

## METODY LOKALIZACJI ŹRÓDEŁ WYŻSZYCH HARMONICZNYCH W SIECIACH ZASILAJĄCYCH

Daniel BIGAJ, Zbigniew HANZELKA  
Akademia Górniczo-Hutnicza

### 1. WSTĘP

Często, w przypadku znaczącego odkształcenia napięcia w sieci zasilającej, w złączu pomiędzy dostawcą i odbiorcą energii elektrycznej, występuje potrzeba zlokalizowania źródła tego zaburzenia. Nabiera to szczególnego znaczenia w okresie formułowania kontraktów na dostawę energii i egzekwowania, poprzez taryfy, opłat za pogarszanie jakości zasilania. W wielu przypadkach wymagane jest także określenie ilościowego udziału dostawcy i odbiorcy (odbiorców) energii w całkowitym odkształceniu napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP).

Wiele praktycznych metod lokalizacji źródeł harmoniczných opiera się na badaniu kierunku przepływu mocy czynnej dla poszczególnych harmoniczných. W niniejszym artykule autorzy zwracają uwagę na ograniczenia w stosowaniu tej metody. W tym celu porównano rezultaty otrzymane w efekcie jej stosowania z efektami stosowania metody zaproponowanej przez Xu [9, 10], uznawanej w literaturze przedmiotu za jedną z najlepszych do określania udziału dostawcy i odbiorcy w całkowitym odkształceniu napięcia i/lub prądu w PWP. Inne metody proponowane w licznych pozycjach literatury tj. badanie kierunku przepływu mocy biernej i „impedancji krytycznej” [4], iniekcja interharmoniczných [8], wyznaczanie względnych wartości prądu i napięcia [1, 2] itp., prócz złożoności technicznej realizacji wymagają posiadania dokładnych informacji o wartościach parametrów zastępczych analizowanego systemu, a są to dane trudno dostępne lub uzyskiwane w efekcie kosztownych pomiarów.

### 2. OKREŚLENIE KIERUNKU PRZEPŁYWU MOCY CZYNNEJ DLA ROZWAŻANEJ HARMONICZNEJ

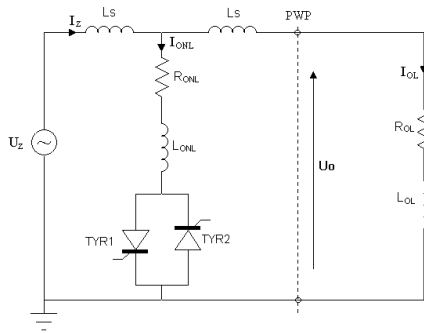
Dominujące źródło rozważanej harmoniczných ( $h$ -tego rzędu) można zlokalizować określając kierunek przepływu mocy czynnej dla tej harmoniczných w różnych punktach systemu. Niezerowa wartość mocy:  $P_h = U_h I_h \cos(\Theta_{uh} - \Theta_{ih})$  jest efektem interakcji napięcia i prądu o tej samej częstotliwości. Odbiornik o charakterze liniowym zasilany odkształconym napięciem pobiera moc czynną dla każdej harmoniczných -  $P_h \geq 0$ . Jeżeli po stronie odbiorcy istnieją elementy nieliniowe, moc czynna dla niektórych harmoniczných może być oddawana do sieci zasilającej -  $P_h < 0$ . Znak  $P_h$  można określić na podstawie pomiaru kątów fazowych harmoniczných napięcia i prądu tego samego rzędu:  $\Theta_{uh}$  i  $\Theta_{ih}$ .

Dla prezentacji istoty metody wykorzystano jednofazowy obwód przedstawiony na rysunku 1 (źródło napięcia zasilającego -  $U_z$ ,  $L_s$ ), w którym przyjęto jako odbiornik nieliniowy sterownik tyrystorowy (TYR1, TYR2, rezystancja -  $R_{ONL}$ , indukcyjność  $L_{ONL}$ ), będący

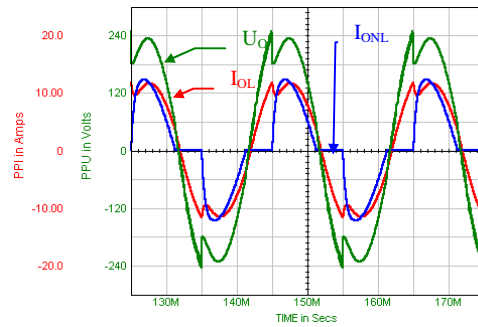
źródłem harmonicznych prądu o rzędach:  $h = 2k \pm 1 = 3, 5, 7, 9, 11, 13, 15, \dots$  (dla  $k = 1, 2, 3, \dots$ ). Rozpatrzono kilka przypadków wyróżnionych miejscem lokalizacji źródła odkształcenia napięcia w których przekształtnik tyrystorowy znajduje się: (i) powyżej PWP, (ii) poniżej PWP, (iii) źródła harmonicznych znajdują się po obydwu stronach PWP.

### Przykład 1: Źródło harmonicznych przyłączone powyżej PWP

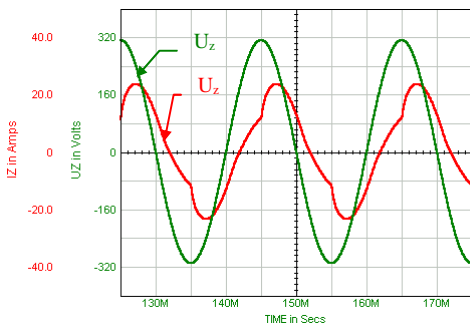
Przykład (rys. 1) odpowiada sytuacji, gdy stroną generującą harmoniczne jest wyłącznie dostawca energii elektrycznej. W tym przypadku moc czynna przepływa od dostawcy do odbiorcy, a kierunek mocy czynnych dla poszczególnych harmonicznych ma znak dodatni.



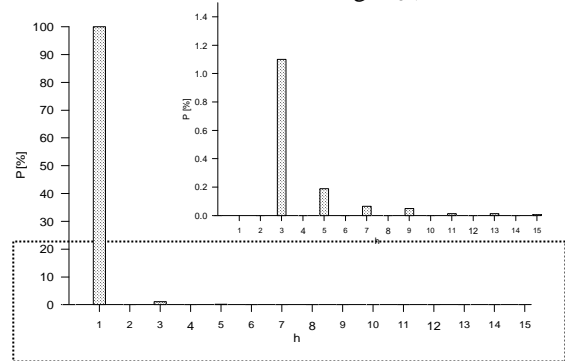
Rys. 1. Model sieci elektroenergetycznej ze źródłem wyższych harmonicznych powyżej PWP



Rys. 2. Przebiegi napięcia  $U_o$ , prądu  $I_{OL}$  oraz prądu odbiornika nieliniowego  $I_{ONL}$



Rys. 3. Przebieg napięcia  $U_z$  i prądu źródła zasilania  $I_z$



Rys. 4. Moce czynne dla poszczególnych harmonicznych

Rysunek 2 przedstawia przebiegi napięcia  $U_o$  i prądu  $I_{OL}$  w punkcie PWP oraz prądu odbiornika nieliniowego  $I_{ONL}$  ( $R_{ONL}, R_{OL}, L_{ONL}, L_{OL} \neq 0$ ), a rysunek 3 napięcie i prąd źródła zasilania. Moce czynne poszczególnych harmonicznych - o rzędach nie większych niż 15 (Tabela 1 oraz rysunek 4) mają dodatni znak dla wszystkich rzędów harmonicznych niezależnie od charakteru odbiornika. Wskazuje to jednoznacznie na odpowiedzialność dostawcy za występujące odkształcenie przebiegów czasowych.

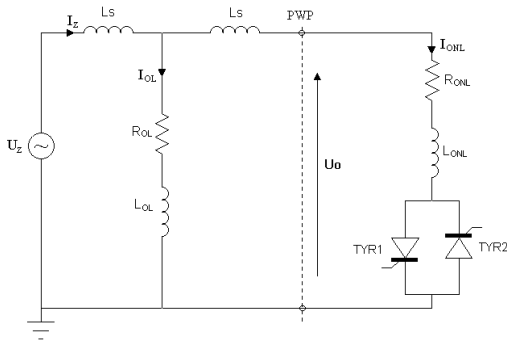
### Przykład 2: Źródło harmonicznych przyłączone poniżej PWP

Przykład ze źródłem harmonicznych znajdującym się poniżej PWP (rys. 5) odpowiada sytuacji, w której stroną generującą harmoniczne jest wyłącznie odbiorca energii elektrycznej. Rysunek 6 przedstawia przebiegi napięcia  $U_o$  i prądu  $I_{ONL}$  w punkcie PWP oraz prądu odbiornika liniowego  $I_{OL}$ , a rysunek 7 napięcie i prąd źródła zasilania. W tym przypadku moce czynne dla poszczególnych harmonicznych mają ujemne znaki, co zgodnie z przyjętą konwencją znakowania oznacza ich przepływ od odbiorcy na stronę dostawcy energii (rys. 8). Świadczy to o odpowiedzialności odbiorcy energii elektrycznej za generowanie harmonicznych.

