

ADAM SZELĄG, LESZEK MIERZEJEWSKI\*

## PROBLEMY ZASILANIA LINII KOLEJOWYCH DUŻYCH PRĘDKOŚCI JAZDY

### PROBLEMS OF HIGH SPEED RAILWAY LINES POWER SUPPLY

#### Streszczenie

Polityka UE w zakresie transportu kolejowego, w szczególności sieci szybkich linii kolejowych w Europie, dała impuls nie tylko do modernizacji głównych linii kolejowych w Polsce, ale również stworzyła szansę na budowę nowych połączeń. Ponieważ w Polsce obecnie stosowany jest na kolei wyłącznie system trakcji 3 kV DC, warto podjąć dyskusję i studia dotyczące wymagań technicznych i uwarunkowań systemu zasilania, który powinien być zastosowany na nowo projektowanych liniach. W niniejszym artykule przedstawiono specyfikę 3 głównych systemów trakcji elektrycznej stosowanych w Europie na liniach o prędkościach powyżej 200 km/h. Omówiono techniczne parametry podstacji i sieci trakcyjnej, porównano zalety i wady każdego z systemów oraz podkreślono problemy, jakie mogą się pojawić przy ich wprowadzaniu.

*Słowa kluczowe: trakcja elektryczna, systemy zasilania, linie kolejowe dużych prędkości*

#### Abstract

EU policy in the area of railway transport, specifically high-speed railway network in Europe, has been created impulse not only for enhance modernization of main railway lines in Poland but as well for studies of construction new connections. As currently 3 kV DC system of electrification is used uniformly on Polish railroads it is worth to undertake discussions and technical studies on the conditions and technical requirements towards power supply systems to be applied for newly designed lines. The paper presents the specification of three power supply systems used in Europe at lines with speeds over 200 km/h. Technical parameters of traction substations and catenary are presented. Advantages and disadvantages of each of the system are discussed and specific problems which could appear, taking into account local circumstances are underlined.

*Keywords: electric traction, power supply, high-speed railways*

\* Dr hab. inż. Adam Szeląg, prof. PW, dr inż. Leszek Mierzejewski, Instytut Maszyn Elektrycznych, Wydział Elektryczny, Politechnika Warszawska.

## 1. Wstęp

Od wielu lat w Polsce rozpatruje się możliwość budowy szybkich linii kolejowych. Brak zdecydowanej prokolejowej polityki rządu i parlamentu spowodował, że traktowano je jako bardziej przyszłościowe, a marzeniem kolejarzy i użytkowników kolei było, by starczyło środków na utrzymanie infrastruktury bez konieczności wprowadzania ograniczeń prędkości oraz na tabor zachęcający do skorzystania z jej usług. Już w latach 90. XX w. dzięki pojawieniu się środków przedakcesyjnych z UE perspektywy kolei, mimo utrzymującej się zapaści, zaczęły się poprawiać, a po wejściu Polski do UE zaczęły wręcz sphywać potencjalne miliardy euro. Niestety, potrzebny jest potencjał do skorzystania z tego „rogu obfitości”, w tym dobrze przygotowane i uzasadnione plany i programy zagospodarowania środków. Stąd w ostatnim okresie daje się zauważyć zwiększoną aktywność planistyczno-projektową w zakresie studiów wykonalności dotyczących nie tylko modernizacji istniejących linii, ale również budowy nowych szybkich połączeń kolejowych. I to nie tylko jako linii tranzytowych (jak wcześniej planowany polski odcinek linii Berlin–Warszawa–Moskwa), ale również wewnętrznych, takich jak Warszawa–Łódź–Poznań/Wrocław. Decyzje o budowie nowych połączeń na duże prędkości (do 350 km/h) powinny być podejmowane z rozważą, gdyż są to niezwykle kosztowne inwestycje. Ponieważ jest możliwość uzyskania dofinansowania na ich realizację z puli środków przypisanych Polsce w budżecie UE na infrastrukturę, to środki te mogą również zostać przeznaczone np. na potrzebną modernizację już istniejących linii kolejowych. Ale już na pewno utrzymanie i rentowność szybkich linii w trakcie eksploatacji będzie tylko sprawą operatora infrastruktury i przewoźników. Dlatego warto zwrócić uwagę na efektywność wykorzystania środków i bieżącą rentowność szybkich linii w takich krajach, jak Francja czy Niemcy, a w szczególności Hiszpania, która od 1992 r. eksploatuje i nadal rozbudowuje sieć szybkich kolei.

W niniejszym artykule autorzy zwracają uwagę na kilka aspektów natury technicznej, jakie wiążą się z budową szybkich linii kolejowych w zakresie infrastruktury elektroenergetycznej, która zapewne będzie się różnić od obecnie eksploatowanej w Polsce.

## 2. Zelektryfikowane linie dużych prędkości

Docelowo linie kolejowe wszystkich krajów Europy ujęte w sieci transeuropejskiej, niezależnie od przyjętego systemu elektryfikacji, mają być dostępne dla każdego operatora (przewoźnika) dysponującego odpowiednim tarem. Ze względu na różne rozwiązania techniczne, w tym stosowane systemy zasilania, udostępnienie linii wymaga ujednoczenia i dostosowania parametrów poszczególnych systemów zasilania do jednolitych standardów skoordynowanych z wymaganiami obowiązującymi w przypadku lokomotyw eksploatowanych w danym systemie. Zagadnieniom tym poświęcone są wydane w kolejnych latach przepisy UE: 1996 Dyrektywa 96/48 – Techniczne Specyfikacje Interoperacyjności dla kolei dużych prędkości, 2001 Dyrektywa 2001/16 – TSI dla kolei konwencjonalnych, 2002 Decyzje 730-735/200 Wprowadzenie Technicznych Specyfikacji Interoperacyjności, 2002 Decyzja KE 2002/733/EC z dnia 30 maja 2002 r. dotycząca TSI transeuropejskiego systemu szybkiej kolei dla podsystemu energia zgodnie z dyrektywą 96/48/EC.

