

Witold Rostkowski

# System zasilania trakcji elektrycznej prądu przemiennego 15 kV 16,7 Hz

**Burzliwy rozwój kolejnictwa na początku XIX w. spowodował, że powstało wiele systemów zasilania kolei elektrycznej. Ówczesne rozwiązania, technicznie ciągle udoskonalane, są dzisiaj podstawowymi systemami zasilania trakcji elektrycznej na świecie. W ramach procesu unifikacji systemów technicznych w Unii Europejskiej, zdefiniowano w TSI „Energia” [6] podstawowe systemy zasilania trakcji elektrycznej. Do jednego z nich należy omówiony w tym artykule system 15 kV 16,7 Hz.**

## Rys historyczny

W lutym 1879 r. Werner von Siemens napisał do swojego brata w związku ze swoim udziałem na wystawie techniki w Berlinie [1]: „ Na wystawie pokażemy między innymi lokomotywę o napędzie elektrycznym dla kolei żelaznej, która moim zdaniem wzbudzi bardzo duże zainteresowanie. Jestem przekonany, że idea ta się sprawdzi i w przyszłości pojawią się następne lokomotywy”.

Od tego momentu rozpoczęła się era kolei elektrycznej, która najpierw była zasilana ze źródła prądu stałego (DC). Zaletą ówczesnego rozwiązania była łatwość sterowania (zmiany obrotów wirnika) silników prądu stałego przez zmianę napięcia wzbudzenia. Jednak rosnące zapotrzebowanie na zwiększenie mocy silników, a przez to zwiększenie przesyłanej energii i zarazem zminimalizowanie strat przesyłu energii, spowodowało poszukiwanie nowych rozwiązań.

Dopiero wynalazek transformatora w 1885 r. przez Węgrów – Zipernowskiego, De’ri i Bla’thy – oraz indukcyjnego asynchronicznego silnika trójfazowego w 1890 r. przez Michaela von Dolivo-Dobrowolski (Firma AEG) dało możliwość zasilania trakcji elektrycznej prądem przemiennym.

Wynalazki te umożliwiły w końcu XIX w. podjęcie decyzji [3] o zastosowaniu prądu przemiennego do zasilania sieci kolei elektrycznej.

Zacząto intensywnie budować doświadczalne zelektryfikowane linie kolejowe o przeróżnych napięciach i częstotliwościach, takich jak:

- 0,75 kV 38 Hz oraz 0,8 kV 33 1/3 Hz, prąd trójfazowy (Szwajcaria, 1898 r.),
- 3 kV 15 Hz, prąd trójfazowy (Węgry, 1899 r.),
- 3,6 kV 15 Hz, prąd trójfazowy (Włochy, 1901 r.),
- 0,5/1,0 kV 25 Hz, prąd trójfazowy (Kanada, 1906 r.),
- 6 kV 25 Hz, prąd trójfazowy (USA, 1909 r.).

Firma Siemens wraz AEG i Państwową Koleją Prusy – Hesja utworzyły „Spółkę dla rozwoju szybkiej kolei” [2], która na trasie długości 23 km, między Marienfeld i Zossen koło Berlina, zbudowała trakcję elektryczną trójfazową o zmiennej częstotliwości, na której ustanowiono w 1903 r. rekord prędkości 210 km/h.

Po przeprowadzonych doświadczeniach stwierdzono, że ze względów na konieczność płynnej regulacji obrotów silników napędzających elektryczne pojazdy szynowe, najlepszym rozwią-

niem byłoby zastosowanie jednofazowej sieci trakcyjnej prądu przemiennego i komutatorowych jednofazowych silników prądu przemiennego.

Wadą jednofazowych komutatorowych silników prądu przemiennego jest iskrzenie (powstawanie prądu zwarcia) na szczotkach komutatora, który zależy wprost proporcjonalnie od częstotliwości prądu zasilania. Następnymi wadami wymienionych silników przy zasilaniu ich z sieci o częstotliwości 50 Hz były ich duża masa i objętość. Porównanie silników o tej samej mocy w wykonaniach DC i AC podano w tablicy 1 [4].

