

Rozważania o jakości energii elektrycznej (V)

Zbigniew Hanzelka

Skutki obecności wyższych harmonicznych

● **Źródła światła.** Wzrost wartości szczytowej odkształconego napięcia powoduje skrócenie czasu eksploatacji żarowych źródeł światła. Lampy wyładowcze – fluorescencyjne i rtęciowe – są na ogół wyposażone w szeregowy dławik ograniczający prąd. Dławik ten w połączeniu z często stosowanym kondensatorem na wejściu układu (do poprawy

W Ei 12/2001 omówiono skutki występowania wyższych harmonicznych w takich urządzeniach jak silniki, generatory, transformatory oraz kondensatory. Obecnie przedstawiono skutki takiego oddziaływania na pozostałe odbiorniki i aparaty elektryczne, a także opisano różne sposoby ograniczania odkształcenia prądów i napięć.

jów sprzętu elektronicznego), w obwodach ochrony przepięciowej, filtrach EMC itp.

Sprzęt informatyczny, podobnie jak np. sterowniki programowalne, wymaga, aby w sieci, z której jest zasilany, współczynnik odkształcenia napięcia oraz względne wartości każdej z występujących harmonicznych nie przekroczyły zadanych, dopuszczalnych wartości. Wyższe poziomy odkształcenia powodują błędy w działa-

Wyższe harmoniczne napięć i prądów (cd.)

współczynnika mocy) tworzy równoległy obwód rezonansowy. Stan bliski rezonansu jest źródłem strat dodatkowych.

● **Wyłączniki.** Odkształcenie przebiegu prądu spowodowane harmonicznymi ma wpływ na zdolność łączeniową wyłączników w przypadku wyłączania małych prądów (nie prądów zwarciovych). Obecność wh (wyższych harmonicznych) może być przyczyną większej wartości pochodnej prądu di/dt przy jego przejściu przez wartość zerową (w porównaniu z przebiegiem sinusoidalnym). Czyni to trudniejszym proces przerywania prądu.

● **Układy przekształtnikowe i sprzęt elektroniczny.** Układy przekształtnikowe są traktowane w literaturze głównie jako źródło wh, znacznie rzadziej jako odbiorniki podlegające zakłóceniom. W praktyce jednak te układy, podobnie jak większość urządzeń elektronicznych, są wrażliwe na zaburzenia, w tym również na występujące harmoniczne. Z tego względu stwierdza się nieprawidłowości ich działania, związane np. z błędami synchronizacji. W wielu rodzajach sprzętu wykorzystuje się przejście składowej podstawowej napięcia (znacznie rzadziej prądu) przez wartość zerową w celu czasowej synchronizacji ich działania. W razie dużego odkształcenia (np. w warunkach rezonansowych, lecz nie tylko) przebiegi czasowe wielkości synchronizującej mogą przechodzić przez zero więcej niż jeden raz w każdej połowie okresu.

W układach sterowania sieciowo komutowanych przekształtników, synchronizowanych przejściami napięć zasilających

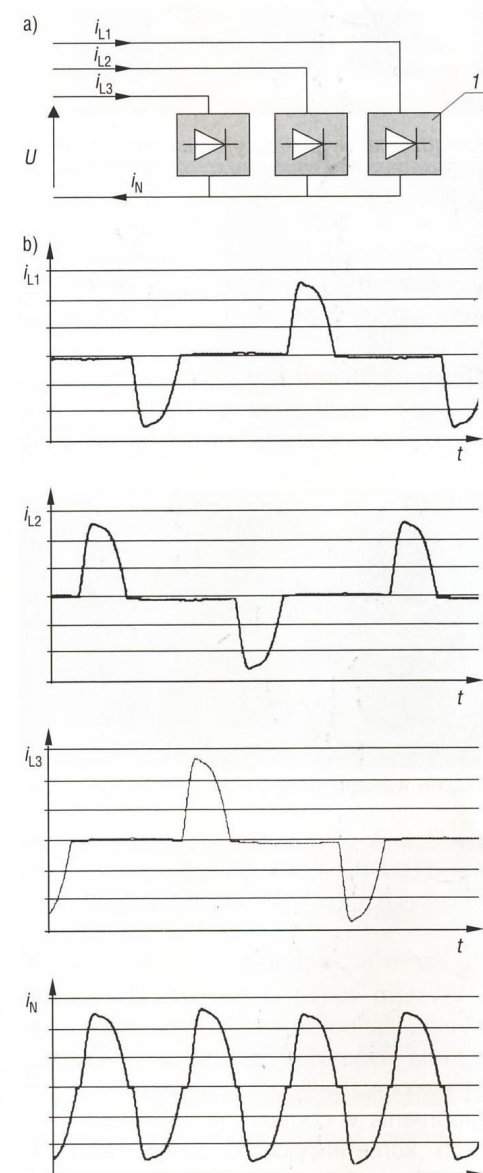
przez wartość zerową, na skutek odkształcenia napięcia wokół tej wartości może wystąpić nierówność kątów występowania poszczególnych elementów półprzewodnikowych. Skutkiem tego jest generowanie przez przekształtnik wyższych harmonicznych nie charakterystycznych (w tym również parzystych, potrójnych rzędów i interharmonicznych) oraz w szczególnych warunkach – składowej stałej. Załączanie elementów półprzewodnikowych w niewłaściwej dla nich chwili jest szczególnie groźne przy pracy inwerterowej przekształtnika.

