowych, w tym unikalnych transformatorów, wymogło potrzebę stosowania coraz to bardziej nowoczesnych konstrukcji i technologii. W referacie omówiono nowe rozwiązania konstrukcyjno-technologiczne stosowane w Zakładzie Transformatorów TurboCare Poland S.A. Autorzy referatu przedstawiają je na przykładzie nowego produktu - transformatora blokowego regulacyjnego typu TOBNRLa 290000/400.

**Abstract.** Decades of activity on the transformers' market, great experience in repairs, modernizations and manufacturing of new units, among others unique transformers, require the need of using modern designs and technologies. This paper presents new technical solutions applied in the Transformer Product Line of TurboCare Poland SA. Authors present them on example of the new product – type TOBNRLa 290000/400 regulating generator step up transformer. (**Modern technical solutions and their impact on selected parameters of the regulating generator step up transformer type TOBNRLa 290000/400.**)

**Słowa kluczowe:** transformator blokowy, modułarny odpływ wysokonapięciowy, rdzeń transformatora

**Keywords:** unit transformer, modular exit lead, transformer core.

doi:10.12915/pe.2014.01.52

## Wstęp

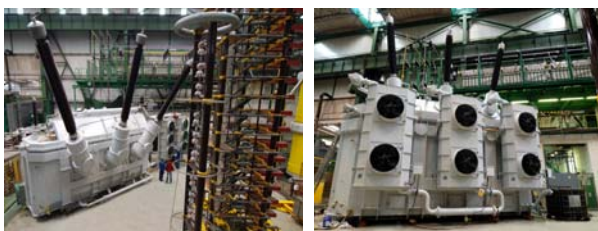
W 2012 roku TurboCare Poland S.A. Lubliniec pozyskał zamówienie na zaprojektowanie, wykonanie i dostawę partii transformatorów blokowych regulacyjnych o mocy 290MVA dla Elektrowni Połaniec (rys. 1).

Długoletnia aktywność na rynku energetycznym (remonty, modernizacje i produkcja nowych transformatorów), przy uwzględnieniu postępu w dziedzinie projektowania, pozwoliła firmie na wyprodukowanie serii transformatorów blokowych, w których zastosowano unikatowe rozwiązania techniczne.

Ze względu na wysokie wymagania techniczne zawarte w umowie oraz zagrożenia, na jakie narażone są transformatory blokowe podczas eksploatacji, zespół projektowy TurboCare Poland S.A. Lubliniec wygenerował szereg rozwiązań konstrukcyjnych, które w polskiej energetyce zostały zastosowane po raz pierwszy.

a)

b)



Rys. 1 Transformator blokowy regulacyjny na stacji prób, a) transformator typu TOBNRLa 290000/400; b) transformator TOBNRLa 290000/230

## Charakterystyka wybranych rozwiązań technologicznych i konstrukcyjnych transformatorów

Wysokie wymagania techniczne dotyczące między innymi parametrów eksploatacyjnych (straty obciążeniowe i jałowe, masy oraz gabaryty), niezawodności pracy przy uwzględnieniu niskiej i konkurencyjnej ceny oraz krótkiego terminu dostawy skłoniły producenta do podejmowania wyzwań w postaci zastosowania najnowszych rozwiązań konstrukcyjno – technologicznych.

Przykładem takiego rozwiązania jest budowa transformatora typu TOBNRLa 290000/400. Na jego

przykładzie autorzy referatu dokonują charakterystyki konstrukcji.

Transformator o parametrach podanych poniżej jest jednostką blokową z regulacją podobciążeniową po stronie wysokiego napięcia 400kV. Poniżej przedstawiono podstawowe dane uzyskane po próbach końcowych:

- moc znamionowa: 290000/290000MVA,
- przekładnia napięciowa:  $400 \pm 10\%$  ( $\pm 10$ st.)kV / 15,75kV,
- układ i grupa połączeń: YNd11,
- napięcie zwarcia: 14,05%,
- straty obciążeniowe: 759,9kW,
- straty jałowe: 112,0kW
- Poziom ciśnienia akustycznego (A)  $L_{PA}$ : 59,2dB.

