

Doświadczenia z wdrożenia jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV w podstacjach trakcyjnych PKP S.A.

Wzrastające wymagania stawiane układom zasilania sieci trakcyjnej sprawiły, że w PKP w latach dziewięćdziesiątych rozpoczęto prace studialne związane ze zmianą sposobu zasilania podstacji trakcyjnych. Do wymagań tych zaliczyć można m.in. niezawodność zasilania, warunki BHP obsługi, możliwość dostarczenia większej mocy do sieci trakcyjnej, sztywność napięcia (mała rezystancja układu zasilania), zmniejszenie poziomu zakłóceń powodowanych wyższymi harmonicznymi zarówno w odniesieniu do sieci zasilającej prądu przemiennego, jak i do urządzeń srk oraz pojazdów trakcyjnych.

Prace studialne, wykonane przez wiodące placówki naukowo-techniczne (w szczególności Zakład Trakcji Elektrycznej Politechniki Warszawskiej), wskazywały jako jedną z możliwości poprawy układu zasilania wprowadzenie jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV. Dodatkową przesłanką skłaniającą do tego typu rozwiązania była rezygnacja wielu zakładów energetycznych z zasilania podstacji napięciem 30 kV i zmuszanie PKP do jego zmiany na 15 kV. Rozpowszechniane napięcie zasilania 15 kV (ok. 75% podstacji) sprawia, że układ zasilania staje się niewydolny. Jest to szczególnie istotne przy długich liniach zasilających podstacje, gdy stacje energetyczne 110/15 kV znajdują się daleko od podstacji.

W związku z powyższym podjęto decyzję o wprowadzeniu jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV w dwóch lokalizacjach:

- 1) w istniejącej, budynkowej podstacji trakcyjnej Huta Zawadzka (linia CMK), zasilanej dotychczas napięciem 15 kV;
- 2) w nowej kontenerowej podstacji Barłogi (skrzyżowanie linii E20 i magistrali węglowej).

Wykonawcą przebudowy podstacji Huta Zawadzka była firma Elester-PKP Sp. z o.o., natomiast podstację Barłogi wybudowała firma PKRE S.A.

Jakkolwiek na łamach miesięcznika **tts** wielokrotnie pisano o wymienionych podstacjach oraz o urządzeniach

w nich zainstalowanych, wskazane jest omówienie w niniejszym artykule pierwszych doświadczeń eksploatacyjnych. Okazją jest również druga rocznica uruchomienia podstacji Huta Zawadzka po przebudowie (15 listopada) oraz pierwsza rocznica uruchomienia podstacji w Barłogach (3 października).

Nowe urządzenia w podstacjach trakcyjnych

Spośród nowych urządzeń w podstacjach trakcyjnych należy wymienić przede wszystkim te, które zainstalowano w związku z wprowadzeniem zasilania podstacji napięciem 110 kV.

Nowością jest kompaktowa aparatura łączeniowa, zastosowana w podstacji Barłogi (Compass produkcji ABB). Istota polega na połączeniu funkcji wyłącznika, odłączników, przekładników prądowych, odgromników i uziemnika w jednym module (fot. 1). Zaletą takiego rozwiązania, w porównaniu z wykonaniem tradycyjnym, jest niewielkie zajęcie terenu pod rozdzielnię 110 kV, wadą – droższe urządzenia. Ważną sprawą dla przyszłych wykonawców jest stosowanie napędów wyłączników i napędów wózków przesuwających wyłączniki do pozycji odłącznikowej na napięcie stałe 220 V, zwłaszcza w obiektach zasilanych jedną linią lub posiadających jeden transformator – chodzi o możliwość wykonywania przełączeń w rozdzielni 110 kV przy braku napięcia zasilającego podstację.

