

Wpływ systemów trakcyjnych AC i DC na konstrukcję zbrojenia tuneli kolejowych

The impact of AC and DC traction systems on the design of reinforcement in railway tunnels



mgr inż. Józef Dąbrowski

Sieć Badawcza Łukasiewicz
– Instytut Elektrotechniki
jozef.dabrowski@iel.lukasiewicz.gov.pl
ORCID: 0000-0002-3766-1852



mgr inż. Mateusz Paluch

absolwent Wydziału Elektrycznego
Politechniki Warszawskiej
paluch-mateusz@proton.me
ORCID: 0009-0006-3280-4400

Streszczenie

Prezentowana analiza porównawcza systemów zelektryfikowanej trakcji szynowej prądu stałego (DC) oraz przemiennego (AC) ze szczególnym uwzględnieniem ich oddziaływania na infrastrukturę tunelową oraz ograniczeń fizycznych wynikających z dużych prędkości jazdy. Omówiono parametry znamionowe napięć w kontekście historycznym i nowoczesnych wymagań eksploatacyjnych. Szczególną uwagę poświęcono zjawiskom termicznym i mechanicznym na styku pantografu z przewodem jezdnym, wskazując na limity prądowe ograniczające moc dostarczaną do pojazdów. Autorzy przeanalizowali różnice w stratach energii wynikające z upływności izolacji oraz zjawiska indukcyjne towarzyszące

przepływowi prądu trakcyjnego. Na podstawie doświadczeń z eksploatacji warszawskiego metra wykazano wpływ prądu rozruchowego na indukowanie napięć w konstrukcjach podziemnych. Wskazano, że o ile w systemach DC kluczowym wyzwaniem jest rezystancja wzdłużna konstrukcji, o tyle w systemach AC dominuje strumień transformacji. Wyciągnięto wnioski, że ewolucja technologii budowy tuneli (metoda TBM) i wprowadzenie nowoczesnych materiałów zbrojeniowych pozwoliły na zminimalizowanie niekorzystnych oddziaływań elektromagnetycznych i strat wiroprądowych, zwłaszcza w kontekście projektowania linii dużych prędkości.

Słowa kluczowe transport szynowy, efektywność energetyczna, budowa tuneli metodą TBM, zakłócenia elektromagnetyczne, prądy błądzące, trakcja elektryczna (AC/DC), beton zbrojony włóknami, nakładka stykowa pantografu

Abstract

Presented is a comparative analysis of direct current (DC) and alternating current (AC) electrified rail traction systems, with particular emphasis on their impact on tunnel infrastructure and physical limitations resulting from high speeds. The rated voltage parameters are discussed in the context of historical and modern operational requirements. Particular attention is paid to thermal and mechanical phenomena at the contact point between the pantograph and the contact wire, pointing to the current limits restricting the power supplied to vehicles. The authors analyzed differences in energy losses resulting from insulation leakage and inductive phenomena accompanying the flow of

traction current. Based on experience from the operation of the Warsaw metro, the influence of starting current on the induction of voltages in underground structures was demonstrated. It was pointed out that while in DC systems the key challenge is the longitudinal resistance of the structure, in AC systems the transformation flux dominates. It was concluded that the evolution of tunnel construction technology (TBM method) and the introduction of modern reinforcement materials have made it possible to minimize adverse electromagnetic effects and vibroacoustic eddy current losses, especially in the context of high-speed line design.

Keywords rail transport, energy efficiency, tunnel construction (TBM), electromagnetic interference (EMI), stray currents, electric traction (AC/DC), fiber-reinforced concrete, pantograph sliding contact



WPROWADZENIE

W zelektryfikowanych szynowych trakcjach kolejowych na świecie pojazdy są zasilane napięciem stałym o znamionowej wartości 1,5 lub 3,0 kV albo prądem przemiennym o częstotliwości $16\frac{2}{3}$ lub 50 Hz. Znamionowe napięcie zasilające pojazdy prądu przemiennego wynosi odpowiednio: 15 i 25 kV lub 2×25 kV [1].

Charakterystyka systemów zasilania trakcji szynowej

Pierwotnie stosowano systemy DC na bazie elektrowni kolejowych z generatorami prądu stałego. Częstotliwość $16\frac{2}{3}$ Hz jest trzykrotnie niższa od 50 Hz stosowanych w większości trójfazowych systemów elektroenergetycznych na świecie. Oznacza to, że system kolejowy można było zasilic nie tylko z jednofazowych elektrowni kolejowych, ale też sprzęgając zespołem elektromaszynowym oba systemy. Od strony trójfazowej stosowano trójfazowy silnik synchroniczny, np. z jedną parą biegunów, a od strony kolejowej – prądnicę jednofazową z trzema parami biegunów. Dzięki mechanicznemu sprzęgnięciu obie maszyny wirowały z taką

