



Antoni ZBUDNIEWEK¹, Ryszard MALEWSKI²

EV Transformatory Żychlin (1), Instytut Elektrotechniki Warszawa (2)

Autotransformator rezerwowy dla polskich sieci 220/125/15,75 kV, 100 MVA z przeciążalnością do 160 MVA

Streszczenie. Zaproponowano konstrukcję rezerwowego autotransformatora przewoźnego, który w przypadku awarii może zastąpić typowy dla Polskich Sieci Elektroenergetycznych autotransformator 160 MVA, 220/110 kV. Moc znamionowa autotransformatora przewoźnego jest zmniejszona do 100 MVA, a zarazem jego wymiary, waga, a także straty biegu jałowego. Dzięki zastosowaniu izolacji mieszanej syntetycznej (aramidowej) i celulozowej autotransformator przewoźny może pracować przy przeciążeniu do 160 MVA przez szereg godzin bez obawy uszkodzenia izolacji stałej. Odpowiedni dobór impedancji zwarcia pozwala na pracę równoległą z konwencjonalnymi jednostkami w tej samej stacji. Uzwojenie regulacyjne zostało umieszczone na osobnym rdzeniu transformatora dodatkowego umieszczonego w tej samej kadzi i zastosowano bezobsługowy przełącznik zaczepek z komorami próżniowymi.

Abstract. (Back-up autotransformer for polish power grid 220/125/15,75 kV, 100 MVA with overloading to 160 MVA). A mobile back-up autotransformer has been designed for emergency replacement of 160 MVA, 220/110 kV autotransformers typical to the Polish Power Grid. Rated power of the mobile unit is reduced to 100 MVA, and in consequence its size, weight and no-load losses are decreased. However, an extended (several hours) overloading to 160 MVA does not damage to the hybrid: cellulose and aramid insulation employed in this auto-transformer. Its short-circuit impedance was selected to enable parallel operation with the conventional units. The regulation winding is integrated with the tertiary (delta) winding, and installed on a separate booster-transformer core. A maintenance-free on-load tap changer with vacuum chambers is specified.

Słowa kluczowe: autotransformator rezerwowy, transformatory przewoźne, izolacja, uzwojenie regulacyjne.

Keywords: back-up autotransformer, mobile transformers, insulation, regulation winding.

Wstęp

Polskie Sieci Elektroenergetyczne (PSE) eksploatują około 60 autotransformatorów 160 MVA, 220/110 kV, które z uwagi na przestarzałą konstrukcję i zły stan techniczny przewidziane są do remontu modernizacyjnego, bądź do złomowania. Koszt nowego autotransformatora o takich samych parametrach znamionowych wynosi obecnie około 3 milionów złotych i zastąpienie wszystkich wyeksploatowanych jednostek w krótkim czasie wymagałoby zaciągnięcia kosztownego kredytu.

W tej sytuacji PSE będzie stopniowo wymieniać jednostki najbardziej zagrożone awarią, tak aby zapewnić niezawodność dostawy energii wymaganą przepisami. Jednakże częstość awarii zwiększa się w przypadku starych jednostek i ma charakter stochastyczny, tak że trudno przewidzieć kiedy i które autotransformatory ulegną uszkodzeniu. W stacji wyposażonej w dwa bliźniacze autotransformatory awaria jednego z nich powoduje pracę z jednym tylko autotransformatorem. Taki stan nie powinien przekraczać dwóch miesięcy i przedsiębiorstwo może być zmuszone do płacenia wysokich kar za przedłużającą się eksploatację stacji bez drugiej jednostki.

W tej sytuacji posiadanie jednostki rezerwowej o dużej przeciążalności i przystosowanej do transportu, a więc o zmniejszonych wymiarach i wadze, pozwala na szybkie zastąpienie uszkodzonego autotransformatora. Wprowadzenie izolacji mieszanej zawierającej celulozę oraz materiał syntetyczny z włókien aramidowych, znany pod nazwą handlową NOMEX, umożliwia zbudowanie autotransformatora o długotrwałej przeciążalności około 150% bez zmniejszenia czasu życia układu izolacyjnego.

