

WYBRANE METODY LOKALIZACJI ŹRÓDEŁ WYŻSZYCH HARMONICZNYCH W SIECIACH ELEKTROENERGETYCZNYCH

STRESZCZENIE

W artykule autorzy przedstawili zagadnienia związane z występowaniem wyższych harmonicznych jako jednym z parametrów jakości energii elektrycznej. Zaprezentowane wyniki badań mają na celu znalezienie metody (on-line), która wskaże stronę dominującą w generacji zniekształceń harmonicznymi, bez ingerencji w strukturę sieci. Wybrane metody różnią się stopniem skomplikowania algorytmu, czasochłonnością realizacji i dokładnością otrzymanych wyników (część metod określa dominujące źródło harmonicznymi wraz z ich ilościowym udziałem).

Słowa kluczowe: harmoniczne i wyższe harmoniczne, lokalizacja źródeł wyższych harmonicznymi, metody lokalizacji harmonicznymi, jakość energii elektrycznej

A METHOD FOR DETERMINING HARMONIC CONTRIBUTIONS AT THE POINT OF COMMON COUPLING

Article authors submitted issues related to the existence of higher harmonics as one of the parameters of the quality of electricity. Presented results of the studies aim to find method (on-line) that points to a dominant source of harmonic distortion, without interfering with the network structure. Selected methods differ in their degree of complexity of the algorithm, to devote the completion and accuracy of the results obtained (some methods specifies source along with their quantitative participation).

Keywords: location of sources of higher harmonice, reactive power, power quality

1. WPROWADZENIE

Energia elektryczna jest postrzegana na rynku jako towar o określonych parametrach ilościowych i jakościowych. Coraz częściej dostawcy energii, indywidualni odbiorcy oraz producenci sprzętu elektronicznego doświadczają konsekwencji pogorszenia jakości energii, które mają wymiar finansowy. Istotne staje się wtedy pytanie, kto jest odpowiedzialny za pogorszenie jakości energii. Ta sytuacja wymaga posiadania dostatecznej wiedzy o każdym uczestniku rynku, aby nie dochodziło do sporów pomiędzy dostawcą (operatorem technicznym sieci) i odbiorcą energii elektrycznej przy ustalaniu sprawcy zaburzeń. Jej brak może być, i w wielu przypadkach jest, źródłem ogromnych kosztów zarówno w skali gospodarki krajowej, jak i w budżetach poszczególnych operatorów technicznych sieci, odbiorców przemysłowych i indywidualnych, producentów sprzętu itp.

W artykule autorzy skupili się na przedstawieniu zagadnień związanych z występowaniem wyższych harmonicznymi jako jednym z parametrów jakości energii elektrycznej. Przedstawiono wyniki badań mających na celu znalezienie metody (on-line), która wskaże stronę dominującą w generacji zniekształceń harmonicznymi, bez ingerencji w strukturę sieci.

2. ANALIZOWANE METODY STOSOWANE DO LOKALIZACJI ŹRÓDEŁ HARMONICZNYCH

Do analizy wybrano następujące metody lokalizacji źródeł wyższych harmonicznymi:

- metoda kierunku przepływu mocy czynnej [2, 4, 7],
- metoda „impedancyjna” [2, 5, 7, 8],
- metoda wskaźnika napięciowego [4],
- metoda „impedancji krytycznej” [1, 3, 6, 7].

Różnią się one stopniem skomplikowania algorytmu, czasochłonnością realizacji i dokładnością otrzymanych wyników (część metod określa dominujące źródło harmonicznymi wraz z ich ilościowym udziałem).

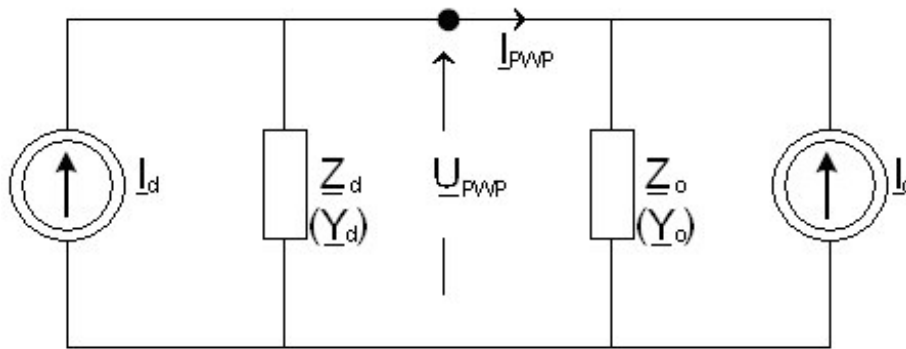
Na rysunkach 1 i 2 przedstawiono dla rozważanej harmonicznymi uproszczone schematy elektryczne (modele Nortona i Thevenina) będące podstawami algorytmów wymienionych metod.

Objaśnienia do rysunków 1 i 2:

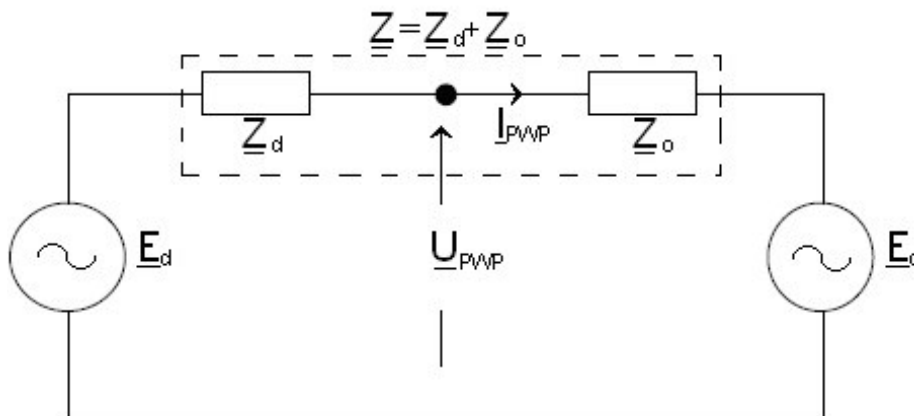
- $\underline{U}_{PWP}, \underline{I}_{PWP}$ – napięcie i prąd w PWP,
- $\underline{Z}_d, \underline{Z}_o$ – impedancje zastępcze strony dostawcy i odbiorcy dla rozpatrywanej harmonicznymi,
- $\underline{I}_d, \underline{I}_o$ – prąd strony dostawcy i odbiorcy dla rozpatrywanej harmonicznymi,
- $\underline{E}_d, \underline{E}_o$ – napięcie strony dostawcy i odbiorcy dla rozpatrywanej harmonicznymi.