Błędy synchronizacji mogą również pojawić się wówczas, gdy jest dokonywana komparacja dwóch przebiegów czasowych.

Występowanie wyższych harmonicznych może także powodować niepoprawną pracę omawianych urządzeń ze względu na:

- uszkodzenia elementów układu na skutek wzrostu wartości szczytowej napięcia zasilającego w wyniku jego odkształcenia harmonicznymi,
- błędy w czujnikach pomiarowych sygnałów wejściowych do układów sterowania,
- zakłócenia w pracy elementów diagnostyki i zabezpieczeń,
- niekorzystny wpływ na kondensatory występujące w strukturze układów energoelektronicznych (również innych rodza-

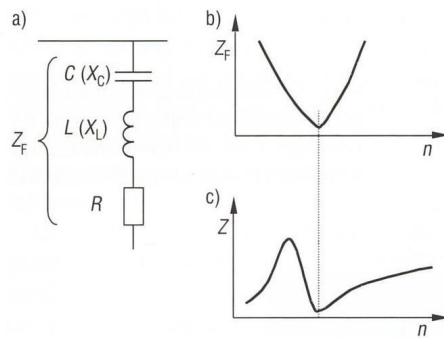
Rys. 15. Trójfazowy, czteroprzewodowy układ zasilający jednofazowe odbiorniki przekształtnikowe (1): a) schemat ideowy, b) typowe przebiegi czasowe prądów fazowych i prądu neutralnego



niu, często przekłamania lub utratę danych, charakterystyczne „brzęczenie” napędów dysków itp. Może to mieć w wielu przypadkach groźne konsekwencje, szczególnie w takich dziedzinach, jak służba zdrowia, banki, transport lotniczy itp. Z tych powodów wiele funkcjonujących tam urządzeń jest zasilanych przez specjalne interfejsy wejściowe zapewniające lepszą jakość zasilania.

● **Przyrządy pomiarowe.** Zwykle są one kalibrowane do pomiarów przebiegów sinusoidalnych. Użycie ich w obwodach z przebiegami odkształconymi może więc być źródłem błędów. Wartości tych błędów – zarówno dodatnie, jak i ujemne – zależą od wielu czynników, takich jak rodzaj realizowanego pomiaru i zastosowanego przyrządu, rząd, wartość i faza poszczególnych harmonicznych itp.

Typowy elektromagnetyczny licznik energii czynnej jest z zasady działania małym silnikiem, którego wirnik stanowi poruszająca się tarcza. Pojawienie się harmonicznych w napięciu i prądzie powoduje wytworzenie dodatkowych momentów harmonicznych działających na tarczę. Momenty te mogą działać zgodnie lub przeciwnie do momentu podstawowego. Wynikające stąd błędy pomiaru zale-



Rys. 16. Schemat zastępczy filtra prostego (a) oraz jego typowe charakterystyki impedancyjne: b) filtra, c) filtra wraz z siecią zasilającą

żą od wielu czynników, wśród których należy wymienić: stopień odkształcenia mierzonych przebiegów, rząd i wartość harmonicznych, kierunek przepływu mocy itp. Elementy konstrukcyjne licznika wiodące strumień są nieliniowe w funkcji częstotliwości i wartości harmonicznych, co powoduje, że zmieniają one te wartości składowe strumienia, które są w przyrządzie wykorzystane do jego kalibracji (np. kompensacji momentu tarcia).

Zauważalny błąd pomiaru występuje, jak wykazują badania, dopiero przy znacznych odkształceniach napięcia i prądu (przekraczających 20%), co w realnych u-

kładach jest rzadkością. Istnieją jednak publikacje prezentujące krańcowo odmienną opinię, co dowodzi jak wielkie jest zróżnicowanie konstrukcji w tej grupie przyrządów.

Cyfrowy licznik czynnej energii elektrycznej oblicza energię próbując przebiegi czasowe napięć i prądów. Szerokość pasma przepustowego jest ograniczona częstotliwością próbkowania. Komercyjnie dostępne liczniki cyfrowe mają w zasadzie płaską charakterystykę częstotliwościową do ok. 1000 Hz. Wskazania licznika w tym przedziale są więc prawidłowe, co nie eliminuje możliwości występowania błędów związanych z techniką próbkowania i przetwarzania danych.

