

Jakość energii elektrycznej zasilającej trakcję elektryczną PKP – oddziaływania wzajemne

Polskie Koleje Państwowe są jednym z największych odbiorców energii elektrycznej, ze zużyciem energii elektrycznej na ponad 4000 GWh rocznie, w tym na cele trakcyjne około 3800 GWh. Kolej zużywa około 4% energii w skali kraju. Trakcja elektryczna PKP jest zasilana napięciem stałym 3000 V, a energia dostarczana przez energetykę państwową w postaci 3-fazowego prądu przemiennego jest w znacznej części przetwarzana w podstacjach trakcyjnych na napięcie stałe.

Podstacje trakcyjne są dla energetyki odbiorami korzystnymi, ponieważ energię pobierają w ciągu całej doby, w tym w godzinach nocnych i przy wysokim $\cos\phi$, ale układy prostownicowe wprowadzają do sieci zasilających harmoniczne, które zniekształcają napięcie zasilające. Z drugiej strony patrząc, energetyka dostarcza do podstacji trakcyjnych napięcie 3-fazowe 15 kV, ale często odkształcone i często z dużą asymetrią fazową, co powoduje pojawianie się niekorzystnych harmonicznych w sieci trakcyjnej, oddziałujących szkodliwie na pojazdy trakcyjne, zwłaszcza nowoczesne, oraz na obwody zabezpieczenia ruchu pociągów (srk). W artykule podano niektóre aspekty niekorzystnych oddziaływań wzajemnych i metody zaradcze dla niektórych zagadnień.

Rozwój trakcji elektrycznej w aspekcie problemów zasilania

Od początku zastosowania energii elektrycznej do napędu pojazdów trakcyjnych poszukiwano optymalnego systemu zasilania trakcji. Po wielu doświadczeniach i eksperymentach, z systemem zasilania 3-fazowego włącznie, ostatecznie w I połowie XX w. ukształtowały się dwa systemy zasilania trakcji kolejowej: prądu stałego o napięciach 1500 V i 3000 V oraz system zasilania napięciem przemiennym jednofazowym 15 kV 16 2/3 Hz. Było to spowodowane wyborem szeregowego silnika komutatorowego do napędu pojazdów, którego charakterystyki najlepiej (a jak niektórzy uważali, wręcz idealnie) odpowiadały potrzebom napędo-

wym pojazdów trakcyjnych przy stosunkowo prostej regulacji. Silniki te wymagały jednak zasilania napięciem stałym. Silniki szeregowy mogły także pracować przy zasilaniu napięciem przemiennym, ale o obniżonej częstotliwości. Te dwa systemy zasilania i silniki szeregowy były powszechnie stosowane w trakcji elektrycznej aż do czasu pojawienia się układów energoelektronicznych na początku lat 60. Wtedy możliwe stało się prostowanie napięcia bezpośrednio w pojeździe trakcyjnym, a zatem zastosowanie systemu zasilania 25 kV 50 Hz. Wtedy też silnik szeregowy zaczął tracić swoją monopolistyczną pozycję w napędach trakcyjnych, początkowo na rzecz silników obcowzbudnych prądu stałego, a następnie 3-fazowych silników asynchronicznych i synchronicznych.

W Polsce przyjęto system zasilania 3000 V prądu stałego, który wtedy był uważany za najnowocześniejszy. Opracowany w 1918 r. projekt elektryfikacji kolei w Polsce przewidywał w I etapie wprowadzenie trakcji elektrycznej w Warszawskim Węźle Kolejowym (WWK), a następnie elektryfikację kolejnych linii. Do zasilania trakcji zastosowano podstacje trakcyjne, wyposażone w zespoły prostownicowe, rozmieszczone co ok. 25 km [1]. Były one zasilane z sieci energetycznych 3-fazowych o najwyższym wtedy dostępnym napięciu – 35 kV. Jeśli dodatkowo uwzględnić, że obciążenie podstacji było wtedy znacznie mniejsze niż obecnie (6 podstacji z prostownikami rtęciowymi o łącznej mocy 35 MW), był to system bardzo nowoczesny i korzystny dla energetyki.

