

JAKOŚĆ ENERGII ELEKTRYCZNEJ

CZĘŚĆ 4 – Wyższe harmoniczne napięć i prądów

Zbigniew Hanzelka

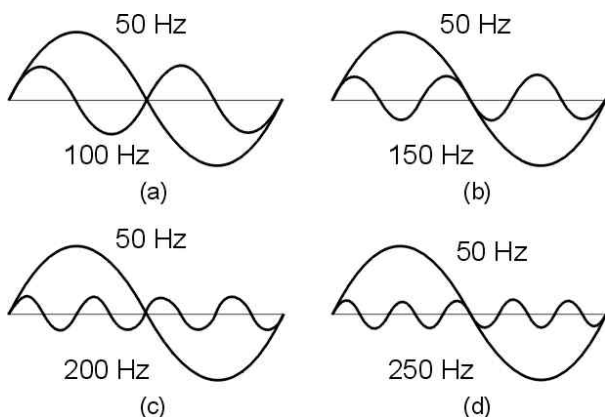
Akademia Górniczo-Hutnicza, 30-019 Kraków, Al. Mickiewicza 30
tel: (012) 617 28 78, tel/fax: (012) 633 22 84, e-mail: hanzel@uci.agh.edu.pl
Konsultant techniczny Twelve Electric.

Streszczenie: Wyższe harmoniczne napięć i prądów są jednym z najstarszych zaburzeń które pojawiło się w systemie elektroenergetycznym. Przez wiele lat ich wartość rosła jako efekt wzrostu liczby odbiorników nieliniowych oraz malejącego udziału odbiorników rezystancyjnych (tłumiących, głównie elektrotermicznych). Ostatnia dekada przyniosła poprawę sytuacji. Jest to spowodowane głównie rosnącym poziomem wiedzy i świadomości wagi zagrożeń jakie niesie ze sobą obecność wyższych harmonicznych (wh). Producenci sprzętu, spełniając oczekiwania odbiorców, oferują coraz częściej urządzenia o sinusoidalnych prądach wejściowych. Nie oznacza to, że problem został rozwiązany, można mówić jedynie o pewnych symptomach wskazujących na zmniejszenie zagrożenia. Nową jakością jest to, że miejsce dużych nieliniowych instalacji i urządzeń (np. napędów) zlokalizowanych w jednym punkcie systemu zasilającego (w zakładzie przemysłowym) pojawiły się nieliniowe odbiorniki komunalne (oświetlenie, sprzęt elektroniczny itp.), których moc jednostkowa jest niewielka, ale ich ogromna liczba sprawia, że negatywny efekt sumaryczny jest bardzo znaczący, a rozproszona instalacja zasadniczo utrudnia jego redukcję. W artykułach poświęconych harmonicznym (część 4 i 5 cyklu) omówiono podstawowe informacje dotyczące tego zaburzenia, ze szczególnym podkreśleniem jego źródeł, skutków oraz sposobów eliminacji.

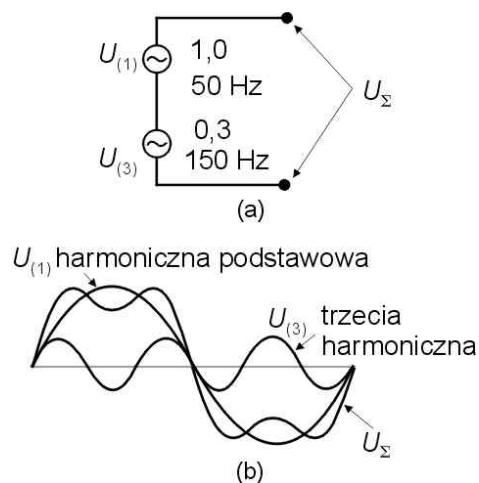
1. WPROWADZENIE

1.1. Definicja harmonicznej

Pojęcie harmonicznej wywodzi się z akustyki, gdzie odnoszone było do wibracji struny lub kolumny powietrza. W przypadku przebiegów występujących w elektrotechnice, harmoniczna jest definiowana jako składowa przebiegu o częstotliwości będącej całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej (rys. 1).



Rys. 1. Przebieg sinusoidy o częstotliwości podstawowej 50 Hz i jego harmoniczne: a) druga (100Hz), b) trzecia (150Hz), c) czwarta (200Hz), d) piąta (250Hz)

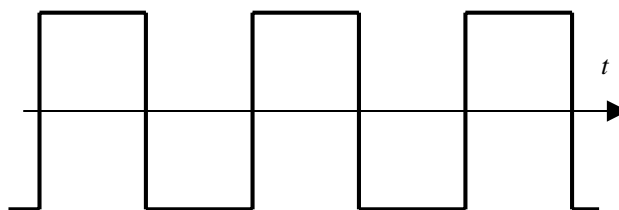


Rys. 2. Kompozycja przebiegu odkształconego

1.2. Kompozycja przebiegu odkształconego

Poprzez superpozycję przebiegów sinusoidalnych o różnych częstotliwościach i amplitudach, możliwe jest otrzymanie przebiegu odkształconego (a więc różnego od sinusoidy) o dowolnym, zadanym kształcie (rys. 2).

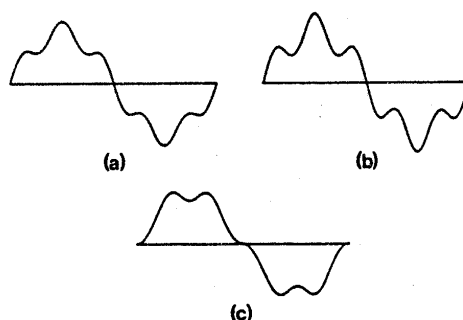
Przykładowo, przebieg prostokątny jak na rysunku 3 jest wynikiem sumowania nieskończonej liczby harmonicznych, których amplitudy maleją odwrotnie proporcjonalnie do ich rzędów n ($=f_n/f_{(1)}$), a ich częstotliwości $f_n = (2k+1)f_{(1)}$ Hz, $k = 0, 1, 2, \dots$ są nieparzystymi krotnościami częstotliwości harmonicznej podstawowej $f_{(1)} = 50$ Hz. Zaniedbanie harmonicznych o niewielkich amplitudach i przyjęcie skończonej liczby składników powoduje „złagodzenie” wierzchołków przebiegu wypadkowego i zmniejszenie nachyleń jego boków.



Rząd harmonicznej	Częstotliwość [Hz]	Względna wartość amplitudy
1	50	1,0
3	150	1/3
5	250	1/5
7	350	1/7
9	450	1/9
...
n	50n	1/n

Rys. 3. Przebieg prostokątny będący superpozycją podstawowej i nieparzystych harmonicznych

O kształcie przebiegu decydują nie tylko częstotliwości i wartości amplitud składowych harmonicznych, lecz również kąty ich wzajemnych przesunięć fazowych. Rysunek 4 ilustruje wpływ wartości amplitudy i fazy harmonicznej na kształt przebiegu wypadkowego.



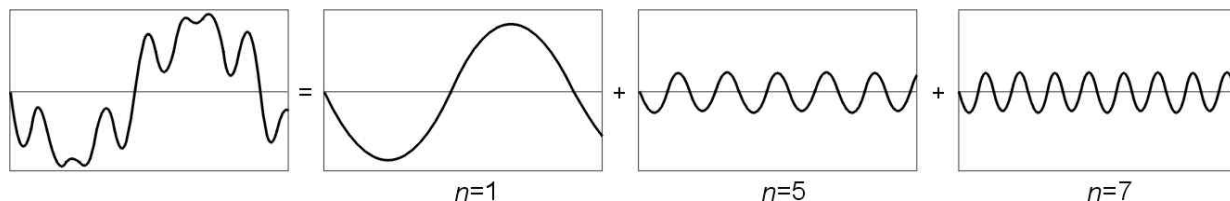
Rys. 4. Przebiegi różniące się wartościami i kątami fazowymi odkształcającej harmonicznej: a) 1 (harmoniczna podstawowa) -100%, 5 (5 harmoniczna) -15%, $\varphi_{15} = 0$, b) 1-100%, 5-30%, $\varphi_{15} = 0$, c) 1-100%, 5-15%, $\varphi_{15} = 180^\circ$

Przebiegi na rysunkach 4a i b zawierają prócz składowej podstawowej, której wartość w jednostkach względnych wynosi jeden, również współfazową z nią 5 harmoniczną, której wartość wynosi 0,15 (rys. 4a) i 0,30 (rys. 4b). Przebieg na rysunku 4c, zawiera prócz

harmoniczej podstawowej, również przesuniętą względem niej w fazie o 180° piątą harmoniczną o amplitudzie 0,15.

1.3. Dekompozycja przebiegu odkształconego

Tak jak każdy odkształcony przebieg czasowy napięcia lub prądu może być utworzony z harmoniczných, tak każdy okresowy przebieg może być poddany rozkładowi na harmoniczne (rys. 5)¹.



Rys. 5. Dekompozycja przebiegu odkształconego na składowe harmoniczne: podstawową oraz piątą i siódmą

Ta technika analizy pozwala rozważać oddzielnie każdą składową odkształconego przebiegu, a następnie stosując standardowe metody analizy liniowych obwodów elektrycznych, uzyskać wynik ostateczny jako efekt sumowania rezultatów częściowych.

Za twórcę tej techniki analizy uważa się powszechnie francuskiego matematyka Jana Baptystę Fouriera, który po raz pierwszy przedstawił tę koncepcję w 1807 r. dla rozwiązania równania przewodzenia ciepła. Ze względu na niedostatki formalne praca nie uzyskała pozytywnych ocen od jej pierwszych recenzentów, członków Francuskiej Akademii Nauk – Laplace’a, Lagrange’a i Legendre’a. Ostatecznie w 1822 roku, po dwóch dalszych recenzjach, Fourier opublikował swoją pracę (*Theorie Analytique de la Chaleur*). Zawierała ona wśród innych wyników badań, również liczbową postać całki i szeregu Fouriera dla funkcji $f(x)$:

$$\begin{aligned}
 f(x) &= \frac{a_0}{2} + a_{(1)} \cos x + b_{(1)} \sin x \\
 &\quad + a_{(2)} \cos 2x + b_{(2)} \sin 2x \\
 &\quad + \dots\dots\dots \\
 &\quad + a_{(n)} \cos nx + b_{(n)} \sin nx + \dots \\
 &= \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} a_{(n)} \cos nx + \sum_{n=1}^{\infty} b_{(n)} \sin nx = \frac{a_0}{2} + \sum_{n=1}^{\infty} c_{(n)} \sin(nx + \varphi_{(n)})
 \end{aligned}$$

gdzie dla $T=2\pi$

$$a_0 = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) dx \qquad a_{(n)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \cos(nx) dx \qquad b_{(n)} = \frac{1}{\pi} \int_0^{2\pi} f(x) \sin(nx) dx$$

$$c_{(n)} = \sqrt{a_{(n)}^2 + b_{(n)}^2} \qquad \varphi_{(n)} = \operatorname{arctg} \frac{b_{(n)}}{a_{(n)}}$$

¹ Spełniający tzw. warunki Dirichleta: (a) w przedziale czasu 0-T (okres przebiegu) liczba ekstremów (maksymów i minimów) jest skończona; (b) jeżeli występują punkty nieciągłości to są one pierwszego rodzaju, a ich liczba jest skończona.

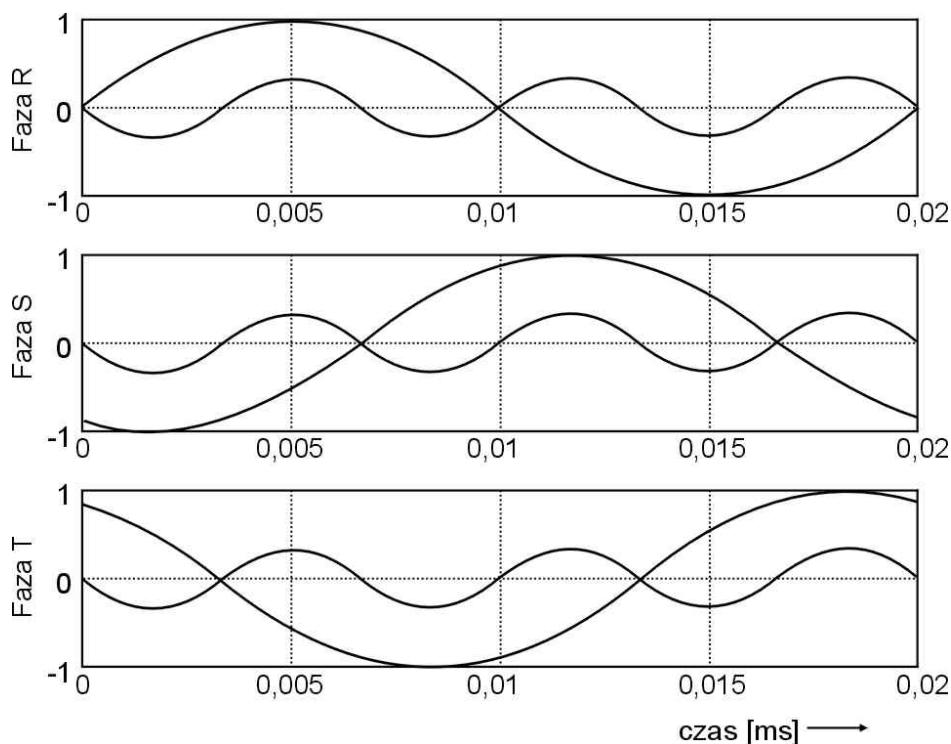
Szereg Fouriera dotyczy dowolnych niesinusoidalnych okresowych przebiegów. Najniższa składowa harmoniczna – $c_{(1)}$ (nie stała a_0) nazywana jest podstawową. Pozostałe składowe szeregu zwane są wyższymi harmonicznymi.

1.4. Harmoniczne i składowe symetryczne

Harmoniczne występujące w układzie trójfazowym mogą być rozważane z uwzględnieniem pojęć składowych symetrycznych podobnie jak w przypadku składowej podstawowej. W trójfazowym symetrycznym układzie, dla podstawowej i każdej z harmonicznymi, istnieje prosta relacja pomiędzy rzędem harmonicznymi i odpowiadającą mu kolejnością faz (tablica 1).

Tablica 1 - Relacja pomiędzy kolejnością faz (składową symetryczną) i rzędem harmonicznymi

Kolejność faz	zgodna	przeciwna	zerowa
	1	2	3
4	5	6	
7	8	9	
10	11	12	
...	
	$3k+1$	$3k+2$	$3k+3$ dla $k=0,1,2,3,\dots$



Rys. 6. Symetryczny układ napięć trójfazowych oraz prądy trzeciej harmonicznej

Na rysunku 6 przedstawiono przykładowo przebiegi trzeciej harmonicznej prądu na tle napięć fazowych. Widać wyraźnie, że składowe te w poszczególnych fazach pokrywają się. W podobny sposób można wykazać, że 5 harmoniczne w poszczególnych fazach są przesunięte względem siebie o 120^0 , a kolejność ich faz opisana jest sekwencją: $R \rightarrow T \rightarrow S$.