Tablica 1

## Porównanie silników prądu stałego z jednofazowymi silnikami na prąd zmienny

	DC	AC 16 2/3 Hz	AC 50 Hz
Masa	100%	125%	300%
Objętość	100%	130%	350%

Uwzględniając te aspekty w Niemczech w latach 1912/1913 pomiędzy Państwową Koleją Prusy–Hesja i Bawarską Koleją Państwową oraz Badeńską Koleją Państwową podpisano umowę, w której zobowiązano się na stosowanie ujednoczonego napięcia zasilania kolei elektrycznej 15 000 V 16 2/3 Hz (1/3 × 50 Hz). Do stosowania tego ujednoczonego napięcia zasilania zobowiązały się później również Austria, Szwajcaria, Szwecja i Norwegia.

W umowie tej uzasadniono wybraną częstotliwość 16 2/3 Hz w następujący sposób:

- aby umożliwić bezawaryjną regulację obrotów silnika elektrowozu (m.in. iskrzenie szczotek na komutatorze), zaleca się średnią wartość częstotliwości napięcia zasilającego około 15 Hz;
- dokładna wartość częstotliwości kolejowej sieci jednofazowej ma uwzględniać możliwość jej uzyskania z ogólnej trójfazowej sieci energetycznej, jak również z odrębnych prądnic jednofazowych osadzonych na wspólnym wale z prądnicami prądu trójfazowego;
- w elektrowniach wodnych musi być możliwość wytwarzania obu rodzajów prądu przemiennego.



Fot. 1. Pojazd szynowy, który w 1903 r. ustanowił rekord prędkości, wynoszący 210 km/h

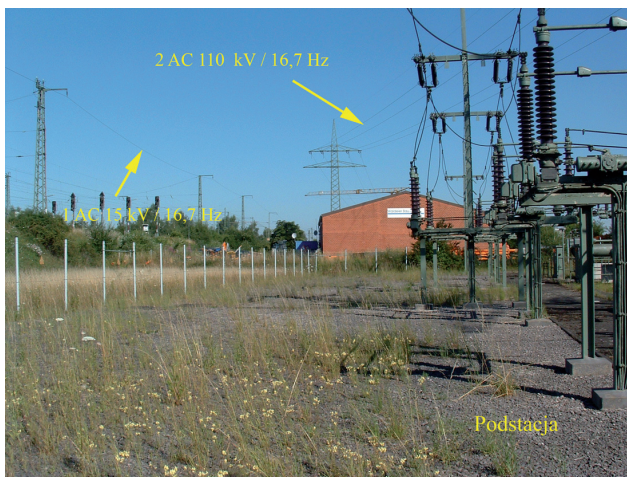
Uwzględniając wszystkie te założenia postanowiono, że częstotliwość energetycznej sieci kolejowej będzie wynosiła  $1/3$  z 50 Hz, tzn.  $16\frac{2}{3}$  Hz.

W maju 2001 r. podano do wiadomości, że częstotliwość energetycznej sieci kolejowej w Niemczech, Norwegii, Szwecji, Austrii i Szwajcarii zmieniono z  $16\frac{2}{3}$  Hz na 16,7 Hz. Określenie tej wielkości częstotliwości znalazło odbicie w europejskich normach [5 i 6].

## Sposoby zasilania kolejowej trakcji elektrycznej System zintegrowanej sieci energetycznej prądu przemiennego 15 kV 16,7 Hz

W zintegrowanym (centralnym) systemie zasilania trakcji elektrycznej energia elektryczna dostarczana jest z dwóch źródeł:

- 1) kolejowej sieci energetycznej 2AC 110 kV 16,7 Hz, a następnie transformowana na 15 kV 16,7 Hz ( fot. 2 i 3 );