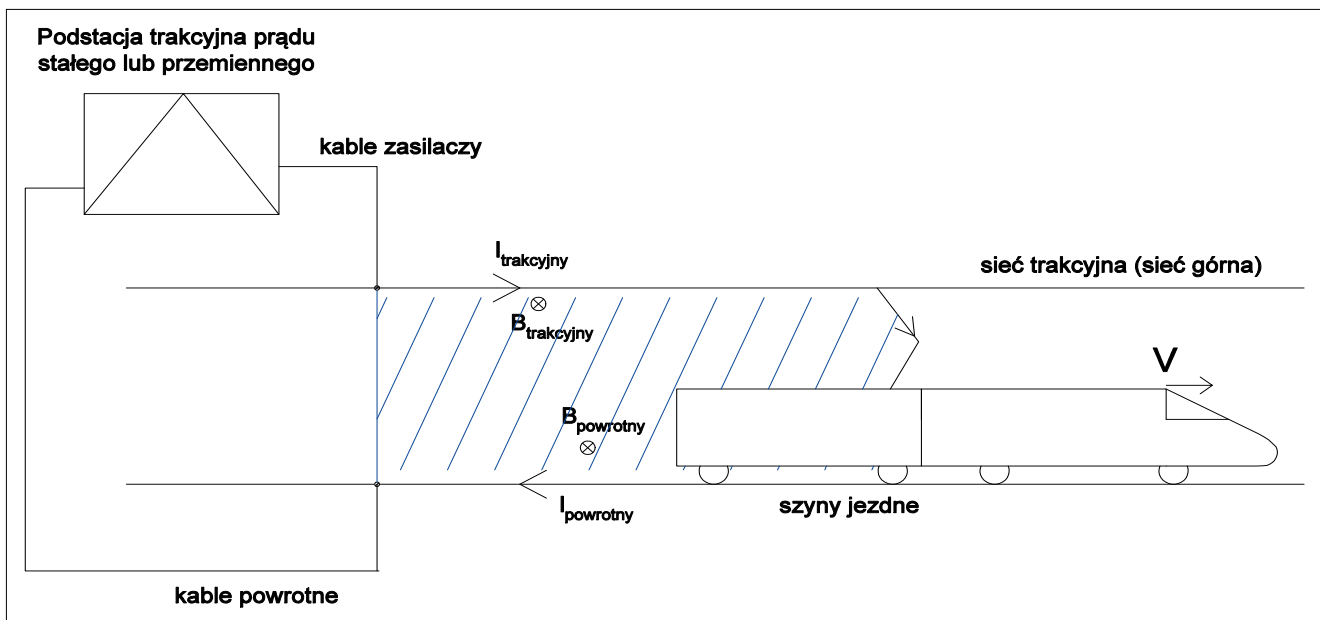
samą prędkością, dlatego na wyjściu z generatora uzyskiwano trzykrotnie mniejszą częstotliwość. Maszyna synchroniczna w krajowym systemie elektroenergetycznym służyła jako kompensator mocy biernej dzięki regulacji jej wzbudzenia.

Wyzwania techniczne przy zwiększaniu prędkości eksploatacyjnej

Badania nad zwiększeniem prędkości jazdy składów kolejowych przyczyniły się do opracowania transformacji trójfazowego napięcia przemiennego najwyższych napięć w jednofazowe napięcie o nominalnej wartości 25 kV. Zwiększenie prędkości składu szynowego wymaga dostarczenia większych mocy ze względu na rosnące wraz z prędkością opory ruchu pojazdu. Można podnosić pobór prądu z sieci 15 kV, ale wymaga to rozbudowy jednofazowych źródeł zasilania. W przypadku systemów DC podniesienie napięcia trakcyjnego powyżej 3 kV wymagałoby przebudowy zespołów transformatorowo-prostownikowych na podstacjach oraz dopasowania elementów izolacyjnych zawieszenia sieci trakcyjnej.

Maksymalny prąd zestyku ślizgowego przy prądzie stałym wynosi ok. 2,2–2,4 kA. W standardach technicznych PKP PLK *Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 250$ km/h* [2] podano nieco większe wartości dla pociągu, którego pantograf może być dwustykowy. Większe wartości prądu nie są zalecane ze względów termicznych występujących na styku ślizgacza pantografu z przewodem jezdnym nad pojazdem. Przy niskich prędkościach dochodzi do punktowego przegrzania i zmiany własności mechanicznych przewodu, co sprzyja jego zerwaniu. Przy maksymalnych prędkościach, kiedy zapotrzebowanie na energię jest największe, występują zjawiska mechaniczne związane z odskokami przewodu jezdnego od pantografu. W momentach odrywania powierzchni ślizgowej styku przewodu i pantografu pojawia się łuk elektryczny (przewodzenie wysokotemperaturowego prądu), który przepala materiały stykowe.

Ponadto prąd stały charakteryzuje się utrudnionym wyłączaniem (przerywaniem przepływu w obwodzie elektrycznym). Oznacza to konieczność stosowania



Rys. 1. Idea systemu trakcyjnego zelektryfikowanego poprzez podstację i sieć zasilającą pojazd oraz sieć powrotną (obszar zakreślony – cewka wytwarzająca pole magnetyczne pod wpływem prądu trakcyjnego)

fineznych rozwiązań aparatury łączeniowej, aby zapewnić normalną pracę systemu trakcyjnego DC oraz wyłączalność stanów awaryjnych, zwłaszcza selektywne i relatywnie szybkie wyłączanie niekorzystnych zwarć w obwodach trakcyjnych.

Prąd przemienny pod tym względem charakteryzuje się naturalnym przejściem przez zero i zmianą kierunku przepływu, czyli polaryzacji. To znacznie ułatwia proces wyłączania nawet prądu o dużej wartości występującego przy zwarciach.

Porównanie architektury sieci DC i AC

Geometria sieciowych systemów trakcyjnych DC oraz AC jest podobna. Zastępczy schemat kreskowy jest identyczny (rys. 1). Różne są rozwiązania źródła zasilania, nazywane podstacjami. Wzdłuż torowiska znajdują się słupy trakcyjne podtrzymujące zawieszoną nad torami sieć zasilającą (tzw. sieć górną) w postaci przewodu jezdny, a od spodu dotyka do niego pantograf zasilający napęd i potrzeby własne pojazdu. Szyny torowiska stanowią zasadniczy element obwodu trakcyjnego – sieci powrotnej. Stojące lub toczące się po szynach koła pojazdu stanowią odmianę styku ślizgowego dla

prądu trakcyjnego. Dzięki torowisku prąd pobrany przez pojazd z sieci górnej powraca do podstacji zasilającej [3].

Podstawowym materiałem przewodu jezdny w obu systemach zasilania jest miedź. W zależności od potrzeby (większa odporność na rozciąganie, wytrzymałość temperaturowa i odporność na ścieranie) miedź można domieszkować magnezem lub srebrem.