Kosztowna izolacja syntetyczna jest używana w punktach gorących: do opłotu przewodów uzwojenia, jako przekładki bezpośrednio stykające się z tym opłotem i w innych krytycznych częściach układu izolacyjnego. W ten sposób tylko najwyższa dopuszczalna temperatura oleju ogranicza moc przenoszoną przez transformator. Zgodnie z normą IEEE na transformatory o podwyższonej przeciążalności z izolacją mieszaną celulozowo-

syntetyczną można przyjmować 95 K przyrost temperatury oleju [1], w porównaniu do 65 K dopuszczalnych dla izolacji z celulozy. Ponadto taki autotransformator jest bardziej odporny na wstrząsy podczas transportu dzięki znacznie lepszym własnościom mechanicznym izolacji syntetycznej.

Niebagatelną zaletą są małe straty stanu jałowego odpowiadające autotransformatorowi o mocy 100 MVA, a nie konwencjonalnej jednostce o mocy znamionowej 160 MVA. Zważywszy na niskie (20% do 40%) wykorzystanie transformatorów sieciowych, określone jako iloraz energii przeniesionej w okresie rocznym do mocy znamionowej, można przyjąć, że długotrwałe obciążenie pełną mocą 160 MVA występuje jedynie w krótkich okresach czasu.

Współpraca z istniejącymi jednostkami i podział mocy przy pracy równoległej są określone przez napięcie zwarcia i dlatego jednostka rezerwowa powinna mieć stosunkowo małe napięcie zwarcia około 5% do 7%, nie ulegające znacznym zmianom w zakresie regulacji przełącznikiem zaczepek. Proponowane rozwiązanie konstrukcyjne przewiduje mały wewnętrzny transformator dodatkowy, który umożliwi spełnienie trudnych wymagań dla uzwojenia regulacyjnego oraz zastosowanie bezobsługowego przełącznika zaczepek z komorami próżniowymi.

Istniejące stacje i transformatory przewoźne

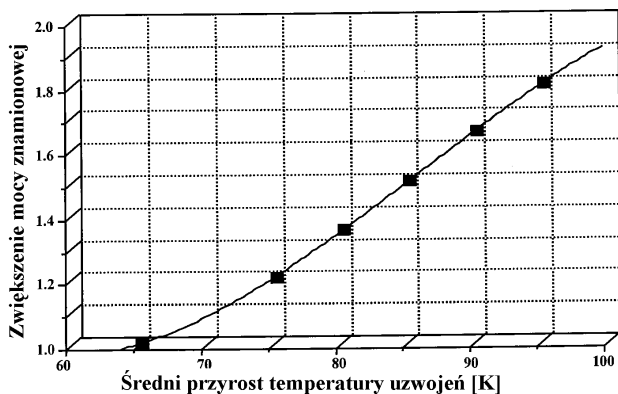
Obecnie około 200 stacji bądź transformatorów przewoźnych jest użytkowanych na całym świecie. Podstawowe dane techniczne kilka transformatorów przewoźnych wykonanych dla przedsiębiorstw energetycznych w Stanach Zjednoczonych i w Korei [2] przedstawiono w tabeli 1.

Porównanie danych wskazuje na powszechną akceptację zwiększonego o 30 K średniego przyrostu temperatury uzwojeń ($\Delta\theta=95$ K).

Zależność pomiędzy zwiększeniem mocy w odniesieniu do klasycznej izolacji celulozowej a podwyższeniem średniego przyrostu temperatury uzwojeń pokazano na rysunku 1.

