

# optymalizacja jakości napięcia dzięki zastosowaniu pasywnych filtrów wyższych harmonicznych z inteligentną regulacją impedancji

EST ENERGY

**Zastosowanie i wybór systemów filtracji w celu zredukowania wyższych harmonicznych zawsze wiąże się ze znalezieniem odpowiedniego kompromisu pomiędzy mocnymi i słabymi stronami poszczególnych metodyk. Zasada inteligentnego dopasowania impedancji oferuje, oprócz klasycznych koncepcji filtrów pasywnych i aktywnych, szczególnie odpowiednie podejście.**

Zakłócenia sieci w postaci wyższych harmonicznych (oscylacje z wielokrotnością częstotliwości podstawowej) są obecnie istotnym elementem wpływającym na jakość napięcia. Urządzenia o nieliniowych krzywych charakterystyk U-I lub o niestabilnym obciążeniu prowadzą do pobierania prądu niesinusoidalnego, co z kolei prowadzi do niesinusoidalnych spadków napięcia z powodu jego zasilania w stosunku do istniejącej impedancji sieci, a tym samym do zniekształcenia napięcia zasilania. Konsekwencjami są m.in. zniszczenie urządzenia, wpływ na prawidłowe funkcjonowanie elektronicznych urządzeń sterujących czy spowodowanie wystąpienia rezonansów. Choć emisję wyższych harmonicznych można ograniczyć za pomocą odpowiednich środków, nie można jej całkowicie wyeliminować.

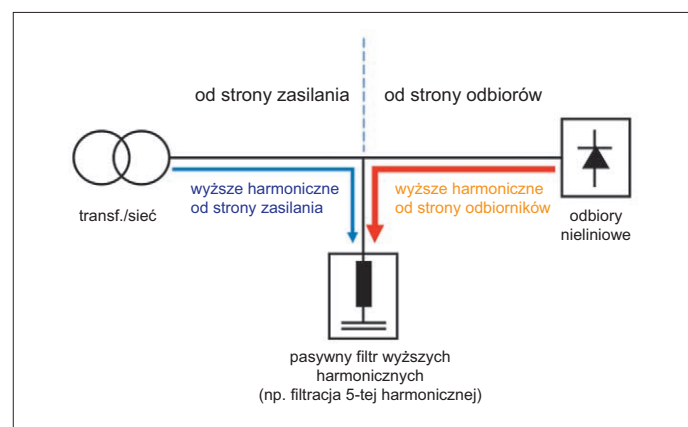
Norma IEC 61000-2-4 jako norma przewodnia produktu określa stałe wartości graniczne dla maksymalnych dopuszczalnych zniekształceń napięcia. W przypadku przekroczenia tych wartości granicznych, urządzenia i procesy mogą zostać zakłócone bez ponoszenia odpowiedzialności przez ich producentów, co oznacza, że roszczenia gwarancyjne są nieważne. W takich przypad-

kach klient musi sam ponieść koszty napraw i przestoju w produkcji. Zwłaszcza w przypadku przestoju całych procesów produkcyjnych poniesione koszty mogą szybko zsumować się nawet wielokrotnie w stosunku do kosztu odpowiednich środków zastosowanych uprzednio w celu zmniejszenia zniekształceń napięcia. Obowiązkiem klienta jest zatem zapewnienie, że istniejące zakłócenia napięcia w jego sieci zostaną zredukowane do poziomu zgodnego z normą.

## pasywne systemy filtracji wyższych harmonicznych

W celu zredukowania wyższych harmonicznych, zwanych potocznie harmonicznymi, do akceptowalnego poziomu, w praktyce stosowane są różne rodzaje filtrów wyższych harmonicznych, które generalnie dzielą się na systemy aktywne i pasywne.