Kluczowym elementem pantografu stykającym się z przewodem jezdny jest nakładka ślizgowa. Niegdyś stosowano nakładki miedziane, jednak ze względu na utrudnioną mechaniczną współpracę tych samych materiałów (nakładka–przewód jezdny) i konieczność stosowania smaru zostały one wyparte przez nakładki węglowe.

Nakładki węglowe są spiekami węgla (grafitu) i miedzi z domieszkami cyny oraz antymonu. Węgiel ma dobre właściwości elektryczne (przewodność) i mechaniczne (ścieralność), co uzasadnia jego wybór jako głównego materiału nakładki stykowej. Dodatek miedzi natomiast zmniejsza rezystancję.

Torowisko składa się z dwóch szyn wykonanych ze stopów stali. Drogi szynowe mogą być jedno- i dwutorowe,

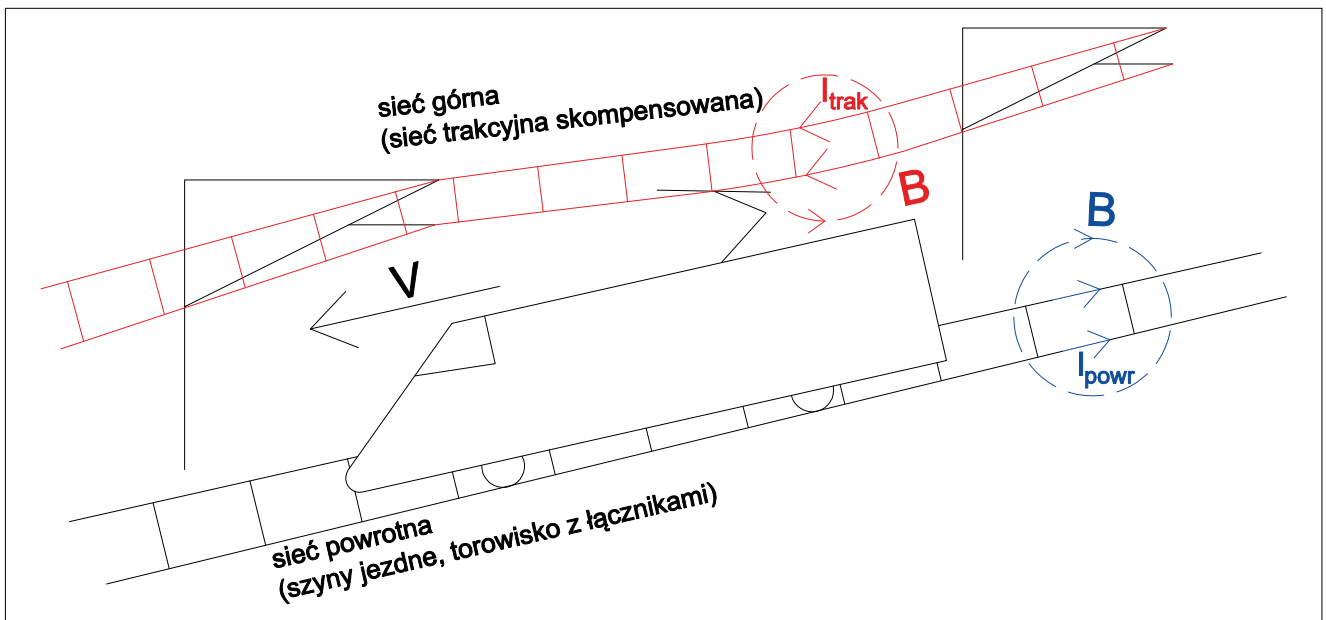
a na stacjach z bocznicami występują układy wielotorowe.

FIZYCZNE ZJAWISKA ELEKTRYCZNE W SYSTEMACH AC I DC

Oddziaływanie systemu trakcyjnego pojawia się wraz z podaniem napięcia na sieć, niezależnie od jego rodzaju. W obu przypadkach oznacza to spolaryzowanie sieci górnej względem szyn.

W systemach DC podanie napięcia wiąże się z krótkotrwałym ładowaniem pojemności występującej między siecią górną a torowiskiem. Po zaniku prądu ładowania płynie znacznie mniejszy prąd upływu. Oddziałują na niego przede wszystkim liczne punkty podparcia sieci (słupy i zawieszania rozmieszczone co 50–60 m), a w mniejszym stopniu – ulot ładunku elektrycznego do powietrza na odcinkach niez izolowanego przewodu pomiędzy zawieszzeniami.

Zjawiska te generują straty energii, których poziom zależy od warunków atmosferycznych – zwłaszcza wilgotności, temperatury punktu rosy i opadów. Pozostają one jednak na akceptowalnym poziomie. Zabrudzenie izolatorów pyłem zawieszonym w powietrzu zmniejsza rezystancję izolacji, co zwiększa prądy upływu



Rys. 2. Podczas przepływu prądu pobieranego przez pojazd (trakcyjnego) wokół sieci górnej (zasilającej) i sieci powrotnej pojawiają się pola magnetyczne o indukcji B i zwojach zgodnych w regułę Lenza

i stwarza zagrożenie porażeniowe dla obsługi oraz osób postronnych. Wymusza to szczególną dbałość o stan izolacji – gabaryty izolatorów zastosowanych w zawieszaniach sieci trakcyjnej zależą od jej napięcia znamionowego.

W systemach AC załączenie napięcia, oprócz procesów przejściowych typowych dla DC, wywołuje zjawisko opisywane przez $\tan \sigma$ – tangens kąta strat w dielektryku układu kondensatorowego zasilanego ze źródła prądu sinusoidalnego. Układ przewodu zasilającego i szyn tworzy bowiem kondensator zasilany prądem sinusoidalnym.

Podobnie jak w systemie prądu stałego zabrudzenie izolatorów zwiększa prąd upływu i jednocześnie zagrożenie porażeniowe. Wyższe napięcia znamionowe w systemach AC intensyfikują również zjawisko ulotu prądu z niez izolowanych przewodów jezdnych.