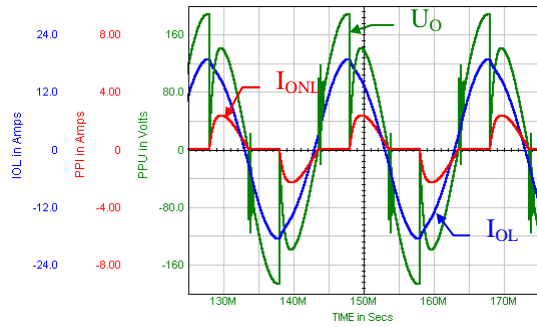
Tabela 1. Napięcia, prądy oraz moce dla wyróżnionych harmonicznych w PWP (PRZYKŁAD 1)

Rząd harmonicznej ( $h$ )	Wartość $U_{m_h}$ [V]	Faza [°]	Wartość $I_{m_h}$ [V]	Faza [°]	P[W]	Q [VAR]
1	246,81	-30,5	12,29	-34,8	1512,56	115,37
2	0,27	123,0	1,0E-05	110,1	1,44E-06	3,3E-07
3	26,21	-88,2	1,29	-99,3	16,62	3,24
4	0,24	-30,4	9,5E-06	-47,2	1,12E-06	3,3E-07
5	11,57	105,4	0,51	87,9	2,84	0,89
6	0,23	166,7	8,5E-06	148,9	9,71E-07	3,1E-07
7	7,3	-102,4	0,30	-132,8	0,98	0,57
8	0,28	5,0	8,1E-06	-19,1	1,05E-06	4,7E-07
9	6,75	89,3	0,27	53,4	0,74	0,53
10	0,34	-147,1	8,3E-06	175,4	1,14E-06	8,8E-07
11	3,59	-89,4	0,14	-133,4	0,18	0,17
12	0,38	66,7	8,3E-06	15,7	9,987E-07	1,2E-06
13	3,58	71,3	0,13	29,4	0,18	0,16
14	0,35	-78,2	7,6E-06	-139,7	6,51E-07	1,2E-06
15	3,32239	-96,0	0,10	-138,7	0,121	0,11
	<b>THD<sub>U</sub>: 12,54 %</b>		<b>THD<sub>I</sub>: 11,9467 %</b>			

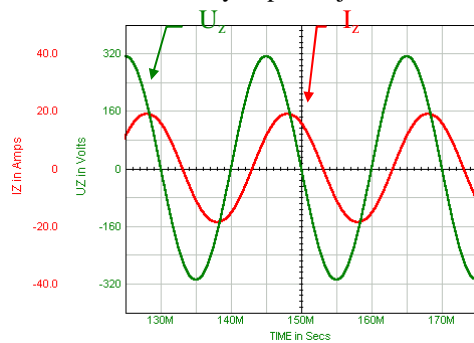
$U_{m_h}, I_{m_h}$  – amplituda napięcia i prądu



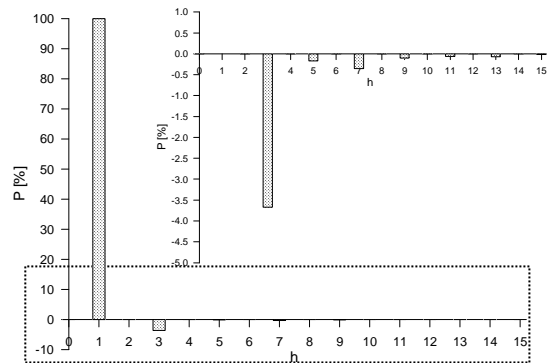
Rys. 5. Model sieci energetycznej ze źródłem harmonicznych poniżej PWP



Rys. 6. Przebiegi napięcia  $U_O$ , prądu  $I_{ONL}$  oraz prądu odbiornika liniowego  $I_{OL}$



Rys. 7. Przebieg napięcia  $U_z$  i prądu źródła zasilania  $I_z$

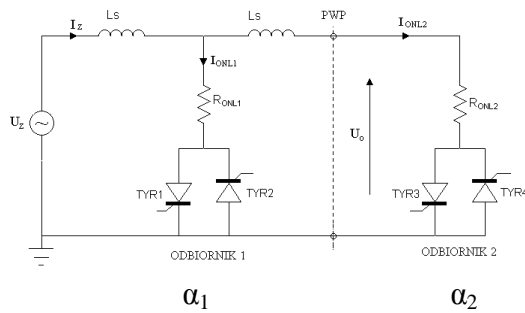


Rys. 8. Moce czynne dla poszczególnych harmonicznych

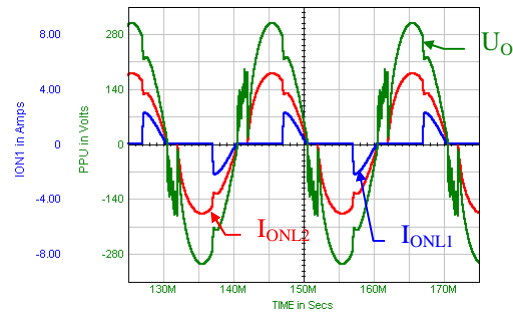
### Przykład 3: Źródła wyższych harmonicznych znajdują się po obydwu stronach PWP

Poniższy przykład ze źródłami odkształcenia po obydwu stronach PWP ilustruje stan w którym zarówno dostawca jak i odbiorca energii elektrycznej generują harmoniczne. W sieciach rozgałęzionych, w przypadku obecności wielu różnych odbiorników nieliniowych,

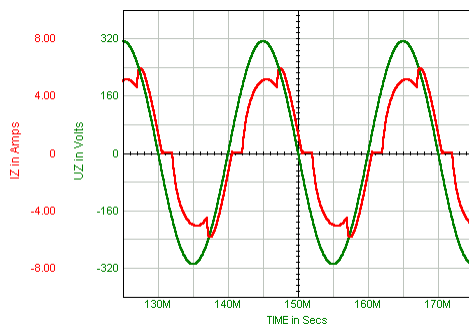
przepływy mocy czynnej różnych odbiorników sumują się. Powoduje to pojawianie się różnych kierunków przepływu tej mocy.



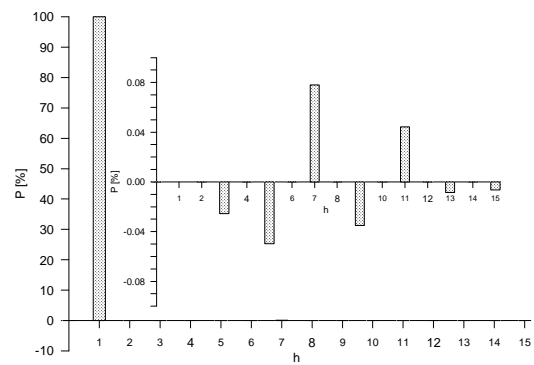
Rys. 9. Model sieci energetycznej z odbiornikami nieliniowymi po stronie dostawcy i odbiorcy energii



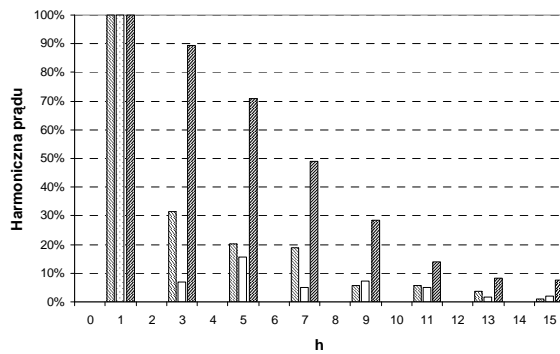
Rys. 10. Przebiegi napięcia  $U_O$ , prądu  $I_{ONL2}$  oraz prądu odbiornika nieliniowego  $I_{ONL1}$  powyżej PWP (kąty wysterowania łącznika tyrystorowego:  $\alpha_1 > \alpha_2$ )



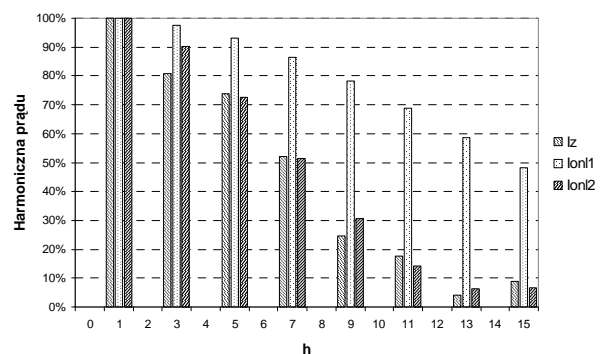
Rys. 11. Przebieg napięcia  $U_z$  i prądu źródła zasilania  $I_z$  ( $\alpha_1 > \alpha_2$ )