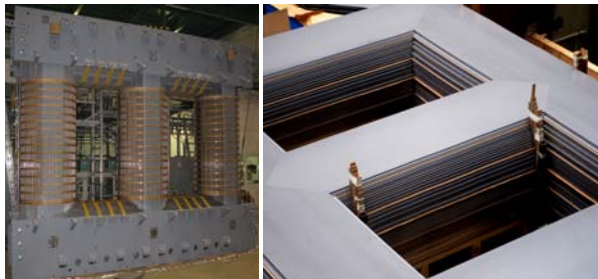
## Rdzeń i konstrukcja prasująca

Rdzeń transformatora TOBNRLa 290000/400 (przedstawiony na rysunku 2) został wykonany jako trójkolumnowy, przy zastosowaniu blachy o niskiej stratności. Dla uzyskania optymalnego wymiaru wysokości rdzenia (głównie dla celów transportowych) dokonano spłaszczenia jarzma górnego i dolnego. Cechą szczególną, zasługującą na podkreślenie, jest to że w rdzeniu nie zastosowano podziału na kanały poprzeczne. Rdzeń stanowi konstrukcję jednoramową, w systemie zaplotu blach step-lap pod kątem  $45^{\circ}$ . Technologia cięcia blach pozwoliła na eliminację ostrych naroży w rdzeniu.

Zastosowanie w rdzeniu jednolitych, niedzielonych blach o szerokości prawie 1200mm zasługuje na stwierdzenie, że jest to pierwszy w Polsce taki rdzeń transformatora blokowego o konstrukcji jednoramowej. Z kolei według zapewnień producenta blachy transformatorowej jest to pierwszy na świecie transformator o tak szerokich niedzielonych pakietach rdzenia.

Nowoczesna technologia wykonania rdzenia umożliwiła optymalizację wymiarów zewnętrznych, a tym samym przyczyniła się do zmniejszenia strat jałowych i współczynnika korekcyjnego strat dodatkowych.

Zastosowanie bardzo silnego prasowania rdzenia za pomocą taśm szklanych, bogato nasyconych żywicą epoksydową oraz belek jarzmowych, których konstrukcja została opracowana przy pomocy nowoczesnych metod projektowych pozwoliło w skuteczny sposób na obniżenie hałasu generowanego przez zjawiska magnetostrykcji.

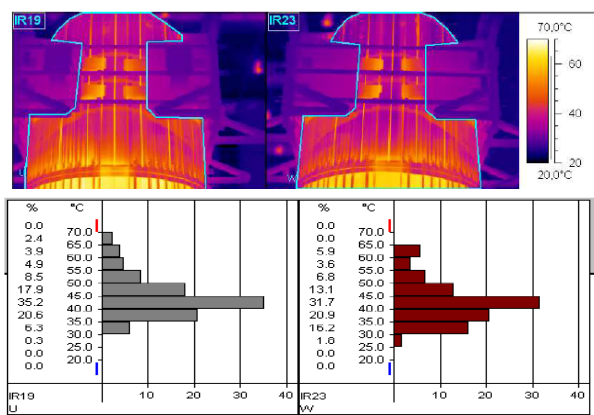


Rys. 2 Rdzeń transformatora typu TOBNRLa 290000/400

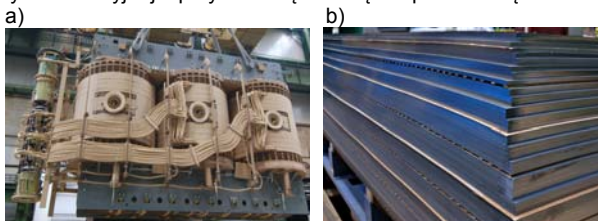
Ważnym etapem przy produkcji rdzenia było przeprowadzenie próby termowizyjnej, która jest potwierdzeniem poprawności założeń projektowych oraz procesu składania blach.

Próba termowizyjna pozwoliła zweryfikować poprawność wykonania rdzenia, zgodnie z własnymi wartościami kryterialnymi.

Rdzeń przy tej próbie został wzbudzony do warunków znamionowych, a po ustabilizowaniu się jego temperatury dokonano pomiaru w charakterystycznych punktach.