W związku z wprowadzeniem jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV powstały nowe transformatory prostownikowe. Są to transformatory czterouzwojeniowe 110/15/1,3/1,3 kV o mocy odpowiednio 7300/1000/3150/3150 kVA i układzie połączeń YNd11y0d11. Uzwojenie 15 kV służy do zasilania transformatorów potrzeb własnych podstacji oraz do zasilania linii potrzeb nietrakcyjnych, natomiast uzwojenia 1,3 kV, odpowiednio przesunięte w fazie, do zasilania prostowników trakcyjnych. Transformatory zostały wyposażone w przełączniki zaczeów do regulacji napięcia pod obciążeniem, a odczepy wyprowadzono z uzwojenia 110 kV. Konstrukcję transformatora komplikowało istnienie dwóch uzwojeń połączonych w trójkąt oraz potrzeba zminimalizowania oddziaływania uzwojeń prostownikowych



Fot. 1. Kompaktowa aparatura łączeniowa, zastosowana w podstacji Barłogi (Compass produkcji ABB) Fot. K. Tuliński

na uzwojenia 15 kV. Zaletą takiego transformatora cztero-uzwojeniowego, w porównaniu z trójuzwojeniowym (który służyłby tylko do zasilania prostowników), jest rezygnacja z dodatkowego transformatora 110/15 kV i pola wyłącznikowego w rozdzielni 110 kV oraz zmniejszenie terenu, co zdecydowanie obniża nakłady inwestycyjne. Wadą jest wzrost zawartości wyższych harmonicznych w napięciu 15 kV przy dużym obciążeniu uzwojeń trakcyjnych oraz zbędne wyłączenie transformatora od zabezpieczeń w rozdzielni 3 kV (np. ochrona podnapięciowa lub ziemnozwarciowa), co pozbawia napięcia rozdzielnię 15 kV. Producentami wymienionych transformatorów są: EMIT Żychlin (podstacja Huta Zawadzka) i ABB Elta w Łodzi (podstacja Barłogi – fot. 2).

Wprowadzenie jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV wymusiło wykonanie nowego typu prostowników trakcyjnych, głównie ze względu na możliwość wystąpienia dużych prądów zwarciovych. Prostowniki pracują w układzie dwunastopulsowym, a ich prąd znamionowy wynosi 1700 A w III klasie przeciążalności (150% przez 2 min, 200% przez 10 s). W prostownikach zastosowano system sygnalizacji uszkodzenia diod. Producentami prostowników są: ABB Industry z Łodzi (podstacja Barłogi) oraz Instytut Elektrotechniki Warszawa Międzylesie (podstacja Huta Zawadzka).

Zespoły prostownikowe zostały zaprojektowane w taki sposób, że jest możliwa ciągła praca równoległa dwóch zespołów do zasilania rozdzielni 3 kV. Możliwa jest również chwilowa praca równoległa uzwojeń 15 kV transformatorów, co umożliwi przełączanie zasilania rozdzielni 15 kV bez zaniku napięcia, a więc bez pozbawiania napięcia linii potrzeb nietrakcyjnych i potrzeb własnych prądu przemiennego.

Z nowymi zespołami prostownikowymi współpracują nowego rodzaju filtry wyższych harmonicznych napięcia wyprostowanego. Są to filtry gamma, w skład których wchodzi tradycyjne dławiki katodowe o zwiększonej indukcyjności (6 mH) oraz baterie kondensatorów (800 μ F). Zaletami tych filtrów, w porównaniu z tradycyjnymi rezonansowymi, jest lepsza charakterystyka częstotliwościowa oraz brak potrzeby okresowego dostrajania filtrów do rezonansu. Jednak duża indukcyjność dławików i pojemność kondensatorów wymagały położenia szczególnego nacisku na ochronę przepięciową i przetężeniową filtru, istotną zwłaszcza przy wyłączaniu prądów zwarciovych przez wyłączniki szybkie. Jednym z elementów tej ochrony było zastosowanie na dławikach tyrystorowych ograniczników przepięć, które oprócz eliminacji przepięć wspomagają pracę wyłączników szybkich, rozładowując energię zgromadzoną w indukcyjności dławików. Zmniejsza się zatem czas łukowy wyłączania oraz napięcie łuku. Przyczynia się to do zwiększenia żywotności komór gaszeniowych wyłączników szybkich, dzięki mniejszej ilości energii wydzielonej w postaci ciepła w komorze. W filtrze zastosowano również sygnalizację stanu bezpieczników baterii kondensatorów.