Badania przeprowadzono w układzie trójfazowym symetrycznym i niesymetrycznym. Amplitudy i fazy harmonicznymi prądu dostawcy i/lub odbiorcy dobrano w sposób pozwalający na widoczne odkształcenie przebiegów napięć i prądów fazowych w punkcie pomiarowym. Przyjęto, że dominującym źródłem harmonicznymi 5. i 11. będzie dostawca, a harmonicznymi 7. i 13. odbiorca energii elektrycznej. Powyższe założenie obowiązuje dla układu symetrycznego i niesymetrycznego.

* Wydział Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie



Rys. 1. Uproszczony schemat źródła i odbioru z zaznaczonym punktem PWP dla rozważanej harmonicznej (model Nortona)



Rys. 2. Uproszczony schemat źródła i odbioru z zaznaczonym punktem PWP dla rozważanej harmonicznej (model Thevenina)

2.1. Metoda kierunku przepływu mocy czynnej

Dominujące źródło rozpatrywanej harmonicznej można zlokalizować analizując kierunek przepływu mocy czynnej dla tej harmonicznej w określonym punkcie PWP systemu elektroenergetycznego [2, 4, 7].

Używając konwencji znaku przepływu mocy czynnej należy rozpatrzyć dwa warunki:

- 1) znak mocy czynnej w punkcie PWP jest dodatni ($P_{(h)} > 0$), oznacza to, że dominującym źródłem rozpatrywanej harmonicznej jest dostawca;
- 2) znak mocy czynnej w punkcie PWP jest ujemny ($P_{(h)} < 0$), oznacza to, że dominującym źródłem rozpatrywanej harmonicznej jest odbiorca.

Nierzerowa wartość mocy czynnej jest wynikiem wzajemnego oddziaływania napięcia i prądu o tej samej częstotliwości i określana jest wzorem:

$$P_{(h)} = U_{(h)} I_{(h)} \cos(\Phi_{U(h)} - \Phi_{I(h)}) \quad (1)$$

gdzie:

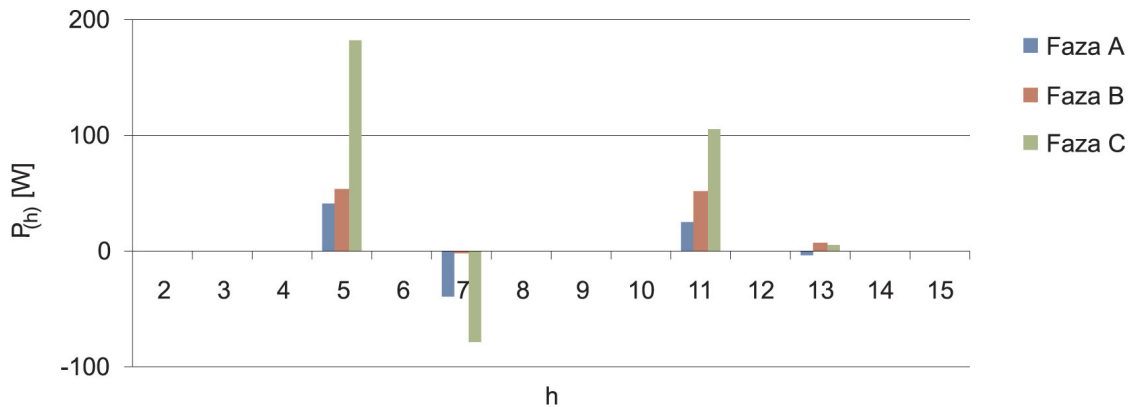
- $P_{(h)}$ [W] – moc czynna harmonicznej h -tego rzędu,
- $U_{(h)}$ i $I_{(h)}$ [V, A] – wartości skuteczne napięcia i prądu h . harmonicznej,
- $\Phi_{U(h)}$ i $\Phi_{I(h)}$ – kąty fazowe prądu i napięcia h . harmonicznej.

Na rysunku 3 przedstawiono przykładowe wyniki badania metody w układzie niesymetrycznym dla przypadku, kiedy to dostawca i odbiorca jednocześnie wprowadzają harmoniczne do sieci (strona dostawcy jest dominującym źródłem 5. i 11. harmonicznej a strona odbiorcy 7. i 13.). Można zauważyć, że 13. harmoniczna dla fazy B i C została błędnie zidentyfikowana, ponieważ to odbiorca jest dominującym źródłem tej harmonicznej a metoda wskazuje na dostawcę jako główne źródło zakłócenia. Można wyciągnąć wniosek, że metoda kierunku mocy czynnej jest czuła w pewnym stopniu na asymetrię.

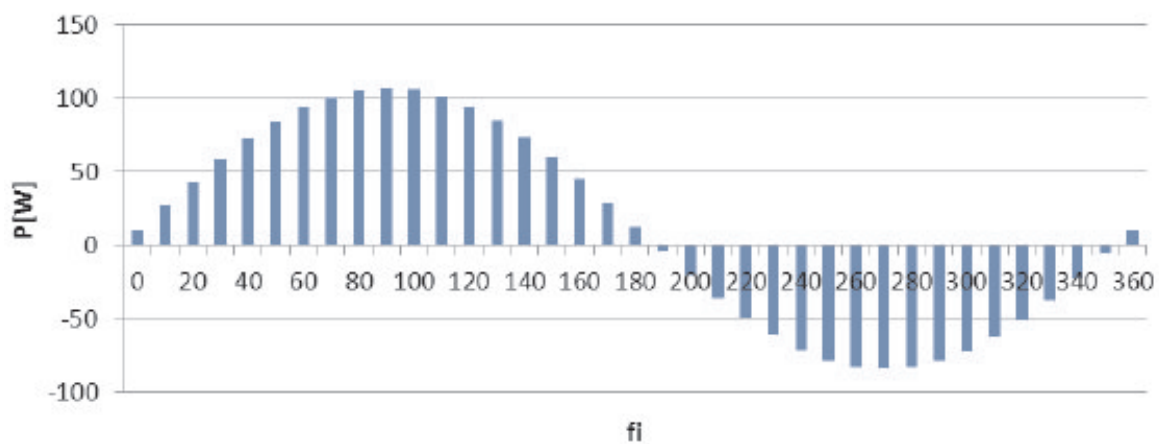
Przeprowadzono również badanie metody w zależności od kąta fazowego (ϕ) pomiędzy prądem strony dostawcy I_d i strony odbiorcy I_o dla 5. harmonicznej. Wyniki zaprezentowano na rysunkach 4 i 5. Kąt ϕ zmienia się w zakresie od 0° do 360° .

Na rysunku 4 dla niewielkiej różnicy amplitud pomiędzy prądem dostawcy i odbiorcy dla kąta fazowego ϕ powyżej 180° metoda mocy czynnej wskazuje niepoprawny wynik, tzn. wskazuje na dostawcę energii elektrycznej jako sprawcę zaburzeń w sieci elektroenergetycznej, tymczasem to odbiorca jest dominującym źródłem zaburzeń.

