

KATEDRA ENERGOELEKTRONIKI I AUTOMATYKI SYSTEMÓW PRZETWARZANIA ENERGII

WYDZIAŁ ELEKTROTECHNIKI, AUTOMATYKI, INFORMATYKI I INŻYNIERII BIOMEDYCZNEJ

Autoreferat rozprawy doktorskiej

Mgr inż. Chamberlin Stéphane Azebaze Mboving

Methods for Reducing Voltage and Current Distortion Caused by Power Electronic Converters in Power Systems

Metody redukcji odkształcenia napięć i prądów powodowanych przez przekształtniki energoelektroniczne w sieciach elektroenergetycznych

> Promotor: prof. dr hab. inż. Zbigniew Hanzelka

Promotor pomocniczy: dr inż. Ryszard Klempka

KRAKÓW 2020 r.

1. Wstęp

Energia elektryczna jest towarem i dbanie o jej jakość jest niezbędne. Zaburzenia jakości dostawy energii elektrycznej są liczne i różnorodne (spadki i wzrosty napięcia, wahania, odkształcenie itp.), co oznacza, że stosuje się wiele metod, żeby redukować ich poziom w systemie elektroenergetycznym. Niniejsza praca koncentruje się na łagodzeniu zaburzeń, takich jak asymetria, harmoniczne i kompensacji moc bierna podstawowej harmoniczne, stosując do tego celu filtry pasywne, aktywne i hybrydowe.

Celem pracy jest zaprojektowanie hybrydowego filtru aktywnego, który jest połączeniem filtru aktywnego z filtrem pasywnym. W celu skutecznego zaprojektowania takiego filtru, w niniejszej pracy przedstawiono szczegółową analizę (symulacja i badania laboratoryjne) różnych struktur filtrów aktywnych i pasywnych.

Rozpatrywane są następujące struktury filtru pasywnego: równoległy (prosty), szeregowy, podwójnie nastrojony, szerokopasmowe (pierwszego, drugiego i trzeciego rzędu oraz typu C), a także hybrydowy filtr pasywny. Każdy z nich jest indywidualnie analizowany pod kątem charakterystyki impedancji w funkcji częstotliwości oraz wpływu zjawiska odstrojenia i rezystancji tłumienia na ich efektywność. Porównano niektóre struktury filtru pasywnego (grupa dwóch filtrów prostych & filtr podwójnie nastrojony, szeregowy filtr pasywny i hybrydowy filtr pasywny), a także metody podziału całkowitej mocy biernej w grupie filtrów. Wyniki symulacyjne zostały potwierdzone badaniami w laboratorium następujących struktur filtru pasywnego: filtr prosty, grupa dwóch filtrów prostych, filtry pierwszego i drugiego rzędu.

W niniejszej pracy analizowano równoległy filtr aktywny - trójfazowy, trójprzewodowy. Celem jego stosowania jest kompensacja asymetrii i odkształcenia napięcia oraz mocy biernej podstawowej harmonicznej przy użyciu oryginalnego algorytmu sterowania - opartego na teorii *p-q* - zaproponowanego przez autora. W pracy uwzględniono badania wpływu dławików: włączonego między PWP a sieć zasilającą, wejściowego prostownika, wejściowego równoległego filtru aktywnego oraz kondensatora strony DC na efektywność działania filtru. Eksperymenty laboratoryjne równoległego filtru aktywnego - potwierdzające wyniki badań symulacyjnych - zostały przeprowadzane z wykorzystaniem struktury czteroprzewodowej z dzieloną pojemnością po stronie DC.

Po szczegółowych badaniach filtru pasywnego i aktywnego, w następnej kolejności zostały przeanalizowane struktury hybrydowe filtru aktywnego: model równoległego filtru aktywnego (trójfazowy, trzygałęziowy) połączonego szeregowo z filtrem prostym (badania symulacyjne) i model równoległego filtru aktywnego (czteroprzewodowy z dzieloną pojemnością od strony DC) połączony równolegle z grupą dwóch filtrów prostych (badania laboratoryjne). Autor zaproponował oryginalny algorytm sterowania oparty na teorii mocy *p-q* dla tej struktury.

2. Teza, cel i zakres rozprawy

Wzrost liczby i mocy jednostkowej obciążeń nieliniowych i źródeł energii elektrycznej wymusił rozwój i stosowanie różnych rozwiązań technicznych mających na celu obniżenie odkształceń prądów i napięć. Oprócz metod pasywnych coraz większą popularność zyskują systemy filtracji aktywnej i kompensacji mocy biernej. Jedną z ich podkreślanych wad jest nadal wysoka cena, szczególnie w przypadku systemów dużej mocy przeznaczonych do użytku w sieciach średniego lub wysokiego napięcia. Możliwe jest jednak wykorzystywanie zalet obu rozwiązań: pasywnego i aktywnego. Takie systemy są strukturami hybrydowymi, które umożliwiają uzyskanie żądanego efektu filtracji i kompensacji mocy biernej przy umiarkowanych kosztach.

Do zbudowania skutecznego hybrydowego systemu filtracji niezbędna jest szeroka wiedza o charakterystyce częstotliwościowej filtrów *LC* oraz o algorytmach sterowania filtrów aktywnych. Celem rozprawy było zdobycie i zaprezentowanie takiej wiedzy poprzez przeanalizowanie bardzo dużej liczby różnych przypadków. Pozwoliło to na sformułowanie uogólniających wniosków w formie zbioru zasad przydatnych podczas projektowania takich systemów. Główną tezą, którą autor starał się udowodnić w niniejszej rozprawie, jest fakt, że dysponując taką wiedzą, można wykorzystać zalety obu rodzajów elementów: pasywnych i aktywnych, oraz uniknąć błędów w projektowaniu.

Bardzo szczegółowo przeanalizowano parametry systemów pasywnej filtracji harmonicznych oraz kompensacji mocy biernej. Zbadano czułość i efektywność ich działania w odpowiedzi na zmianę wartości ich elementów oraz przeanalizowano wpływ sieci zasilającej i parametrów obciążenia poddanego filtracji/kompensacji. Rozważania teoretyczne i dotyczące symulacji potwierdzono w drodze prób laboratoryjnych.

W kolejnych częściach rozprawy sprawdzono podczas badań symulacyjnych zaprojektowany model elektronicznego przekształtnika z energetycznym filtrem aktywnym wraz z jego systemem sterowania. Jak w przypadku filtrów pasywnych, przeanalizowano wpływ różnych czynników na efektywność filtra aktywnego. Wybrane aspekty rozważań teoretycznych uzupełniono o badania fizycznego modelu w warunkach laboratoryjnych.

W końcowej części rozprawy połączono system pasywny i aktywny w formie bardzo rzadko rozważanej

struktury hybrydowej oraz potwierdzono zalety takiego rozwiązania w drodze symulacji.

3. Analiza symulacyjna

Badania symulacyjne przeprowadzono w środowisku MATLAB/SIMULINK [14].

3.1 Pasywne filtry harmonicznych (PHF)

Rozważane topologie pasywnych filtrów harmonicznych (passive harmonic filter, PHF) zbadano w symulowanym systemie elektroenergetycznym zaprezentowanym na Rys. 3.1(a).

Filtry są nastrojone na częstotliwość nieco mniejszą niż częstotliwość pierwszej charakterystycznej wyższej harmonicznej (po harmonicznej podstawowej) 6-pulsowego prostownika tyrystorowego, będącej 5. harmoniczną (4,85). W przypadku poszczególnych analizowanych topologii filtrów rezystancja kondensatorów jest zaniedbywana, rezystancja dławików jest obliczana na podstawie dobroci, kompensująca moc bierna (harmonicznej podstawowej) jest stała: $Q_f = -2172,5$ var (z wyjątkiem topologii filtra prostego) oraz kąt wysterowania prostownika jest stały. Wartości napięcia i prądu oraz charakterystyka na mostku tyrystorowym po stronie AC są rozważane w stanie ustalonym.



Figure 3.1 (a) Simulated power system, (b) investigated passive parallel harmonic filter topologies

3.1.1 Przykładowe badanie z wykorzystaniem topologii filtrów PHF

W tym rozdziale zbadano filtr prosty (dla jednej harmonicznej; patrz Rys. 3.1(b)), prezentując wpływ zjawiska odstrojenia na jego skuteczność. Wzory użyte do obliczenia jego parametrów przedstawiono w Tabeli 3.1.

Filtr prosty (oraz inne topologie filtrów) zbadano w dziedzinie częstotliwości na podstawie zależności impedancji od częstotliwości oraz w dziedzinie czasu po podłączeniu go do systemu elektroenergetycznego, jak pokazano na Rys. 3.1(a).



