

Jurij WARECKI*
Michał GAJDZICA*

KOMUTACJE FILTRÓW HARMONICZNYCH W UKŁADACH KOMPENSACJI MOCY BIERNEJ OBCIĄŻEŃ PRZEMYSŁOWYCH

Praktyka eksploatacji układów kompensacyjno-filtrujących pokazała, że wielokrotne komutacje technologiczne filtrów wyższych harmonicznym zachodzące w układzie są dosyć często przyczyną uszkodzenia elementów składowych obwodu filtrującego. W pracy zbadano wpływ topologii systemu zasilania oraz dokładności strojenia filtrów na wartości uderzeń prądowych oraz przepięć generowanych na elementach układu filtrującego podczas komutacji łączeniowych. Analizę zachodzących procesów przejściowych przeprowadzono w oparciu o model zrealizowany w pakiecie Matlab/Simulink. Porównano ze sobą procesy przejściowe zachodzące w różnych układach kompensacyjno-filtrujących: w pierwszym przypadku moduł filtrów stanowiły wyłącznie jednostki typu LC, w drugim - współpracujący z nimi filtr klasy "C".

SŁOWA KLUCZOWE: bateria kondensatorów, dławik filtrujący, filtr wyższych harmonicznym, filtr klasy "C", kompensator statyczny SVC, proces przejściowy, stany komutacyjne

1. WPROWADZENIE

Obciążenia przemysłowe których większość stanowią zmienne odbiorniki nieliniowe dużych mocy w tym zwłaszcza m.in.: piece i spawarki łukowe, przekształtniki prądu stałego oraz przemiennego, walcownie cechuje duża zmienność poboru mocy biernej w czasie normalnej pracy. Skutkuje to wprowadzeniem do sieci przemysłowych zmian: amplitud, faz i odkształcenia formy napięć znacznie przekraczających dopuszczalne wartości. Ich praca zwiększa również w znaczącym stopniu sumaryczną wartość dyrektywnego współczynnika $\text{tg}\phi$ zakładu przemysłowego. W konsekwencji może to powodować kary umowne za niedotrzymanie deklarowanych parametrów poboru mocy biernej oraz jakościowych energii.

W chwili obecnej opracowano kilka zaawansowanych technik mających na celu zmniejszenie problemów związanych z harmonicznymi odkształceniami

* Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie.

oraz kompensacją mocy biernej w układach przemysłowych [1]. Techniki te są jednak dość skomplikowane oraz zbyt kosztowne, stąd nie mogą konkurować z obecnie instalowanymi aplikacjami jakimi są: baterie kondensatorów oraz filtry wyższych harmoniczných.

W praktyce najczęściej stosowanymi układami są pojedynczo strojone jednostki pasywne typu LC oraz klasy "C" konfigurowane w oparciu o układy proste oraz złożone. Ich wielokrotne komutacje technologiczne zachodzące w przemysłowych systemach zasilania dosyć często powodują uszkodzenia elementów składowych układów filtrujących. Przyczyną tego zjawiska są udary prądowe oraz przepięcia generowane na skutek licznych cykli łączeniowych, których amplitudy znacznie przekraczają wartości znamionowe parametrów układu kompensacyjnego, wynikających z konieczności filtracji oraz kompensacji mocy biernej w danym cyklu technologicznym.

W artykule przeprowadzono analizę porównawczą stanów przejściowych zachodzących w poszczególnych filtrach wyższych harmoniczných układu – kompensacyjno-filtrującego kompensatora statycznego SVC typu FC-TCR, skonfigurowanego w pierwszym przypadku wyłącznie w oparciu o jednostki filtrujące typu LC, a w drugim - o współpracujący z nimi filtr klasy "C" podczas komutacji technologicznych filtru lub grupy filtrów do sieci przemysłowej. Określono wpływ konfiguracji połączeń oraz parametrów systemu zasilania na wartość maksymalną amplitud prądów oraz napięć przejściowych w obwodzie każdej pracującej w określonej topologii jednostki filtrującej.

2. FILTRY W UKŁADACH FC ORAZ ICH KOMUTACJE

Filtry wyższych harmoniczných dla systemu zasilania odbiorników przemysłowych konfigurowane są w taki sposób, aby zminimalizować harmoniczne zniekształcenie napięcia poniżej poziomu wymaganego przez aktualne normy oraz zapewnić odpowiednią kompensację mocy biernej. Uzyskuje się to poprzez odpowiedni dobór elementów baterii kondensatorów oraz dławików filtrujących do rezonansu szeregowego, dla wymaganych częstotliwości filtrowanych harmoniczných. Mając informację na temat zawartości wyższych harmoniczných prądu generowanych w miejscu przewidywanego zainstalowania filtrów, przyjmuje się ich eliminację od najmniejszej do największej występującej harmonicznej [1, 2, 6]. Sprawdza się wartość współczynnika odkształcenia napięcia, aż do uzyskania wymaganej przez normy lub standardy wartości.

