

# Wyższe harmoniczne w linii zasilającej przy jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV

**Pojawienie się nowych układów zasilania trakcji kolejowej bezpośrednio z sieci energetyki 110 kV, zamiast powszechnie stosowanego zasilania z sieci 15 kV (ewentualnie 30 kV), wzbudziło oczekiwania istotnej poprawy warunków zasilania pojazdów trakcyjnych, zwłaszcza pojazdów o dużych mocach, które eksploatowane są już dzisiaj, ale przede wszystkim, które niewątpliwie będą potrzebne w przyszłości. Jest to problem dużej wagi i jest rzeczą pożądaną spojrzeć na to zagadnienie z wielu stron, tak aby ograniczyć do minimum możliwość popełnienia jakiegokolwiek błędu, czy zaniedbania i uniknąć w przyszłości niepotrzebnych zawodów i ponoszenia dodatkowych kosztów.**

Dobłą okazją do przemyśleń jest artykuł opisujący pierwsze doświadczenia z eksploatacji dwóch podstacji trakcyjnych z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV, wybudowanych na przestrzeni ostatnich dwóch lat (podstacja Huta Zawadzka i podstacja Barłogi), napisany przez Konrada Tulińskiego i opublikowany w *tts* 10/2001 [8].

Niezwykle ważnym problemem występującym przy budowie zasilających układów prostownikowych jest problem powstawania wyższych harmonicznych prądu i napięcia, jako efektu ubocznego przekształcania prądu przemiennego na prąd stały. Przy dużych jednostkach prostownikowych, takich

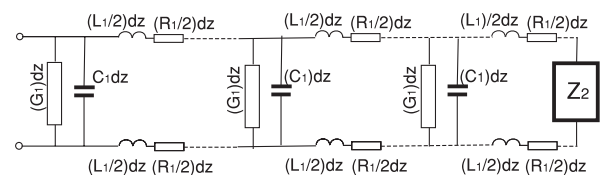
jakie występują w podstacjach kolejowych, wyższe harmoniczne prądu i napięcia są nośnikami dość znacznych wartości mocy, których przepływy w sieciach mają najczęściej negatywne oddziaływanie [3]. W układzie prostownikowym 12-pulsowym, jaki najbardziej upowszechnił się w zespołach zasilających sieć trakcyjną, wyższe harmoniczne prądu mają w przybliżeniu wartości podane w tabelicy 1.

Wyższe harmoniczne prądu za pośrednictwem transformatora prostownikowego przenoszone są do sieci zasilającej, która w tym przypadku jest siecią wysokiego napięcia 110 kV. Najczęściej poza ogólnym stwierdzeniem, że takie prądy występują, brak jest w dostępnych publikacjach jakiegokolwiek szerszej informacji co się dalej z tymi prądami dzieje, jak rozprzyskują się one w sieci zasilającej, jakie moce są przenoszone za pośrednictwem tych prądów i napięć oraz jak są one spożytkowane. Aby prześledzić jak prądy wyższych harmonicznych przepływają w sieci zasilającej nie wystarczy ograniczyć się tylko do klasycznej analizy opartej na prawach Ohma i Kirchhoffa. Do pełnego poznania wpływu wyższych harmonicznych na zjawiska przenoszenia energii elektrycznej w sieci wysokiego napięcia konieczne jest poznanie zjawisk falowych, jakie występują w linii zasilającej, która w rozważaniach powinna być potraktowana jako tzw. linia długa. Zjawiska powstające w takich liniach opisywane są przez równania telegrafistów. Energetycy zajmujący się wysokimi mocami nieczęsto sięgają do takiej analizy i dlatego będzie rzeczą pożyteczną przypomnienie pokrótce jak zachowuje się linia długa pod wpływem wymuszeń o różnych częstotliwościach.

Analiza linii zasilającej będzie przeprowadzona w oparciu o schemat zastępczy (rys. 1), na którym linia przedstawiona jest w postaci łańcucha szeregowo połączonych elementarnych odcinków (o nieskończeniu małych długościach –  $dz$ ), składających się z elementów impedancji o stałych skupionych. Poszczególne symbole na schemacie oznaczają:

$R_1, G_1$  – rezystancja i konduktancja na jednostkę długości linii,

$L_1, C_1$  – indukcyjność i pojemność na jednostkę długości linii.