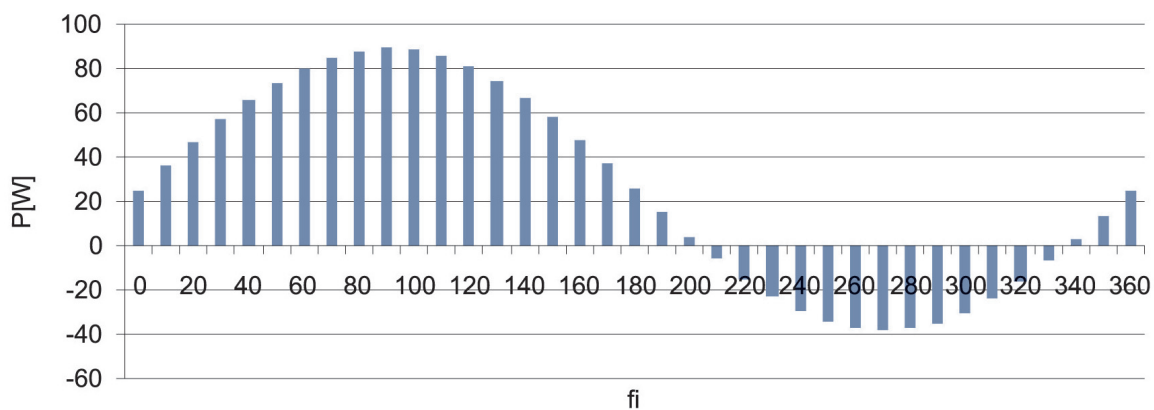
Na rysunku 5 dla większej różnicy amplitud prądów dostawcy i odbiorcy zmienia się wartość kąta ϕ , przy którym następuje zmiana znaku mocy czynnej. Skróceniu ulega przedział kąta fazowego, dla którego metoda mocy czynnej wskazuje błędne wyniki.



Rys. 3. Moce czynne poszczególnych harmonicznych (układ niesymetryczny)



Rys. 4. Zależność mocy czynnej 5. harmonicznej od wartości kąta przesunięcia fazowego ϕ . $L_o = 1,5e^{j0}$ [A], $L_d = 1,75e^{-j\phi}$ [A]



Rys. 5. Zależność mocy czynnej 5. harmonicznej od wartości kąta przesunięcia fazowego ϕ . $L_o = 1,5e^{j0}$ [A], $L_d = 2,75e^{-j\phi}$ [A]

Wnioski:

- metoda jest szybka i łatwa w implementacji, najpowszechniej stosowana,
- metoda jest czuła na asymetrię prądów i napięć,
- wskazanie metody zależy od kąta fazowego pomiędzy prądem dostawcy i odbiorcy,
- metoda nie określa ilościowego udziału stron dostawcy i odbiorcy w całkowitym odkształceniu prądu I_{PWP} .

2.2. Metoda „impedancyjna

Do analizy przyjmuje się uproszczony schemat zastępczy, przedstawiający strony dostawcy oraz odbiorcy połączone ze sobą w punkcie PWP (rys. 1) [2, 5, 7, 8]. Prąd w PWP zależy od I_o oraz I_d , które są prądami dostawcy i odbiorcy dla analizowanej harmonicznej. W tym miejscu przyjęto, że zarówno impedancja odbiorcy Z_o , jak i impedancja dostawcy Z_d są znane i niezmiennie. Bazując na tych informacjach,

można wyznaczyć składowe prądów dostawcy i odbiorcy w PWP.

Dla układu zastępczego (rys. 1) zgodnie z pierwszym prawem Kirchhoffa obowiązują zależności:

$$\underline{I}_{PWP} + \underline{I}_o - \frac{\underline{U}_{PWP}}{\underline{Z}_o} = 0 \quad (2)$$

$$-\underline{I}_{PWP} + \underline{I}_d - \frac{\underline{U}_{PWP}}{\underline{Z}_d} = 0 \quad (3)$$

$$\underline{I}_{PWP} = \underline{I}_d - \frac{\underline{U}_{PWP}}{\underline{Z}_o} = \frac{\underline{U}_{PWP}}{\underline{Z}_d} - \underline{I}_o \quad (4)$$

Z tych zależności wynika:

$$\underline{I}_d = \frac{\underline{U}_{PWP}}{\underline{Z}_d} + \underline{I}_{PWP} \quad (5)$$

$$\underline{I}_o = \frac{\underline{U}_{PWP}}{\underline{Z}_o} - \underline{I}_{PWP} \quad (6)$$

gdzie: $\underline{I}_{PWP} = \underline{I}_d + \underline{I}_o$.

Udział każdego źródła harmonicznego w prądzie PWP jest określony zgodnie z równaniami:

$$\underline{I}_{d-PWP} = \frac{\underline{Z}_d}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_o} \underline{I}_d \quad (7)$$

$$\underline{I}_{o-PWP} = \frac{\underline{Z}_o}{\underline{Z}_d + \underline{Z}_o} \underline{I}_o \quad (8)$$

Ponieważ:

$$\underline{I}_{PWP} = \underline{I}_{d-PWP} + (-\underline{I}_{o-PWP}) \quad (9)$$

Prąd \underline{I}_{PWP} można rozłożyć na dwie składowe skalarne zgodnie z równaniem (10):

$$|\underline{I}_{PWP}| = I_{df} + I_{of} \quad (10)$$

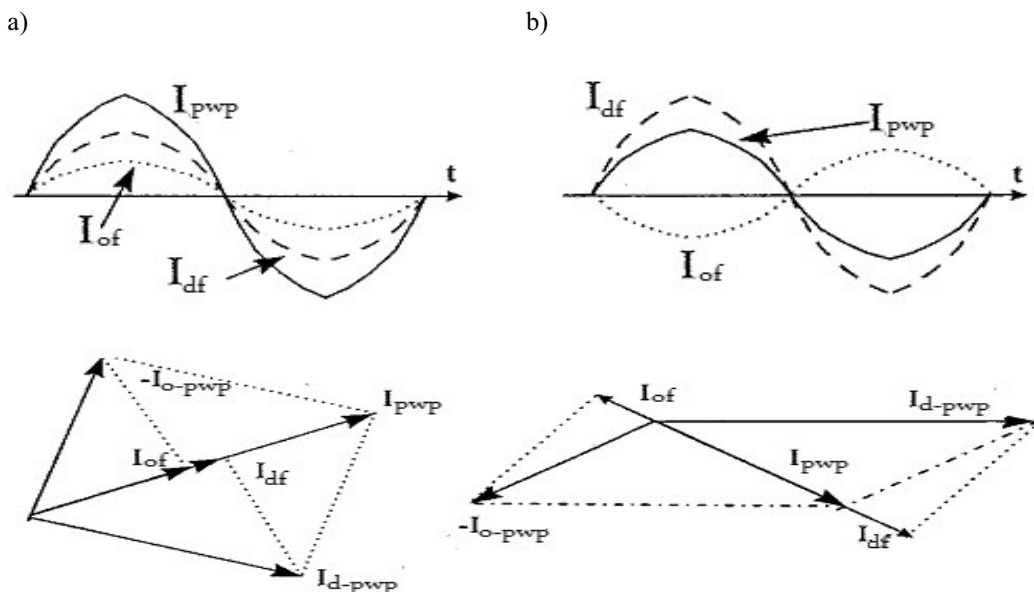
gdzie I_{df} jest rzutem \underline{I}_{d-PWP} na kierunek wektora \underline{I}_{PWP} , a I_{of} rzutem \underline{I}_{o-PWP} na kierunek wektora \underline{I}_{PWP} .

