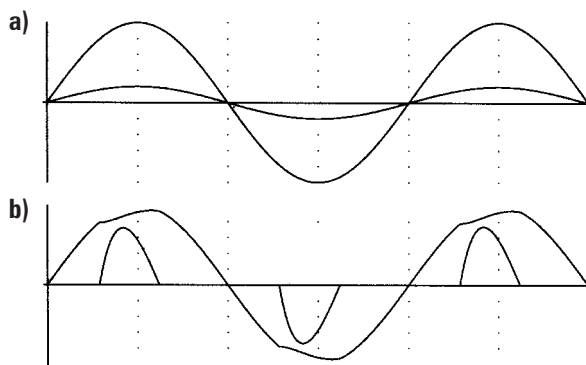


# Filtry aktywne – zastosowanie do podstacji trakcyjnych

**Jakość energii elektrycznej jest zagadnieniem, któremu poświęca się coraz więcej uwagi zarówno w dyskusjach i analizach technicznych, jak i w uregulowaniach prawnych. Jest ona jednym z czynników decydujących o niezawodności pracy urządzeń i jest definiowana zarówno jako ciągłość zasilania (długie i krótkie przerwy), jak i zbiór parametrów charakteryzujących napięcie zasilające (np. amplituda, częstotliwość, symetria faz, zawartość harmoniczných). Jakość energii elektrycznej w coraz większym stopniu decyduje o niezawodności działania urządzeń, gdyż wraz z wprowadzaniem do eksploatacji coraz większej liczby urządzeń elektronicznych – co wydaje się procesem nieuchronnym zarówno z technicznego, jak i ekonomicznego punktu widzenia – wzrasta liczba odbiorników czułych na zakłócenia napięcia zasilającego.**

Problemy z utrzymaniem odpowiedniego poziomu jakości energii elektrycznej wynikają z faktu, że coraz większy procent wytwarzanej energii podlega przetworzeniu dla dostosowania parametrów zasilania do potrzeb odbiorników – są to np. stacje prostownikowe, tyrystorowe przekształtniki



Rys. 1. Przebiegi napięcia i prądu  
a) obciążenie rezystancyjne, b) obciążenie prostownikiem z filtrem pojemnościowym

napędowe, regulatory mocy itp. Wymienione urządzenia stanowią dla sieci zasilającej obciążenia o charakterze nieliniowym, pobierając odkształcony – w stosunku do przebiegu sinusoidalnego – prąd i powodując powstawanie odkształceń napięcia w sieci.

Na rysunku 1 przedstawiono dla porównania przebiegi napięć i prądów w przypadku obciążenia liniowego (rezystancyjnego) i nieliniowego (prostownik z filtrem pojemnościowym). Dla uproszczenia przedstawiono przebiegi w układzie jednofazowym, jednak zjawiska te dotyczą wszystkich sieci niskich i średnich napięć.

Na przedstawionych przebiegach jest widoczne, że cała energia niezbędna dla pracy nieliniowego odbiornika (np. prostownika z filtrem C) jest pobierana z sieci impulsowo, w krótkim okresie. Powoduje to wzrost mocy pozornej urządzenia i jednocześnie wzrost strat w linii przesyłowej, stwarzając problemy z doborem kabli i transformatorów. Czasami efektem pracy odbiornika nieliniowego są zakłócenia elektromagnetyczne oraz zjawiska rezonansowe. Wpływają one niekorzystnie na pracę systemów zabezpieczeń, automatyki i sterowania, łączności oraz innych odbiorników.

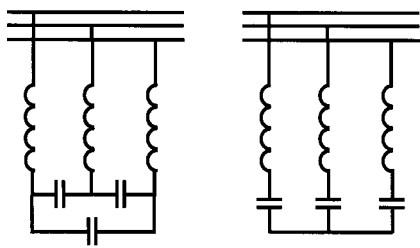
Odształcenia prądu i napięcia w sieci zasilającej, spowodowane przez dołączone do tej sieci odbiorniki nieliniowe, są określane przez tzw. współczynnik zawartości harmoniczných THD (Total Harmonic Distortion). W krajach zachodnich – a ostatnio również i w Polsce – dopuszczalne wartości tego współczynnika są podawane w różnego rodzaju zaleceniach, normach i rozporządzeniach (np. norma EN 50160, Rozporządzenie Ministra Gospodarki Dz.U. nr 135 z 21.10.1998 r., poz. 881). Określona w rozporządzeniu dopuszczalna wartość THD (<1,5%) jest wyjątkowo rygorystyczna i ostrzejsza od poziomu podanego w wymienionej normie (<8%). Wraz z wprowadzeniem limitów THD należy liczyć się w niedalekiej przyszłości – tak jak jest to już obecnie w krajach zachodnich – z koniecznością karnych opłat za wprowadzanie zakłóceń do sieci zasilającej.