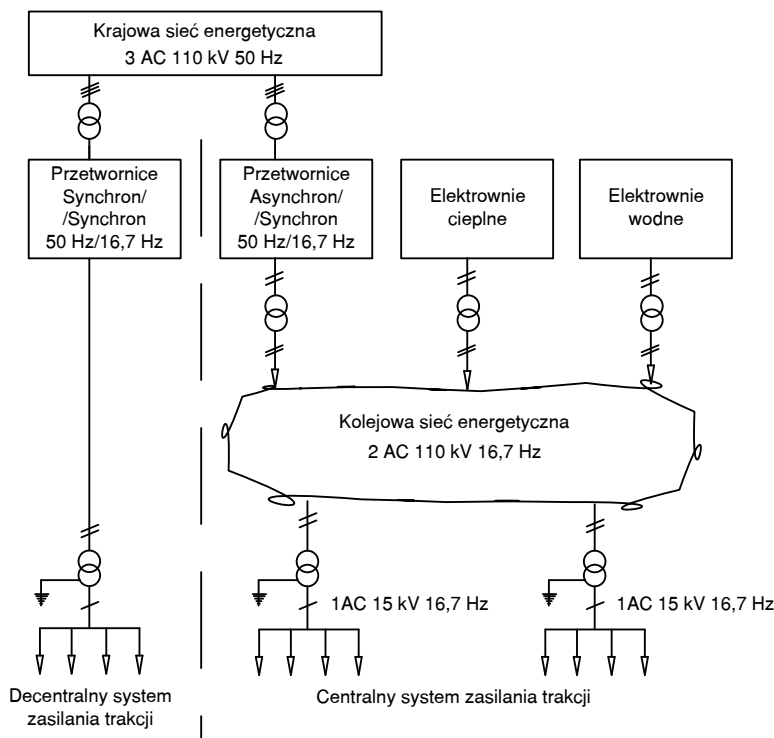
Fot. 2. Podstacja 110 kV 15 kV



Fot. 3. Podstacja na trasie Frankfurt/M – Fulda



Fot. 4. Energetyczna sieć kolejowa 2×110 kV 16,7 Hz



Rys. 1. Schemat zasilania kolejowej trakcji elektrycznej 15 kV 16,7 Hz

- 2) ogólnokrajowej sieci 50 Hz transformowanej na 15 kV i przetwarzanej na 16,7 Hz.

Energetyczną sieć kolejową przedstawiono na fotografii 4 – na słupach wysokonapięciowych prowadzone są dwie linie 110 kV 16,7 Hz.

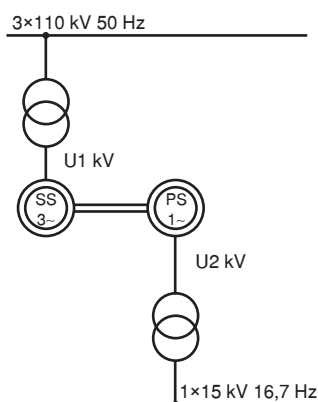
Energia dla kolejowej dwufazowej sieci energetycznej 2AC 110 kV 16,7 Hz jest wytwarzana w elektrowniach ciepłych, wodnych lub atomowych. W Niemczech część elektrowni jest własnością DB AG lub poszczególne prądnice wydierżawione są w elektrowniach ogólnokrajowych. Podstawowy schemat kolejowej sieci energetycznej przedstawiono na rysunku 1.

Kolejowa sieć energetyczna jest tzw. elastyczną siecią, pozwalającą na równoległą pracę tzw. stacji przekształtnikowych. Jednofazowe synchroniczne prądnice kolejowe napędzane są asynchronicznymi trójfazowymi silnikami prądu przemiennego, co pozwala na pokrywanie chwilowego zwiększonego poboru mocy. Dopuszczalne zmiany częstotliwości sieci energetycznej mieszczą się w granicach +2% do -3%, tzn.  $16\frac{1}{6}$  Hz do 17 Hz.

## Zdecentralizowany system sieci energetycznej

### prądu przemiennego 15 kV 16,7 Hz

W decentralnym systemie zasilania energia elektryczna dostarczana jest z ogólnokrajowej sieci energetycznej 3AC 110 kV 50 Hz po jej wcześniejszym przekształceniu oraz przetransformowaniu w stacjach przekształtnikowych. System ten znalazł zastosowanie w Szwecji i byłej NRD. Cechą charakterystyczną jest sposób wytwarzania napięcia o specyficznej częstotliwości 16,7 Hz. Uzyskuje się je w stacjach transformatorowo-przekształtnikowych, w których synchroniczna jednofazowa prądnica prądu przemiennego o częstotliwości 16,7 Hz napędzana jest poprzez sztywne połączenie trójfazowym synchronicznym silnikiem prądu przemiennego (rys. 2).