Składowe te służą jako ilościowe wskaźniki udziału dostawcy i odbiorcy w prądzie PWP. Składowa I_{of} przedstawia udział odbiorcy, a składowa I_{df} udział dostawcy w całkowitym prądzie danej harmonicznego.

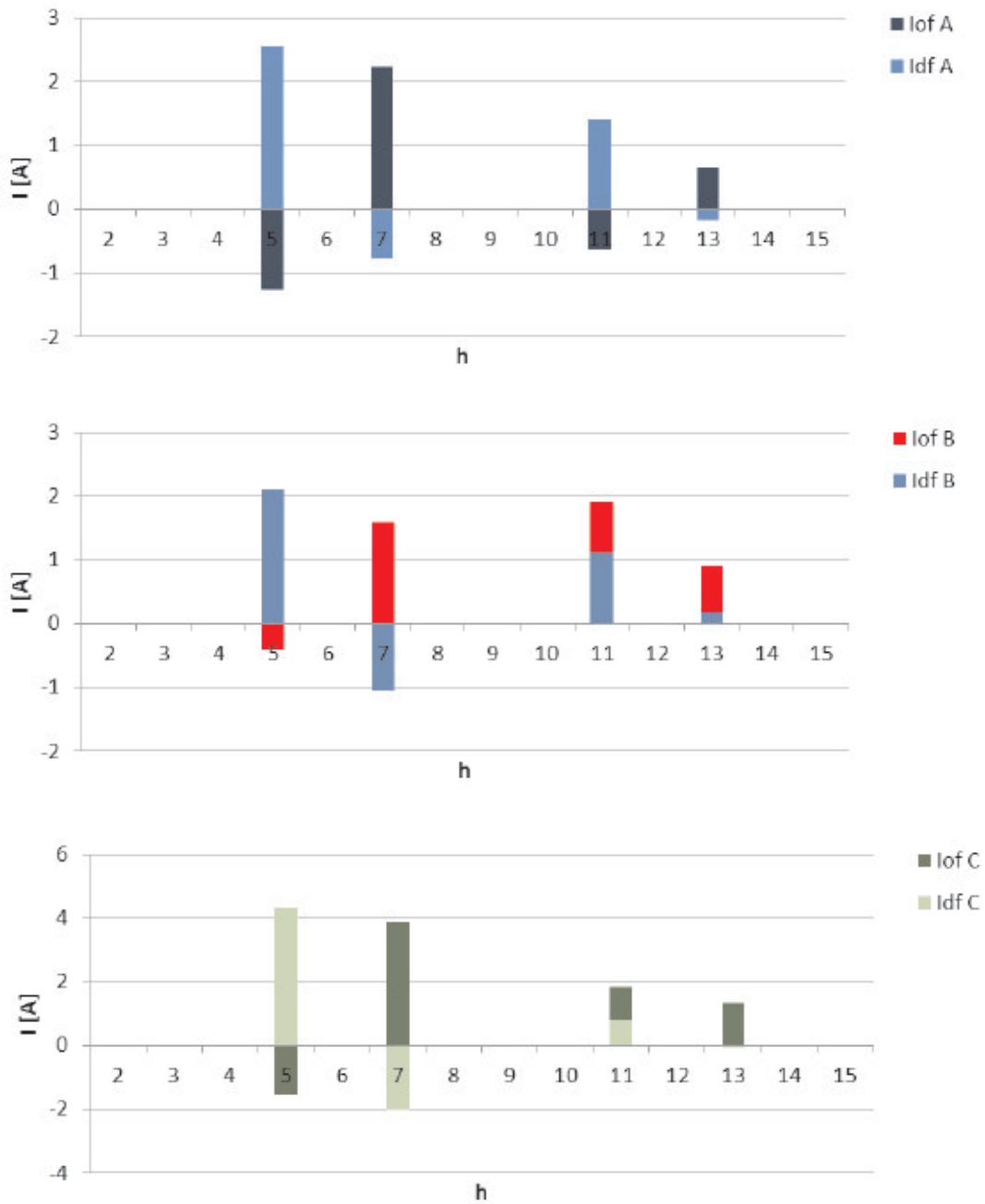
Jeżeli składowe I_{of} oraz I_{df} mają ten sam znak, to prądy dostawcy i odbiorcy sumują się w PWP. Jeżeli mają przeciwne znaki prądy odejmują się od siebie (rys. 6).

Na rysunku 7 przedstawiono przykładowe wyniki badania metody dla układu niesymetrycznego. W wyniku identyfikacji strony wprowadzającej odkształcenia do sieci elektroenergetycznej metodą „impedancyjną” istnieje możliwość określenia ilościowego udziału poszczególnych składowych w prądzie PWP. Na rysunku 7 można zauważyć, że składowe 7. harmonicznego odejmują się od siebie w PWP a składowe 11. harmonicznego dodają. Metoda ta dała poprawny wynik identyfikacji strony powodującej odkształcenia niezależnie od występowania asymetrii sieci.