Aby zapewnić prawidłową pracę układu filtrującego w sieci zasilającej, każdy system filtrów projektowany jest każdorazowo dla konkretnego punktu zasilania tak, aby zapewnić pożądany przebieg częstotliwościowych charakterystyk impedancyjnych [2, 5]. Najpopularniejszymi filtrami wyższych harmoniczných, stosowanymi w przemyśle są nadal filtry rezonansowe strojone pojedynczo, dla

zadanej wartości częstotliwości rezonansowej, a także filtry szerokopasmowe. W systemach zasilających niespokojne obciążenia (piece łukowe, przemysłowe sieci trakcyjne itp.) coraz częściej znajdują zastosowanie filtry klasy "C" wyposażone w rezystancję tłumiącą. W konkretnych przypadkach, nie wyklucza się jednak zastosowania innych rozwiązań, korzystniejszych ekonomicznie oraz technicznie.

W większości przypadków do pracy z odbiornikiem niespokojnym lub układem przekształtnikowym wymaga się zastosowania złożonego układu filtrującego FC, stąd zachodzi potrzeba instalacji kilku współpracujących ze sobą, odpowiednio dobranych i strojonych jednostek filtrujących [2, 4, 7, 8]. Złożony układ filtrujący FC, który zawiera filtr typu "C" zapewnia wymaganą filtrację wyższych harmoniczych oraz łagodzi wpływ zaburzeń wysokoczęstotliwościowych na sieć.

Ważnym zagadnieniem w przypadku złożonej pracy układu FC jest prawidłowa sekwencja komutacji zainstalowanych filtrów, która powinna przebiegać od najniższej do najwyższej strojonej jednostki filtrującej. Błędna sekwencja na skutek dużej energii zgromadzonej w elementach filtrów, może przyczynić się do powstania niekontrolowanych przepięć o dużych stromościach i amplitudach, co w konsekwencji może skutkować uszkodzeniem elementów obwodu filtrującego a także aparatury sterującej i łączeniowej.

Procesom łączenia samotnych baterii kondensatorów oraz baterii kondensatorów współpracujących w sieci elektroenergetycznej z innymi jednostkami będącymi pod napięciem towarzyszą przepięcia, których maksymalna wartość napięcia przejściowego nie przekracza podwójnej amplitudy napięcia sieci zasilającej w stanie ustalonym. Generowane procesy przejściowe na skutek występującego tłumienia obwodu ulegają szybkiemu wygaszeniu, a wartości przetężeń wynoszą od 5 do 20 amplitudy prądu ustalonego.

W przypadku włączania pojedynczo strojonych filtrów wyższych harmoniczych do wymaganej częstotliwości rezonansowej h_r , amplituda napięcia roboczego baterii kondensatorów względem napięcia szyn systemu zasilania ulega zwiększeniu o wartość współczynnika k :

$$k = \frac{h_r^2}{h_r^2 - 1}.$$

Stąd maksymalna amplituda napięcia przejściowego na zaciskach baterii może przekraczać nawet dwukrotną wartość napięcia znamionowego układu. Poza tym, operacji włączania filtru towarzyszą oscylacje o znacznie niższych częstotliwościach niż ma to miejsce w przypadku łączenia baterii kondensatorów. Zjawisko znajduje swoje uzasadnienie w poziomach dobroci filtru oraz obwodu zasilania. W porównaniu do typowych układów filtrujących, w których stosunek X/R wynosi między: 100 a 150, wartość współczynnika systemu elektroenergetycznego z baterią kondensatorów zawiera się zwykle pomiędzy: 5 a 30, stąd