Według TSI typ linii określa się na podstawie następujących parametrów:

- **maksymalna prędkość linii** – określona w [km/h] zaakceptowana prędkość dla danego odcinka;
- **moc jednostki mierzona na pantografie** – maksymalna moc ciągła [MW] wymagana przez pociąg dla celów trakcyjnych i obwodów pomocniczych;
- **minimalny możliwy odstęp** – przedział czasowy liczony w minutach pomiędzy pociągami, dozwolony przez system sygnalizacji i sterowania ruchem na linii.

Przy wyborze i projektowaniu układu zasilania trakcji elektrycznej podstawowym kryterium oceny jakości pracy takiego układu jest zagwarantowanie dostawy energii o wymaganej jakości do prowadzenia ruchu pojazdów trakcyjnych o określonej mocy:

- z dostateczną dyspozycyjnością mocy;
- o wymaganej wartości napięcia (tzw. napięcie użyteczne);
- bez niedozwolonych oddziaływań na sieć zasilającą i infrastrukturę linii;
- o dużej niezawodności.

Ponadto uwzględnia się także uwarunkowania techniczne i finansowe (liczbę i koszt budowy podstacji, koszt sieci trakcyjnych i elektroenergetycznych, możliwość współpracy z systemem energetycznym ze względu na zakłócenia) oraz lokalne (np. istnienie dogodnych punktów przyłączeniowych do sieci elektroenergetycznej, system zasilania już istniejących linii).

Obecnie za rozwojowe, tzn. rekomendowane do stosowania na nowo elektryfikowanych odcinkach, uznaje się systemy: 25 i 50 kV Hz oraz 15 kV 16 2/3 Hz (w krajach, gdzie ten system jest stosowany). W szczególności odnosi się to do linii przewidzianych do ruchu z prędkościami powyżej 250 km/h ze względu na wymóg dostawy dużej mocy (powyżej 10 MW) do pociągów. W niekonwencjonalnych systemach dużej prędkości z pojazdami na poduszce magnetycznej problem poboru dużej mocy rozwiązano dzięki zastosowaniu silnika liniowego, co pozwala na zasilanie torowiska (w którym umieszczony jest stator silnika liniowego), a nie pojazdu i eliminuje napowietrzną sieć trakcyjną.

## 2.1. System zasilania prądu stałego

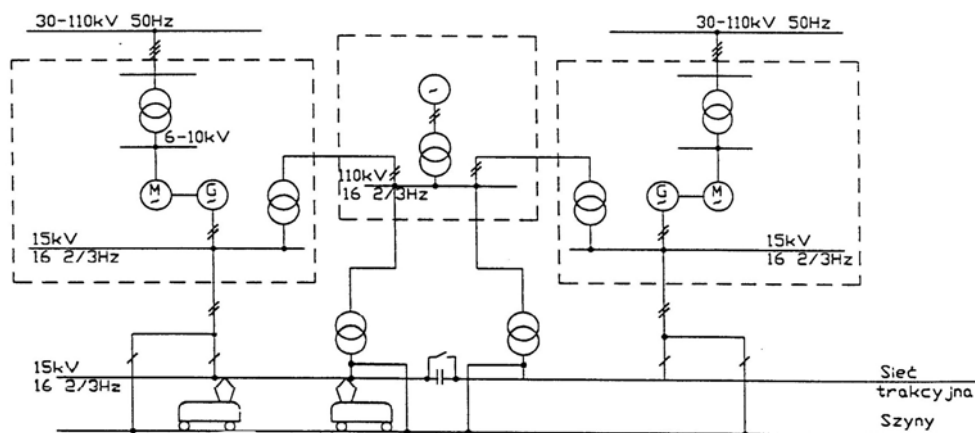
Dobrze znany system prądu stałego pozwala, szczególnie w wariantie stosowanym w Polsce 3kV DC, na prowadzenie ruchu pojazdów z prędkościami do 220–250 km/h o mocy do 6–8 MW. Większe obciążenia (moc pojazdów i gęstość ruchu) powodują jednak znaczne spadki napięcia i duże prądy obciążenia, co wymaga: zwiększenia przekroju sieci trakcyjnej (nawet do ponad 600 mm<sup>2</sup> Cu), mniejszych odległości między podstacjami (nawet 10–12 km), większych mocy zainstalowanych w podstacjach (powyżej 10 MW). Wymusza to wzrost nakładów inwestycyjnych i jest kosztowne w eksploatacji. Ponadto zwiększone obciążenia i pobór harmonicznych powoduje konieczność przeniesienia punktu wspólnego przyłączenia podstacji do sieci elektroenergetycznej na poziom wysokiego napięcia, czyli stosowania transformacji jednostopniowej. W Polsce funkcjonuje już kilka podstacji trakcyjnych zasilanych napięciem 110 kV – Huta Zawadzka na linii CMK, Barłogi, Mienia, Sosnowe, Sabinka na linii E20, Przecza na linii E30. Eksploatowane są w nich zespoły PD17 o mocy 6,4 MW z filtrami typu LC. Sieć trakcyjna w systemie prądu stałego stwarza wiele problemów zarówno konstrukcyjnych (duże przekroje, współpraca odbierak–sieć trakcyjna), jak i eksploatacyjnych (szybkie zużycie), szczególnie dla dużych prędkości.