Po II wojnie światowej odbudowano trakcję elektryczną na bazie prądu stałego o napięciu 3000 V i początkowo przy zasilaniu podstacji z sieci 30 kV. Tym systemem jest zelektryfikowane ponad 10 000 km linii kolejowych – jest to jedyny obecnie system zasilania trakcji w Polsce i w dającej się przewidzieć perspektywie czasowej, poza zastosowaniem jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV, nie ulegnie on zmianie.

Aktualne warunki zasilania trakcji elektrycznej oraz potrzeby w zakresie mocy i jakości energii

W okresie powojennym do zasilania kolejowych podstacji trakcyjnych zastosowano napięcie 3-fazowe 30 kV, uzyskiwane przez transformację napięcia 110/30 kV. W latach 60. energetyka przyjęła jako podstawowy system zasilania średniego napięcia – 15 kV i liniami o takim napięciu zaczęto realizować zasilanie podstacji trakcyjnych. Wynikało to z koncepcji rozbudowy systemu zasilania 110 kV i przyjęcia jako następnej wielkości – napięcia 15 kV. Doprowadziło to do likwidacji linii 30 kV i przejścia podstacji, nawet dotychczas zasilanych napięciem 30 kV, na zasilanie z linii 15 kV, będących podstawowym zasilaniem różnych odbiorców przemysłowych i komunalnych. Tylko na Śląsku są podstacje trakcyjne zasilane z linii 20 kV. Zwiększanie mocy podstacji, wynikające ze stosowania coraz większych prędkości i większej mocy pojazdów trakcyjnych, spowodowało konieczność wprowadzenia zasilania podstacji bezpośrednio napięciem 110 kV. Pierwsza taka podstacja została zainstalowana na linii CMK. Dla sprostania zwiększającym się potrzebom prze-

wozowym na liniach magistralnych niezbędne będzie szybkie wzmocnienie systemu zasilania.

Oddziaływanie odbiorów prostownikowych trakcji elektrycznej na 3-fazowe linie zasilające

Napięcie w 3-fazowych sieciach zasilających powinno mieć kształt sinusoidalny. Zalecane odkształcenie napięcia v_{pd} nie powinno przekraczać 5%, a graniczne odkształcenie napięcia v_{pd} nie powinno być większe niż 10%. Rzeczywisty kształt przebiegów czasowych napięcia i prądu zawsze różni się od idealnej sinusoidy. Nierównomierność te powstają już w samym generatorze, jako wynik nie uniknionej nierównomierności rozkładu strumienia w szczelinie powietrznej między wirnikami a biegunami stojana, ale głównym źródłem odkształceń są tzw. nieliniowe odbiorniki dużej mocy.

Odbiornik nieliniowy – ze względu na jego budowę i zasadę działania – pobiera z sieci zasilającej prąd odkształcony. Jednym z takich odbiorów nieliniowych jest prostownikowa podstacja trakcyjna. Prostowanie prądu 3-fazowego za pomocą prostownika niesterowanego daje przepływ prądu w każdej fazie tylko przez część półokresu sinusoidy napięcia [2]. Powoduje to powstawanie wyższych harmonicznych (wh) po stronie napięcia wyprostowanego w postaci napięć przemiennych $h(u)$ o częstotliwościach $f_h(u)$, nałożonych na składową stałą prądu wyprostowanego, określonych następującymi zależnościami:

$$h(u) = mp$$

$$f_h(u) = mp_{fs}$$

a po stronie prądu przemiennego w zasilającej sieci energetycznej w postaci prądów harmonicznych $h(i)$ o częstotliwościach $f_h(i)$, opisanych zależnościami:

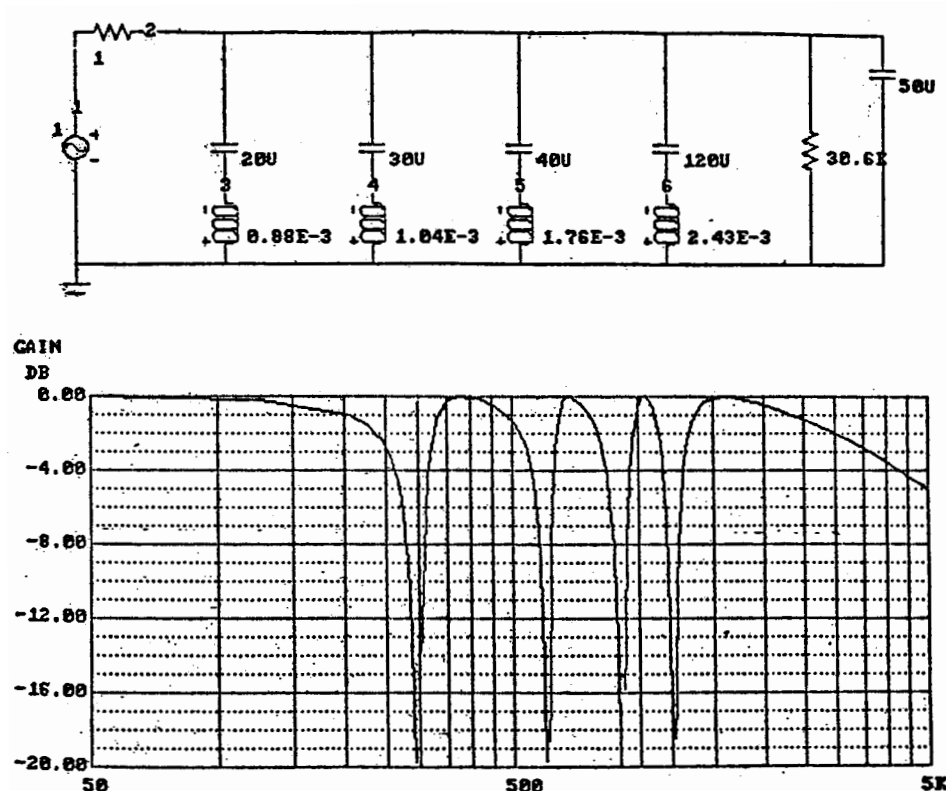
$$h(i) = mp + 1$$

$$f_h(i) = (mp + 1)f_s$$

gdzie:

f_s – częstotliwość sieci zasilającej prądu przemiennego,
 p – wskaźnik tętnienia układu prostownikowego ($p = 6$ dla prostowników 6-pulsowych, albo $p = 12$ dla nowych rozwiązań podstacji 12-pulsowych),
 m – kolejne liczby całkowite, np. 1, 2, 3...

Odkształcenie sinusoidy napięcia po stronie zasilającej podstację prostownikową zależy od rodzaju zastosowanego układu prostownikowego, ale głównie od mocy znamionowej podstacji trakcyjnej, odniesionej do wartości mocy zwarciowej w punkcie przyłączenia podstacji do sieci energetycznej. W aktualnych warunkach zasilania podstacji trakcyjnych PKP moc zwarciowa na wejściu podstacji nie jest wysoka; wynika to z zasilania podstacji z sieci przemysłowych średniego napięcia – 15 kV. Jest to jeden z niekorzystnych skutków przeniesienia zasilania podstacji trakcyjnych z napięcia 30 kV na 15 kV. Planowane w najbliższym czasie wprowadzenie do eksploatacji na PKP lokomotyw o mocy 6000 kW jeszcze ten stan pogorszy. Dlatego jednym ze środków zaradczych na liniach dostosowanych do dużych prędkości będzie instalowanie podstacji trakcyjnych, zasilanych bezpośrednio z linii 110 kV.