Metody ograniczania zawartości harmoniczných w sieciach można podzielić na dwie grupy: pierwsza to stosowanie linearyzacji napięciowo-prądowych charakterystyk odbiorników, a druga – ograniczanie harmoniczných poprzez filtrację. Linearyzacja, polegająca na stosowaniu w przekształtnikach energoelektronicznych układów PFC (Power Factor Correction) jest obecnie stosowana w układach małej i rzadko średniej mocy. Niezależnie od mocy odbiorników można stosować układy filtrujące: bierne (LC), aktywne lub hybrydowe.

## Filtry bierne (LC)

Redukcja wyższych harmoniczných prądu może być realizowana poprzez dołączenie do sieci zasilającej biernych obwodów LC, których częstotliwości rezonansowe są dobrane do częstotliwości harmoniczných występujących w przebiegu sieciowym. Przykładowe konfiguracje rezonansowych filtrów LC przedstawiono na rysunku 2.

W przypadku konieczności redukcji kilku harmoniczných zamiast powielać obwody LC (filtry wielogłęziowe) stosuje się filtry kombinowane, w których dzięki odpowiednio połą-



Rys. 2. Przykładowe konfiguracje rezonansowych filtrów LC

czonym dławikom i kondensatorom uzyskuje się możliwość stosowania jednego typu dławików, co znacznie upraszcza konstrukcję.

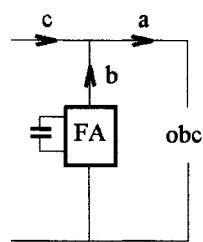
Na skuteczność filtrów rezonansowych znaczny wpływ ma niestety impedancja linii zasilającej oraz ograniczona dobroć dławików. Zmusza to – dla uzyskania właściwej częstotliwości rezonansowej – do odpowiedniego zwiększenia pojemności kondensatorów, co może prowadzić do istotnego, dodatkowego obciążenia sieci prądem pojemnościowym.

### Energetyczne filtry aktywne

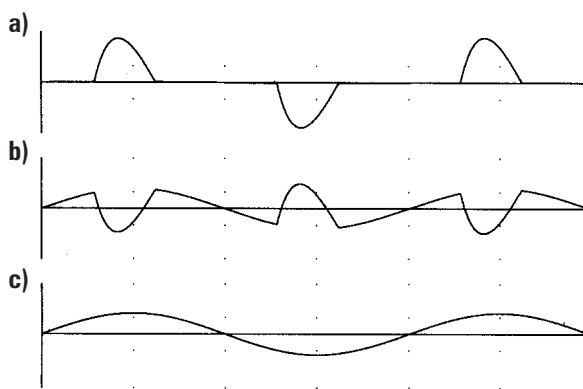
Jedną z bardzo skutecznych metod kompensacji zakłóceń w sieci zasilającej jest stosowanie tzw. równoległych (prądowych) filtrów aktywnych. Filtr aktywny jest urządzeniem (rys. 3), które pobierając energię w czasie trwania półokresu napięcia sieciowego – wtedy, gdy nie pobiera jej odbiornik – oddaje ją w chwili impulsowego poboru przez obciążenie. Aktywnym elementem filtru jest odpowiednio sterowany falownik tranzystorowy (prądowy lub napięciowy), który umożliwia gromadzenie energii w baterii kondensatorów, a następnie przekazanie jej do sieci w chwili impulsowego poboru prądu przez odbiornik. Filtr aktywny może skutecznie kompensować zarówno chwilowe zakłócenia, jak i odkształcenia spowodowane pobieraniem przez odbiorniki mocy biernej. Efektem działania filtru aktywnego jest radykalna poprawa przebiegu prądu w sieci zasilającej, co obniża straty energii w sieci oraz w odbiornikach zasilanych z tej sieci. Przykładowe przebiegi ilustrujące pracę równoległego filtru aktywnego są przedstawione na rysunku 4.

Suma prądu pobieranego przez odbiornik *a* i prądu pobieranego lub oddawanego przez filtr aktywny *b* stanowi prąd pobierany z sieci zasilającej *c*, który – przy odpowiednim sterowaniu filtru – powinien mieć przebieg sinusoidalny.

Istnieją jeszcze filtry aktywne szeregowe (napięciowe), w których szeregowo z napięciem sieci dołącza się dodatkowe aktywne źródło napięcia, sterowane tak, aby wypadkowe napięcie miało przebieg sinusoidalny. Stosowanie ich wymaga wykonania przerwy w sieci zasilającej i są one stosowane znacznie rzadziej niż filtry równoległe.