W przypadku klasycznych filtrów pasywnych dla połączenia szeregowego kondensatora i elementu indukcyjnego ich wartości są wybierane w taki sposób, aby wynikowa częstotliwość rezonansowa powstałego szeregowego obwodu rezonansowego odpowiadała filtrowanej wyższej harmonicznej. W ten spo-



Rys. 1. Budowa i działanie pasywnego filtra wyższych harmonicznych

sób powstaje ścieżka o niskiej impedancji dla prądów wyższych harmonicznych filtrowanej częstotliwości, które wpływają do filtra zamiast wracać do sieci. Wyższa harmoniczna jest praktycznie „zasysana”, dlatego też mówimy tutaj o efekcie zasysania przez filtr (rys. 1.).

Główną zaletą takiego filtra pasywnego jest to, że pochłania on zarówno wyższe harmoniczne z sieci wyższego rzędu, jak i z własnej sieci. W ten sposób nie tylko zredukowane są zakłócenia sieci spowodowane przez własne urządzenia generujące wyższe harmoniczne, ale także zwalczane są skutki już istniejących zakłóceń napięcia w punkcie przejścia z sieci zasilającej do własnej sieci. Ponadto, szerokopasmowy efekt

takich koncepcji filtrowania umożliwia również redukcję interharmonicznych i subharmonicznych (oscylacji o bardzo wysokich częstotliwościach). Dodatkowo, filtry pasywne sterowane napięciem są bardziej opłacalne w zakupie niż inne koncepcje filtrów ze względu na bardzo niskie straty mocy. Instalacja dodatkowych urządzeń pomiarowych, takich jak przekładniki prądowe, nie jest również konieczna w przypadku pasywnego systemu filtracji.

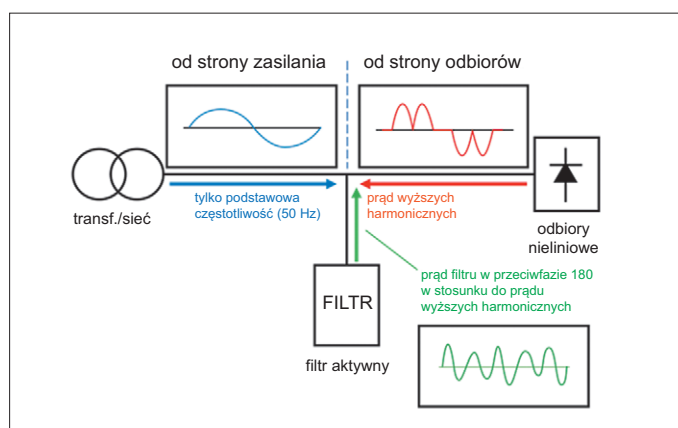
Wadą filtrów pasywnych jest ich nieuniknione wyłączenie w przypadku przeciążenia. Jeśli poziomy filtrowanych wyższych harmonicznych stają się zbyt wysokie, odpowiedni prąd harmoniczny w filtrze również wzrasta. Aby uniknąć uszkodzeń spo-

wodowanych przeciążeniem, filtr wyłącza się przy odpowiedniej wartości prądu. Chociaż zapobiega to jego uszkodzeniu, to wpływa także na wcześniej istniejący efekt filtracji, co nieuchronnie prowadzi do ponownego zwiększenia ilości zredukowanych wyższych harmonicznych. Kolejną wadą jest to, że konstrukcja filtra pasywnego często niesie za sobą znaczne nakłady czasu i pieniędzy. Klasyczna koncepcja filtra pasywnego musi być zawsze dostosowana do istniejących warunków sieciowych. W przypadku jego instalacji konieczne jest wcześniejsze zarejestrowanie i ocena dużej liczby zmierzonych wartości i parametrów sieciowych w celu zaprojektowania indywidualnego systemu. Ta procedura, której nie da się uniknąć w przypadku klasycznych systemów filtrów pasywnych, zapobiega natychmiastowej dezaktywacji filtra po jego włączeniu, jeśli został on nieprawidłowo zaprojektowany, dla prądu harmonicznego o zbyt małej wartości.

