

# Zmiana systemu zasilania trakcji elektrycznej w Polsce z 3 kV DC na 25 kV

Artur ROJEK<sup>1</sup>

## Streszczenie

W artykule porównano systemy zasilania kolejowej trakcji elektrycznej 3 kV DC oraz 25 kV AC. Scharakteryzowano obydwa systemy, ich wymagania w zakresie zasilania podstacji trakcyjnych, strat w systemach oraz wpływ wyboru systemu na parametry ruchu kolejowego.

**Słowa kluczowe:** system zasilania trakcji elektrycznej, system 3 kV DC, system 25 kV AC, straty energii, sieć trakcyjna

## 1. Wstęp – rys historyczny

W niniejszym artykule wykorzystano, za zgodą firmy Siemens, materiały zamieszczone w pracy Instytutu Kolejnictwa [1] oraz zawartych w raporcie fundacji ProKolej [2].

Początkiem systemu zasilania trakcji elektrycznej jest źródło energii w elektrowni, a końcem styk sieci trakcyjnej z pantografem i układ sieci powrotnej. Na parametry energii elektrycznej dostarczanej do pojazdu trakcyjnego wpływają parametry całego układu, nawet odległe i pozornie niezwiązane z zasilaniem trakcji elektrycznej.

W początkowej fazie elektryfikacji kolei, rozwój systemów zasilania w poszczególnych krajach europejskich, a nawet ich regionach przebiegał niezależnie. Decyzje o wyborze konkretnego systemu podejmowano biorąc pod uwagę względy techniczne, prowadzone badania, czynniki gospodarcze i polityczno-militarne. Czasem doprowadziło to do powstania w jednym kraju więcej niż jednego systemu zasilania. Pośród wielu rozwiązań Europę zdominowały cztery dominujące systemy:

- 1,5 kV DC,
- 3 kV DC,
- 15 kV 16,7 Hz,
- 25 kV 50 Hz.

Dodatkowo, systemy przemiennoprądowe doczekały się stworzenia różnych wariantów, w tym systemów  $2 \times 15$  kV 16,7 Hz oraz  $2 \times 25$  kV 50 Hz. Obecnie nowe linie, szczególnie dużych prędkości,

elektryfikuje się w ostatnim z wymienionych systemów –  $2 \times 25$  kV 50 (60) Hz. O wyborze systemu w danym kraju, w wielu przypadkach decydował okres elektryfikacji i powiązania polityczno-gospodarcze. Przykładem jest system 15 kV 16,7 Hz, który opracowano w Niemczech i rozpowszechniono w krajach niemieckojęzycznych (Niemcy, Austria, Szwajcaria) oraz powiązanych z nimi gospodarczo Szwecją i Norwegią.

Na kongresie AICC (*Association Internationale du Congrès des Chemins de fer*) zorganizowanym w 1954 roku w Londynie dyskutowano w jakim systemie prowadzić dalszą elektryfikację kolei. Rozpatrywano istniejące wówczas systemy zasilania pod względem: zasilania z systemu elektroenergetycznego, sieci trakcyjnej i urządzeń stałych, taboru elektrycznego, kosztów budowy, eksploatacji i utrzymania. Zwrócono uwagę na asymetrię wprowadzaną do układu elektroenergetycznego przez system 25 kV AC, wymagane odstępstwa izolacyjne itp. Na kongresie przyjęto 27 wniosków (uchwał) dotyczących wyboru systemu zasilania trakcji elektrycznej, jednakże nie wybrano jednego systemu. Stwierdzono bowiem, że „Każdy z systemów ma jemu właściwe cechy charakterystyczne, tak pod względem technicznym, jak i pod względem ekonomicznym i eksploatacyjnym. Cechy te czynią w danych warunkach ten lub inny system szczególnie dogodnym”. Wspomniany kongres i poruszane na nim zagadnienia szczegółowo opisano w artykule zamieszczonym w *Problemach Kolejnictwa* [3]. W czasie trwania kongresu AICC system 25 kV AC był stosowany jedynie we Francji i Kongu Belgijskim (obecnie

<sup>1</sup> Dr inż.; Instytut Kolejnictwa, Zakład Elektroenergetyki; e-mail: rojeka@ikolej.pl.

Kongo), a kilka państw prowadziło badania i próby, w tym Wielka Brytania, USA i ZSRR.

Kongres AICC był inspiracją do rozpoczęcia rozważań nad wprowadzeniem w Polsce systemu 25 kV 50 Hz w ramach elektryfikacji PKP. Resorty komunikacji, przemysłu ciężkiego, górnictwa i energetyki oraz łączności zainteresowane systemem, początkowo badały zagadnienie indywidualnie, a następnie wspólnie. Wykonano liczne analizy i prace studialne, przeprowadzono wiele rozmów, w tym z ekspertami z innych krajów, w których system 25 kV AC już był wdrażany. Po dziesięciu latach prac, w 1964 roku uznano, że w ramach programu elektryfikacji PKP na lata 1961–1980, nie ma podstaw technicznych i ekonomicznych do wprowadzenia w Polsce systemu 25 kV 50 Hz. Argumentowano to między innymi trudnościami eksploatacyjnymi, ze względu na bardzo rozgałęzioną i powiązaną ze sobą sieć PKP, kosztami budowy i eksploatacji nowego systemu, kosztami taboru, a przede wszystkim możliwością opóźnienia, rozpoczętej w systemie 3 kV DC, elektryfikacji linii kolejowych. Obszerne relacje dotyczące podejmowania w latach 50. oraz 60. decyzji o wprowadzeniu w Polsce systemu 25 kV 50 Hz można znaleźć w [4, 5].

W pierwszym dziesięcioleciu XXI wieku powrócono do idei wprowadzenia w Polsce systemu zasilania 25 kV AC, z tym że już w wariantcie  $2 \times 25$  kV AC. Motorem prac były plany budowy kolei dużych prędkości, tzw. linii Y, łączącej Warszawę, Łódź i Poznań z odnogą do Wrocławia oraz plany elektryfikacji części linii E75 z połączeniem z Litwą. W 2005 roku w Instytucie Kolejnictwa (wówczas CNTK) rozpoczęto prace nad wstępnym studium wykonalności linii Y. W kolejnych latach opracowano pierwsze standardy i wymagania oparte w części na doświadczeniach innych kolei, gdzie system AC jest eksploatowany. Kolejnym impulsem do prac nad wdrożeniem w Polsce systemu  $2 \times 25$  kV AC są prace nad Programem Kolejowym

CPK. Obecnie trwają prace studialne i projektowe, w tym nad projektami układu zasilania oraz sieci trakcyjnych i ich elementów do systemu 25 kV AC.

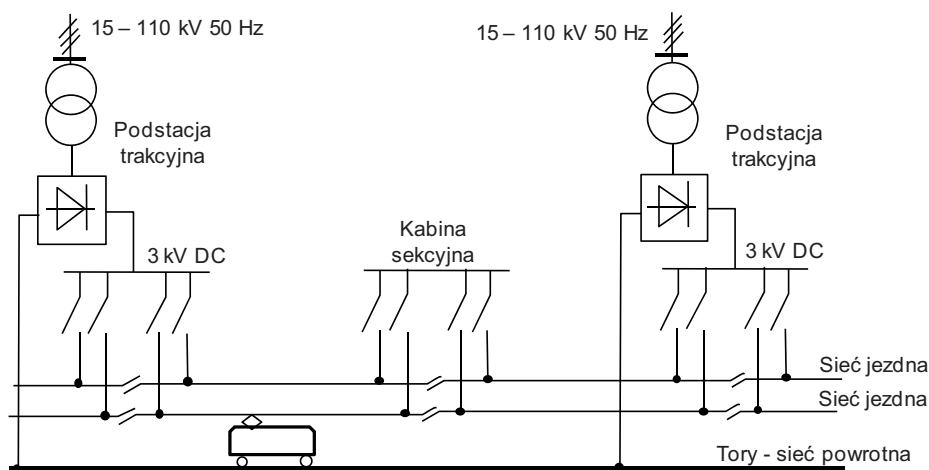
## 2. Charakterystyka systemów zasilania trakcji 3 kV DC i $2 \times 25$ kV AC

### 2.1. System zasilania sieci trakcyjnej 3 kV DC

W tym systemie (rys. 1) sieć trakcyjna w większości przypadków jest zasilana dwustronnie z podstacji trakcyjnych, których odległość między nimi wynosi od około 10 do 30 km. Na liniach dwu- i wielotorowych, w szczególności, gdy odległość między podstacjami jest większa niż 12–15 km, stosowane są kabiny sekcyjne. Zastosowanie kabin umożliwia lepsze sekcjonowanie elektryczne sieci trakcyjnej na odcinku zasilania oraz zmniejszenie spadków napięcia.