1.5. Klasyfikacja harmonicznych

Z punktu widzenia rodzaju analizowanych w elektrotechnice przebiegów można wyróżnić harmoniczne napięcia lub prądu.

Ze względu na relację częstotliwości składowych analizowanego przebiegu odkształconego, do częstotliwości składowej podstawowej, można wyróżnić, prócz harmonicznych dodatkowo:

interharmoniczne – składowe o rzędach nie będących całkowitą krotnością częstotliwości podstawowej;

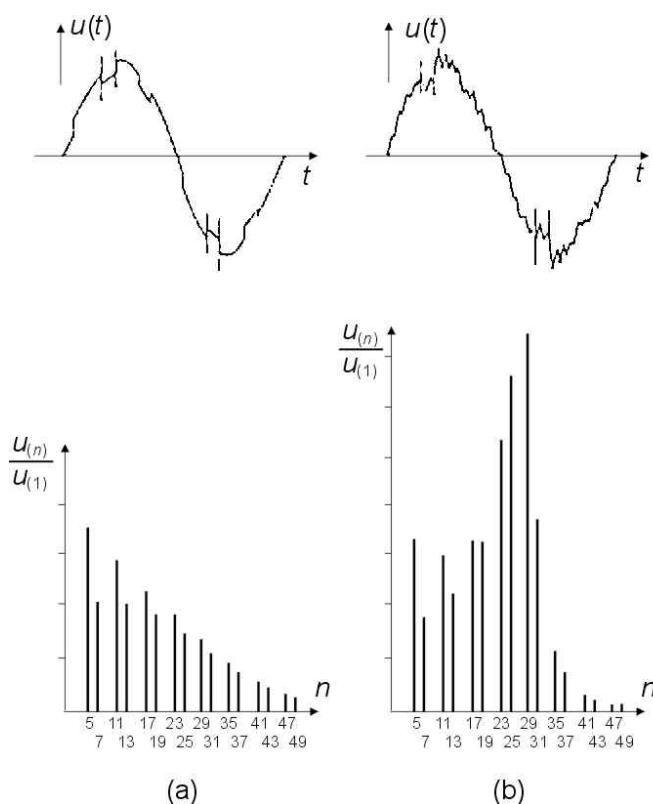
subharmoniczne – składowe o częstotliwościach mniejszych od częstotliwości składowej podstawowej.

Harmoniczne stacjonarne (harmoniczne stanu ustalonego) są rezultatem analizy Fouriera zastosowanej do funkcji okresowych. Harmoniczne określane często jako „nie stacjonarne” lub „przejściowe” dotyczą funkcji nieokresowych, analizowanych w skończonym przedziale czasu.

W układach przekształtnikowych, dodatkowo wyróżnia się dwie grupy harmonicznych:

- charakterystyczne, występujące w prądach przekształtnika w wyidealizowanych warunkach jego pracy,
- nie charakterystyczne, występujące w rzeczywistych warunkach pracy, których obecność nie wynika z liczby pulsów przekształtnika np. 5 harmoniczna w przekształtniku 12- pulsowym.

Często spotykanym terminem jest określenie – harmoniczne „potrójne” – w odniesieniu do składowych, których rzędy są całkowitą krotnością trzech. Nie wymagają wyjaśnienia takie pojęcia jak: harmoniczne parzyste i nieparzyste.



Rys. 7. Przykładowe przebiegi czasowe funkcji $f(t)$ i spektrum harmoniczne

Dla większości odbiorników nieliniowych wartość poszczególnych harmonicznych maleje wraz ze wzrostem ich rzędów. Tę typową postać spektrum harmonicznego (widma),

przedstawionego przykładowo na rysunku 7a, należy odróżnić od znacznie rzadziej występującego przebiegu widma – rysunek 7b, którego postać może być spowodowana np. wzmocnieniem rezonansowym.

2. WIELKOŚCI OPISUJĄCE ODKSZTAŁCENIE NAPIĘĆ I PRĄDÓW

Odkształcenie przebiegu napięcia/prądu może być charakteryzowane w dziedzinie czasu lub częstotliwości. Opis w dziedzinie czasu polega na określeniu różnic pomiędzy wartościami rzeczywistego, odkształconego przebiegu, a wartościami wzorcowego przebiegu sinusoidalnego. Ten sposób opisu przyjęty został np. w polskiej normie PN-72/E-06000, w której zdefiniowano „praktycznie sinusoidalne napięcie/prąd” jako przebieg, którego dowolna wartość chwilowa nie różni się więcej niż o 5% od wartości pierwszej harmonicznej. Trudność pomiarowego określenia tych różnic sprawia, że ten sposób opisu praktycznie nie jest stosowany. Nie ma też międzynarodowego porozumienia dotyczącego pojęcia „przebieg prawie sinusoidalny” oraz porozumienia dotyczącego dopuszczalnej wartości różnic chwilowych.

Między innymi z tych powodów powszechnie zaakceptowano opis odkształcenia przebiegu w dziedzinie częstotliwości. Najbardziej pełną informację dostarcza zbiór liczb określający rzędy, amplitudy (wartości skuteczne) i fazy poszczególnych harmonicznych.

W dokumentach normalizujących przyjmowane są różne wielkości liczbowe, zdefiniowane na tym zbiorze (najczęściej bez uwzględnienia fazy harmonicznych). Są to:

współczynnik udziału n-tej harmonicznej napięcia (analogicznie dla harmonicznych prądu):

$$D_{(n)} = \frac{U_{(n)}}{U_{(1)}}$$

współczynnik udziału składowej podstawowej napięcia (analogicznie dla harmonicznej prądu):

$$D_{(1)} = \frac{U_{(1)}}{U}$$

gdzie U jest wartością skuteczną odkształconego napięcia.

współczynnik kształtu:

Definiowany jest jako iloraz wartości szczytowej i skutecznej, co dla przebiegu sinusoidalnego wynosi 1,41. Inna wartość oznacza odkształcenie przebiegu.

zawartość harmonicznych (wartość skuteczna w_h):

$$D_{wh} = \sqrt{\sum_{n \geq 2} D_{(n)}^2}$$

całkowity współczynnik odkształcenia napięcia – THD_U :

Jest to iloraz wartości skutecznej harmonicznych do wartości skutecznej podstawowej harmonicznej:

$$THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{n=2} U_{(n)}^2}}{U_{(1)}} 100\%$$

Jako górną granicę sumowania przyjmuje się najczęściej $n=50$. Jeżeli ryzyko rezonansu dla harmoniczných wyższych rzędów jest małe, można ograniczyć sumowanie do rzędu 25. Współczynnik ten przyjmuje analogiczną postać dla prądu². Jest on wówczas miarą dodatkowego prądu harmonicznego w całkowitej wartości skutecznej. Wadą tego współczynnika jest nieuwzględnienie w definicji częstotliwości harmoniczných. Taką samą jego wartość można otrzymać dla nieskończonej kombinacji różnych harmoniczných.

Przyjęcie współczynnika odkształcenia tylko dla jednej fazy jest słuszne przy założeniu pełnej symetrii dla harmoniczných wszystkich rzędów. W praktyce ten warunek jest rzadko spełniony. Często równocześnie występuje zjawisko niesymetrii i niesinusoidalności. Wymaga to wyznaczenia wartości współczynnika THD oddzielnie dla każdej fazy.

Prócz podanej powyżej definicji współczynnika THD stosowane są sporadycznie w literaturze technicznej również inne jego postacie. Są to np.:

$$TDF = \sqrt{\sum_{n \geq 2}^{n \leq 50} \left(\frac{U_{(n)}}{U_N} \right)^2}$$

gdzie U_N jest napięciem znamionowym.

$$EHD = \sqrt{\sum_{n \geq 2}^{n \leq 50} \left(\frac{U_{(n)}}{U_N} \right)^2} \quad n=2k \quad k=1, 2, 3, \dots$$

$$PHD = \sqrt{\sum_{n \geq 14}^{n \leq 50} \left(\frac{U_{(n)}}{U_{(1)}} \right)^2} \quad PWHD = \sqrt{\sum_{n \geq 14}^{n \leq 40} \left(\frac{I_{(n)}}{I_{(1)}} n \right)^2}$$

współczynnik odkształcenia D_W

Straty w uzwojeniach transformatora spowodowane dodatkowymi prądami wzrastają w proporcji do kwadratu prądu obciążenia i częstotliwości. Dla określenia procesu nagrzewania transformatora niezbędna jest więc znajomość rzędów występujących wh. Znajomość współczynnika kształtu i współczynnika odkształcenia jest niewystarczająca dla doboru mocy transformatora w warunkach przebiegów odkształconych. Taką możliwość stwarza współczynnik D_W . Jest on definiowany jako suma kwadratów względnych wartości prądów poszczególnych harmoniczných mnożonych przez rząd harmonicznej:

$$D_W = \sum_{n=1}^H [D_{(n)} n]^2$$

² Niekiedy stosowana jest także inna jego nazwa - *Total Demand Distortion*: $TDD_I = \sqrt{\frac{\sum_{n=2}^{\infty} I_{(n)}^2}{I_{(1)}}}$

Współczynnik ten uwzględnia częstotliwość prądów harmonicznycy, tym samym jego użytkowa wartość związana z oceną warunków pracy transformatora w warunkach odkształconych przebiegów jest znacząca.

Podane powyżej wielkości są podstawą normalizacji w dziedzinie jakości energii elektrycznej. Ich rzeczywiste wartości są porównywane z wartościami dopuszczalnymi określonymi w normach i przedmiotowych przepisach. Na tej podstawie wydawane są między innymi warunki techniczne przyłączenia lub certyfikat dla urządzeń i sprzętu. Zasadą jest, że dla pojedynczych urządzeń ich emisyjność (wartości harmonicznycy) określana jest poprzez dopuszczalne wartości opisujące odkształcenie prądu, podczas gdy odporność urządzeń oraz emisyjność dużych instalacji opisywana jest poprzez odkształcenie napięcia które wywołują w punkcie ich przyłączenia lub które na nie oddziałuje.

W DODATKU A podano przykładowo dopuszczalne wartości harmonicznycy napięcia na podstawie wybranych dokumentów i norm.

2. ŹRÓDŁA WYŻSZYCH HARMONICZNYCH PRĄDU

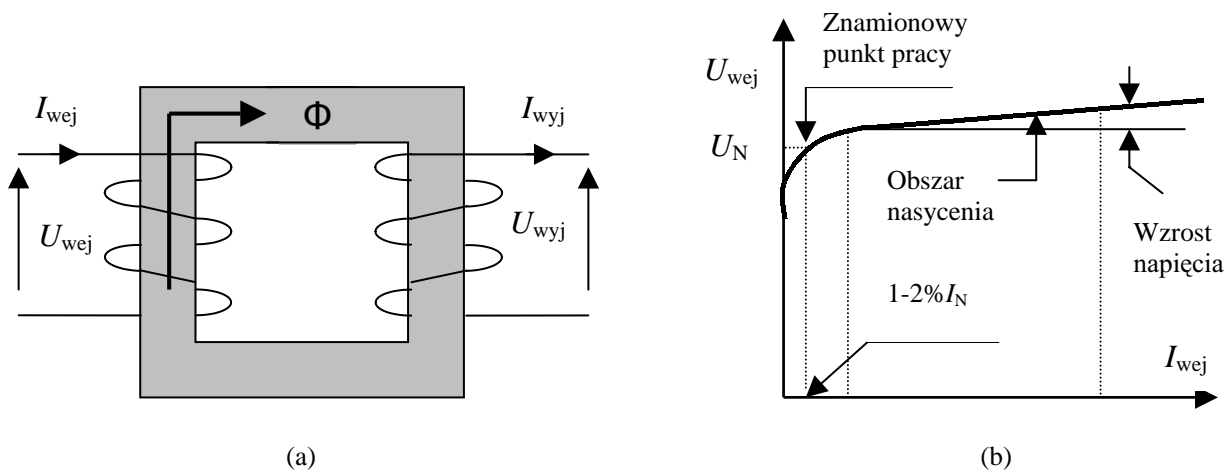
Źródłami wh są ogólnie odbiorniki o nieliniowej charakterystyce prądowo-napięciowej lub odbiorniki załączane i wyłączane synchronicznie względem napięcia sieci. Wśród występujących w systemie energetycznym źródeł harmonicznycy można wyróżnić trzy grupy urządzeń:

- urządzenia z rdzeniami magnetycznymi, np. transformatory, silniki, generatory itp.
- urządzenia łukowe, np. piece łukowe, wyładowcze źródła światła, urządzenia spawalnicze itp.
- urządzenia elektroniczne i energoelektroniczne.

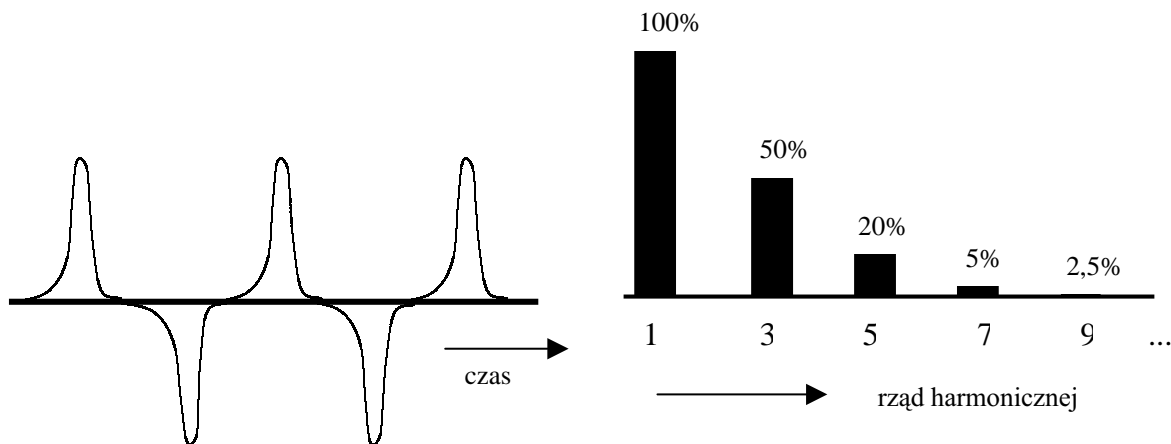
W DODATKU B podano wartości harmonicznycy dla wybranych przykładowo jedno- i trójfazowych odbiorników.