Tabela 1. Dane techniczne transformatorów przewoźnych

Wytwórnia	Pauwels	ABB	Delta-Star			Hundai
Użytkownik	PG&E	PECO	PECO	BG&E	SMUD	KEPCO
Moc [MVA]	45	40	60	70	100	40
Napięcie [kV]	117,5/12,4	230/23	225/35	115/35	230/69	154/23
$\Delta\theta$ uzwojeń [K]	95	95	95	85	95	95
Waga [tony]						
Rdzeń+uzwojenia		17,8	19,8	14,8	-	12,7
Transformator	44,1	42,3	43,8	26,9	-	24,8
Ciężar całkowity	77,7	61,7	64,4	40,0	73,4	39,5



Rys.1. Wpływ podwyższenia średniego przyrostu temperatury uzwojeń na zwiększenie mocy transformatora (według [3])

Opis proponowanego autotransformatora

Opracowanie konstrukcji i wykonanie takiego transformatora leży w możliwościach wytwórni w Żychlinie, która zleci niezależnemu laboratorium przeprowadzenie prób odbiorczych.

Szczególnymi cechami tego autotransformatora są: zmniejszona waga i wymiary, zmniejszone straty obciążeniowe i biegu jałowego oraz wysoka przeciążalność w porównaniu do seryjnie produkowanych przez ABB-ELTA autotransformatorów typu ANER 160 MVA, 220/125/15.75 kV. Osiągnięcie tak wysokiej przeciążalności osiągnięto przez zastosowanie syntetycznej izolacji aramidowej (NOMEX) w obszarach pracujących w podwyższonej temperaturze.

Napięcie zwarcia i zakres regulacji są tak dobrane aby umożliwić pracę równoległą kompaktowego autotransformatora rezerwowego z istniejącymi jednostkami typu ANER3, bądź ich starszą wersją RTdxP1, które pracują obecnie w sieci przesyłowej PSE.

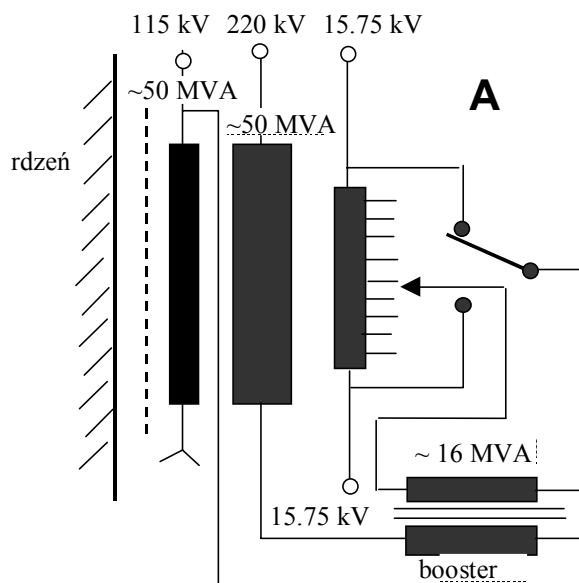
Proponowany autotransformator umożliwi szybkie zastąpienie jednostek typu RTdxP1 lub ANER3 w przypadku wymuszonego wyłączenia ich z ruchu. Ponadto proponowany auto-transformator może być rozważany jako jednostka pilotowa dla serii nisko-stratnych autotransformatorów zastępujących wyeksploatowane jednostki produkowane przez zakłady ELTA w latach 1960 i 1970-tych.

Założenia konstrukcyjne

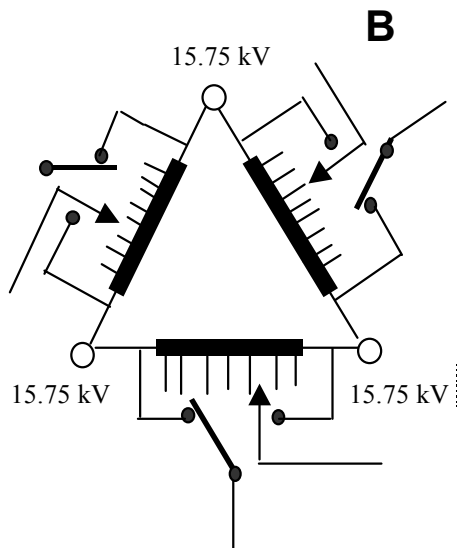
Zważywszy na niewielkie średnie obciążenie autotransformatorów typu RTdxP1 lub ANER3 w polskiej sieci przesyłowej oraz na wysoki i ciągle zwiększający się koszt strat, zdecydowano się na częściowe zastosowanie aramidowej izolacji syntetycznej, która umożliwia pracę przy temperaturze punktów gorących