Szacuje się, że moc podstacji trakcyjnych w Polsce wynosi około 8 do ponad 23 MW (przeciętnie około 11 MW). Podstacje są zasilane z systemu elektroenergetycznego napięciem średnim (SN) 15 lub 20 kV (pojedyncze napięciem 30 kV) oraz napięciem wysokim (WN) 110 kV. System 3 kV DC umożliwia prawidłowe zasilanie pojazdów trakcyjnych o mocy do około 6 MW.

Stosunkowo niskie napięcie zasilające pojazdy trakcyjne w systemie 3 kV DC, powoduje, że występują duże wartości prądów. Konsekwencją tego jest konieczność stosowania sieci trakcyjnych o dużym przekroju, wykonanych z przewodów jezdnych i lin nośnych o jak najlepszej przewodności. Eksploatowane w Polsce sieci jezdne na torach szlakowych mają przekrój od 320 do 450 mm<sup>2</sup>, a w Europie przekrój ten osiąga nawet 610 mm<sup>2</sup>. Uproszczony schemat układu zasilania w systemie 3 kV DC przedstawiono na rysunku 1.



Rys. 1. Uproszczony schemat układu zasilania trakcji elektrycznej w systemie 3 kV DC [6]

Podstacja trakcyjna, zasilana napięciem do 30 kV, wyposażona w dwa zespoły prostownikowe zajmuje teren o powierzchni około 1700 m<sup>2</sup>. Gdy podstację zasilamy napięciem 110 kV zajętość terenu wzrasta do około 4000 m<sup>2</sup>. Kabinę sekcyjną, w zależności od wykonania (kontenerowe, budynkowe) zajmują teren do 100 m<sup>2</sup>. Przeliczając zajętość terenu pod obiekty zasilania na 1 km linii kolejowej, otrzymuje się od 75 m<sup>2</sup> (podstacje zasilane SN co 24 km z kabinami sekcyjnymi) do 330 m<sup>2</sup> (podstacje zasilane napięciem 110 kV co 12 km).

## 2.2. System zasilania sieci trakcyjnej 2 × 25 kV AC

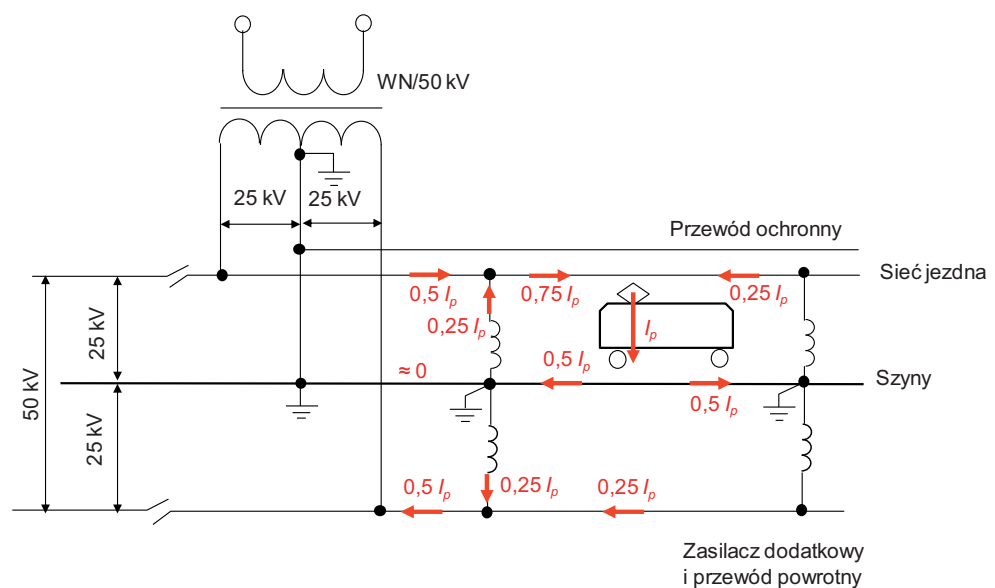
System przemiennoprądowy o napięciu 25 kV 50 (60) Hz, w tym wariantie 2 × 25 kV AC, jest stosowany w wielu krajach europejskich i na świecie. W części tych krajów stosowany jest na całej zelektryfikowanej sieci kolejowej, a w niektórych eksploatuje się go na liniach dużych prędkości, natomiast linie konwencjonalne zasilane są w systemach stałoprądowych. Pojazdy zasilane w systemie 25 kV AC mogą osiągać moc do około 20 MW. Uproszczony schemat systemu 2 × 25 kV AC i jego zasadę działania przedstawiono na rysunku 2.

Cechą charakterystyczną tego systemu są transformatory zainstalowane w podstacjach trakcyjnych mające po dwa uzwojenia wtórne o napięciu 25 kV. Wspólny środkowy zacisk tych uzwojeń jest uziemiony i jest połączony z szynami oraz przewodem powrotnym. Zacisk wyjściowy jednego z uzwojeń jest połączony z siecią jezdnią, a drugiego z dodatkowym przewodem zasilającym. Kolejną cechą wyróżniającą ten system są autotransformatory zainstalowane między podstacjami w odległości około 10–15 km od siebie. Są one

włączone między sieć jezdnią a dodatkowy przewód zasilający. Zaletą takiego rozwiązania jest to, że napięcie pomiędzy siecią trakcyjną a szynami jezdniowymi wynosi 25 kV, a przesył energii z podstacji do autotransformatorów odbywa się na poziomie do 50 kV. Dzięki temu spadki napięcia w układzie zasilania są mniejsze, co umożliwia zwiększenie odległości między podstacjami trakcyjnymi. Odległość między podstacjami wynosi przeciętnie od 20 do 70 km. Dodatkową zaletą tego systemu jest znaczne ograniczenie przepływu prądu powrotnego przez szyny. Od autotransformatora znajdującego się najbliżej pociągu, od strony podstacji do podstacji, przepływ prądu powrotnego przez szyny jest zredukowany prawie do zera.

W podstacjach trakcyjnych systemu 25 kV 50 Hz instalowane są co najmniej dwa transformatory o mocy od 10 do 60 MVA. Zasilanie takich podstacji wymaga zastosowania minimalnego napięcia 110 kV, a podstawowo powinno to być napięcie 220 lub 400 kV.

Ponieważ w systemie 2 × 25 kV 50 Hz zasilanie sieci trakcyjnej odbywa się w układzie dwufazowym, przy zasilaniu podstacji z układu trójfazowego do systemu elektroenergetycznego wprowadzana jest asymetria, która nie powinna przekraczać 1%. Przy zastosowaniu transformatorów jednofazowych dotrzymanie tego wymagania jest możliwe, gdy moc zwarciowa systemu elektroenergetycznego będzie co najmniej stukrotnie większa od mocy transformatora. Jednym z rozwiązań pozwalającym na zmniejszenie asymetrii jest zastosowanie w podstacjach transformatorów o układzie Vv lub Yd. Transformatory te wprowadzają asymetrię o połowę mniejszą niż jednofazowe, lecz ich budowa jest bardziej skomplikowana, a napięcie między siecią jezdnią a zasilaczem dodatkowym ma mniejszą wartość – 43,3 kV. Innym rozwiązaniem są transformatory



Rys. 2. Uproszczony schemat i zasada działania układu zasilania trakcji elektrycznej w systemie 2 × 25 kV 50 Hz [opracowanie własne]

w układach Scott'a, Le Blanc'a, Woodbrige'a i Roof-Delta, które wprowadzają asymetrię bliską zeru, jednak ich bardzo skomplikowana budowa powoduje, że są praktycznie nieeksploatowane. Ponadto, zastosowanie tego typu transformatorów powoduje, że przesyłanie energii z podstacji do autotransformatorów odbywa się na poziomie około 35,4 kV, a nie 50 kV. Z tego powodu w Polsce przewiduje się zastosowanie głównie transformatorów jednofazowych, zgodnie z zapisami standardów CPK [7].