## aktywne, sterowane prądem, systemy filtracji wyższych harmonicznych

Aktywne, sterowane prądem, systemy filtracji oferują szereg korzyści, których nie mogą osiągnąć filtry pasywne, ale z drugiej strony, wykazują również pewne niekorzystne aspekty. Podstawową zasadą filtra aktywnego sterowanego prądem jest to, że analizuje on prąd harmoniczny (w zależności od rzędu) doprowadzany przez obciążenie i wytwarza prąd kompensacyjny, który jest przeciwny pod względem fazowym i który następnie eliminuje prąd harmoniczny. Prąd harmoniczny przepływa więc tylko pomiędzy filtrem a obciążeniem, ale nie w kierunku sieci (**rys. 2**).

Ponieważ sam filtr nie pochłania prądów przy tej zasadzie, lecz działa jako źródło prądu, problem wyłączenia w przypadku przeciążenia nie występuje w filarach aktywnych, tak jak w pasywnych systemach filtracji. Filtr aktywny sterowany prądem może za-



Rys. 2. Budowa i działanie aktywnego filtra wyższych harmonicznych

siłać tylko ograniczony prąd kompensacyjny zgodnie ze swoimi parametrami mocy. Jeśli jednak ta wartość istniejącego prądu harmonicznego zostanie przekroczona, filtr nie zostanie wyłączony. Jedynie sam efekt filtracji zostanie zredukowany w odniesieniu do zniekształceń.

Ze względu na zasadę regulowanego źródła prądu, straty filtra aktywnego sterowanego prądem są, w zależności od budowy, do trzech lub

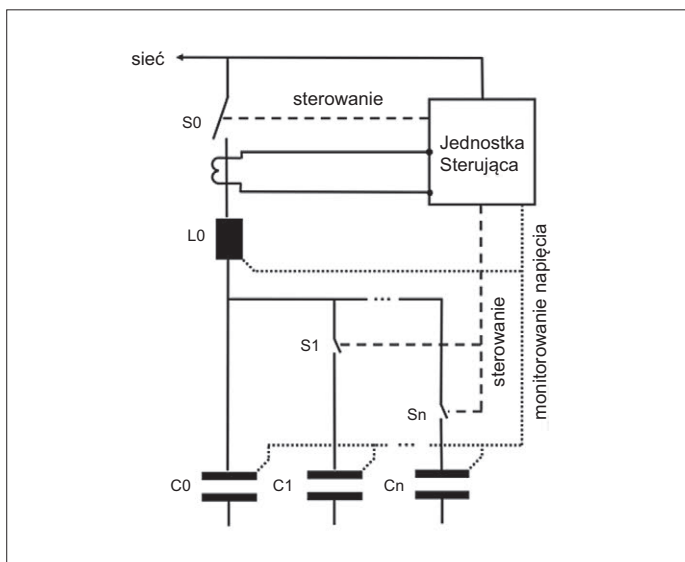
czterech razy wyższe w porównaniu z filtrem pasywnym. Odbija się to negatywnie na kosztach eksploatacji i okresie użytkowania. Nawet przy filtrowaniu bardzo wysokich częstotliwości istnieją techniczne ograniczenia aktywnego systemu filtracji sterowanego prądem. W zależności od producenta filtracja może zachodzić tylko do maksymalnie 53. rzędu.

Z drugiej strony, aktywny system filtracji sterowany prądem może za-

reklama



**Rys. 3.** System filtracji SOFIA® w różnych wersjach. Od lewej do prawej: SOFIA® jako system szaf sterowniczych/SOFIA®-HV do zastosowań wysokonapięciowych/SOFIA®-mod jako system modułowy do łatwej integracji z szafami sterowniczymi



**Rys. 4.** Zasada inteligentnej regulacji impedancji: W zależności od poziomu wyższych harmonicznych, stopnie kondensatorów są podłączane lub odłączane szeregowo do elementu indukcyjnego LO poprzez jednostkę sterującą. Zmienia to wynikową częstotliwość rezonansową lub częstotliwość dostrojenia danego szeregowego obwodu rezonansowego i odpowiednio jego impedancję

punktować tym, że posiada możliwość zaprogramowania na dużą liczbę różnych częstotliwości i tym samym rzędów wyższych harmonicznych. Do filtrowania najbardziej wyraźnych wyższych harmonicznych rzędu 5, 7 i 11, zastosowanie filtrów pasywnych wymaga użycia trzech obwodów lub modułów filtrujących, z których każdy indywidualnie dostrojony jest do częstotliwości 250 Hz, 350 Hz i 550 Hz. Natomiast filtr aktywny sterowany prądem jest zaprogramowany do dostarczania prądów kompensacyjnych dla trzech filtrowa-

nych częstotliwości i dlatego wymaga zakupu tylko jednego zamiast trzech modułów filtrujących.