Przykładem linii zasilanych napięciem stałym, na których prowadzony był ruch z prędkościami powyżej 200 km/h jest system 1,5 kV DC we Francji, 3 kV DC we Włoszech.

Moc zespołów projektowanych do zainstalowania w podstacjach linii Rzym–Neapol w rozpatrywanym tu wariancie zasilania 3 kV DC (ostatecznie wybrano do elektryfikacji napięcie  $2 \times 25$  kV 50 Hz) dla przewidywanego ruchu pociągów o prędkości 300 km/h sięgały  $2 \times 10$  MVA (moce transformatorów) z dodatkowym zespołem rezerwowym, co dawało okład mocy linii powyżej 1,1 MW/km. Przewidywano zastosowanie: zasilania dwustronnego z podstacji rozmieszczonych co 12 km bez kabiny sekcyjnej, zespołów prostownikowych 12-pulsowych z filtrami typu LC oraz wyłączników szybkich o zdolności wyłączenia prądów powyżej 50 kA. Zasilanie podstacji wydzieloną linią 132 kV 50 Hz miało zapewniać wysoki poziom niezawodności w układzie  $n - 1$  (wyłączenie z pracy jednej podstacji pozwala na utrzymanie prognozowanego ruchu), jednocześnie eliminując negatywne oddziaływanie podstacji na sieć zasilającą. Dla porównania – po przewidywanej modernizacji linii CMK zainstalowany okład mocy wyniósłby ok. 700–900 kW/km.

## 2.2. System 15 kV 16 2/3 Hz

System ten wymaga wytworzenia napięcia o obniżonej częstotliwości 16 2/3 Hz w elektrowniach lub za pomocą jednofazowych przetwornic elektromaszynowych albo statycznych (ryc. 5), które zasilają podstacje indywidualnie lub ze specjalnego scentralizowanego systemu linii jednofazowych 110 kV (ryc. 1). Obciążenie trakcyjne stanowi zatem dla systemu elektroenergetycznego odbiór symetryczny 3-fazowy, zakłócenia zaś mogą wprowadzać rozruchy maszyn wirujących o mocy rzędu 10 MVA lub harmoniczne wprowadzane przez przetwornice statyczne.



Ryc. 1. Schemat dostawy energii elektrycznej dla systemu 15 kV 16 2/3 Hz

Fig. 1. Scheme of electrical energy supply – 15 kV 16 2/3 Hz traction system

Dzięki obniżonej częstotliwości impedancja zwarciova sieci trakcyjnej jest mniejsza niż w przypadku 50 Hz, co wpływa na warunki wyłączalności minimalnych prądów zwarciowych. Ponadto w porównaniu z systemem 25 kV 50 Hz istnieje możliwość łączenia wzdłużnego poszczególnych odcinków sieci trakcyjnej zasilanych z różnych podstacji w przypadku przerw w pracy jednej z podstacji. Ułatwia to zasilanie w stanach awaryjnych, gdyż można zrezygnować z rezerwowania mocy dla zasilania sąsiednich odcinków linii, co

jest konieczne w systemach 25 kV 50 Hz ze względu na fakt, że transformatory podstacji systemu 25 kV przyłączone są do różnych źródeł napięć oraz do różnych faz. Linie szybkie zasilane napięciem o częstotliwości 16 2/3 Hz to przede wszystkim trasy ICE w Niemczech, ale także w Szwajcarii czy Szwecji. Sieci trakcyjne w systemach prądu przemiennego są znacznie lżejsze niż w systemach prądu stałego.

