

Zasilanie linii kolejowych dużych prędkości

Streszczenie. *W artykule przedstawiono informacje o systemach zasilania kolejowej trakcji elektrycznej, ze szczególnym naciskiem na systemy zasilania linii dużych prędkości. Omówiono system 2 x 25 kV 50 Hz podstawowo przeznaczony do zasilania pociągów na liniach dużych prędkości oraz wybrane problemy, jakie mogą wystąpić podczas jego wprowadzania. Część artykułu poświęcona jest oddziaływaniu systemu 2 x 25 kV 50 Hz na system elektroenergetyczny. Z uwagi na różną liczbę faz po stronie pierwotnej i wtórnej transformatorów w podstacjach wprowadzana jest asymetria do systemu elektroenergetycznego. Metody jej ograniczania oraz minimalne wymagania stawiane systemowi elektroenergetycznemu są jedną z części referatu. Jeden z punktów referatu poświęcono planom budowy systemu zasilania linii dużej prędkości w Polsce, zwanej linią „Y” oraz związanych z tym prac koniecznych do przeprowadzenia w zakresie budowy linii najwyższych napięć oraz krajowego systemu elektroenergetycznego.*

Słowa kluczowe: system zasilania trakcji elektrycznej, jakość energii, linie kolejowe dużych prędkości

Wstęp

System zasilania trakcji elektrycznej jest największym odbiorcą energii elektrycznej. Jednak jest to odbiorca o licznych i rozproszonych punktach przyłączenia do systemu elektroenergetycznego, niejednokrotnie zlokalizowanych w terenie słabo zurbanizowanym, w znacznych odległościach od infrastruktury rozdzielczo-przesyłowej dystrybutorów energii elektrycznej. Podstacje trakcyjne są odbiorcami niespokojnymi, pobierającymi szybkozmienne wartości mocy, od kilku kilowatów do kilku a nawet kilkunastu megawatów. Dlatego rozwój systemu kolejowego musi uwzględniać rozbudowę krajowego układu elektroenergetycznego, choć w wielu przypadkach plany rozwoju tych dwóch gałęzi gospodarki nie są wystarczająco silnie powiązane ze sobą.

W procesie rozwoju trakcji elektrycznej i jej układów zasilania powstało kilka różnych systemów zasilania, zarówno prądu stałego, jak i prądu przemiennego o różnych częstotliwościach. Różnorodność systemów zasilania trakcji elektrycznej jest wynikiem niezależnych prac nad nimi w różnych krajach. Podyktowana ona była czynnikami technicznymi oraz strategiczno-militarnymi.

Systemy zasilania trakcji elektrycznej w Europie

W Europie rozwinęły się cztery podstawowe systemy zasilania kolejowej trakcji elektrycznej. Są to systemy prądu stałego o napięciu 1,5 i 3 kV oraz prądu przemiennego 15 kV 16 2/3 Hz i 25 kV 50 Hz. System 3 kV prądu stałego oprócz Polski stosowany jest w wielu krajach europejskich, takich jak Hiszpania, Czechy, Słowacja, Włochy, Belgia, Słowenia, Chorwacja, Łotwa, Estonia i Rosja. System 1,5 kV DC stosowany jest w głównie w Holandii i Francji. System prądu przemiennego o napięciu 15 kV i obniżonej częstotliwości 16 2/3 Hz, eksploatowany jest w Niemczech, Austrii, Szwajcarii, Norwegii i Szwecji, natomiast napięcie 25 kV 50 Hz do zasilania kolejowych pojazdów trakcyjnych wykorzystywany jest w licznych krajach Europy. Są to: Bułgaria, Czechy, Słowacja, Dania, Finlandia, Francja, Wielka Brytania, Luksemburg, Węgry, Rumunia, Jugosławia, Serbia i Czarnogóra, Chorwacja, Bośnia, Litwa, Białoruś, Ukraina, Rosja oraz na liniach dużych prędkości w Portugalii, Hiszpanii i Włoszech.

Z uwagi na wartość napięcia i występujące jego spadki systemy te mają różną wydolność energetyczną oraz wymagają zastosowania różnych przekrojów sieci trakcyjnej. Porównanie podstawowych parametrów systemów zasilania trakcji przedstawiono w poniższej tabelicy.

Tablica 1. Podstawowe parametry systemów zasilania trakcji elektrycznej stosowane w Europie

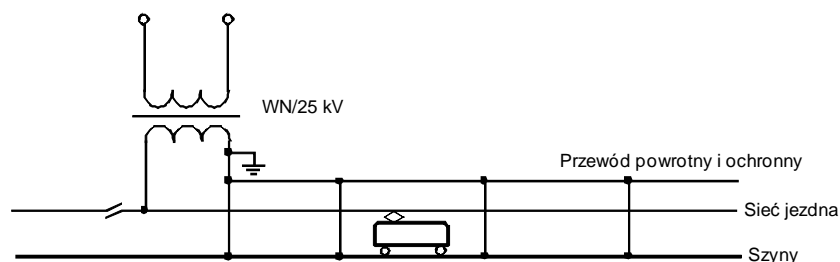
System	Odległość między podstacjami [km]	Przekrój sieci trakcyjnej [mm ²]	Typowa moc pojazdów trakcyjnych [MW]	Maksymalna moc pojazdów trakcyjnych [MW]	Układ zasilania
1,5 kV DC	6 – 10	320 – 440	do 4	4,2 – 7,5	Dwustronny
3 kV DC	10 – 25 (30)	190 – 610	do 6	7,5 – 12	Dwustronny
15 kV 16 2/3 Hz	20 – 40 (70)	150 – 240	do 10	13,5 – 22,5	Jedno i dwustronny
25 kV 50 Hz	do 60	150 – 240	do 13	12,5 – 37,5	jednostronny

