

**Andrzej MICHALUK**

POLITECHNIKA WROCLAWSKA, INSTYTUT ENERGEOELEKTRYKI

## Rezonans w układach nieliniowych z uwzględnieniem transformatora zasilającego

Mgr inż. Andrzej MICHALUK

W 2003 roku ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej na kierunku Elektrotechnika i uzyskał tytuł magistra inżyniera w specjalności Elektroenergetyka przemysłowa i komunalna. Od 2003 roku jest uczestnikiem studiów doktoranckich na Wydziale Elektrycznym Politechniki Wrocławskiej, gdzie zajmuje się badaniem zjawisk związanych z występowaniem wyższych harmonicznych w przemysłowych sieciach średniego napięcia.



e-mail: andrzej.michaluk@pwr.wroc.pl

### Streszczenie

W artykule omówiono zjawiska rezonansowe występujące przy udziale wyższych harmonicznych. Zjawiska te są niejednoznacznie interpretowane w literaturze, w związku z czym przedstawiono mechanizm powstawania wyższych harmonicznych w sieci elektroenergetycznej, który wyjaśnia przyjęte przez autora stanowisko odnośnie występujących zjawisk rezonansowych. Przedstawiono także przykładowy przebieg i skutki awarii w sieci przemysłowej spowodowanej wystąpieniem rezonansu.

**Słowa kluczowe:** wyższe harmoniczne, rezonans, transformator.

### A resonance in nonlinear circuits supplied by transformer

#### Abstract

In this article phenomenon of resonance with participation of higher harmonics are discussed. The phenomenon are ambiguously interpreted in literature, thus a mechanism of generating of higher harmonics in electrical networks is presented. The mechanism explains the stand taken by the authors on higher harmonics resonance phenomenon. As an example a course and results of resonance breakdown in industrial network are shown.

**Keywords:** higher harmonics, resonance, transformer.

### 1. Wstęp

W układach nieliniowych, w związku z występowaniem wyższych harmonicznych napięcia i prądu, wystąpienie zjawiska rezonansu jest bardziej prawdopodobne niż w układach sieci zawierających odbiorniki liniowe, w których występuje tylko podstawowa harmoniczna. Dlatego tematyka dotycząca rezonansów jest bardzo często poruszana przy okazji rozważań związanych z rozplywem wyższych harmonicznych w sieci. Należy podkreślić, że wyznaczenie częstotliwości rezonansowych dla danej konfiguracji sieci może być pracochłonne, ale zasady wyznaczania częstotliwości własnej obwodów są jasno określone i nie budzą zastrzeżeń. Natomiast określenie charakteru występującego rezonansu (prądowy, napięciowy) może wywoływać pewne wątpliwości, gdyż w literaturze prezentowane są różne przeciwstawne interpretacje zjawisk w analizowanych układach sieci, a jako przykład można tu przytoczyć prace [1] i [2]. Wątpliwości te dotyczą głównie zjawisk rezonansowych występujących pomiędzy elementami przesyłowymi (np. transformatory) a elementami przyłączonymi po stronie obciążenia (np. baterie kondensatorów). W pracy [1] zjawisko rezonansu pomiędzy wymienionymi elementami określone jest mianem rezonansu równoległego, a autorzy wyciągają takie wnioski na podstawie analizy przyjętego schematu zastępczego. Natomiast autorzy pracy [2], badając zjawiska rezonansowe w rzeczywistej sieci przemysłowej tego samego typu, rezonans nazywają rezonansem szeregowym. Koniecz-

nym jest zatem ustosunkowanie się do powstałych rozbieżności i zajęcie odpowiedniego stanowiska.

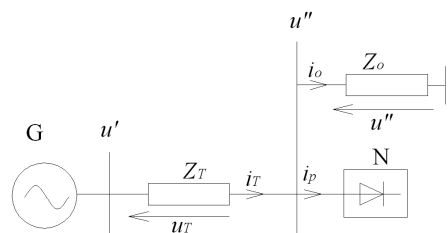
### 2. Interpretacja zjawiska rezonansu na podstawie powszechnie stosowanych modeli źródeł wyższych harmonicznych

Zgodnie z powszechnie przyjętymi i prezentowanymi przez wielu badaczy zasadami modelowania odbiorników nieliniowych, jako przyczynę występowania odkształconych prądów i napięć przyjmuje się jedynie wpływ odbiornika nieliniowego [1, 3-8]. W związku z przyjętym założeniem, w schematach zastępczych modelem źródła wyższych harmonicznych zastępuje się tylko odbiornik nieliniowy, a co za tym idzie model źródła wyższych harmonicznych włącza się w schemacie zastępczym sieci w punkcie przyłączenia danego (nieliniowego) odbiornika. Niemniej jednak nie ma pełnej zgodności wśród autorów prac dotyczących tych zagadnień, jak powinien wyglądać schemat zastępczy dla samego odbiornika nieliniowego.