Ograniczenie asymetrii wprowadzanej przez układ zasilania do systemu elektroenergetycznego, uzyskuje się między innymi przez zasilanie kolejnych transformatorów z innych faz. Powoduje to, że napięcie w sieci trakcyjnej na kolejnych odcinkach jest przesunięte w fazie względem siebie. Uniemożliwia to dwustronne zasilanie sieci trakcyjnej i równoległą pracę podstacji, a poszczególne odcinki sieci trakcyjnej muszą być rozdzielone sekcjami separacji faz. Innym rozwiązaniem minimalizacji asymetrii, szczególnie przy zasilaniu podstacji z systemu elektroenergetycznego o niewystarczającej mocy zwarciowej, jest zastosowanie przekształtników napięcia zmieniających napięcie trójfazowe na jednofazowe. Przykładem takiego rozwiązania może być system Sitras SFC plus firmy Siemens. Dodatkową zaletą zastosowania przekształtników jest możliwość zasilania sieci trakcyjnej dwustronnie i rezygnacja z sekcji separacji faz. Warunkiem koniecznym takiego rozwiązania jest synchronizacja pracy przekształtników zasilających sąsiednie podstacje.

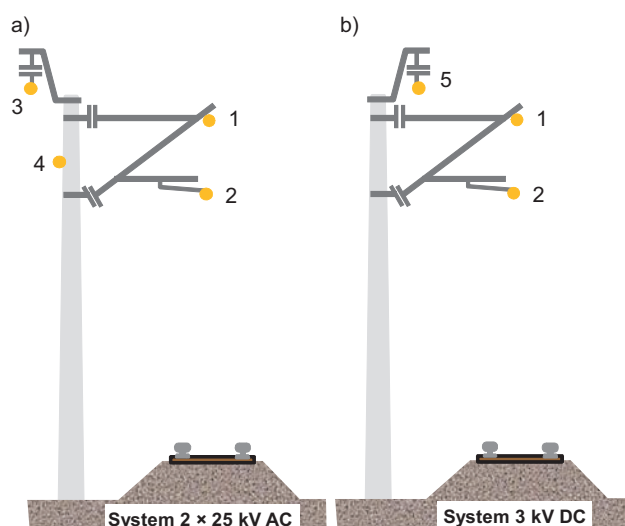
### 3. Sieć trakcyjna w systemie 3 kV DC i 2 × 25 kV AC

W systemie 25 kV AC prądy pobierane przez pociągi są ponad ośmiokrotnie mniejsze niż w systemie 3 kV DC przy tej samej mocy pojazdu trakcyjnego. Dodatkowo, w systemie 2 × 25 kV AC prąd przepływający przez sieć jezdnią od podstacji trakcyjnej do autotransformatora, za którym znajduje się pociąg jest około o połowę mniejszy od prądu pociągu (patrz rys. 2). Umożliwia to znaczne zmniejszenie przekroju sieci jezdniej w porównaniu z systemem 3 kV DC. Przekrój przewodów jezdnych i lin nośnych w systemie 2 × 25 kV AC jest dobierany głównie ze względu na wytrzymałość mechaniczną tych elementów. W systemie AC możliwe jest również domieszkanie miedzi innymi metalami, głównie magnezem i cyną w celu poprawy parametrów mechanicznych przewodów jezdnych i lin nośnych, kosztem pogorszenia parametrów elektrycznych.

Stwierdzając, że masa sieci jezdniej w systemie 2 × 25 kV AC jest niższa niż w systemie 3 kV DC

wynikałoby, że konstrukcje wsporcze sieci trakcyjnej w systemie AC mogłyby mieć mniejszą wytrzymałość mechaniczną niż w systemie DC. Twierdzenie to jest słuszne tylko dla sieci w systemie 1 × 25 kV AC i prędkości do 250 km/h, dla których siły naciągu przewodów jezdnych i lin nośnych w obydwu systemach są porównywalne.

W systemie 2 × 25 kV AC na konstrukcjach wsporczych oprócz przewodów jezdnych i lin nośnych, często jest instalowany dodatkowy zasilacz i przewód ochronny, wykonywany z aluminium. Różnice w budowie sieci trakcyjnej w systemie 2 × 25 kV AC oraz w systemie 3 kV DC ilustruje rysunek 3.



Rys. 3. Przykładowe rozmieszczenie elementów sieci trakcyjnej na słupie [8]: a) w systemie – 2 × 25 kV; b) w systemie – 3 kV DC; 1 – liną nośną, 2 – przewodem jezdny, 3 – zasilaczem dodatkowym, 4 – przewodem ochronnym, 5 – liną uszynienia grupowego

Sieci jezdne w systemie 2 × 25 kV AC, przeznaczone do eksploatacji z prędkościami powyżej 250 km/h, są zbudowane z pojedynczych przewodów jezdnych i jednej liny nośnej. Przewody jezdne z Cu, CuAg0,1 oraz CuMg0,2 i CuMg0,5 mają przekroje 120 i 150 mm<sup>2</sup>. Naciąg przewodów jezdnych zawiera się w zakresie od 15 do 31,5 kN. Liny nośne są wykonane z miedzi lub stopu BzII i mają przekrój od 65 do 120 mm<sup>2</sup>. Ich naciąg wynosi 14–16,25 kN.

Do porównania, przykładowe sieci jezdne w systemie 3 kV DC o prędkości eksploatacyjnej 250 km/h są zbudowane z dwóch przewodów jezdnych i dwóch lin nośnych. Ich parametry są następujące:

- sieć 2C120-2C-3 [9]:
  - przewody jezdne: 2 × 100 mm<sup>2</sup> Cu lub CuAg0,1, sumaryczna siła naciągu 21,18 kN,
  - liny nośne: 2 × Cu 120 mm<sup>2</sup>, sumaryczna siła naciągu 31,76 kN;
- sieć na linii „Direttissima” [10, 11]:
  - przewody jezdne: 2 × Cu 150 mm<sup>2</sup>, sumaryczna siła naciągu 30 kN,

- liny nośne:  $2 \times \text{CuCd } 160 \text{ mm}^2$ , sumaryczna siła naciągu 30 kN;
- sieć FR 5AV [10]:
  - przewody jezdne:  $2 \times \text{Cu } 150 \text{ mm}^2$ , sumaryczna siła naciągu 37,5 kN,
  - liny nośne:  $2 \times \text{Cu } 120 \text{ mm}^2$ , sumaryczna siła naciągu 30 kN.

Na podstawie danych zawartych w [9–15] obliczono masę jednostkowe sieci trakcyjnej. Obliczenia wykonano w ramach realizacji pracy [1], której wyniki opublikowano w [2]. Wyniki obliczeń zestawiono w tablicy 1.

Analizując dane z tablicy 1 można stwierdzić, że pomimo mniejszych przekrojów przewodów jezdnych

w sieciach w systemie 25 kV AC, całkowita masa elementów podwieszonych na konstrukcjach wsporczych jest podobna w obydwu porównywanych systemach. Dodatkowo, dobierając wytrzymałość mechaniczną konstrukcji wsporczych należy brać pod uwagę siły naciągu przewodów jezdnych i lin nośnych.

#### 4. Porównanie podstawowych parametrów systemów zasilania 3 kV DC i $2 \times 25 \text{ kV AC}$

W tablicy 2 zestawiono podstawowe parametry oraz wymagania stawiane przez systemy zasilania trakcji elektrycznej 3 kV DC i  $2 \times 25 \text{ kV AC}$  [1, 4].

Tablica 1

Zestawienie parametrów przykładowych sieci trakcyjnych [4, 8]

Sieć	Sumaryczny przekrój poprzeczny [ $\text{mm}^2$ ]	Sumaryczna masa sieci [ $\text{kg/m}$ ]	System zasilania	Maksymalna prędkość jazdy [ $\text{km/h}$ ]
2C120-2C-3	440 Cu	3,90	3 kV DC	250
FR5AV	540 Cu	4,79	3 kV DC	250
Direttissima	620 Cu	5,55	3 kV DC	250
FR25AV	270 Cu+450 Al	4,22	$2 \times 25 \text{ kV AC}$	300
TGV	185 Cu+576 Al	3,96	25 kV AC	260/300
Lina Madryt – Sevilla	195 Cu+480 Al	3,61	$2 \times 25 \text{ kV AC}$	200/300

Tablica 2

Parametry i wymagania systemów zasilania 3 kV DC i  $2 \times 25 \text{ kV AC}$  [1, 4]

Parametr/wymaganie	3 kV DC	$2 \times 25 \text{ kV AC}$
Zasilanie	dwustronne	jednostronne
Znamionowe napięcie wyjściowe podstacji	3,3 kV	od 39,9 do 55 kV <sup>2</sup>
Odległość między podstacjami	10–25 km	20–70 km
Kabiny sekcyjne	Pomocniczo, w przybliżeniu w połowie odcinka zasilania lub lokalizacji wynikającej z układu sieci	
Moc podstacji	8–23 MW, przeciętnie 11,22 MW	20–120 MVA
Moc autotransformatorów	–	10–15 MVA
Napięcie zasilania	15–110 kV	(110), 220, 400 kV
Asymetria	brak	W zależności od typu transformatorów
Zajętość terenu przez obiekty zasilania	75–330 m <sup>2</sup> /km linii	>180 m <sup>2</sup> /km linii
Moce pojazdów	6 MW	20 MW
Masa sieci trakcyjnej	do 5,55 km/m	do 4,22 kg/m
Siła naciągu: przewodu jezdnego liny nośnej	do 18,75 kN do 15,88 kN	do 31,50 kN do 16,25 kN

<sup>2</sup> Zgodnie ze standardami [7] w Polsce przewiduje się zastosowanie transformatorów jednofazowych o wyjściowym napięciu znamionowym 55 kV 50 Hz.