- wartości maksymalne, rzadko stosowane

Jazda pociągu z prędkością 300 km/h i wyższą wymaga dostarczenia do niego mocy, w zależności od masy pociągu, od 9 do prawie 20 MW. Oznacza to, że zasilanie pociągów dużych prędkości powinno odbywać się w systemach prądu przemiennego. System 15 kV 16 2/3 Hz wymaga wytworzenia napięcia o obniżonej częstotliwości. Odbywa się to przez zastosowanie dedykowanego systemu elektroenergetycznego wraz z generatorami wytwarzającymi energię o wymaganej częstotliwości lub stosując przetwornice, dawniej maszynowe, obecnie coraz częściej energoelektroniczne. Powoduje to, że system 15 kV 16 2/3 Hz jest niezwykle skomplikowany i kosztowny. Z uwagi na powyższe, wszystkie nowe linie dużych prędkości w Europie (z wyjątkiem Niemiec i Austrii) są elektryfikowane w systemie 25 kV 50 Hz, w którym napięcie publicznego systemu elektroenergetycznego jest przekształcane tylko w zakresie poziomu oraz liczby faz.

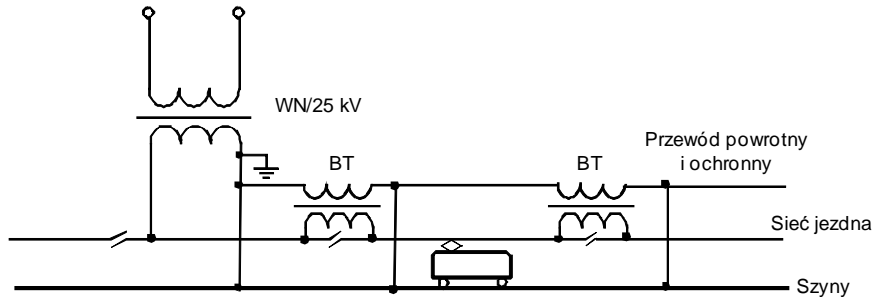
System zasilania trakcji elektrycznej 25 kV 50 Hz

Najprostszy układ zasilania w systemie 25 kV 50 Hz przedstawiony jest na rysunku 1. Jest on praktycznie nie stosowany z uwagi na znaczny wpływ prądu powrotnego do ziemi i zakłócenia w obwodach telekomunikacji. Aby tego uniknąć stosuje się układy z booster transformatorami (BT) włączonymi co kilka kilometrów między szyny a dodatkowy przewód powrotny. Zadaniem tych transformatorów jest wymuszenie przepływu prądu (odessanie) z szyn jezdnych do przewodu powrotnego. Układ ten przedstawiony jest na rysunku 2.



Rys. 1. Uproszczony schemat układu zasilania trakcji elektrycznej w systemie 25 kV 50 Hz.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

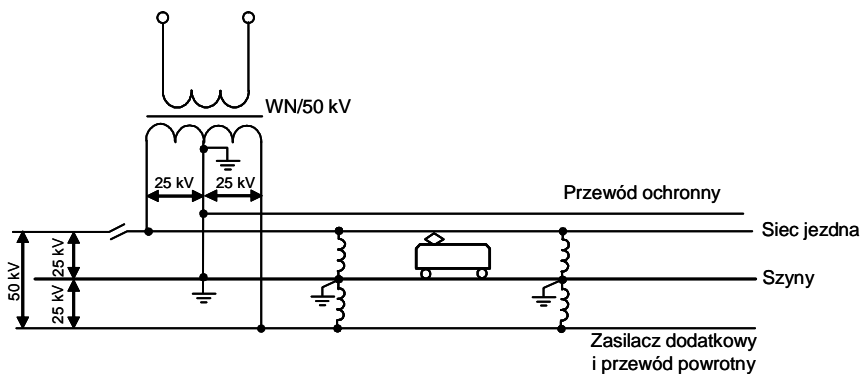


Rys. 2. Uproszczony schemat układu zasilania trakcji elektrycznej w systemie 25 kV 50 Hz z booster transformatorami (BT).