Autorzy opracowania [3] stwierdzają, że poprawnym modelem dla większości odbiorników nieliniowych - przy odkształceniu napięcia nie większym niż 10% - jest idealne źródło prądowe. Również w pracy [4] odbiornik nieliniowy modelowany jest jako idealne źródło prądowe, przy czym autorzy zakładają, że napięcie zasilające może być odkształcone, nie podają jednak żadnych ograniczeń co do stopnia odkształcenia. W pracy [5] autorzy sugerują stosowanie idealnego źródła prądowego jako poprawnego modelu dla przekształtników, jednak zwracają uwagę na fakt, że modele poszczególnych odbiorników nieliniowych powinny mieć różne postacie ze względu na różną specyfikę ich pracy. Równie często w pracach poświęconych tematyce modelowania odbiorników nieliniowych (jako źródeł wyższych harmonicznych) spotyka się modele w postaci rzeczywistych źródeł Thevenina lub Nortona [6, 7, 8].

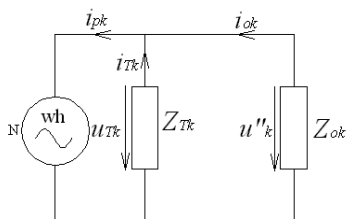
Przyjmując zatem którykolwiek z modeli proponowanych przez poszczególnych autorów, schemat zastępczy fragmentu sieci przedstawionego na rysunku 1 przyjmie dla harmonicznej rzędu  $k$  postać jak na rysunku 2.

Należy przypomnieć, iż modelem odbiornika nieliniowego (N) w tym schemacie może być źródło prądowe lub napięciowe, rzeczywiste lub idealne a parametry poszczególnych elementów układu ( $Z_{Tb}$ ,  $Z_{ok}$ ) zależą od rzędu  $k$  rozpatrywanej harmonicznej.



Rys. 1. Przykładowy schemat prostego układu nieliniowego;  $Z_T$  – impedancja sieci zasilającej,  $Z_o$  – impedancja odbiorów liniowych, N – model odbiornika nieliniowego dla wyższych harmonicznych

Fig. 1. Hypothetical diagram of simply nonlinear circuit;  $Z_T$  – impedance of supplying network,  $Z_o$  – impedance of linear load, N – model of nonlinear load for higher harmonics



Rys. 2. Schemat zastępczy układu przedstawionego na rys. 1 (powszechnie przyjmowany w literaturze);  $k$  – rząd harmonicznego  
Fig. 2. Equivalent circuit of diagram shown in Fig. 1. (commonly presented in literature);  $k$  – order of harmonic

Nie wnikając w genezę powstawania wyższych harmonicznych w sieci i analizując tylko zbudowany schemat zastępczy (rys. 2), według którego odbiory liniowe ( $Z_o$ ) i elementy przesyłowe ( $Z_T$ ) stanowią równoległy układ zasilany ze źródła wyższych harmonicznych nasuwa się wniosek, że w układzie może wystąpić rezonans równoległy. Zgodnie ze schematem zastępczym, rezonans ten wystąpić może pomiędzy elementami przesyłowymi  $Z_T$  (np. transformatorem) a odbiorami liniowymi  $Z_o$  (np. baterią kondensatorów). Tak też zjawisko rezonansu w układach nieliniowych jest przedstawiane w literaturze przez wielu autorów [1, 9]. Powodem takiej interpretacji jest fakt uproszczonej analizy układu, w którym odbiornik nieliniowy w schemacie zastępczym jest zastąpiony modelem źródła wyższych harmonicznych a sieć zasilająca ( $Z_T$ ) wraz z resztą odbiorników ( $Z_o$ ), zgodnie ze schematem zastępczym, są z tego źródła zasilane.