2.1. Transformatory

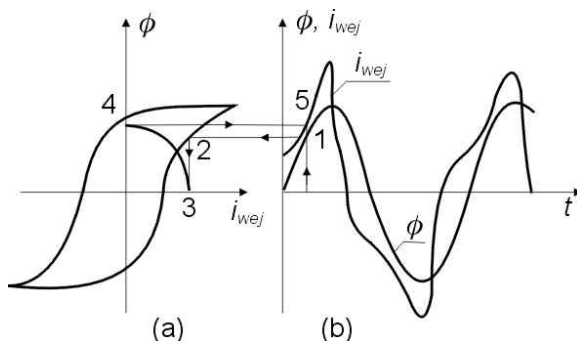
Były historycznie jednym z pierwszych źródeł harmonicznycy w systemie elektroenergetycznym. Zależność pomiędzy napięciem i prądem strony pierwotnej transformatora – przedstawiona na rysunku 8b jako charakterystyka magnesowania – jest silnie nieliniowa i stąd lokalizacja punktu pracy w obszarze jej nasycenia powoduje znaczące odkształcenia prądu magnesującego (rys. 9).



Rys. 8. a) Schemat ideowy i b) charakterystyka magnesowania transformatora (I_N – prąd znamionowy)



Rys. 9. Przykładowy, odkształcony przebieg prądu magnesującego transformatora oraz jego widmo harmoniczne ($U_{wej} = 115\%U_N$)



Rys. 10. Generacja harmoniczných w prądzie magnesowania transformatora (ϕ - strumień)

Mechanizm generacji harmoniczných przedstawiono na rysunku 10. Dla każdej chwili czasu można, odczytując kolejne wartości z przebiegów, odtworzyć kształt odkształconego prądu magnesowania transformatora.

Transformatory są projektowane tak, aby prąd magnesujący nie przekroczył 1-2% prądu znamionowego. Znamionowy punkt pracy znajduje się wówczas poniżej kolana charakterystyki magnesowania na jej prostoliniowej części. Dzięki temu, nawet mimo dużej liczby transformatorów pracujących w systemie elektroenergetycznym nie są one, w normalnych, ustalonych warunkach pracy, znaczącym źródłem harmoniczných. Stan ten może ulec radykalnej zmianie w przypadku np. nawet niewielkiego wzrostu napięcia ponad wartość znamionową. Powoduje to znaczący wzrost prądu magnesującego oraz poziomu jego odkształcenia. Takie warunki mogą wystąpić w systemach słabo obciążonych w następstwie zaburzeń polegających na wyłączeniu lub załączeniu znaczących odbiorników mocy biernej np. wyłączeniu równoległych dławików lub załączeniu baterii kondensatorów. Efektem są stany przejściowe rozchodzące się w systemie, które mogą spowodować nasycenie transformatorów niekiedy na znaczącym obszarze. Uwzględniając ich dużą liczbę oraz fakt, że wiele z nich pracuje z małym obciążeniem, efektem może być znaczny wzrost

odkształcenia napięcia. W systemach transmisyjnych stosowane są często transformatory o skojarzeniu Y_0/y_0 . Odształcony prąd magnesujący przy takim skojarzeniu uzwojeń może spowodować duże odkształcenie napięcia na wtórnej stronie transformatora. Przeciwnie, połączenie D/y gwarantuje niskoimpedancyjny obwód uzwojeń połączonych w trójkąt dla trzeciej harmonicznej. W rezultacie przebieg napięcia po stronie wtórnej nie ulega odkształceniu tą harmoniczną. W sieciach rozdzielczych i zakładowych powszechnie stosowane są transformatory o połączeniu trójkąt/gwiazda, co eliminuje problem odkształceń napięcia trzecią harmoniczną.

2.2. Silniki i generatory

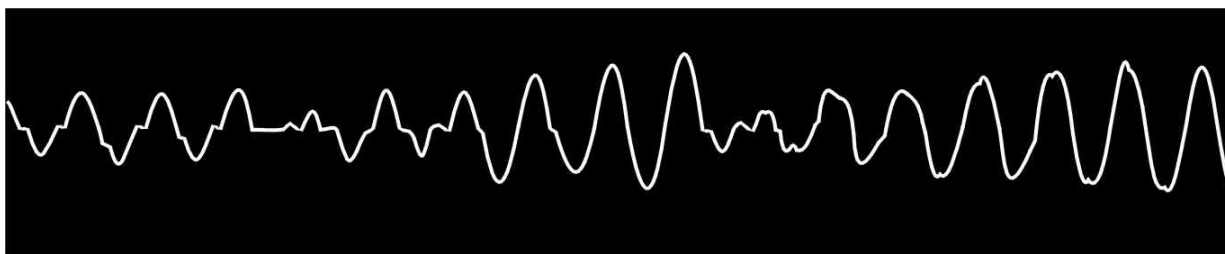
Podobnie jak transformatory, również silniki mogą spowodować przepływ prądów harmonicznym w celu wytworzenia pola magnetycznego. Jednakże ich znaczenie praktyczne jest małe, bowiem charakterystyka magnesowania silnika jest znacznie bardziej liniowa w porównaniu z charakterystyką magnesowania transformatora. Przyczyną jest obecność szczeliny powietrznej.

Poskok uzwojeń silnika może być także przyczyną wystąpienia harmonicznym. Typowe uzwojenia silnika posiadają 5 do 7 żłobków na biegun, co powoduje wytworzenie 5 lub 7 harmonicznym. Mimo, że są one nieporównywalnie mniejsze niż w układach przekształtnikowych, ich obecność w przypadku bardzo dużych silników jest zauważalna.

W napięciu generatorów występują harmoniczne (o małych wartościach), nie jest bowiem możliwy ani celowy z praktycznego i ekonomicznego punktu widzenia, taki rozkład przestrzenny uzwojeń stojana, który gwarantowałby sinusoidalność napięcia. Indukowane napięcia są więc lekko odkształcone, dominuje często 3-cia harmoniczna. Powoduje ona przepływ prądu dla tej harmonicznym w przypadku obciążenia generatora³.

2.3. Piece łukowe prądu przemiennego

Przebiegi czasowe napięcia i prądów pieca sprawiają, że przedstawienie ich odkształcenia poprzez dyskretne spektrum jest pewnym, powszechnie stosowanym przybliżeniem rzeczywistości technicznej. Kształty tych przebiegów mają bowiem charakter zmiennych losowych, są nieokresowymi funkcjami czasu (rys. 11).

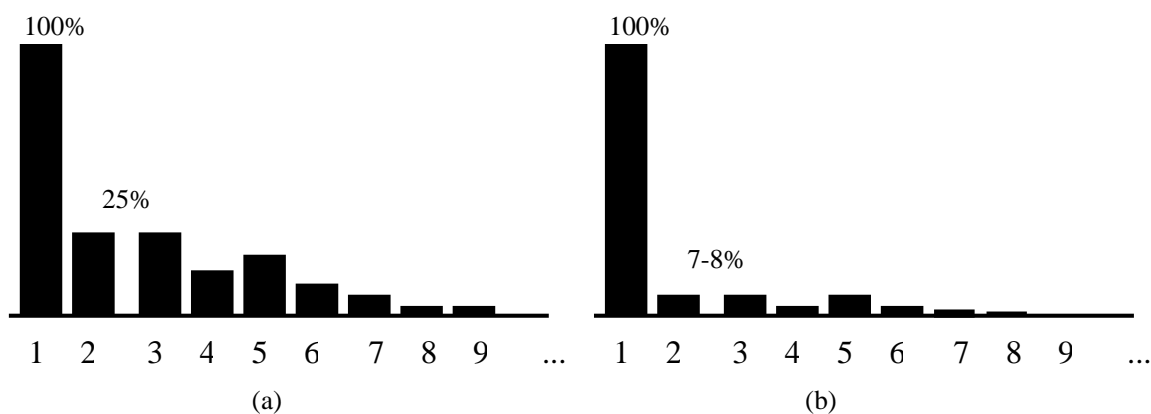


Rys. 11. Przykładowy przebieg czasowy prądu pieca w pierwszych minutach roztopiania

Warunki wyładowania łukowego ulegają zmianom w poszczególnych fazach wytopu. W efekcie największy stopień odkształcenia prądu występuje w okresie roztopiania. W przypadku pieco-kadzi jest znacznie mniejszy. Z pojawieniem się lustra występuje bowiem krótki łuk, wahania prądu stają się mniejsze, a krzywa prądu coraz mniej różni się od przebiegu sinusoidalnego. Przykładowe przebiegi amplitudowego spektrum prądu

³ Osiąga on przykładowo wartość około 20A w przewodzie neutralnym jednostek o mocach 30-40MVA [22].

przedstawiono na rysunku 12. W widmie tym zawsze uwidaczniają się dominujące harmoniczne o najbardziej znaczących amplitudach i rzędach będących zarówno parzystymi jak i nieparzystymi krotnościami częstotliwości podstawowej: 2, 3, 4 ...



Rys. 12. Przykładowe spektrum harmoniczne prądu: (a) pieca łukowego; (b) pieco-kadzi

Prawidłowością jest, że amplitudy te (określone jako wartości spodziewane) szybko maleją wraz ze wzrostem częstotliwości harmonicznej oraz wzrostem mocy pieca. Tablica 3 przedstawia rezultaty pomiarów wh prądu dla pieców o różnych pojemnościach wsadowych (w procentach harmonicznej podstawowej).

Tablica 3 - Wartości współczynników udziału n -tej harmonicznej w prądzie pieca łukowego w zależności od mocy znamionowej transformatora piecowego [29]

Moc znamionowa transformatora piecowego [MVA]	Rząd wh								
	2	3	4	5	6	7	9	11	13-25
	%								
2,5	36	25	8	10	4	3	2	1	0
5	26	20	5	7	2	3	2	1	0
10	26	13	4	5	1	2	1	1	0
16	16	18	6	8	3	3	2	1	0
60	7	10	4	5	1	2	2	1	0

Wh o rządach $n > 11$ posiadają praktycznie pomijalne wartości. Obecność harmonicznej trzeciej (ogólnie o rządach będących całkowitą krotnością trzech) jest rezultatem asymetrycznej pracy pieca. Pomiarы wh wykazują, co jest racjonalnie uzasadnione, ogromnie duże zróżnicowanie będące rezultatem losowości zjawiska wyładowania łukowego (niekiedy również stosowanych metod i środków pomiarowych). Pomiedzy wyróżnionymi, dominującymi harmonicznymi spektrum ma charakter białego szumu o znaczących wartościach.

Wartość odkształcenia krzywej napięcia, wywołanego obecnością wh zależy od odkształcenia prądu pieca oraz impedancji zastępczej sieci zasilającej. Z dotychczasowych doświadczeń wynika, że piece łukowe nie stanowią na ogół istotnych problemów w zakresie

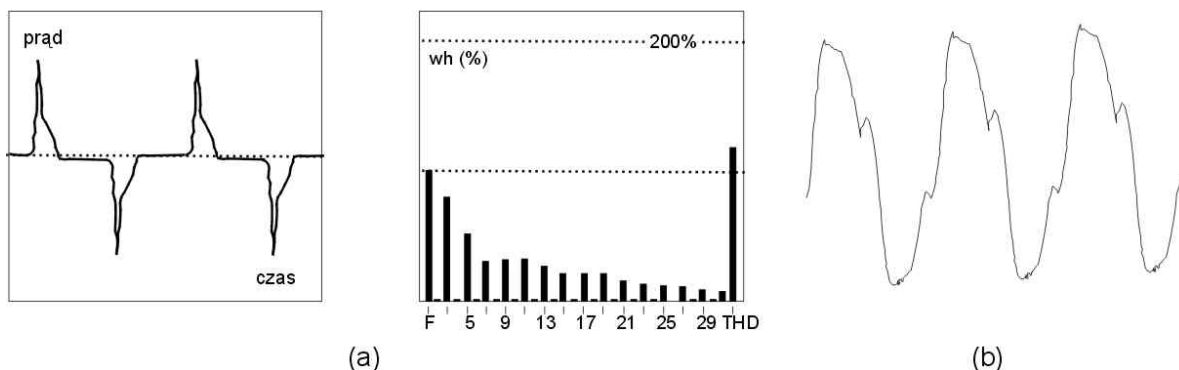
odkształcenia napięcia (w porównaniu np. z urządzeniami energoelektronicznymi). Dotyczy to zwłaszcza sieci energetyki zawodowej. W sieciach wewnętrznych zakładów przemysłowych mogą wystąpić problemy np. w przypadku współpracy pieców z bateriami kondensatorów o niewłaściwie dobranych mocach znamionowych lub nieprawidłowo dobranej częstotliwości rezonansu szeregowego dla baterii z dławikami przeciwrezonansowymi. Największy stopień odkształcenia napięcia spowodowany pracą pieców występuje na szynach zasilających bezpośrednio piece tj. w elektrostalowniach. Zawartość wh w napięciu jest tam wprost proporcjonalna do mocy pieców zasilanych z tej rozdzielni i odwrotnie proporcjonalna do jej mocy zwarcia. Jest ona tłumiona w przypadku równoległej pracy innych odbiorników (głównie silników synchronicznych i asynchronicznych) zasilanych z tego samego transformatora głównego, co piece łukowe.

Oddziaływanie harmoniczne pieców łukowych prądu stałego jest zasadniczo podobne jak dla prostowników o liczbie pulsów odpowiadającej liczbie pulsów przekształtnika zastosowanego w instalacji piecowej.

2.4. Wyładowcze źródła światła

W urządzeniach tych światło jest wytwarzane w oparciu o przepływ prądu przez parę lub gaz, a nie przez żarnik jak to ma miejsce w żarowych źródłach światła. Występujący w ich strukturze szeregowy dławik z rdzeniem (balast) jest źródłem trzeciej harmonicznej o znacznej wartości. Jego zastąpienie w nowoczesnych konstrukcjach układem elektronicznym, mimo niewątpliwych zalet użytkowych, zwiększa z reguły stopień odkształcenia prądu. prądu THD_I , którego wartość zawiera się w przedziałach jak na rysunku 12.

Znaczenie harmonicznych prądu generowanych przez wyładowcze źródła światła wzrasta, stanowią one bowiem coraz bardziej znaczącą pod względem mocy część odbiorników komunalnych.