W systemie DC polaryzacja (np. dodatnia na sieci górnej i ujemna na powrocie) jest stała i wynika z rozwiązań konstrukcyjnych. W taborze klasycznym – z rozruchem oporowym silnika szeregowego – stały był również kierunek przepływu prądu na odcinkach zasilanych jednostronnie z podstacji sieci górnej.

W systemach AC polaryzacja zmienia się wraz z częstotliwością zasilania (16⅔ lub 50 Hz).

Obciążenia i spadki napięć

Systemy DC oraz AC 16⅔ Hz mogą pracować przy zasilaniu jedno- lub dwustronnym. Natomiast system AC 50 Hz jest zasilany tylko jednostronnie. W takim układzie odcinek sieci wydzielony izolatorami sekcyjnymi pobiera energię tylko z jednej podstacji trakcyjnej.

- sieci tramwajowe DC: od kilkuset metrów do niewiele ponad kilometra,
- sieci kolejowe DC: do kilku kilometrów,
- sieci kolejowe AC: do 80 km.

Przy zasilaniu dwustronnym (preferowanym na szlakach kolejowych) odległości między podstacjami wynoszą średnio 20 km dla systemu DC i do 60 km dla systemu AC. Struktura obu rozwiązań jest podobna: obejmuje podstację, sieć górną (zasilaną kablami wyprowadzonymi z rozdzielnic podstacji), tabor

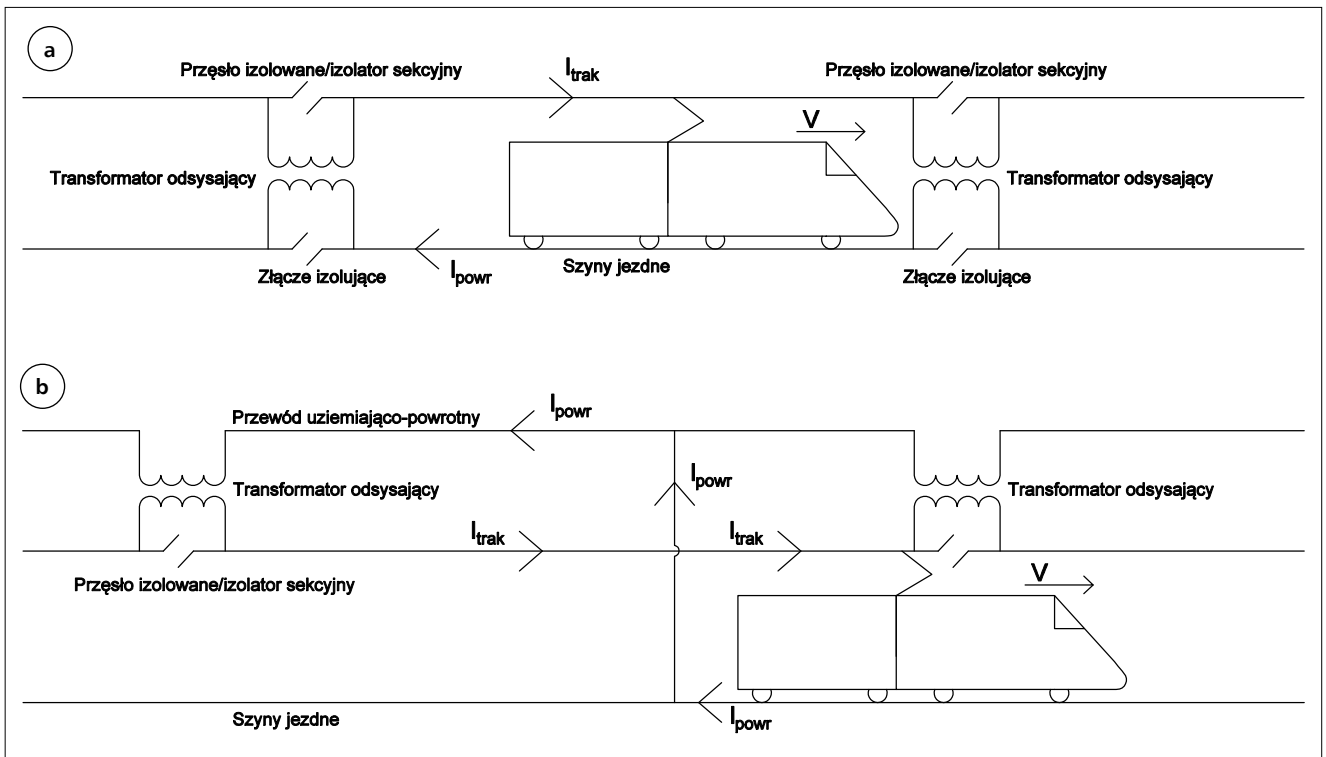
Zabrudzenie izolatorów zmniejsza rezystancję izolacji, co zwiększa prądy upływu i stwarza zagrożenie porażeniowe.

Podział sieci górnej na odcinki wynika z konieczności zapewnienia selektywności zabezpieczeń (głównie przeciwzwarciowych), a także ograniczenia spadków napięcia. Zasilanie dwustronne wymaga natomiast koordynacji zabezpieczeń przeciążeniowych oraz zwarciovych na obu współpracujących podstacjach.

Długość odcinków sieci jezdnej (górnej) zasilanych jednostronnie zależy od napięcia znamionowego:

oraz drogę szynową (rys. 1). W obu systemach są kable powrotne. Przekroje poprzeczne kabli zależą od projektowanego obciążenia i mocy taboru. Stąd w systemach AC przekroje te są mniejsze niż w DC, co przekłada się na mniejszą masę sieci górnej. Mimo tych różnic konstrukcje słupów trakcyjnych w obu systemach są zbliżone [3].