Tabela 3.1 Wzory do obliczania parametrów filtrów prostych



Figure 3.2 Impedance frequency characteristics of single-tuned filter for different values of tuning frequency order. The filter is tuned to the harmonic frequencies lower (a) and higher (b) than the frequency of 5th harmonic ($R_f = 0$)

Z powodu starzenia (co w większym stopniu dotyczy kondensatora [5]) lub warunków pracy itp. filtr prosty musi być nastrojony na częstotliwość nieco niższą niż częstotliwość najniższej wytwarzanej harmonicznej (ω_{re}); w rozważanym przykładzie jest to 5. harmoniczna. Spotyka się różne opinie wskazujące, o ile powinno się odstroić filtr [4]. Zgodnie z [10] wartość odstrojenia powinna mieścić się w przedziale od 3% do 15% poniżej częstotliwości eliminowanej harmonicznej. W tym rozdziale wartość odstrojenia dobrano w przedziale od 1% do 20% poniżej częstotliwości 5. harmonicznej.

Dla częstotliwości strojenia niższych (Rys. 3.2(a)) lub wyższych (Rys. 3.2(b)) niż $\omega_{re}(5)$ impedancja filtra 5. harmonicznej jest wysoka, co powoduje obniżenie skuteczności filtracji filtra. Gdy filtr jest odstrojony do częstotliwości wyższych niż $\omega_{re}(5)$, może wystąpić wzmocnienie filtrowanej harmonicznej (5.) z powodu zjawiska rezonansu równoległego między filtrem a indukcyjnością sieci.

Impedancja zastępcza filtra ma charakter pojemnościowy dla wszystkich częstotliwości harmonicznych (także podstawowej) niższych niż częstotliwość rezonansowa oraz charakter indukcyjny dla harmonicznych

wyższych niż składowa rezonansowa (5. rzędu na Rys. 3.2(a) i (b)).

Przebiegi prądu i napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP) (Rys. 3.1(a)) oraz ich widma zaprezentowano na Rys. 3.3. Po podłączeniu filtra można zaobserwować mały spadek głębokości załamań komutacyjnych (Rys. 3.3(a)). Przebiegi prądu sieci przed podłączeniem i po podłączeniu filtra przedstawiono na Rys. 3.3(c).

Wraz z obniżaniem się częstotliwości strojenia (od 5. do 4,1) wzrasta amplituda 5. harmonicznej napięcia i prądu w PWP (Rys. 3.3(b) i (d)) oraz amplituda wyższych harmonicznych (od 11. do 29.). Wzrasta także współczynnik zawartości harmonicznych (THD) prądu i napięcia w PWP.

Przy zmianie częstotliwości strojenia amplitudy harmonicznej podstawowej napięcia i prądu sieci są niemal stałe (Rys. 3.3(b) i (d)). Niemniej jednak po podłączeniu filtra znacznie zmalał prąd (z 15,86 A do 8,43 A) z powodu kompensacji składowej biernej.

Widmo prądu filtra przestawiono na Rys. 3.4(b), a jego przebieg na Rys. 3.4(a). Poziom filtrowanej harmonicznej (5.) płynącej przez filtr zależy od częstotliwości strojenia. Jej wartość jest wysoka dla częstotliwości strojenia bliskiej częstotliwości 5. harmonicznej (250 Hz). Filtr prosty jest w większym stopniu obciążony przez filtrowaną harmoniczną niż przez inne harmoniczne (Rys. 3.4(b)).

Skuteczność filtra prostego przedstawiono na Rys. 3.4(c) i (d). Filtr jest bardziej skuteczny, gdy jest nastrojony na częstotliwość niższą, ale bliską częstotliwości filtrowanej harmonicznej.



Figure 3.3 (a) grid voltage wavefoms with its spectrum (b), (c) grid current wavefoms with (d) its spectrum





Przebiegi napięcia i prądu na wejściu mostka tyrystorowego oraz ich widma zaprezentowano na Rys. 3.5.

Zależność impedancji systemu elektroenergetycznego od częstotliwości mierzonej od zacisków wejściowych mostka tyrystorowego przedstawiono na Rys. 3.6. Na powiększeniu tego rysunku górna część krzywej reprezentuje wyższą wartość impedancji (rezonans równoległy), a dolna — niższą wartość impedancji (rezonans szeregowy). Wraz ze wzrostem częstotliwości strojenia można zaobserwować przesuwanie się rezonansu równoległego i szeregowego od wyższej do niższej częstotliwości. Amplituda impedancji systemu elektroenergetycznego przy rezonansie równoległym maleje.



Figure 3.6 Characteristics of power system impedance versus frequency (module and phase) at the thyristor bridge input, ωL- input rectifier reactor reactance

3.1.2 Porównanie struktur filtrów PHF



Po szczegółowym zbadaniu topologii filtrów PHF niektóre z nich (patrz Rys. 3.7) porównano na podstawie określonego zbioru kryteriów: strat mocy w filtrze (ΔP_f), amplitudy 5. harmonicznej napięcia i prądu w PWP ($U_{S(5)}$, $IS_{(5)}$) oraz współczynnika THD napięcia i prądu w PWP (THD_{US}, THD_{IS}). Założono, że porównywane filtry mają taką samą moc bierną (Q_f = 2172,5 Var), dobroć dławika (q'= 85) oraz częstotliwość strojenia (n_{re} = 4,85) (zob. Tabela 3.2).

Rezystancja filtra pierwszego rzędu jest zaniedbywana, a w przypadku filtrów drugiego rzędu, trzeciego rzędu i typu C zakłada się, że mają one taką samą rezystancję tłumiącą (tj. 0,08 Ω , 1,25 Ω oraz 25 Ω , zob. Tabela 3.2). Filtr prosty oraz filtr pierwszego rzędu porównano z filtrem drugiego rzędu, trzeciego rzędu i typu C, gdy rezystancja tłumiąca tych ostatnich wzrasta (od 0,08 Ω do 25 Ω).



Tabela 3.2Założenia porównania

Figure 3.8 Comparison spectrums between the single-tuned, first-order, second-order, third-order filter and C-type filter: (a), (b) grid voltage and current 5th harmonic; (c), (d) grid voltage and current THD; (e) filter power losses

Ze wszystkimi filtrami szerokopasmowymi wiąże się problem wzmocnienia harmonicznych. W zależności od ich rezystancji tłumiącej problem ten można jednak ograniczyć. Z punktu widzenia ograniczania pojedynczej harmonicznej filtr prosty jest bardziej zalecany niż inne topologie, ponieważ cechuje się najniższą amplitudą 5. harmonicznej napięcia i prądu sieci (Rys. 3.8(a)(b)).

Przy mniejszych wartościach rezystancji tłumiącej (tj. 0,08 Ω, 1,25 Ω) filtr trzeciego rzędu jest bardziej zalecany do redukcji pojedynczej harmonicznej niż filtr drugiego rzędu i typu C, a kolejne miejsce zajmuje filtr drugiego rzędu (Rys. 3.8(a)(b)).

Przy wysokich wartościach rezystancji tłumiącej (tj. 8 Ω, 25 Ω) filtr typu C jest bardziej zalecany do redukcji pojedynczej harmonicznej niż filtr drugiego i trzeciego rzędu. Filtr drugiego rzędu jest bardziej zalecany niż filtr trzeciego rzędu (Rys. 3.8(a)(b)).

Z punktu widzenia braku wzmocnienia 5. harmonicznej (Rys. 3.8(a)(b)) filtr prosty jest bardziej zalecany, a drugie miejsce zajmuje filtr typu C przy wysokiej rezystancji tłumiącej (tj. 25 Ω). W przypadku filtra trzeciego rzędu przy wysokiej rezystancji tłumiącej prawdopodobieństwo wzmacniania 5. harmonicznej jest większe niż w przypadku innego filtra.

Biorąc pod uwagę odkształcenie napięcia sieci, z Rys. 3.8(c) wynika, że filtr trzeciego rzędu jest bardziej zalecany niż inne filtry, gdy jego rezystancja tłumiąca jest mała (tj. 0,08 Ω , 1,25 Ω), a filtr typu C jest bardziej zalecany niż inne filtry przy wysokiej rezystancji tłumiącej (tj. 8 Ω , 25 Ω) (Rys. 3.8(c)).

Filtr prosty charakteryzuje się najniższym współczynnikiem THD prądu w PWP w porównaniu z filtrami szerokopasmowymi (Rys. 3.8(d)). Dla małych wartości R (tj. 0,08 Ω , 1,25 Ω) filtr trzeciego rzędu jest bardziej zalecany niż filtr drugiego rzędu i typu C. Przy wysokich wartościach R (tj. 8 Ω , 25 Ω), aby poprawić współczynnik THD prądu sieci, lepiej jest zastosować filtr typu C niż filtr drugiego i trzeciego rzędu. Filtr pierwszego rzędu ma najwyższy współczynnik THD prądu i napięcia sieci i nie jest zalecany do ograniczania harmonicznych.

Filtr trzeciego rzędu generuje mniejsze straty mocy niż filtr prosty, drugiego rzędu i typu C (Rys. 3.8(e)), a kolejne miejsca zajmują: filtr prosty i filtr typu C. Najwyższymi stratami mocy cechuje się filtr drugiego rzędu.