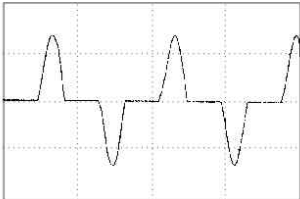
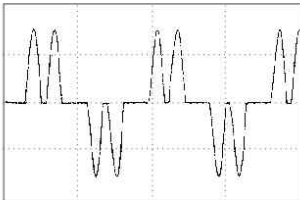
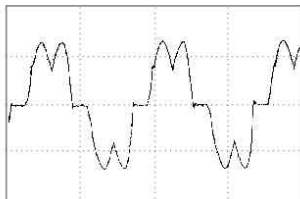
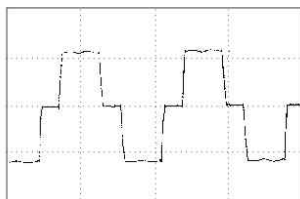
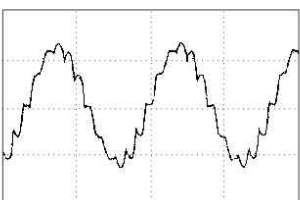
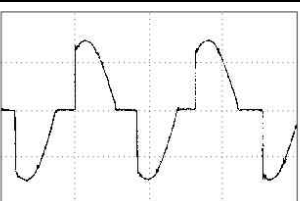
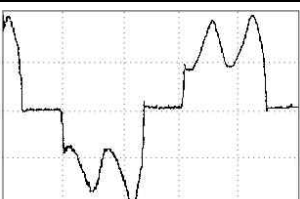


Rys. 12. (a) prąd energooszczędnej lampy typu COMPACT ($THD_I=80-130\%$ - balast elektroniczny);
(b) dużej lampy fluorescencyjnej ($THD_I=20-30\%$)

2.5. Przekształtniki jako źródła wh

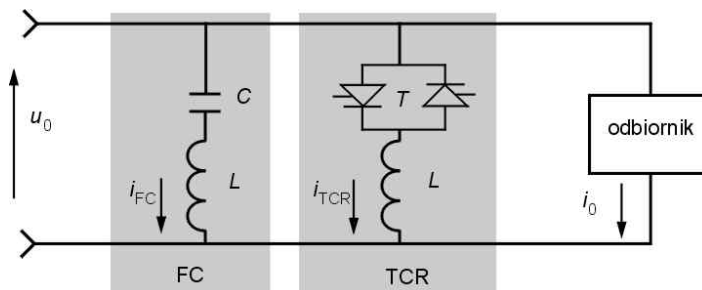
Przekształtniki statyczne jako źródła wh stanowią oddzielne, bardzo obszerne zagadnienie, którego omówienie przekracza zakres niniejszego artykułu. W tabelicy 4 przedstawiono jedynie przykładowe przebiegi czasowe prądów różnych, najbardziej typowych układów przekształtnikowych.

Tablica 4 - Przebiegi czasowe prądów typowych odbiorników przekształtnikowych

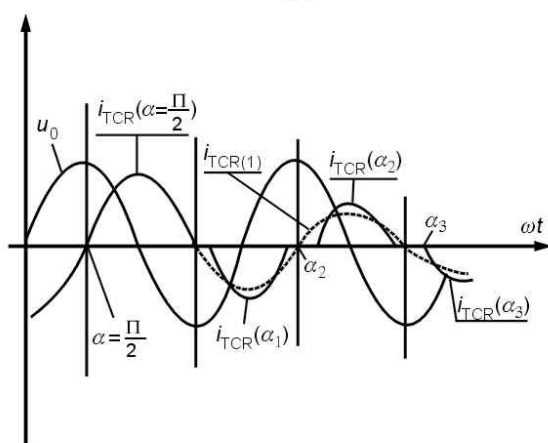
przebieg prądu	rodzaj przekształtnika
	<p>jednofazowy prostownik THD_i 80% dominująca trzecia harmoniczna</p>
	<p>6-pulsowy prostownik z filtrem pojemnościowym bez szeregowej indukcyjności THD_i 80%</p>
	<p>6-pulsowy prostownik z filtrem pojemnościowym i szeregowym dławikiem >3%, lub napęd prądu stałego THD_i 40%</p>
	<p>6-pulsowy przekształtnik z dławikiem o dużej indukcyjności dla redukcji składowej zmiennej prądu stałego THD_i 28%</p>
	<p>przekształtnik 12-pulsowy THD_i 15%</p>
	<p>sterownik prądu przemiennego (odbiornik rezystencyjny) THD_i zmienne wraz ze zmianą kąta wysterowania</p>
	<p>falownik z 6-pulsowym przekształtnikiem wejściowym do zasilania napędu prądu przemiennego</p>

2.6. Kompensator FC/TCR

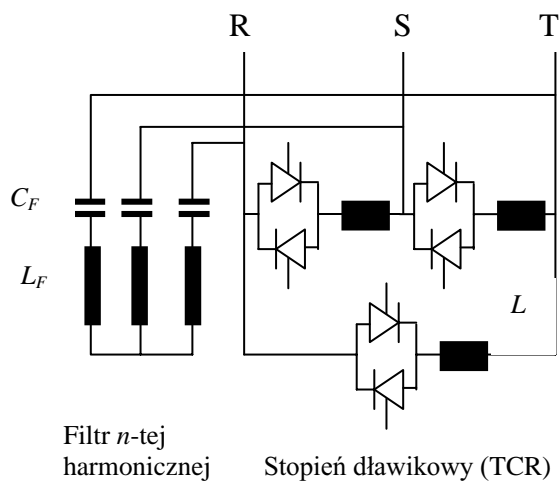
Schemat ideowy układu jest przedstawiony na rysunku 13.



(a)



(b)



(c)

Rys. 13 (a) jednofazowy schemat zastępczy układu FC/TCR; (b) przebiegi czasowe napięcia i prądu ilustrujące zasadę działania; (c) schemat układu trójfazowego

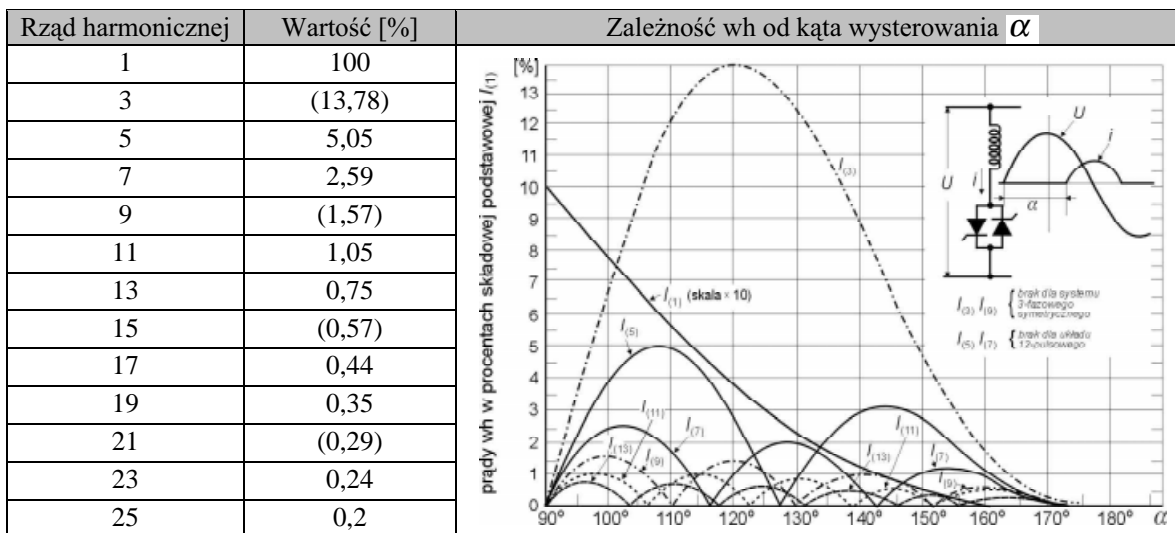
Dla kąta wysterowania tyrystorów $\alpha = \frac{\pi}{2}$ (w odniesieniu do przejścia przez zero sinusoidy napięcia zasilającego) prąd fazowy stopnia dławikowego jest sinusoidalny. Wzrost kąta wysterowania ($\alpha > \frac{\pi}{2}$) powoduje nie tylko redukcję wartości prądu, lecz także nieciągłość w jego przebiegu czasowym. Pojawiają się harmoniczne nieparzystych rzędów (jeżeli kąty wysterowania są jednakowe dla obydwu tyrystorów łącznika). Ich wartości skuteczne opisane są związkiem:

$$I_{(n)} = \frac{4 U_0}{\pi X} \left[\frac{\sin(n+1)\alpha}{2(n+1)} + \frac{\sin(n-1)\alpha}{2(n-1)} - \cos\alpha \frac{\sin\alpha}{n} \right]$$

gdzie: $n = 3, 5, 7, \dots$
 U_0 = napięcie międzyfazowe (wartość skuteczna),
 X = całkowita reaktancja w jednym boku stopnia dławikowego,
 α = kąt wysterowania.

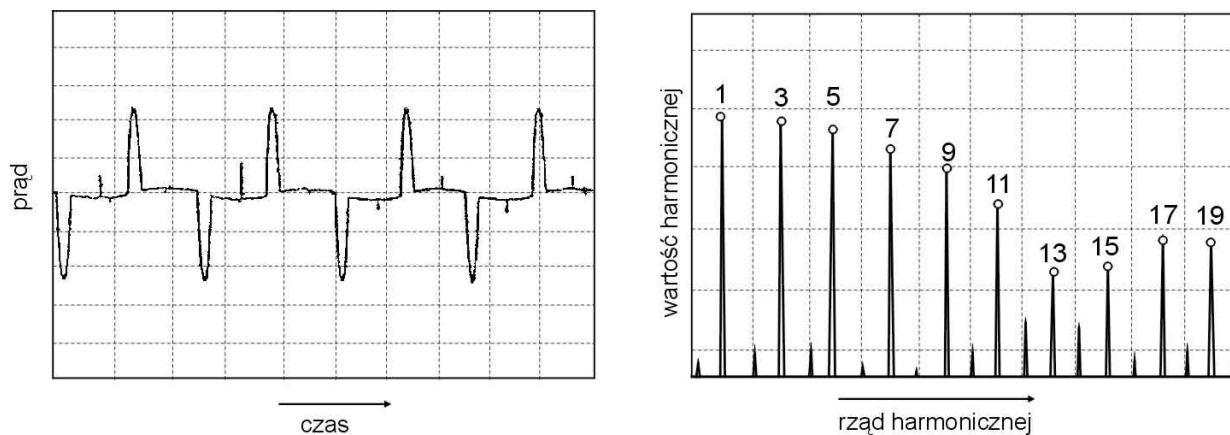
W tabelicy 5 podano maksymalne wartości harmonicznych (do 25). Należy zauważyć, że występują one przy różnych kątach wysterowania. W symetrycznych warunkach pracy trójfazowego stopnia dławikowego podane w tabelicy wartości procentowe dotyczą zarówno prądów fazowych jak i liniowych. Harmoniczne potrójne (w tabelicy 5 w nawiasach) obecne w prądach fazowych, nie pojawiają się w prądach liniowych dla symetrycznej pracy kompensatora.

Tabela 5 - Maksymalna wartość harmonicznych stopnia dławikowego kompensatora FC/TCR.



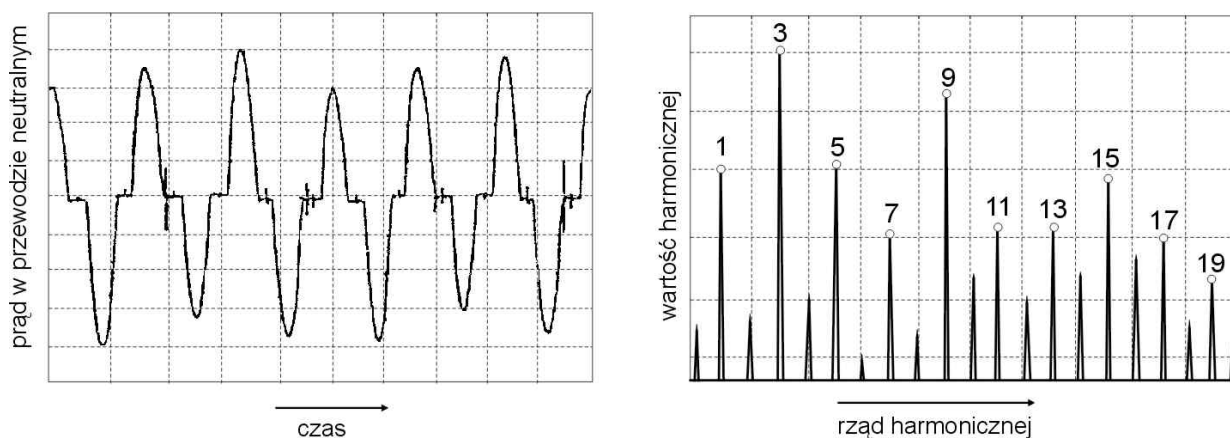
2.7. Urządzenia informatyczne

Rysunek 14 przedstawia typowy przebieg prądu komputera PC wraz z jego widmem harmonicznym. Widać wyraźnie, że 3, 5 i 7 harmoniczna mają wartości porównywalne z wartością składowej podstawowej. Współczynnik odkształcenia prądu zawarty jest w ogromnej większości przypadków w przedziale 100-130%, a wartość maksymalna trzeciej harmonicznej osiąga poziom 90-95% składowej podstawowej.

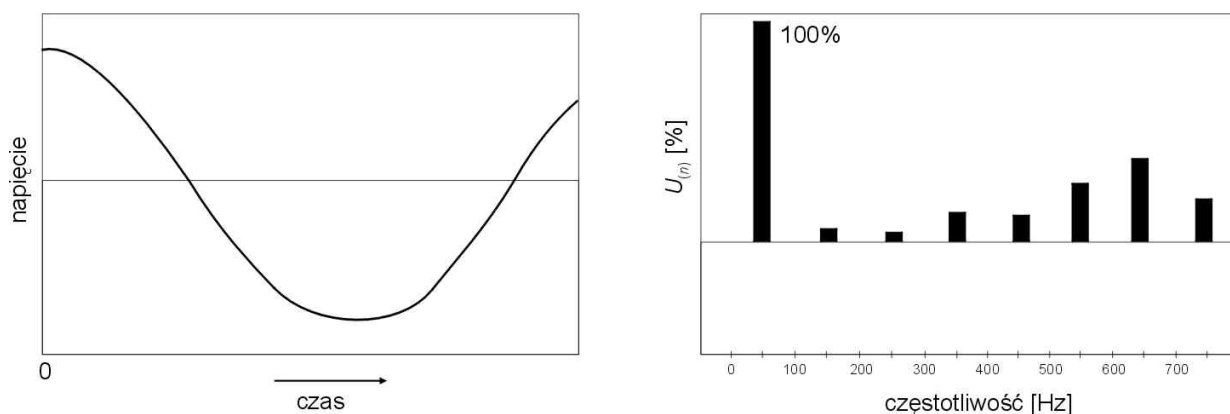


Rys. 14. Przykładowy przebieg czasowy prądu zasilającego komputer (PC) wraz ze spektrum harmonicznym

Przykładowy przebieg czasowy prądu w przewodzie neutralnym laboratorium komputerowego (kilkanaście komputerów wykonujących różne operacje) przedstawia rysunek 15. Obecność harmonicznych, które nie tworzą układu kolejności zerowej jest rezultatem obecności w laboratorium różnych komputerów oraz rezultatem niesymetrii ich prądów fazowych.