● **Przewody elektryczne.** W przypadku odkształconych przebiegów w przewodach zasilających następuje wzrost strat cieplnych prądu w porównaniu ze stratami przy prądzie sinusoidalnym. Są tego dwie przyczyny.

Pierwsza to zjawisko naskórkowości i efekt sąsiedztwa polegający na wypieraniu strug prądu w sąsiadujących przewodach zasilających. Obydwa zjawiska prowadzą do wzrostu efektywnej rezystancji przewodów. W pierwszym przypadku rezystancja zwiększa się wraz ze wzrostem

01/00475-01

Twelve

electric

**Kompensacja Mocy Biernej
Rozdział Energii
Monitoring Jakości Sieci
Osprzęt Elektrotechniczny**

Po pełną wersję artykułu
prof. Z. Hanzelki dzwoni:
(22) 872-20-20
lub odwiedź stronę
www.twelve.com.pl






JEEN 2000
im. K. Szpotalskiego
INSTALEKTRA
Bydgoszcz 2000



ZŁOTA ISKRA
ELEKTROEXPO
Warszawa 2000

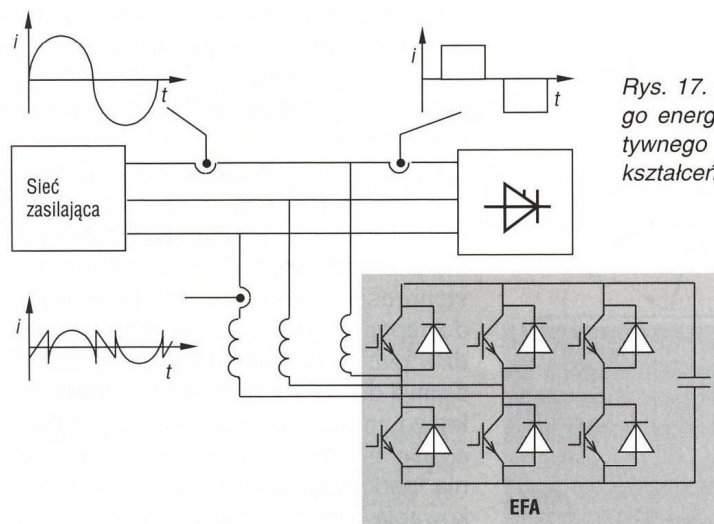


ZŁOTY MEDAL
INSTALEKTRA
Bydgoszcz 2000



MEDAL PREZESA SEP
ELEKTROINSTALACJE
Gdańsk 2000

TWELVE ELECTRIC
04-994 Warszawa, ul. Poezji 19
tel. (22) 872 20 20, fax (22) 612 79 49
www.twelveE.com.pl



Rys. 17. Zastosowanie równoległego energoelektronicznego filtra aktywnego EFA do kompensacji odkształceń trójfazowego prostownika

częstotliwości harmonicznej składowej prądu oraz średnicą przewodu. Efekt sąsiedztwa jest związany z wzajemnym oddziaływaniem pól elektromagnetycznych i strug prądów płynących w przylegających do siebie przewodach. W przewodach o przekroju okrągłym skutek tego zjawiska jest mniejszy niż efekt naskórkowości.

Druga przyczyna wpływu wH dotyczy wzrostu wartości skutecznej prądów fazowych, a przede wszystkim nadmiernego obciążenia przewodu neutralnego w trójfazowych, czteroprzewodowych systemach zasilających. Jednofazowe odbiorniki małej mocy mają w większości przypadków interfejsy AC/DC przyłączone na wejściu między fazę a przewód neutralny (rys. 15a).

Jednakowa moc poszczególnych odbiorników fazowych i symetria napięcia zasilającego sprawia, że w przewodzie neutralnym płyną głównie harmoniczne potrójnych rzędów tworzące układ składowych symetrycznych kolejności zerowej. Prąd ten może być bardzo duży.

Przewód neutralny ma zwykle taki sam przekrój jak przewód fazowy, może więc zdarzyć się jego prądowe przeciążenie. Problem ten jest szczególnie istotny w instalacjach budynków biurowych, centrach komputerowych itp., gdzie występuje duża liczba jednofazowych odbiorników. Korzystnym i stosowanym rozwiązaniem jest zwiększenie przekroju przewodu neutralnego, nawet dwukrotne w porównaniu z przekrojem przewodów fazowych.

W przewodach i kablach elektrycznych oprócz zwiększonych strat mocy czynnej występuje dodatkowy stres izolacji związany z możliwym wzrostem szczytowej wartości napięcia zasilającego na skutek odkształcenia spowodowanego harmonicznymi. Następuje również przyspieszone starzenie izolacji jako rezultat zwiększenia wartości pojemnościowego prądu upływu i wynikających stąd niekorzystnych procesów fizykochemicznych. Intensywność jego znacznie się zwiększa, gdy pojemność doziemna kabla jest elementem obwodu będącego w stanie rezonansu.