Choć w systemie  $2 \times 25$  kV AC odległości pomiędzy podstacjami mogą być znacznie większe niż w systemie 3 kV DC, to z uwagi na konieczność zastosowania autotransformatorów pomiędzy obiektami zasilania są zbliżone w obydwu systemach. Należy też zwrócić uwagę, że podstacje w systemie AC wymagają zasilania napięciem o wyższych wartościach, a tylko w wyjątkowych przypadkach dopuszcza się zasilanie podstacji napięciem 110 kV.

## 5. Wpływ systemu zasilania na realizację rozkładu jazdy

Zgodnie z TSI Energia [16, 17] i przywołanych w nich normie EN 50388-1 [18] system zasilania trakcji elektrycznej, bez względu na jego rozwiązanie, powinien mieć parametry umożliwiające realizację zakładanego rozkładu jazdy pociągów. Celem systemu zasilania trakcji elektrycznej jest zapewnienie każdemu składowi mocy wystarczającej do dotrzymania rozkładu jazdy przy rozsądnych kosztach. Osiągnięcie przez pociągi zakładanych parametrów ruchowych, w tym prędkości jazdy i przyspieszenia uwarunkowane jest możliwością poboru z sieci trakcyjnej wymaganej ilości energii elektrycznej. Zarówno przyspieszenia, jak i prędkość jazdy mają podstawowy wpływ na czasy przejazdów, czyli realizację rozkładu jazdy.

Im wyższe prędkości, masy i osiągnięte przyspieszenia, tym wyższy jest pobór energii przez pociąg z układu zasilania. W układzie przesyłania energii z systemu zasilania do pociągu, jednym z najbardziej niewłaściwych jest styk nakładek pantografu z przewodami jezdnyymi sieci jezdnej. Powierzchnia styku jest bardzo mała z powodu okrągłego kształtu przewodu jezdny i jego zużycia oraz stanu i wymiarów nakładek stykowych. Ponadto, w poruszającym się pociągu styk jest ruchomy, a siła docisku obydwu elementów wynosi od kilku do kilkudziesięciu niutonów. Tego rodzaju układ jest narażony na powstawanie łuku elektrycznego pomiędzy elementami stycznymi. Prawdopodobieństwo wystąpienia tego zjawiska jest tym większe im wyższe są prędkości jazdy i pobór prądu.

Eksploatacja i badania wykorzystania systemu 3 kV DC do zasilania linii o prędkości jazdy powyżej 200 km/h, które były prowadzone w Polsce oraz innych krajach europejskich, w tym we Włoszech, wykazały, że ze względu na współpracę dynamiczną pantografu i jakość odbioru prądu, maksymalna prędkość jazdy pociągów zasilanych w tym systemie to około 250 km/h. Natomiast ze względu na przepływ dużego prądu przez styk, przewód jezdny – nakładka stykowa, moc pobierana przez jeden pantograf nie

powinna przekraczać około 7,5 MW (odpowiada to pojazdowi o mocy około 6 MW wraz zasilaniem odbiorów nietrakcyjnych).

Zostało to usankcjonowanie prawnie w punkcie 7.1.1. TSI Energia [16, 17] zapisem „Nowe linie dostosowane do prędkości większej niż 250 km/h muszą być zasilane jednym z systemów prądu przemiennego wymienionych w pkt 4.2.3 lit. a) i b).” Oznacza to, że w Polsce na liniach kolejowych o prędkości powyżej 250 km/h powinien być zastosowany system  $2 \times 25$  kV AC. Z tego względu dalsze porównanie systemów zostanie ograniczone do prędkości jazdy 250 km/h.

W systemie zasilania trakcji elektrycznej, jak w każdym układzie rzeczywistym elektrycznym prądu, występują spadki napięcia. Spadki te są wprost proporcjonalne do rezystancji (impedancji) obwodu i przepływającego prądu. Pomimo, że w systemie 3 kV DC przekrój sieci jezdnej jest ponad dwukrotnie większy niż w systemie  $2 \times 25$  kV AC oraz w systemie AC, na spadki napięcia ma wpływ indukcyjność sieci, spadki napięcia w sieci trakcyjnej systemu AC są niższe. Wynika to z przepływającego przez sieć prądu. Prąd pobierany przez pociąg w systemie  $2 \times 25$  kV AC jest ponad ośmiokrotnie mniejszy niż w systemie 3 kV DC. Dodatkowo, od podstacji trakcyjnej do autotransformatora najbliższej pociągu, energia przesyłana jest na poziomie 50 kV (patrz rys. 2). Również spadki napięcia na pozostałych elementach systemu zasilania (podstacjach trakcyjnych, liniach zasilających itd.) w systemie  $2 \times 25$  kV AC są niższe niż w przypadku 3 kV DC. Szczegółowe porównanie tych systemów pod tym względem przedstawiono w rozdziale 5.

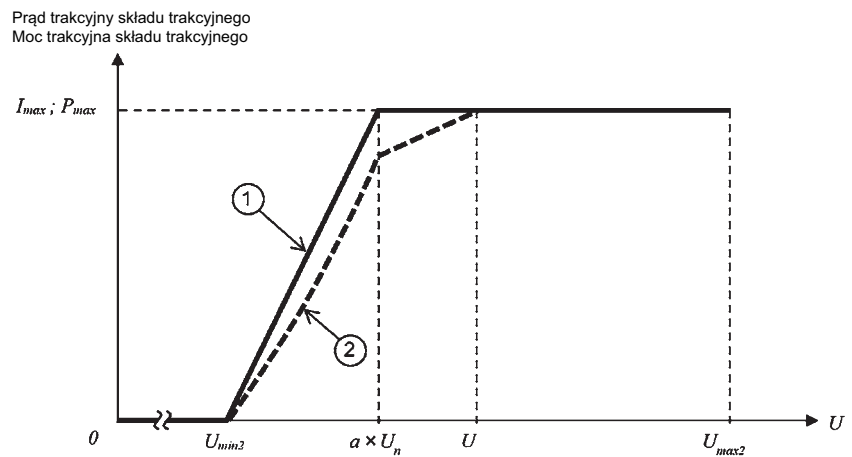
Powoduje to, że względna wielkość spadków napięcia w systemie  $2 \times 25$  kV AC jest znacznie mniejsza niż w systemie 3 kV DC. Z tego względu odległości między podstacjami w systemie AC mogą być znacząco większe niż w systemie DC.

Aby uniknąć nadmiernych spadków napięcia w systemie zasilania, zgodnie z normą EN 50388-1 [18], pojazdy o mocy powyżej 2 MW powinny być wyposażone w układy redukujące prąd (moc) w przypadku spadku napięcia w sieci trakcyjnej. Zakres redukcji prądu (mocy) pokazano na rysunku 4.

Współczynnik  $a$  na rysunku 4 dla systemów 3 kV DC i 25 kV AC wynosi 0,9. Wynika z tego to, że w celu ograniczenia zmniejszenia się napięcia w sieci trakcyjnej pociąg powinien redukować pobierany prąd (moc), gdy napięcie na pantografie w systemie 3 kV DC będzie poniżej 2700 V lub 22,5 kV w systemie 25 kV AC.