Tablica 1

## Wartości harmonicznych prądu

| Rząd harmonicznej | Wartość amplitudowa prądu<br>(w stosunku do harmonicznej podstawowej) |
|-------------------|---|
| 11                | 9,1   |
| 13                | 7,7   |
| 23                | 4,3   |
| 25                | 4,0   |
| 35                | 2,9   |
| 37                | 2,7   |

Rys. 1. Układ zastępczy linii długiej

Dla elementarnego odcinka linii o długości  $dz$  można napisać zależności dla prądu i napięcia w sposób następujący:

$$\frac{dU}{dz} = I(R_1 + j\omega L_1) = IZ_1 \quad (1)$$

$$\frac{dI}{dz} = U(G_1 + j\omega C_1) = UY_1$$

gdzie:

$$Z_1 = R_1 + j\omega L_1 \quad (2)$$

$$Y_1 = G_1 + j\omega C_1$$

Różniczkując równania (1) względem parametru  $Z$  otrzymuje się dwa równania różniczkowe drugiego stopnia, o następującej postaci:

$$\frac{d^2 U}{dz^2} - U Z_1 Y_1 = 0 \quad (3)$$

$$\frac{d^2 I}{dz^2} - I Z_1 Y_1 = 0$$

Rozwiązaniem takiego układu równań różniczkowych są dwie następujące zależności na napięcie i prąd w linii długiej:

$$U = A_1 e^{\gamma z} + B_1 e^{-\gamma z} \quad (4)$$

$$I = A_2 e^{\gamma z} + B_2 e^{-\gamma z}$$

gdzie:

$$\gamma = \sqrt{Z_1 Y_1} = \sqrt{(R_1 + j\omega L_1)(G_1 + j\omega C_1)} = \alpha + j\beta \quad (5)$$

Poszczególne symbole w tym równaniu określane są jako współczynnik:

$\alpha$  – tłumienia fali,

$\beta$  – fazowy,

$\gamma$  – propagacji fal.

Równania (4) na napięcie i prąd można zinterpretować w ten sposób, że każda z tych wielkości składa się z dwóch składowych, z których pierwsza oznacza falę padającą wychodzącą ze źródła (składnik z  $A_1$  lub  $A_2$ ), natomiast druga jest falą odbitą na końcu linii i powracającą do źródła. Obie fale dodają się do siebie na całej długości linii i w ten sposób powstają w poszczególnych punktach linii wartości wypadkowe.

Po wyznaczeniu w równaniach (4), zwyczajnymi metodami, stałych całkowania  $A_1$ ,  $A_2$ ,  $B_1$ ,  $B_2$  uzyskuje się ostatecznie następujące równania opisujące zjawiska zachodzące w linii długiej:

$$U = U_2 \cosh \gamma z + I_2 Z_0 \sinh \gamma z \quad (6)$$

$$I = I_2 \cosh \lambda z + \frac{U_2}{Z_0} \sinh \lambda z$$

gdzie:

$U_2$  i  $I_2$  – napięcie i prąd na końcu linii długiej,

$U$ ,  $I$  – napięcie i prąd na początku linii,

$Z_0$  – impedancja falowa linii.

Parametr  $Z_0$  może być wyznaczony z równania:

$$Z_0 = \sqrt{\frac{R_1 + j\omega L_1}{G_1 + j\omega C_1}} \quad (7)$$

Dla zwiększenia czytelności w równaniach (6) można dokonać jeszcze następujących uproszczeń:

– pominąć wartość  $G_1$ , co dla linii 110 kV jest jak najbardziej uzasadnione,

– pominąć wartość  $R_1$ , jako znacznie mniejszą od  $\omega L_1$  (to uproszczenie jest uzasadnione, lecz przy dokładnej analizie może wymagać skorygowania).

Ostatnie równanie na impedancję przyjmuje wówczas następującą postać:

$$Z_0 = R_0 = \sqrt{\frac{L_1}{C_1}} \quad (8)$$

Należy zauważyć, że w tym przypadku wielkość  $Z_0$  ma charakter czysto rezystancyjny i dlatego oznaczona została jako  $R_0$  i jest to rezystancja falowa linii.