Rys. 12. Moce czynne dla poszczególnych harmonicznych



Rys. 13. Wzmocnienie harmonicznych w PWP

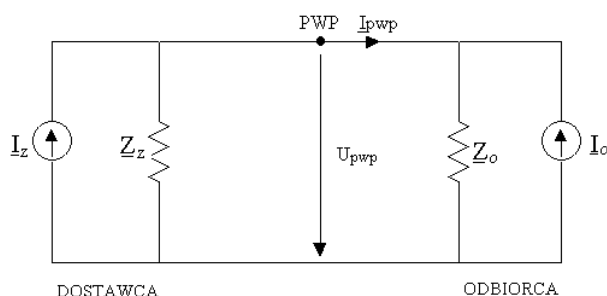


Rys. 14. Redukcja harmonicznych w PWP

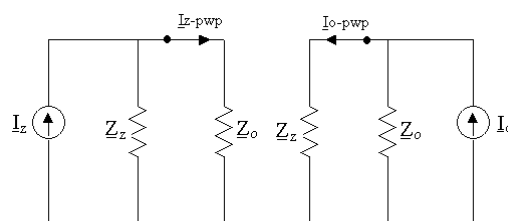
W zależności od wartości kątów wysterowania  $\alpha$  łączników tyrystorowych, jedna ze stron: dostawca lub odbiorca będzie dominować w wytwarzaniu odkształcenia napięcia. Przebiegi napięcia  $U_O$  oraz prądów odbiorników  $I_{ONL1,2}$  i prądu odbiornika liniowego  $I_{OL}$  przedstawia rysunek 10, a rysunek 11 napięcie i prąd źródła zasilania. Wyniki obliczeń mocy czynnych dla poszczególnych harmonicznych napięcia i prądu (do 15 rzędu) prezentuje rysunek 12. W przypadku źródeł harmonicznych po obydwu stronach PWP może wystąpić, w zależności od przesunięcia fazowego, redukcja harmonicznych jak na rysunku 14, lub przeciwnie może dojść do wzmocnienia harmonicznej co przedstawia rysunek 13. W takim przypadku wnioskowanie odnośnie do lokalizacji źródeł harmonicznych jest utrudnione i nie jest możliwe jednoznaczne wskazanie na jedną ze stron jako sprawcę zaburzenia. Dodatkowo nie jest możliwe ilościowe określenie udziałów odbiorcy i dostawcy energii w całkowitym odkształceniu napięcia lub prądu w PWP.

### 3. METODA "IMPEDANCYJNA" [9, 10]

Wskazanie „winowajcy” odpowiedzialnego za generowanie harmonicznych wymaga rozwiązania dwóch problemów: (i) dokonania oceny udziału dostawcy i odbiorcy w odkształceniu napięcia/prądu w PWP. Każda ze stron powinna odpowiadać wyłącznie za swój „wkład” w całkowite odkształcenie; (ii) wyodrębnienia przypadków, gdy zmieniająca się wartość zastępczej impedancji sieci lub odbiorcy jest przyczyną naruszenia ustanowionych limitów zawartości harmonicznych. Bardzo często pod wpływem zmniejszenia wartości impedancji zastępczej dostawcy zwiększa się udział harmonicznych prądu w PWP, które będą pochodzić od odbiorcy. W tym wypadku nie można obciążyć odbiorcy winą za dodatkowe generowanie harmonicznych. Podobnie, gdy dla zwiększonej impedancji po stronie dostawcy maleje zawartość harmonicznych w PWP, odbiorca nie powinien z tego tytułu otrzymywać żadnej bonifikaty. Dotyczy to także zmian impedancji zastępczej odbiorcy.



Rys. 15. Uproszczony obwód do analizy harmonicznych



Rys.16 Modyfikacja obwodu z rysunku 15 ilustrująca udziały źródeł harmonicznych dostawcy i odbiorcy energii

Na rysunku 15 wielkości  $\underline{I}_z$ ,  $\underline{Z}_z$  reprezentują odpowiednio prąd i impedancję zastępczą po stronie zasilania (dostawcy); natomiast  $\underline{I}_o$ ,  $\underline{Z}_o$  reprezentują odpowiednio prąd i impedancję po stronie odbiorcy. Rozważane wielkości dotyczą pojedynczej harmonicznej  $h$ . rzędu

#### Stała wartość impedancji dostawcy i odbiorcy

W tym przypadku wartości impedancji zastępczych analizowanego obwodu (impedancja dostawcy i odbiorcy) są stałe. Zmiana prądu w PWP jest wywoływana wyłącznie zmianą prądu dostawcy  $\underline{I}_z$  i/lub prądu odbiorcy  $\underline{I}_o$ . W praktyce dostawca informuje odbiorcę o wartości  $\underline{Z}_z$  (mocy zwarciowej) w PWP i każdorazowych jej zmianach. Stałą impedancję  $\underline{Z}_z$ , przyjęto w dalszej części rozważań jako impedancję referencyjną (kontraktową) -  $\underline{Z}_{z-referencyjne}$  - systemu zasilania wykorzystywaną dla potrzeb sporządzenia kontraktu pomiędzy dostawcą i odbiorcą. Analogicznie stała impedancja po stronie odbiorcy  $\underline{Z}_o$  będzie traktowana jako impedancja referencyjna odbiorcy -  $\underline{Z}_{o-referencyjne}$ . Na tym etapie zakłada się, że impedancje  $\underline{Z}_z$  i  $\underline{Z}_o$  są zmierzone, a ich wartości ściśle określone. Prądy źródeł harmonicznych po stronie zasilania i po stronie odbiorcy można wyrazić zależnościami:

$$\underline{I}_z = \frac{U_{pwp}}{\underline{Z}_z} + \underline{I}_{pwp}, \quad \underline{I}_o = \frac{U_{pwp}}{\underline{Z}_o} - \underline{I}_{pwp} \quad (1)$$

gdzie:  $\underline{U}_{pwp}$  i  $\underline{I}_{pwp}$  są odpowiednio napięciem i prądem rozważanej harmonicznej w PWP. Udziały prądów pochodzących odpowiednio od dostawcy i odbiorcy (rys. 16), składających się na sumaryczny prąd  $\underline{I}_{pwp}$ , obliczane są z zasady superpozycji:

$$\underline{I}_{z-pwp} = \frac{\underline{Z}_z}{\underline{Z}_z + \underline{Z}_o} \underline{I}_z \quad \underline{I}_{o-pwp} = \frac{\underline{Z}_o}{\underline{Z}_z + \underline{Z}_o} \underline{I}_o \quad (2)$$

Całkowity prąd  $I_{pwp}$  w PWP:

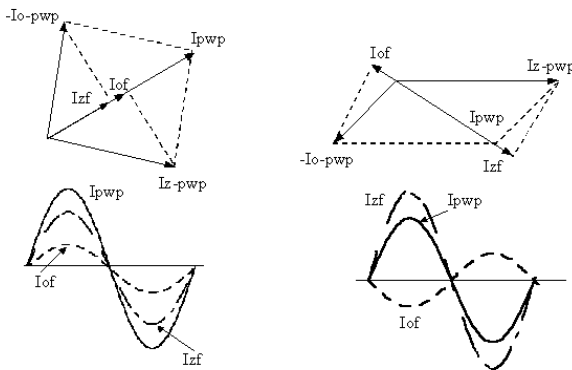
$$\underline{I}_{pwp} = \underline{I}_{z-pwp} + (-\underline{I}_{o-pwp}) \quad (3)$$

można rozłożyć na dwie składowe skalarnie jak na rysunku 17 i wyrazić zależnością:

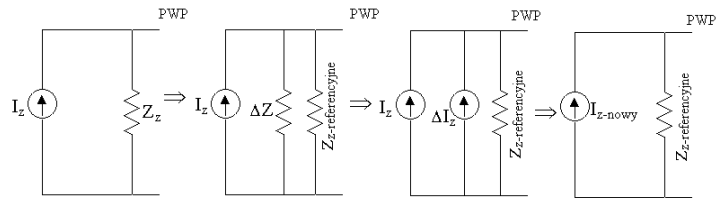
$$|\underline{I}_{pwp}| = I_{of} + I_{zf} \quad (4)$$

gdzie  $I_{of}$  jest rzutem  $\underline{I}_{o-pwp}$  na kierunek  $\underline{I}_{pwp}$ , a  $I_{zf}$  rzutem  $\underline{I}_{z-pwp}$  na kierunek  $\underline{I}_{pwp}$ . Zatem  $|\underline{I}_{pwp}|$  jest sumą algebraiczną dwóch składowych. Składowe te mogą posłużyć jako wskaźniki charakteryzujące udział harmonicznych dostawcy i odbiorcy w całkowitym prądzie w PWP. Obydwie składowe są skalarami i mogą przyjmować różne znaki. Jeżeli posiadają ten sam znak to harmoniczne odbiorcy i dostawcy dodają się tworząc prąd  $\underline{I}_{pwp}$ . Jeżeli posiadają przeciwne znaki, wartość rozważanej harmonicznej w PWP podlega redukcji. Dodatni znak  $I_{zf}$  lub  $I_{of}$  oznacza dodawanie się harmonicznych w PWP.