Ze względu na występowanie większych spadków napięcia w systemie 3 kV DC niż w systemie  $2 \times 25$  kV AC występuje większe prawdopodobieństwo wystąpienia konieczności ograniczania prądu

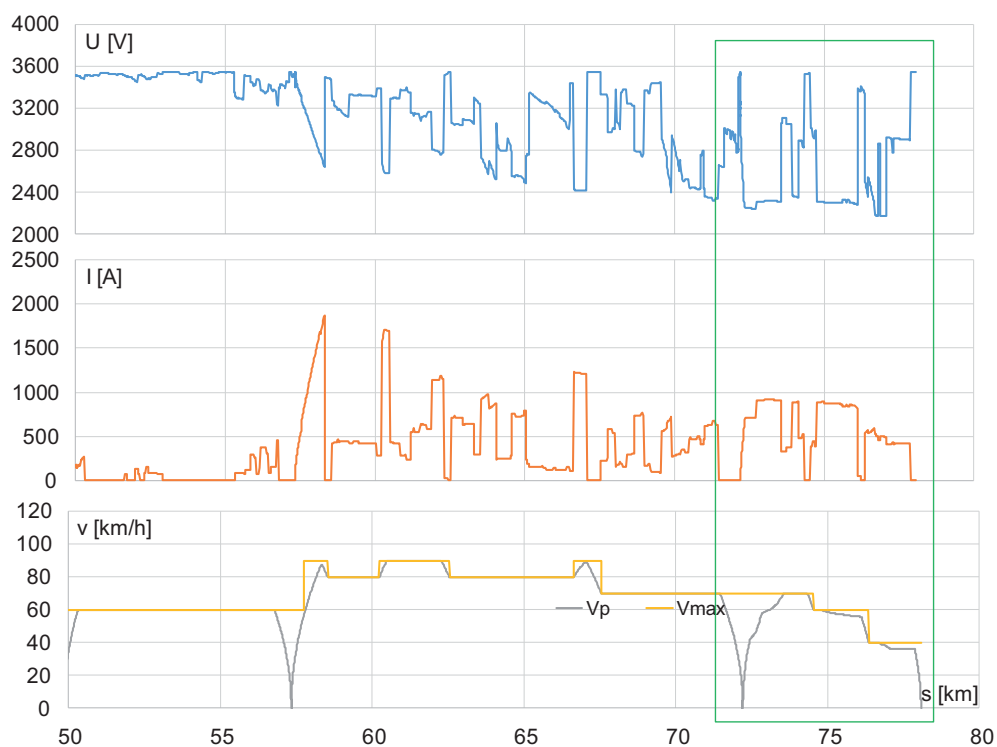
Rys. 4. Ograniczenie prądu (mocy) pojazdu trakcyjnego [18], gdzie:  $U_{\min 2}$ ,  $U_n$ ,  $U_{\max 2}$  – zgodnie z EN 50163:2004 [19],  $I_{\max}$  – maksymalny prąd trakcyjny pobierany przez pociąg ustawiony na napięcie nominalne (bez zasilania pomocniczego),  $P_{\max}$  – maksymalna moc na kołach, 1 – ograniczenie mocy trakcyjnej wynikające z liniowego ograniczenia prądu trakcyjnego poniżej  $a \times U$ , 2 – ograniczenia liniowe w dwóch stopniach prądu trakcyjnego poniżej napięcia  $a \times U_n$



(mocy) pociągu w systemie DC niż AC. Prawdopodobieństwo to jest tym wyższe im większa jest moc pociągu, co jest związane z jego prędkością i masą. Ilustruje to rysunek 5. Na rysunku, zielonym prostokątem oznaczono odcinek linii, na którym z powodu niskiego napięcia na pantografie (przebieg niebieski) konieczne było ograniczenie prądu pobieranego przez pociąg (przebieg czerwony). W wyniku tego pociąg nie mógł osiągnąć zakładanego przyspieszenia, czego skutkiem było niejednostajne zwiększanie

prędkości pociągu (przebieg szary) od zera do prędkości maksymalnej zaznaczonej linią żółtą. Również na kolejnym odcinku linii ograniczenie prądu (mocy) pociągu wpłynęło na jego osiągi – zmniejszenie prędkości poniżej rozkładowej. Konsekwencją redukcji prądu (mocy) pociągu było jego opóźnienie.

Pociąg o określonej masie jadący z określoną prędkością lub uzyskujący zadane przyspieszenie potrzebuje takiej samej mocy, niezależnie od zastosowanego systemu zasilania. Minimalne różnice



Rys. 5. Przykład wpływu wartości napięcia w sieci trakcyjnej na konieczność redukcji prądu (mocy) pociągu i redukcję osiągow [opis w tekście]

w zapotrzebowaniu na moc mogą jedynie wynikać ze sprawności pojazdu trakcyjnego w systemie AC i DC, lecz są one pomijalne. Dlatego można przyjąć, że jeżeli napięcie w sieci trakcyjnej nie będzie obniżać się poniżej napięcia znamionowego oraz prędkość jazdy będzie do 250 km/h, to rodzaj systemu zasilania nie ma wpływu na przyspieszenia pociągów oraz ich prędkość, niezależnie od parametrów pociągu. Wymaga to wydajnych układów zasilania.

Podsumowując, rodzaj zasilania ma wpływ na osiągi pociągów w przypadku prędkości powyżej 250 km/h, która to prędkość jest graniczna dla systemu 3 kV DC, ponieważ system 3 kV DC jest bardziej podatny na spadki napięcia niż system  $2 \times 25$  kV AC. Wynika z tego większe prawdopodobieństwo konieczności redukcji prądu (mocy) pociągów, szczególnie dużej mocy, czyli w ruchu towarowym i pasażerskim międzyregionalnym. Redukcja prądu (mocy) przekłada się na przyspieszenia pociągów i ewentualność nieosiągnięcia prędkości maksymalnej, co z kolei przełoży się na czas przejazdu i możliwość realizacji zakładanego rozkładu jazdy. Jeżeli system zasilania zapewnia napięcie znamionowe w sieci trakcyjnej to jego rodzaj nie ma wpływu na możliwość realizacji rozkładu jazdy (uzyskiwane prędkości do 250 km/h, przyspieszenia, czas jazdy, maksymalne masy).

## 6. Zużycie i straty energii w systemach 3 kV DC i $2 \times 25$ kV AC

Zużycie i straty energii w systemach 3 kV DC i  $2 \times 25$  kV AC określono na podstawie symulacji [20], wykonanej w programie Sidytrak, który spełnia wymagania normy EN 50641 [21]. Dla obydwu systemów, symulacje i analizy wykonano dla hipotetycznej,

dwutorowej linii, której parametry zaczerpnięto z normy EN 50641 [21]. Profil linii i lokalizację stacji przedstawiono na rysunku 6.

Po linii porusza się 6 pociągów:

- 4 pociągi HS z prędkością maksymalną 200 km/h,
- pociąg towarowy z prędkością maksymalną 100 km/h,
- pociąg regionalny – ezt z prędkością maksymalną 160 km/h.

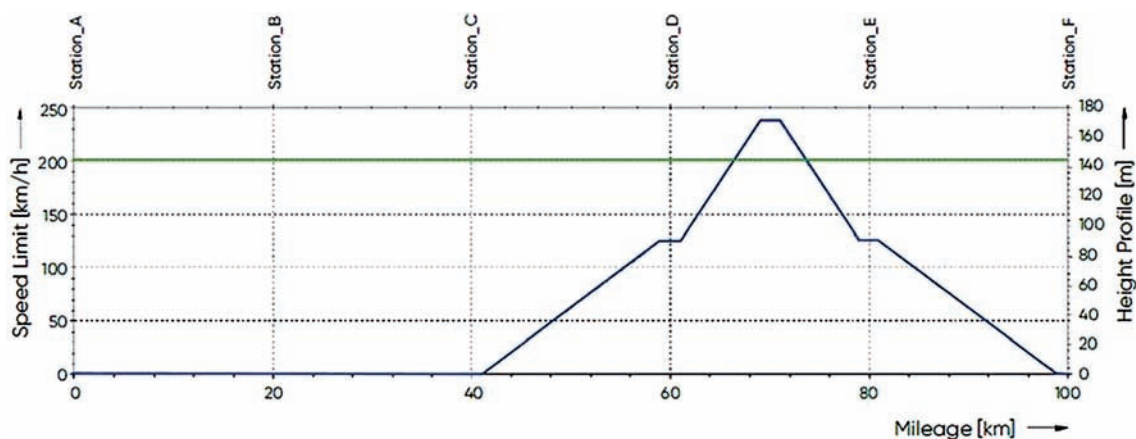
Parametry pociągów przyjęto zgodnie z punktem 6.3 normy EN 50641 [21], w którym są określone między innymi masy pociągów, współczynnik mas wirujących, charakterystyka trakcyjna, sprawność, moc urządzeń pomocniczych, opory ruchu, maksymalne przyspieszenia itp.