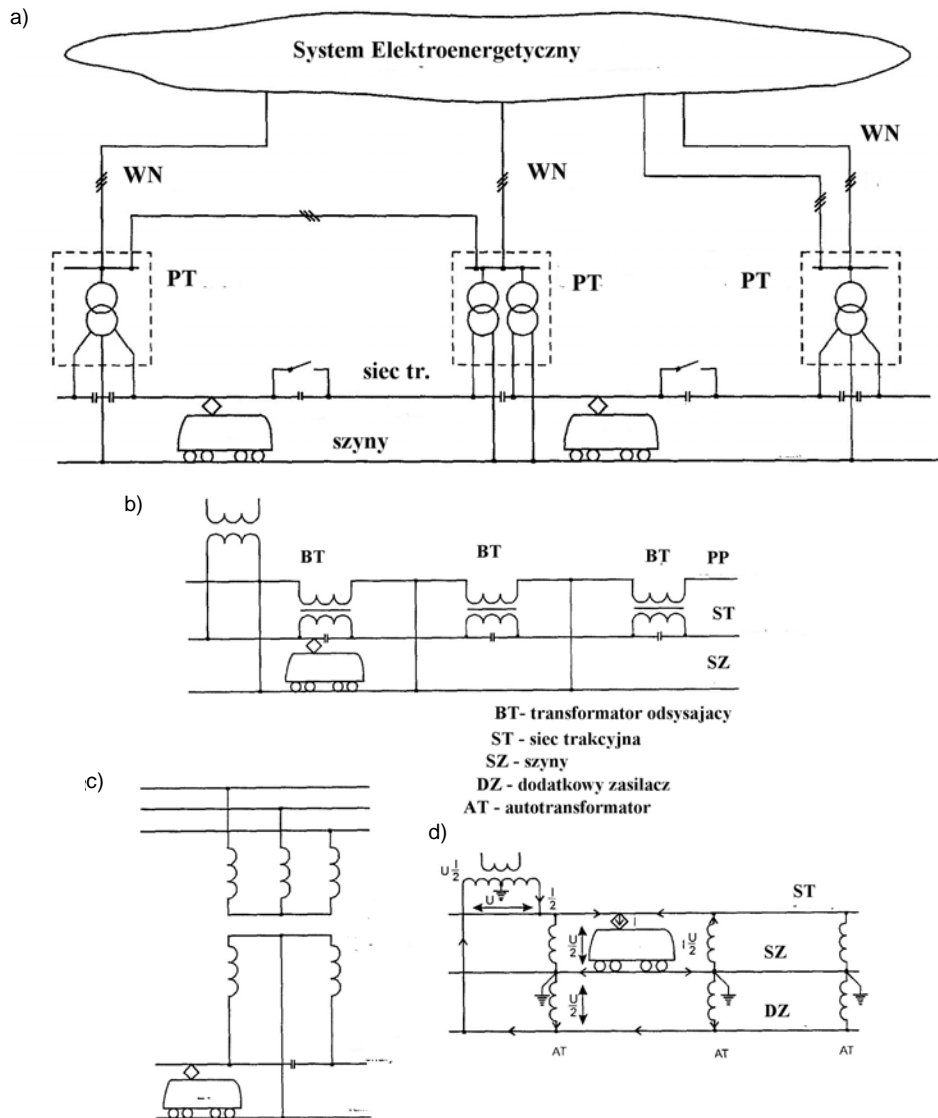
### 2.3. System 50/60 Hz

Obecnie stosowane są różne rozwiązania systemu zasilania prądu przemiennego o częstotliwości sieciowej 50 lub 60 Hz (ryc. 2).

Najprostszy schemat zasilania w tym systemie przedstawiono na ryc. 2a, ale ze względu na wpływ prądu w ziemi i zakłócenia w obwodach telekomunikacji nie jest on praktycznie stosowany. W wersji zmodyfikowanej stosuje się system z tzw. transformatorami odsysającymi (*booster transformers* – BT) włączonymi co kilka kilometrów pomiędzy sieć szynową i dodatkowy przewód powrotny (ryc. 2b). Ich zadaniem jest wymuszenie przepływu prądu z szyn jezdnych do przewodu powrotnego. Najnowszym rozwiązaniem jest tzw. system 2×25 kV (ryc. 2d). W tym układzie zasilania w podstacji znajduje się transformator z dwoma uzwojeniami wtórnymi o napięciach nieco wyższych od napięcia znamionowego – 27,5 kV, których środek jest uziemiony i połączony przewodem powrotnym z szynami (SZ). Koniec jednego z uzwojeń wtórnych podłączony jest do sieci trakcyjnej (ST), koniec drugiego zaś do dodatkowego przewodu zasilającego (DZ). Przy takim połączeniu napięcie między siecią jezdnią a szynami wynosi 27,5 kV, zaś na wyjściu transformatora 55 kV. Przewody sieci trakcyjnej i dodatkowy zasilacz (DZ) są zawieszane na tych samych słupach, tworząc system 2-fazowy 50 kV. Na odcinku pomiędzy kolejnymi podstacjami znajdują się autotransformatory (AT) rozmieszczone co 7–25 km, które są podłączone pomiędzy sieć trakcyjną (ST) a dodatkowy zasilacz (DZ), zaś ich środki są wyprowadzone na zewnątrz i podłączone do szyn jezdnych (SZ). Podczas przemieszczania się pojazdu wzdłuż odcinka autotransformatory kolejno przejmują zasilanie pociągu, a prąd pobierany przez pojazd płynie tylko na odcinku między najbliższymi autotransformatorem. Dzięki temu zmniejsza się spadki napięcia i wydłuża odcinki zasilania, a podstacje mogą być rozmieszczone 2–2,5 razy rzadziej niż w przypadku układu 1×25 kV przy zapewnieniu tych samych warunków pracy. System ten stanowi alternatywę dla wprowadzanego w niektórych krajach systemu 50 kV, ale musi być zasilany z linii WN o napięciu 220 kV lub wyższym. Umożliwia on jednak budowę kolei tam, gdzie słaby rozwój linii WN wymusza duże odległości pomiędzy podstacjami. System 2×25 kV w porównaniu z systemem 1×25 kV zmniejsza wpływ prądu powrotnego do ziemi i oddziaływania zakłócające na obwody niskoprądowe. Wadą tego systemu jest większa złożoność i potrzeba dodatkowego wyposażenia w celu zapewnienia odpowiedniego układu zabezpieczeń. Różnice w wyposażeniu systemu 2×25 kV w stosunku do 1×25 kV dotyczą przede wszystkim typów transformatorów w podstacjach WN (2×25 kV) i dodatkowo autotransformatorów na linii (50/25 kV), co znacznie podnosi koszty inwestycyjne. Napięcie zasilania transformatorów zależy od ich mocy i np. dla linii TGV, gdzie stosuje się olejowe transformatory o mocy 60 MVA, jest to napięcie 225 lub 400 kV. Autotransformatory mają moce od 5 MVA na liniach konwencjonalnych do 10 MVA na liniach TGV i 15 MVA na linii Rzym–Neapol.