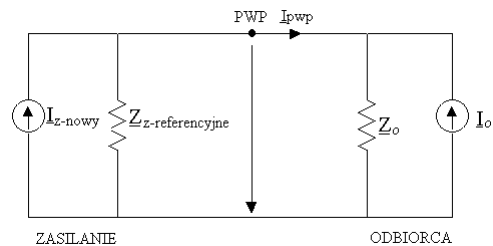
### Zmienna wartość impedancji sieci zasilającej



Rys. 17. Rozkład prądu  $I_{pwp}$  na dwie składowe  $I_{zf}$  i  $I_{of}$  a) wzrost, b) redukcja prądu w PWP



Rys. 18. Konwersja zmian impedancji  $\Delta Z$  w równoważną jej zmianę prądu źródła



Rys. 19. Obwód zastępczy po przekształceniu impedancji  $Z_z$

Za przykład może posłużyć zmiana impedancji, będąca skutkiem załączenia równoległej baterii kondensatorów. Wartość impedancji sieci  $Z_z$  może zostać zmniejszona, przez co zwiększy się udział harmonicznych prądu przepływającego od odbiorcy do dostawcy. W tym przypadku odbiorca nie powinien być karany za powstanie warunków sprzyjających wzrostowi udziału harmonicznej (wzrost prądu  $I_{of}$ , a co za tym idzie wzrost prądu  $\underline{I}_{pwp}$  zgodnie z wyrażeniem (4)). Podobnie w przypadku wzrostu wartości impedancji  $Z_z$ , udział harmonicznych odbiorcy ulegnie redukcji. Fakt ten nie powinien być podstawą do udzielenia bonifikaty przez dostawcę na rzecz odbiorcy z tytułu zmniejszenia odkształcenia. Inną przyczynę zmian wartości impedancji  $Z_z$  można upatrywać w różnicy pomiędzy impedancją referencyjną, a jej rzeczywistą wartością w PWP. Zjawisko zmian wartości impedancji źródła zasilania powinno być uwzględnione przy określaniu udziałów harmonicznych dla obydwu partnerów obrotu energia elektryczną.

Idea proponowanej metody polega na takiej transformacji analizowanego obwodu, która pozwoli zamienić składową zmienną  $\Delta Z$  impedancji  $Z_z$  w równoważną zmianę harmonicznej prądu źródła  $\Delta I_z$  - rysunek 18. Wyrażenia opisujące prąd w PWP oraz prąd źródła zasilania przyjmują postać:

$$\underline{I}_{pwp} = \underline{I}_{z-nowy} - \frac{\underline{U}_{pwp}}{\underline{Z}_{z-referencyjne}} \quad \underline{I}_{z-nowy} = \frac{\underline{U}_{pwp}}{\underline{Z}_{z-referencyjne}} + \underline{I}_{pwp} \quad (5)$$

Takie przekształcenie umożliwia analizowanie przypadku zmiennej impedancji  $\underline{Z}_z$  zgodnie z koncepcją przedstawioną dla stałych impedancji obwodu (rys. 19). Można wówczas wyznaczyć nowe wartości  $I_{zf}$  i  $I_{of}$ , co będzie przedstawione w dalszej części. Udział harmonicznego odbiorcy reprezentowany przez nową wartość  $I_{of}$  pozostaje stały, niezależnie od zmian w systemie zasilania.

### Zmienna wartość impedancji odbiorcy

Typowym przykładem jest wyłączenie filtra po stronie odbiorcy. W konsekwencji prąd w punkcie wspólnego przyłączenia może wzrosnąć lub zmaleć w zależności od impedancji sieci i wartości prądu źródła. Tym razem odbiorca powinien ponosić odpowiedzialność za konsekwencje tego stanu. I w tym przypadku zmiany impedancji zastępczej odbiorcy  $\underline{Z}_o$  można przekształcić w ekwiwalentną harmoniczną prądu  $\underline{I}_o$  generowaną po stronie odbioru zgodnie z wyrażeniem:

$$\underline{I}_{o-nowy} = \frac{\underline{U}_{pwp}}{\underline{Z}_{o-referencyjne}} - \underline{I}_{pwp} \quad (6)$$

Procedura sformułowana dla stałych impedancji dostawcy i odbiorcy, może być wykorzystana do analizy obwodu po przekształceniu składowej zmiennej impedancji w równoważne prądowe źródło harmonicznego.

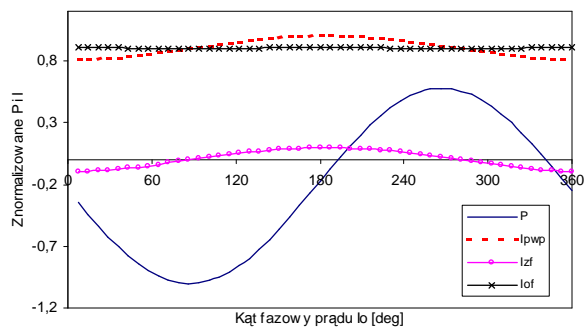
W rzeczywistości obydwie impedancje  $\underline{Z}_z$  i  $\underline{Z}_o$  mogą ulegać zmianie podobnie jak i prądy  $\underline{I}_z$  i  $\underline{I}_o$ . Gdy składowe zmienne impedancji  $\Delta Z$  są przekształcone w równoważne zmiany  $\Delta I_z$  lub  $\Delta I_o$  harmonicznego źródła prądu, wówczas nowe źródła prądu zawierają w sobie zmienną składową impedancji i składową harmoniczną źródła prądu.

Kolejne kroki analizy w przypadku tej metody przedstawiają się następująco: (i) określana jest wartość impedancji  $\underline{Z}_{z-referencyjne}$  oraz  $\underline{Z}_{o-referencyjne}$ , (ii) mierzone są napięcia  $\underline{U}_{pwp}$  i prąd  $\underline{I}_{pwp}$ , (iii) wyznaczane są równoważne prądy  $\underline{I}_{z-nowe}$  oraz  $\underline{I}_{o-nowe}$  (zależności (6)), (iv) wyznaczane są równoważne prądy  $\underline{I}_{z-pwp}$  oraz  $\underline{I}_{o-pwp}$  (zależność (2)), (v) wyznaczane są rzuty  $\underline{I}_{z-pwp}$  oraz  $\underline{I}_{o-pwp}$  na kierunek  $\underline{I}_{pwp} - I_{zf}$  i  $I_{of}$ , (vi) oceniane są udziały harmonicznego dostawcy i odbiorcy energii w prądzie w PWP.

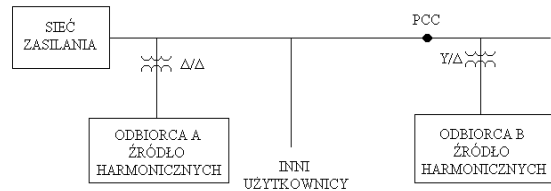
## **4. PORÓWNANIE METODY "ZNAKU MOCY CZYNNEJ" I „IMPEDANCYJNEJ” [9]**

Prawdziwość metody opartej na kierunku przepływu mocy czynnej można sprawdzić poprzez analizę przykładu, w którym przyjęto wartości  $\underline{I}_o$ ,  $\underline{I}_z$ ,  $\underline{Z}_o$  oraz  $\underline{Z}_z$ , odpowiadające jednej przykładowo wybranej harmonicznego odpowiednio:  $\underline{I}_z = 1e^{j0^\circ}$  [A]  $\underline{Z}_z = (1.0 + j8.0)$  [Ω]  $\underline{I}_o = 1e^{j\varphi_o}$  [A]  $\underline{Z}_o = (1.0 + j8.0)$  [Ω]. Kąt fazowy  $\varphi_o$  prądu  $\underline{I}_o$  zmienia się w przedziale od  $0^\circ$  do  $360^\circ$ , natomiast kąt fazowy prądu  $\underline{I}_z$  ma stałą wartość  $0^\circ$ . Sprawdzeniu podlega relacja pomiędzy kierunkiem przepływu mocy czynnej a wskaźnikami uzyskanymi w efekcie rzutowania wektorów prądu zgodnie z metodą „impedancyjną”. Jeżeli metoda przepływu mocy jest poprawna to prawdziwą powinna być zależność:

$$\text{Jeżeli } P > 0 \text{ to } I_{zf} > I_{of} \quad (7)$$



Rys. 20. Wzajemna relacja pomiędzy mocą czynną i wskaźnikami wyznaczonymi zgodnie z metodą „impedancyjną”



Rys. 21. Przykład obwodu w którym w efekcie skojarzenia uzwojeń transformatorów może wystąpić duża wartość kąta przesunięcia fazowego pomiędzy  $\underline{L}_z$  i  $\underline{L}_o$

Rezultaty obliczeń przedstawia rysunek 20. Są to zmiany mocy rozważanej harmonicznej  $P$ , prądu  $I_{pwp}$  i jego składowych  $I_{zf}$  oraz  $I_{of}$  w funkcji kąta fazowego  $\varphi_0$  prądu  $\underline{I}_o$ . Poprzez normalizację mocy i prądów względem ich wartości maksymalnych uzyskano zmienność wszystkich rozważanych wielkości w przedziale od  $-1$  do  $1$ . Widać wyraźnie, że występują przedziały wartości kąta w których warunek (7) nie jest spełniony. Przykładowo  $I_{of}$  jest zawsze większy niż  $I_{zf}$  i strona odbiorcy powinna być traktowana jako główne źródło harmonicznych, jeżeli metodę opartą na wskaźnikach  $I_{of}$  i  $I_{zf}$  przyjmijemy za prawdziwą. Na rysunku 20 widać, że moc czynna rozważanej harmonicznej zmienia znak. Jeżeli jego wartość jest większa niż  $190^\circ$ , metoda kierunku przepływu mocy jest sprzeczna z metodą rzutowania wektorów („impedancyjną”). Ponieważ nie ma gwarancji, że kąt przesunięcia fazowego pomiędzy  $\underline{L}_z$  i  $\underline{L}_o$  będzie zawarty w przedziale wartości gwarantującym poprawność wnioskowania w oparciu o kontrolę kierunku przepływu mocy, można przyjąć, że metoda ta jest niewłaściwa dla lokalizacji źródeł harmonicznych. Na rysunku 21 przedstawiono przypadek, w którym kąt przesunięcia fazowego pomiędzy  $\underline{L}_z$  i  $\underline{L}_o$  może być bardzo znaczący.