Porównując filtr drugiego rzędu z filtrem typu C, na Rys. 3.8(a)(b)(c)(d) można zauważyć, że mają one niemal taką samą charakterystykę, jednak pod względem strat mocy filtr typu C jest bardziej godny polecenia.

W grupie filtrów, w których początkowe harmoniczne, takie jak 5., 7. itd. (np. od napędu o regulowanej prędkości), są redukowane przez filtry proste, dla skuteczniejszego ograniczania wysokich harmonicznych w szerokim paśmie można dodać filtry tłumiące, takie jak filtr drugiego rzędu, trzeciego rzędu lub typu C.

Filtry PHF są znane od wielu dekad. Mimo doświadczenia autorów wskazującego, że wiedza na ten temat jest bardzo bogata, w procesie projektowania często zwraca się zbyt mało uwagi na analizę zmian właściwości filtrowania tych układów [8]. Zależą one od wielu czynników, do których zalicza się np. starzenie lub tolerancje produkcyjne dławików i kondensatorów w procesie produkcji [6, 12, 13]. Celem tego rozdziału było zaprezentowanie właściwości różnych topologii filtrów PHF przy użyciu charakterystyki impedancji w funkcji częstotliwości [1, 3, 9, 11].

3.1.3 Badanie metod rozdziału łącznej mocy biernej w grupie filtrów

W dziedzinie filtrów PHF zbadania wymagają inne problemy, np. połączone równolegle struktury filtrów PHF pracujących w grupie z daną łączną mocą bierną. Pytanie, na które projektant powinien odpowiedzieć, brzmi: jak rozdzielić łączną moc bierną w grupie filtrów? Istnieją różne metody, ale w tym rozdziale zbadano sześć spośród nich (Tabela 3.3).

Aby wskazać, która metoda (A–F) jest najlepsza, określono zbiór kryteriów (Tabela 3.4). W tabeli można zauważyć różne poziomy efektywności filtrowania, a ogółem trudno jest wskazać najbardziej efektywną metodę, ponieważ między porównywanymi parametrami nie ma dużych różnic.

Tabela 3.3 Wzory stosowane do obliczenia mocy biernej poszczególnych filtrów w grupie według każdej metody

Metoda A — taka sama moc bierna dla filtrów	$Q_{f1} = Q_{f2} = \frac{Q_F}{2}$
Metoda B — moc bierna filtrów odwrotnie proporcjonalna do rzędu harmonicznej	$\frac{Q_{\rm f1}}{Q_{\rm f2}} = \frac{n_{\rm re_f2}}{n_{\rm re_f1}} \Rightarrow 2.9Q_{\rm f1} = 4.85Q_{\rm f2} \Rightarrow Q_{\rm f1} = \frac{2.9}{7.75}Q_{\rm F}$
Metoda C — moc bierna filtrów odwrotnie proporcjonalna do kwadratu rzędu harmonicznej	$\frac{Q_{f1}}{Q_{f2}} = \frac{n_{re_{f1}}^2}{n_{re_{f1}}^2} \Rightarrow 8.41Q_{f1} = 23.52Q_{f2} \Rightarrow Q_{f1}$ $= \frac{8.41}{31.93}Q_F$
Metoda D — moc bierna filtrów obliczana na podstawie kształtu charakterystyki impedancji filtra w funkcji częstotliwości	$\begin{cases} \frac{2.9^2 * 100\pi}{1-2.9^2} & \frac{4.85^2 * 100\pi}{1-4.85^2} \\ \frac{2.9^2 * 4}{4^2-2.9^2} & \frac{4.8^2 * 4}{4^2-2.9^2} \\ \end{bmatrix} \begin{bmatrix} C_{f1} \\ C_{f2} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} \frac{Q_F}{230^2} \\ 0 \\ 0 \end{bmatrix}$
Metoda E — moc bierna filtrów obliczana przy założeniu, że dławiki filtrów są identyczne	$Q_{\rm f1} = \frac{Q_{\rm F}}{(1-2.9^2) \left(\frac{1}{1-2.9^2} + \frac{1}{1-4.85^2}\right)}$
Metoda F (optymalizacja) — $y = 1 - (1 - \varphi_1)(1 - \varphi_2)$	1.02 2.1 0.98 0.97 0.96 0.97 0.96 0.100 200 300 400 500 Qf1 [Var]

Porównanie metod na podstawie wybranych kryteriów

Kryteria porównania	Metoda A	Metoda B	Metoda C	Metoda D	Metoda E	Metoda F		
<i>U</i> _{S(3)} [v]	0,43	0,41	0,40	0,40	0,40	0,41		
<i>U</i> S(5) [V]	0,45	0,48	0,51	0,50	0,52	0,47		
$(I_{F(3)}/I_{r(3)})$ [%]	11,16	15	16,66	16,66	16,66	13,33		
(<i>I</i> _{F(5)} / <i>I</i> _{r(5)}) [%]	31,48	24,07	18,51	22,22	18,51	25,92		
THD _U ₅[%]	0,50	0,50	0,51	0,51	0,51	0,51		
$\Delta P_{\rm F}$ [w]	0,533	0,600	0,660	0,6418	0,6687	0,5897		
Niebieskim kolorem wskazano, która metoda jest najlepsza w porównaniu z innymi metodami.								

3.2 Równoległy energetyczny filtr aktywny (SAPF)

Struktura badanego równoległego energetycznego filtra aktywnego (shunt active power filter, SAPF) jest przedstawiona na Rys. 3.9. Podczas badań autor zaproponował własny algorytm systemu sterowania oparty na teorii mocy chwilowej *p-q* (patrz Rys. 3.10). Badania skupiały się na wpływie indukcyjności sieci elektroenergetycznej (mocy zwarciowej sieci), dławika wejściowego przekształtnika, kondensatora DC oraz parametrów dławika wejściowego po stronie obciążenia na skuteczność działania filtra SAPF.



Figure 3.9 Power system together with the SAPF

3.2.1 Przykładowe badanie z wykorzystaniem filtra SAPF

W tym rozdziale przedstawiono badanie wpływu dławika wejściowego mostka tyrystorowego (*L*_T) na efektywność filtra SAPF. Przebiegi napięcia i prądu w PWP wraz z widmami przed podłączeniem filtra SAPF przedstawiono na Rys. 3.11.

Przebiegi napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej na Rys. 3.12(a)(b)(c) wskazują, że gdy indukcyjność dławika wejściowego mostka tyrystorowego jest równa lub większa niż indukcyjność dławika wejściowego filtra SAPF, tętnienia (w trakcie załamań komutacyjnych) są zredukowane (patrz Rys. 3.12(b)(c)).

Parametry harmonicznej podstawowej napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej przedstawiono w Tabeli 3.5. Przy wzroście indukcyjności dławika wejściowego prostownika prąd sieci minimalnie maleje. Przebieg prądu odniesienia w porównaniu z przebiegiem prądu wyrównawczego zaprezentowano na Rys. 3.13(a)(b)(c). Zwiększenie indukcyjności dławika wejściowego prostownika (L_T) do wartości równej lub wyższej niż L_{inv_min} powoduje zmniejszenie szybkości zmian prądu wejściowego prostownika w trakcie załamań komutacyjnych, dzięki czemu prąd wyrównawczy może nadążać za prądem odniesienia (Rys. 3.13(b)(c)). Uchyb na wejściu regulatora PI pokazano na Rys. 3.14(a)(b)(c), a przebiegi napięcia kondensatora DC przekształtnika — na Rys. 3.14(d).



Figure 3.10 Proposed SAPF control system



Figure 3.11 Waveforms of PCC voltage (a) and current (b) with their spectrums before the SAPF connection



Figure 3.12 Waveforms of PCC voltage and current for different value of input rectifier reactor inductance: (a) $L_{inv_{min}} > L_{T}$, (b) $L_{inv_{min}} = L_{T}$, (c) $L_{inv_{min}} < L_{T}$

Zgodnie z Tabelą 3.6 najlepsze wyniki pod względem współczynnika THD prądu i napięcia sieci elektroenergetycznej (a także TTHD — patrz Tabela 3.7), kompensacji mocy biernej harmonicznej podstawowej oraz kompensacji asymetrii uzyskuje się, gdy wartość $L_{inv_{min}}$ jest równa lub mniejsza niż wartość L_{T} .