Rys. 15. a) przykładowy przebieg czasowy prądu w przewodzie neutralnym laboratorium komputerowego oraz b) jego spektrum harmoniczne

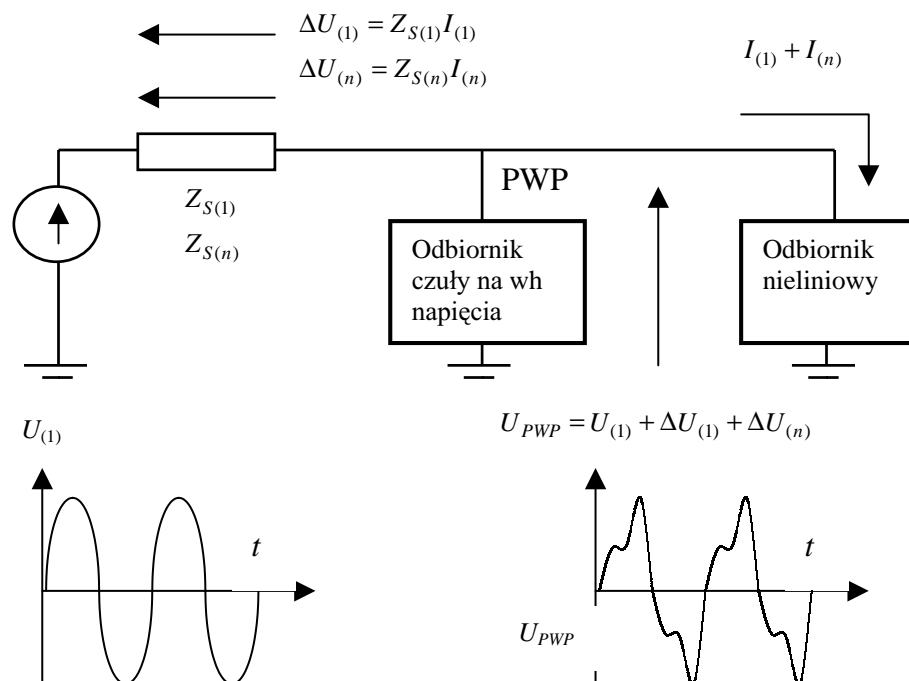


Rys. 16. Przykładowy przebieg czasowy napięcia zasilającego w laboratorium komputerowym oraz jego spektrum harmoniczne ($THD_U = 4\%$)

Mimo, że bezwzględne wartości prądów harmonicznych generowanych przez komputery są małe, efekt sumaryczny w postaci odkształcenia napięcia może być znaczący. Rysunek 16 przedstawia napięcie zasilające rozważane laboratorium komputerowe. Widać wyraźnie typowe dla tego rodzaju odbiorników „spłaszczenie” szczytu napięcia (spowodowane głównie 5 i 7 harmoniczną).

3. HARMONICZNE NAPIĘĆ I PRĄDÓW

Składowa prądu zasilającego odbiornik nieliniowy - $I_{(n)}$ wywołuje na impedancji zastępczej sieci zasilającej $Z_{s(n)}$ spadek napięcia $\Delta U_{(n)} = Z_{s(n)}I_{(n)}$ (rys. 17).



Rys. 17. Odkształcenia napięcia w PWP będące rezultatem spadku napięcia $\Delta U_{(n)}$

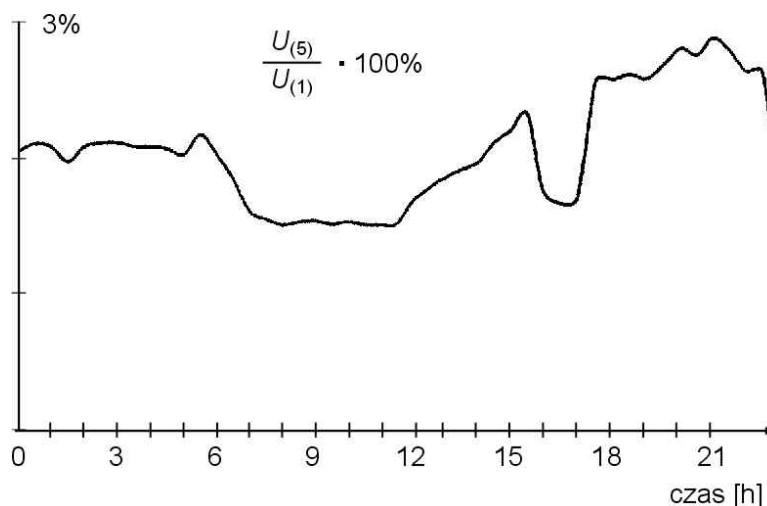
Spadek ten powoduje odkształcenie napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP) czułego na odkształcenie napięcia odbiornika.

Sytuacja komplikuje się, jeżeli wyznaczany jest wypadkowy efekt odkształcenia wywołany obecnością wielu różnych odbiorników nieliniowych. Należy wówczas uwzględnić kilka aspektów tj.:

- (a) wzajemne przesunięcie fazowe harmonicznych pochodzących od różnych źródeł.
 - harmoniczne niskich rzędów mają zbliżone kąty fazowe, mają więc tendencją do arytmetycznego dodawania się,
 - harmoniczne wyższych rzędów mają z reguły zróżnicowane kąty fazowe, ich wypadkowa wartość jest wyznaczana z reguły jako pierwiastek z sumy kwadratów wartości indywidualnych
 - pewne harmoniczne mogą mieć zasadniczo różne kąty fazowe w zależności od tego, czy są wywołane pracą odbiorników jedno- czy trójfazowych. Klasycznym przykładem jest 5 harmoniczna.

- (b) efekt redukcji związany z małą impedancją zastępczą źródła oraz tłumiącym działaniem odbiorników równoległych;
- (c) efekt redukcji związany ze sposobem eksploatacji sprzętu np. nie równoczesną pracą urządzeń.

Nową jakością w dziedzinie wyższych harmonicznych jest fakt, że w coraz większym stopniu rolę dominujących źródeł tego zaburzenia pełnią nie odbiorniki przemysłowe lecz rozproszone odbiorniki komunalne o małych mocach jednostkowych lecz występujące w bardzo dużej liczbie. Ich łączne negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą uwidacznia się szczególnie w porze wieczornego szczytu obciążeniowego (rys. 18).



Rys. 18. Przykładowa dobowa wartość 5 harmonicznej w napięciu sieci 110kV

4. SKUTKI OBECNOŚCI WYŻSZYCH HARMONICZNYCH

Poziom dopuszczalnego odkształcenia napięcia/prądu jest determinowany czułością odbiorników (również źródeł energii), które podlegają wpływowi odkształconych wielkości. Najmniej czułym rodzajem sprzętu są te urządzenia, których główną funkcją jest ogrzewanie, a więc np. wszelkiego rodzaju piece oporowe. Najbardziej czułym rodzajem sprzętu są te urządzenia elektroniczne, których projektant lub konstruktor założył (prawie) idealne, sinusoidalne przebiegi napięć i prądów częstotliwości podstawowej. Ten rodzaj urządzeń jest często stosowany w telekomunikacji lub do przetwarzania danych. Silniki elektryczne, najbardziej popularne odbiorniki energii elektrycznej, mieszczą się pomiędzy tymi dwoma granicznymi kategoriami. Większość z nich toleruje znaczące poziomy odkształceń. Lecz nawet w przypadku najmniej czułych odbiorników jakimi są piece, obecność harmonicznych jest niekorzystna. Mogą one bowiem powodować np. szkodliwe oddziaływanie napięciowe i termiczne na dielektryk izolacji powodując przyspieszenie procesu jej starzenia lub niekiedy trwałe uszkodzenie.

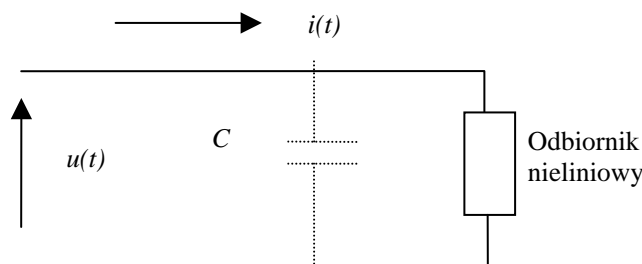
4.1. Klasyfikacja skutków

W tabelicy 6 podano przykładową klasyfikację skutków obecności wh.

Tablica 6 – Klasyfikacja skutków obecności wh ze względu na przyjęte kryteria

Kryterium podziału	Rodzaj skutku	Komentarz
Ze względu na czas występowania	Skutki chwilowe lub o charakterze natychmiastowym	Te efekty są związane z uszkodzeniami, wadliwym działaniem lub zanikiem działania urządzeń poddanych wpływowi wh. Do takich urządzeń można zaliczyć przykładowo: urządzenia sterujące i pomiarowe, sprzęt elektroniczny, sprzęt komputerowy, itp.
	Skutki długotrwałe	Mają zasadniczo termiczną naturę. Występują głównie w tych przypadkach, w których ciepła stała czasowa urządzenia jest krótsza od czasu emisji harmonicznych, które na to urządzenie oddziałują. Efekt cieplny (powodujący np. przyspieszony proces starzenia izolacji lub rzadziej uszkodzenia sprzętu) jest funkcją wielu zmiennych wśród, których wymienić należy jako najbardziej istotne rzędy i wartości harmonicznych.
Ze względu na charakter fizyczny odkształconego przebiegu	Skutki prądowe	Związane są z wartością chwilową lub uśrednioną w czasie przepływającego prądu (przegrzanie maszyn elektrycznych, przepalenie bezpieczników w kondensatorach, wzrost strat w linii przesyłowej, niepożądane zadziaływanie przekładników itp.). W systemie zasilającym harmoniczne prądu są główną przyczyną wzrostu temperatury urządzeń oraz skrócenia czasu ich pracy. Wpływ ten osiąga ekstremalnie duże wartości w warunkach rezonansowego wzmocnienia prądów harmonicznych.
	Skutki napięciowe	Związane z wartością szczytową, średnią lub skuteczną odkształconego napięcia
Ze względu na miejsce występowania odkształconych przebiegów	W systemach rozdziału i transmisji mocy	
	W systemach transmisji danych i systemach telekomunikacyjnych	
	W sprzęcie i urządzeniach elektrycznych	
Ze względu na wartość częstotliwości ⁴	Składowa stała	Ze względu na stosowanie prostowników oraz elektronicznego sprzętu w gospodarstwach domowych i przemyśle może wystąpić składowa stała w napięciu, głównie w sieci nn. Jej poziom jest zwykle niski. Niemniej w wielu przypadkach jest wystarczający dla wprowadzenia rdzeni transformatorów w stan nasycenia (co może prowadzić do ich uszkodzenia, a w korzystniejszej sytuacji do generacji dodatkowych harmonicznych prądu). Może również powodować procesy korozyjne, zakłócenia w pracy układów zabezpieczających i innych odbiorników czułych na wartość i charakter przebiegu czasowego prądu.
	Harmoniczne niskich rzędów do około 9kHz	
	Harmoniczne w przedziale 9 kHz-30 MHz (EMC)	

4.2. Wpływ harmonicznych na współczynnik mocy



Rys. 19. Jednofazowy odbiornik nieliniowy wraz z kondensatorem kompensującym

⁴ Podział zgodny z stosowanym w pracach Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki (IEC).

W ogólnym przypadku przebiegi czasowe napięcia i prądu odbiornika jak na rysunku 19 określone są związkami (1):

$$u(t) = \sum_n \sqrt{2}U_{(n)} \sin(n\omega t + \alpha_{(n)}) + \sum_m \sqrt{2}U_{(m)} \sin(m\omega t + \alpha_{(m)}) \quad (1 \text{ a})$$

$$i(t) = \sum_n \sqrt{2}I_{(n)} \sin(n\omega t + \alpha_{(n)} + \varphi_{(n)}) + \sum_p \sqrt{2}I_{(p)} \sin(p\omega t + \alpha_{(p)}) \quad (1 \text{ b})$$

gdzie:

- n, m, p - rzędy harmoniczných napięć i prądów;
- $U_{(n)}, U_{(m)}, I_{(n)}, I_{(p)}$ - napięcia i prądy dla harmoniczných rzędów: n, m, p (wartości skuteczne);
- $\alpha_{(n)}, \alpha_{(m)}, \varphi_{(n)}, \alpha_{(p)}$ - fazy początkowe oraz kąty przesunięć fazowych napięć i prądów dla poszczególných harmoniczných.

Współczynnik mocy – *PF* (*power factor*) - odbiornika określony jest związkami:

$$PF = \frac{P}{S} = \frac{\frac{1}{T} \int_0^T u(t)i(t)dt}{UI} = \frac{P}{P_{(1)}} \frac{P_{(1)}}{S_{(1)}} \frac{S_{(1)}}{S} = [I] \cdot DPF \cdot [II] \quad (2 \text{ a})$$

- gdzie: P, S – moc czynna i pozorna,
- $P_{(1)}, S_{(1)}$ – moc czynna i pozorna dla harmoniczných podstawowej,
- U, I – skuteczne wartości napięcia i prądu.

Czynnik [I]:

$$[I] = \frac{P}{P_{(1)}} = \frac{\sum_n U_{(n)} I_{(n)} \cos \varphi_{(n)}}{U_{(1)} I_{(1)} \cos \varphi_{(1)}} \quad (3)$$

Współczynnik mocy dla harmoniczných podstawowej zwany także współczynnikiem przesunięcia *DPF* (*displacement power factor*):

$$DPF = \frac{U_{(1)} I_{(1)} \cos \varphi_{(1)}}{U_{(1)} I_{(1)}} = \cos \varphi_{(1)} \quad (4)$$

Czynnik [II]:

$$\frac{S_{(1)}}{S} = \frac{1}{\sqrt{(1 + THD_I^2)(1 + THD_U^2)}} \quad (5)$$

Wartości skuteczne napięcia i prądu oraz współczynniki odkształceń:

$$U = \sqrt{\sum_n U_{(n)}^2 + \sum_m U_{(m)}^2} = U_{(1)} \sqrt{1 + THD_U^2} \quad I = \sqrt{\sum_n I_{(n)}^2 + \sum_p I_{(p)}^2} = I_{(1)} \sqrt{1 + THD_I^2} \quad (6)$$

$$THD_U = \frac{\sqrt{U^2 - U_{(1)}^2}}{U_{(1)}} \quad THD_I = \frac{\sqrt{I^2 - I_{(1)}^2}}{I_{(1)}} \quad (7)$$

Jeżeli napięcie jest sinusoidalne wówczas zależność (2a) przyjmuje postać:

$$PF^* = DPF \frac{1}{\sqrt{1 + THD_I^2}} \quad (2b)$$

Jeżeli kompensacja realizowana jest w sposób pasywny tzn. za pomocą kondensatorów, wówczas powstaje pytanie:

Jaka powinna być wartość pojemności C przyłączonego równolegle do odbiornika kondensatora, którą można uznać za optymalną tzn. minimalizującą wartość mocy pozornej źródła zasilania i gwarantującą tym samym maksymalną wartość współczynnika mocy i minimalną wartość skuteczną prądu źródła zasilania (rys. 19)?