## 5. BADANIE KIERUNKU PRZEPIYU MOCY BIERNEJ [4]

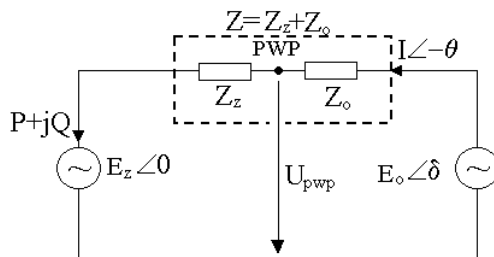
Jeżeli znane są przybliżone wartości impedancji zastępczych, wówczas, na podstawie kontroli kierunku przepływu mocy biernej, jest możliwe rozwinięcie praktycznej i wiarygodnej metody wykrywania źródła harmonicznych.

W pierwszym kroku procedury ocenia się moc bierną „wygenerowaną”, przez źródło zasilania. Na tej podstawie wyznaczana jest impedancja (lub admitancja) zastępcza. Impedancja ta (lub admitancja) jest nazywana krytyczną  $Z_K$  (ang. *critical impedance*). Przez porównanie  $Z_K$  (lub  $Y_K$ ) ze znaną impedancją (admitancją) linii zasilającej łączącej dostawcę i odbiorcę energii można wskazać lokalizację dominującego źródła harmonicznych. Metoda posiada zalety zarówno metody kierunku przepływu mocy czynnej jak i metod opartych na pomiarze impedancji.

### Podstawy teoretyczne metody

Rozważany jest model sieci, w którym strona dostawcy i odbiorcy reprezentowane są przez odpowiednie źródła i impedancje zgodnie ze schematem zastępczym Nortona jak na rysunku 15.





Rys. 22. Model sieci wg Thevenina

Zadanie lokalizacji źródła harmonicznych opiera się na określeniu, która z wielkości  $I_z$  albo  $I_o$  posiada większy udział w prądzie harmonicznym  $I_{pwp}$  w PWP. Teoretycznie jest to równoważne z rozważaniem wzajemnych relacji napięć:  $I_z Z_z$  i  $I_o Z_o$ . Jeżeli  $|I_z Z_z|$  jest większe niż  $|I_o Z_o|$ , to można wykazać, że źródło harmonicznej po stronie zasilania posiada większy udział w prądzie  $I_{pwp}$  i odwrotnie. Dlatego, można transformować obwód Nortona do równoważnego obwodu Thevenina jak na rysunku 22. Na tym rysunku:  $Z = Z_z + Z_o$ ,  $E_z = |I_z Z_z|$  i  $E_o = |I_o Z_o|$ . Przyjęto, że kąt fazowy  $E_z$  ma wartość zero natomiast kąt fazowy  $E_o$  oznaczono symbolem  $\delta$ . Od tej chwili lokalizacja źródła harmonicznych sprowadza się do zadania identyfikacji źródła napięcia o większej wartości:  $E_z$  lub  $E_o$ .

Przyjmując uproszczony przypadek, gdy  $Z = jX$  wyrażenie określające moc czynną płynącą do źródła  $E_z$  przyjmuje postać:

$$P = E_z I \cos \theta = \frac{E_z E_o}{X} \sin \delta \quad (12)$$

Kąty fazowe napięć na nadawczym i odbiorczym końcu linii determinują głównie przepływ mocy czynnej, podczas gdy amplitudy napięć determinują głównie przepływ mocy biernej. Można sformułować pytanie, czy kierunek przepływu mocy biernej jest miarą względnych wartości dwóch źródeł napięcia. Aby udzielić odpowiedzi, analizie zostanie poddana moc bierna przepływająca do źródła zasilania  $E_z$ :

$$Q = E_z I \sin \theta = \frac{E_z}{X} (E_o \cos \delta - E_z) \quad (13)$$

Wyrażenie wskazuje na zależność kierunku przepływu mocy biernej od wartości napięć. Ponadto, z równania (13) wynika, że jeżeli strona zasilania pobiera moc bierną ( $Q > 0$ ), to źródło  $E_z$  posiada mniejszą wartość niż  $E_o$ . Inaczej mówiąc, strona odbiorcy posiada większy udział w prądzie  $I_{pwp}$  i moc bierna pobierana przez  $E_z$  musi pochodzić od  $E_o$ . Ponieważ impedancja posiada charakter bierny,  $E_o$  musi posiadać wystarczająco dużą wartość, aby moc bierna popłynęła w kierunku źródła  $E_z$ . W sytuacji, gdy dostawca energii „generuje” moc bierną ( $Q < 0$ ), nie oznacza to, że jest on źródłem dominującym. Wygenerowana moc bierna może nie docierać na stronę odbiorcy, ale być absorbowaną przez linię zasilającą. Jednakże dla jednego kierunku przepływu mocy, opisana metoda daje teoretycznie jednoznaczną konkluzję.

Ważnym warunkiem w metodzie kierunku mocy biernej jest założenie:  $Z = jX$  i  $X > 0$ . Warunek ten jest prawdziwy dla częstotliwości podstawowej, ale może nie być spełniony dla częstotliwości harmonicznych.

### Główne założenia metody

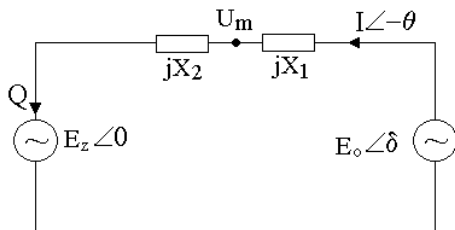
Metoda opiera się na dwóch założeniach:

- Impedancja strony dostawcy  $Z_z$  jest w przybliżeniu znana. Ten wymóg jest stosunkowo łatwy do spełnienia, ponieważ impedancja najbliższego transformatora obniżającego napięcie dominuje w impedancji całego systemu, która zmienia się w małym zakresie.
- Przybliżona wartość impedancji od strony odbiorcy  $Z_o$  jest znana. Obciążenie po stronie odbiorcy może się zmieniać w szerokim zakresie, przez co występują trudności w określeniu jego impedancji dla rozważanej harmonicznej. Możliwa jest jednakże ocena przedziału zmian wartości impedancji dzięki zastosowaniu analizy częstotliwościowej dla modelu sieci wewnętrznej odbiorcy. W sieciach z dominującą liczbą silników i napędów, wynik analizy częstotliwościowej może być wystarczający.

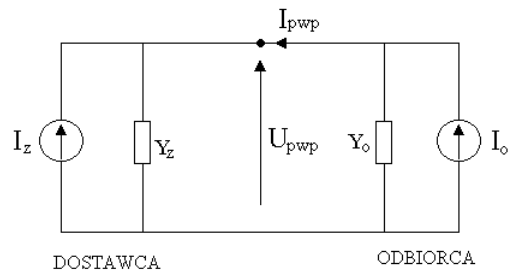
Celem jest opracowanie skutecznej metody do określenia względnych wartości  $E_o$  i  $E_z$  dla powyższych warunków. Metoda powinna dostarczać poprawnych wyników także w przypadku, gdy zmiana wartości impedancji zastępczych dostawcy i odbiorcy ( $Z = Z_o + Z_z$ ) jest bardzo duża. Ponieważ dla dostawcy pobierającego moc bierną ( $Q > 0$ ), uzyskuje się poprawne wyniki, rozważone zostaną tylko przypadki, gdy mocy bierna jest generowana przez źródło zasilania. Zakładając, że impedancja zasilania  $Z_z$  jest znana i rozpoczynając analizę od najprostszego przypadku  $Z = jX = j(X_o + X_z)$ , wartość napięcia źródła zasilania  $E_z$  można wyrazić następująco:

$$E_z = U_{pwp} - I_{pwp} Z_z = U_{pwp} - I_{pwp} jX_z \quad (14)$$

Wpływ błędu oszacowania reaktancji  $X_z$  będzie analizowany w dalszej części. Kluczem do proponowanej metody jest znalezienie odpowiedzi na pytanie: jak daleko moc bierna wygenerowana przez źródło  $E_z$  może „płynąć” wzdłuż impedancji  $jX$ , przy założeniu, że impedancja jest rozłożona równomiernie pomiędzy źródłami  $E_z$  i  $E_o$  jako "impedancja linii".



Rys. 23. Model sieci do ustalenia punktu  $m$  wzdłuż reaktancji  $jX$



Rys. 24. Obwód do analizy harmonicznych

W tym celu definiuje się napięcie w dowolnym punkcie  $m$  wzdłuż "impedancji linii", stosownie do rysunku 24:

$$U_m = \frac{X_1}{X_1 + X_2} E_z e^{j0} + \frac{X_2}{X_1 + X_2} E_o e^{j\delta} \quad (15)$$

gdzie  $X_1 + X_2 = X$ . Z warunku  $\frac{\partial |U_m|^2}{\partial X_2} = 0$ , można wyznaczyć punkt o najmniejszej wartości napięcia jako:

$$x = \frac{E_z^2 - E_z E_o \cos \delta}{E_z^2 + E_o^2 - 2 E_z E_o \cos \delta} X \quad (16)$$

gdzie  $x$  jest reaktancją liczoną od źródła  $E_z$  do punktu o najmniejszej wartości napięcia. Jeżeli zostanie rozważone wyrażenie (13) oraz:

$$I^2 = \frac{E_z^2 + E_o^2 - 2E_z E_o \cos \delta}{X^2} \quad (17)$$

wówczas wyrażenie (16) przybiera postać:

$$x = \frac{-Q}{I^2} = -\frac{E_z}{I} \sin \theta \quad (18)$$

Moc bierną reaktancji  $x$  można wyrazić jako  $I^2 x$ , równą  $|Q|$  zgodnie z wyrażeniem (18). Oznacza to, że cała moc bierna wygenerowana przez źródło  $E_z$  jest „pobrana” przez reaktancję  $x$ . Inaczej mówiąc,  $x$  jest najbardziej oddalonym punktem, do którego może „dopłynąć” moc bierna, generowana przez źródło  $E_z$ . Ten punkt posiada najmniejszą wartość napięcia wzdłuż „impedancji linii” pomiędzy źródłami  $E_z$  i  $E_o$ .