Jeżeli zredukowane zostaną nie tylko wyższe harmoniczne generowane we własnej sieci i ich następstwa w sieci wyższego rzędu, ale także istniejące tam już poziomy zakłóceń, nie jest już możliwe zastosowanie filtra aktywnego sterowanego prądem. Jak już wyjaśniono, tylko prądy harmoniczne po stronie obciążenia mogą być filtrowane poprzez zasilanie przeciwnym prądem kompensacyjnym, więc nie jest możliwe oddzia-

ływanie na poziom wyższych harmonicznych po stronie sieci. Ogólnie rzecz biorąc, najważniejsze charakterystyki metod filtracji pasywnej i aktywnej można porównać w tabeli 1.

W zależności od istniejącej topologii sieci, połączenie filtrów aktywnych i pasywnych (tzw. filtrów hybrydowych) w systemie szafkowym może być odpowiednim rozwiązaniem do filtrowania zakłóceń o niskiej częstotliwości i wysokiej częstotliwości napięcia, które są związane z obciążeniem i pochodzą z sieci wyższego rzędu (nadrzędny poziom sieci).

### filtr pasywny sterowany napięciem z inteligentną regulacją impedancji

Jeśli wziąć pod uwagę poprzednie metody filtrowania wraz z ich mocnymi i słabymi stronami, to rozważania te sugerują poszukiwanie możliwości technicznych w celu stworzenia systemu filtracji, który łączy w sobie mocne strony poszczególnych systemów:

- niskie straty mocy,
- brak wyłączenia w przypadku przeciążenia,
- filtrowanie po stronie sieci i obciążenia,
- filtrowanie wyższych częstotliwości (powyżej 53 rzędu harmonicznych),
- filtrowanie wielu częstotliwości za pomocą jednego modułu filtrującego.

Ponadto pożądana byłaby możliwość zaprojektowania i uruchomienia nowego systemu filtracji przy jak najmniejszych nakładach. Tutaj zarówno pasywny, jak i aktywny system sterowany prądem mają swoje słabe strony. W przypadku systemu pasywnego opisane nakłady są konieczne, aby dostosować go indywidualnie do istniejących warunków sieci, natomiast filtr aktywny sterowany prądem wymaga oprócz zaprogramowania, dodatkowej instalacji przekładników prądowych, w zależności od wymaganej mocy filtra. Zasada inteligentnej regulacji impe-

dancji, stosowana np. w opatentowanym systemie filtracyjnym SOFIA® (*Spannungsführtes Oberschwingungs-Filter mit Intelligenter Anpassung* – sterowany napięciem filtr wyższych harmonicznych z inteligentnym dopasowaniem impedancji) firmy Condensator Dominit GmbH, oferuje odpowiednie podejście do realizacji opisanych wymagań w praktyce (rys. 3).

Zasadniczo ta koncepcja filtra opiera się na klasycznym pasywnym filtrze wyższych harmonicznych z szeregowym połączeniem kondensatora i elementu indukcyjnego, przy czym istnieje stała zdefiniowana częstotliwość dostrojenia, przy której filtr ma najniższą impedancję, a tym samym największy efekt pochłaniania oddziałujący na filtrowaną wyższą harmoniczną. W przypadku inteligentnej regulacji impedancji, ta podstawa techniczna jest teraz rozszerzana w taki sposób, że wcześniej ustalona, ze względu na konstelację składową, stała częstotliwość dostrojenia może być przełączana poprzez zmianę wartości kondensatora połączonego szeregowo z elementem indukcyjnym, przy czym częstotliwość dostrojenia zmienia się zgodnie ze znaną zależnością (rys. 4).