Rys. 2. Zasada przekształcania napięcia w decentralnym systemie zasilania

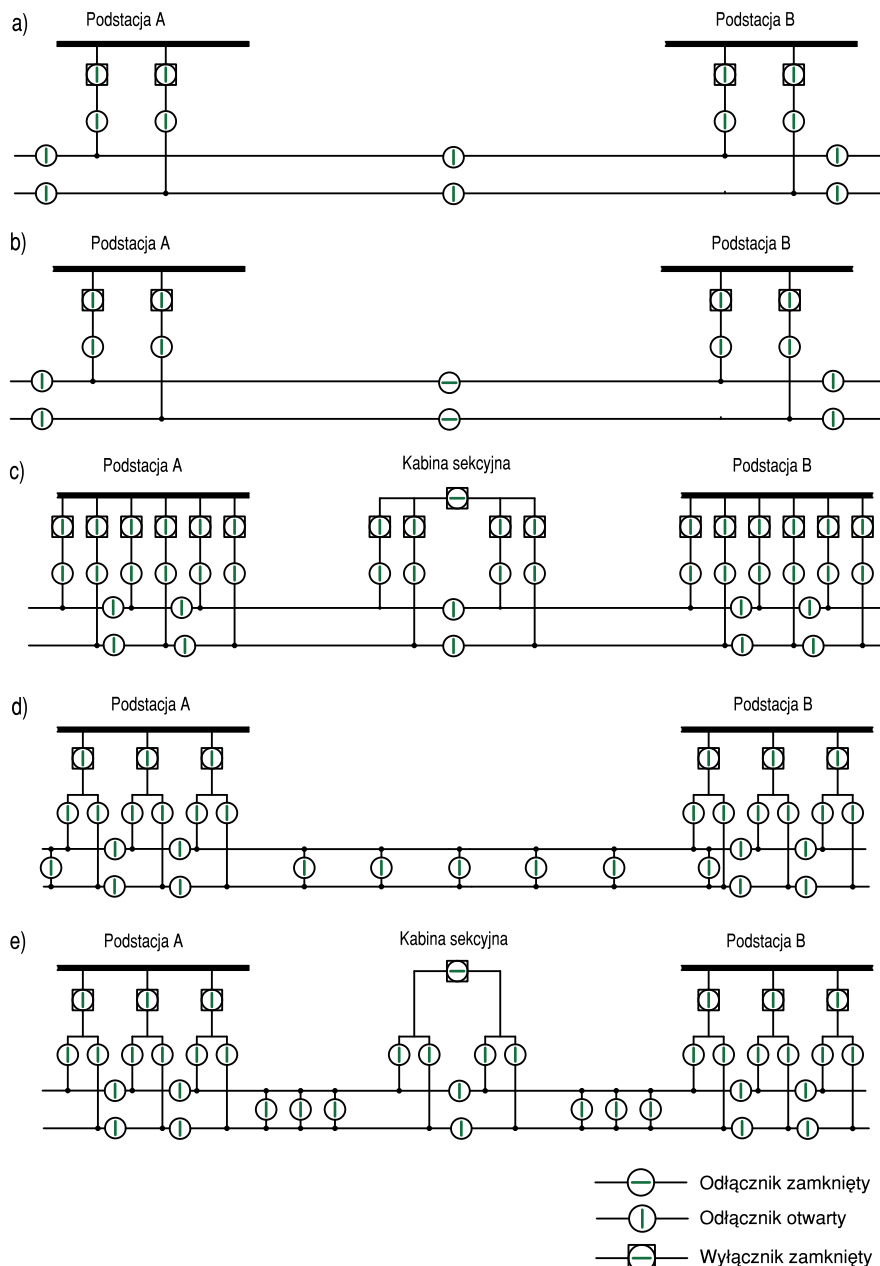
SS – trójfazowy synchroniczny silnik napędowy; PS – jednofazowa prądnica synchroniczna

Na skutek niesynchronizowania częstotliwości i przesunięcia fazowego wytwarzanego napięcia zasilania w systemie decentralnym z kolejową siecią energetyczną centralnego systemu zasilania, muszą odcinki kolejowej trakcji elektrycznej, zasilane z tych różnych systemów, być izolowane po przez tzw. między-systemowe sekcjonowanie podłużne [7].