wyższej o ~30 K od dopuszczalnej temperatury dla izolacji papierowo-olejowej. Obliczenia cieplne autotransformatora z izolacją aramidową (NOMEX[®]) produkowaną przez amerykańską firmę DuPont Engineering Fibers, przeprowadzono w oparciu o doświadczenia tej firmy [3]. Zmniejszenie wymiarów, waga zarazem kosztów operacyjnych i kosztu produkcji w porównaniu do konwencjonalnej konstrukcji osiągnięto przez: zastosowanie trójfazowego przełącznika zaczeń z komorami próżniowymi (typu VV) [4] nie wymagającego przeglądów w czasie życia technicznego auto-transformatora, wprowadzenie pośredniego transformatora (booster) separującego uzwojenie regulacyjne od wysokiego potencjału odpływu 115 kV co umożliwiło połączenie funkcji uzwojenia wyrównawczego z uzwojeniem regulacyjnym.

Uzwojenie wyrównawcze - regulacyjne zostało umieszczone na zewnątrz uzwojenia WN i nie podlega siłom ściskającym podczas zwarć jednofazowych w sieci zasilanej przez autotransformator. W ten sposób wyeliminowano problem odkształceń uzwojenia wyrównawczego, który stanowi wadę konstrukcji konwencjonalnej. Rozmieszczenie uzwojeń na kolumnie rdzenia oraz schemat połączeń uzwojenia regulacyjnego/wyrównawczego pokazano na rysunku 2 A i B.



Rys.2 A. Schemat połączeń uzwojenia górnego napięcia, uzwojenia wspólnego, transformatora dodatkowego (booster) i uzwojenia regulacyjnego

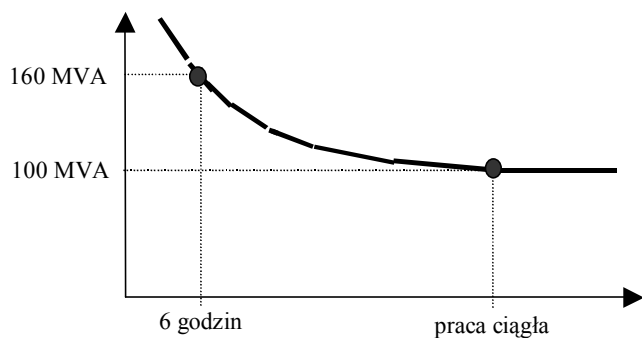


Rys.2 B. Schemat połączeń trójfazowego uzwojenia regulacyjnego spełniającego zarazem funkcję uzwojenia wyrównawczego

Zastosowanie trójfazowego przełącznika zacze- pów pozwala na zmniejszenie wymiarów kadzi, a zarazem objętości oleju, co stanowi o zmniejszeniu zagrożenia środowiska. Założono transport autotransformatora bez zdejmowania chłodzi- c. Całkowita waga wraz z olejem jest ustalona na ~85 ton, a więc w przybliżeniu 75% wagi konwencjonalnego autotransformatora.

Straty biegu jałowego są ustalone na ~20 MW a straty obciążeniowe ~260 MW, co stanowi znacznie zmniejszenie kosztów operacyjnych autotransformatora w odniesieniu do konwencjonalnej konstrukcji. Straty obciążeniowe wzrosną przy przeciążeniu do 160 MVA, jednakże koszt tych strat nie ma większego wpływu na ogólny bilans strat z uwagi na ograniczony czas pracy przy takim obciążeniu.

Założono system chłodzenia ze skierowanym obiegiem oleju (OD). Przyjęto 6 godzinny czas pracy przy przeciążeniu do 160 MVA, jednakże ten czas może być ustalony w zależności od wymagań użytkownika. Zależność dopuszczalnego przeciążenia od czasu pracy pokazano schematycznie na rysunku 3.