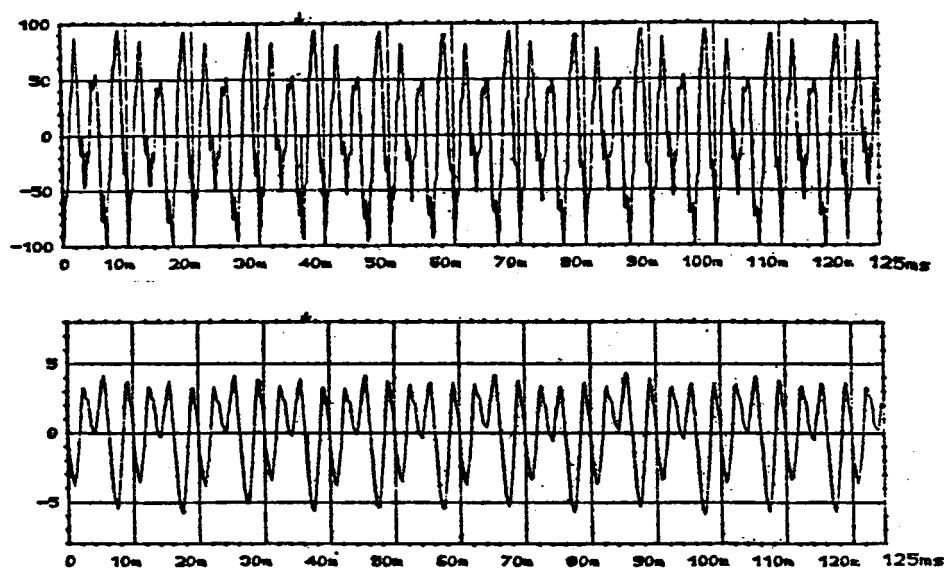


Rys. 1. Schemat ideowy filtrów rezonansowych w podstacji z prostownikami 6-pulsowymi i jego charakterystyka częstotliwościowa $Z = f(f)$

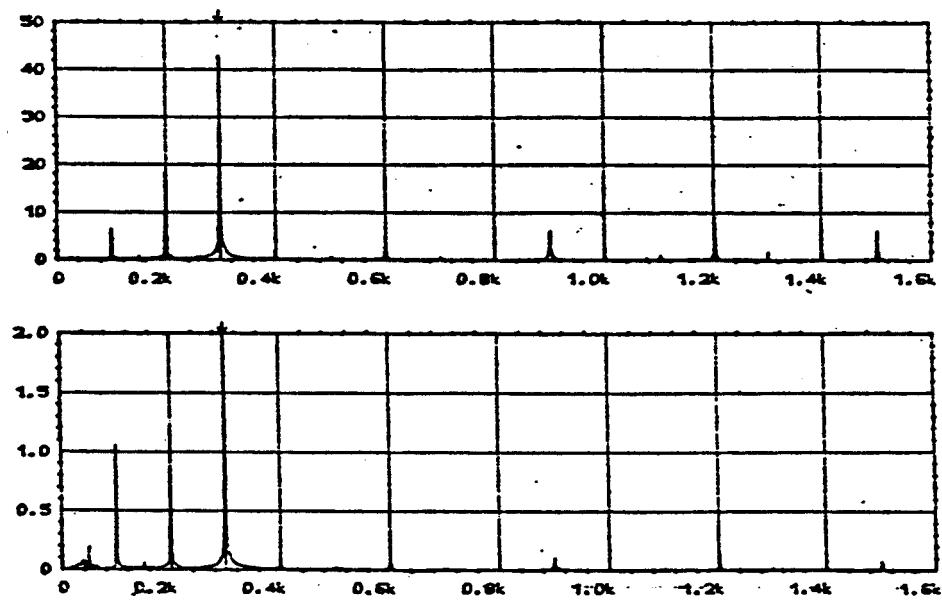
Harmoniczne w napięciu zasilającym trakcji elektrycznej i ich wpływ na pracę pojazdów trakcyjnych, urządzenia srk i łączności

Elektryczny pojazd trakcyjny jest zasilany w układzie, składającym się z podstacji trakcyjnej, sieci napowietrznej i szyn kolejowych, stanowiących obwód powrotny dla prądu trakcyjnego. W podstacjach najczęściej są stosowane prostowniki diodowe 6-pulsowe, na wyjściu prostownika są zainstalowane filtry rezonansowe na częstotliwości 300, 600, 900 i 1200 Hz, oraz człon RC (30,6 kΩ, 50 μF). Schemat ideowy filtrów na podstacji i ich charakterystykę częstotliwościową przedstawiono na rysunku 1. Wyprostowane i odfiltrowane napięcie jest dostarczane poprzez sieć do pojazdu trakcyjnego. Nowsze, obecnie stosowane podstacje są wyposażane w prostowniki 12-pulsowe, które generują mniejsze składowe harmoniczne po stronie prądu stałego, a także po stronie zasilania prądem przemiennym.