## Rodzaje łączenia i sekcjonowania sieci

Podstawowe sposoby łączenia i sekcjonowania sieci zasilanych z dwóch podstacji przedstawiono na rysunku 3.

W zasilaniu jednostronnym (rys. 3a) cechą charakterystyczną jest to, że ciąg sieciowy zasilany jest tylko z jednej podstacji. Ciągi sieciowe zasilane z różnych podstacji oddzielone są izolowanym przęsłem naprężenia. Na skutek różnego obciążenia poszczególnych ciągów sieciowych, wynikającego z różnej liczby znajdujących się w nim pojazdów trakcyjnych, powstaje duża różnica napięcia na izolowanym przęsle naprężenia. Różnica potencjału może doprowadzić do uszkodzenia sieci przez łuk elektryczny powstający przy zwarciu obu odcinków przez przejeżdżający pantograf.



Rys. 3. Schematy łączenia i sekcjonowania trakcji elektrycznej systemu 15 kV 16,7 Hz

a) zasilanie jednostronne; b) zasilanie dwustronne; c) zasilanie dwustronne z kabiną sekcijną w środku trasy między dwoma podstacjami; d) zasilanie dwustronne z ciągami sieciowymi połączonymi równolegle; e) zasilanie dwustronne z ciągami sieciowymi połączonymi równolegle i z kabiną sekcijną w środku trasy między dwoma podstacjami

Zasilanie dwustronne (rys. 3b) różni się w stosunku do jednostronnego, zwartym przez odcłanek przęsłem naprężenia między dwoma ciągami sieciowymi. W rozwiązaniu tym płyną prądy wyrównawcze, których wielkość zależy od różnego stopnia obciążenia podstacji zasilających.

Udoskonalonym rozwiązaniem zasilania dwustronnego jest zasilanie z dwóch kierunków z kabiną sekcijną w środku trasy (rys. 3c). Rozwiązanie to umożliwia zwiększenie dopuszczalnego obciążenia trakcji elektrycznej, jednofazowego prądu przemiennego, do 600 A na pociąg, przy zachowaniu następujących parametrów sieci:

- przewód jezdny 100 mm<sup>2</sup> Cu,
- lina nośna 50 mm<sup>2</sup> Bz,

- regulacja sieci na zakres temperatury otoczenia od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+40^{\circ}\text{C}$ ,
- selektywne zabezpieczenie linii na skutek zmniejszonej impedancji sieci trakcyjnej.

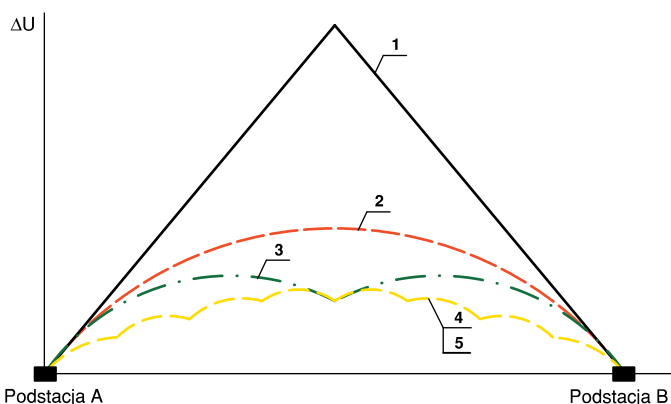
Typowa odległość między podstacjami wynosi od 60 km do 80 km.

