

KOLEJOWE OBSZARY STYKOWE SYSTEMÓW 25 KV AC I 3 KV DC - WYBRANE ZAGADNIENIA¹

Marek Patoka

mgr inż., Zakład Trakcji Elektrycznej Instytut Maszyn Elektrycznych, Politechnika Warszawska, Pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, e-mail: marek.patoka@ee.pw.edu.pl

Adam Szelaǳ

dr hab. inż., prof. PW, Zakład Trakcji Elektrycznej Instytut Maszyn Elektrycznych, Politechnika Warszawska, Pl. Politechniki 1, 00-661 Warszawa, e-mail: adam.szelaǳ@ee.pw.edu.pl

Streszczenie. *W artykule przedstawiono przegląd zagadnień i wniosków z prac dotyczących obszarów stykowych linii kolejowych zelektryfikowanych dwoma różnymi systemami zasilania. Takie obszary mogą wystąpić w przyszłości na sieci kolei PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. przy wprowadzaniu dotychczas niestosowanego w Polsce systemu 25 kV 50 Hz. Przedstawiono złożoność zagadnienia i zdefiniowano podstawowe problemy związane z zasilaniem w dwu różnych systemach zasilania trakcji 3 kV DC i 25 kV 50 Hz ze wspólnego węzła sieci elektroenergetycznej. Wskazano na konieczność prowadzenia szczegółowych analiz oddziaływań wzajemnych linii obu systemów jak i na otoczenie techniczne, tak w obszarach zasilania elektroenergetycznego, jak i toru kolejowego i sieci trakcyjnej.*

Słowa kluczowe: *obszary stykowe AC DC, 25 kV, układ zasilania trakcji, oddziaływanie*

1. Wstęp

Problemy obszarów stykowych różnych systemów trakcji elektrycznej [7,17] są złożone [2,4,5,6,12,13,14,23,24] i dotychczas w Polsce praktycznie nieznanne, ze względu na obecnie stosowanie napięcia DC do zasilania trakcyjnego. Wstępne rozpoznanie tego zagadnienia było podjęte w pracach przygotowawczych zleczanych przez PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. dotyczących pilotażowego odcinka systemu zasilania 25 kV 50 Hz [9,25,27,28] oraz Studium budowy Kolei Dużych Prędkości [15]. Istotne jest jednak prowadzenie bardziej zaawansowanych prac badawczo - rozwojowych w celu rozpoznania możliwych do wystąpienia zjawisk i zaburzeń w tych obszarach. Oddzielne i niezależne podejście do analiz oddziaływań powodowanych przez zelektryfikowane linie kolejowe (ZLK) AC czy DC (tzn. przez niezależną analizę zjawisk powodowanych przez wydzielony jeden system w obszarach stykowych dwóch systemów), okazuje się niewystarczająco dokładne. Wynika to z możliwości pominięcia szeregu istotnych zjawisk, które mogą wystąpić nawet w późniejszym etapie eksploatacji (np. po zastąpieniu dotychczas użyt-

¹ Wkład autorów w publikację: Patoka M.: 70%, Szelaǳ A.: 30%

kowanych lokomotyw czy podsystemów, nowymi lub przy pogorszeniu jakości energii elektrycznej w zasilającym systemie elektroenergetycznym) [1,4,10,11,12,13,16,18,19,20,21,22,29]. Związane jest to także z innym rozwiązaniem, tak zasilania sieci trakcyjnej (szczególnie w wariancie z systemem 2x25 kV 50 Hz, gdzie stosowane są 2 przewody zasilające), jak i rozwiązania sieci powrotnej, która w systemie 3 kV DC nie jest w warunkach normalnych celowo uziemiana (ze względu na upływ prądów błędzących), a w systemie 25 kV 50 Hz jest celowo uziemiona i tworzy tzw. system uziemiająco-powrotny. Dlatego wskazane jest rozpatrywanie szeroko pojętych obszarów stykowych obu systemów, jako całości - we wszystkich aspektach dotyczących różnorodnych zagadnień, nie tylko infrastruktury kolejowej.