W przypadku systemu filtracyjnego SOFIA® dostępne są w tym celu łącznie trzy kondensatory o różnych wartościach, które można włączać i wyłączać, umożliwiając w ten sposób łącznie 4 różne częstotliwości dostrojenia.

Podczas pracy filtra następuje przełączenie pomiędzy nimi, aby utrzymać niemal stały przepływ filtra w szerokim zakresie. Jeśli na przykład poziom filtrowanej harmonicznej wzrasta, następuje automatyczne przełączenie na poziom z niższą częstotliwością dostrojenia (rys. 5).

I odwrotnie, częstotliwość dostrojenia jest przełączana z powrotem na wyższy poziom, gdy poziom wyższych harmonicznych spada. Celem jest, aby system filtracyjny zawsze pobierał swój prąd znamionowy w mniejszym lub większym stop-

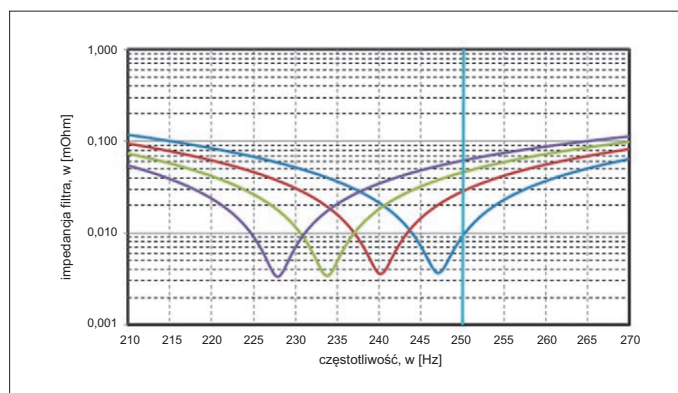
niu. Bez względu na warunki sieci, prąd znamionowy filtra „zakupionego” przez klienta jest rzeczywiście dostarczany, niezależnie od punktu pracy. Pod tym względem istnieje również porównywalność z systemami aktywnymi. Jednakże nie tylko zmiany w poziomach wyższych harmonicznych mogą być brane pod uwagę przy przełączaniu poziomów, ale również zmiany w częstotliwości sieci i zależne od wieku i temperatury zmiany wartości pojemności zainstalowanych kondensatorów, które mimo wszystko zmieniają częstotliwość dostrojenia.

Ponieważ filtr automatycznie dostosowuje się do istniejących warunków dzięki automatycznej regulacji, do zaprojektowania i uruchomienia nie jest wymagana wcześniejsza dogłębna znajomość parametrów sieciowych w porównaniu z filtrem pasywnym o stałej częstotliwości dostrojenia. Zasadniczo tylko poziom napięcia i częstotliwość sieci są wymagane, aby wybrać odpowiedni filtr z asortymentu modeli. Oprócz filtrowania

poszczególnych rzędów harmonicznych 5., 7. i 11., możliwe jest również uruchomienie wersji tłumiącej, przy której możliwa jest szerokopasmowa redukcja składowych wyższych harmonicznych o wyższej częstotliwości, takich jak te spowodowane częstotliwościami taktowania lub rezonansami sieci. Tabela 2 zawiera podsumowanie wymagań, jakie powinien spełniać system filtracyjny z połączeniem zalet filtra pasywnego i aktywnego w stosunku do zasady filtra pasywnego z inteligentną regulacją impedancji.