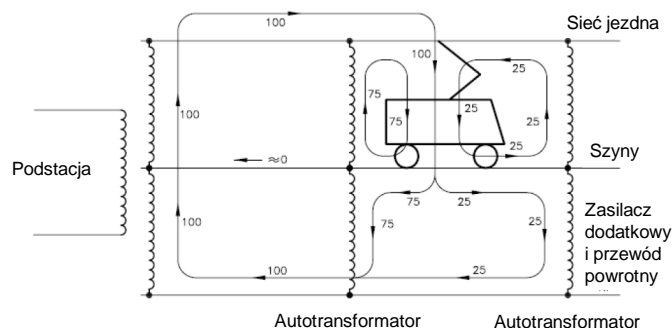
System 25 kV 50 Hz ma dwie podstawowe wady. Jedną z nich jest wprowadzanie asymetrii do systemu elektroenergetycznego, z którego zasilane są podstacje trakcyjne. Aby minimalizować to zjawisko kolejne podstacje trakcyjne są zasilane z różnych faz. Powoduje to, że napięcie zasilające sąsiednie odcinki sieci trakcyjnej ma różne fazy. Konsekwencją tego jest niemożność połączenia elektrycznego sąsiadujących ze sobą odcinków sieci trakcyjnej – zasilanie jednostronne.

Zasilanie jednostronne jest drugą wadą systemu 25 kV 50 Hz. Powoduje to, że na końcu odcinka zasilania występują największe spadki napięcia, co ogranicza maksymalne odległości między podstacjami trakcyjnymi.

Środkiem ograniczającym spadki napięcia w systemie 25 kV 50 Hz jest jego odmiana – system 2 x 25 kV 50 Hz, którego uproszczony schemat pokazano na rysunku 3. W systemie tym transformatory zainstalowane w podstacjach trakcyjnych posiadają dwa uzwojenia wtórne o napięciu 25 kV każde, których wspólny środkowy zacisk jest uziemiony i połączony z szynami oraz przewodem powrotnym. Koniec jednego z uzwojeń połączony jest z siecią jezdnią, a drugiego z dodatkowym przewodem zasilającym. Pomiedzy podstacjami znajdują się autotransformatory rozmieszczone w odległościach od kilku do kilkunastu kilometrów od siebie. Są one włączone między sieć jezdnią a dodatkowy przewód zasilający. W wyniku tego napięcie pomiędzy siecią trakcyjną a szynami jezdniowymi wynosi 25 kV, a przesył energii z podstacji do autotransformatorów odbywa się na poziomie 50 kV. Zasadę działania – rozptył prądów w systemie 2 x 25 kV 50 Hz ilustruje rysunek 4.

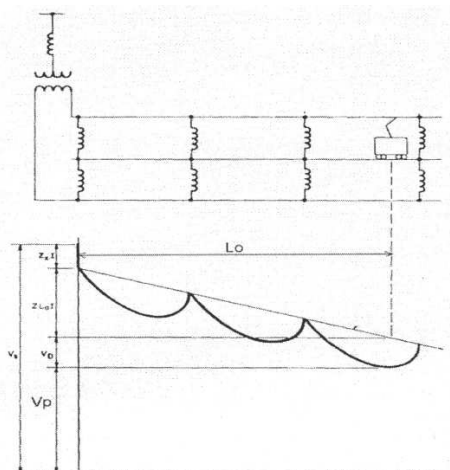


Rys. 3. Uproszczony schemat układu zasilania trakcji elektrycznej w systemie 2 x 25 kV 50 Hz.



Rys. 4. Rozpływ prądów w systemie 2 x 25 kV 50 Hz.

Zastosowanie w systemie 2 x 25 kV 50 Hz autotransformatorów rozmieszczonych w odległości około 10 – 15 km od siebie dodatkowo „podbijają” napięcie w sieci trakcyjnej (Rys. 5.). Powyższe rozwiązania Pozwalają na zmniejszenie spadków w układzie zasilania oraz zwiększenie odległości pomiędzy podstacjami trakcyjnymi, które mogą wynosić nawet znacznie powyżej 60 km.



Rys. 5. Spadki napięcia w systemie 2 x 25 kV 50 Hz.

Oddziaływanie podstacji trakcyjnych w systemie 2 x 25 kV 50 Hz na system elektroenergetyczny

Zasilanie sieci trakcyjnej w systemie 25 kV 50 Hz odbywa się w układzie jednofazowym, przy zasilaniu podstacji z układu trójfazowego. Powoduje to niejednakowe obciążenie poszczególnych faz przez podstacje. Nierównomierność obciążenia jest zmienna – zależna od ruchu i mocy pociągów. Powyższe jest przyczyną wprowadzania asymetrii do systemu elektroenergetycznego, które nie może przekraczać 1 %.