Współczynnik propagacji fal  $\gamma$  upraszcza się w tym przypadku do postaci  $\gamma = j\beta$ . Natomiast równania telegrafistów mogą być teraz zapisane następująco:

$$U = U_2 \cos \beta z + jI_2 R_0 \sin \beta z \quad (9)$$

$$I = I_2 \cos \beta z + \frac{U_2}{Z_0} \sin \beta z$$

Przy dokonanych uproszczeniach powyższe równania można zinterpretować następująco:

– napięcie na jednym końcu linii długiej jest równe napięciu na drugim końcu i pomnożonemu przez cosinus kąta przesunięcia fazowego  $\beta z$  (powstającego przy przesuwaniu się fali napięcia wzdłuż linii) plus spadek napięcia powstający na rezystancji falowej  $R_0$ , pomnożony przez sinus kąta przesunięcia fazowego (dodawanie geometryczne),

– prąd na wejściu linii jest równy prądowi na wyjściu pomnożonemu przez cosinus kąta przesunięcia fazowego  $\beta z$  plus iloraz napięcia wyjściowego przez rezystancję falową linii, pomnożony przez sinus kąta przesunięcia fazowego.

Kąt przesunięcia fazowego  $\beta z$  może być wyliczony z równania (5) przez podniesienie do kwadratu obu stron równania i wyznaczeniu części rzeczywistej i urojonej. Część urojona będzie współczynnikiem fazowym  $\beta$ , natomiast część rzeczywista będzie współczynnikiem tłumienia  $\alpha$  fali. Przyjmując w dalszym ciągu, że  $G_1 = 0$ , otrzymuje się zależność:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \sqrt{\frac{1}{2} \left[ 1 + \sqrt{1 + \left( \frac{R_1}{\omega L_1} \right)^2} \right]} \quad (10)$$

Jeżeli dodatkowo przyjąć, że również  $R_1 = 0$ , to uzyskuje się prostą zależność:

$$\beta = \frac{2\pi}{\lambda} \quad (11)$$

Kąt przesunięcia fazowego  $\varphi = \beta z$  może być obecnie określony następująco:

$$\varphi = \frac{2\pi z}{\lambda} \quad (12)$$

Zależność ta wyraźnie wskazuje, że przesunięcie fazowe w linii długiej jest tym większe, im dłuższa jest linia przesyłowa, ale praktycznie ma to wówczas znaczenia, gdy długość linii jest porównywalna z długością fali  $\lambda$ . Jeżeli dłu-

gość linii jest pomijalnie mała w stosunku do długości fali powstającej w tej linii, to przesunięcie fazowe jest praktycznie równe zero i linia może być traktowana jako czwórnik o stałych skupionych.

Linia 110 kV łączy ze sobą z jednej strony transformator zasilający (przeważnie 220 kV), a z drugiej – transformator prostownikowy. Najczęściej do linii dołączone są jeszcze inne transformatory energetyczne. Wszystkie te transformatory z punktu widzenia linii długiej stanowią obciążenie reaktancyjne.

Przeanalizujmy jeszcze, jak zachowuje się linia długa, do której na końcu dołączona została reaktancja  $X_2$  (rys. 2).

W punkcie końcowym linii oczywista jest zależność:

$$\frac{U_2}{I_2} = Z_2 = jX_2 \quad (13)$$

Podstawiając tę zależność do równań (9) uzyskuje się po kilku prostych przekształceniach następujący układ równań:

$$\begin{aligned} U &= U_2 \frac{\cos(\beta z - \varphi_1)}{\cos \varphi_1} \\ I &= j \frac{U_2 \sin(\beta z - \varphi_1)}{R_0 \cos \varphi_1} \end{aligned} \quad (14)$$