Niezależnie od rodzaju zasilania, szyny dobiera się pod kątem przewidywanego



Rys. 3. Układy zasilania w systemie prądu przemiennego AC z zastosowaniem transformatorów odsysających: a) w sieci powrotnej – w torowisku; b) w sieci powrotnej z przewodem uziemiająco-powrotnym

nacisku osi pojazdów. Przykładowo dla tramwajów wartość ta nie przekracza 100 kN (ok. 10 t) [4].

Masa pojazdu oraz jego dopuszczalna prędkość determinują siłę pociągową. W praktyce zależy ona od przyczepności kół, ich średnicy, przełożeń przekładni pomiędzy silnikiem a kołami na osi napędowej, a także liczby osi napędowych i liczby oraz mocy silników.

Przyspieszenie pojazdu jest wypadkową siły pojazdu. Największe zapotrzebowanie na energię występuje podczas rozruchu. Optymalną efektywność energetyczną uzyskuje się na trasie – przy minimalnej liczbie hamowań i przyspieszeń. To pozwala na uzyskanie średniej prędkości przejazdu odpowiadającej trzem fazom ruchu: przyspieszeniu, wybiegowi i hamowaniu na danym odcinku [3].

Przy dużych prędkościach (powyżej 250 km/h) potrzebna jest duża moc, aby pokonać opory ruchu narastające z kwadratem prędkości (opory aerodynamiczne). Opory tocznienia na łukach

oraz w tunelu nie są kwadratową funkcją prędkości. W systemach DC ograniczeniem dostarczanej mocy na pantografie pojazdu jest maksymalny prąd na styku odbieraka z przewodem jezdny, wynoszący ok. 2 kA. Moc dostarczana do pojazdu osiąga ok. 6 MW i zależy od spadków napięcia uwarunkowanych temperaturą oraz zużyciem przewodów i szyn. Zużycie szyn w sieci powrotnej oraz ich temperatura również mają wpływ na spadki napięcia zasilającego oraz straty zasilania.

W systemach AC prąd jest proporcjonalnie mniejszy dzięki wyższemu napięciu znamionowemu. Zgodnie z normą PN-EN 50388-1:2023 [5] ograniczenia prądu wynoszą 1 kA przy 25 kV oraz 1,5 kA przy 15 kV. Pozwala to na dostarczenie mocy rzędu 22,5 MVA w sieci 16⅔ Hz i 25 MVA w sieci 50 Hz. W sieci AC także występują spadki napięcia, zależne od zużycia sieci górnej i powrotnej oraz ich temperatury.

Pojawienie się pojazdu na odcinku zasilania zmienia oddziaływanie sys-

temu. Podczas jazdy wybiegiem skład pobiera energię na potrzeby własne (od kilku do kilkunastu procent mocy trakcyjnej). Pobierany z sieci zasilającej prąd natychmiast wywołuje spadki napięcia w sieci zasilającej i powrotnej. Przepływ prądu obciążenia generuje wokół sieci zasilającej oraz powrotnej pola magnetyczne o indukcji B i zwrotach zgodnych z regułą Lenza (rys. 2).

Kontur (rys. 1) tworzony przez sieć górną, szyny, podstację i pojazd (obciążenie) działa jak cewka jednozwojna dająca strumień magnetyczny zależny od indukcji B oraz powierzchni tego konturu. Zmiana położenia pojazdu przy stałej wartości prądu powoduje rotacyjną modyfikację strumienia magnetycznego (w obu systemach). W systemie AC występuje dodatkowo strumień transformacji wynikający z częstotliwości prądu. Nie ma go w systemie DC ze względu na stały kierunek przepływu prądu i relatywnie małe zmiany jego wartości w czasie. Pobór prądu trakcyjnego – przyspieszającego ruch pociągu – przez skład

Rys. autorów

pojawiający się na odcinku zasilania zwiększa wartości natężenia pola magnetycznego i strumienia. Pomimo znacznie większych wartości prądu w systemach DC zjawiska oddziaływania magnetycznego są istotnie słabsze i na otwartej przestrzeni ich poziom jest akceptowalny technicznie. W układach AC (zwłaszcza: 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz oraz 25 kV 50 Hz) strumienie te mogą osiągać poziomy technicznie nieakceptowalny bez zastosowania dodatkowych rozwiązań (rys. 3a–b).

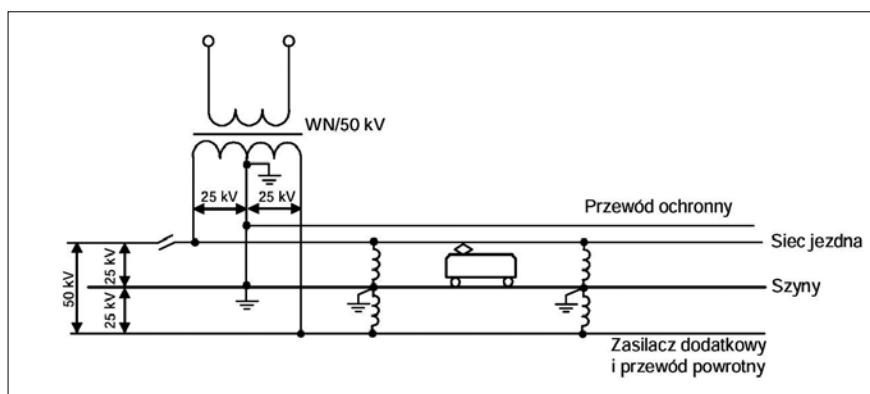
Pomiary oddziaływania elektromagnetycznego na infrastrukturę podziemną

W ramach Monitoringu Prądów Błądzących [6] w warszawskim metrze odnotowano charakterystyczne skoki (piki) spadków napięcia (T) na podziemnych konstrukcjach stacji i tuneli. Pomiary te realizuje się za pomocą jednożyłowych przewodów teletechnicznych prowadzonych po ścianach (także w ekranach), łączących magistralę uziemiającą z miliwoltowym układem rejestrującym [6]. Biegają one na odcinkach o długości od kilkudziesięciu do maksymalnie stu kilkudziesięciu metrów (porównywalnej z długością składu metra).