### 3. Rezonans w układach z transformatorem zasilającym – analiza zjawisk

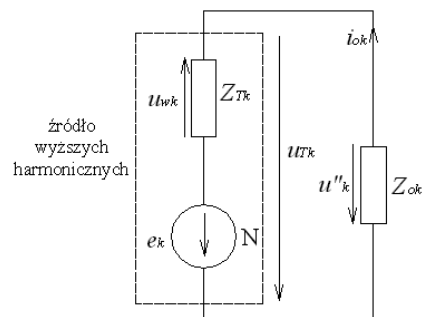
Analizując skutki awarii w sieciach z odbiorami nieliniowymi, których przyczyną było wystąpienie zjawiska rezonansu [10, 11], stwierdzono, że przyczyną uszkodzeń urządzeń były przetężenia i przepięcia wywołane rezonansem powstałym w układzie baterii kondensatorów - transformator. Powstaje jednak pytanie: czy na pewno w układach nieliniowych, wskutek wystąpienia warunków rezonansowych np. dla transformatora i baterii kondensatorów, powstaje rezonans prądowy, jak to wynika ze schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 2. Aby udzielić odpowiedzi na to pytanie należy przeanalizować genezę powstawania wyższych harmonicznych prądu i napięcia w sieci zawierającej transformator [12, 13], którą w skrócie można opisać w następujący sposób (odnosząc się do układu z rys. 1):

- układ jest zasilany z generatora napięciem sinusoidalnym  $u'$
- wskutek pracy odbiornika nieliniowego płynie z generatora odkształcony prąd  $i_T$ , zawierający wyższe harmoniczne
- odkształcony prąd  $i_T$  płynący przez elementy przesyłowe o impedancji  $Z_T$  (transformator) powoduje powstanie na nich napięcia odkształconego  $u_T$ , zawierającego wyższe harmoniczne
- spadek napięcia  $u_T$  powoduje powstanie odkształcenia napięcia na szynach odbiorczych  $u''$ , którego wyższe harmoniczne są równe co do modułu wyższemu harmonicznemu napięciu na elementach przesyłowych  $u_T$
- pod wpływem odkształconego napięcia na szynach odbiorczych  $u''$ , z których zasilane są również odbiorniki  $Z_o$ , płynie do nich odkształcony prąd  $i_o$ , zawierający wyższe harmoniczne.

Zatem wyższe harmoniczne napięcia na szynach odbiorczych  $u''$  powstają wskutek „współpracy” odbiornika nieliniowego i elementów przesyłowych, więc rozpatrywanie tylko odbiornika nieliniowego jako źródła wyższych harmonicznych oddzielnie od elementów przesyłowych nie jest poprawnym podejściem przy analizie sieci. Generatorem wyższych harmonicznych jest odbiornik nieliniowy wraz z elementami przesyłowymi i należy je rozpatrywać łącznie – odbiornik nieliniowy jest przyczyną przepływu prądu odkształconego, natomiast elementy przesyłowe są przyczyną pojawienia się napięcia odkształconego. Nie należy także zapominać o tym, że źródło wyższych harmonicznych nie jest źródłem mocy, gdyż moc wyższych harmonicznych tracona w układzie jest dostarczona z generatora – źródła podstawowej harmonicznej [12]. W przypadku wystąpienia – dla danej harmonicznej rzędu  $k$ , warunków rezonansowych w układzie przedstawionym na rysunku 1 następuje przepływ prądu ze źródła zasilania przez szeregowo połączone elementy przesyłowe ( $Z_T$ ) i odbiorniki ( $Z_o$ ). Harmoniczna przepływającego prądu, dla której wystąpiły warunki rezonansowe może w takim przypadku osiągnąć duże wartości w wyniku zmniejszenia się wypadkowej impedancji szeregowo połączonych elementów przesyłowych i odbiorników. W układzie zastępczym otrzymuje się obwód rezonansowy jak na rysunku 3, gdzie źródłem wyższych harmonicznych jest element przesyłowy, którym jest transformator. Przedstawiony obwód opisany jest równaniami:

$$i_{ok} = i_{Tk} - i_{pk} \quad (1)$$

$$u_{Tk} = e_k - u_{wk} \quad (2)$$



Rys. 3. Schemat zastępczy obwodu rezonansowego (dla harmonicznej rzędu  $k$ )  
Fig. 3. Equivalent diagram of the resonance circuit (for  $k$ -th harmonic)