Jeżeli punkt  $x$  znajduje się bliżej odbiorcy ( $x > X/2$ ), wówczas źródło zasilania ma większą wartość, ponieważ źródło to może „przepchnąć” wygenerowaną moc bierną na drugą stronę, poza ( $X/2$ ). Podobnie, jeżeli  $x < X/2$  lub  $x$  znajduje się bliżej źródła dostawcy energii, źródło odbiorcy będzie posiadać większą wartość. Porównywanie wartości  $x$  i  $X/2$  może więc posłużyć do określenia względnych wartości źródeł dostawcy i odbiorcy.

Udowodniono, że kryterium:  $x > X/2$  lub  $2x > X$  są warunkiem koniecznym i wystarczającym, na podstawie którego można wyciągnąć wniosek, że  $E_z > E_o$ . Aby wykazać poprawność tych tez przyjęto, że  $E_z = \alpha E_o$ , gdzie  $\alpha > 1$ . Po przekształceniu wyrażenia (16):

$$x = \frac{\alpha^2 - \alpha \cos \delta}{(1 + \alpha^2) - 2\alpha \cos \delta} X \quad (19)$$

Parametr  $x$  przyjmuje minimalną wartość dla  $\delta = \pi$ .

$$x_{\min} = \frac{\alpha^2 - \alpha \cos \delta}{(1 + \alpha^2) - 2\alpha \cos \delta} X \Big|_{\delta=\pi} = \frac{\alpha}{\alpha + 1} X > 0.5X \quad (20)$$

Z powyższego równania wynika, że jeżeli  $E_z > E_o$ , to wszystkie możliwe wartości  $x$  będą większe od  $0,5X$ . Zależność  $2x > X$  jest warunkiem koniecznym dla zachowania warunku  $E_z > E_o$ . Z drugiej strony, dla  $2x > X$ , otrzymuje się:

$$\frac{x}{X} = \frac{\alpha^2 - \alpha \cos \delta}{(1 + \alpha^2) - 2\alpha \cos \delta} > 0.5 \quad (21)$$

Nierówność ta jest spełniona jeżeli  $\alpha > 1$ . W ten sposób udowodniono, że:

$$2x > X \text{ jeżeli } E_z > E_o \quad (22)$$

Znak mocy biernej pobranej przez źródło  $E_z$  i wielkość  $2x$  są w proponowanej metodzie dwoma istotnymi parametrami, dla których wprowadzono pojęcie tzw. „impedancji krytycznej ( $Z_K$ )”. Nowy wskaźnik, będący efektem agregacji  $E_z$  i  $2x$  zdefiniowany jest związkiem:

$$Z_K = 2 \frac{Q}{I^2} \quad (23)$$

gdzie  $Q$  jest mocą bierną pobraną przez źródło  $E_z$ , stosownie do rysunku 23. Należy zaznaczyć, że wielkości  $Z_K$  i  $Q$  posiadają te same znaki. Dla warunku  $Z_K > 0$  strona zasilania „pochłania” moc bierną, z czego bezpośrednio wynika, że strona odbiorcy jest dominującym źródłem harmonicznych. Natomiast dla  $Z_K < 0$ , dostawca generuje moc bierną. W tym przypadku, w celu identyfikacji dominującego źródła odkształcenia należy porównać wartość  $X$ , z wartością bezwzględną  $Z_K$ .

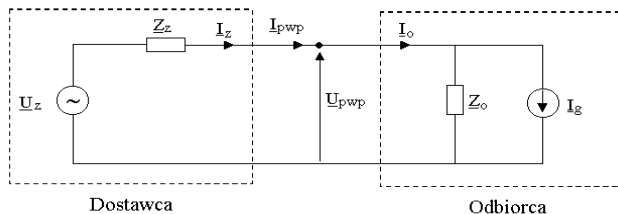
Podsumowując, dla  $Z = jX$ , proponowaną metodę można stosować wykonując następujące działania:

1. Wyznaczyć napięcie źródła po stronie dostawcy energii przy użyciu wyrażenia  $E_z = U_{pwp} - I_{pwp} Z_z$ , dla znanej impedancji  $Z_z$ ;
2. Wyznaczyć moc bierną pobraną przez źródło  $E_z$  na podstawie  $Q = E_z I \sin \theta$ , gdzie  $\theta$  jest kątem fazowym, pomiędzy napięciem  $E_z$ , a prądem  $I$ ;
3. Wyznaczyć  $Z_K = 2 \frac{Q}{I^2}$ ;
4. Jeżeli  $Z_K > 0$ , to źródło zasilania „pochłania” moc bierną, z czego wynika, że strona odbiorcy jest głównym źródłem harmonicznych;
5. Jeżeli  $Z_K < 0$ , to strona zasilania generuje moc bierną, i wówczas postępuje się zgodnie z następującą procedurą:
  - Jeżeli  $|Z_K| > X_{max}$ , gdzie  $X_{max}$  jest maksimum z wszystkich możliwych wartości  $X$ , to dostawca energii jest głównym źródłem harmonicznych. Związane jest to z wysokim napięciem źródła strony zasilania, które jest w stanie „przepchać” wygenerowaną moc bierną na stronę odbiorcy;
  - Jeżeli  $|Z_K| < X_{min}$ , gdzie  $X_{min}$  jest minimum z wszystkich możliwych wartości  $X$ , to strona odbiorcy jest głównym źródłem harmonicznych (moc bierna przepływa od strony odbiorcy na stronę dostawcy);
  - Jeżeli  $X_{min} < |Z_K| < X_{max}$ , wówczas nie jest możliwe sformułowanie jednoznacznych wniosków. Wyniki analiz wskazują, że dostawca i odbiorca mają porównywalne udziały w prądzie w PWP.

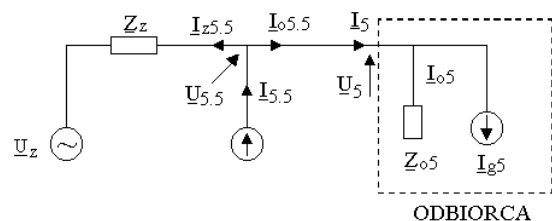
## 6. INIEKCJA INTERHARMONICZNYCH DO SYSTEMU ZASILANIA [8]

Analizie podlega obwód złożony ze źródła harmonicznych i impedancji po stronie dostawcy i odbiorcy. Impedancja po stronie dostawcy to głównie impedancja transformatora i linii zasilających. O wartości impedancji po stronie odbiorcy decyduje zwykle wiele połączonych równolegle gałęzi. Dlatego, dla rozważanej harmonicznej, stronę dostawcy można przedstawić jako szeregowe połączenie źródła napięcia  $\underline{U}_z$  i impedancji  $\underline{Z}_z$ , a stronę odbiorcy jako równoległe połączenie źródła prądu  $\underline{I}_g$  i impedancji  $\underline{Z}_o$  (rys. 25).

Odształcenie napięcia w PWP wywołują prądy:  $\underline{I}_o$  – prąd harmoniczny odbiorcy oraz  $\underline{I}_z$  – prąd harmoniczny dostawcy w PWP. W celu określenia ich wartości należy wykonać pomiar czterech wielkości: napięcia po stronie dostawcy -  $\underline{U}_z$ , impedancji po stronie dostawcy dla rozważanej harmonicznej -  $\underline{Z}_z$ , prądu harmonicznej po stronie odbiorcy -  $\underline{I}_g$ , impedancji po stronie odbiorcy dla rozważanej harmonicznej -  $\underline{Z}_o$ .



Rys. 25. Model sieci energetycznej



Rys. 26. Zasada pomiaru poprzez iniekcję interharmonicznych prądu do systemu energetycznego

Jeżeli jest możliwy pomiar, wówczas  $\underline{I}_o$  i  $\underline{I}_z$  są określone związkami (prąd harmoniczny  $\underline{I}_{pwp}$  jest sumą  $\underline{I}_o$  i  $\underline{I}_z$ , które są wartościami zespolonymi):

$$\underline{I}_o = \frac{\underline{Z}_o}{(\underline{Z}_z + \underline{Z}_o)} \underline{I}_g \quad (24) \quad \underline{I}_z = \frac{\underline{U}_z}{(\underline{Z}_z + \underline{Z}_o)} \quad (25)$$

Jak wynika z rysunku 25, harmoniczna źródła prądu po stronie obciążenia -  $\underline{I}_g$ , musi być zostać zmierzona.