Rys. 3 Rdzeń transformatora TOBNRLa 290000/400 podczas próby termowizyjnej z przykładową analizą temperaturową

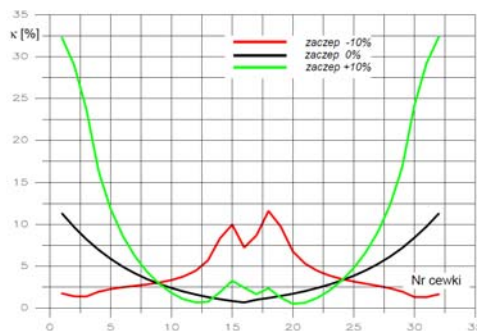


Rys. 4 a) Część aktywna transformatora TOBNRLa 290000/400 z trójkolumnowym rdzeniem, b) proces składania rdzenia wg systemu „step - lap”

### Uzwojenia i ich zagrożenia podczas eksploatacji

Konstruowanie i obliczanie uzwojeń wysokiego i niskiego napięcia są najważniejszymi fazami projektowania transformatorów energetycznych. Dlatego duży nacisk w Zakładzie Transformatorów kładzie się na prawidłowe wykonanie uzwojeń, które podczas pracy narażone są na działanie przepięć, długotrwałe oddziaływanie napięcia roboczego oraz muszą zapewnić żądaną wytrzymałość cieplną i dynamiczną.

Stosowana w Zakładzie komputerowo wspomagana metoda projektowania uzwojeń daje bardzo dobre rezultaty w zakresie optymalizacji konstrukcji jak i ograniczania strat dodatkowych.



Rys. 5 Wypadkowe wskaźniki strat dodatkowych  $\kappa$  w uzwojeniu regulacyjnym transformatora 290MVA/400kV

W omawianym transformatorze zastosowano we wszystkich uzwojeniach – oprócz uzwojenia wysokiego napięcia – technologię przewodów z ciągłą transpozycją żył. Technologia ta daje bardzo dobry efekt w dziedzinie zmniejszenia strat dodatkowych w uzwojeniach transformatorów energetycznych.



Rys. 6 Uzwojenie REG transformatora 290MVA/400kV nawijane przewodami wg technologii CTC

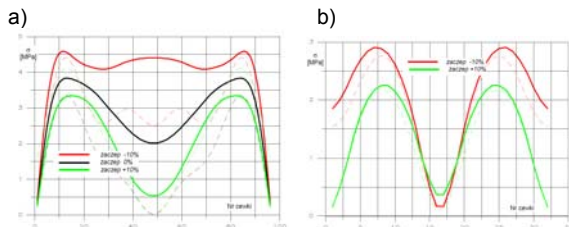
Technologia stosowania przewodów CTC pozwala na uzyskanie wyższego współczynnika wypełnienia miedzią w oknie rdzenia, niż przy użyciu przewodów konwencjonalnych, a tym samym pozwala na optymalizację części aktywnej transformatorów.

W uzwojeniu niskiego napięcia (15,75kV) transformatora TOBNRLa 290000/400 wykorzystano technologię przewodów CTC w oplacie siatkowym (rys. 8). W uzwojeniach o niskim i średnim napięciu pozwala to na częściową lub całkowitą eliminację izolacji papierowej. Rozwiązanie to poprawia skuteczność chłodzenia uzwojeń.



Rys. 8 Uzwojenie nawijane przewodem CTC w oplacie siatkowym

Dodatkowo wszystkie przewody CTC użyte w produkcji uzwojeń transformatora posiadają dodatkową warstwę kleju żywicznego, który podczas procesu suszenia uzwojeń ulega utwardzeniu przyczyniając się do zwiększenia wytrzymałości na promieniowe i osiowe siły zwarcia (rys. 7).



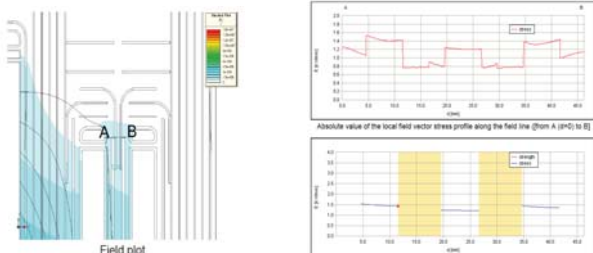
Rys. 7 a) Rozkłady nacisków na izolację uzwojenia GN przy zwarciu 1-fazowym po stronie GN, b) Rozkład nacisków na izolację uzwojenia REG przy zwarciu 1-fazowym po stronie GN  
Uwaga: linie ciągłe odnoszą się do strefy okna, a przerywane (linie cienkie) do strefy poza oknem

### Układ izolacyjny

Wieloletnie doświadczenie w budowie, modernizacjach i remontach transformatorów pokazały, jak duże znaczenie dla ich niezawodnej i bezawaryjnej pracy ma prawidłowo zaprojektowany i wykonany układ izolacyjny.