Najprostszym rozwiązaniem stosowanym w podstacjach w systemie 2 x 25 kV jest zastosowanie transformatorów jednofazowych. Uproszczony schemat podstacji z transformatorami jednofazowymi pokazano na rysunku 6. Układ odłączników po stronie pierwotnej transformatorów pozwala na wybór fazy, z której dany transformator będzie

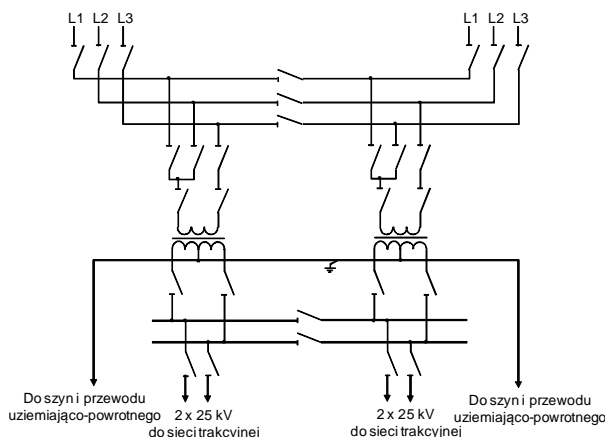
VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

zasilany. Transformatory jednofazowe wprowadzają asymetrię, której wartość można wyznaczyć z zależności:

$$(1) \quad nps = \frac{S_t}{S_{zw}} \cdot 100\%$$

gdzie: S_t – moc transformatora;
 S_{zw} – moc zwarcia systemu elektro-energetycznego w punkcie zasilania podstacji.

Przyjmując, że moc transformatora może osiągać wartość 60 MVA, aby asymetria nie przekroczyła 1 %, moc zwarcia systemu powinna mieć wartość powyżej 6 GVA. Tak wysokie wartości mocy zwarcia w Polsce osiągane są na poziomie 400 kV i tylko w niewielu punktach systemu elektroenergetycznego na poziomie 220 kV.



Rys. 6. Uproszczony schemat podstacji trakcyjnej w systemie 2 x 25 kV z transformatorami jednofazowymi.

Rozwiązaniem pozwalającym na ograniczenie wprowadzania asymetrii jest zastosowanie w podstacjach w systemie 2 x 25 kV transformatorów typu V. Uzwojenie pierwotne tego typu transformatora jest trójfazowe, a wtórne – dwufazowe. Uproszczony schemat podstacji z transformatorami tego typu pokazano na rysunku 7. Transformatory typu V wprowadzają asymetrię, której wartość można wyznaczyć z zależności:

$$(2) \quad nps = \sqrt{3k^2 - 3k + 1} \cdot \frac{S_t}{S_{zw}} \cdot 100\%$$

W systemie 2 x 25 kV można przyjąć, że uzwojenia wtórne są obciążane jednakowo. Minimalne różnice obciążenia uzwojeń wynikają z faktu zasilania odbiorów nietrakcyjnych z sieci trakcyjnej, czyli z jednego z uzwojeń. Jeżeli na każde uzwojenie wtórne przypada połowę obciążenia całkowitego transformatora, czyli:

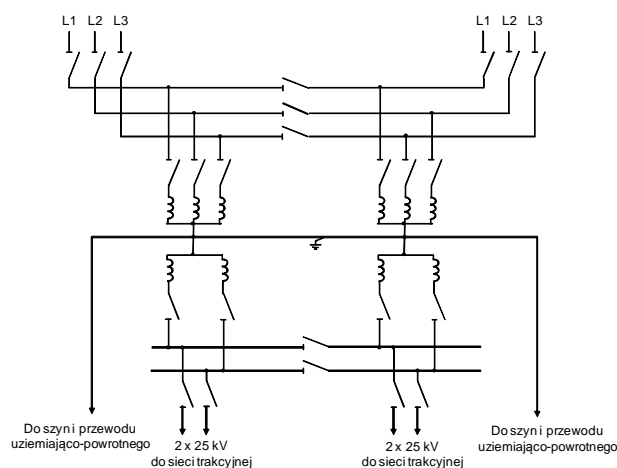
$$(3) \quad k = \frac{S_{t1}}{S_t} = \frac{S_{t2}}{S_t} = 0,5$$

gdzie: S_t – moc transformatora;
 S_{t1}, S_{t2} – moc uzwojenia wtórnego;

wówczas:

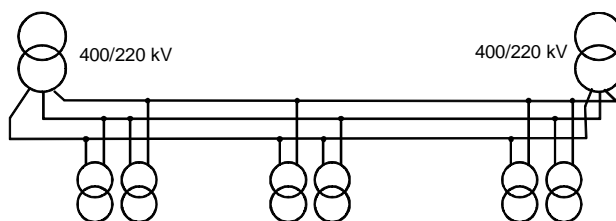
$$(4) \quad nps = 0,5 \cdot \frac{S_t}{S_{zw}} \cdot 100\%$$

Z powyższego wynika, że aby asymetria nie przekroczyła 1 %, moc zwarciova systemu powinna mieć wartość powyżej 3 GVA przy transformatorach o mocy 60 MVA. Moc zwarciova na tym poziomie występuje dla napięć 220 kV i większych.



Rys. 7. Uproszczony schemat podstacji trakcyjnej w systemie 2 x 25 kV z transformatorami typu V.