W podstacjach systemu 1×25 kV rozmieszczonych co 40–60 km (w systemie 2×25 kV nawet co 80–120 km) występują przeważnie dwa zasilacze 25 kV, każdy z nich podwójny, i niezależny, będący w stanie indywidualnie przenieść całkowite obciążenie trakcyjne

w normalnych warunkach ruchowych, co zapewnia dużą niezawodność (100% rezerwowania). Każdy z zasilaczy ma własny wyłącznik mocy po stronie 25 kV. Transformatory 110/25 kV są zasilane z dwóch niezależnych źródeł sieci WN.



Ryc. 2. Układ zasilania systemu 50 Hz 25 kV: a) schemat ogólny, b) wariant z transformatorami odsysającymi (*booster transformers* – BT), c) zasilanie z zastosowaniem specjalnych transformatorów, d) system 2×25 kV

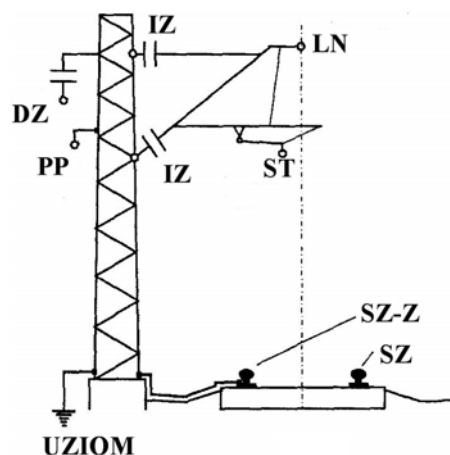
Fig. 2. 50 Hz 25 kV traction power supply system: a) general scheme, b) version with booster-transformers, c) a special transformer applied, d) 2×25 kV system scheme



System zasilania 25 kV sieci napowietrznej stanowi jednobiegowy system dostawy energii z uziemionym punktem zerowym podstacji (ryc. 2). Jedną z szyn każdego toru stanowi szynę powrotną (SZ-Z) dla prądu trakcyjnego, połączoną z dodatkowym przewodem powrotnym (PP) w celu zmniejszenia spadków napięć w szynach (SZ) (ryc. 3). Szyny te są ze sobą połączone i przyłączone do konstrukcji wsporczych sieci trakcyjnej. Podstawowym parametrem brany pod uwagę przy rozpatrywaniu systemu uziemień jest poziom napięcia na konstrukcjach metalowych w stosunku do ziemi.

Ryc. 3. Schemat rozmieszczenia przewodów sieci trakcyjnej w systemie 25 kV, DZ – dodatkowy zasilacz (typowy w systemie 2×25 kV), PP – przewód powrotny, SZ-Z – szyna-ziemia systemu trakcyjnego, IZ – izolator, LN – lina nośna, ST – sieć trakcyjna

Fig. 3. 25 kV AC system – catenary wires layout, DZ – additional feeder, PP – return wire, SZ-Z – a rail-earth of a traction system, IZ – isolator, LN – Messenger wire, ST – contact wire



W systemie prądu przemiennego stosowane są złożone układy zabezpieczeń, których zadaniem jest zapewnienie bezpieczeństwa ludzi i ograniczenie zagrożeń, które mogą być wywołane przez zwarcia lub przeciążenia. Na układ zabezpieczeń w systemie prądu przemiennego składają się m. in.:

- a) zabezpieczenia transformatora: zabezpieczenie nadprądowe, zabezpieczenie od zwarć doziemnych, zabezpieczenie Buchholza, zabezpieczenie termiczne uzwojeń, które chroni przed skutkami nadmiernego obciążenia lub w przypadku awarii układu chłodzenia; zabezpieczenie termiczne medium chłodzącego, posiadające, podobnie jak zabezpieczenie Buchholza, dwa stopnie: alarm i wyłączenie; zabezpieczenie różnicowe;
- b) ochrona sieci trakcyjnej: zabezpieczenie odległościowe, zabezpieczenie termiczno-obciążeniowe, zabezpieczenie zanikowo-napięciowe, zabezpieczenie minimalnoczasowe;
- c) ochrona kabli zasilających: zabezpieczenie od wyładowań atmosferycznych, układ porównywanie prądów wejściowych oraz wyjściowych.

### 3. Zakłócenia powodowane przez system 25 kV i sposoby ich ograniczania

System zasilania 25 kV 50 Hz stanowi, z punktu widzenia oddziaływania na sieć elektroenergetyczną, odbiór 1-fazowy. W celu zminimalizowania tego zakłócenieowego oddziaływania przyłączenia dokonuje się do sieci o napięciach 110 kV lub wyższych. Kolejne, sąsiadujące ze sobą podstacje podłączane są zwykle do różnych faz, tak by system WN miał równomiernie rozłożone obciążenia pomiędzy trzy fazy. Innym rozwiązaniem jest stosowanie specjalnych transformatorów w podstacjach (np. Scotta, Woodridga,

Le Blanca), które zmniejszają asymetrię wprowadzaną do systemu elektroenergetycznego lub, gdy jest to konieczne, stosowanie symetryzatorów. Niezbędne jest też określenie wielkości asymetrii przez wyznaczenie wektora składowej przeciwnej oraz ustalenie limitów tej wielkości. Do obliczenia współczynnika asymetrii [11] można się posłużyć jednym z podanych niżej wzorów

$$\text{nps} = \frac{U_{\max} - U_{\text{sr}}}{U_{\text{sr}}} \cdot 100\% \quad \text{lub} \quad (1)$$

$$\text{nps} = \frac{U_{\max\%} - U_{\min\%}}{1,7} \quad [\%] \quad (2)$$

gdzie:

$U_{\max\%}, U_{\min\%}$  – maksymalna i minimalna wartość skuteczna napięcia fazowego wyrażona w [%] wartości znamionowej,

$U_{\max}, U_{\text{sr}}$  – maksymalna i średnia wartość napięcia fazowego.