	(Prz	ed podłącze L _T =	eniem filtra S = 1 nH	APF)	(Po podłączeniu filtra SAPF) L_inv > L _T			
	U _{S(1)} [V] / _{S(1)} [A]			<i>U</i> S(1)	[V]	<i>I</i> s(1) [A]		
	Wartość skuteczna (RMS)	Faza	Wartość skuteczna (RMS)	Faza	Wartość skuteczna (RMS)	Faza	Wartość skuteczna (RMS)	Faza
L1	230,8	30°	12,43	21,7°	230,8	30°	10,41	29,4°
L2	230,7	270°	14,92	235,4°	230,7	270°	10,4	269,2°
L3	230,7	150°	8,29	111,90°	230,7	150°	10,37	149,3°

Tabela 3.5Harmoniczna podstawowa napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej przed podłączeniem i po
podłączeniu filtra SAPF (dla różnych wartości dławika wejściowego prostownika)

	()	Po podłącze L_inv_	niu filtra SAF min = <i>L</i> τ	PF)	(Po podłączeniu filtra SAPF) L_inv_min < LT			
	U _{S(1)} [V] I _{S(1)} [A]			<i>U</i> _{S(1)}	[V]	<i>I</i> _{S(1)} [A]		
	Wartość skuteczna (RMS)	Faza	Wartość skuteczna (RMS)	Faza	Wartość skuteczna (RMS)	Faza	Wartość skuteczna (RMS)	Faza
L1	230,8	30°	10,29	29,4°	230,8	30°	10,14	29,5°
L2	230,7	270°	10,3	269,3°	230,8	270°	10,14	269,3°
L3	230,7	150°	10,28	149,3°	230,8	150°	10,11	149,4°

Tabela 3.6 Współczynnik THD napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej oraz moc bierna i czynna przed podłączeniem i po podłączeniu filtra SAPF (dla różnych wartości indukcyjności dławika wejściowego prostownika)

	(Przed podłączeniem filtra SAPF) <i>L</i> ⊤ = 1 nH					(Po podłączeniu filtra SAPF) L_inv_min > L⊤				
	THDus [%]	THD _{is} [%]	Q _{S(1)} [Var]	P _{S(1)} [W]	k _{asym} [%]	THDus [%]	THD _{is} [%]	Q _{S(1)} [Var]	P _{S(1)} [W]	k _{asym} [%]
L1	0,25	28,07	414,08	2838,4		0,15	8,77	25,15	2402,5	
L2	0,25	23,41	1954,5	2833,1	33,25	0,15	8,75	33,51	2400,1	0,30
L3	0,25	42,07	1181,8	1507,2		0,15	8,77	29,24	2393,2	

	(Po podłączeniu filtra SAPF) L_inv_min = L _T					(Po podłączeniu filtra SAPF) L_inv_min < L _T				
	THDus [%]	THD _{IS} [%]	Q _{S(1)} [Var]	P _{S(1)} [W]	k _{asym} [%]	THDus [%]	THD _{is} [%]	Q _S [Var]	Ps IW1	k _{asym} [%]
L1	0,04	2,47	24,86	2374,8	0,30	0,02	1,22	20,42	2340,2	0,20
L2	0,05	2,91	29,04	2377,1		0,02	1,49	28,59	2340,1	
L3	0,05	2,79	28,98	2372,4		0,02	1,22	24,43	2333,3	



Figure 3.13 Waveforms comparison between the reference and compensating current of *control loop (3)* (Figure 4.24): (a) for $L_{inv_min} > L_T$, (b) for for $L_{inv_min} = L_T$, (c) for $L_{inv_min} = L_T$



Figure 3.14 (a)(b)(c) error at the input of PI current control loop (3); (d) inverter DC capacitor voltage

Tabela 3.7 Współczynnik TTHD napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej dla różnych wartości indukcyjności dławika wejściowego prostownika

	(Po podłączeniu L_inv_min	u filtra SAPF) ₃ > <i>L</i> ⊤	(Po podłączen L_inv_m	iu filtra SAPF) $hin = L_T$	(Po podłączeniu filtra SAPF) L_inv_min < L _T		
	TTHD _{US} [%]	TTHD _{IS} [%]	TTHD _{US} [%]	TTHD _{IS} [%]	TTHD _{US} [%]	TTHD _{IS} [%]	
L1	3,12	12,60	3,18	7,16	3,30	6,59	
L2	2,77	13,77	2,85	8,08	2,92	6,82	
L3	3,12	13,40	3,23	7,20	3,29	6,11	

Na podstawie badań przedstawionych w tym rozdziale autor może wysnuć wniosek, że efektywność filtra SAPF zależała nie tylko od jego systemu sterowania i parametrów elementów, z którego jest on wykonany, ale także od parametrów sieci elektroenergetycznej i obciążenia. W przypadku systemu elektroenergetycznego z niesinusoidalnym przebiegiem napięcia i prądu ważne jest filtrowanie napięcia przed jego użyciem w algorytmie opartym na teorii mocy chwilowej *p-q* (z perspektywy ograniczania odkształceń prądu w sieci).

3.3 Hybrydowy energetyczny filtr aktywny (HAPF)

Wiedza uzyskana podczas badania struktur filtrów PHF i filtra SAPF pozwoliła autorowi na przeanalizowanie hybrydowego energetycznego filtra aktywnego (HAPF2) będącego strukturą, w której część pasywna jest połączona szeregowo z częścią aktywną, jak pokazano na Rys. 3.15. W celu przeprowadzenia analizy autor zaproponował algorytm systemu sterowania przedstawiony na Rys. 3.18.

3.3.1 Przykładowe badanie z wykorzystaniem filtra HAPF2

Po podłączeniu dwóch części (pasywnej i aktywnej) poszukiwano odpowiedzi na następujące pytanie: na jaką częstotliwość powinna być nastrojona część pasywna, biorąc pod uwagę fakt, że charakterystyczne harmoniczne generowane przez mostek tyrystorowy to 5., 7., 11., 13. itd.

Aby odpowiedzieć na to pytanie, zbadano i porównano trzy przypadki symulacji: w pierwszym filtr PHF układu HAPF2 jest nastrojony na częstotliwość nieco niższą (tj. 243,5 Hz, 4,87) niż częstotliwość pierwszej charakterystycznej harmonicznej obciążenia (5.); w drugim przypadku filtr ten jest nastrojony na częstotliwość drugiej charakterystycznej harmonicznej obciążenia (7.); w trzecim przypadku filtr ten jest nastrojony na częstotliwość nieco niższą (tj. 543,5 Hz, 10,87) niż częstotliwość trzeciej charakterystycznej harmonicznej obciążenia (11.).

Charakterystykę impedancji części pasywnej w funkcji częstotliwości przedstawiono na Rys. 3.16, a jej parametry w Tabeli 3.8.



Figure 3.15 HAPF2 functionality principle

n _{re}	<i>L</i> f [mH]	C _f [μF]	$R_{\rm Lf}$ [m Ω]	Q _f [Var]	q'	<i>L</i> т [mH]
4,87	6,1	69,74	12,8	1210	150	3,5
6,87	3,0	71,27	6,3			
10,87	1,2	72,19	2,5			

Parametry pasywnego filtra harmonicznych układu HAPF2

Tabela 3.8



Figure 3.16 PHF impedance versus frequency characteristics. The PHF is tuned to the resonance frequencies of 243.3 Hz, 343.5 Hz and 543 Hz



Figure 3.17 Grid voltage (Us) and current (Is) waveforms with their spectrums before the HAPF2 connection

Przebiegi napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej z widmami przed podłączeniem układu HAPF2 przedstawiono na Rys. 3.17. Z uwagi na symetryczność systemu zasilania pewne wyniki są podane tylko dla jednej fazy. Z powodu stabilności sieci elektroenergetycznej w modelu laboratoryjnym (bardzo mała indukcyjność w porównaniu z indukcyjnością wejścia prostownika i układu HAPF2) napięcie w PWP jest bardzo mało odkształcone.



Figure 3.18 HAPF2 control system



Figure 3.19 Waveforms of grid voltage (Us) and current (Is) and HAPF2 current (If) for the PHF tuned to the harmonic component frequency of: 4.87, 6.87 and 10.87



Figure 3.20 (a) grid current waveforms and (b) HAPF2 inverter DC side voltage during the reduction of R_{DC}

Na Rys. 3.19 przedstawiono przebiegi napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej oraz prądu układu HAPF2 po podłączeniu układu HAPF2. Można zauważyć, że układ HAPF z filtrem PHF nastrojonym na częstotliwość nieco niższą (tj. 543,5 Hz, 10,87) niż częstotliwość 11. harmonicznej zapewnia najlepszą redukcję tętnień prądu w PWP w trakcie załamań komutacyjnych na przebiegach. Niemniej jednak wywołuje on najwyższy współczynnik THD napięcia w PWP (Rys. 3.19).

Symulowany stan przejściowy systemu elektroenergetycznego podczas zmiany parametrów obciążenia (tj. spadku rezystancji R_{DC} prostownika DC z 36,5 Ω do 18,25 Ω) przedstawiono na Rys. 3.20. Można zobaczyć, że po wzroście prądu systemu elektroenergetycznego (patrz Rys. 3.20(a) po zmniejszeniu rezystancji po stronie prostownika DC) układ HAPF ograniczył harmoniczne prądu sieci, ale nie zapewnił pełnej kompensacji mocy biernej harmonicznej podstawowej z powodu mocy biernej jego filtra PHF wynoszącej około 1210 Var. Napięcie po stronie DC przekształtnika przedstawiono na Rys. 3.20(b).

Na Rys. 3.21(a)(b) pokazano przebiegi prądu odpowiednio na wejściu prostownika (h) i po stronie sieci (l_s) w warunkach asymetrii. Asymetrię uzyskano, podłączając rezystancję między fazy, jak pokazano na Rys. 3.9 (R_{asym}). Układ HAPF2 z zaproponowanym systemem sterowania nie może kompensować składowej asymetrycznej.