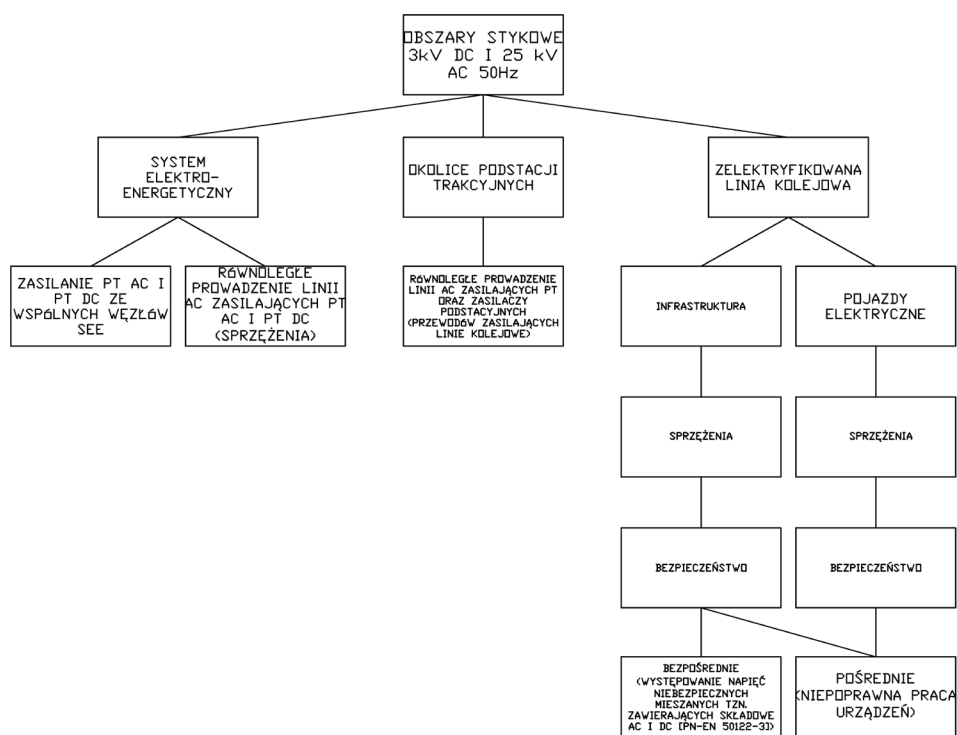
2. Oddziaływania międzysystemowe 25 kV AC i 3 kV DC

Oddziaływania między systemami zelektryfikowanych linii kolejowych (ZLK) o różnych rodzajach napięcia mogą występować nie tylko po stronie toru kolejowego i sieci trakcyjnych, ale również w zasilającym podstacje systemie elektroenergetycznym (SEE) - rys. 1). Jednym z bardziej istotnych zjawisk występujących przy oddziaływaniu podstacji trakcyjnych prądu przemiennego (PT AC) i prądu stałego (PT DC) na SEE w przypadku zasilania PT z jednego węzła SEE jest powstanie oddziaływań wpływających na jakość energii elektrycznej zasilającej daną PT [1], co w rezultacie wpływa również na jakość energii dostarczanej do sieci trakcyjnej [16,18,19,21].

Oddziaływanie PT AC

Ze względu na charakterystyczne dla PT AC nierównomierne obciążenie faz w SEE wywoła wystąpienie asymetrii napięciowej, co przy zasilaniu PT DC z tego samego węzła co PT AC spowoduje, że napięcie dostarczone do zespołu prostownikowego w PT DC będzie niesymetryczne [1]. Z kolei asymetria napięcia zasilającego będzie źródłem dodatkowych harmonicznych tzw. niecharakterystycznych w napięciu wyjściowym PT DC [21] oraz w prądzie fazowym AC zasilającym PT DC.

Dodatkowym zagadnieniem są wszelkie oddziaływania wzajemne linii AC zasilających PT, bądź oddziaływanie tych linii z kablami zasilaczy trakcyjnych. Równoległe prowadzenie linii elektroenergetycznych zasilających PT może powodować powstawanie sprzężeń indukcyjnych oraz pojemnościowych. Powstawanie sprzężeń jest silnie związane z istnieniem sygnałów zmiennych w czasie, stąd wymagane jest przede wszystkim uwzględnienie zjawisk, jakie linie AC wywołają w liniach DC.



Rys. 1. Wskazanie problemów mogących występować w obszarach styku systemów kolejowych zelektryfikowanych napięciem AC i DC

Oddziaływanie PT DC

W układach z prostownikami, w napięciu wyjściowym DC w stanach ustalonych, oprócz składowej stałej, o wymaganej wartości średniej, występuje również składowa przemienna [19,20,21], która również może być przyczyną powstawania napięć indukowanych w liniach AC. Ze względu na relatywnie małe amplitudy i wartości skuteczne pulsacji na obwód napięcia w sieci trakcyjnej DC, wpływ sprzężeń systemów DC do AC jest pomijalnie mały [12], ale przy oddziaływaniu na obwody słaboprądowe sygnalizacji, sterowania i przesyłu informacji może być znaczący (np. na obwody torowe) [1,18]. Wszelkie zmiany prądu w czasie odpowiadają za zjawisko indukcji elektromagnetycznej, stąd w stanach przejściowych (np. zwarcia) [26] proces indukowania się napięć ze strony DC może być zauważalny.

Odształcenia w prądzie zasilającym PT DC powodują odształcenia napięcia wyjściowego w zasilającym SEE, które w związku z tym mogą być obserwowane również w prądzie i napięciu wejściowym PT AC oraz w sieci zasilającej i powrotnej ZLK AC (szczególnie przy zasilaniu podstacji trakcyjnych z węzła AC o niskiej mocy zwarciowej). Szczegółowe analizy dotyczące zakłóceń w obszarach stykowych systemów 25 kV AC i 3 kV DC wynikających z zasilania ze wspólnego węzła SEE zawarto w [4,10,11,13,16,19,23].