Wymagania odnośnie zwiększonej wytrzymałości zwarciowej (50 kA) przyczyniły się do powstania nowych typów rozdzielni 3 kV. Rozdzielnię kontenerową do podstacji Barłogi wykonała firma PKRE S.A. Warszawa, a rozdzielnicę do budynkowej podstacji Huta Zawadzka – APENA Bielsko Biała

(fot. 3). Rozdzielnia kontenerowa ma zasilacze umieszczone po dwa w dwóch celkach, każdy z indywidualną próbą linii. Pozwala to na wykonanie przeglądu i napraw, nie wyłączając całej rozdzielni.

Rozdzielnia budynkowa została wykonana jako dwuczłonowa; na członie wysuwym znajduje się wyłącznik szybki z próbą linii. Zaletą tego rozwiązania jest zmniejszenie zagrożenia porażenia prądem podczas eksploatacji. Istotną zmianą w porównaniu z dotychczas eksploatowanymi rozdzielnicami jest wprowadzenie silnikowych napędów odłączników, co pozwala na zdalne wykonywanie przełączeń – na uwagę zasługuje możliwość zdalnego przełączenia zasilacza na wyłącznik zapasowy. Rozdzielnie tego typu są obecnie rozpowszechniane i pracują, oprócz wymienionej Huty Zawadzkiej, również w Zalesiu, Warszawie Pradze, Rogalicach i Rembertowie (wersja przyścienna), nie stwarzając problemów eksploatacyjnych.

Obserwowany w ostatnich latach silny rozwój elektroniki i informatyki pozwolił na zastosowanie mikroprocesorowych, swobodnie programowalnych sterowników. W ślad za wprowadzeniem sterowników zaistniała potrzeba opracowania nowego standardu komunikacji między sterownikami, co zaowocowało stworzeniem magistrali przesyłu danych w obiekcie, czyli „rozproszonej” automatyki i sterowania podstacji trakcyjnych. Standard CAN-Bus/RS485 definiuje rodzaj



Fot. 2. Transformator czterouzwojeniowy w podstacji Barłogi

Fot. K. Tuliński



Fot. 3. Rozdzielnica do budynkowej podstacji Huta Zawadzka

Fot. Elester-PKP

interfejsu łączącego urządzenie z magistralą przesyłu danych oraz protokół wymiany informacji między urządzeniami z wykorzystaniem tej magistrali (nazwany PPM2). Protokół definiuje zasady dostępu do magistrali przez poszczególne urządzenia i struktury danych w przesyłanych magistralą telegramach. Opis standardu CAN-Bus/RS485 i zasady wykorzystania protokołu PPM2 są zawarte w opracowaniu „Przekazywanie informacji w obiekcie zasilania wyposażonym w urządzenia współpracujące przez magistralę CAN-Bus/RS485”, wykonanym przez CNTK na zlecenie Dyrekcji Elektroenergetyki Kolejowej.

Równolegle z wdrażaniem jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV, w podstacjach trakcyjnych PKP rozpoczęto wdrażanie mikroprocesorowych sterowników i zabezpieczeń urządzeń zasilania sieci trakcyjnej. Z tego powodu podstacje Huta Zawadzka i Barłogi, obok Zalesia i Jeleśni, były pierwszymi, w których znalazła zastosowanie automatyka mikroprocesorowa oraz magistrala CAN-Bus/RS485.