Rys.3. Szkic zależności pomiędzy przeciążeniem a czasem trwania tego przeciążenia

Koszt produkcji proponowanego auto-transformatora nie przekracza kosztu konwencjonalnej jednostki. W zależności od wymagań narzuconych przez rodzaj pracy można zwiększyć przeciążalność lub czas pracy przy przeciążeniu stosując izolację syntetyczną w szerszym zakresie [5,6]. Wiąże się to z pewnym kosztem dodatkowym, jednakże

koszt NOMEX'u nie wpływa znacząco na całkowity koszt transformatora.

Wnioski

- Analiza ekonomiczna przeprowadzona przez Polskie Sieci Elektroenergetyczne wykazała potrzebę autotransformatora zastępczego, który można w krótkim czasie wstawić na miejsce uszkodzonej jednostki 160 MVA, 220/110 kV. Potrzeba taka wynika ze znacznej ilości wyeksploatowanych auto-transformatorów, które wykazują wysoką częstość awarii w eksploatacji, a nie mogą być zastąpione w krótkim czasie nowymi jednostkami.
- Aby uzyskać dostatecznie dużą moc autotransformatora zastępczego przy ograniczonych wymiarach i wadze stosuje się izolację pracującą w podwyższonej temperaturze. Konwencjonalna izolacja celulozowa jest zastąpiona izolacją mieszaną. W bezpośrednim styku z gorącym uzwojeniem stosuje się papier i preszpan aramidowy, znany pod nazwą handlową NOMEX. Celuloza używana jest w pozostałych częściach układu izolacyjnego aby ograniczyć ilość kosztownej izolacji aramidowej.
- Współpraca z połączonym równolegle konwencjonalnym transformatorem wymaga zmniejszenia impedancji zwarcia jednostki zastępczej, a także niewielkich zmian tej impedancji w zakresie regulacji przełącznikiem zacze- pów. Zaproponowane rozwiązanie konstrukcyjne spełnia wymagania pracy równoległej oraz łączy funkcje uzwojenia regulacyjnego z uzwojeniem wyrównawczym.
- Istotną zaletą są niskie straty stanu jałowego odpowiadające mocy znamionowej transformatora zastępczego, a nie mocy zastąpionej przezeń konwencjonalnej jednostki.

LITERATURA

- [1] *IEEE STD. 1276-1997*, Trial-use Guide for the Application of High Temperature Materials in Liquid Immersed Power Transformers, Publ. marzec 1998.
- [2] Malewski, R., Ferrari, S., Duart, J-C., "Aramidowa i mieszana izolacja zwiększa obciążalność transformatorów", VII Sympozjum „Problemy Eksploatacji Układów Izolacyjnych Wysokiego Napięcia”, Zakopane, 21-23 października 1999.
- [3] Provost, R., Duart, J-C., High Temperature Insulation Systems in Transformer Repair, 4-th Bi-Annual Convention of the Electrical Repairers Association, 1998.
- [4] Malewski, R., Rotter, H., "Przełącznik zacze- pów typu VV, Seminarium „Współczesne konstrukcje, eksploatacja i diagnostyka podobciążeniowych przełączników zacze- pów transformatorów”", Energopomiar, Wisła, 20-22 marca 2002, str.23-29.
- [5] PES Transformer Committee, Insulation Life Subcommittee, Background Information on High temperature Insulation for Liquid Immersed Transformers, *IEEE Transactions*, Vol. PWRD-6, Nr. 4, 1994, str. 1892-1906.
- [6] McNutt, W.J., Provost, R.L., Thermal Life Evaluation of High Temperature Insulation Systems and Hybrid Insulation Systems in Mineral Oil, *IEEE Transactions*, Vol. PWRD-11, 1996, str. 1391 1399.

Autorzy: mgr inż. Antoni Zbudniewek, EV Żychlińskie Transformatory Sp. z o.o., ul. Narutowicza 72, 99-320 Żychlin, prof. dr hab. inż. Ryszard Malewski, Instytut Elektrotechniki Warszawa, E-mail: malewski@ieee.org