Specjalistyczne projektowanie komputerowe izolacji głównej pozwala zagwarantować wysoką wytrzymałość napięciową przy zachowaniu optymalnych wymiarów całego układu.

Przykładem zaawansowanego technicznie układu izolacyjnego jest izolacja transformatora 290MVA na napięcie znamionowe 400kV.



Rys. 8 Rozkład pola elektrycznego w transformatorze 290MVA/400kV

Cechą szczególną omawianego transformatora jest sposób wyprowadzenia odpyły 400kV ze środka uzwojenia, pomiędzy dwiema równoległymi grupami uzwojenia regulacyjnego. Ze względu na wysokie napięcia dielektryczne pomiędzy odpyłem wysokiego napięcia a uzwojeniem regulacyjnym, zastosowano specjalny pierścień izolacyjny firmy Weidmann (tzw. Centralny Układ Izolacyjny). Pierścień umieszczono pomiędzy dolną a górną częścią uzwojenia regulacyjnego oraz dodatkowo zastosowano modułarny odpyły wysokonapięciowy wyprowadzenia z uzwojenia 400kV. Modułarny odpyły w tym rozwiązaniu jest przeprowadzony przez ekranowany otwór Centralnego Układu Izolacyjnego.



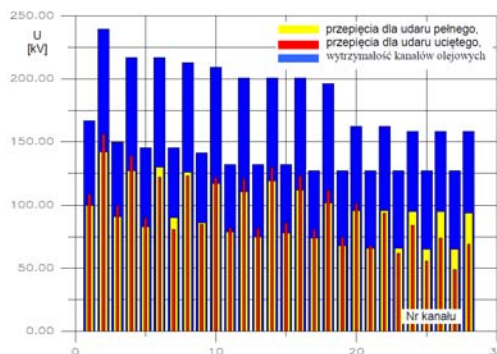
Rys. 9 Modułarny odpyły wysokonapięciowy 400kV wraz z Centralnym Układem Izolacyjnym transformatora 290MVA/400kV

Zastosowanie modułarnego odpyły 400kV wraz z Centralnym Układem Izolacyjnym stanowi novum na polskim rynku energetycznym. Rozwiązanie to nie tylko przyczyniło się do zmniejszenia wymiarów części aktywnej transformatora. Zastosowanie takiego układu pozwoliło

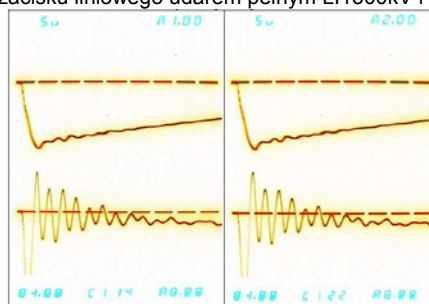
również, na symetryczne rozmieszczenie uzwojeń, a tym samym na zwiększenie odporności na zagrożenia dynamiczne pochodzące od prądów zwarciowych.

### Próby fabryczne

Skuteczna kontrola międzyoperacyjna i prawidłowo wykonane próby fabryczne zapewniają wysoką jakość i niezawodność produkowanych i modernizowanych transformatorów. Jednym z ważnych elementów kontroli międzyoperacyjnej są badania rozkładów napięć udarowych, w tym przepięć przenoszonych i przepięć na uzwojeniach regulacyjnych i przełączniku zaczerpów. Badania te umożliwiają weryfikację obliczeń projektowych, przed przystąpieniem do ostatecznej próby napięciami udarowymi. Zapewnia to uzyskanie za pierwszym „podejściem” pozytywnego wyniku próby.



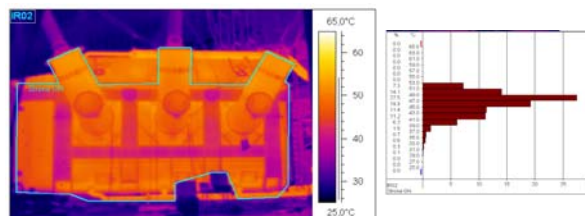
Rys. 10 Przepięcia i wytrzymałość międzycewkowych kanałów olejowych uzwojenia GN transformatora TOBNRLa 290000/400 przy próbie zacisku liniowego udarem pełnym LI1300kV i uciętym



Rys. 11 Próba udarem piorunowym uzwojenia GN

Kolejnym ważnym zagadnieniem dla niezawodnej eksploatacji transformatorów dużej mocy, jest stwierdzenie braku lokalnych przegrzań elementów konstrukcyjnych.