Rys. 3. Schemat działania równoległego filtru aktywnego



Rys. 4. Przebiegi prądu

a) pobieranego przez odbiornik nieliniowy, b) filtru aktywnego, c) pobieranego z sieci zasilającej

### Filtry hybrydowe

Hybrydowe systemy filtracyjne stanowią połączenie filtru aktywnego z biernym filtrem rezonansowym LC. Istnieje wiele konfiguracji układowych filtrów hybrydowych, w których współpracują bierne obwody LC z równoległymi lub szeregowymi filtrami aktywnymi. Zastosowanie obwodów LC pozwala na zmniejszenie napięcia występującego na zaciskach lub prądu kompensowanego przez filtr. Dzięki tym właściwościom systemy hybrydowe są predystynowane do stosowania w sieciach średnich napięć, jak również w przypadku odbiorników dużej mocy.

Mimo że systemy szeregowo mają lepsze parametry dynamiczne, lepszymi właściwościami filtracyjnymi charakteryzują się systemy równoległe. Są one korzystniejsze również dzięki temu, że nie wymagają wykonania przerwy w sieci zasilającej, lecz ograniczają się do równoległego (względem obciążenia) dołączenia obwodów filtracyjnych.

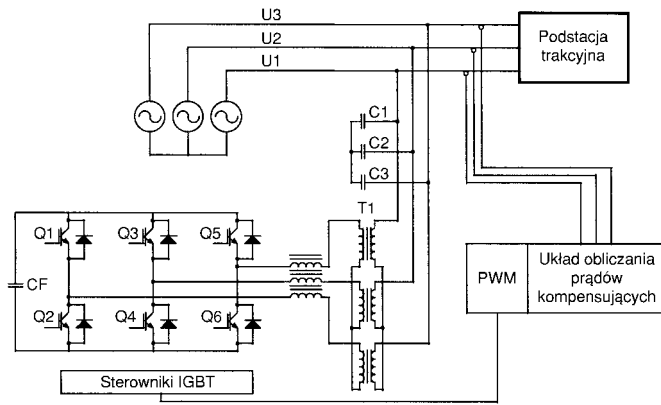
Poniżej zostaną omówione trzy konfiguracje układowe systemów hybrydowych, które mogą być stosowane w podstacjach trakcyjnych dla kompensacji mocy biernej i mocy odkształceń.

### Zastosowanie filtrów aktywnych w podstacjach trakcyjnych

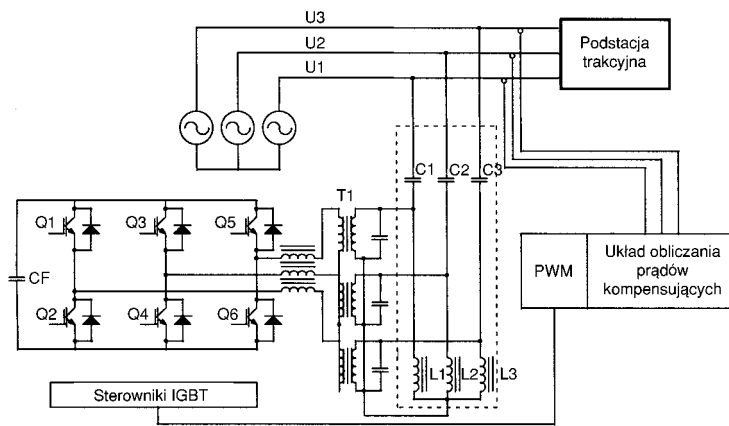
Podstacja trakcyjna z punktu widzenia sieci energetycznej stanowi odbiornik o charakterze nieliniowym, pobierający impulsowy prąd o amplitudzie zależnej od chwilowego obciążenia zasilanego odcinka oraz od struktury układu prostowniczego. Zostaną przedstawione trzy układowe warianty systemów filtracyjnych, stosowanie których – już w niedalekiej przyszłości – może okazać się niezbędne dla obniżania zawartości harmonicznych, przekazywanych przez urządzenia podstacji do sieci energetycznej.