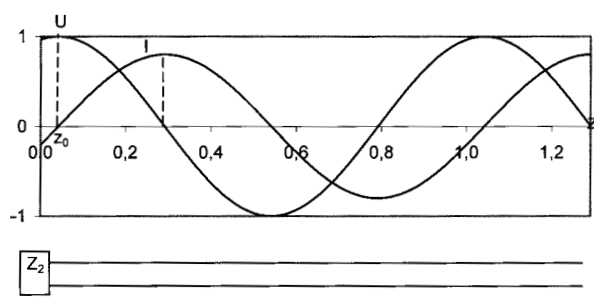
gdzie:

$$\varphi_1 = \arctg \frac{R_0}{X_2}$$

Z tego układu równań wynika, że w linii obciążonej reaktancją powstaje fala stojąca, a maksymalne napięcie nie występuje ani na jej początku linii, ani na jej końcu, lecz pośrodku w odległości równej:

$$z_0 = \frac{\varphi_1}{\beta} = \lambda \frac{\varphi_1}{2\pi}$$

Przebiegi prądu i napięcia, występujące w tym przypadku w linii pokazano na rysunku 2.



Rys. 2. Przebiegi fal napięcia i prądu w linii długiej obciążonej reaktancją

Z zależności (9) i (14) wynika, że w linii długiej powstają fale stojące prądu i napięcia, w których brzośce i węzły oddalone są od siebie o  $1/4$  długości fali ( $\lambda$ ). Oznacza to, że jeżeli na początku linii występuje maksymalna wartość napięcia, to w odległości równej czwartej części długości fali wartość napięcia spada do zera. W przypadku napięcia o częstotliwości 50 Hz nie jest to kłopotliwe, gdyż nie spo-

tyka się, przynajmniej w naszym kraju, linii o długości porównywalnej z  $1/4$  długości fali (zob. tabl. 2). Natomiast dla wyższych harmonicznych właściwość ta staje się jak najbardziej realna. W tablicy 2 podano długości fal odpowiadające wyższym harmonicznym, występującym w układzie prostownikowym 12-pulsowym.

Tablica 2

#### Długości fal odpowiadające wyższym harmonicznym

| Rząd harmonicznej | Częstotliwość [Hz] | $1/4$ długości fali [km] |
|-------------------|--------------------|--------------------------|
| 1                 | 50                 | 1500,0                   |
| 11                | 550                | 136,4                    |
| 13                | 650                | 115,4                    |
| 23                | 1150               | 65,2                     |
| 25                | 1250               | 60,0                     |
| 35                | 1750               | 42,9                     |
| 37                | 1850               | 40,5                     |

Z tablicy wynika, że w linii zasilającej kolejowy zespół prostownikowy o napięciu pierwotnym 110 kV mogą być obserwowane zjawiska falowe dla wyższych harmonicznych prądu i napięcia, szczególnie wówczas, gdy linie zasilające mają długości sięgające kilkudziesięciu kilometrów lub więcej. Przy dwustopniowej transformacji napięcia linie zasilające 15 kV mają znaczne mniejsze długości i efekty falowe są tu mniej dostrzegalne, tym niemniej nie mogą być całkowicie pomijane. Linie zasilające, w których występują znaczące wyższe harmoniczne, stają się antenami emitującymi do środowiska naturalnego fale elektromagnetyczne. Kolejowe zespoły prostownikowe, wytwarzające w sieci zasilającej wyższe harmoniczne prądu o dużych wartościach, mogą stać się poważnym źródłem zakłóceń elektromagnetycznych na dużych obszarach kraju. Szczególną cechą tych specyficznych anten jest to, że maksymalne natężenia zakłóceń nie powstaje na ich końcach (np. przy prostowniku), lecz w pewnych odległościach od nich. **Dlatego, aby dobrze ocenić emisję zakłóceń linii zasilającej 110 kV należałoby dokonać pomiarów natężeń o określonych częstotliwościach na całej jej długości, nie tylko na jej krańcach.** Odpowiadając na pytanie co dzieje się z energią przenoszoną przez wyższe harmoniczne w sieci zasilającej trzeba stwierdzić, że znaczna część energii zostaje wypromieniowana do środowiska naturalnego w postaci fal elektromagnetycznych zanieczyszczających to środowisko, część energii zostaje wytracona w transformatorach do niej dołączonych i niewielka część przedostaje się do sieci innych napięć. Moc wypromieniowywana przez sieć 110 kV w postaci fal elektromagnetycznych, powodowanych przez wyższe harmoniczne, jest tym większa, im większy jest stosunek długości linii do długości fali, przy czym jak wykazują szczegółowe obliczenia zależność ta występuje w drugiej potęgce. Przy długościach linii zbliżonych do długości fali są to wartości znaczne i dlatego ich działanie może być bardzo uciążliwe, zarówno dla urządzeń wrażliwych na zakłócenia, których spotyka się coraz więcej u coraz szerszej gru-