Zależność impedancji od częstotliwości od strony zacisków prostownika (Rys. 3.22) wskazuje, że system zasilania ma charakter wyłącznie indukcyjny. Rezonans równoległy między filtrem PHF (pracującym samodzielnie) a siecią elektroenergetyczną został całkowicie wyeliminowany, podobnie jak wpływ efektywności filtra PHF (działającego samodzielnie) na impedancję sieci.





Figure 3.21 Waveforms of (a) input rectifier current and (b) grid current during the load side asymmetry



Figure 3.22 Impedance versus frequency of power system observed from thyristor bridge terminals



Figure 3.23 Grid current waveforms before and after the HAPF2 connection.

Układy HAPF2 z pasywnym filtrem harmonicznych nastrojonym na częstotliwość rezonansową ($n_{re} = 6,87$ (243,5 Hz)) bliską częstotliwości 7. harmonicznej oraz na częstotliwość rezonansową ($n_{re} = 10,87$ (543,5 Hz)) bliską częstotliwości 11. harmonicznej uzyskują najlepszy wynik pod względem redukcji współczynnika THD prądu sieci, ponieważ indukcyjności ich dławików, wynoszące odpowiednio 3 mH i 1,2 mH, są mniejsze niż indukcyjność dławika wejściowego mostka tyrystorowego równa 3,5 mH (patrz Rys. 3.23). W związku z tym zasada wykazana eksperymentalnie w rozdziale 5, zgodnie z którą aby uzyskać lepsze ograniczanie tętnień prądu sieci w trakcie załamań komutacyjnych na przebiegach, jako indukcyjność dławika wejściowego filtra SAPF (filtra pierwszego rzędu) powinno się dobrać wartość równą lub nieco niższą niż indukcyjność dławika wejściowego filtra harmonicznych układu HAPF2.

Dobór częstotliwości rezonansowej pasywnego filtra harmonicznych układu HAPF2 nie powinien zależeć tylko od charakterystycznych harmonicznych prostownika (obciążenia do kompensacji), ale także od wartości indukcyjności dławika wejściowego prostownika. Filtr PHF układu HAPF2 można nastroić na dowolną częstotliwość pod warunkiem, że indukcyjność jego dławika ma wartość równą lub mniejszą niż indukcyjność dławika wejściowego prostownika, tzw. dławika komutacyjnego.

Przeprowadzone eksperymenty dowiodły również, że gdy filtr PHF jest nastrojony na częstotliwość rezonansową wyższą niż częstotliwości 5. i 7. harmonicznej, filtr HAPF skuteczniej redukuje (po stronie sieci) wyższe harmoniczne prądu (tj. od 13.), ponieważ filtr PHF ma mniejszą impedancję dla tych harmonicznych (Rys. 3.16), 5. i 7. harmoniczna prądu jest redukowana mniej efektywnie, a wartość dławika filtra PHF jest mniejsza niż w przypadku, gdy był on nastrojony na częstotliwość bliską częstotliwości 5. lub 7. harmonicznej, co oznacza niski koszt. Jeśli wartość dławika filtra PHF jest zbyt mała, filtr HAPF może zmagać się z problemem ograniczenia tętnień przy przełączaniu.

Istnieje wiele topologii filtra PHF, które można podłączyć szeregowo z filtrem SAPF jak w przypadku struktury HAPF2 [2].

Na podstawie tego przypadku prezentowanej topologii HAPF2 można uzyskać następujące zalecenia:

- z perspektywy prądu sieci, aby uzyskać niższy współczynnik THD, jako częstotliwość strojenia części pasywnej powinno się dobrać wartość z zakresu wyższych harmonicznych, pod warunkiem że indukcyjność wejścia układu HAPF jest równa lub mniejsza niż indukcyjność wejścia mostka tyrystorowego;
- z perspektywy napięcia sieci, aby uzyskać niższy współczynnik THD, jako częstotliwość strojenia części pasywnej powinno się dobrać wartość z zakresu niższych harmonicznych, pod warunkiem że indukcyjność wejścia układu HAPF2 zapewnia skuteczniejsze ograniczanie harmonicznych tętnień przy przełączaniu.

4. Eksperymenty laboratoryjne

Sieć elektroenergetyczna zasilająca laboratorium, w którym przeprowadzano badania eksperymentalne, przedstawiono w formie obwodu zastępczego na Rys. 4.1(a). Zaprezentowane przykłady eksperymentów laboratoryjnych służą tylko potwierdzeniu badań symulacyjnych. Parametry zastępcze sieci elektrycznej (impedancja, prąd zwarciowy i moc zwarciowa) wymieniono na Rys. 4.1(b).

Napięcie sieci elektroenergetycznej (bez rozważanego obciążenia) zasilającej laboratorium jest symetryczne (składowa przeciwna stanowi 0,12% składowej zgodnej), ale nie ma przebiegu wyłącznie sinusoidalnego (Rys. 4.2(a)) z powodu innych podłączonych obciążeń nieliniowych. Jego widmo, w przykładzie ograniczone do jednej fazy (Rys. 4.2(b)), wskazuje, że dominujące są następujące harmoniczne: 5. (ok. 2%), 3. (ponad 1%) oraz 7. (prawie 1%).



Figure 4.1 (a) laboratory electrical network, (b) electrical grid equivalent circuit



Figure 4.2 (a) PCC voltage waveforms without the considered load connected) and (b) its spectrum (p.u.)

4.1 Pasywne filtry harmonicznych (PHF)

Zestaw laboratoryjny, w którym badano filtry PHF, zaprezentowano na Rys. 4.3. Badane topologie filtrów PHF przedstawiono na Rys. 4.4.

Widma na Rys. 4.5 przedstawiają harmoniczne napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej dla różnych wartości kąta wysterowania i napięcia DC prostownika. Z uwagi na symetryczność systemu zasilania projektowanego modelu laboratoryjnego wyniki odnoszą się tylko do jednej fazy (patrz przebiegi na Rys. 4.5).

Rozważając harmoniczną podstawową napięcia sieci, zauważa się minimalny spadek jej amplitudy wraz ze wzrostem wartości U_{DC} (tj. od 226,97 V ($U_{DC} = 50$ V) do 226,13 V ($U_{DC} = 525$ V)). Piąta harmoniczna ma najwyższą amplitudę dla wartości U_{DC} równej 250 V, a 7. harmoniczna — dla wartości U_{DC} równej 350 V (Rys. 4.5).

Oprócz 3. i 9. harmonicznej w widmach napięcia i prądu w PWP występują także inne niecharakterystyczne harmoniczne (patrz Rys. 4.6). Patrząc na widmo na Rys. 4.6, zauważa się, że wraz ze wzrostem rzędu harmonicznej pewne niecharakterystyczne harmoniczne mają wyższą amplitudę niż amplituda charakterystycznych harmonicznych.



Figure 4.3

Laboratory model





Single-tuned filter

Filter group







Second order filter

Figure 4.4

Investigated PHF topologies in the laboratory



Figure 4.5 Grid voltage and current parameters measured from the laboratory model. The example of waveforms are for the U_{DC} equal to 250 V



Figure 4.6 Example of grid current spectrum for $U_{CD} = 250 \text{ V}$ (the red manganese colour represents the characteristic harmonics)

4.1.1 Przykładowe badanie z wykorzystaniem topologii filtrów PHF: zjawisko odstrojenia



Figure 4.7 Power system equivalent circuit with filter reactor parameters

Zjawisko odstrojenia filtra PHF jest badane przy użyciu filtra prostego. Badanie przeprowadza się poprzez zwiększanie lub zmniejszanie częstotliwości rezonansowej filtra w celu obserwowania, jak zachowuje się on w stosunku do eliminowanej harmonicznej oraz harmonicznych wyższego rzędu.

Podczas badań symulacyjnych teoretycznie udowodniono, że skuteczność jednego filtra w ograniczaniu eliminowanej harmonicznej (tj. 5.) maleje, gdy jego częstotliwość rezonansowa jest niższa i odległa od częstotliwości tej harmonicznej, oraz że wzmocnienie amplitudy 5. harmonicznej może wystąpić, gdy filtr jest nastrojony na częstotliwość wyższą niż częstotliwość 5. harmonicznej z powodu rezonansu równoległego. Prezentowane badania laboratoryjne służą wyłącznie potwierdzeniu badań symulacyjnych.

Do celów badania filtr prosty przedstawiony na Rys. 4.7 (model laboratoryjny) jest nastrojony na częstotliwości niższe niż częstotliwość 5. harmonicznej (mierzone parametry — Rys. 4.8(b)).

Na Rys. 4.8 zaprezentowano charakterystykę impedancji filtra w funkcji częstotliwości uzyskaną na podstawie symulacji (Rys. 4.8(a) — charakterystyka oczekiwana na podstawie parametrów producenta; Rys. 4.8(b) — charakterystyka na podstawie pomiarów w laboratorium). Obserwowane różnice między danymi a charakterystykami na obu rysunkach wynikają z tolerancji parametrów filtra.