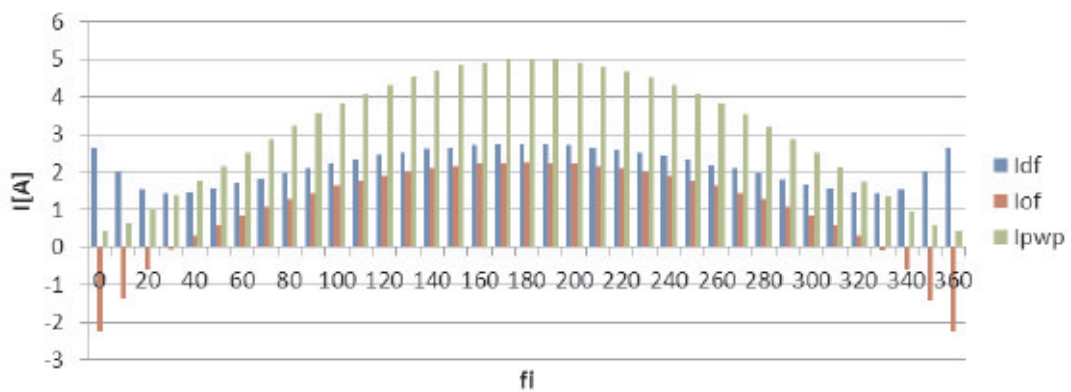
Przeprowadzono również badanie metody w zależności od kąta fazowego pomiędzy prądami stron dostawcy i odbiorcy w takich samych warunkach, jakie opisano w metodzie kierunku mocy czynnej. Na rysunkach 8 i 9 przedstawiono wyniki.



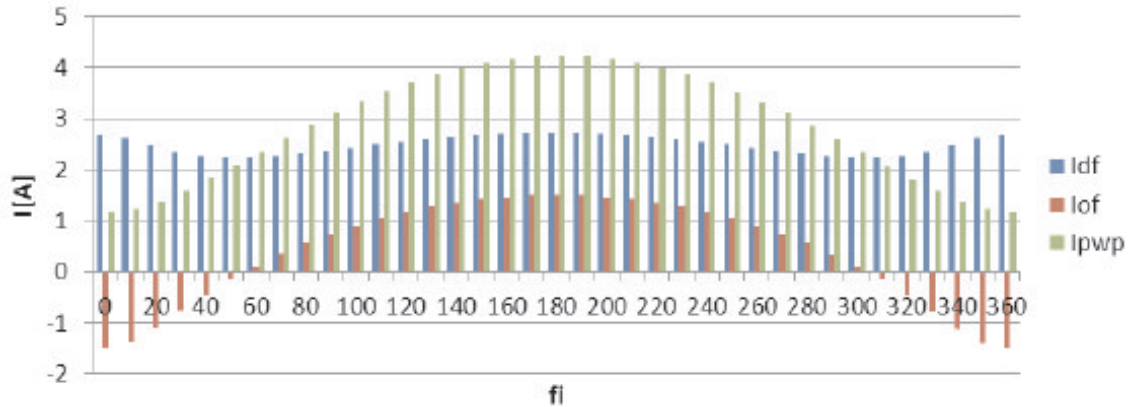
Rys. 6. Prądy dostawcy i odbiorcy dodają się w punkcie PWP (a), Prądy dostawcy i odbiorcy odejmują się w punkcie PWP (b) [7]



Rys. 7. Wartości prądów składowych PWP dla poszczególnych harmonicznych w fazach A, B, C (układ niesymetryczny)



Rys. 8. Składowe prądu 5. harmonicznej dla różnych wartości kąta przesunięcia fazowego φ .
 $I_o = 1,5 e^{j0}$ [A], $I_d = 1,75 e^{j\varphi}$ [A]



Rys. 9. Składowe prądu 5. harmonicznej dla różnych wartości kąta przesunięcia fazowego φ .
 $I_o = 1,5 e^{j0}$ [A], $I_d = 2,75 e^{j\varphi}$ [A]

Z porównania rysunków 8 i 9 można wnioskować, że wartość różnicy amplitud pomiędzy prądami harmonicznymi dostawcy i odbiorcy nie wpływa na poprawność wyniku identyfikacji sprawcy zaburzenia.

Wnioski:

- Zaletą tej metody jest możliwość określenia ilościowego udziału stron dostawcy i odbiorcy w całkowitym odkształceniu prądu I_{PWP} .
- Metoda jest nieczuła na asymetrię.
- Wskazanie nie zależy od kąta fazowego pomiędzy prądem dostawcy i odbiorcy.
- Wadą tej metody jest konieczność dokładnego określenia impedancji stron dostawcy i odbiorcy.

2.3. Metoda wskaźnika napięciowego

Do analizy przyjmuje się schemat zastępczy Nortona (rys. 2) [4]. Badając stosunek napięć źródłowych strony dostawcy i odbiorcy, można określić lokalizację dominującego źródła odkształceń w sieci elektroenergetycznej na podstawie wskaźnika:

$$\theta_U = \frac{E_o}{E_d} \quad (11)$$

zwanego dalej wskaźnikiem napięciowym.

Stosując zależności:

$$\underline{E}_o = \underline{I}_o \underline{Z}_o \quad (12)$$

$$\underline{E}_d = \underline{I}_d \underline{Z}_d \quad (13)$$

oraz biorąc pod uwagę wzory (2–6) otrzymuje się:

$$\underline{E}_o = \underline{U}_{PWP} - \underline{I}_{PWP} \underline{Z}_o \quad (14)$$

$$\underline{E}_d = \underline{U}_{PWP} + \underline{I}_{PWP} \underline{Z}_d \quad (15)$$

Dzieląc stronami równania (14) i (15):

$$\frac{\underline{E}_o}{\underline{E}_d} = \frac{\underline{U}_{PWP} - \underline{I}_{PWP} \underline{Z}_o}{\underline{U}_{PWP} + \underline{I}_{PWP} \underline{Z}_d} \quad (16)$$

I dalej:

$$\frac{\underline{E}_o}{\underline{E}_d} = \frac{\underline{Z} - \underline{Z}_o}{\underline{Z} + \underline{Z}_d} \quad (17)$$

gdzie:

$$\underline{Z} = \frac{\underline{U}_{PWP}}{\underline{I}_{PWP}} \quad (18)$$

Wskaźnik napięciowy zdefiniowany jak w (11) może być obliczony następująco:

$$\theta_U = \frac{|\underline{Z} - \underline{Z}_o|}{|\underline{Z} + \underline{Z}_d|} \quad (19)$$

Do określenia dominującego źródła wykorzystuje się następujące kryterium:

$$D = \begin{cases} D_o & \text{gdy } \theta_U > 1 \\ D_n & \text{gdy } \theta_U = 1 \\ D_d & \text{gdy } \theta_U < 1 \end{cases} \quad (20)$$

gdzie:

- D_o – wskazuje na odbiorcę, jako źródło odkształceń,
- D_n – oznacza, że nie można jednoznacznie wskazać źródła odkształceń,
- D_d – wskazuje na dostawcę, jako źródło odkształceń.

Kryterium to opiera się na założeniu, że można dokładnie określić wartość \underline{Z}_d oraz \underline{Z}_o i na ich podstawie wyznaczyć wartości E_d i E_o .