3. Analiza negatywnych oddziaływań systemów kolejowych AC i DC związanych tworzeniem obszaru stykowego po stronie ZLK

Oddziaływania po stronie ZLK są również złożone, a ich poziom zależy od rodzaju i sposobu zasilania PT AC i DC z SEE jak i konfiguracji linii stykowych. W przypadkach bardziej skomplikowanych obszarów stykowych systemów trakcyjnych tzn. występowania nie tylko blisko prowadzonych ZLK, ale również zasilania PT z tego samego GPZ, zjawiska obecne po stronie ZLK mogą się nasilać. Jest to powodowane występowaniem większej liczby harmonicznych w sieci trakcyjnej ZLK AC i DC [21]. Praca dwóch występujących w bliskiej strefie ZLK PT o innych parametrach elektryfikacji (AC i DC) może objawiać się powstawaniem zakłóceń wynikających ze sprzężeń międzysystemowych. Istnieją różne możliwe warianty sprzęgania się systemów. Norma [12] wprowadza wskazówki dotyczące sprzężeń warunkujące wpływ na kompatybilną pracę funkcjonujących w strefie wspólnego oddziaływania układów kolejowych.

Jeżeli odległość pracy elementów infrastruktury dwóch ZLK jest większa niż 50 m, zakłada się jako główne zagrożenie bezpieczeństwo człowieka, powodowane powstawaniem napięć o składowych AC i DC (zwiększone ryzyko porażenia prądem).

Jeżeli ZLK AC i DC rozmieszcza się w odległości mniejszej niż 50 m [12], to należy przyjąć, że oprócz zjawisk występujących dla odległości większych niż 50 m będzie istnieć interakcja międzysystemowa, powodująca, że: m.in. elementy obwodu jednego systemu (transformatory, autotransformatory, transformatory odysające) mogą stanowić drogę powrotną dla prądu pojazdów drugiego systemu, a stany awaryjne w systemie AC (zwarcia), mogą spowodować powstanie przepięć w systemach DC [26] prowadzących do zadziałania ograniczników przepięć, bez wystąpienia stanów awaryjnych po stronie DC.

Oddziaływania międzysystemowe w strefie większej niż 50 m

Oddziaływania w strefach o odległościach międzysystemowych powyżej 50 m dotyczą przede wszystkim wpływu ZLK AC na DC. W przypadku, gdy zaistnieje możliwość sprzężenia galwanicznego, to powstałe w ZLK AC skutki, dla rozpatrywanych odległości, są niewielkie [12]. Wpływ ZLK AC na DC jest znaczący i nie jest do pominięcia. Przyjmując najbardziej krytyczny wariant występowania napięć mieszanych w obwodach powrotnych, należy poddać analizie przypadek, w którym w systemie DC występuje maksymalne, bezpieczne, długotrwałe napięcie szyna - ziemia, wynoszące 120 V DC [12]. Dodatkowo, wskutek indukowania się napięcia z systemu AC wprowadzane jest długotrwałe napięcie bezpieczne AC, które przy obecności napięcia DC równego 120 V wynosi 35 V. Norma [12] wskazuje metodę wyznaczania bezpiecznych odległości międzysystemowych dla wyżej opisanego przypadku, uwzględniając najważniejsze parametry dla sprzężeń indukcyjnych. Parametrami tymi są tu: określenie liczby elementów przewodowych prądu powrotnego w systemie AC (szyny, szyny i przewody powrotne), wartość prądu w sieci trakcyjnej AC, rezystywność gruntu, częstotliwość systemu AC, długość równoległości ZLK AC i DC, odległość ZLK AC i DC, obecność autotransforma-

torów bądź transformatorów odsysających (gdy są stosowane) oraz stopień urbanizacji terenu.

Oddziaływania międzysystemowe w strefie mniejszej niż 50 m

Opisane powyżej negatywne oddziaływania międzysystemowe w przypadku odległości mniejszych niż 50 m będą się nasilać. Oprócz tego, że w ZLK DC będą pojawiać się składowe przemienne napięcia, to występujące w sieci trakcyjnej i szynach ZLK DC wyższe harmoniczne mogą być zauważalne w postaci napięć indukowanych w ZLK AC i obwodach słaboprądowych systemu DC. Prądy wyższych harmonicznych nie są jednak duże, lecz ze względu na relatywnie duże częstotliwości oraz małe odległości międzysystemowe, prawdopodobne jest powstawanie sprzężeń. W praktyce, mimo powyższego, są one pomijalnie małe [12] dla systemu zasilania trakcyjnego AC. Istotnym zjawiskiem w bliskich obszarach międzystykowych są sprzężenia galwaniczne, w których prąd trakcyjny jednego systemu przepływa przez ziemię do sąsiedniego systemu. Mimo tego, że szyny kolejowe w systemach DC są teoretycznie odseparowane od ziemi, to w praktyce separacja ta jest określona przez minimalną konduktancję przejścia szyny - ziemia. W przypadku złego stanu szyn, zanieczyszczeń podtorza, konduktancja przejścia szyny - ziemia, nawet w pierwotnie bardzo dobrze separowanym obwodzie, staje się mniejsza. Realne są zatem sytuacje sprzężeń przewodzonych między ZLK AC i DC powodowanych występowaniem prądów błędzących.