● **Układy przekaźnikowe i stycznikowe.** Większość opublikowanych dotychczas wyników badań zabezpieczeń (przełączników) i styczników pracujących w środowisku o przebiegach odkształconych dotyczy konstrukcji elektromechanicznych, w mniejszym stopniu – rozwiązań elektronicznych. Na ich podstawie można wysnuć następujące wnioski:

– styczniki i przełączniki działają bardzo różnie przy zakłóceniach wywołanych przez harmoniczne; ich reakcja zależy nie tylko od rodzaju, typu, producenta tych urządzeń, lecz zmienia się również wraz ze zmianą badanego egzemplarza oraz zmianą cech charakterystycznych widma przebiegu;

– czułość styczników i przełączników na harmoniczne prądu lub napięcia zmniejsza się ze wzrostem rzędu harmonicznych;

– większość styczników i przełączników jest niewrażliwa na odkształcenie napięcia mniejsze niż 20%; powyżej tej wartości może wystąpić nieprawidłowość ich działania zarówno w typowych, jak i nietypowych warunkach pracy zabezpieczonego obiektu.

● **Układy telekomunikacyjne.** Zakłócenia telekomunikacyjne są jednym z najwcześniej rozpoznanych problemów związanych z obecnością wyższych harmonicznych w systemach zasilających. W latach 20., kiedy prostowniki statyczne były po raz pierwszy stosowane w warunkach przemysłowych, często ich przewody zasilające umieszczano w pobliżu sieci telefonicznych. Będący tego rezultatem „szum” w obwodach telekomunikacyjnych powodował odczucie dyskomfortu u użytkownika. Wysoki poziom szumu obniżał znacznie jakość transmisji, prowadząc

niekiedy do całkowitej utraty informacji. Udokumentowano – szczególnie w latach 30. i 40. – liczne przypadki, gdy załączenie dużych odbiorników prostownikowych powodowało przerwy w komunikacji telefonicznej niekiedy na dużych obszarach.

Obecnie dążenie do poprawy jakości transmisji sygnałów również wymaga ciągłej analizy poziomu zaburzeń występujących w liniach telefonicznych lokalizowanych w pobliżu np. linii wysokiego napięcia, jednak niebezpieczeństwo ich wystąpienia jest znacznie mniejsze. Upowszechnia się pogląd, że znaczenie zaburzeń wywołanych harmonicznymi staje się coraz mniejsze w następstwie stosowania w telekomunikacji nowych technik: hardware (światłowody) i software (np. fazy modulacja).

Eliminacja zagrożeń

W środowisku elektromagnetycznym, w procesie wzajemnego oddziaływania uczestniczą trzy elementy składowe:

- źródło zaburzenia, w rozważanym przypadku jest to nieliniowy odbiornik będący źródłem harmonicznymi;
- odbiornik podlegający zewnętrznemu zaburzeniu, które może doprowadzić do degradacji jakości jego pracy;
- układ sprzęgający odbiornik ze źródłem zaburzenia, inaczej – ścieżka transmisji zaburzenia, np. sieć zasilająca dla rozważanego zaburzenia o charakterze głównie przewodnym.

Redukcja wartości wh napięcia, a więc ograniczenie skutków ich obecności, wymaga realizacji zespołu działań technicznych dotyczących każdego z trzech wyszczególnionych elementów środowiska elektromagnetycznego. Błędem jest obarczanie odpowiedzialnością za złą jakość energii elektrycznej wyłącznie końcowych jej odbiorców i zmuszanie tylko ich do ograniczenia wartości generowanych harmonicznymi. Dostawca energii powinien również prowadzić ciągłą kontrolę poziomu odkształcenia napięcia, aby uniknąć niebezpieczeństwa jego rezonansowego wzmocnienia lub przekroczenia poziomów kompatybilności.

Redukcja wartości wh napięcia, a więc ograniczenie skutków ich obecności, wymaga realizacji zespołu działań technicznych dotyczących każdego z trzech wyszczególnionych elementów środowiska elektromagnetycznego. Błędem jest obarczanie odpowiedzialnością za złą jakość energii elektrycznej wyłącznie końcowych jej odbiorców i zmuszanie tylko ich do ograniczenia wartości generowanych harmonicznymi. Dostawca energii powinien również prowadzić ciągłą kontrolę poziomu odkształcenia napięcia, aby uniknąć niebezpieczeństwa jego rezonansowego wzmocnienia lub przekroczenia poziomów kompatybilności.