Bardzo często zdarza się tak, że nie można dokładnie określić wartości \underline{Z}_d oraz \underline{Z}_o . W takim przypadku, jeśli mamy możliwość określenia ich wartości maksymalnej i minimalnej, możemy zastosować następujące kryterium:

$$D = \begin{cases} D_o & \text{gdy } \theta_{U \min} > 1 \\ D_n & \text{gdy } \theta_{U \min} < 1 < \theta_{U \max} \\ D_d & \text{gdy } \theta_{U \max} < 1 \end{cases} \quad (21)$$

gdzie:

$\theta_{U_{\min}}$ – minimalna możliwa wartość wskaźnika napięcia dla wyznaczonych impedancji,

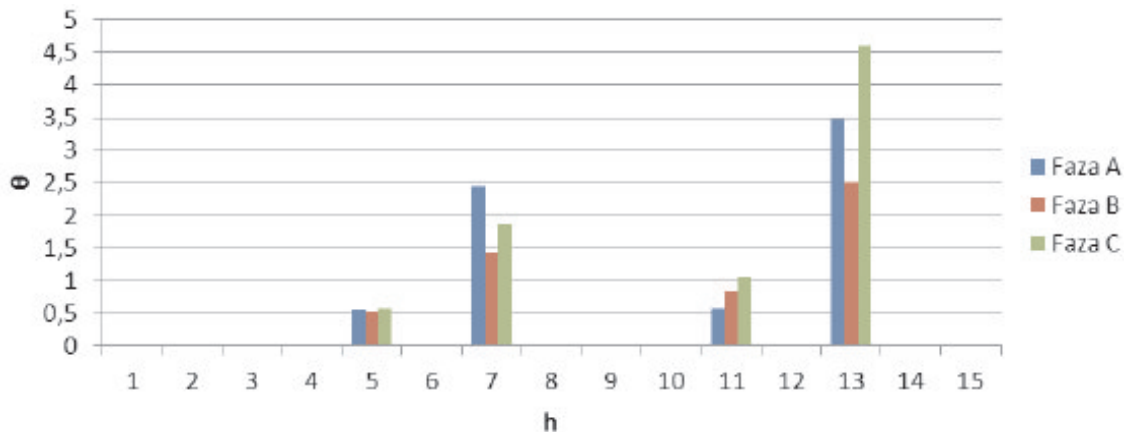
$\theta_{U_{\max}}$ – maksymalna możliwa wartość wskaźnika napięcia dla wyznaczonych impedancji.

Na rysunku 10 przedstawiono przykładowe wyniki badania metody dla układu niesymetrycznego. Źródła harmonicznej 11. dla fazy C nie można dokładnie określić, ponieważ wartość wskaźnika jest bliska jedności. Metoda ta dała

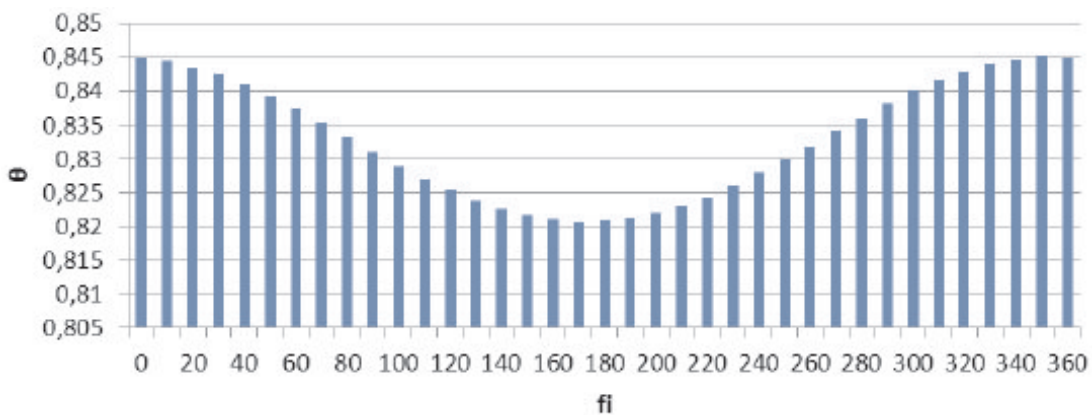
poprawny wynik identyfikacji strony powodującej odkształcenia niezależnie od występowania asymetrii sieci.

Na rysunkach 11 i 12 przedstawiono wyniki identyfikacji przeprowadzonej metodą wskaźnika napięciowego w zależności od kąta przesunięcia fazowego pomiędzy prądem 5. harmonicznej dostawcy i odbiorcy.

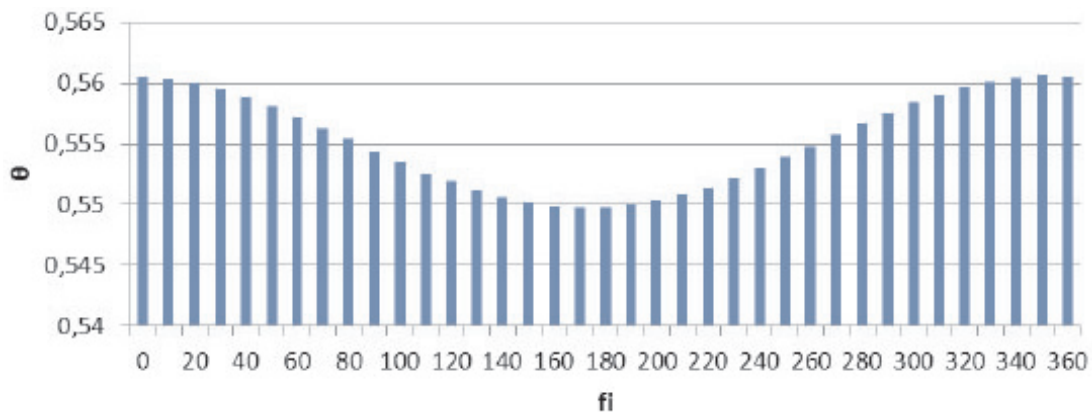
Jak widać na przedstawionych rysunkach, metoda wskaźnika napięciowego poprawnie wskazuje na dostawcę jako źródło odkształceń w pełnym zakresie kąta bez względu na różnice amplitud.



Rys. 10. Wartości wskaźnika napięciowego dla układu niesymetrycznego



Rys. 11. Wartości wskaźnika napięciowego dla prądów $I_d = 2, 75$ A, $I_o = 2,25$ A



Rys. 12. Wartości wskaźnika napięciowego dla prądów $I_d = 2,75$ A, $I_o = 1,5$ A

Wnioski:

- Metoda jest czuła na asymetrię.
- Nie można określić ilościowego udziału dostawcy i odbiorcy w prądzie PWP.
- Jeżeli dostawca i odbiorca jednocześnie wprowadzają zaburzenia do sieci elektroenergetycznej metoda błędnie identyfikuje dominującą stronę odkształcenia.