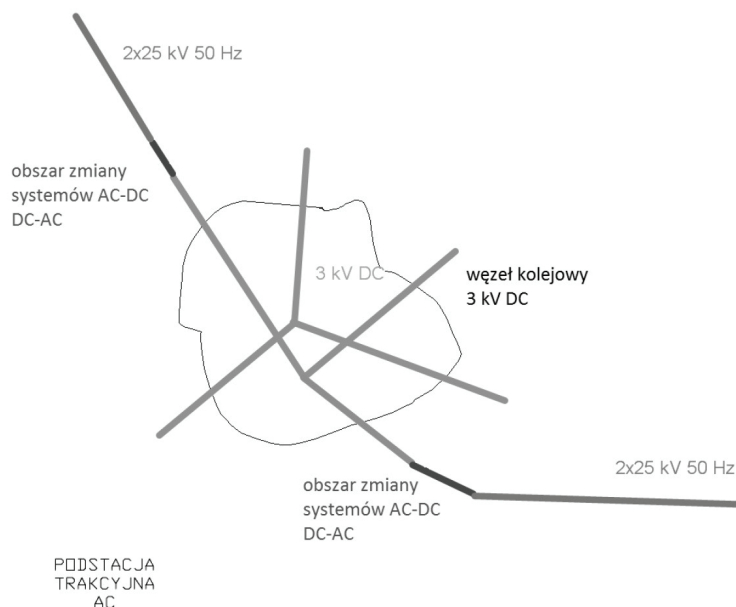
W warunkach bliskiej pracy ZLK AC i DC, należy zapewnić względnie niską rezystywność gruntu, co umożliwi przepływ ewentualnych prądów powrotnych lub prądów błędzących (w zależności od układu) w ziemi stosunkowo bliskiej dla danej ZLK. W przypadku dużych rezystywności gruntu, zewnętrzny ('obcy'), sąsiadujący system może stanowić „bocznikowanie” ziemi, przez co istnieje większe prawdopodobieństwo wpłynięcia prądów zakłócającego system do szyn systemu sąsiedniego. Duża rezystywność gruntu miałaby pozytywny wpływ na wartość upływu prądów błędzących w systemach DC (zmniejszenie), ale niestety negatywny w przypadku zwarć doziemnych (trudno wykrywalne niskie prądy zwarcia doziemnego). Dlatego w obszarach stykowych dwóch systemów wskazane jest zapewnienie możliwie dużej konduktancji przejścia szyny DC - ziemia, przy ograniczeniu do odpowiednio bezpiecznego poziomu napięć krokowych oraz możliwie małej (o ile to możliwe) rezystywności gruntu.

4. Wprowadzenie linii kolejowej 25 kV AC w obszar istniejącej infrastruktury 3 kV DC

W przypadku wprowadzania ZLK AC do węzła kolejowego zelektryfikowanego dotychczas napięciem 3 kV DC, ze względu na ograniczoną przestrzeń do wykorzystania przez układy kolejowe, należy spodziewać się konieczności prowa-

dzenia ZLK AC i DC możliwe blisko siebie, jednak ze względu na występowanie napięć indukowanych ważne jest, aby zapewnić odpowiednie, bezpieczne potencjały w szynach. Sugerowanym rozwiązaniem jest stosowanie układu 2x25 kV AC 50 Hz, z dodatkowym przewodem powrotnym w obszarach stykowych z ZLK DC (niska rezystywność gruntu poprawia warunki oddziaływań). Równoległe prowadzenie linii KDP z istniejącą linią DC jest możliwe tylko w przypadku względnie krótkich odcinków równoległości oraz stosunkowo (w zależności od długości równoległości) niskich mocy. Taki układ często pozwala na prowadzenie równoległych ZLK AC i DC praktycznie w całym obrębie miasta [11], lecz zwiększa prawdopodobieństwo oddziaływań opisanych w punkcie 3. artykułu, powstających na skutek sprzężeń przewodzonych pomiędzy ZLK AC i DC. Zaleca się więc możliwie dobrą separację (z uwzględnieniem bezpiecznego napięcia krokowego szyny DC ziemia) szyn ZLK DC względem ziemi, aby zminimalizować zjawisko prądów błądzących w obszarach stykowych oraz minimalizację wpływu prądu powrotnego AC do szyn DC, który, szczególnie w niemodernizowanych ZLK DC, oprócz zwiększania ryzyka wystąpienia niebezpiecznych napięć, może zakłócać pracę obwodów torowych oraz prądu DC do szyn AC, mogącego zakłócać pracę układów energetyki trakcyjnej tego systemu.