Odpowiedź na tak postawione pytanie przedstawili w swych pracach Shepherd i Zand (np. [23]). Po podłączeniu równoległej pojemności C wartość mocy pozornej źródła zasilania można określić związkami:

$$S = \sqrt{\sum_n U_{(n)}^2 + \sum_m U_{(m)}^2} \sqrt{\sum_n (I_{(n)}^2 + U_{(n)}^2 n^2 \omega^2 C^2 + 2U_{(n)} I_{(n)} n \omega C \sin \phi_{(n)}) + \sum_m U_{(m)}^2 m^2 \omega^2 C^2 + \sum_p I_{(p)}^2} \quad (8)$$

Przyrównanie do zera pochodnej mocy pozornej pozwala wyznaczyć wartość optymalnej pojemności C_{opt} :

$$\frac{dS}{dC} = 0 \Rightarrow C_{opt} = \frac{\frac{1}{\omega} \sum_n n U_{(n)} I_{(n)} \sin \phi_{(n)}}{\sum_n n^2 U_{(n)}^2 + \sum_m m^2 U_{(m)}^2} \quad (9)$$

4.3. Silniki i generatory

Podstawowym skutkiem obecności harmonicznych napięcia i prądu w maszynach wirujących (asynchronicznych i synchronicznych) jest wzrost temperatury pracy spowodowany stratami mocy. Jest to dodatkowy stres dla izolacji, który w przypadku długotrwałego występowania może skrócić czas ich eksploatacji. Straty występują w rdzeniu i uzwojeniach maszyn:

1. w z r o s t s t r a t w u z w o j e n i a c h s t o j a n a i w i r n i k a s p o w o d o w a n y j e s t z a r ó w n o z w i ę k s z e n i e m w a r t o ś c i s k u t e c z n e j p r ą d u n a s k u t e k o d k s z t a ł c e n i a j a k r ó w n i e ż w z r o s t e m e f e k t y w n e j r e z y s t a n c j i u z w o j e ń n a s k u t e k z j a w i s k a n a s k ó r k o w o ś c i.
2. w z r o s t s t r a t w m a g n e t o w o d a c h s t o j a n a i w i r n i k a. W p r z y p a d k u s i l n i k ó w (s z c z e g ó l n i e a s y n c h r o n i c z n y c h, t r ó j f a z o w y c h) n a w e t n i e w i e l k a w a r t o ś ć h a r m o n i c z n e j p o w o d u j e p o w s t a n i e d o d a t k o w y c h s t r u m i e n i m a g n e t y c z n y c h i z w i ą z a n y c h z t y m d o d a t k o w y c h p r ą d ó w w u z w o j e n i a c h w i r n i k a i ż e l a z i e r d z e n i a. T e d o d a t k o w e p r ą d y, w p r z y p a d k u z n a c z n e g o o d k s z t a ł c e n i a n a p i ę c i a, t e g o s a m e g o r z ę d u c o p r ą d m a g n e s u j ą c y d l a s k ł a d o w e j p o d s t a w o w e j, p o w o d u j ą d o d a t k o w e s t r a t y m o c y c z y n n e j, g r z a n i e s i ę m a s z y n y i z w i ę k s z o n ą a w a r y j n o ś ć j e j p r a c y. D o d a t k o w e s t r a t y o d p r ą d ó w w i r o w y c h z a l e ż ą o d s p o s o b u w y k o n a n i a m a g n e t o w o d ó w m a s z y n - l i t e c z y p a k i e t o w a n e - o r a z c h a r a k t e r y s t y k i m a g n e t y c z n e j ż e l a z a. D o d a t k o w e s t r a t y z w i ą z a n e z o b e c n o ś c i ą w h w y s t ę p u j ą w m a s z y n i e s y n c h r o n i c z n e j g ł ó w n i e w u z w o j e n i a c h s t o j a n a o r a z w k l a t c e t ł u m i ą c e j. S t r a t y w i r n i k a s ą z r e g u ł y z n a c z ą c o m n i e j s z e. I s t o t n e s ą g ł ó w n i e h a r m o n i c z n e t w o r z ą c e u k ł a d k o l e j n o ś c i p r z e c i w n e j t z n. 5, 11, 17, 23...itd⁵. W s i l n i k a c h a s y n c h r o n i c z n y c h w y s o k i e g o n a p i ę c i a s t r a t y w s t o j a n i e i w i r n i k u s ą m n i e j w i ę c j e j e d n a k o w e. S i l n i k i a s y n c h r o n i c z n e p i e r ś c i e n i o w e d o p u s z c z a j ą w i ę k s z e s t r a t y m o c y w w i r n i k u n i ż s i l n i k i k l ą t k o w e.
3. d o d a t k o w e m o m e n t y h a r m o n i c z n e. S ą r e z u l t a t e m w z a j e m n e g o o d d z i a ł y w a n i a p o m i ę d z y s t r u m i e n i e m w s z c z e l i n i e p o w i e t r z n e j (g ł ó w n i e s k ł a d o w a p o d s t a w o w a) i s t r u m i e n i a m i w y t w a r z a n y m i p r z e z p o s z c z e g ó l n e p r ą d y h a r m o n i c z n e w i r n i k a. I c h e f e k t w w y p a d k o w e j, ś r e d n i e j w a r t o ś c i m o m e n t u s i l n i k a j e s t w p r a k t y c e m a ł y. M a j ą o n e d o d a t k o w o t e n d e n c j ę d o w z a j e m n e g o z n o s z e n i a s i ę. H a r m o n i c z n e t w o r z ą c e u k ł a d k o l e j n o ś c i z g o d n e j w y t w a r z a j ą s k ł a d o w e m o m e n t u w s p i e r a j ą c e r o t a c j ę s i l n i k a, p o d c z a s g d y d l a p o z o s t a ł y c h h a r m o n i c z n y c h (5, 11, 17, 23,...) d z i a ł a j ą p r z e c i w n i e⁶. M o m e n t y h a r m o n i c z n e m a j ą n a t o m i a s t w p ł y w n a w a r t o ś ć c h w i ł o w ą m o m e n t u w y p a d k o w e g o s i l n i k a w y w o ł u j ą c j e g o p u l s a c j ę.
4. O s c y l a c j e m e c h a n i c z n e m a s z y n e l e k t r y c z n y c h z a s i l a n y c h o d k s z t a ł c o n y m n a p i ę c i e m o s i ą g a j ą s w o j e m a k s y m a l n e w a r t o ś c i, g d y c z ę s t o t l i w o ś ć z m i e n n e g o m o m e n t u s i l n i k a j e s t z g o d n a z c z ę s t o t l i w o ś c i ą r e z o n a n s u m e c h a n i c z n e g o u k ł a d u s i l n i k - a g r e g a t n a p ę d z a n y. I s t o t n y m c z y n n i k i e m j e s t w a r t o ś ć m o m e n t u o b c i ą z a j ą c e g o s i l n i k. Z j a w i s k o t o m o ż e w y s t ą p i ć r ó w n i e ż w u k ł a d a c h t u r b i n a - g e n e r a t o r.
5. P r ą d y h a r m o n i c z n e w s i l n i k u m o g ą s p o w o d o w a ć z w i ę k s z o n y p o z i o m e m i s j i z a k ł ó c e ń a k u s t y c z n y c h w p o r ó w n a n i u d o i c h w a r t o ś c i p r z y z a s i l a n i u p r z e b i e g a m i s i n u s o i d a l n y m i.

⁵ Wg [31] straty od prądów wirowych w maszynie synchronicznej z pakietowanym stojanem i wirnikiem nie przekraczają pojedynczych procentów strat znamionowych, nawet przy bardzo znaczącym odkształceniu napięcia zasilającego - $THD_U = 10-15\%$, co jest wartością mało realną w praktyce przy bezpośrednim zasilaniu maszyny z sieci. Straty dodatkowe w silnikach i kompensatorach synchronicznych z litymi biegunami są większe. Wg tego samego źródła straty w maszynach wirujących mają znaczenie głównie dla harmonicznych niskich rzędów, przede wszystkim 2 i 3. Straty od harmonicznych o rzędach powyżej 13 można praktycznie zaniedbać.

⁶ Wg [31] w silnikach asynchronicznych średniej mocy, zasilanych napięciem odkształconym 5 harmoniczną o wartości 20%, moment dla tej harmonicznej nie przekracza 0,1% momentu dla składowej podstawowej.

6. Harmoniczne, wpływając na rozkład strumienia w szczelinie powietrznej, mogą spowodować utrudniony łagodny rozruch silnika lub zwiększyć jego poślizg.

4.4. Transformatory

Transformatory zawsze doświadczają skutków obecności wh, bowiem filtry instalowane są prawie wyłącznie po ich pierwotnej stronie.

Bezpośrednim skutkiem obecności harmonicznych jest, prócz zakłóceń akustycznych, wzrost strat mocy w rdzeniu (straty: histerezy - proporcjonalne do częstotliwości i straty od prądów wirowych - proporcjonalne do kwadratu częstotliwości) oraz w uzwojeniach, w następstwie wzrostu wartości skutecznej prądu oraz zwiększonej rezystancji (efekt naskórkowości). Przyjmuje się, że te ostatnie są proporcjonalne do $\approx \sum_n I_{(n)}^2 n^2$ gdzie n jest

rzędem harmonicznej prądu o wartości skutecznej $I_{(n)}$ ⁷. Wywołany tym termiczny stres izolacji może być przyczyną skrócenia czasu eksploatacji transformatorów.

Ważnym miejscem lokalizacji strat mocy są połączone w trójkąt uzwojenia stanowiące obwód zwarty dla prądów harmonicznych potrójnych.

Obecność składowej stałej prądu (jako rezultat pracy pewnych rodzajów odbiorników) może wywołać nasycenie rdzenia i wynikający stąd dalszy wzrost odkształcenia prądu. Rdzeń transformatora może ulegać nasyceniu również na skutek wzrostu wartości szczytowej napięcia występującego w następstwie odkształcenia harmonicznego.

Ze względu na niebezpieczeństwo wystąpienia zjawiska rezonansowego pomiędzy reaktancją indukcyjną transformatora a reaktancją odbiorników pojemnościowych przyłączonych do jego wtórnej strony, ogranicza się moc baterii kondensatorów. Nie powinna ona przekroczyć około 25 % mocy znamionowej transformatora.

Praca transformatorów w środowisku elektromagnetycznym z odkształconymi przebiegami napięć i prądów zmusza projektantów i producentów tych maszyn do dokonania takich zmian konstrukcyjnych, które prowadzą w konsekwencji do minimalizacji strat. Są to:

- przewymiarowanie uzwojeń połączonych w trójkąt i przewodu neutralnego przy połączeniu uzwojeń w gwiazdę ze względu na obecność harmonicznych potrójnych (do 200% przekroju przewodów fazowych);
- projektowanie rdzeni magnetycznych tak, aby w znamionowym punkcie pracy uzyskać odpowiednią wartość strumienia magnetycznego (poniżej kolana charakterystyki magnesowania). Uzyskuje się to między innymi poprzez stosowanie rdzeni z żelaza o odpowiedniej jakości i o odpowiednim przekroju poprzecznym;
- wykonywanie uzwojeń transformatorów z wiązek przewodów w celu redukcji zjawiska naskórkowości.

W USA i Kanadzie wprowadzono specjalny sposób oznaczania transformatorów konstrukcyjnie przystosowanych do pracy z odbiornikami nieliniowymi. Charakteryzują się one większą zdolnością akumulacji ciepła w porównaniu z typowymi rozwiązaniami o tej samej mocy znamionowej. Stosowane są w ich konstrukcji zmiany zmierzające do redukcji strat mocy. Transformatory te oznaczone są symbolem K wraz z liczbą ze znormalizowanego szeregu: 4, 9, 13, 20, 30, 40 i 50. Większa wartość współczynnika

⁷ Wg [13] w przypadku znaczącej wartości współczynnika odkształcenia prądu THD_I może wystąpić nawet podwojenie strat mocy czynnej. I tak przykładowo, dla transformatora o mocy 25kVA, w warunkach znamionowego obciążenia straty te wynoszą odpowiednio: $THD_I=0\%$ $\Delta P=800W$; $THD_I=20\%$ $\Delta P=1152W$; $THD_I=35\%$ $\Delta P=1600W$.

Wg [31] straty mocy w transformatorach SN/nn, zasilających odbiorców bytowo komunalnych wzrastają o około 20-60% w zależności od stopnia odkształcenia napięcia.

oznacza większą zdolności transformatora do pracy w środowisku elektromagnetycznym charakteryzującym się większą wartością współczynnika odkształcenia prądu THD_I . Np. K4 oznacza, że zdolność akumulacji ciepła jest około cztery razy większa w porównaniu z typowym transformatorem, któremu w przyjętej konwencji odpowiada symbol K1. Związek ten nie jest liniowy, bowiem K13 oznacza około dwukrotny wzrost możliwości akumulacji ciepła w porównaniu do K4, a K30 dalsze podwojenie, lecz w relacji do K13.

4.5. Kondensatory

Należą do tej kategorii urządzeń, które w bardzo dużym stopniu doświadczają skutków pracy w środowisku elektromagnetycznym z przebiegami odkształconymi. Przeciążenia, którym podlegają, dotyczą: napięcia, prądu i mocy. Dlatego też do tych wielkości odnoszą się, określane przez producentów, dopuszczalne współczynniki przeciążeniowe podające krotność ich wartości znamionowych. Wyznaczają one, dla baterii kondensatorów, obszar nieniszczących warunków, lecz praca z długotrwałym przeciążeniem skraca znacząco czas ich eksploatacji.