W warszawskim metrze odnotowano charakterystyczne spadki napięcia na podziemnych konstrukcjach stacji i tuneli.

Podczas rozruchu pociągów typu klasycznego (z wałem kułakowym jako opornikiem rozruchowym [7]) występują gwałtowne zmiany wartości chwilowych T (piki). Zależą one w znacznym stopniu od ułożenia przewodów pomiarowych i usytuowania szafki na ścianie konstrukcji względem torów metra.

Należy unikać prowadzenia pojedynczego przewodu w korytkach po drugiej stronie tunelu, na którym mierzony jest spadek napięcia T – przeliczany na prąd w konstrukcji po wyznaczeniu rezystancji wzdłużnej od-



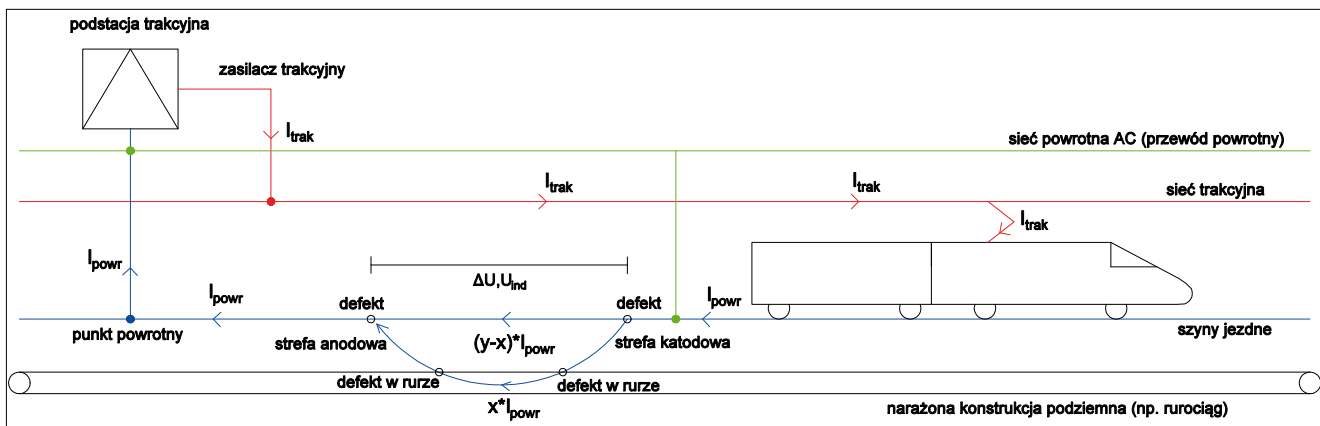
Rys. 4. Schemat zasilania w systemie AC 2 x 25 kV [9]

cinka, na którym rejestruje się spadek napięcia. Uzyskane pole powierzchni równoległej do płaszczyzn wyznaczonych przez powierzchnie ślizgowe główek szynowych torowiska jest wówczas maksymalne. Relatywnie nieznaczne stromości narastania prądu trakcyjnego przy klasycznym rozruchu – kilkanaście do kilkudziesięciu amperów na milisekundę – powodują na powierzchni ok. 40–50 m² indukowanie napięć przekraczających miliwoltowe zakresy przetworników pomiarowych. Przy zasilaniu dwustronnym torów szlakowych w metrze przejazd składu przez odcinek pomiarowy objawia się

Autorzy nie mają takich doświadczeń z eksploatacji systemów AC na 15 kV 16 $\frac{2}{3}$ Hz i 25 kV 50 Hz, jednak z literatury wynika, że w celu zmniejszenia transformatorowego oddziaływania konturu z rys. 1, utworzonego z sieci górnej, składu, torowiska i podstacji zasilającej, stosuje się transformatory odsysające (ang. booster transformers, BT), które wymuszają powrót prądu z szyn do przewodu uziemiająco-powrotnego [8]. Typowy odstęp między BT wynosił ok. 3 km (rys. 3a). Tym samym dążono do zminimalizowania powierzchni konturu pola magnetycznego strumienia transformacji.

Rozwiązanie to ma jednak wady. Ponieważ jedno z uzwojeń transformatora jest włączane bezpośrednio do sieci trakcyjnej, istnieje konieczność jego izolacji za pomocą specjalnych przeseł lub izolatorów sekcyjnych, które ograniczają prędkość przejazdu pociągów (rys. 3b). Oprócz tego transformator, ze względu na swoją konstrukcję, wprowadza dodatkową impedancję na drodze przepływu prądu trakcyjnego, pogarszając efektywność zasilania.

W wyniku poszukiwania rozwiązania pozbawionego wad stosowania transformatorów BT opracowano system 2 x 25 kV z dodatkowym przewodnikiem powrotnego prądu trakcyjnego – zasilaczem (ang. negative feeder) o potencjale -25 kV względem szyn jezdnych (rys. 4), co daje wypadkową różnicę potencjałów pomiędzy siecią trakcyjną a dodatkowym zasilaczem



Rys. 5. Idea generowania prądów korozyjnych w podziemnych konstrukcjach metalowych od systemu DC – kolor niebieski i AC – kolor zielony (wycinek pomiędzy transformatorami odsysającymi lub autotransformatorami)

na poziomie 50 kV. Punkt zasilania sieci stanowi podstacja trakcyjna zasilana z poziomu najwyższych albo wysokich napięć energetyki zawodowej. Znajdują się w niej transformatory trakcyjne o dwóch uzwojeniach wtórnych; koniec jednego uzwojenia jest podłączony do sieci trakcyjnej, a drugi – do dodatkowego zasilacza, natomiast ich punkt środkowy – do obwodu powrotnego i uziemiony. Na linii kolejowej co ok. 10–15 km rozmieszczone są autotransformatory (AT) włączone do sieci trakcyjnej,

W systemie DC stany nieustalone poboru prądu trakcyjnego słabo oddziałują na otoczenie i mogą być pomijane. Zastosowanie układów przekształtnikowych i falowników w napędach pojazdów zasilanych z sieci DC ujawniło jednak wiele negatywnych zjawisk z zakresu kompatybilności elektromagnetycznej (EMC), w tym zaburzeń przewodzonych.