Szerokie spektrum problemów, jakie występują w obszarach stykowych ZLK AC i DC powoduje, że należy uznać, iż najlepszym rozwiązaniem ich uniknięcia będzie niewprowadzanie kolejowego systemu 25 kV AC do węzłów zelektryfikowanych napięciem 3 kV DC (rys. 2), jak to przyjęto w projektach dla prowadzenia linii KDP [15,25]. Rozwiązanie to jednak nie wyeliminuje wszystkich problemów opisanych w przypadku pracy równoległej.



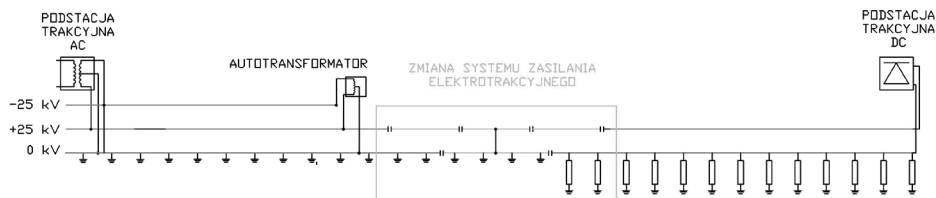
Rys. 2. Węzeł kolejowy zelektryfikowany system 3 kV DC ze zmianą napięcia wchodzącej linii KDP z 2x25 kV na 3 kV DC przed węzłem

5. Obszary stykowe w warunkach zmiany systemów zasilania

Wdrożenie nowego systemu zasilania elektrotrakcyjnego na terenie Polski w układzie przedstawionym na rys. 2 będzie prowadzić do powstawania obszarów granicznych napięć różnych systemów w jednym ciągu komunikacyjnym ZLK (rys. 3). Do tej pory w Polsce obszary zmiany napięcia sieci trakcyjnej występują tylko w okolicach granicy państwa, w przypadku, gdy w państwie sąsiadującym funkcjonuje inny system elektrotrakcyjny (np. za granicą z Niemcami). W związku z powyższym, zmiana napięcia zasilania oraz wiążące się z nią powstawanie tego typu obszarów stykowych, nie stwarzało większego problemu. Jednak wprowadzenie w dotychczas pracujący system kolejowy 3 kV DC nowej linii KDP w układzie 2x25 kV AC (lub zmiana napięcia albo rozbudowa linii CMK o odcinki zasilane napięciem 25 kV 50 Hz [9]), będzie w rezultacie prowadzić do zwiększenia skali problemów, z których należy zdawać sobie sprawę i rozwiązać już na etapie studium wykonalności.

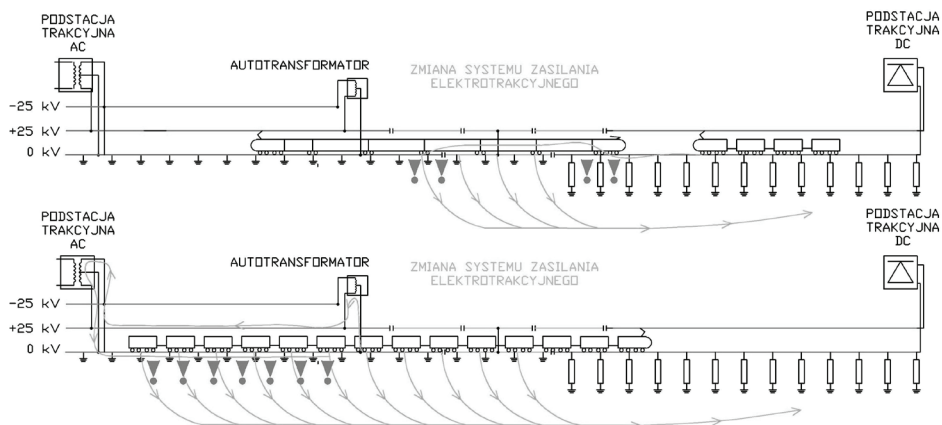
W przypadku separacji wzdłużnej systemów zasilania trakcji elektrycznej, ZLK AC i DC nie są wzajemnie równoległe, lecz jedna ZLK AC stanowi kontynuację drugiej ZLK DC i odwrotnie. W takich układach parametry dotyczące ziemi bliskiej sieci trakcyjnej dolnej są również niezwykle istotne. Prawdopodobne są przypadki, w których pojazdy jednego systemu mogą przenosić potencjały do drugiego systemu, stwarzając przy tym zwiększenie zjawisk prądów błędzących oraz obecności napięć zawierających komponenty AC i DC w szynach (rys. 4). Występowanie składowej DC w systemach AC, analogicznie do układów równoległych opisanych wyżej, może prowadzić do zakłóceń w pracy urządzeń energetyki kolejowej tych systemów. Skala przedstawionych na rys. 4 zjawisk nasili się w przypadkach występowania w układach większych prądów, co m.in. dla stanów zwarciovych warunkuje przypadki krytyczne.