Równoległe filtry wyższych harmonicznymi

● **Filtry pasywne.** W przypadku gdy w instalacjach istniejących lub nowo projektowanych współczynnik odkształcenia napięcia jest większy niż dopuszczalna jego wartość, powstaje potrzeba przyłączenia filtrów wh do szyn zasilających. Obecnie są to prawie wyłącznie filtry równoległe, które przez odpowiedni dobór wartości elementów biernych LC stanowią gałąź o małej impedancji bocznikującą impedancję

się sieci zasilającej. Spełniają podwójną funkcję: odciążają system zasilający od wh prądu oraz są źródłem potrzebnej do kompensacji mocy biernej dla podstawowej harmonicznej. Wszystkie konfiguracje filtrów mają dla tej harmonicznej charakter pojemnościowy.

Układ filtrów jest projektowany każdorazowo dla konkretnego punktu zasilania systemu tak, aby uzyskać pożądany przebieg częstotliwościowej charakterystyki impedancyjnej.

Najczęściej stosuje się filtry rezonansowe pojedynczych harmonicznymi (filtr prosty) oraz filtr szerokopasmowy. Możliwa jest realizacja innych rozwiązań, korzystnych technicznie i ekonomicznie, w określonych zastosowaniach.

Schemat zastępczy oraz typowe charakterystyki impedancyjne filtru prostego oraz układu filtr prosty-sieć zasilająca przedstawiono na rys. 16. Rezystancja R jest głównie rezystancją dławika, jej wartość bowiem w przypadku kondensatorów jest praktycznie pomijalna.

Gałąź filtru przyłączona do zacisków odbiornika nieliniowego dostrójona do generowanej przez niego harmonicznej n -tego rzędu powoduje, że w idealnych

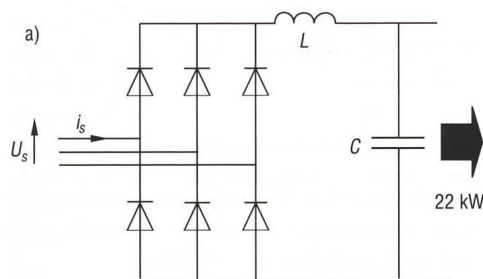
warunkach płynie ona tylko w jego obwodzie, a nie jest obecna w sieci zasilającej.

Filtry są najczęściej projektowane w taki sposób, aby każda z filtrowanych częstotliwości miała swój własny obwód filtracyjny dostrojony – przez odpowiedni dobór wartości indukcyjności i pojemności – do rezonansu szeregowego dla wybranej częstotliwości filtrowanej harmonicznej.

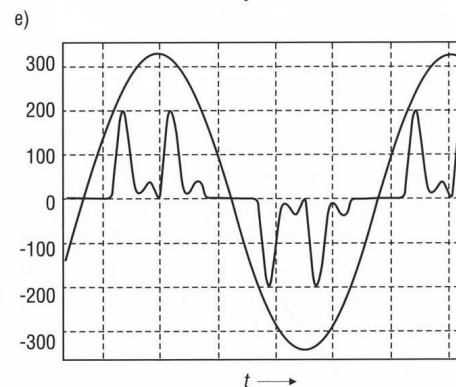
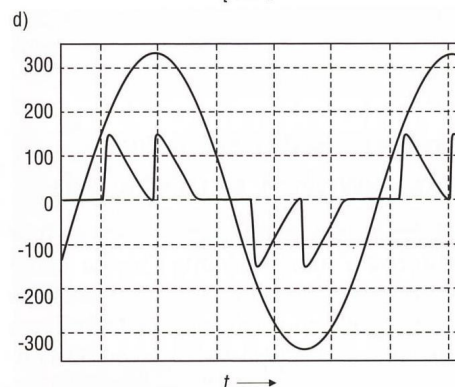
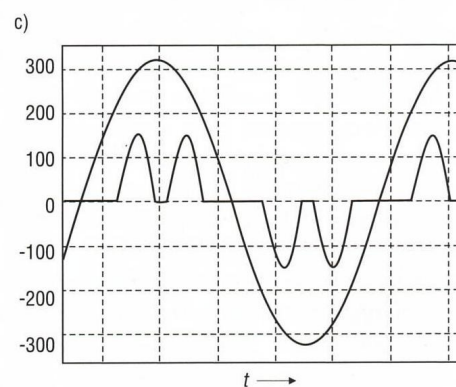
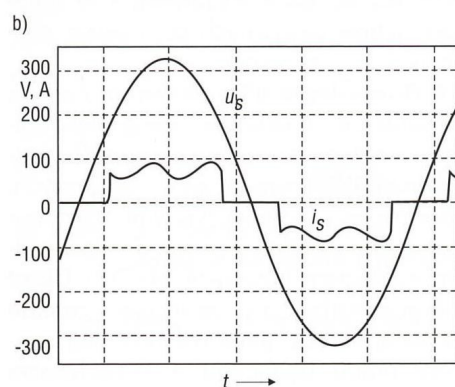
Znając wartości wh prądu występujących w miejscu przewidywanego zainstalowania filtrów, zakłada się ich eliminację zaczynając od najmniejszej harmonicznej, następnie sprawdzając kolejno współczynnik odkształcenia napięcia (w miarę dołączania nowych filtrów) aż do uzyskania pożądanego ograniczenia jego wartości.