Podczas symulacji odwzorowano realizację rozkładu jazdy określonego na podstawie zapisu w normie EN 50641 [21] i przedstawionego na rysunku 7.

Założenia, jednakowe dla obydwu systemów zasilania, pozwoliły na porównanie zużycia i strat energii przy realizacji takiego samego rozkładu jazdy.

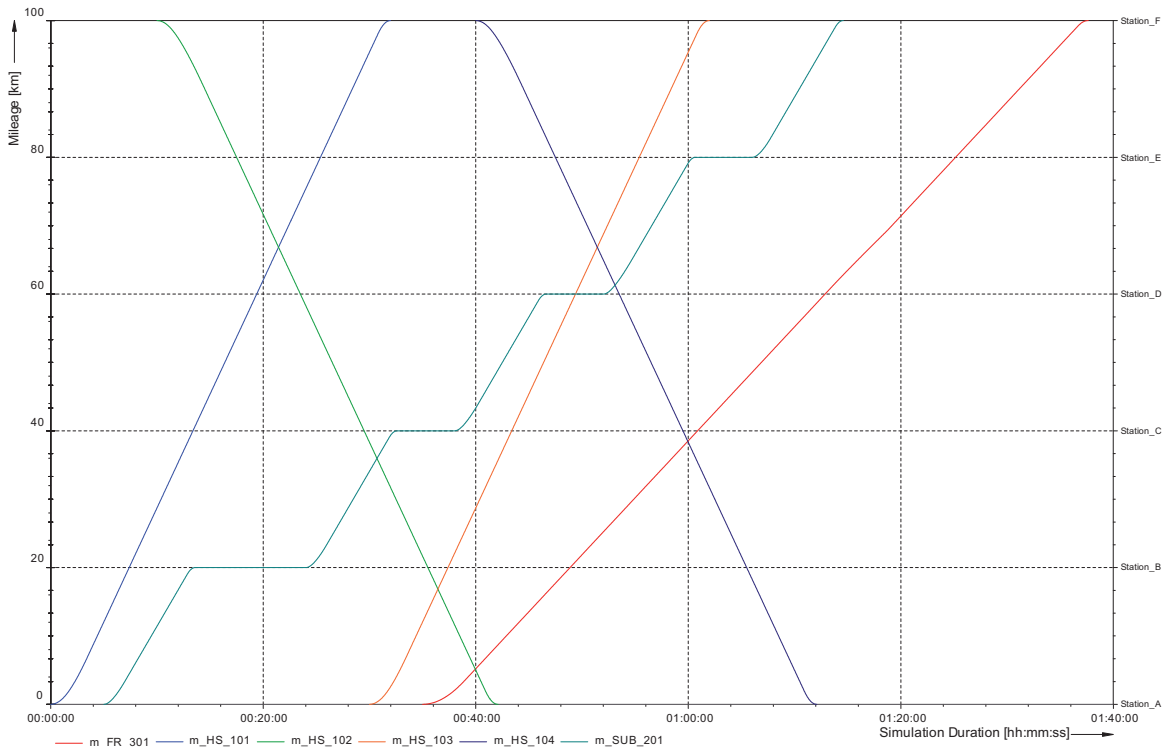
W symulacjach dla systemu 3 kV DC przyjęto, że linia jest zasilana z 9 podstacji trakcyjnych zlokalizowanych co 12,5 km od km 0 do km 100. Podstacje wyposażono w dwa zespoły typu PD-17S, zasilane napięciem 15 kV, z transformatorami o mocy 6,3 MVA. Układ zasilania podstacji i parametry jego elementów przedstawiono na rysunku 8. W systemie 3 kV DC sieć jezdna ma sumaryczny przekrój 450 mm<sup>2</sup>.

W systemie  $2 \times 25$  kV AC podstacje zasilane są z systemu elektroenergetycznego o mocy zwarciowej 5 GVA napięciem 220 kV, liniami AFL-8 o długości 30 km i przekroju 350 mm<sup>2</sup>. Sieć trakcyjna jest zasilana z dwóch podstacji, w których są zainstalowane dwa transformatory o mocy 25 MVA i  $U_z = 10\%$ . Autotransformatory w kabinach sekcyjnych mają moc 10 MVA i  $U_z = 1\%$ .

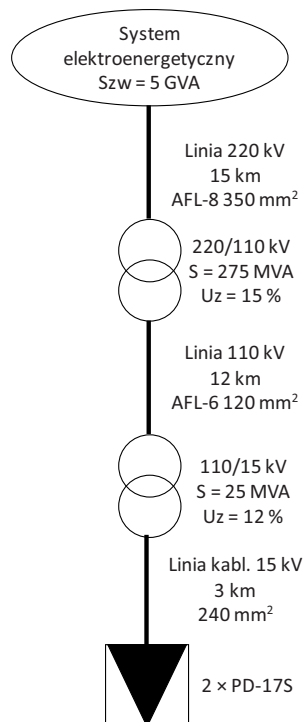


Rys. 6. Profil pionowy linii i dopuszczalna prędkość [1, 2, 20, 21]





Rys. 7. Rozkład jazdy przyjęty do symulacji [1, 2, 20, 21]



Rys. 8. Uproszczony schemat zasilania podstacji w systemie 3 kV DC [1, 2, 20]

W tabelicy 3 zestawiono lokalizację i moce obiektu zasilania w obydwu porównywanych systemach. Zastosowana moc podstacji zasilających symulowaną linię, w obydwu systemach jest podobna – w systemie

3 kV DC moc ta jest większa o 0,98 MW od mocy w systemie  $2 \times 25$  kV AC.

Przekrój sieci trakcyjnej do symulacji w systemie  $2 \times 225$  kV AC przyjęto z normy EN 50641 [21] o następujących wartościach:

- przewód jezdny – 120 mm<sup>2</sup> Cu,
- lina nośna – 70 mm<sup>2</sup> BzII,
- zasilacz dodatkowy – 288 mm<sup>2</sup> Al.

Wynik symulacji wskazuje, że przy zakładanym rozkładzie jazdy całkowite zużycie energii przez pociągi jest jednakowe dla obydwu systemów zasilania i wynosi 14 697 kWh w czasie 1 godziny i 40 minut (6000 s). Potwierdzają to wnioski z rozdziału 5. W symulacjach dla obydwu systemów napięcie na pantografach pociągów nie spadało poniżej  $0,9U_n$ , więc nie zachodziła konieczność redukcji prądu (mocy) pociągów.

Straty energii w systemach zasilania wyniosły:

- 1464 kWh w systemie 3 kV DC,
- 363,4 kWh w systemie  $2 \times 25$  kV AC.

Straty stanowią odpowiednio 9,97% w systemie 3 kV DC i 2,47% w systemie  $2 \times 25$  kV AC w stosunku do energii pobranej przez pociągi. W tabelicy 4 zestawiono wartość strat na poszczególnych elementach układów zasilania oraz ich względną wielkość w stosunku do strat całkowitych. Dane w sposób graficzny przedstawiono również na rysunkach 9 i 10.