W przypadku obciążeń trakcyjnych przyłączonych do dwóch faz transformatora zasilającego wartość nps można oszacować jako

$$\text{nps} = \frac{S_{\text{obc.tr.}}}{kS_{\text{zw3-faz}}} \cdot 100\% \quad (3)$$

gdzie:

$S_{\text{obc.tr.}}$  – moc obciążenia trakcyjnego przyłączonego do dwóch faz [MVA],

$S_{\text{zw3-faz}}$  – moc zwarciova 3-fazowa w punkcie zasilania podstacji trakcyjnej,

$k = 1, 2$  – współczynnik uwzględniający możliwość przekroczenia asymetrii.

Obciążenie to oblicza się dla warunków obciążenia szczytowego 10-sekundowego lub 1-minutowego przy największej impedancji systemu zasilającego; praktycznie przyjmuje się często obciążenie szczytowe 30-minutowe.

Ze względu na fakt, że podstacja trakcyjna wprowadza do systemu energetycznego jednocześnie asymetrię i wyższe harmoniczne, oba te zakłócenia powinny być rozpatrywane łącznie, gdyż ich oddziaływanie na odbiorniki elektryczne i generatory w elektrowniach kumuluje się. Inne zakłócenia pochodzące od tego systemu to: wahania napięć powodowane wahaniami obciążeń trakcyjnych, oddziaływanie na linie telekomunikacyjne i obwody niskoprądowe oraz pobór mocy biernej.

Przykładem systemu, w którym zaistniała konieczność zastosowania układów do symetryzacji i filtracji jest linia pod kanałem La Manche. Na etapie projektu przyjęto moce lokomotyw rzędu 15 MVA, a spodziewany łączny pobór mocy całego odcinka 120 MVA (przewidziano dwa transformatory po 60 lub 75 MVA. Minimalne moce zwarciove na poziomie 132 kV w Folkestone (UK) były poniżej 1000 MVA, zaś po stronie Francji powyżej 11 000 MVA. Stąd w podstacji w Folkestone przewidziano zastosowania symetryzatorów-filtrów o mocy kilkudziesięciu MVA z przelączalnymi bateriami kondensatorów i tyrystorowo regulowanymi indukcyjnościami. Znacznie podniosło to koszt wyposażenia podstacji.

W systemie 50 Hz sieci trakcyjne mają zbliżone parametry do sieci systemu 16 2/3 Hz. Przykładami szybkich linii kolejowych zasilanych napięciem 25 kV mogą być linie Madryt–Sewilla (1×25 kV), Shinkansen (Japonia) czy TGV (pierwsze zastosowanie systemu

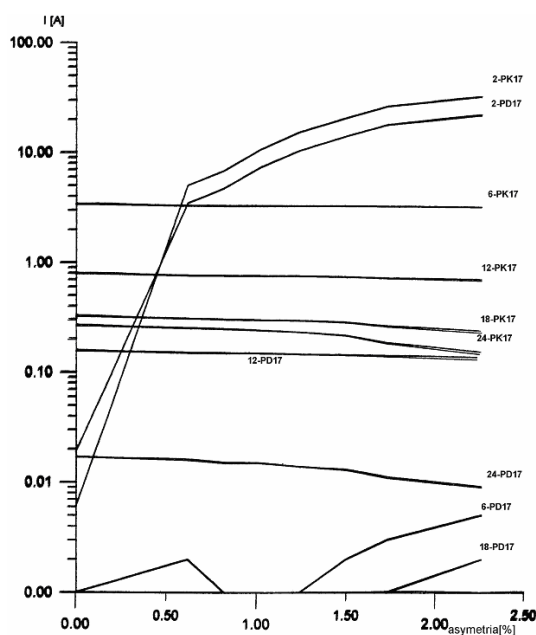


2×25 kV na linii 163 km TGV-South\_East w 1981 r. do zasilania pociągów o mocy 6,6 MW, a na linii TGV Atlantic pociągów o mocy 8,8 MW z następstwem co 4 min).

Dla linii Rzym–Neapol, mimo pozytywnych doświadczeń z eksploatowanym systemem 3 kV DC, koleje włoskie wybrały system 2×25 kV 50 Hz ze względu na przewidywane perspektywiczne prędkości ruchu 300–350 km/h pociągów o mocy 12 MW z następstwem co 5 minut, co przekracza zdolność dostawy mocy przez system 3 kV DC. Przyjęto średnie odległości pomiędzy podstacjami 50 km, a każda z podstacji wyposażona jest w dwa jedno-fazowe transformatory o mocy 60 MVA każdy. Przewidziano 100% rezerwowanie, co spowodowało konieczność zastosowania sieci trakcyjnej 320 mm<sup>2</sup> Cu i dało okład mocy zainstalowanej 2,2 MVA/km linii. Linia 132 kV przeznaczona do zasilania 3 podstacji trakcyjnych poprowadzona została z autotransformatorów systemowych 380/132 kV. Pośród podstacjami trakcyjnym zainstalowano po 3 autotransformatory trakcyjne 50/25 kV o mocy 15 MVA każdy, znajdujące się w odległości co 12 km od siebie. Każdy z transformatorów podstacji zasila odcinek ok. 25 km z wykorzystaniem połowy swojej mocy znamionowej, co pozwala w warunkach awaryjnych (odłączenie jednej podstacji) na zasilanie całości trasy bez konieczności zmniejszenia nawet szczytowego ruchu. Przeciężalność transformatora wynosi: 50% przez 15 min i 100% przez 5 min.