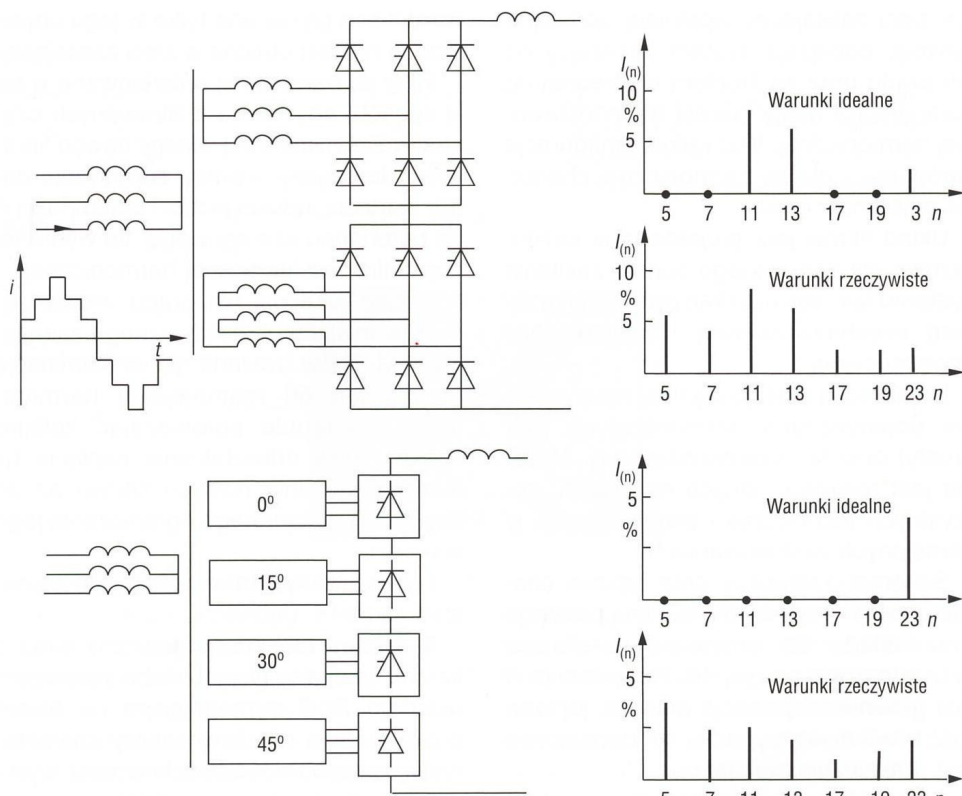
Główne wady filtrów pasywnych są następujące:

■ System elektroenergetyczny wraz z filtrami pasywnymi jest słabo tłumionym układem RLC wymagającym na etapie projektowania uważnej analizy charakterystyk częstotliwościowych w celu wyeliminowania zjawisk rezonansowych. Już przy częstotliwości bliskiej częstotliwości rezonansowej następuje silne wzmocnienie tej harmonicznej w napięciu zasilającym



Rys. 18. Wpływ parametrów dławika i kondensatora w obwodzie prądu stałego (a) na poziom odkształcenia prądu wejściowego prostownika w przypadku: b) dużej indukcyjności i pojemności, c) małej indukcyjności i dużej pojemności, d) średniej wartości indukcyjności i pojemności, e) małej indukcyjności i pojemności





Rys. 19. Redukcja zawartości wh prądu w układzie przekształtnika: a) 12-pulsowego, b) 24-pulsowego (0, 15, 30 i 45° – kąty przesunięcia fazowego między napięciami strony wtórnej transformatora)

cym (pod warunkiem, że występuje pobudzenie harmoniczne w układzie).

Skuteczność działania filtra zależy bardzo silnie od impedancji systemu zasilającego w punkcie jego przyłączenia. Zwykle wartość impedancji nie jest dokładnie znana i zmienia się wraz ze zmianą konfiguracji sieci.

Filtry ulegają rozstrojeniu na skutek zmian częstotliwości zasilania oraz zmian wartości elementów składowych LC (np. w wyniku procesu starzenia kondensatorów). Negatywny tego skutek można zredukować m.in. odpowiednio dostrajając filtr lub zmniejszając jego dobroć. Ten ostatni sposób powoduje jednak wzrost strat mocy czynnej oraz wzrost nie filtrowanej harmonicznej w napięciu. Idealna filtracja za pomocą filtrów pasywnych nie jest więc możliwa, szczególnie w przypadku niestacjonarnych wh.

W prądzie filtru są również zawarte wh płynące pod wpływem harmonicznych napięć źródła zasilania. Możliwy jest przypadek rezonansu szeregowego filtra z impedancją systemu.