Kolejnym rozwiązaniem pozwalającym na ograniczenie oddziaływania podstacji na system elektroenergetyczny jest zasilanie kilku podstacji z wydzielonej linii WN. W podstacjach tych powinno pracować 3n transformatorów ($n = 1, 2, 3 \dots$) zasilanych naprzemiennie z różnych faz (Rys. 8.). Pociągi zasilane są z różnych transformatorów obciążając wszystkie fazy układu elektroenergetycznego. W idealnych warunkach może wystąpić sytuacja, że trzy transformatory zasilane z różnych faz są obciążone takim samym prądem, co pozwala osiągnąć symetryczne obciążenie systemu elektroenergetycznego.



Rys. 8. Zasilanie podstacji w systemie 25 kV z wydzielonej linii.

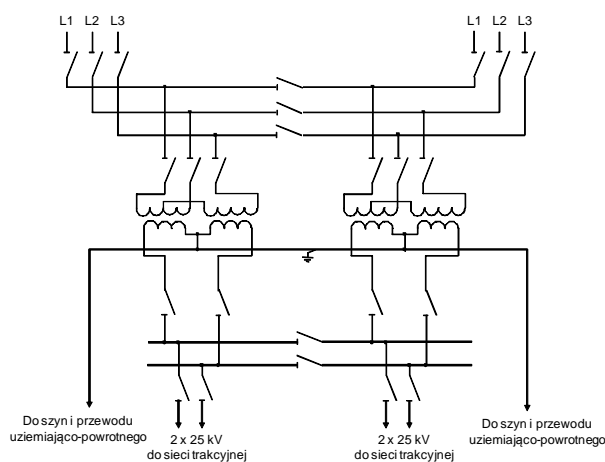
VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012

Zastosowanie transformatorów w układzie Scott'a (Rys. 9.) pozwala zminimalizować niesymetryczne obciążenie systemu elektroenergetycznego. Asymetria wprowadzana do systemu przy zastosowaniu tego typu transformatorów wynosi:

$$(5) \quad nps = (2k - 1)^2 \cdot \frac{S_t}{S_{zw}} \cdot 100\%$$

Jak wspomniano wcześniej, w systemie 2 x 25 kV można przyjąć, że uzwojenia wtórne są obciążane jednakowo, a więc zgodnie z zależnością (3) współczynnik $k = 0,5$. Wówczas $nps \approx 0$, co pozwala na zasilanie nawet pojedynczych podstacji z układów o stosunkowo małej mocy zwarciowej, występującej na poziomie 110 kV.

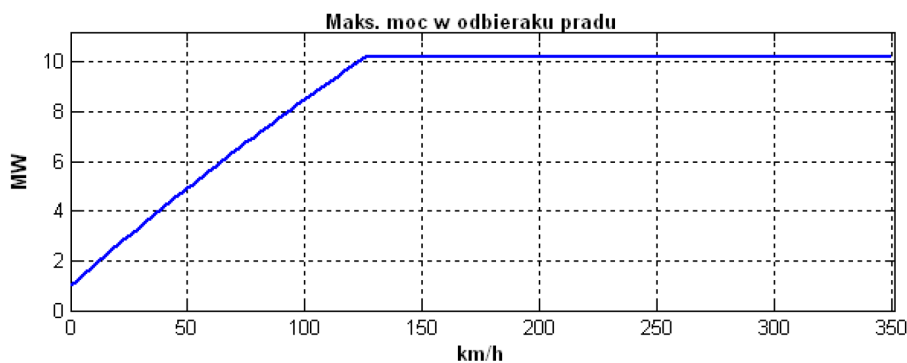
Wadą tego rozwiązania jest koszt transformatorów w układzie Scott'a, których konstrukcja jest skomplikowana. Ponadto wektory napięć wtórnych są przesunięte względem siebie o 90° , co powoduje że w układzie zasilania są dwa napięcia 25 kV, lecz przesył energii z podstacji do autotransformatorów odbywa się na poziomie około 39 kV, a nie 55 kV.



Rys. 9. Uproszczony schemat podstacji trakcyjnej w systemie 2 x 25 kV z transformatorami w układzie Scott'a.

Charakterystyka systemu zasilania linii dużych prędkości jako odbiornika energii

Jak wspomniano we wstępie, system zasilania trakcji elektrycznej jest odbiorem niespokojnym, którego moc jest wartością szybkozmienną. Na linii dużej prędkości w Polsce, zwanej z uwagi na swój przebieg linią „Y”, planowany jest ruch pociągów o prędkości ponad 300 km/h. Pociągi te mają moc na kołach o wartości 8,8 MW, a ich moc elektryczna przekracza 10 MW. Charakterystyka prądowa takiego pociągu przedstawiona jest na rysunku 10, na którym jest widoczne, że wraz ze wzrostem prędkości od 0 do około 125 km/h, moc elektryczna pociągu rośnie, w przybliżeniu liniowo. Po osiągnięciu prędkości 125 km/h moc pociągu osiąga ponad 10 MW i utrzymuje się na stałym poziomie aż do prędkości maksymalnej.



Rys. 10. Przykładowa charakterystyka prądowa pociągu dużej prędkości [4].