Zastosowano także dla każdego z torów przewody powrotne: podziemny 2×95 mm<sup>2</sup> Cu i nawięztrzny 2×150 mm<sup>2</sup> ze stopu Al. W wyniku analiz stwierdzono, że obciążenia linii nie będą powodować istotnej asymetrii do systemu elektroenergetycznego, podobnie wyeliminowany będzie wpływ harmonicznych. Jednak w trakcie uruchamiania linii okazało się, że pojawiały się zakłócenia w przebiegającej w pobliżu i krzyżującej się w wielu miejscach „starej” linii Rzym–Neapol zasilanej napięciem 3 kV DC. Linia 3 kV DC wyposażona była w obwody torowe zasilane napięciem 50 Hz.

W warunkach kolei polskich wprowadzenie systemu 25 kV 50 Hz oznaczałoby, podobnie jak we Włoszech, występowanie podstacji stykowych i możliwość negatywnego wpływu systemu 25 kV 50 Hz na podstacje trakcyjne 3 kV, gdy asymetria napięcia zasilającego prostowniki powoduje pojawienie się po stronie napięcia stałego dodatkowych, niecharakterystycznych harmonicznych (ryc. 4) oraz możliwość zakłócenia w pracy obwodów torowych pracujących z częstotliwością 50 Hz (podobnie jak na linii Rzym–Neapol).



Ryc. 4. Wpływ asymetrii na zawartość harmonicznych w prądzie wyjściowym prostowników typu PK-17 i PD-17 przy obciążeniu znamionowym

Fig. 4. Influence of assymetry on harmonic presence in DC current of rectifiers PK-17 and PD-17 type

#### 4. Podsumowanie

Każdy z omówionych systemów zasilania dla dużych prędkości jazdy ma specyficzne zalety, wady i ograniczenia. System 3 kV prądu stałego ma najniższe z omawianych systemów zdolności przesyłowe, a jego możliwości dostawy wymaganej energii dla ruchu szybkich pociągów kończą się przy prędkościach rzędu 250 km/h. Budowa nowych linii czy przygotowania do zmiany systemu na linii Dirretissima we Włoszech wynikają także z czynników eksploatacyjnych – dużego zużycia przewodu jezdnego przy gęstym ruchu pociągów szybkich. Uzasadniona jest także budowa linii szybkich zasilanych napięciem 25 kV 50 Hz we Francji czy Holandii, gdyż dla systemu 1,5 kV osiągnięcie prędkości powyżej 160 km/h stanowiło dla tego, mało efektywnego technicznie systemu wyzwanie. System prądu stałego, ze względu na spadki napięć w sieci i wprowadzanie wyższych harmonicznych prądu do sieci zasilającej, wymaga gęstego rozmieszczenia podstacji, które powinny być zasilane z punktów o dużej mocy zwarciowej, czyli o wysokim napięciu. Zaletą systemu prądu stałego jest zaś symetria obciążeń.

Z kolei system 25 kV 50 Hz, ze względu na wprowadzaną asymetrię, wymaga przyłączenia do sieci wysokich napięć za pośrednictwem wydzielonych linii. Jest to niezmiernie kosztowne i nie w każdych warunkach możliwe do realizacji. Wymagania dotyczące mocy zwarciowych, aby uniknąć konieczności stosowania kosztownych układów do symetryzacji obciążeń trakcyjnych, mogą być spełnione jedynie przy zasilaniu podstacji trakcyjnych liniami o napięciach powyżej 110 kV z przyłączeniem do węzłów systemowych ( $\geq 220$  kV). Wprowadzenie systemu 25 kV jest uzasadnione ze względu na korzyści techniczno-ekonomiczne (większe odległości pomiędzy podstacjami, lżejsza sieć, mniejsze zużycie energii, zwykle ok. 20–30% niższe nakłady inwestycyjne) w porównaniu z systemem 3 kV DC. Aby wykorzystać te zalety i utrzymywać duże odległości międzypodstacyjne przy pobieranych dużych mocach, stosowane są układy do kompensacji indukcyjnych spadków napięcia lub napięcie  $2 \times 25$  kV (50 kV).

System zasilania o obniżonej częstotliwości ( $16 \frac{2}{3}$  Hz) wymaga utworzenia własnej, wydzielonej sieci zasilającej nawet poza krajami, w których jest stosowany od lat i silnie już rozbudowany nie ma większych szans na ekspansję do innych krajów. Chociaż jego oddziaływanie na sieć zasilającą (w przypadku podłączenia do sieci publicznej) jest 3-fazowe, to mogą pojawić się zapady napięcia przy rozruchach maszyn wirujących lub wyższe harmoniczne przy zasilaniu przetwornic statycznych.