Obecnie PKP eksploatuje pojazdy z rozruchem rezystorowym i silnikami prądu stałego. Pojazd taki przedstawia obciążenie o charakterze rezystancyjno-indukcyjnym, z przewagą obciążenia rezystancyjnego. Taki pojazd praktycznie nie generuje składowych harmonicznych. Odmiennie przedstawia się problem pojazdu, w którym zastosowano sterowanie energoelektroniczne. W przypadku takiego pojazdu na wejściu zasilania jest zainstalowany filtr sieciowy, ograniczający tętnienia prądu, pobieranego z sieci do wartości nie wprowadzających zakłóceń w obwodach zabezpieczenia ruchu kolejowego. W najprostszym wykonaniu jest to filtr typu Γ (LC), składający się z indukcyjności kilku i więcej mH i pojemności rzędu mF. Częstotliwość rezonansowa takich filtrów jest zawsze poniżej 50 Hz. Podczas badań elektrycznego zespołu trakcyjnego EN57, wyposażonego w układ impulsowego sterowania silników trakcyjnych, stwierdzono przepływ znaczących prądów przez filtr nawet wtedy, kiedy układ impulsowy był wyłączony. Szczegółowe badania, podjęte dla określenia skali zjawiska, pozwoliły stwierdzić występowanie znaczących tętnień napięcia stałego, wynoszących kilkadziesiąt woltów. Tętnienia te są źródłem znaczących tętnień prądu, płynącego w obwodzie filtra. Przebiegi składowej zmiennej napięcia i prądu płynącego przez filtr wejściowy przy niepracującym przekształtniku impulsowym przedstawiono na rysunku 2. Tętnienia napięcia i prądu, wynikające z niesymetrii zasilania po stronie prądu przemiennego, mogą być większe niż tętnienia spowodowane pracą układu impulsowego. Analiza widmowa tych tętnień (rys. 3) pozwoliła ustalić występowanie w napięciu wyprostowanym składowych harmonicznych o częstotliwości 50, 100 i 200 Hz, harmonicznych, których teoretycznie być nie powinno. Stwierdzono, że składowe te są efektem niesymetrii napięć fazowych po stronie prądu przemiennego, w liniach energetycznych 15 kV na wejściu podстанции. [3]. Włączenie sterowania energoelektronicznego powoduje generowanie dodatkowego widma składowych harmonicznych, które nakładają się na harmoniczne już istniejące, wynikające z prostowania prądu i niesymetrii po stronie zasilania 3-fazowego. Przeprowadzone analizy komputerowe pokazują, że filtr wejściowy podстанции może wzmacniać niektóre harmoniczne, generowane przez układ sterujący pojazdu w różnych pasmach widma częstotliwościowego [4]. Odpowiedni dobór filtra wejściowego pozwala na ograniczenie amplitudy niektórych harmo-



Rys. 2. Oscylogramy napięcia i prądu w sieci trakcyjnej po załączeniu zasilania filtra wejściowego pojazdu sterowanego impulsowo



Rys. 3. Charakterystyki widmowe napięcia i prądu, pokazanych na rysunku 2 – $Z = f(f)$

nicznych, ale przy nałożeniu się składowych od niesymetrii zasilania po stronie prądu przemiennego filtr może okazać się mało skuteczny. Zastosowanie podстанции trakcyjnych, zasilanych bezpośrednio z linii 110 kV, powinno wyeliminować, a przynajmniej radykalnie zmniejszyć niesymetrię po stronie zasilania, a zatem i zawartość harmonicznych 50, 100 i 200 Hz w napięciu sieci trakcyjnej prądu stałego.

Perspektywy rozwoju trakcji elektrycznej

Obecnie produkowane pojazdy trakcyjne są wyposażone w różnorodne, często bardzo skomplikowane układy sterowania, pozwalające na dostosowanie ich do dowolnego napięcia zasilającego, optymalizujące własności trakcyjne, ułatwiające pracę maszyniście oraz poprawiające niezawodność i bezpieczeństwo jazdy. Natomiast systemy zasilania trak-