Próby i badania eksploatacyjne

Na zlecenie Dyrekcji Elektroenergetyki Kolejowej zostały wykonane przez Zakład Elektroenergetyki CNTK następujące prace:

- *Badania eksploatacyjne zespołu prostownikowego z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV z urządzeniem wyładowującym*
- *Badania eksploatacyjne rozdzielnic 3 kV przystosowanej do pracy w podstacji z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV*
- *Nadzór nad wdrożeniem i eksploatacją nowych urządzeń zasilania, automatyki sterowania i zabezpieczeń w podstacjach trakcyjnych*

Z tych prac wynikają następujące wnioski:

1. Nowe zespoły prostownikowe posiadają bardzo sztywną charakterystykę zewnętrzną – rezystancja wewnętrzna zespołu wynosi ok. 0,1 Ω .
2. Procesy łączeniowe po stronie napięcia 110 kV i 15 kV nie powodują powstawania przepięć po stronie 3 kV DC.
3. Filtr gamma charakteryzuje się dużą efektywnością pracy – przy dużym obciążeniu trakcyjnym ($2 \times I_N = 3400$ A) procentowa wartość napięcia psfometrycznego (zakłócającego) nie przekracza dopuszczalnego poziomu 0,5 % nawet przy długotrwałej pracy z niepełną pojemnością (550 μ F).
4. Ochrona przepięciowa i przetężeniowa filtra działa poprawnie. Dodatkowo zaobserwowano, że działanie tyrystorowych ograniczników przepięć na dławikach katodowych znacznie skraca czas łukowy wyłączników szybkich.
5. Przeprowadzone próby zwarcia wykazały poprawność pracy urządzeń. Nie zaobserwowano niepożądanych zjawisk. Zwarcia wykonywano zarówno bezpośrednio za wyłącznikiem szybkim, jak i na szynach 3 kV rozdzielni (zwarcia wyłączały wówczas wyłączniki 110 kV zespołów prostownikowych). Ustalony prąd zwarcia jednego zespołu wynosi ok. 18 kA, natomiast dwóch zespołów 32 kA. Na uwagę zasługuje krótki czas wyłączenia zwarć na szynach 3 kV. Wyłączniki 110 kV przerywają prąd zwarcia po ok. 60 ms, co dobrze świadczy o ich konstrukcji oraz o zabezpieczeniach. Warto dodać,

że duża indukcyjność dławików powoduje bardzo powolny zanik prądu, trwający powyżej 1 s. Powoduje to dodatkowe obciążanie elementów obwodu głównego, zwłaszcza diod prostowników.

6. Badania jakości napięcia 15 kV z uzwojeń transformatorów prostownikowych wykazały dwa niepożądane zjawiska:
 - obciążenie transformatora prostownikowego prądem trakcyjnym ma stosunkowo duży wpływ na zmiany napięcia 15 kV, choć ich dopuszczalne wartości nie są przekraczane;
 - przy dużych obciążeniach trakcyjnych występują silne odkształcenia napięcia 15 kV, w szczególności 11 i 13 harmoniczna.
7. Zaobserwowano powstawanie oscylacji w układach komutacyjnych prostowników, co dodatkowo niepotrzebnie obciąża filtry.
8. Zaobserwowano niewielkie obciążenie odbiorami nietrakcyjnymi oraz potrzebami własnymi podstacji, co świadczy o dużym zapasie mocy uzwojeń 15 kV transformatorów.

Doświadczenia eksploatacyjne

Bezpośrednio po włączeniu obu podstacji do ruchu występowały drobne usterki lub nieprzewidziane problemy techniczne, które były na bieżąco usuwane przez producentów urządzeń, wykonawców oraz pracowników eksploatacji. Ciekawym przykładem były problemy z regulacją napięcia pod obciążeniem. Do regulacji zastosowano regulatory napięcia typu RNT5E firmy Computers & Control z Katowic. Regulacja odbywa się w inny sposób niż w typowych transformatorach energetycznych 110/SN. Pomiar napięcia do regulacji odbywa się po stronie 110 kV i dla danego przedziału napięć jest zaprogramowany konkretny numer zaczełu transformatora zgodnie z jego tabliczką znamionową – regulacja odbywa się bez sprzężenia zwrotnego. Taki sposób regulacji dostosowuje napięcie wyjściowe w zależności od zmian napięcia zasilającego, natomiast nie reaguje na spadki napięcia na wyjściu spowodowane zmianami obciążenia. Ponieważ zmiany obciążenia transformatorów prostownikowych w podstacjach trakcyjnych są duże i częste, tradycyjny sposób regulacji doprowadziłby do nadmiernego zużycia elementów przełącznika zaczełów. Oprócz podstawowych funkcji, związanych z regulacją napięcia, regulatory mogą:

- zawyżać lub zaniżać napięcie wyjściowe trwale lub w określonych przedziałach doby, np. w celu racjonalnego obciążania się danej podstacji przy dwustronnym zasilaniu sieci trakcyjnej;
- zawyżać lub zaniżać napięcie wyjściowe po wprowadzeniu sygnału z zewnątrz – opcja ta może być używana np. w celu unikania przekroczeń mocy zamówionej, zamiast wyłączania zespołów prostownikowych;
- monitorować pracę przełącznika zaczełów.

Innym przykładem może być niewłaściwe funkcjonowanie zabezpieczeń różnicowych transformatorów prostownikowych. Ze względu na brak typowych zabezpieczeń, do transformatorów czterouzwojeniowych zastosowano zabezpieczenia typu PQ 721 firmy ALSTOM, przeznaczone do transformatorów trójuzwojeniowych. Wykorzystano tu fakt,

że uzwojenia prostownikowe są zawsze obciążone tym samym prądem i zawsze pracują jednocześnie. Przekładniki prądowe obu uzwojeń prostownikowych połączono w taki sposób, aby symulować jedno uzwojenie. To z kolei spowodowało trudności w doborze nastaw zabezpieczeń. Po wielu próbach i konsultacjach z producentem uzyskano właściwe nastawy, nie powodujące zbędnych wyłączeń transformatorów (często występujących w początkowej fazie eksploatacji) i chroniące transformatory we właściwy sposób.

Wprowadzanie sterowników mikroprocesorowych napotkało w początkowej fazie wiele trudności, a zdobyte doświadczenia pozwoliły na zmniejszenie ich w kolejnych wykonaniach. Przy stosowaniu automatyki mikroprocesorowej, ze względu na jej wrażliwość, należy zwrócić szczególną uwagę na ochronę przepięciową i przeciwwzrosteniową. Przekładniki elektromagnetyczne, styczniki i wyłączniki szybko generują silne przepięcia w obwodach automatyki, natomiast bliskość obwodów silnoprądowych i wysokonapięciowych przyczynia się do zwiększonego oddziaływania pola elektromagnetycznego na urządzenia mikroprocesorowe. Wskazane jest ekranowanie sterowników oraz instalowanie w obiektach kilkustopniowej ochrony przepięciowej w obwodach sterowniczych poprzez zastosowanie ograniczników napięcia o różnych napięciach i zdolnościach pochłaniania energii.

Na etapie tworzenia projektów wykonawczych nowych lub modernizowanych obiektów należy uwzględnić tzw. dokumentację informatyczną, niepraktykowaną w tradycyjnych wykonaniach. Jest ona potrzebna m.in. programistom i wykonawcom do skonfigurowania i wzajemnego powiązania poszczególnych sterowników w obiekcie; dzięki niej wiadomo, jakie informacje muszą wysyłać poszczególne sterowniki do magistrali CAN-Bus, jakie informacje muszą być odbierane z magistrali i jaka powinna być reakcja sterowników po odebraniu informacji. W wykonaniach tradycyjnych wzajemne powiązania funkcjonalne określał układ połączeń cewek i styków przekładników oraz styczników, co w nowym wykonaniu automatyki zostało znacznie ograniczone. Dokumentacja informatyczna jest potrzebna również pracownikom eksploatacji i serwisu.