### wnioski i perspektywy

Obciążenie sieci elektrycznych urządzeniami nieliniowymi stale rośnie, co oznacza, że stosowanie odpowiednich środków zaradczych pozostanie w przyszłości priorytetowym elementem poprawy jakości napięcia. Chociaż generowanie wyższych harmonicznych można już zmniejszyć poprzez zastosowanie odpowiednich urządzeń, na przykład po-



**Rys. 5.** Krzywa impedancji systemu filtracji SOFIA® dla wyższej harmonicznej 5. rzędu (250 Hz) z 4 stopniami strojenia. W zależności od połączenia stopni kondensatorów, krzywa impedancji i tym samym minima impedancji przesuwają się do niższych lub wyższych częstotliwości

zez zastosowanie prostowników o wyższych wartościach impulsów, ich całkowite uniknięcie jest niemożliwe. Zastosowanie aktywnych i pasywnych filtrów wyższych harmonicznych jest zatem często niezbędne w celu zmniejszenia poziomów wyższych harmonicznych we własnej sieci do dopuszczalnego poziomu lub w celu zmniejszenia zakłóceń w sieci z własnych nieliniowych lub niestabilnych odbiorów i urządzeń. Wybór odpowiedniej koncepcji filtra jest nie-

tylko związany z redukcją zawartości wyższych harmonicznych, ale również musi być rozważany w kontekście czynników ekonomicznych. Wysokie straty użytego filtra prowadzą nie tylko do odpowiednio wysokich kosztów pobieranej energii, ale również odpowiednie systemy chłodzenia mogą dodatkowo zwiększyć koszty eksploatacji. Projekt systemu filtrującego może już powodować znaczne nakłady czasu i kosztów przy planowaniu kompletnej, nowej instalacji. Jeśli rosnące pogorszenie jakości napięcia wymaga późniejszej instalacji systemu filtracji, często pojawiają się problemy związane z miejscem.

Wraz z przedstawieniem zasady działania pasywnego filtra wyższych harmonicznych z inteligentną regulacją impedancji, wskazano możliwość połączenia wielu zalet klasycznych koncepcji filtrów pasywnych i aktywnych bez brania pod uwagę ich słabych stron, takich jak zwiększone straty mocy lub skomplikowana czy też wymagająca większych nakładów konstrukcja.

Charakterystyka porównawcza	Filtr pasywny	Filtr aktywny sterowany prądem
Straty	Niskie	Wysokie
Przełączalność	Wyłączenie przy przeciążeniu	Nieprzełączalny (Bez wyłączenia)
Efekt filtrowania po stronie sieci i obciążenia	Tak	Tylko po stronie obciążenia
Filtrowanie bardzo wysokich częstotliwości	Tak	Maksymalnie do 53 rzędu harmonicznych
Filtrowanie wielu częstotliwości/rzędów	Jeden moduł filtrujący wymagany dla każdej częstotliwości/rzędu	Jeden moduł może być używany dla kilku częstotliwości/rzędów w tym samym czasie

**Tab. 1.** Charakterystyka wydajności pasywnych i aktywnych systemów filtracji wyższych harmonicznych

Wymagania	Filtr pasywny z inteligentną regulacją impedancji
Niskie straty mocy	Tak
Brak wyłączenia w przypadku przeciążenia	Automatyczna zmiana częstotliwości dostrojenia, jeśli prąd filtrujący jest zbyt wysoki
Filtrowanie po stronie sieci i obciążenia	Tak
Filtrowanie wyższych częstotliwości	Tak, przez wersję tłumiącą
Filtrowanie wielu częstotliwości za pomocą jednego modułu filtrującego	Efekt szerokopasmowy filtra redukuje również sąsiednie wysokie harmoniczne, jednakże poszczególne moduły filtrujące są niezbędne do kompleksowej redukcji pojedynczych rzędów (oddzielne moduły dla 5, 7 i 11 rzędu)
Prosta konstrukcja i instalacja systemu filtracji	<ul style="list-style-type: none"> <li>Nie jest wymagana szeroka wiedza na temat parametrów sieciowych</li> <li>Nie jest wymagane programowanie</li> <li>Nie jest wymagana instalacja przekładników prądowych</li> </ul>

**Tab. 2.** Charakterystyka pasywnego systemu filtracji wyższych harmonicznych z inteligentnym dopasowaniem impedancji

reklama



**EST Energy Sp. z o.o. Sp. k.**  
05-400 Otwock  
ul. Żeromskiego 114  
tel. 22 779 09 00  
faks 22 779 09 09  
estenergy@estenergy.pl  
www.estenergy.pl