W celu zmniejszenia niekorzystnych zjawisk występujących przy zasilaniu dwustronnym, jak nierównomierność obciążenia podstacji i różnica napięć między poszczególnymi sieciami trakcyjnymi, połączono równolegle ciągi sieciowe zarówno torów szlakowych, jak i stacyjnych (rys. 3d) za pomocą odpowiedniego odłącznika. Brak selektywności zabezpieczenia sieci skompenso- wano wprowadzeniem metody pomiaru doziemienia i automa- tycznego ponownego załączenia. Szybką lokalizację doziemienia uzyskano wyposażając wyłączniki równoległe w przekładniki prądowe.

Instalując w połowie trasy, między dwoma podstacjami tzw. sieci równoległej, kabinę sekcijną (rys. 3e) poprawiono selek- tywność wyłączania uszkodzonego odcinka.

Spadek napięcia między punktami zasilania spowodowany stałym elektrycznym obciążeniem, przy założeniu równomiernej impedancji linii przedstawiono na rysunku 4.

Linia 1 przedstawia spadek napięcia w zależności od odległo- ści od podstacji przy zasilaniu jednokierunkowym (rys.3a); linie 2, 3, 4 i 5 odpowiednio przy połączeniach przedstawionych na rysunku 3b, c, d i e.



Rys. 4. Spadek napięcia między podstacjami przy różnych łączeniach sieci trakcyjnej

Idąc za potrzebą zwiększenia dostarczanej energii dla linii du- żych prędkości do 1500 A na pociąg zastąpiono kabiny sekcyjne podstacjami, co zmniejszyło odległość między podstacjami do 30–40 km. Zwiększono przekroje przewodów jezdnych do 120 mm<sup>2</sup>, a liny nośnej do 70 mm<sup>2</sup>, wprowadzono wzdłuż trasy linię wzmacniającą, przeprowadzono również regulację sieci trak- cyjnej na zwiększony zakres temperatury otoczenia od  $-30^{\circ}\text{C}$  do  $+80^{\circ}\text{C}$ . Wprowadzenie cyfrowych zabezpieczeń pozwoliło na zwiększenie prądów obciążenia przez zmniejszenie dopuszczalnej różnicy między prądem zwarcia a nominalnym prądem obcią- żenia.



#### Literatura

- [1] Horstmann D., Wagner R., Weigel W.-D.: *100 Jahre Entwicklung der Antriebstechnik für elektrische Bahnen*. eb 101 (2003) H 6, s. 255–269.
- [2] Gladigau A.: *Historische Entwicklung und Stand der Bahnstromsysteme*. Elektrische Bahnen, Heft 12/1987.
- [3] Schon: *Elektrische Energie und Verkehr auf der Frankfurter Ausstellung von 1891*. Elektrische Bahnen, Heft 1/2/1993.
- [4] Linder Ch., Heinze R.: *Umstellung der Sollfrequenz im zentralen Bahnstromnetz von  $16\frac{2}{3}$  Hz auf 16,7 Hz*. eb 100 (2002), Heft 12, s. 447–454.
- [5] EN 50388 – *Zastosowania kolejowe. Energetyczna sieć kolejowa i po- jazdy szynowe*.
- [6] TSI (2002/733/EG) z 30 maja 2002 r.
- [7] Rostkowski W.: *Sieci trakcyjne prądu przemiennego i przejścia między systemami*. Materiały na kurs „Nowoczesna trakcja elektryczna”. Poli- technika Warszawska, Centrum Doskonałości EESEMC. Warszawa 18 marzec 2005 r.

#### Autor

Witold Rostkowski  
DB Infrastruktur, ProjektBau GmbH  
w.rostkowski@arcor.de

#### XVII Konferencja Naukowa

# POJAZDY SZYNOWE

## Kazimierz Dolny, 13–15 września 2006 r.

#### Patronat

JM Rektor Politechniki Warszawskiej  
Komitet Transportu PAN

#### Informacje

Wydział Transportu Politechniki Warszawskiej  
POJAZDY SZYNOWE 2006

00-662 Warszawa, ul. Koszykowa 75, pokój 320

tel. +48 22 660 55 94, fax +48 22 629 25 86, +48 22 621 56 87, e-mail: psz2006@it.pw.edu.pl, http://www.it.pw.edu.pl