We wszystkich trzech proponowanych wariantach prąd pobierany przez urządzenia podstacji trakcyjnej jest analizowany przez układ mikroprocesorowy (DSP), który oblicza potrzebną, chwilową wartość prądu kompensującego. Poprzez układ modulacji szerokości impulsów (PWM) odpowiednie sygnały są doprowadzane do sterowników IGBT, które sterują pracą falownika (tranzystory Q1 ÷ Q6). Energia oddawana lub pobierana przez falownik pochodzi z baterii

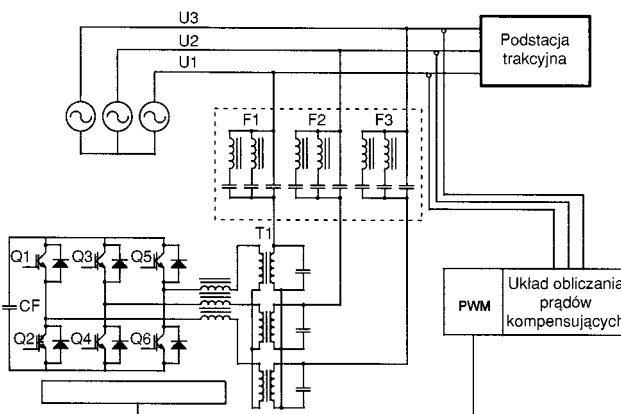
kondensatorów CF. Wysoka częstotliwość modulacji (kilkanaście kHz) pozwala na precyzyjne kształtowanie prądu wyjściowego z dynamiką umożliwiającą kompensację pełnego spektrum harmoniczných. Układ falownika jest wyposażony w dodatkowy wyjściowy filtr LC typu gamma, usuwający niepożądane produkty modulacji. Każdy z proponowanych układów jest wyposażony w transformator dopasowujący, umożliwiający współpracę układu z siecią SN o dowolnej topologii.



Rys. 5. Równoległy filtr aktywny VSI (sterowane źródło prądów kompensujących)



Rys. 6. Równoległy filtr hybrydowy z pojedynczą gałęzią LC



Rys. 7. Równoległy filtr hybrydowy z wielokrotną gałęzią LC

Przedstawiony na rysunku 5 równoległy filtr aktywny VSI (sterowane źródło prądów kompensujących) ma największe możliwości kompensacji harmoniczných, umożliwiając kompensację wszystkich harmoniczných w szerokim zakresie impedancji linii zasilającej. Układ ma największą dynamikę i pracuje optymalnie przy zmieniających się wartościach i kształtach prądów pobieranych przez obciążenie. Dodatkowo automatycznie jest kompensowana moc bierna pobierana przez odbiornik (zarówno pojemnościowa, jak i indukcyjna). Jediną wadą jest wysoki koszt, moc falownika filtru wynosi około 30% pozornej mocy podstacji trakcyjnej.

Przedstawiony na rysunku 6 równoległy filtr hybrydowy z pojedynczą gałęzią LC ma mniejsze możliwości eliminacji harmoniczných w linii SN, jednakże przy dość prostej budowie i małej mocy przekształtnika stanowi alternatywę xxx dla klasycznego układu przedstawionego na rysunku 5, w przypadku gdy widmo harmoniczných odbiornika jest dokładnie określone i nie zmienia się w czasie. Filtr niestety nie umożliwia nadążnej kompensacji mocy przesunięcia.

Przedstawiony na rysunku 7 równoległy filtr hybrydowy z wielokrotną gałęzią LC pozwala na kompensację harmoniczných w układach o ich stałym rozkładzie. Układ charakteryzuje się najmniejszą mocą zainstalowaną przekształtnika. Poważną wadą układu są tendencje do niekontrolowanych oscylacji przy mocno odkształconym napięciu linii SN oraz duża moc bierna generowana do sieci. Wymaga to zainstalowania dodatkowych układów zabezpieczających oraz kompensujących.

#### Literatura

- [1] Strzelecki R.: *Zastosowanie teorii mocy chwilowej do sterowania energetycznych filtrów aktywnych*. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej. Tom III, zeszyt 1/1997, s. 65–74.
- [2] Strzelecki R., Supronowicz H.: *Kompensacja wyższych harmoniczných w układzie hybrydowym złożonym z filtru biernego i szeregowego filtru aktywnego*. Przegląd Elektrotechniczny 6/1994, s. 134–138.
- [3] Supronowicz H.: *Metody zmniejszania wyższych harmoniczných w prądach pobieranych przez odbiorniki nieliniowe w sieci zasilającej*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 1995, s. 111.
- [4] Supronowicz H., Plątek T.: *Współczynnik mocy prostowników diodowych z filtrem pojemnościowym*. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej. Tom II, zeszyt 1/1995, s. 31–36.

Autorzy  
Marek Niewiadomski i Andrzej Baranecki  
MEDCOM Sp. z o.o. Warszawa

Referat wygłoszony w ramach Gdańskich Dni Elektryki na seminarium zorganizowanym przez Sekcję Trakcji Elektrycznej. Seminarium zorganizował i artykuł do druku przygotował przewodniczący Sekcji Trakcji Elektrycznej Oddziału SEP – Andrzej Liszewski.