Wzrost wartości szczytowej napięcia, będący rezultatem obecności wh, to dodatkowy stres dla izolacji. Może on spowodować w konsekwencji częściowe wyładowanie w dielektryku, zwarcie końców folii i trwałe uszkodzenie kondensatora. Zgodnie z większością narodowych i międzynarodowych norm, dopuszczalny współczynnik przeciążenia napięciowego kondensatora nie przekracza 110% wartości znamionowej.

Większość problemów występujących w kondensatorach, a wywołanych harmonicznymi ma *prądowy* charakter. Obecność wh w napięciu powoduje przepływ przez kondensator dodatkowych prądów, których wartość może być znacząca i może rosnać wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej (w efekcie redukcji impedancji zastępczej kondensatora $Z_C \approx (n\omega C)^{-1}$).

Względna wartość prądu kondensatora dla n -tej harmonicznej $I_{(n)}^*$, odniesioną do harmonicznej podstawowej: ($I_{(n)}^* = I_{(n)}I_{(1)}^{-1}$), można określić związkiem $I_{(n)}^* = nU_{(n)}^*$ gdzie: $U_{(n)}^*$ jest względną wartością napięcia n -tej harmonicznej odniesioną do harmonicznej podstawowej - $U_{(n)}^* = U_{(n)}U_{(1)}^{-1}$. Przykładowo, 7 harmoniczna napięcia o wartości 15 % spowoduje przepływ prądu dla tej harmonicznej stanowiącego 105% prądu harmonicznej podstawowej. Może to spowodować przeciążenie prądowe kondensatora. Współczynnik przeciążenia prądowego obecnie produkowanych kondensatorów nie przekracza z reguły 1,8.

Przepływ przez baterię prądu o zbyt dużej wartości powoduje wystąpienie w kondensatorach dodatkowych strat mocy, z wynikającymi z tego faktu niekorzystnymi zjawiskami takimi jak: przepalenie bezpieczników⁸, procesy fizyko-chemiczne dielektryków powodujące przyspieszony proces starzenia i skrócenia czasu eksploatacji, trwałe uszkodzenie itp.

Straty mocy w kondensatorze można szacować przy pomocy zależności:

$$\Delta P = \sum_{n=1}^{\infty} (tg\delta)_{(n)} n\omega U_{(n)}^2 \quad (10)$$

gdzie $(tg\delta)_{(n)}$ jest współczynnikiem stratności dla n -tej harmonicznej ($= nR\omega C$). Do 13-tej harmonicznej można przyjąć stałą wartość tego współczynnika. Wówczas:

⁸ Wartość prądu przepalenie bezpieczników w kondensatorach SN przyjmowana jest na poziomie 125-165% prądu znamionowego I_N . Dla kondensatorów nn wynosi ona często 200% I_N .

$$\Delta P_{\Sigma} = \omega C (\operatorname{tg} \delta) \sum_{n=1}^{\infty} n U_{(n)}^2 \quad (11)$$

Jeżeli wartość prądu kondensatora przekroczy, w efekcie odkształcenia, dopuszczalny poziom można poprawić ten stan poprzez:

- zmianę lokalizacji baterii⁹
- odłączenie przewodu neutralnego dla baterii połączonych w gwiazdę w celu wyeliminowania obciążenia prądami harmonicznymi potrójnymi, (jeżeli takie występują i jeżeli jest to dopuszczalne z punktu widzenia izolacji baterii i parametrów wyłącznika),
- zastosowanie dławików przeciwrzonansowych.

Wszystkie wymienione niekorzystne zjawiska ulegają drastycznemu wzmocnieniu w warunkach rezonansów: szeregowego i równoległego.

4.5.1 Kompensacja mocy biernej

Kondensatory są najprostszym, z technicznego punktu widzenia, środkiem służącym do kompensacji prądu biernego. Jeżeli normatywne wartości zaburzeń tj. współczynnik odkształcenia napięcia i amplituda wahań napięcia mieszczą się w dopuszczalnych granicach, realizacja kompensacji przy użyciu stałych baterii kondensatorów jest zazwyczaj uzasadniona ekonomicznie. Prezentują bowiem szereg istotnych zalet tj.: niewielki własny pobór mocy czynnej (małe straty), długa żywotność (przy właściwych warunkach eksploatacyjnych), prosty montaż, brak potrzeby konserwacji, możliwość rozbudowy itp. Ich zastosowanie wymaga jednakże rozważenia szeregu zagrożeń mogących obniżyć lub wręcz całkowicie wyeliminować efekt kompensacyjny. Na rysunku 20 przedstawiono uproszczony schemat ideowy i zastępczy układu: odbiornik nieliniowy – sieć zasilająca – bateria kondensatorów. Odbiornik reprezentowany jest na schemacie zastępczym jako idealne źródło prądu poszczególnych wyższych harmonicznymi, wartość którego jest niezależna od impedancji obciążenia.

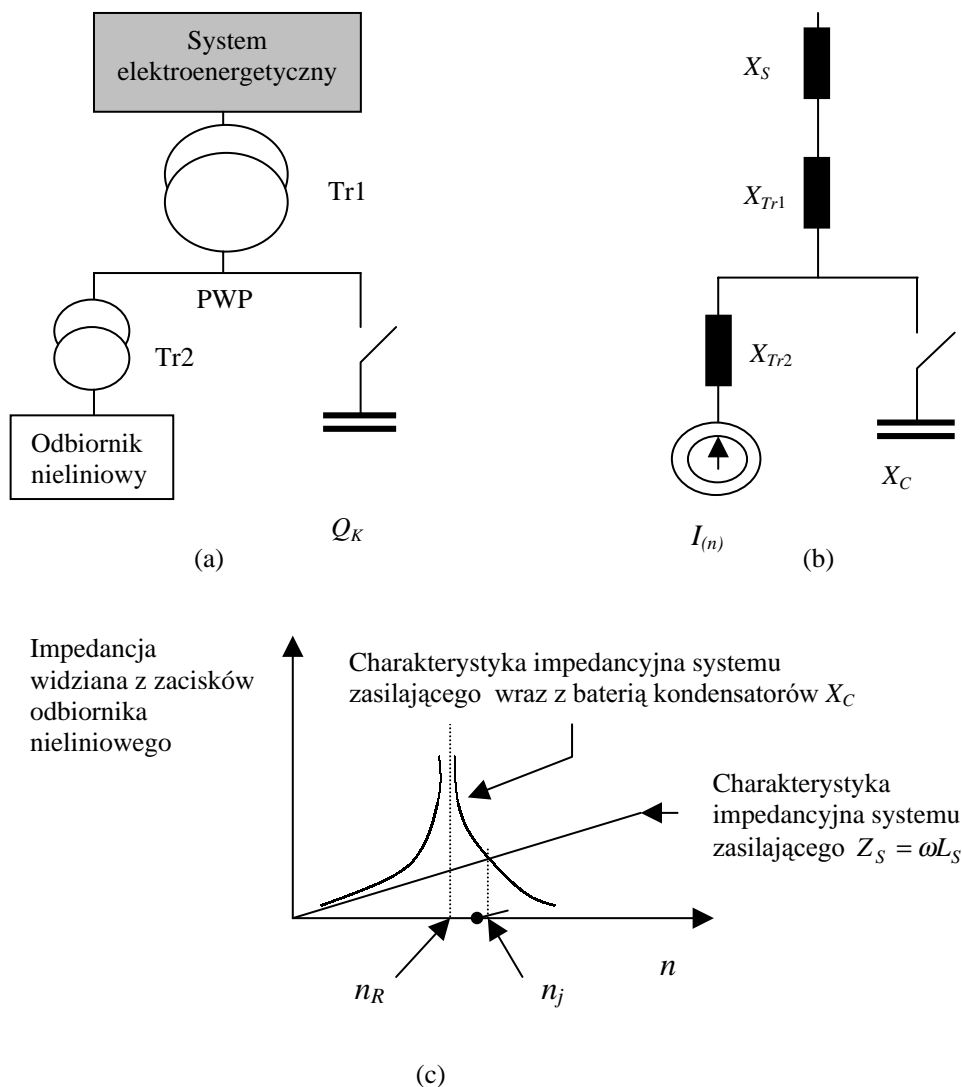
Przyłączenie baterii kondensatorów do szyn, z których zasilany jest odbiornik nieliniowy zmienia amplitudowe widmo harmonicznymi napięcia w PWP (rys. 20c). Zmianie ulega, bowiem częstotliwościowa charakterystyka impedancyjna widziana z zacisków nieliniowego odbiornika. Zwiększeniu ulegają wartości harmonicznymi napięcia $U_{(n)}$ o rzędach mniejszych od rzędu harmonicznymi neutralnej – n_j : $U_{(n)} = Z_{\Sigma(n)} I_{(n)}$ gdzie $Z_{\Sigma(n)}$ jest impedancją widzianą z zacisków odbiornika dla n -tej harmonicznymi. Zmniejszają się natomiast (na skutek zmiany charakterystyki impedancyjnej systemu zasilającego) napięcia o rzędach większych od rzędu harmonicznymi neutralnej n_j (rys. 20c).

Dobór mocy baterii kondensatorów Q_k , przeznaczonych wyłącznie do poprawy współczynnika mocy, powinien być przeprowadzony wnikliwie i starannie, również w oparciu o charakterystyki częstotliwościowe impedancji w PWP. Należy unikać mogących wystąpić trudności w eksploatacji układu powodowanych zjawiskami rezonansowymi związanymi z obecnością wh. Należy mieć pewność, że częstotliwość rezonansowa n_R układu: sieć zasilająca – bateria kondensatorów:

$$n_R \approx \sqrt{\frac{S_{zw}}{Q_k}} = \sqrt{\frac{X_C}{X_{\Sigma}}}$$

⁹ Jako zasadę należy przyjąć, że odbiornik nieliniowy i kondensatory nie powinny mieć wspólnego transformatora.

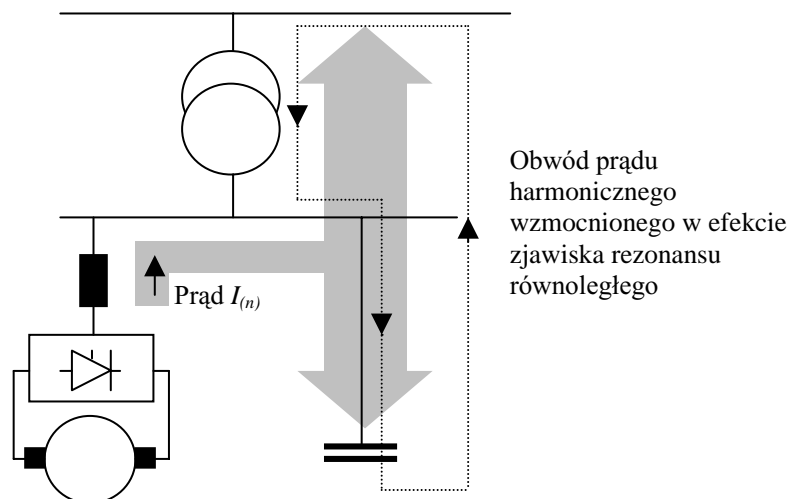
ma wartość gwarantującą odstrojenie układu od stanów zbliżonych do rezonansu równoległego dla jednej z znaczących harmonicznych wytworzonych obecnością odbiornika nieliniowego.



Rys. 20. a) schemat ideowy i b) zastępczy układu kompensacji oraz c) częstotliwościowe charakterystyki impedancyjne

Rysunek 21 przedstawia przykładowy schemat ideowy układu, w którym, w efekcie zjawisk rezonansowych, nastąpiło wzmocnienie prądu dla jednej z charakterystycznych harmonicznych sześciopulsowego napędu przekształtnikowego.

Odstrojenie się od rezonansu równoległego można zrealizować dobierając odpowiednio parametry układu kompensacyjnego tzn. zmieniając moc baterii i/lub włączając dławik przeciwrezonansowy. Ten ostatni włącza się szeregowo z baterią kondensatorów, gdy odkształcenie napięcia zawarte jest w dopuszczalnych granicach, ale istnieje potrzeba ochrony baterii przed przeciążeniem jej prądami wyższych harmonicznych. Układ baterii wraz z dławikiem ochronnym, różni się od jednogąźziowego filtra wyższej harmonicznej (rozdział 5.2.1) jedynie częstotliwością rezonansu szeregowego, a energetycznie innym przeznaczeniem. Należy jednakże zaznaczyć, że bateria z dławikiem ochronnym wpływa również na zmniejszenie odkształcenia napięcia na szynach, aczkolwiek w mniejszym stopniu niż filtr.



Rys. 21. Wzmocnienie rezonansowe prądu harmonicznego w układzie: sieć zasilająca – bateria kondensatorów

Włączanie w szereg z baterią dławika stwarza elementom składowym takiej instalacji dodatkowe wymagania, a mianowicie:

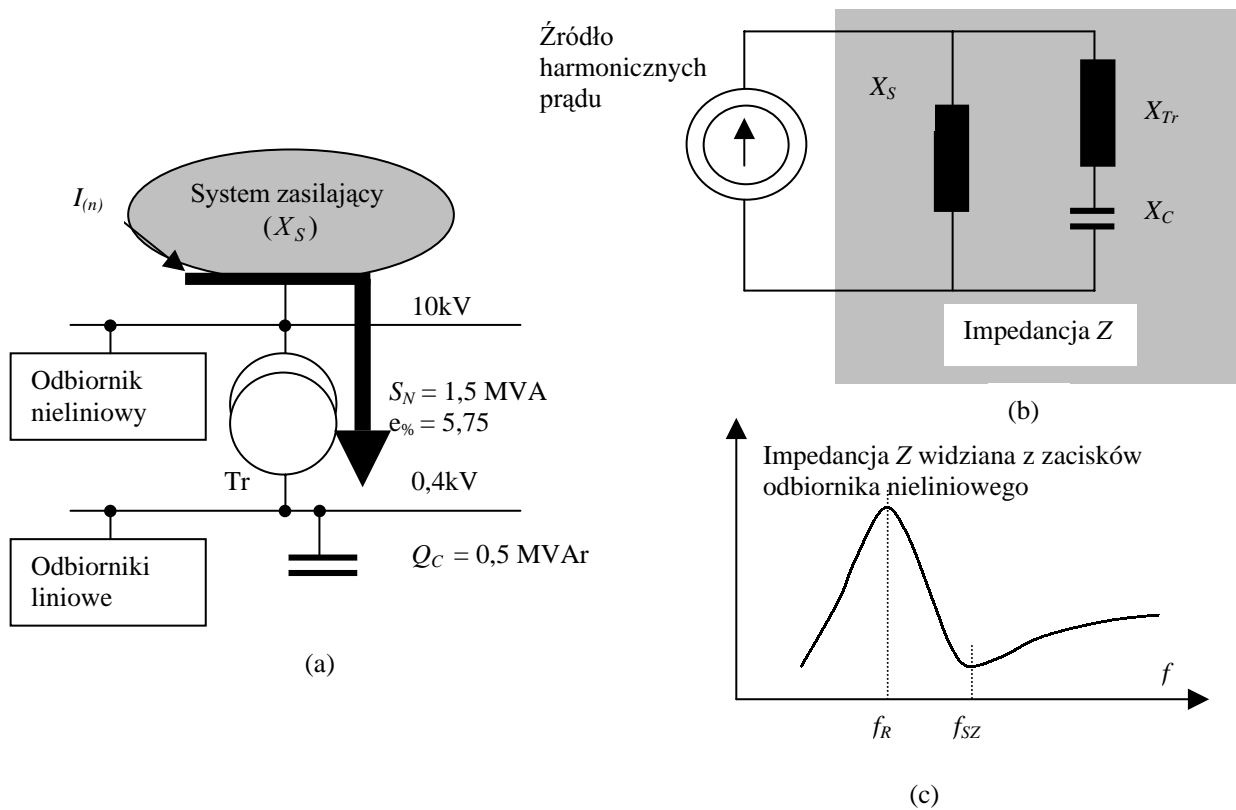
- jednostki kondensatorowe powinny mieć napięcie znamionowe większe niż napięcie znamionowe sieci zasilającej ($U_C = Un^2/(n^2-1)$ gdzie n jest rzędem harmonicznego, do której dostrojony jest obwód szeregowy LC);
- izolacja wzdłużna dławików powinna być tak zwymiarowana, aby wytrzymała przepięcia pochodzące od przepływających prądów łączeniowych baterii. Wartość tych przepięć zależy od parametrów LC układu kompensacyjnego.