Tablica 3

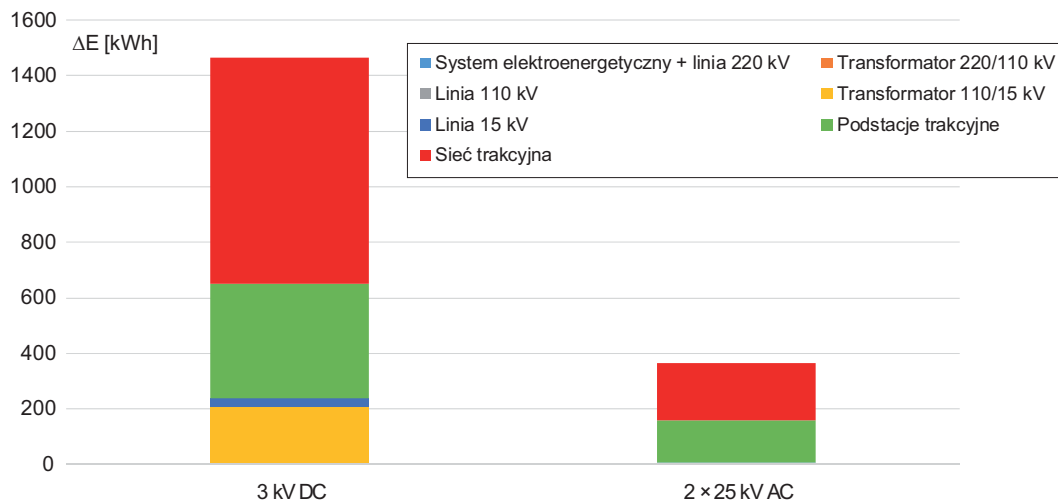
Lokalizacja i moc obiektów zasilania w systemie  $2 \times 25$  kV AC i 3 kV DC [21]

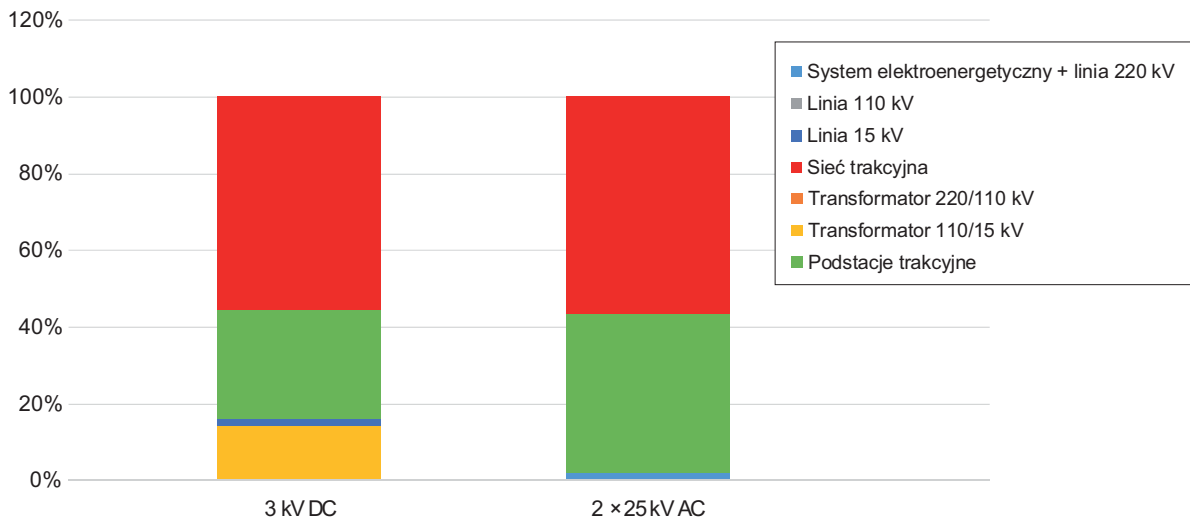
Lokalizacja w [km]	2 × 25 kV AC		3 kV DC	
	Podstacja/kabina	Zainstalowana moc [MVA]	Podstacja	Zainstalowana moc [MV]
0,0	AT01	10	PT1	11,22
12,5	AT02	10	PT2	11,22
25,0	PT1	2 × 25	PT3	11,22
37,5	AT03	10	PT4	11,22
50,0	AT SP (kabina środkowa z se- paracją faz)	2 × 10	PT5	11,22
62,5	AT04	10	PT6	11,22
75,0	PT2	2 × 25	PT7	11,22
87,5	AT05	10	PT8	11,22
100,0	AT06	10	PT9	11,22

Tablica 4

Straty w układzie zasilania trakcji w systemie 3 kV DC i  $2 \times 25$  kV AC [1, 2]

Element układu zasilania trakcji	3 kV DC		2 × 25 kV AC	
	Wartość strat [kWh]	Wielkość względna strat [%]	Wartość strat [kWh]	Wielkość względna strat [%]
System elektroenergetyczny i linie 220 kV	1,06	0,07	7,89	2,17
Transformatory 220/110 kV	0,72	0,05	–	–
Linie 110 kV	5,34	0,36	–	–
Transformatory 110/15 kV	203,30	13,82	–	–
Linie 15 kV	27,16	1,86	–	–
Podstacje trakcyjne	415,40	28,37	149,50	41,14
Sieć trakcyjna	812,00	55,47	206,00	56,69
Suma	1463,98	100,00	363,39	100,00

Rys. 9. Straty energii w systemie zasilania 3 kV DC i  $2 \times 25$  kV AC [1, 2]



Rys. 10. Podział strat energii na elementy w systemie zasilania 3 kV DC i 2 x 25 kV AC [1, 2]

Analizując otrzymane wyniki symulacji można wyciągnąć następujące wnioski:

1. Straty w systemie zasilania 2 x 25 kV AC są ponad cztery razy mniejsze niż w systemie 3 kV DC.
2. Straty energii w systemie elektroenergetycznym i linach 220 kV są niższe ponad siedmiokrotnie w systemie 3 kV DC. Wynika to z faktu przyjęcia o połowę krótszych, niż w systemie 2 x 25 kV AC, linii 220 kV oraz z tego, że w systemie 3 kV DC podstacje trakcyjne podłączone są do systemu elektroenergetycznego w 9 punktach, a w systemie 2 x 25 kV AC tylko w dwóch. Konsekwencją tego jest przepływ mniejszych prądów do poszczególnych podstacji, a więc mniejszych spadków napięcia i strat energii.
3. Straty energii w układzie system elektroenergetyczny – podstacja trakcyjna w systemie 3 kV DC powstają głównie w transformatorach obniżających napięcie z poziomu 220 kV do 110 kV, a następnie do 15 kV. W systemie 2 x 25 kV AC straty są związane tylko z przesyłem energii (niejednokrotnie na duże odległości), gdyż obniżanie napięcia dostarczanego do podstacji nie jest konieczne. Wynikiem tego w układzie zasilania podstacji trakcyjnych w systemie 3 kV DC straty energii są około trzydziestokrotnie większe niż w systemie 2 x 25 kV AC.
4. Pomimo porównywalnych sumarycznych mocy podstacji trakcyjnych, zainstalowanych w podstacjach trakcyjnych w obydwu systemach zasilania, ze względu na większe prądy występujące w systemie 3 kV DC straty energii w podstacjach trakcyjnych w systemie DC są ponad dwa i pół razy większe niż w systemie AC.
5. Pomimo, że systemie 3 kV DC przekrój jednej sieci jest ponad dwukrotnie większy niż w systemie

2 x 25 kV AC oraz w systemie AC na spadki napięcia ma wpływ indukcyjność sieci, spadki napięcia w sieci trakcyjnej systemu AC są niższe. Wynika to z tego, że prąd pobierany przez pociąg w systemie 2 x 25 kV AC jest ponad ośmiokrotnie mniejszy niż w systemie 3 kV DC oraz, że w systemie 2 x 25 kV AC moc przekazywana z podstacji do autotransformatora będącego najbliżej pociągu jest na poziomie napięcia 50 kV. Powoduje to, że straty energii w sieci trakcyjnej w systemie 2 x 25 kV AC są czterokrotnie niższe niż w systemie 3 kV DC, przy tej samej mocy pociągów.

## 7. Podsumowanie

Wielosystemowy tabor trakcyjny jest w powszechnym użyciu i nie jest już konieczna rozbudowana infrastruktura, w tym stacje styczne, na których następowalaby zmiana systemu zasilania. Obecnie wystarczają odpowiednio zaprojektowane sekcje separacji systemów, które głównie są instalowane poza węzłami kolejowymi i dużymi stacjami. Zniknęło więc większość argumentów technicznych podnoszonych przy podejmowaniu decyzji na przełomie lat 50. i 60. ubiegłego stulecia o niewprowadzaniu w Polsce systemu 25 kV 50 Hz.

Porównując systemy zasilania trakcji elektrycznej 3 kV DC i 2 x 25 kV AC należy brać pod uwagę nie tylko liczbę i odległość między podstacjami trakcyjnymi oraz budowę sieci trakcyjnej, lecz również cały układ zasilania podstacji. Należy pamiętać, że w obydwu systemach występują dodatkowo kabiny sekcyjne, z tym, że w systemie 3 kV DC poprawiają parametry układu zasilania, a w systemie AC są konieczne, gdyż instalowane są w nich autotransformatory niezbędne do działania

systemu. W konsekwencji w obydwu systemach obiekty zasilania (podstacje trakcyjne i kabiny sekcyjne) są rozmieszczone, co 10–15 km. Powoduje to, że zajętość terenu przez obiekty zasilania na 1 km linii kolejowej jest podobna w obydwu systemach.