Odległości pomiędzy Warszawą a głównymi aglomeracjami nie przekraczające 300–400 km wskazują, że sieć linii kolejowych o prędkościach maksymalnych 200–250 km/h powinna zapewnić w perspektywie prowadzenie ruchu, który będzie konkurencyjny dla ruchu kołowego i lotniczego. Aby dostarczać energię do prowadzenia pociągów o tych prędkościach, wystarczający jest istniejący w Polsce system zasilania 3 kV DC, wybrany przed II wojną światową przez prof. Romana Podoskiego. Należy podkreślić, że w tamtych czasach był to system nowoczesny i, jak się okazało, wystarczający dla Polski w wieloletniej perspektywie. Wybór dość dobrze rozwiniętego wtedy systemu 1,5 kV DC wymusiłby, podobnie jak we Francji lub Holandii, konieczność jego zmiany lub uzupełnienia o linie zelektryfikowane w systemie prądu przemiennego. Należy zatem wyrazić, w 85-lecie rozpoczęcia przez prof. Romana Podoskiego w Politechnice Warszawskiej wykładów z zakresu trakcji elektrycznej, szacunek dla wiedzy i odwagi Profesora we wdrażaniu nowych rozwiązań. Ta decyzja umożliwiła Polsce utrzymanie jednego systemu elektryfikacji linii

kolejowych i związanych z tym korzyści, co jest obecnie w Europie rzadkością. Oczywiście nie wyklucza to sytuacji, że w przyszłości, gdy pojawi się uzasadniona przewozami i polityką transportową potrzeba budowy tranzytowej linii kolejowej o prędkościach 300–350 km/h, trzeba będzie zastosować systemu zasilania 25 kV 50 Hz (bo oryginalnego systemu 16 2/3 Hz nie należy rozszerzać poza kraje już go eksploatujące). Podobnie można przeanalizować, w przypadku elektryfikacji linii LHS, alternatywę z zasilaniem tej linii (wydzielonej ze względu na szeroki tor z systemu kolei w Polsce) napięciem 25 kV 50 Hz.

#### Literatura

- [1] Altus J., Novak M., Otcenasova A., Pokorný M., Szelağ A., *Quality parameters of electricity supplied to electric railways*, Scientific Letters of the University of Žilina-Communications No. 2-3/2001.
- [2] Barnes R., Wong K.T., *Unbalance and harmonic studies for the Channel Tunnel railway system*, IEE Proc. B, Vol. 138, No. 2, March 1991.
- [3] Bauer K.H., Gerichten F., Kiessling F., Lerner F., *The Use of Aluminium for the Overhead Catenary System on German Federal Railway's New High-speed Lines*.
- [4] Beaun E., *Powering the New High-speed Rail Link between Madrid and Seville*.
- [5] Capasso A., Morelli V., *Elektryfikacja nowych linii kolejowych wysokich prędkości we Włoszech*, Technika Transportu Szynowego, 2/96.
- [6] Gourdon C., Herce C., *The overhead system for the TGV Atlantic*.
- [7] Harprecht W., Seifert R., *Tractive power supply at German Federal Railway's 400 k/h runs*.
- [8] Kotelnikov A.V., *Elektrifikacija železnych dorog – mirowyje tendencii i perspektivy*, VNIIZT, Moskwa 2002.
- [9] Maciołek T., *Problemy zasilania linii kolejowych 3 kV o prędkościach do 250 km/h*, Seminarium Naukowe Sekcji Trakcji Elektrycznej Komitetu Elektrotechniki PAN, Warszawa, maj 2004 (materiały seminaryjne).
- [10] Mierzejewski L., Szelağ A., *Infrastruktura elektroenergetyczna układów zasilania systemu 3 kV DC linii magistralnych o znaczeniu międzynarodowym*, Technika Transportu Szynowego, 1-2/2004.
- [11] Mierzejewski L., Szelağ A., *Infrastruktura elektroenergetyczna układów zasilania systemu 3 kV DC linii magistralnych o znaczeniu międzynarodowym (2) – projektowanie efektywnego układu zasilania zlk*, Technika Transportu Szynowego, 3/2004.
- [12] Mierzejewski L., Szelağ A., *Koncepcii i metody analiza variantov modernizacji pitaniya skorostnykh magistralnykh linii meždunarodnogo znachenija. Seminar OSZD/UIC po teme: „Podchody po razrabotke reszenija dla obespieczeniya tokosjoma na suszczestvujuszich transportnykh koridorach”*, Warszawa, 18–19 IX 2001.
- [13] Mierzejewski L., Szelağ A., Jankowski P., *Electrical energy quality studies in DC electric traction systems for different ways of connection traction substation to power system*, Advances in Electrical and Electronic Engineering No. 2, Vol. 3/2004, Žilina, Słowacja.

- [14] Nogi T., *Feeding system for AC on the San-yo Shin Kansen*, Rail International, VI, 1971.
- [15] Roussel H., *Power supply for the Atlantic TGV high speed line*.
- [16] Surland R.W., *Traction power supplies*.
- [17] 50 kV Autotransformer traction supply systems – the French experience. Half-day colloquium, IEE, 9 November 1993.
- [18] Szelağ A., *Railway electric traction in Poland*, Technika Transportu Szynowego (TTS), Special English Edition Innotrans-Berlin/2004.
- [19] Szelağ A., Mierzejewski L., *Systemy zasilania linii kolejowych dużych prędkości jazdy*, Technika Transportu Szynowego, 5-6/2005.
- [20] Szelağ A., Surland R.W., Mierzejewski L., *Ground transportation systems*, artykuł monograficzny w 22-tomowej: *Wiley Encyclopaedia of Electrical and Electronic Engineering*, Supplement I, Nowy Jork 2000.