Dane laboratoryjne zarejestrowano, przyjmując jako przykład napięcie DC prostownika (U_{DC}) równe 250 V ($\theta = 62,54^{\circ}$). Dla każdej częstotliwości strojenia rejestrowano parametry systemu zasilania. Pomiary mocy czynnej i biernej harmonicznej podstawowej w modelu laboratoryjnym po stronie sieci, na zaciskach filtra i na wejściu prostownika podano w Tabeli 4.1.

Przebiegi i widma napięcia i prądu sieci zasilającej zaprezentowano na Rys. 4.9, a przebiegi i widma prądu filtra i prądu wejściowego prostownika — na Rys. 4.10. Współczynnik THD napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej oraz skuteczność filtra pokazano odpowiednio na Rys. 4.11 i 4.12

Na Rys. 4.9 można zauważyć, że najniższa wartość amplitudy 5. harmonicznej (a także najniższy współczynnik THD — Rys. 4.11(a)) w widmie napięcia sieci zasilającej uzyskuje się, gdy filtr jest nastrojony na częstotliwość harmonicznej rzędu 4,99, natomiast w przypadku widma prądu sieci zasilającej najniższą amplitudę 5. harmonicznej i najniższy współczynnik THD występuje, gdy filtr jest nastrojony na częstotliwość harmonicznej rzędu 4,66 (Rys. 4.11(b)). Gdy częstotliwość strojenia filtra zostanie zwiększona od wartości *n*re równej 4,57 do wartości *n*re równej 4,99, amplituda 5. harmonicznej prądu sieci zasilającej powinna maleć tak, jak amplituda 5. harmonicznej obserwowana w widmie napięcia sieci zasilającej. Różnica ta wynika stąd, że prąd 5. harmonicznej przepływa od strony sieci zasilającej do modelu laboratoryjnego.

Efektywność filtra prostego przedstawiona na Rys. 4.12 wskazuje, że filtr ten skuteczniej ogranicza 5. harmoniczną, gdy jego częstotliwość rezonansowa jest ustawiona dla harmonicznej rzędu 4,66, co jest sprzeczne z charakterystyką na Rys. 4.8(b).

Zgodnie z charakterystyką impedancji filtra w funkcji częstotliwości na Rys. 4.8(b) w przypadku prądu i napięcia sieci zasilającej filtr nastrojony na częstotliwość harmonicznej rzędu 4,57 powinien wykazywać najwyższą amplitudę 5. harmonicznej, a filtr nastrojony na częstotliwość harmonicznej rzędu 4,99 powinien

wykazywać najniższą amplitudę 5. harmonicznej. Jednak redukcja amplitudy 5. harmonicznej w przebiegu prądu sieci zasilającej (Rys. 4.9) nie jest zgodna z tą zasadą, ponieważ prąd harmonicznych płynie od strony sieci.



Figure 4.8 Filter impedance versus frequency characteristics: (a) expected characteristics from simulation and (b) characteristics measured in the laboratory

		-		-	
n _{re}	P _{S1(1)} [W]	Q _{S1(1)} [Var]	$P_{f1(1)}[W]$	Q _{f1(1)} [Var]	Q _{T1(1)} [Var]
Brak podłączonego filtra	806,29	1065,6	-	-	-
4,57	821,66	83,81	16,99	-981,84	1067,4
4,66	826,15	83,53	16,10	-991,20	1076,4
4,76	815,84	83,21	16,90	-971,23	1056,1
4,86	807,39	94,73	16,10	-943,33	1039,5
4,99	819,69	78,11	17,46	-965,52	1045,1

Tabela 4.1 Pomiary mocy czynnej i biernej harmonicznej podstawowej w modelu laboratoryjnym



Figure 4.9 Point of common coupling voltage and current waveforms and spectrums







Tolerancja parametrów dławika i kondensatora wpływa na częstotliwość strojenia oraz efektywność filtra PHF, w związku z czym ważne jest zweryfikowanie parametrów dławika i kondensatora po otrzymaniu ich od producenta. Weryfikacja ta powinna opierać się na wyszukaniu parametrów filtra bliskich oczekiwanym. Badania wykazały także, że harmoniczne w sieci elektrycznej przepływają przez filtr i dotyczy to przede wszystkim harmonicznych o częstotliwościach bliskich częstotliwości rezonansowej filtra. Efektywność filtra zależy od impedancji sieci elektrycznej i zależność tę można zredukować poprzez dodanie dławika liniowego między filtrem a PWP. Obecność dławika liniowego nie tylko ogranicza amplitudę harmonicznych prądu płynących z sieci elektroenergetycznej, ale także zwiększa odkształcenie napięcia sieci.



4.2 Równoległe energetyczne filtry aktywne (SAPF)

Figure 4.13 Equivalent circuit of the laboratory model with components

Obwód zastępczy modelu laboratoryjnego, w którym badano filtr SAPF, zaprezentowano na Rys. 4.13. Obciążenie składa się z trójfazowego mostka tyrystorowego z rezystancją *R* oraz dławika *L* po stronie DC i dławika L_T po stronie AC mostka. Jednofazowy mostek diodowy o rezystancji 24 Ω po stronie DC służy do uzyskania asymetrii prądów. Badany filtr SAPF przedstawiony na Rys. 4.14 jest podłączony w PWP.

Eksperymenty laboratoryjne nie skupiają się na projekcie filtra SAPF z jego systemem sterowania, ale na wpływie dławika komutacyjnego prostownika (L_T) i dławika liniowego (L_{SS}) (patrz Rys. 4.13) na efektywność filtra SAPF.

4.2.1 Przykładowe badania z wykorzystaniem filtra SAPF

Badania dotyczą wpływu dławika wejściowego mostka tyrystorowego na efektywność filtra SAPF.

Widma i przebiegi zmierzonego napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej przed podłączeniem filtra SAPF (elementy L_{SS} oraz L_T nie są podłączone) przedstawiono na Rys. 4.15. Na rysunku widać odkształcenia napięcia i prądu w PWP, asymetrię prądów oraz wysoki poziom mocy biernej harmonicznej podstawowej.

Rozważono trzy przypadki badania oparte na zmianie dotyczącej dławika wejściowego prostownika (L_T) po podłączeniu filtra SAPF: L_T — niepodłączony, $L_T = L_{inv} = 2 \text{ mH}$ oraz $L_T = 2,5 \text{ mH} > L_{inv} = 2 \text{ mH}$. Podczas eksperymentów nie rozważano dławika liniowego po stronie sieci zasilającej (L_{SS}).

Porównanie Rys. 4.16(b)(c) z Rys. 4.16(a) wskazuje, że kiedy indukcyjność dławika wejściowego przekształtnika jest równa lub mniejsza niż indukcyjność dławika wejściowego prostownika, filtr SAPF skuteczniej redukuje tętnienia w przebiegach napięcia i prądu w PWP w trakcie załamań komutacyjnych.



Figure 4.14 Equivalent circuit of the laboratory model with components



Figure 4.15 Measured grid voltage and current waveforms with spectrums before the SAPF connection ($L_{SS} = L_T = 0$)



Figure 4.16 Comparison of grid voltage (U_S) and current (I_S) and SAPF current (I_{inv}) waveforms: (a) L_T is not connected, (b) $L_T = L_{inv} = 2$ mH and (c) $L_T > L_{inv}$



Figure 4.17 Comparison of: (a) PCC voltage spectrums, (b) PCC current spectrums and (c) PCC voltage and current THDs, active (P_1) and reactive powers (Q_1)

Na Rys. 4.17 porównano (dla trzech przypadków) widma i współczynniki THD napięcia i prądu w PWP, a także moc czynną i bierną w PWP. Z powodu symetryczności prądu w PWP po podłączeniu filtra SAPF w każdym przypadku rozważana jest tylko jedna faza. Przy wartości L_{inv} równej lub mniejszej niż L_T 5. harmoniczna napięcia i prądu w PWP oraz współczynnik THD są skuteczniej ograniczane (Rys. 4.17(a) do (c)). Należy zauważyć, że napięcie w PWP zawiera harmoniczne, co może wpływać na wyniki w PWP.

Eksperymenty laboratoryjne dowiodły, że:

- dla lepszej redukcji tetnień napiecia i pradu sieci zasilającej w trakcje załamań komutacyjnych na przebiegach indukcyjność dławika (filtra pierwszego rzedu) podłaczonego na wejściu filtra SAPF w celu ograniczania tętnień przy przełączaniu powinna być równa lub mniejsza niż indukcyjność dławika wejściowego prostownika, tzw. dławika komutacyjnego;
- gdy filtr SAPF z dławikiem na wejściu jest podłączony w PWP, nie zaleca się podłączenia dodatkowego dławika liniowego między PWP a siecią, ponieważ napięcie w PWP będzie bardziej odkształcone na skutek tętnień przy przełączaniu przekształtnika.