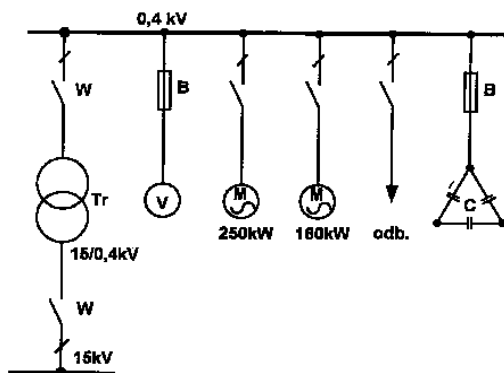
Wskutek przepływu danej harmonicznej (lub harmonicznych) prądu o dużych wartościach wystąpią na elementach układu przepięcia, które prowadzą do uszkodzeń w sieci [10, 11]. Opisane powyżej zjawisko ma znamiona rezonansu napięć (szeregowego) w odróżnieniu od obrazu zjawisk otrzymanego z rozważań w oparciu jedynie o schemat zastępczy przedstawiony na rysunku 2, sprowadzający zjawisko do rezonansu równoległego [1, 9]. Poprawny, odzwierciedlający genezę powstawania wyższych harmonicznych napięcia i prądu w sieci tok rozumowania a więc i schemat powinien traktować jako źródło wyższych harmonicznych łącznie układ odbiornika nieliniowego z elementami przesyłowymi (łączącymi odbiornik nieliniowy ze źródłem zasilającym).

W układzie przedstawionym na rysunku 1 dyskutowano do tej pory możliwość powstania rezonansu pomiędzy elementami przesyłowymi ( $Z_T$ ) a odbiorami liniowymi ( $Z_o$ ) wykluczając rezonans prądowy. Nie oznacza to jednak, że w omawianym układzie nie ma możliwości powstania rezonansu prądowego. Objasnienie możliwości powstania rezonansu prądowego wymaga wniknięcia w strukturę impedancji odbiorników nieliniowych ( $Z_o$ ). Rezonans prądowy może powstać w obwodach tworzonych przez równole-

głe odbiory, zasilane ze wspólnych szyn, a wchodzące w skład wypadkowej impedancji przedstawionej na schemacie zastępczym jako  $Z_o$  [2, 14].

#### 4. Przykładowy przebieg awarii w sieci przemysłowej

Na potwierdzenie poprawności przedstawionej interpretacji zjawisk jako przykład przedstawiono przebieg awarii, która miała miejsce w sieci przemysłowej niskiego napięcia (rys. 4) [11].



Rys. 4. Ideowy schemat fragmentu omawianej sieci przemysłowej  
Fig. 4. Diagram of the segment in the discussed industrial network

Rozdzielnia (rys. 4) w momencie wystąpienia awarii pracowała w warunkach bardzo małego obciążenia, w związku z czym przy biegu jałowym silników sprężarek (160kW) i przy jednoczesnym załączeniu silników sprężarek (250kW) nastąpiło włączenie maksymalnej liczby członów baterii kondensatorów układu automatycznej kompensacji mocy biernej. W tych warunkach powstał dla 7-mej harmonicznej obwód rezonansowy układu: bateria kondensatorów – transformator zasilający. Należy zaznaczyć, że silniki napędu kompresorów (250kW) podczas rozruchu są przyczyną pojawiania się 7-mej harmonicznej napięcia przekraczającej 2% wartości składowej podstawowej.

W związku z tym w obwodzie rezonansowym pojawiła się 7-ma harmoniczna prądu o wartości ok. 10kA powodując zadziałanie zabezpieczenia zwarcowego, którego prąd pobudzenia ustawiono na wartość 6,72kA, z nastawą czasową ok. 0,3s. Jednocześnie wartość prądu była mniejsza od wartości prądu koniecznego do przepalenia wkładek bezpiecznikowych baterii kondensatorów w tak krótkim czasie. Dlatego też bateria przez cały czas przebiegu awarii pozostawała załączona na szyny zbiorcze rozdzielni. Wskutek zadziałania zabezpieczenia i przerwania prądu (o dużej wartości) wystąpiły w układzie przepięcia przekraczające wytrzymałość elektryczną izolacji w niektórych miejscach rozdzielni, powodując uszkodzenie części aparatury.