Przy niewłaściwym doborze parametrów baterii kondensatorów i ewentualnie współpracujących z nimi dławików, przepięcia i przetężenia prądowe baterii, a w następstwie uszkodzenia jednostek kondensatorowych, mogą wręcz uniemożliwić eksploatację układu kompensacji mocy biernej.

4.5.2. Rezonans szeregowy

W pewnych warunkach w systemie elektroenergetycznym, w których zainstalowano baterie kondensatorów, może wystąpić zjawisko rezonansu szeregowego. Przypadek taki ilustruje rysunek 22. Z sieci rozdzielczej o napięciu 10 kV poprzez transformator (Tr) o mocy 1500kVA i napięciu zwarcia 5,75% zasilane są szyny niskiego napięcia 0,4 kV. Dla celów kompensacji mocy biernej przyłączone zostały baterie kondensatorów o mocy 500kVAr. Z szyn SN zasilany jest 6-pulsowy przekształtnik tyrystorowy (odbiorca nieliniowy). Schemat zastępczy układu oraz częstotliwościową charakterystykę impedancyjną widzianą z zacisków przekształtnika przedstawiono na rysunkach 22b i c.

Widać wyraźnie, że prócz rezonansu równoległego dla częstotliwości f_R w układzie występuje również rezonans szeregowy dla częstotliwości f_{SZ} , dla której całkowita impedancja osiąga małą wartość. Oznacza to, że obwód rezonansowy dla tej harmonicznego ma cechy filtra równoległego. Jeżeli częstotliwość rezonansowa f_{SZ} jest bliska częstotliwości np. piątej lub siódmej harmonicznego, wówczas prąd tej harmonicznego generowanej przez przekształtnik będzie płynął w obwodzie szeregowo połączonej reaktancji transformatora i kondensatora do kompensacji mocy biernej. W przeciwieństwie do zjawiska rezonansu równoległego, w tym przypadku nie ma wzmocnienia prądu harmonicznego, lecz obwód rezonansu wymusza przepływ prądu w nie przeznaczonym do tego obwodzie. Może wystąpić bardzo duże odkształcenie napięcia w obwodzie niskiego napięcia.



Rys. 22. Schemat ideowy (a) oraz zastępczy (b) wraz z charakterystykami częstotliwościowymi (c) dla przykładowej instalacji z nieliniowym odbiornikiem i baterią kondensatorów do kompensacji mocy biernej

C.D.N.

LITERATURA

1. Arrillaga J., Bradley D. A., Bodger P.S.: *Power system harmonics*. John Wiley & Sons 1985.
2. Arsenau R., Filipski P. S., Zelle J.: *A VA-meter-error analyzer*. IEEE Trans. On Power Delivery, vol. 6, no. 4, Oct. 1991.
3. Balda J. C., Olejniczak K. J., Barbre B., Samotyj M. J.: *Comments on the derating of distribution transformers serving nonlinear loads*. Proc. of Second International Conference on Power Quality, PQA'92, 28-30 Sept. Atlanta, Georgia (USA).
4. Dini D. A.: *Testing and rating of transformers for use with nonlinear loads*. Proc. of Second International Conference on Power Quality, PQA'92, 28-30 Sept. Atlanta, Georgia (USA).
5. Datta S. K., Nafsi A.: *Distribution relay performance under harmonics conditions*. PQA'92 Atlanta, Georgia, USA.
6. Douglas J.: *Power quality solutions*. IEEE Power Engineering Review, March 1994.
7. Elmore W. A., Kramer C. A., Zocholl E.: *Effect of waveform distortion on protective relays*. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 29, no. 2, March/April 1993.
8. Girgis A. A., Nims J. W., Jacomino J., Dalton J. G., Bishop A.: *Effect of voltage harmonics on the operation of solid-state relays in industrial applications*. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 28, no. 5, Sep/Oct. 1992.
9. Henderson R. D., Rose P. J.: *Harmonics: the effects on power quality and transformers*. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 3, May/June 1994.
10. Hanzelka Z., Piróg S.: *Symmetrical follow-up static reactive current compensator*. IEEE Applied Power Electronics Conf. San Diego, California 1993.
11. Hanzelka Z.: *Kompensator statyczny ze sterownikiem prądu indukcyjnego*. Rozprawy Elektrotechniczne, 1988, 34.
12. Hanzelka Z. i inni: *Jakość i użytkowanie energii elektrycznej oraz urządzenia do rozdziału i przetwarzania*. Materiały seminarium, AGH marzec 1996
13. Informacja uzyskana od G. T. Heydta z Purdue University (USA).
14. Kloss A.: *Stromrichter-Netzrückwirkungen in Theorie und Praxis*. AT Verlag 1981.
15. Makram E., Haines R. B., Girgis A. A.: *Effect of harmonics distortion in reactive power measurement*. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 28, no. 4, July/August 1992.
16. Massey G.: *Estimation methods for power system harmonic effects on power distribution transformers*. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 30, no. 2, March 1994.
17. Makram E. B., Haines R. B., Girgis A. A.: *Effect of harmonic distortion in reactive power measurement*. IEEE Trans. on Industry Application, vol. 28, No. 4 July/August, 1992.
18. Maurer G., Motte J. P. I inni: *Le four a'arc d'acierin alimente en courant continu*. Rev. Metall. 1984(3) 237-246.
19. Purkayastha I., Savoce P. J.: *Effect of harmonics on power measurement*. IEEE Trans. on Industry Applications, vol. 26, no. 5, Sep./Oct. 1990.
20. PN-88/E-02000. *Urządzenia elektroenergetyczne. Napięcia znamionowe*.
21. PN-T-01030 – *Kompatybilność Elektromagnetyczna. Terminologia*.
22. Power System Harmonics-Power Technologies, INC, 1989, USA.
23. Shepherd W., Zand P. (1979): *Energy flow and power factor in non-sinusoidal circuits*. Cambridge University Press, New York ANSI/IEEE Standard c 57.110-1986. Recommended Practice for Establishing Transformer Capability when supplying nonsinusoidal load currents.
24. Stade D., Shau H.: *Influence of voltage harmonics on single-phase earth fault currents*. PQA'91.
25. Saito N., Yagi M., i inni: *Investigation and analysis of voltage fluctuation in the dc arc furnace*. 12th Congress UIE Montreal Quebec Canada June 1992.
26. van Wyk D. J.: *Power quality, power electronics and control*. EPE Conf. Brighton, 1993.
27. Wacks K. P.: *The impact of home automation on power electronics*. APEC'93 San Diego (USA).
28. *Wskazówki projektowania dotyczące ograniczania odkształcenia i wahań napięcia w sieciach 110kV, ŚN i nn energetyki zawodowej*. Instytut Energetyki Warszawa – Zakład Sieci Rozdzielczych Katowice, 1987.
29. *Wytyczne kontroli oraz ograniczania odkształcenia i wahań napięcia w sieciach 110kV, ŚN i nn energetyki zawodowej*. Instytut Energetyki Warszawa – Zakład Sieci Rozdzielczych Katowice, 1987.
30. Yacamini R., Chang S. C.: *Noise and vibration from induction machines fed from harmonic sources*. Proc. of IEEE ICHPS VI, Bologna, Sept. 21-23, 1994.
31. Żeżelenko: *Wyższe harmoniczne w systemach zasilających odbiorniki przemysłowe*. Moskwa Elektroatomizdat, 1994.

DODATEK A

Tabela A1 – Wybrane przykładowo polskie normy dotyczące wyższych harmonicznych

PN-T-01030:1996 Kompatybilność elektromagnetyczna – Terminologia
PN-EN 61000-3-2:1997 Kompatybilność elektromagnetyczna - Dopuszczalne poziomy – Dopuszczalne poziomy emisji harmonicznych prądu (fazowy prąd zasilający odbiornika $\leq 16A$)
PN-EN 61000-4-7:1998 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) - Metody badań i pomiarów - Ogólne wytyczne dla przyrządów i metod pomiarów harmonicznych i interharmonicznych dla systemów zasilania i urządzeń przyłączonych do sieci.
PN EN 50082-1:1996 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Wymagania ogólne dotyczące odporności na zaburzenia – środowisko mieszkalne, handlowe i lekko przemysłowe
PN EN 50081-1:1996 Kompatybilność elektromagnetyczna – Wymagania ogólne dotyczące emisyjności – środowisko mieszkalne, handlowe i lekko przemysłowe
PN EN 50081-2: 1996 Kompatybilność elektromagnetyczna – Wymagania ogólne dotyczące emisyjności – środowisko przemysłowe
PN EN 61000-2-4: 1997 Kompatybilność elektromagnetyczna - Środowisko – Poziomy kompatybilności dotyczące zaburzeń przewodzonych małej częstotliwości w sieciach zakładów przemysłowych
PN EN 50160: 1998 Charakterystyki napięcia w publicznych sieciach zasilających
Pr ¹⁰ PN IEC 61000-3-6 Kompatybilność elektromagnetyczna – Część 3: Wartości dopuszczalne – Arkusz 6: Wyznaczanie dopuszczalnych poziomów emisji harmonicznych obciążeń zaburzających w sieciach elektroenergetycznych SN i WN – Podstawowa publikacja EMC
Pr ⁹ PN IEC 61000-3-4 Kompatybilność elektromagnetyczna (EMC) – Część 3: Arkusz 4: Wartości dopuszczalne – Ograniczenie emisji harmonicznych prądów w niskonapięciowych systemach zasilania dla sprzętu pracującego przy prądzie znamionowym większym niż 16 A

Tabela A2 - Poziomy kompatybilności wyższych harmonicznych napięcia w sieciach nn dyskutowane w ramach Międzynarodowej Komisji Elektrotechniki IEC (IEC 61000-2-2: 1990)

Harmoniczne nieparzyste, o rzędach nie będących krotnością 3		Harmoniczne nieparzyste o rzędach będących krotnością 3		Harmoniczne parzyste	
Rząd harmoniczej, n	Wartość harmoniczej w % składowej podstawowej	Rząd harmoniczej, n	Wartość harmoniczej w % składowej podstawowej	Rząd harmoniczej, n	Wartość harmoniczej w % składowej podstawowej
5	6	3	5	2	2
7	5	9	1,5	4	1
11	3,5	15	0,3	6	0,5
13	3	21	0,2	8	0,5
17	2	>21	0,2	10	0,5
19	1,5			12	0,2
23	1,5			>12	0,2
25	1,5				
>25	0,2+12,5/n				

Tabela A3 – Dopuszczalne wartości współczynnika odkształcenia napięcia oraz zawartości poszczególnych harmonicznych [Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 25 września 2000 r. w sprawie szczegółowych warunków przyłączenia podmiotów do sieci elektroenergetycznych, obrotu energią elektryczną, świadczenia usług przesyłowych, ruchu sieciowego i eksploatacji sieci oraz standardów jakościowych obsługi odbiorców. Dziennik Ustaw Nr 85, Poz. 957]

Wartość napięcia znamionowego U_N	Dopuszczalny współczynnik odkształcenia napięcia [%]	Dopuszczalne wartości poszczególnych harmonicznych odniesionych do harmoniczej podstawowej [%]
$U_N > 110kV$	1,5	1,0
$110kV \geq U_N > 30kV$	2,5	1,5
$30kV \geq U_N > 1kV$	5,0	3,0
$U_N < 1kV$	8,0	5,0

¹⁰ Norma w opracowywaniu.

DODATEK B - Wartości harmonicznych prądu dla wybranych przykładowo odbiorników¹¹

Tablica B1 - Urządzenie jednofazowe

Rząd harmonicznych	Spawarka [%]	Komputer [%]	Lampa fluorescencyjna [%]
1	100	100	100
3	29,6	75	12,3
5	8,8	47,3	13,8
7	2,0	22,9	3,0
9	2,3	9,0	1,1
11	2,3	3,3	0,7
13	1,1	3,0	0,5
15	0,4	2,1	
17	0,9	1,9	

Tablica B2 - Urządzenie trójfazowe

Rząd harmonicznej	Piec indukcyjny	Napęd prądu stałego ¹²	Piec łukowy prądu stałego	PWM napęd ¹³
1	100	100	100	100
5	20,9	37,1	18,9	25
7	12,7	1,1	10,3	11
11	7,8	8,6	5,4	7,5
13	7,2	2,5	3,9	5,0
17	4,3	4,7	1,8	4,4
19	4,9	2,3	1,3	3,2
23	2,6	3,1	0,6	2,6
25	3,6	2,1	0,5	2,0
29	1,7	2,2	0,5	1,7
31	2,7	1,9	0,5	1,3
35	1,2	1,7	0,4	1,0
37	2,0	1,8	0,4	0,8
41	0,8	1,4	0,3	0,6
43	1,4	1,6	0,3	0,5
47	0,5	1,1	0,2	0,4
49	1,0	1,3	0,2	0,3

¹¹ Wartości te należy traktować jedynie jako przykładowe, podlegają one bowiem bardzo silnym zmianom.

¹² Przekształtnik o sterowaniu fazowym z dużą wartością kąta wysterowania.

¹³ Napęd wyposażony był w dławik wejściowy. Bez dławika procentowe zawartości 5, 7, 11, 13 będą dużo większe.