4.3 Hybrydowy energetyczny filtr aktywny (HAPF)





Figure 4.19 PCC voltage and current waveforms and spectrums measured when the HAPF is not connected (with L_T)

Model filtra HAPF przedstawiony na Rys. 4.18 jest dodatkowym modelem filtra HAPF badanym w laboratorium. Składa się on z filtra SAPF połączonego równolegle z grupą dwóch filtrów prostych PHF, jak pokazano na Rys. 4.18. Pomiary przebiegów i widm napięcia i prądu w PWP po podłączeniu filtra HAPF przedstawiono na Rys. 4.19.

4.3.1 Przykładowa analiza z wykorzystaniem filtra HAPF

Analiza ta dotyczy podłączenia i odłączenia dodatkowego dławika liniowego (L_{SS2} i L_{SS2}) w systemie zasilania. Filtr HAPF jest podłączony do sieci zasilającej poprzez dławik liniowy L_{SS2} (L_{SS1} odłączony), a wyniki porównuje się z wynikami uzyskanymi, gdy dławik L_{SS1} (L_{SS2} niepodłączony) był podłączony między filtrem SAPF a grupą filtrów PHF (Rys. 4.18).

W przypadku, gdy filtr HAPF zawiera dławik *L*_{SS1} podłączony między filtrem SAPF a grupą filtrów PHF (bez dławika *L*_{SS2}), przebiegi prądu i napięcia w PWP są mniej odkształcone (patrz Rys. 4.20(a)).

Po podłączeniu filtra HAPF (bez dławika L_{SS1}) do sieci zasilającej poprzez dławik liniowy L_{SS2} uzyskuje się najgorsze wyniki pod względem ograniczania harmonicznych (Rys. 4.21(a)–(c)) i kompensacji mocy biernej harmonicznej podstawowej (Rys. 4.21(d). Napięcie i prąd w PWP są bardziej odkształcone z powodu dodatkowych spadków napięcia na dławiku liniowym L_{SS2} (Rys. 4.20(b)) (podłączenie dławika L_{SS2} po stronie sieci spowodowało obniżenie mocy zwarciowej sieci i zwiększenie jej impedancji).

Dławik liniowy *L*_{SS1} podłączony między filtrami (filtrem SAPF i grupą filtrów PHF) z jednej strony pomaga grupie filtrów PHF w ograniczaniu 5. i 7. harmonicznej prądu, a z drugiej strony pomaga filtrowi SAPF w ograniczaniu tętnień w trakcie załamań komutacyjnych na przebiegach napięcia i prądu sieci elektroenergetycznej.



Figure 4.20 PCC voltage and current waveforms: (a) the line reactor L_{SS1} is connected between the SAPF and PHF (L_{SS2} disconnected) and (b) the HAPF is connected to the grid throught L_{SS2} (L_{SS1} disconnected)



Figure 4.21 (a), (b) PCC voltage and current spectrums, (c) THD and (d) fundamental harmonic active and reactive powers

Eksperymenty laboratoryjne dowiodły, że:

- filtr SAPF ogranicza harmoniczne prądu skuteczniej niż filtr PHF;
- w połączeniu z filtrem PHF (HAPF) filtr SAPF wymaga mniejszej mocy niż kiedy działa samodzielnie;
- nie zaleca się podłączenia filtra SAPF lub HAPF do PWP poprzez dławik liniowy;
- w konfiguracji filtra HAPF, w której filtry SAPF i PHF są połączone równolegle, dławik liniowy między filtrami SAPF i PHF jest potrzebny, jeśli filtr PHF ma wyższą impedancję przy eliminowanej harmonicznej (eliminowanych harmonicznych) niż sieć.

5. Wnioski

Celem rozprawy było zbadanie hybrydowego energetycznego filtra aktywnego (HAPF) będącego połączeniem energetycznego filtra aktywnego (APF) i pasywnego filtra harmonicznych (PHF). W tym celu autor wykonał różne badania (symulacyjne i laboratoryjne) wybranych struktur filtrów PHF i SAPF.

Wiedza uzyskana w toku badań struktur filtrów PHF i SAPF pozwoliła autorowi na zaprojektowanie i przeanalizowanie struktur hybrydowego energetycznego filtra aktywnego (HAPF): modelu filtra SAPF (trzy gałęzie, trzy przewody) podłączonego szeregowo z filtrem jednogałęziowym (badania symulacyjne) i modelu filtra SAPF (trzy gałęzie, cztery przewody) podłączonego równolegle z grupą dwóch filtrów jednogałęziowych (badania laboratoryjne).

5.1 Wyniki badań symulacyjnych

Rozważono następujące struktury filtrów PHF: filtr prosty (dla jednej harmonicznej), szeregowy filtr PHF, filtr podwójnie nastrojony, filtry szerokopasmowe (pierwszego, drugiego i trzeciego rzędu oraz typu C) oraz hybrydowy pasywny filtr harmonicznych (hybrid passive harmonic filter, HPHF). Autor przeanalizował topologie filtrów PHF, uwzględniając charakterystyki ich impedancji w funkcji częstotliwości, zjawisko odstrojenia (na skutek zmiany parametrów elementów filtra (*LC*) w czasie oraz w wyniku zwarcia lub warunków atmosferycznych) i rezystancję tłumiącą. Wszystkie wymienione elementy wpływają na efektywność filtrowania filtra PHF. Porównano również pewne struktury filtrów PHF (grupę dwóch filtrów prostych i filtra podwójnie nastrojonego oraz szeregowy filtr PHF i filtr HPHF), a także metody rozdziału łącznej mocy biernej w grupie filtrów. Struktury te badano jako urządzenia samodzielne, jak i wchodzące w skład całego systemu obejmującego obciążenie nieliniowe i sieć zasilającą z jej wewnętrzną impedancją zastępczą.

Na podstawie charakterystyki impedancji w funkcji częstotliwości autor wykazał, że zmiany parametrów szeregowego filtra PHF obniżają jego skuteczność w ograniczaniu blokowanej harmonicznej. Po podłączeniu między PWP a obciążeniem prostownika układ ten może powodować wzmocnienie harmonicznych po stronie sieci. Wady (m.in. wzmocnienie harmonicznych) szeregowego filtra PHF mogą zostać wyeliminowane przy użyciu równoległego filtra PHF (HPHF).

Autor wykazał, że:

- Równoległe filtry PHF (filtry proste, podwójnie nastrojone i szerokopasmowe) powinny być nastrojone na częstotliwość nieco niższą niż częstotliwość eliminowanej harmonicznej z powodu starzenia się ich elementów (*LC*) mogącego powodować rozstrojenie się filtra. Eliminowana harmoniczna powinna być charakterystyczną harmoniczną obciążenia (np. prostownika) po harmonicznej podstawowej. Niewłaściwy dobór częstotliwości rezonansowej równoległego filtra PHF może spowodować wzmocnienie harmonicznych po stronie sieci elektrycznej i zacisków filtra.
- Na skutek wzrostu rezystancji filtra prostego spada jego skuteczność ograniczania eliminowanej harmonicznej po stronie sieci oraz wzrastają jego straty mocy.
- Grupa filtrów (dwa filtry proste) w porównaniu z filtrem podwójnie nastrojonym (takie same parametry mocy biernej harmonicznej podstawowej, dobroci dławika i napięcia na ich zaciskach) charakteryzuje się wyższą wartością indukcyjności (co w praktyce zwiększa koszty) i mniejszą impedancją w przypadku harmonicznych wyższych niż harmoniczne, na których częstotliwość jest nastrojona.
- Filtr pierwszego rzędu przeznaczony do kompensacji mocy biernej harmonicznej podstawowej w systemie elektroenergetycznym z odkształconym napięciem i prądem może powodować wzmocnienie harmonicznych (po stronie sieci).
- Efektywność filtra drugiego rzędu, trzeciego rzędu i typu C zależy od doboru wartości rezystancji tłumiącej. Jeśli nieprawidłowo dobrano rezystancję tłumiącą, mogą one powodować wzmocnienie harmonicznych (przede wszystkim charakterystycznych harmonicznych bliskich harmonicznej podstawowej) po stronie sieci. Zależnie od wartości ich rezystancji tłumiącej skuteczniej redukują one harmoniczne w szerokim paśmie niż filtr prosty (po stronie sieci).
- W porównaniu z filtrami szerokopasmowymi (takie same parametry mocy biernej harmonicznej podstawowej, dobroci dławika i częstotliwości rezonansowej) oraz niezależnie od wartości rezystancji

tłumiącej filtr prosty jest skuteczniejszy w ograniczaniu (po stronie sieci) harmonicznej, której częstotliwość jest bliska jego częstotliwości rezonansowej.

 W porównaniu z filtrem prostym i innymi filtrami szerokopasmowymi (przy takich samych parametrach mocy biernej harmonicznej podstawowej, dobroci dławika i częstotliwości strojenia) oraz niezależnie od wartości rezystancji tłumiącej filtr drugiego rzędu charakteryzuje się większymi stratami mocy.