Podczas jazdy pociągu można wyróżnić trzy fazy:

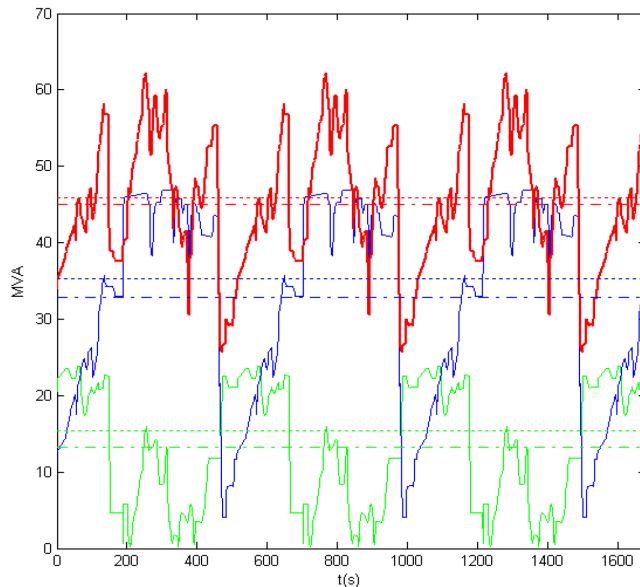
- rozruch, podczas którego pobierany jest prąd o wartości wynikającej z zakładanej mocy;
- wybieg, w czasie którego pociąg jedzie bez poboru prądu poruszając się w wyniku bezwładności;
- hamowanie – wówczas załączane są układy hamowania, jednocześnie część energii kinetycznej pociągu zamieniana jest w elektryczną i zwracana do systemu zasilania.

Wszystkie trzy fazy ruchu następują po sobie w różnej kolejności, w zależności od profilu trasy, rozkłady jazdy i zakładanych prędkości. Wynikiem tego jest ciągle zmieniający się prąd pobierany z podstacji trakcyjnej. Dodatkowo, w przypadku, gdy z jednej podstacji zasilanych jest jednocześnie kilka pociągów, ich prądy sumują się, czego wynikiem jest bardzo zmienny prąd pobierany z podstacji, a zatem z systemu elektroenergetycznego.

Na linii „Y” podstacje mają być zlokalizowane w odległości od 34 do 67 km od siebie, a zakładane następstwo pociągów w szczycie ma wynosić 7,5 minuty. Dodatkowo przyjmuje się, że każda podstacja musi posiadać parametry pozwalające na zasilanie pociągów w przypadku wyłączenia sąsiedniej podstacji (planowego lub w wyniku awarii). Powoduje to, że jedna podstacja, wyposażona w dwa transformatory może zasilać jednocześnie więcej niż jeden pociąg.

Na rysunku 11 przedstawiono przykładowy przebieg obciążenia podstacji dwutransformatorowej. Kolorem niebieskim i zielonym zaznaczona jest moc pojedynczych transformatorów, a kolorem czerwonym sumaryczna moc pobierana przez podstację z systemu elektroenergetycznego.

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



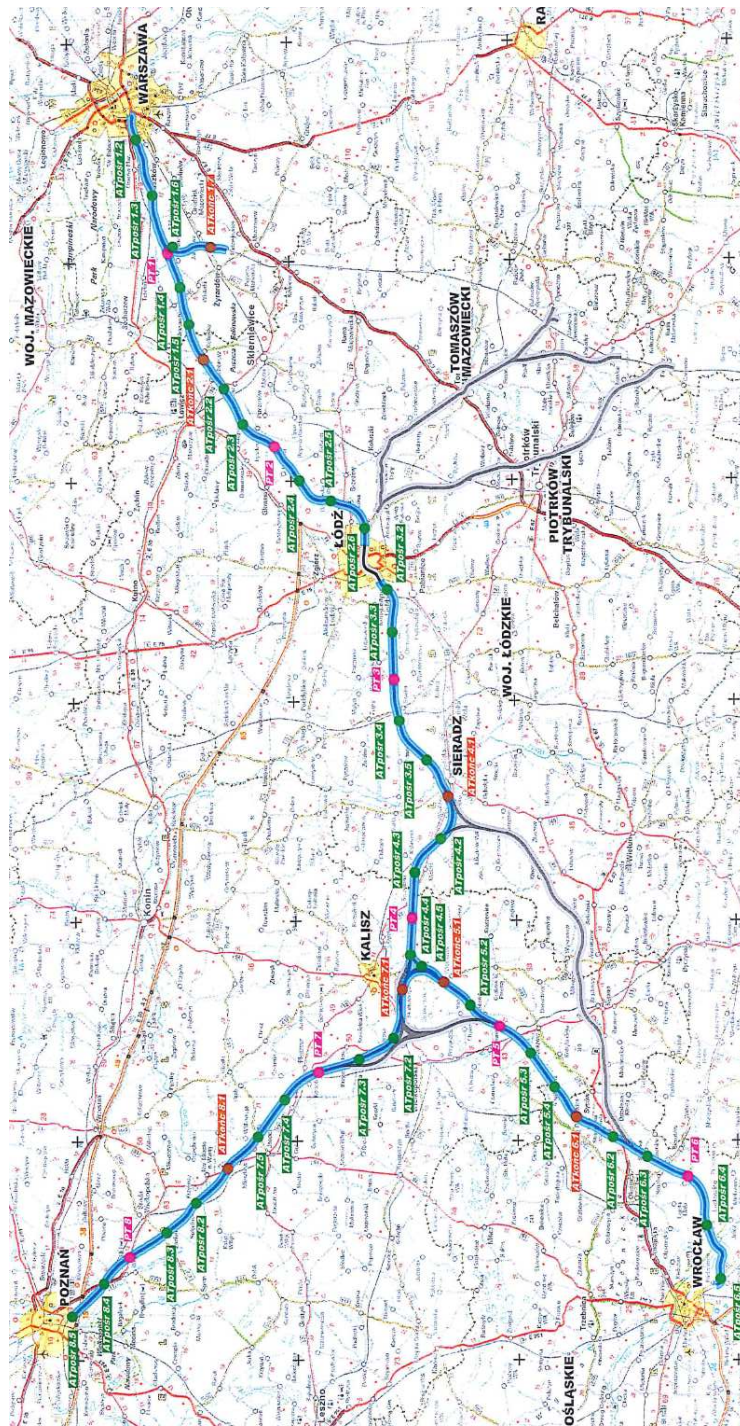
Rys. 11. Przykładowy przebieg obciążenia podstacji trakcyjnej [4].