Dla wyjaśnienia idei wyznaczania charakterystyk częstotliwościowych impedancji obwodu, rozważono przykładowo 5. harmoniczną. Równoważny układ dla impedancji odbiorcy dla 5-tej harmonicznej  $\underline{Z}_{o5}$  pokazano na rysunku 26:

$$\underline{Z}_{o5} = \frac{\underline{U}_5}{\underline{I}_{o5}} = \frac{\underline{U}_5}{(\underline{I}_5 - \underline{I}_{g5})} \quad (26)$$

W tym celu, do systemu zasilania wprowadzana jest interharmoniczna prądu o rzędzie 5,5 (275Hz), która jest blisko rozważanej harmonicznej – 5. o częstotliwości 250Hz. Ponieważ wartość prądu  $\underline{I}_{g5}$  można zaniedbać w obwodzie dla 5.5-tej interharmonicznej, impedancję  $\underline{Z}_{o5.5}$  można wyrazić związkiem:

$$\underline{Z}_{o5.5} = \frac{\underline{U}_{5.5}}{\underline{I}_{o5.5}} \quad (27)$$

Impedancja  $\underline{Z}_{o4.5}$  jest wyprowadzana w analogiczny sposób. Wówczas impedancja  $\underline{Z}_{o5}$  jest uzyskana z równania (28) za pomocą aproksymacji:

$$\underline{Z}_{o5} = \frac{\underline{Z}_{o4.5} + \underline{Z}_{o5.5}}{2} \quad (28)$$

W celu większej precyzji wyznaczenia wartości impedancji można zwiększyć liczbę interharmonicznych generowanych do systemu zasilania. Przykładowo w ogólnym przypadku dla impedancji  $h$ -tego rzędu  $\underline{Z}_h$ :

$$\underline{Z}_h = \frac{\underline{Z}_{h-0.5} + \underline{Z}_{h-0.375} + \underline{Z}_{h+0.375} + \underline{Z}_{h+0.5}}{4} \quad (29)$$

Ponadto,  $\underline{I}_{g5}$  można wyznaczyć za pomocą równania (30) wykorzystując  $\underline{U}_5$  i  $\underline{I}_5$  zmierzone w tym samym przedziale czasowym:

$$\underline{I}_{g5} = \underline{I}_5 - \underline{I}_{o5} = \underline{I}_5 - \frac{\underline{U}_5}{\underline{Z}_{o5}} \quad (30)$$

Dla wielkości zespolonych w zależnościach (26-30) można wyznaczyć nie tylko wartości bezwzględne lecz także ich kąty fazowe. Wartości  $\underline{Z}_{z5}$  i  $\underline{E}_z$  można obliczyć również dokonując pomiaru  $\underline{I}_{z5.5}$ .

W powyższej metodzie uzyskuje się impedancyjną charakterystykę częstotliwościową poprzez generowanie do systemu zasilania interharmonicznych synchronizowanych względem podstawowej harmonicznej napięcia sieci za pomocą przyrządu o niedużej mocy (np. 15kVA [7]) przyłączonego po stronie na niskim napięciu [7].

## 7. OKREŚLENIE KIERUNKU PRZEPŁYWU HARMONICZNYCH POPRZEZ WZGLĘDNE WARTOŚCI POMIARÓW [1]

Metoda polega na porównaniu harmonicznych napięcia i prądu mierzonych w wartościach względnych odniesionych do wartości harmonicznych podstawowych. Jeżeli w prądzie

odbiorcy płyną harmoniczne wytworzone po stronie dostawcy energii, wówczas względne wartości harmonicznych prądu będą mniejsze lub równe względnym wartościom harmonicznych napięcia w PWP:

$$\frac{U_h}{U_1} \geq \frac{I_h}{I_1} \text{ dla } h=2,3,4 \dots$$

$U_h, I_h$  – napięcie i prąd dla harmonicznej  $h$ -tego rzędu

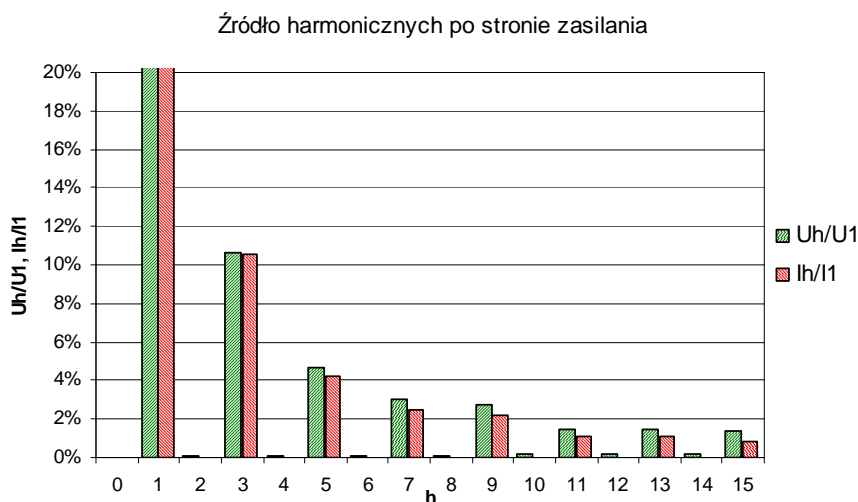
$U_1, I_1$  – napięcie i prąd dla podstawowej harmonicznej

Przykładowo, jeśli trzecia harmoniczna napięcia wynosi 3,1% a trzecia harmoniczna prądu wynosi 2,8%, to należy domniemywać, że przyczyna leży po stronie dostawcy. Ponieważ urządzenia odbiorcy mają zwykle znaczną reaktancję indukcyjną, powodująca wzrost ich zastępczej impedancji dla wyższych częstotliwości, należy oczekiwać, że harmoniczne prądu będą relatywnie mniejsze niż harmoniczne napięcia, jeśli zostaną wyrażone w procentach w stosunku do składowej podstawowej 50Hz (Tabela 2 i rys. 27).

Gdy względne wartości harmonicznych prądu są większe od względnych wartości harmonicznych napięcia (Tabela 3 i rys. 28):

$$\frac{U_h}{U_1} < \frac{I_h}{I_1} \text{ dla } h=2,3,4 \dots$$

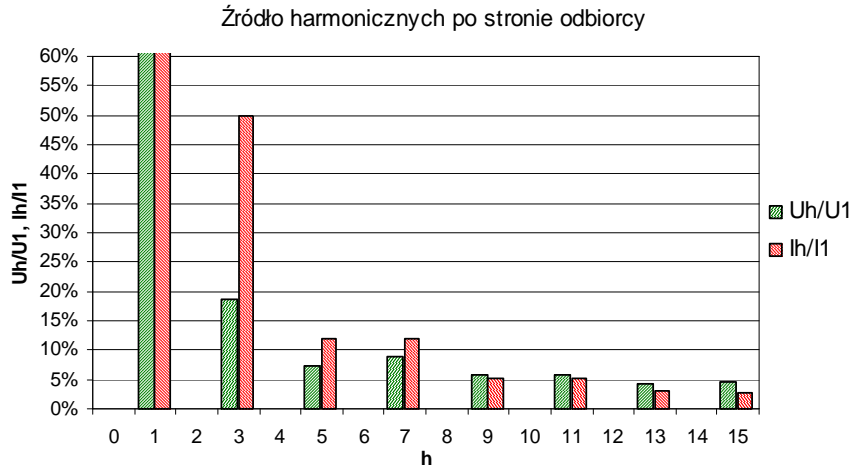
wówczas jest bardzo prawdopodobne, że po stronie odbiorcy znajdują się dominujące źródła harmonicznych. Dzieje się tak, ponieważ impedancja linii zasilających jest z reguły mniejsza od impedancji obciążenia. Jest to bardziej prawdopodobne dla harmonicznych niższych rzędów i często w praktyce można obserwować występowanie harmonicznych prądu o wartościach do 20%, przy obecności harmonicznych napięcia rzędu 4%.



Rys. 27. Względne wartości harmonicznych napięcia i prądu dla źródła harmonicznych znajdującego się po stronie zasilania

Tabela 2. Wartości względne [%] harmonicznych napięcia i prądu dla źródła harmonicznych znajdującego się po stronie dostawcy

Rząd harmonicznej	$\frac{U_h}{U_1}$	$\frac{I_h}{I_1}$
1	100,00%	100,00%
2	0,11%	0,00%
3	10,62%	10,52%
4	0,10%	0,00%
5	4,69%	4,20%
6	0,10%	0,00%
7	2,99%	2,51%
8	0,11%	0,00%
9	2,74%	2,22%
10	0,14%	0,00%
11	1,46%	1,14%
12	0,15%	0,00%
13	1,45%	1,13%
14	0,14%	0,00%
15	1,35%	0,85%



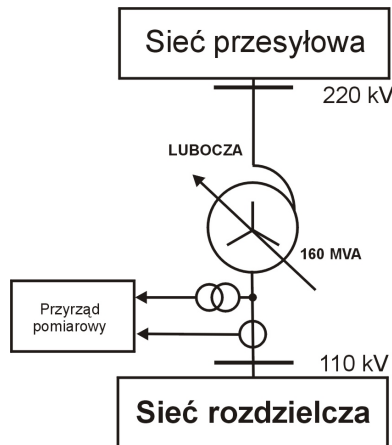
Rys. 28. Względne wartości harmonicznych napięcia i prądu dla źródła harmonicznych znajdującego się po stronie odbiorcy

Tabela 3. Wartości względne [%] harmonicznych napięcia i prądu dla źródła harmonicznych znajdującego się po stronie odbiorcy

Rząd harmonicznej	$\frac{U_h}{U_1}$	$\frac{I_h}{I_1}$
1	100,00%	100,00%
2	0,00%	0,00%
3	18,57%	49,97%
4	0,00%	0,00%
5	7,26%	11,93%
6	0,00%	0,00%
7	8,92%	11,96%
8	0,00%	0,00%
9	5,83%	5,10%
10	0,00%	0,00%
11	5,77%	5,13%
12	0,00%	0,00%
13	4,34%	2,98%
14	0,00%	0,00%
15	4,66%	2,65%

Z powodu występowania zjawiska rezonansu może się zdarzyć, że niektóre harmoniczne mają dominujący wpływ na wartość ilorazu napięcia i prądu. Z tego względu istotne jest, aby analizować obwód w szerokim przedziale częstotliwości, ze szczególnym uwzględnieniem harmonicznych o najniższych rzędach, przede wszystkim nieparzystych od 3-ciej do 11-tej, dla których wpływ impedancji odbiorcy jest najmniejszy.