Istnieją liczne rozwiązania strefy zmiany systemów zasilania ZLK [4,5,4,27], a separacja systemów trakcji elektrycznej w takim przypadku sprowadza się do wprowadzenia tzw. odcinka neutralnego, który umożliwi bezawaryjny przejazd wielosystemowego pojazdu trakcyjnego pomiędzy inaczej elektryfikowanymi systemami. Często stosowany układ odcinka ochronnego polega na wprowadzeniu pomiędzy separowane systemy kilku odcinków izolowanych o różnych długościach w sieci trakcyjnej górnej i dolnej. Przykładem obszaru zmiany napięcia zasilania jest układ przedstawiony na rys. 3.



Rys. 3. Przykładowe rozwiązanie wzdłużnej separacji systemów AC i DC

Układ ten powinien być tak skonstruowany, aby zapewnić pełną separację elektryczną obu systemów. Odległości zastosowanych odcinków neutralnych warunkują sposób przejazdu pojazdu trakcyjnego (dopuszczalną prędkość przejazdu, układ pantografów, warunki pracy układu napędowego, długość pociągów).



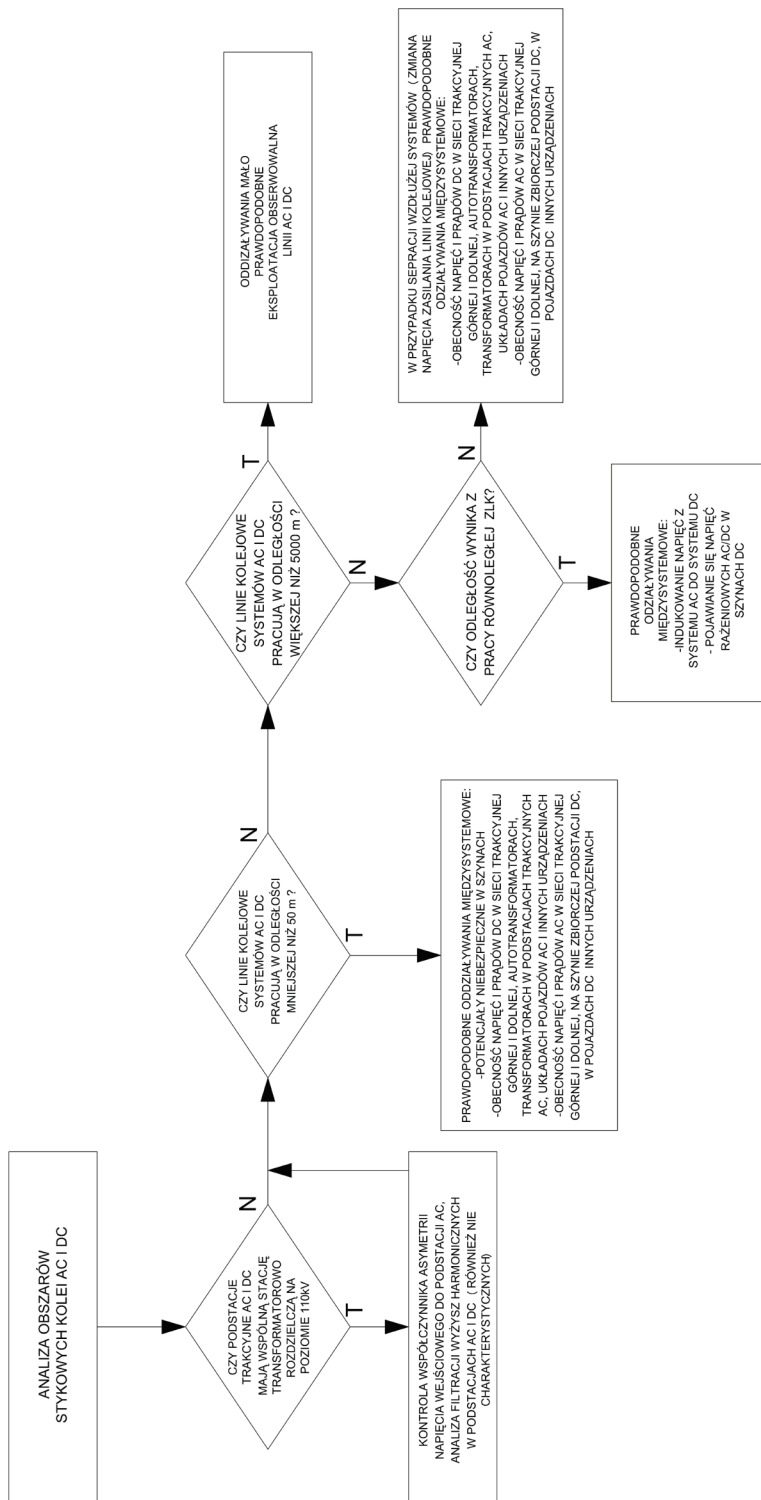
Rys. 4. Możliwe mechanizmy sprzężeń galwanicznych pomiędzy ZLK AC i DC w obszarach separacji wzdłużnej systemów (zmiana napięcia zasilania)