py użytkowników, jak i na środowisko naturalne, a więc na organizmy żywe znajdujące się w pobliżu linii.

### Podsumowanie

Linie zasilające stacje prostownikowe kolejowe o napięciu 110 kV powinny być projektowane ze szczególną starannością z uwzględnieniem także efektów falowych, pochodzących od wyższych harmonicznych. Ważnymi czynnikami, wpływającym na powstawanie niekorzystnych zjawisk elektromagnetycznych w linii, jest długość i konfiguracja linii zasilającej, co powinno być przedmiotem dogłębnej analizy. Ponadto wskazane jest unikać zasilania kilku stacji prostownikowych z jednej linii 110 kV, gdyż mogą powstawać efekty wzajemnej interferencji fal, prowadzącej do wzmocnienia emisji szkodliwego promieniowania elektromagnetycznego. Aby zredukować niekorzystne efekty wywoływane przez wyższe harmoniczne, powinno budować się układy prostownikowe wyższej klasy, tj. o większej liczbie pulsów w ciągu okresu, niż to ma miejsce obecnie w układach 12-pulsowych oraz stosować dodatkowe filtry zmniejszające emisję wyższych harmonicznych do sieci zasilającej 110 kV.

Bez podjęcia środków zmierzających do ograniczenia emisji fal elektromagnetycznych, emitowanych przez linie 110 kV zasilające zespoły prostownikowe, mogą powstawać konflikty z mieszkańcami będącymi w zasięgu ich oddziaływania na skutek przekroczenia dopuszczalnych norm promieniowania [3].



### Literatura

- [1] *Prawo Energetyczne*. Ustawa z 10.04.1997 r. Dz.U. nr 54 (4.06.1997) ze zmianami Dz.U. nr 158 (24.12.1997 r.).
- [2] *Rozporządzenie ministra gospodarki w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, pokrywania kosztów przyłączenia, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców*. Dz.U. nr 135 z 21.10.1998 r.
- [3] *Rozporządzenie ministra ochrony środowiska, zasobów naturalnych i leśnictwa w sprawie szczegółowych zasad ochrony przed promieniowaniem szkodliwym dla ludzi i środowiska, dopuszczalnych poziomów promieniowania, jakie mogą występować w środowisku, oraz wymagań obowiązujących przy wykonywaniu pomiarów kontrolnych promieniowania*. Dz.U. nr 107 z 11.08.1988 r.
- [4] Kurczewski W.: *Układy prostownikowe 18-pulsowe do zasilania sieci trakcyjnej*. Technika Transportu Szynowego 3/1999.
- [5] Kurczewski W.: *Układy prostownikowe 18-pulsowe*. Przegląd Elektrotechniczny 4/2001.
- [6] Mierzejewski L., Szelaąg A.: *Filtry wygładzające w podstacjach kolejowych prądu stałego 3 kV*. Technika Transportu Szynowego 1-2/2000.
- [7] Rojek A.: *Zespół z jednostopniową transformacją napięcia 110/3 kV*. Technika Transportu Szynowego 3/1999.
- [8] Tuliński K.: *Doświadczenia z wdrożenia jednostopniowej transformacji napięcia 110/3 kV w podstacjach trakcyjnych PKP S.A.* Technika Transportu Szynowego 10/2001.
- [9] Wasiluk-Hassa M.: *Jakość energii elektrycznej w warunkach funkcjonowania konkurencyjnego rynku*. Wiadomości Elektrotechniczne 3/1999.

Autor

Wiesław Kurczewski  
Zakład Elektroniki Przemysłowej ENIKA