cji, ukształtowane w I połowie XX w. pozostają nie zmienne, mimo że wiele z nich wykazuje poważne niedogodności eksploatacyjne. Moc zainstalowana w pojazdach trakcyjnych, zwłaszcza na duże prędkości i sterowanych energoelektronicznie, wzrosła nawet do ponad 6000 kW. Występują coraz większe trudności z przesyłem i odbiorem tak dużej mocy przy stosunkowo niskim napięciu zasilającym 3000 V. Dodatkowo przesyłanie dużych prądów w sieci trakcyjnej powoduje znaczne straty w układzie zasilania, które są oceniane na ok. 7% energii pobieranej przez pojazd trakcyjny [5]. Jeśli dodać do tego straty energii w samym pojeździe trakcyjnym (sprawność znamionowa pojazdów trakcyjnych sterowanych energoelektronicznie jest poniżej 90%, a realna – jeszcze niższa), koszty energii zużywanej na cele trakcyjne będą wysokie. Będzie to niekorzystnie wpływać na rentowność kolei, ponieważ już obecnie koszt energii elektrycznej w ogólnych kosztach eksploatacji trakcji wynosi około 40%. Obecne tendencje na rynku energii w Polsce wskazują, że cena energii elektrycznej będzie raczej rosła. Dlatego poprawa sprawności trakcji i ograniczenie niekorzystnych oddziaływań, związanych z pracą sterowanych energoelektronicznie pojazdów, powinna być jednym z najważniejszych problemów do rozwiązania. Znaczącą część tych problemów dotyczy układów zasilania trakcji.

Wnioski

Perspektywy rozwoju kolei w Polsce, pomimo problemów restryktoryzacyjnych, na najbliższe lata wskazują na znaczącą intensyfikację przewozów kolejowych na liniach magistralnych, zwiększenie prędkości pociągów i wprowadzenie pociągów prowadzonych lokomotywami dużej mocy. Będzie to wymagało zmiany infrastruktury także w dziedzinie zasilania.

Już obecnie wiadomo, że do sprostania tym wymaganiom niezbędne będą poważne inwestycje także w dziedzinie energetycznej. Przy zmianie systemu zasilania podstacji z 15 kV na 110 kV mogą pojawić się nowe zagrożenia w dziedzinie kompatybilności elektromagnetycznej systemu zasilania z obwodami sterowania ruchem i łączności. Przy projektowaniu modernizacji systemów zasilania znaczącą uwagę należy poświęcić zagadnieniom eliminacji i ograniczenia harmonicznych w sieci oraz ich wpływowi na inne urządzenia zewnętrzne.

□

Literatura

- [1] Bożentowicz L.: *Aktualne i przewidywane warunki zasilania energią elektryczną trakcji elektrycznej PKP*. Konferencja SEP pt: Jakość energii elektrycznej dla zasilania trakcji PKP. Warszawa 1989.
- [2] Korzycki E.: *Informacje i obliczenia dotyczące odkształcenia krzywej napięcia w liniach zasilających tradycyjne przekształtniki diodowe*. Konferencja SEP pt: Jakość energii elektrycznej dla zasilania trakcji PKP. Warszawa 1989.
- [3] Gąsiński T., Walczyna A.: *Wpływ tętnień napięcia sieci trakcyjnej na dobór filtrów wejściowych pojazdów, wyposażonych w układy RHI*. Konferencja SEP pt: Jakość energii elektrycznej dla zasilania trakcji PKP. Warszawa 1989.
- [4] Janiszewski P., Walczyna A.: *Modelowanie i symulacja oddziaływań prądów harmonicznych między pojazdem trakcyjnym a systemem zasilania 3 kV*. Prace CNTK nr 113, 1995.
- [5] Capasso A., Morelli V.: *Electrification of the new Italian high speed railway network – survey of 3 kV DC and 2×25 kV AC alternatives*. II Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Modern supply systems and drives for electric traction”. Warszawa, październik 1995.

Międzynarodowa Konferencja Techniczna

Nowoczesne rozwiązania techniczne w komunikacji tramwajowej

Wrocław, 30 maj – 2 czerwiec 2000 r.

Organizatorzy:

Zarząd Oddziału SITK we Wrocławiu
Oddział Wrocławski SEP

przy udziale:

Zarządu Dróg i Komunikacji we Wrocławiu
Izby Gospodarczej Komunikacji Miejskiej

Informacje:

tel./fax (0-71) 343 18 74, 344 85 91