Przedstawiony obraz zjawisk mających miejsce podczas awarii w omawianej sieci jednoznacznie wskazuje na fakt wystąpienia rezonansu szeregowego w układzie transformator – bateria kondensatorów. Impedancja wypadkowa omawianego układu dla częstotliwości rezonansowej ma bardzo małą wartość, w związku z czym prąd osiągnął bardzo dużą wartość. W trakcie rezonansu równoległego impedancja wypadkowa układu byłaby bardzo duża i prąd płynący w obwodzie nie mógłby osiągnąć takich wartości jakie wystąpiły w przedstawionym przypadku.

W niniejszej pracy podano jedynie praktyczny dowód wystąpienia rezonansu. Wykorzystując schematy zastępcze zaproponowane w niniejszej pracy można oszacować prądy poszczególnych harmonicznych i napięcia z nimi związane.

#### 5. Podsumowanie

W obwodach nieliniowych występuje zwiększone ryzyko powstania warunków dla wystąpienia rezonansów, co może prowadzić do poważnych awarii w sieci.

Pomiędzy odbiorami i elementami przesyłowymi, może wystąpić rezonans szeregowy a nie równoległy jak wynika z analizy schematu zastępczego przedstawionego na rysunku 2 powszechnie stosowanego w literaturze. Przyjęcie jedynie odbiornika nieliniowego jako źródła wyższych harmonicznych a także analiza układu sieci wyłącznie na podstawie schematu zastępczego zbudowanego na bazie takiego modelu prowadzi do błędnych wniosków dotyczących charakteru powstających rezonansów, a tym samym błędów oszacowania wartości prądów.

Prawidłowy obraz zjawisk rezonansowych daje analiza układu z uwzględnieniem odbiornika nieliniowego łącznie z elementami przesyłowymi jako źródła wyższych harmonicznych.

Powyższy wniosek potwierdzają awarie w sieciach przemysłowych. Awaryje te mogą powstać powstałych wskutek wystąpienia zjawiska rezonansu napięć dla wyższych harmonicznych.

#### 6. Literatura

- [1] Dugan R.C., McGranaghan M.F., Beaty H.W. "Electrical power systems quality" McGraw-Hill 1996
- [2] Pawłowski M., Szymański A., Fjałkowski Z. „Zjawiska rezonansowe w sieciach przemysłowych” Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 8/2003
- [3] IEEE Recommended Practices and Requirements for Harmonic Control in Electrical Power Systems. IEEE Std. 519-1992
- [4] A Robert, T. Deflandre „Guide for Assessing the Network Harmonic Impedance” CIRE/97
- [5] Task Force on Harmonics Modeling and Simulation “Modeling and Simulation of the Propagation of Harmonics in Electric Power Networks” IEEE Trans. On Power Delivery, Vol. 11, No. 1, 1996
- [6] Mihirig “Harmonic Study Analysis Guidelines for Industrial Power Systems” Electricity Today Magazine 3/2001
- [7] D. Bigaj, Z Hanzelka “Metody lokalizacji źródeł wyższych harmonicznych w sieciach zasilających” Elektrotechnika i Elektronika wyd. AGH 1/2004
- [8] T. Pyzalski, K. Wilkosz “Praktyczna metoda lokalizacji generacji harmonicznych napięcia w systemie elektroenergetycznym” Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze – Sieci 2004, V Konferencja Naukowo-Techniczna
- [9] Hanzelka Z., Klempka R. Pasywne filtry wyższych harmonicznych. Napędy i sterowanie 3/2000
- [10] Garcia F.R., Naves A.C. The harmonic impact of self-generating in power factor correction equipment of industrial loads: real case studies. Harmonics and Quality Power 2000 Proceedings Ninth International Conference On.
- [11] Cichoń M., Szkółka S., Szymański A., Mazurek B. „ Wyższe harmoniczne jako źródło przepięć w sieci niskiego napięcia” Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 11/99
- [12] Szymański A., Michaluk A. „Przenoszenie przez transformator wyższych harmonicznych generowanych podczas pracy maszyny wciągowej” Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 7/2005
- [13] Michaluk A., Szymański A. „Wpływ lokalizacji baterii kondensatorów w sieci przemysłowej na poziom wyższych harmonicznych prądu” Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 3/2007
- [14] Pawłowski M., Fjałkowski Z. „Rezonans prądów w sieciach przemysłowych 6kV” Mechanizacja i Automatyzacja Górnictwa 7/2001