2.4. Metoda „impedancji krytycznej”

Metoda opiera się na badaniu przepływu mocy biernej [1, 3, 6, 7]. Szczególna uwaga zostanie poświęcona przypadkowi, gdy moc bierna jest wytwarzana przez stronę zasilania ($Q_{(h)} < 0$). Autorzy pracy [3] zauważyli, że w systemie elektroenergetycznym przedstawionym na rysunku 2 występuje silny związek pomiędzy znakiem mocy biernej a relacją między modułami napięć źródłowych \underline{E}_d i \underline{E}_o . Założono, że impedancje strony zasilającej \underline{Z}_d i strony odbiorcy \underline{Z}_o są w przybliżeniu znane. Do obliczeń przyjmuje się najczęściej, jako impedancję \underline{Z}_d , impedancję zastępczą transformatora obniżającego napięcie, która dominuje w impedancji całego systemu. Obciążenie po stronie odbiorcy może się zmieniać w szerokim zakresie, przez co występują trudności w określeniu jego impedancji \underline{Z}_o .

W dalszych obliczeniach przyjęto: $\underline{U}_{PWP} = \underline{U}$, $\underline{I}_{PWP} = \underline{I}$. By uzasadnić swoje stwierdzenie przytaczają wzory na moc czynną i bierną źródła \underline{E}_d , gdy $R = 0$:

$$P_{(h)} = E_d I \cos \theta = \frac{E_d E_o}{X} \sin \delta \quad (22)$$

$$Q_{(h)} = E_d I \sin \theta = \frac{E_d}{X} (E_o \cos \delta - E_d) \quad (23)$$

gdzie:

$$R = \text{Re}(\underline{Z}),$$

$$X = \text{Im}(\underline{Z}), \underline{Z} = \underline{Z}_o + \underline{Z}_d,$$

$$\theta = \arg \underline{E}_d - \arg \underline{I},$$

$$\delta = \arg \underline{E}_o - \arg \underline{E}_d.$$

We wzorze (22) można zauważyć, że przepływ mocy czynnej zdeterminowany jest poprzez kąty fazowe napięć na nadawczym i odbiorczym końcu linii. Analizując wzór (23), można zauważyć, że gdy $Q_{(h)} > 0$, to $\underline{E}_o > \underline{E}_d$, czyli dominującym źródłem rozpatrywanej harmonicznej w prądzie PWP jest źródło po stronie odbiorcy energii elektrycznej. Nie można jednak stwierdzić, z uwagi na obecność współczynnika $\cos \gamma$ we wzorze (23), że gdy $Q_{(h)} < 0$, to $\underline{E}_o < \underline{E}_d$, czyli dominującym źródłem rozpatrywanej harmonicznej jest dostawca energii elektrycznej. Wygenerowana moc bierna może nie docierać na stronę odbiorcy, ponieważ jest „pochłaniana” przez linię zasilającą. Kluczem do proponowanej metody jest znalezienie odpowiedzi na pytanie, jak daleko moc bierna wygenerowana przez źródło \underline{E}_d może „płynąć” wzdłuż impedancji \underline{X} ($\underline{X} = \underline{X}_d + \underline{X}_o$), przy założe-

niu, że impedancja rozłożona jest równomiernie pomiędzy źródłami \underline{E}_d i \underline{E}_o . W tym celu definiuje się napięcie w dowolnym punkcie p stosownie do rysunku 2:

$$\begin{aligned} R &= \text{Re}(\underline{Z}), \\ X &= \text{Im}(\underline{Z}), \underline{Z} = \underline{Z}_o + \underline{Z}_d, \\ \theta &= \arg \underline{E}_d - \arg \underline{I}, \end{aligned} \quad (24)$$

$$\delta = \arg \underline{E}_o - \arg \underline{E}_d.$$

Z warunku:

$$\frac{\partial |U_p|^2}{\partial X_d} = 0 \quad (25)$$

należy wyznaczyć punkt o najmniejszej wartości napięcia, jako:

$$x = \frac{E_d^2 - E_d E_o \cos \delta}{E_d^2 + E_o^2 - 2E_d E_o \cos \delta} X \quad (26)$$

gdzie X jest reaktancją od źródła \underline{E}_d do punktu o najmniejszej wartości napięcia.

Można zauważyć, że:

$$I^2 = \frac{E_d^2 + E_o^2 - 2E_d E_o \cos \delta}{X} \quad (27)$$

Uwzględniając wzór (23) oraz (27) ze wzoru (26) otrzymuje się:

$$x = \frac{-Q_{(h)}}{I^2} = \frac{-E_d}{I} \sin \theta \quad (28)$$

Ze wzoru (28) wynika, że x jest najdalej oddalonym punktem, do którego może „płynąć” moc bierna generowana przez źródło \underline{E}_d . W tym punkcie jest najmniejsza wartość napięcia pomiędzy źródłami \underline{E}_d i \underline{E}_o . Stanowi to aksjomat, że jeżeli punkt x znajduje się bliżej strony odbiorcy ($x > X/2$), to $\underline{E}_o < \underline{E}_d$, ponieważ źródło \underline{E}_o może „przepchnąć” wygenerowaną moc bierną na drugą stronę ($X/2$) „impedancji krytycznej”. Podobnie, jeżeli $x < X/2$ (x znajduje się bliżej strony zasilania), to $\underline{E}_o > \underline{E}_d$. Na tym etapie można zdefiniować wskaźnik CI „impedancji krytycznej”:

$$CI = 2 \frac{Q_{(h)}}{I^2} \quad (29)$$

W pracy [3] przedstawiony jest również przypadek dla $R \neq 0$. Wówczas wzory na moc czynną $P_{(h)}$ (2.33) i bierną $Q_{(h)}$ (2.34) przyjmują postać:

$$P_{(h)} = \frac{E_d E_o}{Z} \sin(\delta + \beta) - \frac{E_d^2}{Z} \sin \beta \quad (30)$$

$$Q_{(h)} = \frac{E_d E_o}{Z} \cos(\delta + \beta) - \frac{E_d^2}{Z} \cos \beta \quad (31)$$

gdzie $\beta = \arctg \frac{R}{X}$.

Wskaźnik CI przybiera postać:

$$CI = -2 \frac{E_d}{I} \sin(\theta + \beta) \quad (32)$$

Biorąc pod uwagę przedstawione rozważania, zaproponowaną metodę można zastosować w następujących etapach:

1. Wyznaczyć napięcie źródła dla strony zasilania za pomocą wyrażenia:

$$\underline{E}_d = \underline{U} - I \underline{Z}_d \quad (33)$$

2. Wyznaczyć wskaźnik CI według wzoru (32).
3. Wskazać sprawcę odkształcenia według kryterium:

$$D = \begin{cases} D_o & \text{gdy } CI > 0 \text{ lub } CI < 0 \text{ i } |CI| < Z_{\min} \\ D_n & \text{gdy } Z_{\min} < |CI| < Z_{\max} \\ D_d & \text{gdy } CI < 0 \text{ i } |CI| > Z_{\max} \end{cases} \quad (34)$$

gdzie:

Z_{\min} – minimum ze wszystkich możliwych wartości Z ,

Z_{\max} – maksimum ze wszystkich możliwych wartości Z .