Z reguły zastosowane odcinki zmiany napięcia zasilania w pełni wzajemnie separują elektrycznie oba systemy trakcyjne, jednak może się zdarzyć, że w obszarach tych nasilać się będą zjawiska związane [12] z:

- występowaniem prądów błędnych systemu DC,
- pojawianiem się w szynach napięć zawierających składowe AC i DC,
- nasycaniem się transformatorów, autotransformatorów oraz transformatorów odsysających,
- dysfunkcją systemów sterowania i zarządzania ruchem kolejowym (SRK),
- obecnością składowych sąsiedniego systemu w układach powrotnych pojazdów drugiego systemu.

Podane powyżej zjawiska zależą przede wszystkim od parametrów takich jak: rezystancja wzdłużna szyn, rezystywność gruntu, konduktancja przejścia szyny - ziemia w układzie DC, rezystancje uziomów, rezystancje przejść międzywagonowych w przypadku długich pojazdów trakcyjnych.

Proponowany algorytm działań w przypadku wprowadzenia nowego systemu kolejowego został przedstawiony na rys. 5.



Rys. 5. Proponowany algorytm działań przy projektowaniu linii kolejowej AC w otoczeniu linii kolejowych DC

5. Podsumowanie

Z przedstawionych rozwaŹań, bęĄących skróconym podsumowaniem prowadzonych prac analitycznych i badawczo-wdroŹeniowych [8,9,11,25,27,28] moŹna wnioskować, Źe tworzenie obszarów stykowych dwóch zelektryfikowanych róznyÄ napięciem systemów kolejowych, szczególnie w obrębach miast, nie jest zagadnieniem trywialnym i wymaga m. in.:

- szczególowej analizy obciĄŹeń energetycznych (przewidywanie obciĄŹeń trakcyjnych, sposobu zasilania, parametrów zasilajĄcego systemu elektroenergetycznego),
- analiz parametrów otoczenia – środowiska i infrastruktury technicznej otoczenia (określenie rezystywności gruntu i stopnia zurbanizowania terenu),
- odpowiedniej lokalizacji strefy zmiany napięcia i doboru zastosowanych rozwiąŹań technicznych.

Decyzja o niewprowadzaniu nowego napięcia zasilania systemu 25 kV 50 Hz do węzłów kolejowych zelektryfikowanych innym napięciem zasilania (w Polsce 3 kV DC) pozwala zmniejszyć liczbę (bo zapewnie nie uniknąć) spodziewanych problemów mogĄcych się pojawiać w obszarach styków ZLK juŹ na etapie projektowania inwestycji (np. wybór rozwiąŹań ochrony przeciwporażeniowej, ochrona od prądów błądzących itp.), lecz z pewnością bęĄdzie wymagać dalszych prac badawczych zwiĄzanych z obszarami styku na odcinku separacji wzduŹnej systemów.

Literatura

- [1] Altus J., Novak M., Otcenasova A., Pokorny M., Szelaġ A., Quality parameters of electricity supplied to electric railways. Scientific Letters of the University of Źilina-Communications 2-3/2001.
- [2] Batistelli L., Caramia P., Carpinelli G., Proto D., Power quality disturbances due to interaction between AC and DC traction systems. Power Electronics, Machines and Drives , 2004.
- [3] Białoń A., Dopuszczalne parametry zakłóceń dla urzĄdzeń SRK i taboru trakcyjnego. Modern Electric Traction MET'2003, Warszawa 2003.
- [4] Brenna M., Foidelli F., Zaninelli D., The compatibility between DC and AC supply of the Italia Railway System. Power and Energy Society General Meeting, 2011 IEEE.
- [5] Jordan N. & Palmer M., AC and DC Electric Railway Interfaces. Railway Electrification Infrastructure and Systems, 2007.
- [6] Kiessling F., Puschmann R., Schmieder A., Contact Lines for Electrical Railways. Planning, Design, Implementation. Publicis, 2001.
- [7] Lewandowski M., Trakcje w Kolejach DuŹych Prędkości. Logistyka 3/2012.