Ponieważ system  $2 \times 25$  kV AC obciąża nierównomiernie poszczególne fazy układu elektroenergetycznego powstaje niepożądana asymetria. Aby utrzymać poziom asymetrii na dopuszczalnym poziomie moc zwarciowa systemu elektroenergetycznego powinna być dużo większa od mocy podstacji trakcyjnej. W przypadku preferowanych w Polsce transformatorów jednofazowych [7] moc zwarciowa powinna być co najmniej 100 razy większa niż moc transformatorów. Wynika z tego, że napięcie zasilające podstacje powinno wynosić 220 i 400 kV. Zmniejszenie oddziaływania systemu  $2 \times 25$  kV AC na system elektroenergetyczny jest możliwe przez zastosowanie przekształtników z trzech na jedną fazę, co jednak podnosi koszty budowy i eksploatacji układu zasilania.

W systemie 3 kV DC podstacje trakcyjne nie wprowadzają asymetrii napięcia w liniach zasilających, a uniknięciu wprowadzania do systemu elektroenergetycznego zakłóceń powyżej dopuszczalnych wartości zapobiega stosowanie 12-pulsowych zespołów prostownikowych i odpowiednia moc zwarciowa w miejscu zasilania podstacji.

W systemie  $2 \times 25$  kV AC konstrukcje wsporcze sieci trakcyjnej obciążone są, oprócz lin nośnych i przewodów jezdnych, również zasilaczem dodatkowym i przewodem ochronnym. W wyniku tego i pomimo, że przekroje sieci jezdnych w systemie  $2 \times 25$  kV AC są około dwa razy mniejsze niż w systemie 3 kV DC, masa podwieszonych lin i przewodów jest porównywalna dla obydwu systemów.

Ponieważ w systemie  $2 \times 25$  kV prąd pobierany przez pociąg jest ponad ośmiokrotnie mniejszy oraz nie jest konieczne użycie transformatorów obniżających napięcie w układzie zasilania podstacji trakcyjnych, straty energii są około czterokrotnie mniejsze niż w systemie 3 kV DC.

Jakość styku przewodów jezdny – nakładka stykowa ogranicza prędkość jazdy w systemie 3 kV DC do około 250 km/h. Czynnikiem ten w systemie  $2 \times 25$  kV AC w mniejszym stopniu determinuje prędkość jazdy pociągów, dlatego możliwe jest uzyskiwanie znacznie większych prędkości. Dodatkowo, w systemie AC występują mniejsze spadki napięcia w układzie zasilania trakcji. Dzięki temu prawdopodobieństwo konieczności ograniczania pobieranego prądu (mocy) przez pociągi zasilane w tym systemie jest mniejsze niż w systemie 3 kV DC, co z kolei w mniejszym stopniu wpływa na ograniczanie parametrów ruchowych pociągów.

Rodzaj systemu zasilania nie ma wpływu na osiągnięte przez pociągi przyspieszenia, prędkości maksymalne

(do 250 km/h), a tym samym czasy przejazdów i możliwość realizacji zakładanego rozkładu jazdy, pod warunkiem, że system zasilania trakcji zapewnia znamionową wartość napięcia na pantografie.

Reasumując nie można jednoznacznie stwierdzić, który z porównywanych systemów zasilania sieci trakcyjnej jest zdecydowanie lepszy, pod warunkiem, że prędkość jazdy nie przekracza 250 km/h. Należy podkreślić, że planując w Polsce wprowadzenie systemu  $2 \times 25$  kV AC należy brać pod uwagę rozbudowę systemu elektroenergetycznego wysokich napięć lub zastosowanie przekształtników z trzech na jedną fazę. W Polsce jest prawie 12 tys. km zelektryfikowanych linii kolejowych w systemie 3 kV DC, zasilanych z ponad 500 podstacji trakcyjnych. Znaczna liczba tych obiektów zasilania jest nowa lub zmodernizowana w ostatnich latach. Z tego względu wprowadzenie systemu  $2 \times 25$  kV AC jest obecnie racjonalne na nowych, wydzielonych liniach lub liniach nieelektryfikowanych o długości ponad 100 km.

## Literatura

1. Rojek A.: *Raport opisujący kwestię zmiany napięcia sieci trakcyjnej w Polsce z 3 kV DC na 25 kV AC*, Praca IK, nr 001290/12, Warszawa, 2020.
2. Biliński J. et.al.: *3 czy 25 kV? Porównanie systemów zasilania kolejowej sieci trakcyjnej*, Fundacja „Pro Kolej”, Warszawa, 2020.
3. Kuczborski S.: *O najważniejszy system elektryfikacji kole*, Problemy Kolejnictwa – Osiągnięcia Kolejnictwa Światowego, Warszawa, Wydawnictwa Komunikacyjne, 1956, z. 1.
4. Kuczborski S.: *Aktualne stanowisko resortu komunikacji w sprawie celowości zastosowania systemu prądu zmiennego 25 kV, 50 Hz do realizacji programu elektryfikacyjnego PKP*, Problemy Kolejnictwa – Biblioteka Osiągnięć Kolejnictwa Światowego. Zeszyt 20, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 1962.
5. Frontczak F. et.al.: *50 lat elektryfikacji PKP*, Wydawnictwa Komunikacji i Łączności WKŁ, Warszawa, 1989.
6. Rojek A.: *Tabor, zasilanie trakcji elektrycznej i elektroenergetyka kolejowa*, Kolejowa Oficyna Wydawnicza, Warszawa, 2010.
7. Standardy techniczne. Szczegółowe warunki techniczne dla budowy infrastruktury kolejowej Centralnego Portu Komunikacyjnego – Wytyczne projektowania, Tom II.1. Sieć trakcyjna i zasilanie trakcyjne  $2 \times 25$  kV 50 Hz, Instytut Kolejnictwa, Warszawa, 2023.
8. Rojek A.: *Wybrane problemy z zastosowaniem w Polsce systemu zasilania trakcji elektrycznej  $2 \times 25$  kV 50 Hz*, Problemy Kolejnictwa, 2012, z. 155.

9. Katalog sieci trakcyjnej, Podwieszenia rurowe, Sieć trakcyjna YC150-2CS150 z odmianą YC120-2CS150, Warszawa, 2010.
10. Buffarini G.G.: *Prezentacja firmy ITALFERR 2007 r.*
11. Rostkowski W.: *Przegląd konstrukcji sieci trakcyjnych w krajach Unii Europejskiej*, TTS Technika Transportu Szynowego, 2006, nr 4.
12. Design of high speed overhead contact lines and its execution in projects, Balfour Beatty, 6th World Congress on High Speed Rail, Amsterdam, 2008.
13. Kaniewski M., Maciołek T.: *Sieci trakcyjne dużych prędkości jazdy na PKP. MET*, 2003.
14. Rojek A., Kaniewski M.: *Koleje dużych prędkości w Polsce*, Monografia pod redakcją naukową M. Siergiejczyka, Rozdział 8, Instytut Kolejnictwa, Warszawa, 2015.
15. Siemiński T.: *Zasilanie trakcji elektrycznej nowej linii kolejowej Paryż – Lion*, Trakcja i Wagony, 7/1982.
16. Rozporządzenie Komisji (UE) NR 1301/2014 z dnia 18 listopada 2014 r. w sprawie technicznych specyfikacji interoperacyjności podsystemu „Energia” systemu kolei w Unii, Dz.U. L356 z 12.12.2014.
17. Rozporządzenie Wykonawcze Komisji (UE) 2023/1694 z dnia 10 sierpnia 2023 r. zmieniające rozporządzenia Komisji: (UE) nr 321/2013, nr 1299/2014, nr 1300/2014, nr 1301/2014, nr 1302/2014, nr 1304/2014 oraz rozporządzenie wykonawcze Komisji (UE) 2019/777, Dz.U. L222 z 08.09.2023.
18. EN 50388-1:2022: Railway Applications – Fixed installations and rolling stock – Technical criteria for the coordination between electric traction power supply systems and rolling stock to achieve interoperability – Part 1: General.
19. EN 50163:2004: Zastosowania kolejowe – Napięcia zasilania systemów trakcyjnych.
20. Comparison simulation of 3 kV DC and 2 × 25 kV 50 Hz for Instytut Kolejnictwa, Report SMO RI EL COC SE/1019,01/STS. 09.2020.
21. EN 50641:2020: Railway applications – Fixed installations – Requirements for the validation of simulation tools used for the design of traction power supply systems.