Nowe konstrukcje podlegają regułom projektowym uwzględniającym minimalizację generowania zaburzeń przewodzonych oraz emitowanych przez te obwody. Nadal

w ziemi występuje duża odległość – a co za tym idzie znaczna rezystancja szyn przy lokalnie słabej izolacji – znaczący spadek napięcia (rzędu pojedynczych woltów) wywołany prądem trakcyjnym powoduje przepływ prądu w otoczeniu szyn. Ponieważ w ziemi prąd płynie ścieżkami o najmniejszej rezystancji, których dokładne określenie jest trudne, prąd upływający z szyn trakcji DC nazywa się błędzącym (wędrującym). Zjawisko to jest przyczyną korozji elektrochemicznej podziemnych konstrukcji metalowych, a rzadziej uszkodzeń przytwierdzeń szyn do podłoża. Z tego powodu w normie PN-EN 50122-2:2023 [11] określono wymagania dotyczące jednostkowej konduktancji przejścia szyna–ziemia dla pojedynczego toru w zależności od typu zabudowy szyn. Norma ta wymusza zapewnienie odpowiedniego poziomu izolacji torowiska.

Korozyjne oddziaływanie prądu DC jest znane od lat, a kryteria oceny zagrożenia mają charakter potencjałowy. W przypadku prądu AC do drugiej połowy lat 70. XX w. dominowało przekonanie, że nie wywołuje on zjawisk korozyjnych na poziomie technicznie nieakceptowalnym. Dopiero przypadek oddziaływania sieci AC 15 kV 16 2/3 Hz na rurociąg w izolacji z tworzywa sztucznego, ułożony równoległe do torowiska, zainicjował badania i zmianę poglądów. Zgodnie z normą PN-EN 15280:2013 [12] procesy korozyjne od prądu przemianowego ujawniają się, gdy gęstość prądu AC przekracza 30 A/m². Tak wysoka gęstość

W systemie DC stany nieustalone poboru prądu trakcyjnego słabo oddziałują na otoczenie i mogą być pomijane.

obwodu powrotnego oraz dodatkowego zasilacza w identyczny sposób jak transformatory na podstacjach.

Pociąg pobierający prąd na odcinku pomiędzy sąsiednimi autotransformatorami pobiera część energii bezpośrednio z podstacji za pośrednictwem dodatkowego zasilacza i sieci trakcyjnej (na odcinku od podstacji do autotransformatorów, pomiędzy którymi się znajduje) oraz część z samej sieci trakcyjnej (na odcinku między sąsiednimi jednostkami AT). Ze względu na bliskie ułożenie dodatkowego zasilacza i sieci trakcyjnej następuje ograniczenie zakłóceń elektromagnetycznych na odcinku, na którym prąd płynie tymi przewodami [8, 9].

najpopularniejsze jest ograniczanie poziomu emisji zaburzeń elektromagnetycznych poprzez filtry i ekrany. Nawet nowoczesne napędy pojazdów trakcyjnych w sieci DC nie wyeliminowały zjawiska, które pojawia się wraz z prądem trakcyjnym w sieci powrotnej. Prąd płynący w szynach, zgodnie z prawem Ohma, wywołuje w nich spadek napięcia. W publikacji [10] opisano mechanizm generowania prądów upływu z szyn. Generalnie dotyczy to obwodów DC, jednakże spadek napięcia w szynach może również występować w systemach AC.

Na rys. 5 pokazano schematycznie zjawisko prądów błędzących (kolor niebieski). Jeżeli pomiędzy defektami izolacji szyn od

pojawia się przy dużych napięciach między defektami o relatywnie małej powierzchni. Należy zaznaczyć, że powierzchnia defektu nie decyduje o rezystancji jego przejścia.

Systemy AC mogą oddziaływać na podziemne konstrukcje metalowe zależnie od rozwiązania technicznego (rys. 5 – kolor zielony) na odcinkach pomiędzy transformatorami BT (rys. 3 a–b) lub autotransformatorami AT (rys. 4). W praktyce na takim odcinku prąd pobierany przez pociąg płynie przez szyny w obie strony. Defekty oddziałujące konduktancyjnie na podziemną konstrukcję muszą się znajdować pomiędzy punktami przyłączenia zacisków tych urządzeń. System AC wykazuje także oddziaływanie indukcyjne, które wzbudza w podziemnej konstrukcji siłę elektromotoryczną. Na defektach konstrukcji poprzez elektrolit glebowy pojawia się prąd przemienny, mogący wywołać korozję prądu przemiennopiętrową [13, 14]. Ze względu na różnice w długościach odcinków między kablami powrotnymi w systemie DC (ok. 20 km) a punktami przyłączenia transformatorów BT (ok. 3 km) lub AT (ok. 10 km) w systemie AC, czas oddziaływania korozyjnego na poszczególnych odcinkach jest różny, nawet przy takich samych prędkościach przejazdu (do 200 km/h).

Tunele kolejowe

Warunki geologiczne w Polsce sprzyjają budowie tuneli metodą TBM (Tunnel Boring Machine), czyli drążenia maszyną wiertniczą. Mimo nakładów inwestycyjnych metoda ta często okazuje się najkorzystniejsza ekonomicznie po uwzględnieniu całkowitych kosztów inwestycji i utrudnień w infrastrukturze miejskiej [15].