Już na etapie projektowania ocenia się poszczególne elementy konstrukcyjne (belki jarzmowe, konstrukcja kadzi) pod kątem możliwości wystąpienia lokalnych przegrzań, a podczas próby cieplnej przeprowadza się weryfikujące badania termowizyjne.



Rys. 12 Badania termowizyjne podczas próby cieplnej i analiza temperaturowa transformatora TOBNRLa 290000/400

Dzięki dostępnemu oprogramowaniu, opracowany zostaje model obliczeniowy trójwymiarowej konstrukcji transformatora i dokonuje się analizy rozkładów pola

elektromagnetycznego w wybranych obszarach kadzi i ekranów. Na tej podstawie lokalizuje się najgorętsze punkty konstrukcji transformatora i w przypadku przekroczenia dopuszczalnych wartości temperatury, można dokonać ewentualnych modyfikacji.

### Wnioski

Przedstawiona charakterystyka rozwiązań konstrukcyjnych i materiałów zastosowanych w produkowanych transformatorach jest odzwierciedleniem preferencji i wymagań klientów. Ich realizacja i uzyskanie wysokiej niezawodności transformatorów wymaga uwzględnienia szeregu aspektów występujących w założeniach technicznych, procesie projektowania, doborze materiałów i technologii. Ostateczną gwarancją jakości transformatora są pozytywne wyniki prób międzyoperacyjnych i końcowych.

TurboCare Poland S.A. Lubliniec rozwinął produkcję różnych typów transformatorów i autotransformatorów w szerokim zakresie mocy i napięć. Stosując zintegrowany system projektowania, najnowsze światowe technologie i materiały, firma jest w stanie podjąć się realizacji najtrudniejszych projektów, kładąc szczególny nacisk na jakość, energooszczędność i niezawodność produkowanych transformatorów.

Zastosowane nowatorskie rozwiązania konstruktorskie i obliczeniowe pozwoliły wprowadzić nowe transformatory na polski rynek energetyczny. Rozwiązania w nich zastosowane (konstrukcja rdzenia oraz Centralny Układ Izolacyjny) zostały po raz pierwszy wdrożone w polskiej energetyce.

Wieloletnia współpraca z najlepszymi producentami komponentów do budowy transformatorów dała firmie dostęp do najnowocześniejszych technologii.

Przykład transformatora TOBNRLa 290000/400 świadczy o gotowości TurboCare Poland S.A. do stosowania najbardziej wyrafinowanych rozwiązań technicznych, co ma na celu zaspokojenie wymagań klienta.

### LITERATURA

- [1] B. Heinrich, Ch. Krause, K. Wick, R. Malewski, M. Mnich, J. Popardowski: Transformator blokowy 305 MVA, 400/15,75 kV z nowoczesnym układem izolacyjnym. XV Konferencja Energetyki – Zamek Ryn – 5-7.09.2007r.
- [2] B. Heinrich, Ch. Krause, K. Wick, R. Malewski, M. Mnich, J. Popardowski: Modułarny układ izolacyjny odpływu uzwojenia 400 kV transformatora blokowego. VI Konferencja Naukowo-Techniczna „TRANSFORMATORY ENERGETYCZNE I SPECJALNE” - Kazimierz Dolny, 11-13 października 2006r.
- [3] M. Mnich, J. Popardowski: Rozwiązania konstrukcyjne, pomiary i badania zapewniające transformatorom zwiększenie niezawodności pracy. ZARZĄDZANIE EKSPLOATACJĄ TRANSFORMATORÓW – Wisła 2008r.
- [4] M. Mnich, A. Kulik, A. Kozakiewicz: Niezawodność pracy transformatorów w świetle rozwiązań konstrukcyjnych stosowanych w Energoserwis Lubliniec. Międzynarodowa Konferencja „Transformator 09” Toruń 2009
- [5] Mnich M., Pewca W.: Transformatory energetyczne i specjalne w ocenie wyników obliczeń prób, badań oraz doświadczeń eksploatacyjnych. Konferencja Naukowo Techniczna Wisła - Jawornik 31 maja - 02 kwietnia 2004r.
- [6] Obliczenia projektowe dla wykonania transformatora TOBNRLa 290MVA/400kV. Dokumentacja własna TurboCare Poland S.A.

Michał MNICH, Maciej WILK  
TurboCare Poland S.A. Lubliniec