Układ zasilania linii dużej prędkości „Y”

Zgodnie ze Studium Wykonalności dla budowy linii kolejowej dużych prędkości „Warszawa – Łódź – Poznań/Wrocław” [4], linia ta ma być zasilana w systemie 2 x 25 kV AC przez 8 podstacji trakcyjnych, z zastosowaniem 39 stacji autotransformatorowych. Rozmieszczenie podstacji trakcyjnych i stacji autotransformatorowych przedstawiono na rysunku 12.

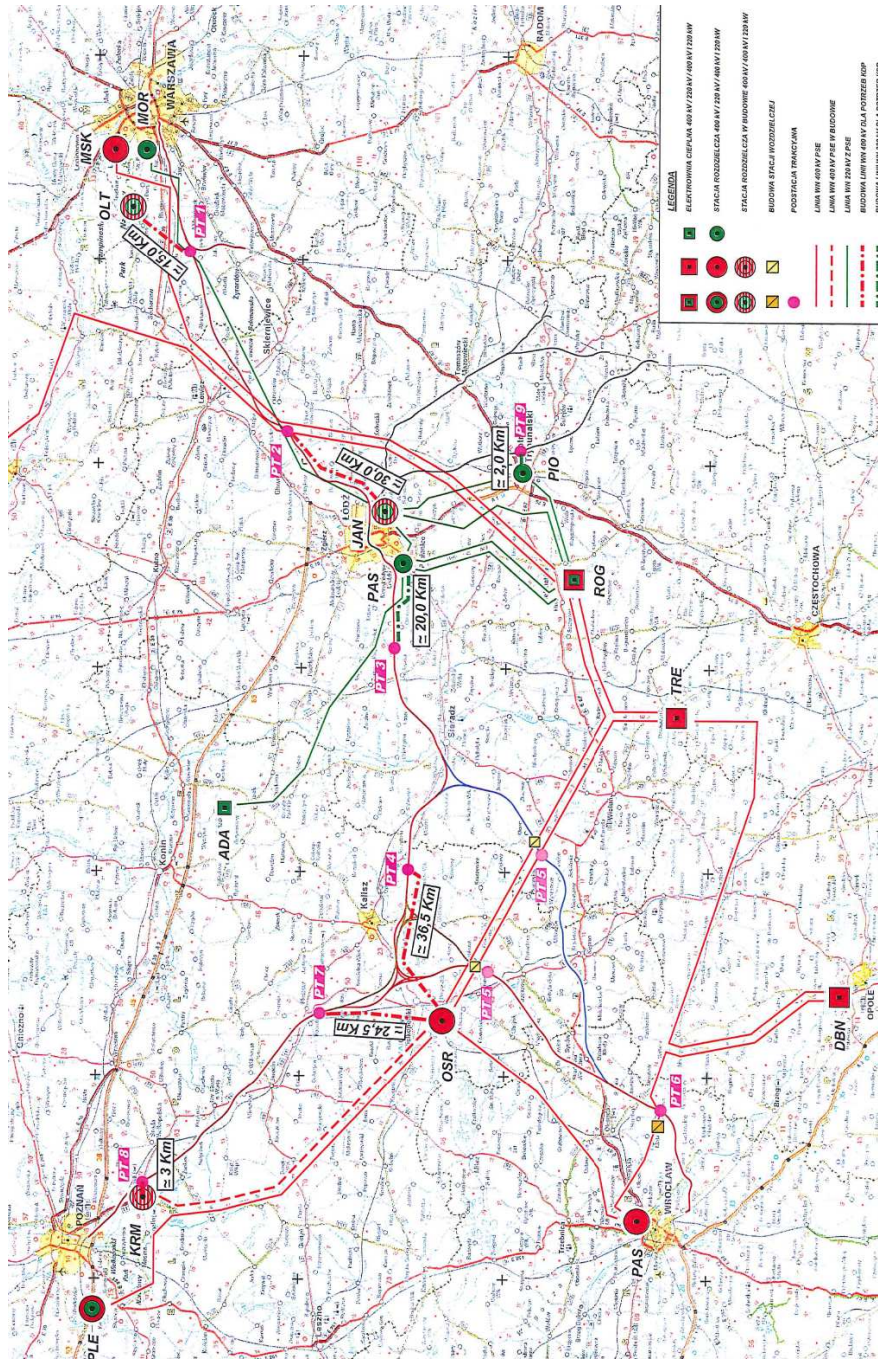
Każda podstacja trakcyjna ma być wyposażona w dwa transformatory o mocy 30 lub 60 MVA. Wyniki studium [4] wykazały, że transformatory w podstacjach mogą być chwilowo obciążone mocą do 78 MVA. Jak podano powyższych rozdziałach, transformatory podstacji trakcyjnych w systemie 2 x 25 kV są odbiorami niesymetrycznymi, wymagających bardzo dużych mocy zwarciovych w punkcie ich zasilania. W związku z tym podstacje trakcyjne na linii „Y” będą zasilane podstawowo napięciem 400 kV, a wyjątkowych przypadkach napięciem 220 kV. Każda podstacja trakcyjna powinna być zasilana dwustronnie. W przypadku promieniowego zasilania ze stacji elektroenergetycznych najwyższych napięć powinna to być linia 2-torowa przyłączona do różnych systemów szyn w stacji. W przypadku oczkowego zasilania można brać pod uwagę linie 1-torowe. Propozycja układu zasilania podstacji została przedstawiona na rysunku 13.