W rozprawie przedstawiono i porównano sześć metod (od A do F) rozdziału łącznej mocy biernej harmonicznej podstawowej w grupie filtrów. Mimo że efektywność filtrów, których poszczególne elementy dobrano różnymi metodami, jest bardzo podobna, metoda A (taka sama moc bierna dla filtrów w grupie) pozostaje atrakcyjniejsza niż inne metody, ponieważ wymaga mniej obliczeń i zapewnia lepsze wyniki pod względem strat mocy na grupie filtrów.

Čelem zaprojektowania filtra SAPF (struktury z trzema przewodami i trzema gałęziami) jest kompensacja mocy biernej harmonicznej podstawowej obciążenia, harmonicznych i asymetrii, co uzyskano przy użyciu oryginalnego algorytmu sterowania opartego na teorii p-q— według propozycji autora. Rozważono także wpływ dławika liniowego (podłączonego między PWP a stroną sieci), dławika wejściowego prostownika i dławika wejściowego filtra SAPF oraz kondensatora DC na skuteczność filtra.

W opisie opartego na teorii *p-q* algorytmu użytego w systemie sterowania filtra SAPF autor wykazał, że jeśli odkształcenie napięcia w PWP nie zostanie odfiltrowane, wpływa na prąd odniesienia i występuje w prądzie sieci po kompensacji (przebieg prądu sieci naśladuje wówczas przebieg napięcia w PWP).

W systemie elektroenergetycznym z obciążeniem prostownika wartość indukcyjności dławika wejściowego filtra SAPF (filtra *L*) powinno się także dobrać na podstawie wartości indukcyjności dławika wejściowego prostownika. Powinna być ona równa lub mniejsza niż indukcyjność dławika wejściowego prostownika w celu lepszego ograniczania tętnień prądu sieci w trakcie załamań komutacyjnych. Podłączenie dławika liniowego między PWP i sieć nie jest zalecane z powodu wzrostu odkształceń napięcia w PWP.

Analizowany filtr HAPF miał topologię filtra SAPF podłączonego szeregowo z filtrem PHF (filtrem prostym). Badanie takiej topologii miało dowieść, że możliwe jest zredukowanie mocy filtra SAPF (części aktywnej). Filtr HAPF zastosowano do kompensacji mocy biernej harmonicznej podstawowej obciążenia oraz ograniczenia harmonicznych. Autor wykazał, że dobór częstotliwości strojenia filtra jednogałęziowego w tej topologii nie powinien zależeć tylko od charakterystycznych harmonicznych prostownika (obciążenia do kompensacji), ale także od wielkości dławika wejściowego prostownika. Dla tej topologii autor zaproponował także algorytm systemu sterowania oparty na teorii *p-q*.

5.2 Wyniki badań laboratoryjnych

Na podstawie badań laboratoryjnych autor dowiódł, że efektywność równoległych filtrów PHF zależy od impedancji sieci elektrycznej (impedancja filtra eliminowanej harmonicznej powinna być mniejsza niż impedancja sieci dla tej harmonicznej), jakości napięcia zasilania (w warunkach odkształconego napięcia sieci elektroenergetycznej po podłączeniu filtra harmoniczne są przekazywane z sieci do filtra (wzmocnienie harmonicznych po stronie sieci i filtra)) oraz tolerancji elementów filtra (*LC*). Przed zaprojektowaniem równoległego filtra PHF potrzebne są następujące informacje:

- charakterystyczne harmoniczne prądu obciążenia i moc bierna harmonicznej podstawowej,
- szacowana impedancja sieci elektroenergetycznej,
- widmo napięcia zasilania w PWP, gdy obciążenie, do którego ma być stosowana kompensacja, nie jest podłączone.

Autor wykazał, że w warunkach odkształconego napięcia zasilania (gdy obciążenie, do którego ma być stosowana kompensacja, nie jest podłączone) oraz gdy impedancja filtra eliminowanej harmonicznej jest niedostatecznie niższa niż impedancja sieci dla tej harmonicznej, podłączenie dławika liniowego między siecią a PWP może być rozwiązaniem obarczonym wadą w postaci wzrostu odkształceń napięcia w PWP.

Autor zademonstrował również, że po odebraniu elementów filtra od producenta ważne jest sprawdzenie (poprzez pomiar), czy ich parametry (indukcyjność i rezystancja dławika, pojemność i rezystancja kondensatora oraz częstotliwość rezonansowa filtra) mieszczą się w przedziale tolerancji lub mają oczekiwane wartości. Mierzone parametry filtra mogą nieco różnić się od wartości znamionowych z powodu tolerancji elementów (*LC*).

Badania laboratoryjne filtra prostego, grupy dwóch filtrów prostych oraz filtrów pierwszego i drugiego rzędu potwierdziły wyniki badań symulacyjnych.

Eksperymenty laboratoryjne z filtrem SAPF przeprowadzono na strukturze z czterema przewodami i trzema gałęziami z dławikami wejściowymi *L*. Na podstawie tej struktury autor przedstawił wpływ dławika wejściowego prostownika oraz dławika liniowego po stronie sieci na efektywność filtra SAPF (potwierdzając wyniki symulacji).

Eksperymenty laboratoryjne z filtrem HAPF przeprowadzono na strukturze złożonej z filtra SAPF (z czterema przewodami i trzema gałęziami z filtrem *L* na wejściu) połączonego równolegle z grupą dwóch filtrów prostych. Autor zaprezentował zalety tej struktury (filtr SAPF zużywał mniej mocy), a także korzyści (poprawę

efektywności filtra PHF) wynikające z podłączenia dławika liniowego między filtrem SAPF a grupą filtrów PHF.

Literatura

- 1 Azebaze M.C.S., Hanzelka Z., Mondzik A.: Different LC power filter topologies effectiveness of reducing voltage distortion, International Conference on Renewable Energies and Power Quality, Hiszpania, Madryt, 4–6 maja 2016 r.
- 2 Azebaze M.C.S., Hanzelka Z.: Hybrid power active filter Effectiveness of passive filter on the reduction of voltage and current distortion, IEEE International Conference on Electric Power Quality and Supply Reliability, Estonia, Tallinn, 29–31 sierpnia 2016 r., s. 91–96.
- 3 Azebaze M.C.S., Hanzelka Z.: Passive harmonic filters. In Power quality in future electrical power systems, 1st ed Zobaa A.F., Shady H.E.A.A., IET the Institution of Engineering and Technology, Londyn, Wielka Brytania, 2017, 77–127.
- 4 Czarnecki L. S., Ginn H.L.: The effect of the design method on efficiency of resonant harmonic filters, IEEE Transactions on Power Delivery, 2005, 20, 1, ss. 286–291.
- 5 Duarte L. H. S., Alves M. F.: The degradation of power capacitors under the influence of harmonics, IEEE on 10th International Conference on Harmonics and Quality of Power, 6–9 października 2002 r.
- 6 Elmathana M. T., Zobaa A. F., Abdel Aleem S. H. E.: Economical design of multiple-arm passive harmonic filters for an industrial firm-case study, IEEE 15th International Conference on Harmonics and Quality of Power (ICHQP), 17–20 czerwca 2012 r.
- 7 Hanzelka Z.: Jakość energii elektrycznej: Część 4 Wyższy harmoniczne napięć i prądów (c.d.), Twelve Electric, http://www.twelvee.com.pl/42767005.php?c=%D0%B5.
- 8 Klempka R., Hanzelka Z., Varetsky Y.: Bank harmonic filters operation in power supply system cases studies, INTECH. 17 kwietnia 2013 r., Power Quality Issues, ed. Zobaa A. F, Rijeka INTECH, ISBN 980-953-307-532-2, ss. 201-23.
- 9 Micheal D., Nirod C.S.: On resonance and frequency response characteristics of electrical circuits, International Journal of Electrical Engineering Education, Manchester, październik 2013 r., 50, 4, ss. 368– 383.
- 10 Muhammad R., Muhammad I., Danang S.: Single tuned harmonic filter as total harmonic distortion (THD) compensator, CIRED, 23rd International Conference on Electricity Distribution, Lyon, 15–18 czerwca 2015 r., s. 0056.
- 11 Sakar S., Abdel A. S. H. E., Balci M. E., Zobaa A. F.: A filter design approach to maximize ampacity of cables in nonsinusoidal power systems, IEEE International Conference, ISNCC, 15–18 czerwca 2015 r., Polska, Łagów, ss. 1–4.
- 12 Sakar S et al.: Optimal design of single-tuned passive filter using response surface methodology, IEEE International Conference, ISNCC, Polska, Łagów, 15–18 czerwca 2015 r.
- 13 Zacharia P., Menti A., Zacharis Th.: Genetic algorithm-based optimal design of shunt compensators in the presence of harmonics, Elsevier, Electric Power Systems Research, kwiecień 2008 r., 78, ss. 728–735.
- 14 Abu-Rubu H., Iqbal A., Guzinski J.: High Performance Control of AC Drives with MATLAB/SIMULINK Models. John Wiley & Sons, Chichester, Wielka Brytania, 2012 r.