Duża liczba poprawek w oprogramowaniu sterowników przy uruchamianiu obiektu, po połączeniu wszystkich sterowników w obiekcie, a także trudności w zlokalizowaniu usterek w sterownikach, wymusiły potrzebę opracowania narzędzi diagnostyczno-serwisowych. Na zlecenie Dyrekcji Elektroenergetyki Kolejowej CNTK wykonało pracę *Opracowanie komputerowego zestawu diagnostyczno-serwisowego dla obiektów zasilania wyposażonych w cyfrowe urządzenia sterowania zasilaniem*. Efektem tej pracy był komputerowy zestaw diagnostyczno-serwisowy, w skład którego wchodzi tester sieci CAN-Bus/RS485 oraz symulator urządzeń pracujących w sieci. Zarówno tester, jak i symulator wymagają wyposażenia komputera klasy PC w kartę sprzężenia z siecią CAN-Bus/RS485 oraz oprogramowania. Aby uruchomić zestaw diagnostyczno-serwisowy w pełnej konfiguracji, należy wykorzystać dwa komputery lub jeden wyposażony w dwie karty. Zestaw ten służy producentom mikroproce-

sorowych urządzeń automatyki i zabezpieczeń, służbom eksploatacji i innym jednostkom zajmującym się projektowaniem, badaniem i wdrażaniem tych urządzeń. W szczególności umożliwia on:

- diagnostykę sieci CAN-Bus/RS485,
- monitorowanie i tworzenie dokumentacji pracy urządzeń w obiektach zasilania,
- testowanie kompatybilności sprzętowej i programowej interfejsu CAN-Bus/RS485 we wszystkich urządzeniach z wymaganiami protokołu PPM2,
- testowanie zapisanej w oprogramowaniu logiki pracy urządzeń automatyki i zabezpieczeń,
- symulację działania urządzeń.

Warto podkreślić, że wprowadzenie nowych mikroprocesorowych urządzeń i wyposażenie obiektów w sieć CAN-Bus/RS485 wymaga innego podejścia obsługi do eksploatacji tych urządzeń. Wiąże się to ze zwiększonymi kwalifikacjami pracowników, częstszymi szkoleniami w zakresie wdrażanych nowości oraz wyposażeniem w odpowiedni sprzęt, np. we wspomniany zestaw diagnostyczno-serwisowy.

Podsumowanie

Mimo dość krótkiego czasu eksploatacji opisanych urządzeń, pion elektroenergetyki PKP S.A. uzyskał już wiele cennych doświadczeń. Zasadniczo potwierdziła się słuszność przyjętych rozwiązań, choć wiele z nich wymaga drobnych zmian i dopracowania szczegółów. Zebrane doświadczenia w odniesieniu do urządzeń obwodu głównego pozwalają na wypracowanie właściwych decyzji odnośnie sposobu wzmacniania układu zasilania, zastosowania konkretnych rozwiązań technicznych itp. W odniesieniu do mikroprocesorowych urządzeń automatyki i zabezpieczeń opisany kierunek zmian będzie z pewnością kontynuowany w przypadku nowych, bądź modernizowanych obiektów.

Na uwagę zasługuje fakt, że większość z urządzeń obwodu głównego oraz sterowników mikroprocesorowych ma co najmniej dwóch producentów. Pozwala to na zachowanie konkurencji cenowej i jakościowej.

Na zakończenie warto podkreślić zaangażowanie wielu producentów (nie tylko tych wymienionych), projektantów oraz jednostek naukowo-badawczych, w szczególności CNTK i Politechniki Warszawskiej we wdrażaniu jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV w podstacjach trakcyjnych PKP S.A. Również warto zaznaczyć bardzo duże zaangażowanie kierownictwa zakładów elektroenergetyki kolejowej w Kielcach i Poznaniu oraz pracowników eksploatacji z sekcji zasilania elektroenergetycznego w Korytowie i Kole.

□

Autor
Konrad Tuliński
PKP S.A. Dyrekcja Elektroenergetyki Kolejowej