- [8] Maciołek T., Szelać A. i inni., Przygotowanie pilotażowego wdrożenia w Polsce systemu zasilania trakcji 25 kV prądu przemiennego – etap II projekt prototypowej podstacji trakcyjnej i sieci trakcyjnej. Opracowanie Zakładu Trakcji Elektrycznej IME PW na zlecenie PKP PLK S.A. , Warszawa 2012.
- [9] Modernizacja linii kolejowej E65-Południe odcinek Grodzisk Mazowiecki -Kraków - Katowice-Zwardoń/Zebrzydowice - granica państwa. Zakład Trakcji Elektrycznej IME PW - Scott Wilson Sp. z o.o. Warszawa, Halcrow sp. z o.o.,2010-2013.
- [10] Patoka M., Problemy oddziaływań wzajemnych w obszarach stykowych linii kolejowych zelektryfikowanych w systemach DC i AC. Czasopismo Techniczne -Elektrotechnika, 2014.
- [11] Patoka M., Analiza oddziaływań zakłócających w strefie styku systemów trakcji elektrycznej 3 kV DC i 25 kV 50 Hz. Rozprawa doktorska, Politechnika Warszawska, Wydział Elektryczny, 2014.
- [12] PN EN50122-3. Zastosowania kolejowe - Urządzenia stacjonarne - Bezpieczeństwo elektryczne, uziemianie i sieć powrotna - Część 3: Oddziaływanie wzajemne systemów trakcji prądu przemiennego i stałego.
- [13] Ogunsola A., Mariscotti A., Electromagnetic Compatibility in Railways. Analysis and Management. Springer 2013.
- [14] Rostkowski W., Materiały pomocnicze do wykładu Sieci trakcyjne prądu przemiennego i przejścia między systemami. Studium podyplomowe ZTE, Warszawa 2005.
- [15] Studium Wykonalności dla budowy linii kolejowej dużych prędkości „Warszawa – Łódź – Poznań/Wrocław” , IDOM. Praca dla PKP PLK S.A., 2012.
- [16] Szelać A., Patoka M., Some aspects of impact analysis of a planned new 25 kV AC railway lines system on the existing 3 kV DC railway system in a traction supply transition zone. International Symposium on Power Electronics, Electrical Drives, Automation and Motion Ischia, Italy VI 2014 (IEEE SPEEDAM 2014).
- [17] Szelać A., Mierzejewski L., Systemy zasilania linii kolejowych dużych prędkości jazdy, Technika Transportu Szynowego ,11-12 2006.
- [18] Szelać A., Steczek M., Analysis of input impedance frequency characteristic of electric vehicles with a.c. motors supplied by 3 kV DC system for reducing disturbances in signalling track circuits caused by the harmonics in the vehicle's current. Przegląd Elektrotechniczny 3/2013. s. 29-33.
- [19] Szelać A., Patoka M., Analiza oddziaływania systemu trakcji elektrycznej 25 kV 50 Hz AC na system 3 kV DC przy zasilaniu ze wspólnego węzła sieci elektroenergetycznej. Modern Electric Traction MET'2013. Warszawa 2013.
- [20] Szelać A., Maciołek T., A 3 kV DC electric traction system modernisation for increased speed and trains power demand- problems of analysis and synthesis. Przegląd Elektrotechniczny 3a/2013.

- [21] Szelaġ A. , Maciołek T., Patoka M., Effectiveness of smoothing filters in the substations of 3 kV DC railway traction - measurements and diagnostics 13th IMEKO TC10 Workshop on 'Technical Diagnostics Advanced measurement tools in technical diagnostics for systems' reliability and safety, June 26-27, 2014, Warsaw, Poland.
- [22] Szelaġ A., Maciołek T., Patoka M., Correlation analysis of results of measurements in AC power supply of DC traction substations for identification of harmonic disturbances, 20th IMEKO TC4 International Symposium and 18th Intern Workshop on ADC Modelling and Testing Research on Electric and Electronic Measurement for the Economic Upturn, Benevento, Italy, September 15-17, 2014.
- [23] White R. D., AC/DC Railway Electrification and Protection. Electric Traction Systems 2006.
- [24] van Waes J.B.M., Janssen M.F. Smulders P.H.W.M., EMC aspects of voltage changeover areas. World Congress on Railway Research, 2008, Seoul, Korea.
- [25] Wytyczne projektowania, budowy i odbioru sieci trakcyjnej oraz układów zasilania 2x25 kV AC dla linii kolejowych o prędkości do 350 km/h. Praca CBPBBK Kolprojekt sp. z o.o. na zlecenie PKP PLK S.A., 2007-2008.
- [26] Wróbel Z., The railway devices modelling for the purpose of a lightning discharge analysis. *Przeġład Elektrotechniczny*, 3a/2013.
- [27] Zakład Trakcji Elektrycznej PW. Przygotowanie pilotażowego wdrożenia w Polsce systemu zasilania trakcji 25 kV prądu przemiennego. Warszawa 2011.
- [28] Zakład Trakcji Elektrycznej PW. Seminarium naukowo – techniczne. System 25 kV 50 Hz – wymagania i wytyczne, IME PW 2009.
- [29] Zajac, W., Szelaġ A., Harmonic distortion caused by suburban and underground rolling stock with DC motors. In Power Electronics Congress, 1996. Technical Proceedings. CIEP'96., V IEEE International (pp. 200-206). IEEE, October, 1996.