Poprawne podjęcie decyzji w tej metodzie zależy od dokładności wyznaczenia impedancji Z . Ponieważ impedancja ta na ogół nie jest znana, przyjmuje się ją z pewnym przybliżeniem. Im dokładniejsze jest oszacowanie impedancji Z_d , tym precyzyjniej można wyznaczyć napięcie \underline{E}_d (33).

Na rysunku 13 przedstawiono przykładowe wyniki badania metody w układzie niesymetrycznym dla przypadku, kiedy to dostawca i odbiorca jednocześnie wprowadzają harmoniczne do sieci (strona dostawcy jest dominującym źródłem 5. i 11. harmonicznej, a strona odbiorcy 7. i 13.). Metoda poprawnie wskazuje stronę odpowiedzialną za zaburzenia harmoniczne, ale tylko dla przypadku, kiedy poprawnie jest wyznaczona wartość impedancji stron dostawcy i odbiorcy, przeciwnym razie następuje błędna identyfikacja.

Wnioski

- podjęcie poprawnej decyzji jest uzależnione od dokładności wyznaczenia impedancji dostawcy i odbiorcy,
- nie można określić ilościowego udziału prądów dostawcy i odbiorcy w prądzie PWP.

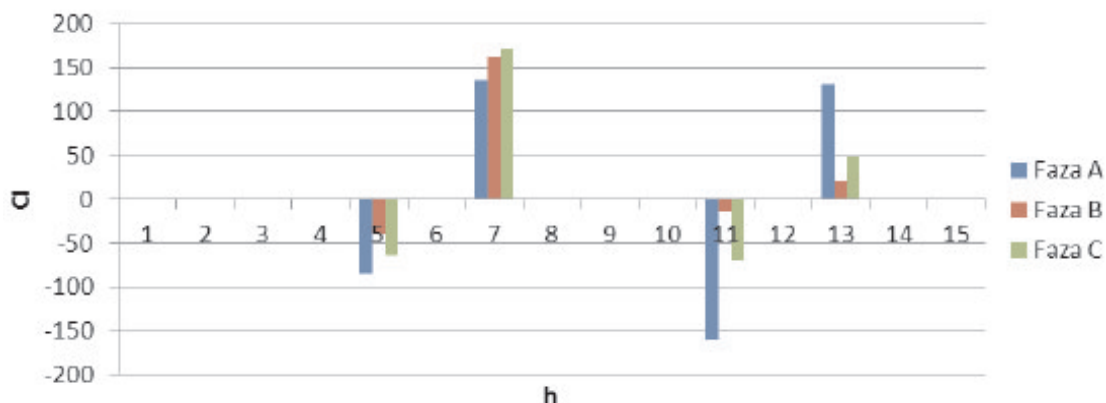
3. PODSUMOWANIE

Przedstawione wyżej metody lokalizacji źródeł wyższych harmonicznych nie zapewniają stuprocentowej pewności podjęcia poprawnej decyzji dotyczącej lokalizacji źródeł harmonicznych w sieci elektroenergetycznej. Wymienione metody są skuteczne tylko dla ściśle określonych warunków, w warunkach kiedy proces identyfikacji źródła zakłóceń wykracza poza nie wzrasta prawdopodobieństwo uzyskania błędnej odpowiedzi. Kierunkiem rozwojowym w tej dziedzinie powinno być zastosowanie algorytmów sieci neuronowych do pomocy w podejmowaniu decyzji o stronie wprowadzającej zakłócenia.

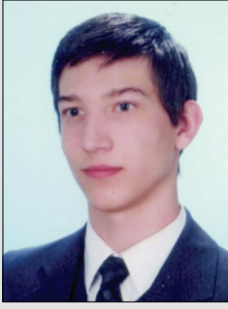
Literatura

- [1] Rashid M.H.: *Power Electronics: Circuits, Devices and Applications*. Prentice Hall, 3rd edition, 2003.
- [2] Bigaj D., Hanzelka Z.: *Metody lokalizacji źródeł wyższych harmonicznych w sieciach zasilających*. VII Międzynarodowa Konferencja „Nowoczesne urządzenia zasilające w energetyce”.
- [3] Chen Chaoying, Liu Xiuling, Koval Don, Xu Wilsun, Tayjasanant T.: *Critical Impedance Method – A New Detecting Harmonic Sources Method in Distribution Systems*. IEEE Transactions on Power Delivery, 19,1, January 2004.
- [4] Pyzalski T.: *Lokalizacja źródeł harmonicznych w systemach elektroenergetycznych*. 20.03.2006 (rozprawa doktorska).
- [5] Wilkosz K.: *Lokalizacja źródeł wyższych harmonicznych w prądzie lub napięciu w wyróżnionym punkcie w sieci elektroenergetycznej przy pełnej informacji pomiarowej*. Elektro-info, 06.2006.
- [6] Chun Li, Xu Wilsun, Tayjasanant Thavatchai.: *A »Critical Impedance« – Based Method for Identifying Harmonic Sources*. IEEE Transactions on Power Delivery, 19,1, April 2004.
- [7] Xu Wilsun, Liu Xian, Liu Yilu: *An Investigation on the Validity of Power-Direction Method for Harmonic Source Determination*.
- [8] Hamzah Noraliza, Mohamed Azah, Hussain Aini: *Identification of harmonic source the point of common coupling based on voltage indices*. Universiti Teknologi Malaysia, 43(D) Dis. 2005,11–32.

Wpłynęło: 11.10.2009



Rys. 13. Wartości impedancji krytycznej dla poszczególnych harmonicznych w fazach A, B, C



Piotr SZCZĘSNY

Urodził się w 1985 roku w Myślenicach. Ukończył studia w 2009 roku na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Specjalność to Energoelektronika. Przedmiotem zainteresowań są odnawialne źródła energii.

e-mail: piotr.szczesny@o2.pl



Paweł WILCZAK

Urodził się w 1984 roku w Oświęcimiu. Ukończył studia w 2009 roku na Wydziale Elektrotechniki, Automatyki, Informatyki i Elektroniki Akademii Górniczo-Hutniczej w Krakowie. Specjalność Automatyka i Metrologia. Zainteresowania naukowe dotyczą metrologii i cyfrowego przetwarzania sygnałów.

e-mail: wilczak.pawel@gazeta.pl