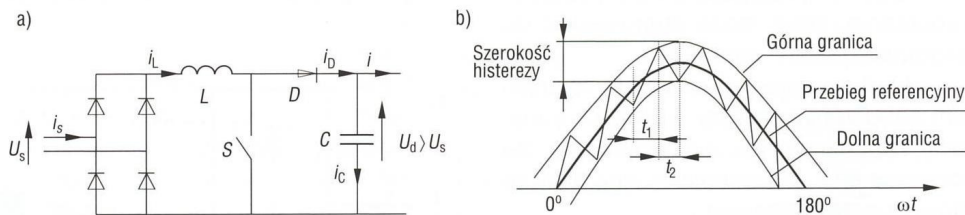
Filtrowaniu podlegają tylko wybrane wh o dominujących wartościach. Nie są filtrowane harmoniczne uznane za niecharakterystyczne dla odbiornika, które mogą jednak wystąpić w jego prądzie zasilającym.

Filtry pasywne są dużym i kosztownym elementem systemów kompensacji. W przypadku filtrów pojedynczej harmonicznej ich liczba odpowiada liczbie filtrowanych wh. Stosowanie zamiast nich filtrów wyższych rzędów w praktyce obni-

nerowanych harmonicznych zależą od rodzaju odbiornika. Dotyczą bowiem zmian w jego strukturze lub wymagają zmian technologicznych. Przykładowo w przypadku pieca łukowego jest to cały zespół działań zmierzających do „uspokojenia” pracy pieca. Jest wiele różnych przedsięwzięć technicznych, których celem jest zmniejszenie szkodliwego „harmonicznego” oddziaływania układów nieliniowych na sieć zasilającą. Szczegółowe omówienie każdego z nich przekracza ramy tego opracowania. Zainteresowani czytelnicy mogą się zapoznać z nimi w licznych książkach z dziedziny energoelektroniki. Tu zostały przedstawione tylko najbardziej powszechne sposoby.

• Dławiki wejściowe. W wielu przypadkach zastosowanie dławików wejściowych w obwodzie prądu przemiennego lub w obwodzie prądu stałego (rys. 18a) zmniejsza w zasadniczy sposób poziom odkształcenia prądu przekształtnika.

Na rys. 18b-e przedstawiono przebiegi czasowe prądu wybranej fazy układu nie sterowanego prostownika, obciążonego po stronie prądu stałego mocą 22 kW, przy różnych wartościach indukcyjności



Rys. 20. Zasada aktywnego kształtowania prądu wejściowego (b) w układzie jednofazowego prostownika (a)

za skuteczność filtracji, wymaga elementów składowych o dużych mocach oraz zmniejsza sprawność instalacji.

Opracowano aktywne układy energoelektroniczne, które instalowane w gałęziach filtrów pasywnych poprawiają skuteczność ich działania.

• Równoległe filtry aktywne. Zasada działania takich układów energoelektronicznych polega na eliminacji z prądów odbiornika nieliniowego tych składowych, które nie są prądami czynnymi, tzn. sinusoidalnymi i współfazowymi z odpowiednimi napięciami fazowymi (rys. 17). Układ energoelektroniczny, realizując zasadę aktywnej filtracji, generuje przebieg czasowy prądu będącego w przeciwfazie względem niepożądanego składowej w prądzie odbiornika. Dzięki temu w sieci zasilającej płynie prąd sinusoidalny.

Inne sposoby redukcji negatywnych skutków wh

• Redukcja emisji harmonicznych w odbiorniku nieliniowym. Oprócz omówionych pasywnych i aktywnych układów filtracyjnych, inne rozwiązania techniczne podejmowane w celu redukcji wartości ge-

dławika L i pojemności kondensatora C . W przypadku pokazanym na rys. 18b współczynnik odkształcenia prądu ma wartość 30%, podczas gdy w innym (rys. 18e), ze względu na małą indukcyjność dławika, THD wzrasta do poziomu 180%.

• Układy wielopulsacyjne. Najbardziej rozpowszechnionym sposobem stosowanym w celu zmniejszenia współczynnika odkształcenia prądu przekształtnika, a tym samym wyeliminowania negatywnych skutków obecności wh w sieci zasilającej, jest zwiększenie liczby pulsów. Ekwiwalentny, wielopulsacyjny reżim pracy można uzyskać łącząc szeregowo lub równoległe przekształtniki o mniejszej liczbie pulsów. Na rys. 19 przedstawiono sposób realizacji układu 12-pulsowego ($p = 12$) oraz układu 24-pulsowego ($p = 24$). Uwzględniając związki określające rzędy wh charakterystycznych przekształtnika $n = pk \pm 1$, gdzie $k = 1, 2, 3$, oraz ich amplitud $I_{(n)} = 1/n$ (teoretycznie) widać wyraźnie korzystny wpływ wzrostu liczby pulsów polegający

na eliminacji (w praktyce redukcji wartości) harmonicznych o niższych rzędach.