Przykładowe pomiary przeprowadzono w punkcie zasilania sieci rozdzielczej 110 kV – GPZ Lubocza ZE Kraków (rys. 29).



Rys. 29. Schemat blokowy GPZ Lubocza (ZE Kraków)

GPZ Lubocza jest częścią sieci rozdzielczej 110 kV, pozostającej pod nadzorem ZE Kraków. Zasila głównie przemysł oraz odbiorców komunalnych. Moc zwarcia  $S_{zw}$  sieci w punkcie przyłączenia zawarta jest w przedziale 3571,9 – 3709,1 MVA.

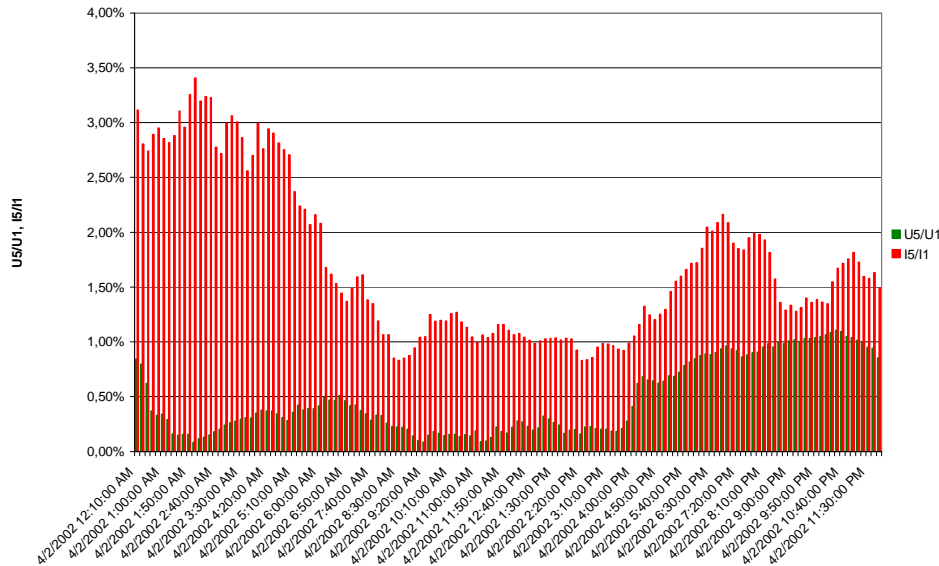
Wykresy na rysunku 30 przedstawiają przykładowe względne wartości piątej i siódmej harmonicznej w fazie L3 w okresie doby. Uwagę zwracają odmienne źródła pochodzenia – dostawca lub odbiorca piątej i siódmej harmonicznej dla kolejnych próbek pomiarowych. Determinuje to (zgodnie z omawianą metodą) różny udział dostawcy i odbiorcy w generowaniu piątej jak i siódmej harmonicznej. Omawianą metodę należy traktować jako bardzo niedokładną, praktyczną regułę wskazania dostawcy lub odbiorcy jako dominującego sprawcy odkształcenia

napięcia w PWP.

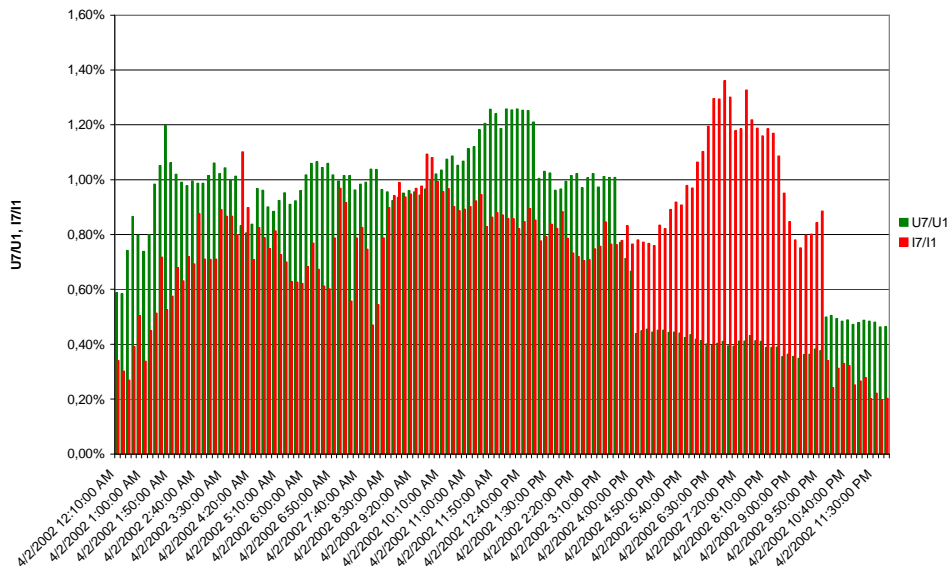
## 8. ZAKOŃCZENIE

Do lokalizacji źródeł wyższych harmonicznych stosowana jest szeroko metoda kierunku przepływu mocy czynnej. W oparciu o proste przykłady wykazano, że może ona prowadzić do nieprawidłowych wniosków w przypadku dużych kątach przesunięć fazowych pomiędzy

harmonicznymi prądu i napięcia dostawcy i odbiorcy. Niedoskonałości metody kierunku przepływu mocy czynnej zostały pokazana na drodze analizy symulacyjnej przykładowego systemu zasilającego oraz przez porównanie z rezultatami metody opartej na pomiarze wartości impedancji dostawcy i odbiorcy, która przyjęto jako referencyjną. Wadą tej ostatniej metody może być trudność wyznaczania (*on-line*) wartości impedancji zastępczych dostawcy i odbiorcy energii w warunkach rzeczywistego systemu elektroenergetycznego. Interesującą alternatywą jest metoda wykorzystująca kierunek przepływu mocy bierniej [7].



(a)



(b)

Rys. 30. Względne wartości (a) piątej, (b) siódmej harmonicznej w FAZIE 3 dla układu jak rysunku 29.

## LITERATURA

- [1] Dane techniczne miernika 1133A Power Sentinel™ firmy Arbiter Systems.
- [2] Emanuel A. E.: *On the Assessment of Harmonic Pollution*, IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 10, No. 3, July 1995.



- [3] Hanzelka Z.: *Jakość energii elektrycznej: Wyższe harmoniczne napięć i prądów*, <http://twelvee.com.pl>.
- [4] Li Chun, Xu Wilsun, and Tayjasant T.: *A "Critical Impedance" Based Method for Identifying Harmonic Sources*, accepted by IEEE Transaction on Power Delivery (materiały otrzymane od Autorów).
- [5] Piróg S.: *Energoelektronika. Negatywne oddziaływania układów energoelektronicznych na źródła energii i wybrane sposoby ich ograniczenia*, WNT.
- [6] Pyzalski T., Wilkosz K.: *Critical Analysis of Approaches to Localization of Harmonic Generation*, Electrical Power Quality and Utilisation, September 17-19, 2003, Cracow, Poland.
- [7] Pyzalski T., Wilkosz K.: *New Approach to Localization of Harmonic Sources in a Power System*, Electrical Power Quality and Utilisation, September 17-19, 2003, Cracow, Poland.
- [8] Tsukamoto M., Kouda I.,N., Minowa Y., Nishimura S.: *Advanced Method to Identify Harmonics Characteristic Between Utility Grid and Harmonic Current Sources*, 8<sup>th</sup> International Conference on Harmonics and Quality of Power, Athens, Greece, October 14-16, 1998.
- [9] Xu Wilsun, Liu Yilu: *A method for determining customer and utility harmonic contributions at the point of common coupling*, IEEE Transaction on Power Delivery, vol.15,no.2, April 2000.
- [10] Xu Wilsun, Liu Xian, Liu Yilu: *An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination*, IEEE Transaction on Power Delivriery, vol.18,no.1, January 2003.
- [11] PN –EN 61000-4-7:1998, *Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC). Metody badań i pomiarów. Ogólny przewodnik dotyczący pomiarów harmonicznych i interharmonicznych oraz stosowanych do tego celów przyrządów pomiarowych dla sieci zasilających i przyłączonych do nich urządzeń*