Maszyna drążąca otwór w gruncie wypełnia przestrzeń segmentami tubingowymi, które tworzą kolejne pierścienie obudowy. W pierwszej linii metra, w centralnych dzielnicach Warszawy, stosowano segmenty żeliwne.

Tunele drugiej linii powstały z segmentów żelbetowych z klasycznym zbrojeniem prętowym. Na końcowym odcinku budowy rozważano zastosowanie tubingów żelbetowych ze zbrojeniem rozproszonym

w postaci stalowych włókien o średnicy 1 mm i długości do 2 cm.

PODSUMOWANIE I WNIOSKI

W budowie płyt torowych dla torowisk zabudowanych coraz częściej stosuje się zbrojenie z prętów kompozytowych lub zbrojenie rozproszone w postaci włókien polimerowych dodawanych do betonu. Można przewidywać, że takie rozwiązanie pojawi się wkrótce również w segmentach tubingowych przeznaczonych do tuneli drążonych metodą TBM.

Norma PN-EN 50122-2:2023 [11], dotycząca systemów DC, zawiera załącznik nakładający obowiązek weryfikacji obliczeniowej spadku napięcia na konstrukcji podziemnej między podstacjami trakcyjnymi zasilającymi torowisko w tunelu. Klasyczne zbrojenie stalowe oraz wyprowadzone do wnętrza marki (płytki zwarte z prętami zbrojeniowymi) pozwalają zmniejszyć rezystancję wzdłużną konstrukcji. Dzięki temu można zredukować nakłady na dodatkowe prace związane z układaniem wzdłużnych prętów pod torowiskiem, co jest konieczne do zredukowania rezystancji wzdłużnej i dopasowania systemu do projektowanych obciążeń.

W przypadku systemów AC, ze względu na indukcyjne oddziaływanie sieci trakcyjnej, proponuje się stosowanie tubingów ze stalowym zbrojeniem rozproszonym lub zbrojeniem z tworzyw sztucznych. Rozwiązanie to minimalizuje indukowanie sił elektromotorycznych (transformacji i rotacji) wywołanych przepływem prądu trakcyjnego wewnątrz konstrukcji. Brak ciągłości elektrycznej zbrojenia rozproszonego (duża rezystancja ścieżek przewodzących) ograniczy straty energii w pierścieniach tubingowych. Zastosowanie zbrojenia polimerowego całkowicie wyeliminuje przypadkowe ścieżki prądowe, które mogą powstawać w procesie produkcji segmentów rozproszonych z żelazem. Kwestią wymagającą weryfikacji pozostają jedynie stany awaryjne detekcji zwarcia sieci zasilającej i powrotnej.

Ze względu na warunki klimatyczne panujące w tunelach niezależnie od ich konstrukcji zjawiska związane z podaniem

napięcia na sieć są znacznie ograniczone, ponieważ wilgotność zmienia się w niewielkim zakresie i nie występują opady atmosferyczne. ■

Literatura

- [1] PN-EN 50163:2006 Zastosowania kolejowe – Napięcia zasilania systemów trakcyjnych.
- [2] PKP Polskie Linie Kolejowe S.A., *Standardy Techniczne – Szczegółowe warunki techniczne dla modernizacji lub budowy linii kolejowych do prędkości $V_{max} \leq 250$ km/h*, Warszawa, 2021.
- [3] Szeląg A., *Trakcja elektryczna – podstawy*, Warszawa: Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2019.
- [4] Rozporządzenie Ministra Infrastruktury z dnia 2 marca 2011 r. w sprawie warunków technicznych, jakim powinny odpowiadać obiekty budowlane metra i ich usytuowanie (Dz.U. z 2011 r. nr 65 poz. 344).
- [5] PN-EN 50388-1:2023 Zastosowania Kolejowe – Urządzenia stacyjne i tabor – Warunki techniczne koordynacji pomiędzy systemem zasilania trakcji elektrycznej i taborem w celu osiągnięcia interoperacyjności – Cz. 1: Postanowienia ogólne.
- [6] Dąbrowski J., „Ewolucje systemu rejestracji i monitoringu prądów błądzących w metrze warszawskim” w: *Prace Instytutu Elektrotechniki*, t. 64, nr 277, 2017, s. 5–31.
- [7] „Seria 81”, [dostęp: 15.02.2026], w: Wikipedia, wolna encyklopedia, https://pl.wikipedia.org/wiki/Seria_81.
- [8] Keenor G., *Overhead line electrification for railways*, London: Permanent Way Institution, 2022.
- [9] Rojek A., Majewski W., „Zasilanie linii kolejowych dużych prędkości” w: *VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna i-MITEL 2012*, Zielona Góra: Uniwersytet Zielonogórski, 2012.
- [10] Dąbrowski J., „Zjawisko prądów błądzących w przypadku torowiska niezabudowanego” w: *Biuletyn Komunikacji Miejskiej BKM*, nr 174 s. 63–74.
- [11] PN-EN 50122-2:2023 Zastosowania kolejowe – Urządzenia stacyjne – Bezpieczeństwo elektryczne, uzimianie i sieć powrotna – Część 2: Środki ochrony przed skutkami prądów błądzących wywołanych przez układy trakcji prądu stałego.
- [12] PN-EN 15280:2013 Ocena prawdopodobieństwa wystąpienia korozji rurociągów ułożonych w ziemi wywołanej prądem przemiennym – Zastosowanie do rurociągów chronionych katodowo.
- [13] PN-EN 50443:2012 Skutki zakłóceń elektromagnetycznych w rurociągach wywołane oddziaływaniem wysokonapięciowych systemów kolejowej trakcji elektrycznej prądu przemiennego i/lub wysokonapięciowych systemów zasilania prądu przemiennego.
- [14] PN-ISO 18086:2021 Korozja metali i stopów – Wyznaczanie korozji wywołanej prądem przemiennym – Kryteria ochrony.
- [15] „Materiały konferencyjne dotyczące technologii TBM w budowie tuneli”, Warszawa, 8 marca 2020.