● **Aktywne kształtowanie prądu wejściowego przekształtnika.** Na rys. 20 przedstawiono przykładowo koncepcję aktywnego kształtowania przebiegu czasowego prądu wejściowego jednofazowego prostownika z filtrem pojemnościowym, układu powszechnie stosowanego w sprzęcie domowym i biurowym.

Zamknięcie łącznika S powoduje w czasie t_1 (rys. 20b) wzrost prądu wejściowego prostownika oraz wzrost energii zgromadzonej w polu magnetycznym dławika L . Otwarcie łącznika wymusza przepływ prądu i_D , pod wpływem siły elektromotorycznej samoindukcji, przez diodę D i kondensator C . W tym czasie t_2 (rys. 20b) prąd i_s maleje. Chwila otwarcia i zamknięcia łącznika S jest określona osiągnięciem przez prąd źródła zasilania górnej lub dolnej granicy wartości dopuszczalnej. Zmniejszenie szerokości histerezy umożliwia dokładniejsze odtworzenie prądu referencyjnego zgodnego w fazie z napięciem sieci zasilającej.

Zastosowanie techniki modulacji szerokości impulsów (PWM), rozwój technologii elementów półprzewodnikowych dużej mocy (IGBT, tranzystorów mocy) dopuszczających duże graniczne częstotliwości łączenia czyni możliwym coraz powszechniejsze stosowanie aktywnego kształtowania prądu wejściowego przekształtnika. Ten rodzaj układów zastępuje w coraz większym stopniu dotychczas stosowane rozwiązania. Wadą tych układów jest ciągle jeszcze znaczny ich koszt.

● **Redukcja sprzężenia czułego na zaburzenia odbiornika ze źródłem harmonicznych.** Redukcja (lub ogólnie kształtowanie) impedancji sieci zasilającej $Z_{s(n)}$, przy założeniu stałej wartości prądu odbiornika $I_{(n)} = \text{const}$, pozwala zmniejszyć wartość spadku napięcia $\Delta U_{(n)}$, a tym samym zmniejszyć wartość jego odkształcenia (rys. 10 w cz. IV artykułu). Wzrost mocy zwarciowej w PWP, czyli zmniejszenie impedancji zastępczej linii zasilającej (w praktyce zastępczej reaktancji indukcyjnej, bowiem $R_s \approx 0$, a $Z_{s(n)} \approx n\omega L_{(s)}$, gdzie: R_s , L_s – rezystancja i indukcyjność zastępcza linii), można zrealizować w różny sposób, np. przez rozbudowanie systemu zasilającego, eliminację dławików szeregowych, równoległą pracę linii zasilających i transformatorów, wzrost mocy transformatorów i/lub zmniejszenie ich napięć zwarcia. Do tej grupy działań można również zaliczyć kompensację impedancji linii za pomocą kondensatorów szeregowych o stałej lub – coraz częściej – zmiennej wartości.

Korzystne jest zasilanie nieliniowych odbiorników dużej mocy bezpośrednio z linii WN. Gwarantuje to dostatecznie dużą

wartość mocy zwarciowej w miejscu ich przyłączenia.

Można również stosować bezprzerwowe układy zasilające. Są to układy, których celem działania jest automatyczne, bez opóźnienia i stanów przejściowych zagwarantowanie zasilania w każdym przypadku, gdy normalny układ zasilający przestanie prawidłowo funkcjonować. Oprócz umożliwienia ciągłości zasilania UPS spełniają również często funkcję układów zasilających o podwyższonych wskaźnikach energetycznych, tzn. gwarantują stabilizację napięcia oraz chronią odbiorniki przed większością zaburzeń pochodzących z sieci zasilającej, w tym również przed występującym tam odkształceniem.

● **Zmniejszenie czułości odbiorników na zaburzenia.** W przypadku zaburzeń spowodowanych wystąpieniem harmonicznych obserwuje się proces przeciwny do zamierzonego. Czułość współczesnych odbiorników wzrasta z bardzo nielicznymi wyjątkami, których pozytywnym przykładem mogą być np. odbiorniki telewizyjne.

Zakończenie

Wyższe harmoniczne, mimo stosowania coraz powszechniej dostępnych środków technicznych służących do redukcji ich wartości, są nadal realnym zagrożeniem dla systemu elektroenergetycznego i zasilanych z niego odbiorników. Znaczącym dla współczesnego stanu techniki, szczególnie urządzeń energoelektronicznych będących podstawowym źródłem odkształcenia napięć i prądów, jest obserwowany coraz powszechniej kierunek ograniczania wartości harmonicznych niższych rzędów przy równoczesnym wzroście wartości składowych wyższych rzędów, tym samym przesunięcie pasma emisji w przedział częstotliwości nawet do 1 GHz.

209



Dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka
– profesor Akademii Górniczo-
Hutniczej, konsultant
ds. technicznych firmy TWELVE