Analizy przeprowadzone w studium [4] wykazały, że przyjęty sposób zasilania podstacji zapewni, że oddziaływanie układu zasilania trakcji na linii „Y” nie przekroczy wartości dopuszczalnych odkształceń napięcia w systemie elektroenergetycznym. Z obliczeń wynika, że maksymalny poziom asymetrii wprowadzanej przez podstacje trakcyjne będzie zawierał się w granicach od 0,31 do 0,90 %, natomiast szybkie zmiany napięcia będą zawierały się w przedziale od 0,2 do 1,3 %.



Rys. 12. Lokalizacja podstacji trakcyjnych (PT) i stacji autotransformatorowych (AT) na linii „Y” [4].

VII Lubuska Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2012



Rys. 13. Zasilanie podstacji trakcyjnych na linii „Y” [4].

Podsumowanie

1. Linie dużych prędkości wymagają zasilania w systemie 25 kV AC (2 x 25 kV AC).
2. Podstacje trakcyjne w systemie zasilania trakcji elektrycznej 2 x 25 kV AC wprowadza asymetrię do systemu elektroenergetycznego. Ograniczenie poziomu asymetrii możliwe jest przez zastosowanie odpowiednich rozwiązań transformatorów trakcyjnych oraz zapewnienie wymaganego poziomu mocy zwarciowej w punkcie zasilania podstacji trakcyjnych.
3. Podstacje trakcyjne w systemie 2 x 25 kV wyposażane są w minimum dwa transformatory o mocy do 60 MVA i wymagają zasilania z systemu o mocy zwarciowej powyżej 6 GVA, co może być spełnione na poziomie napięć 400 kV i w niektórych przypadkach dla napięcia 220 kV.
4. W wyjątkowych przypadkach zastosowanie transformatorów w układzie Scott'a pozwala na zasilanie podstacji trakcyjnych w systemie 2 x 25 kV napięciem 110 kV, jednak wówczas ograniczona jest moc podstacji oraz maksymalna odległość między nimi.
5. Moc pobierana przez podstacje trakcyjne jest wartością szybkozmienną o wartościach od zera do kilkudziesięciu MVA. Wartości chwilowe obciążeń transformatorów mogą przekraczać ich moc znamionową.

Literatura

1. Rojek Artur. Tabor, zasilanie trakcji elektrycznej i elektroenergetyka kolejowa. PKP Polskie Linie Kolejowe S.A. i KOW, Warszawa 2010.
2. Rojek Artur. System zasilania linii dużych prędkości w Polsce – wybrane problemy. Nowoczesne technologie w realizacji projektów inwestycyjnych transportu kolejowego. Jurata 2010.
3. Szelaż Adam, Mierzejewski Leszek. Systemy zasilania linii kolejowych dużych prędkości jazdy. Technika Transportu Szynowego nr 5-6/2005.
4. Studium Wykonalności dla budowy linii kolejowej dużych prędkości „Warszawa – Łódź – Poznań/Wrocław”. Inżynieria IDOM Internacional S.A. Biuro Projektów Komunikacyjnych w Poznaniu Sp. z o.o. Warszawa, Październik 2011.

Autorzy: dr inż. Artur Rojek, e-mail: arojek@ikolej.pl
mgr inż. Wiesław Majewski, e-mail: wmajewski@ikolej.pl
Instytut Kolejnictwa, ul. Chłopickiego 50, 04-275 Warszawa