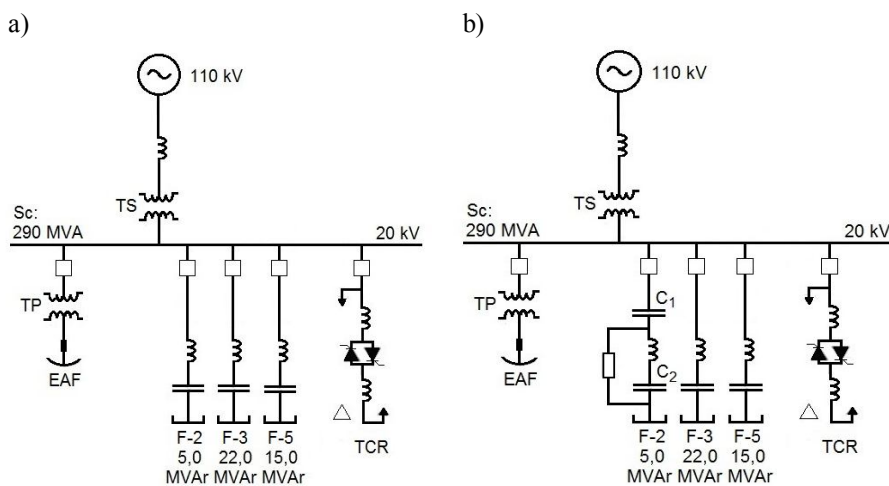
częstotliwość oscylacji oraz ich tłumienia zwiększa się, a stan nieustalony trwa krócej. Dłuższy czas utrzymywania się stanu przejściowego w obwodzie oraz niższa częstotliwość oscylacji powodują większe przebiecia generowane na baterii kondensatorów oraz dławikach filtrujących. Stąd mając na celu zapewnienie ich bezawaryjnej pracy w stanach nieustalonych, prawidłowy dobór poszczególnych parametrów układu filtrującego powinien przebiegać z uwzględnieniem stanów ustalonych oraz przejściowych [3].

3. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU FILTRÓW

Układ przemysłowy przyjęty w badaniach tworzą piec łukowy prądu przemiennego zasilany przez transformator piecowy TP o mocy 50 MVA oraz układ kompensatora bocznikowego SVC zrealizowany w oparciu o dwa podstawowe człony: TCR i FC. Elementy systemu średniego napięcia 20 kV zasilane są z sieci 110 kV poprzez transformator TS. Analizie poddano dwa rodzaje układów filtrujących FC na podstawie filtrów: drugiej (F-2), trzeciej (F-3) oraz piątej (F-5) harmonicznych:

układ A – wszystkie jednostki typu LC, rys. 1a,

układ B – jednostka 2-go rzędu typu "C" współpracująca z układem filtrów prostych LC (F-3 i F-5), rys. 1b.



Rys. 1. Badany system zasilania pieca łukowego:

a) z układem kompensacyjno-filtrującym A, b) z układem kompensacyjno-filtrującym B

Zasilanie systemu, w którym przeprowadzano obserwację stanów przejściowych podczas komutacji układów filtrujących może odbywać się przy pomocy transformatorów systemowych TS o mocach od 80 do 160 MVA. W prezento-

wanych instalacjach przemysłowych, podczas włączeń jednostek układu FC człon TCR pozostaje załączony zapewniając tym samym bilansowanie mocy biernej na szynie średniego napięcia.

Podłączenie poszczególnych jednostek filtrujących F-2, F-3 oraz F-5 typu LC oraz klasy "C" odpowiednio o mocach znamionowych: 5, 22 i 15 MVar do szyny średniego napięcia wykonano poprzez wyłączniki Q1, Q2 i Q3. Wartości poszczególnych elementów układu FC skonfigurowanego wyłącznie w oparciu o filtry pasywne proste oraz współpracujący z nimi filtr typu "C" 2-go rzędu podano w tabelach 1 i 2 poniżej.

Tabela 1. Parametry elementów filtrów pasywnych typu LC

Filtr	Punkt strojenia	Pojemność C [μF]	Indukcyjność L [mH]	Rezystancja R [Ω]	I_{nom} [A]
F-2	1,86	28,30	103,59	0,27	144
F-3	2,79	152,01	8,57	0,07	632
F-5	4,65	113,90	4,12	0,04	433

Tabela 2. Parametry elementów filtru F-2 klasy "C"

Filtr	Obszar strojenia	Pojemność C_1 [μF]	Pojemność C_2 [μF]	Indukcyjność L_2 [mH]	Rezystancja R_T [Ω]	I_{nom} [A]
F-2	1,86	39,79	97,86	103,59	107,53	144

4. SYMULACJA PROCESÓW WŁĄCZENIOWYCH

Celem badań symulacyjnych było wyznaczenie maksymalnych wartości amplitud napięć i prądów przejściowych w obwodach filtrów, pracujących w różnych konfiguracjach i układach zasilania. Dla analizowanego systemu przemysłowego przebadano wpływ możliwych konfiguracji układu FC, mocy zwarciowej układu zasilania oraz zmian strojenia filtrów na charakter przejściowych napięć oraz prądów.

Podczas pracy układu kompensacyjnego możliwe są różne jego konfiguracje, dlatego wpływ topologii połączeń filtrów wyższych harmonicznych oraz dokładności strojenia na zmianę charakteru przejściowych napięć i prądów każdego z elementów układu FC, podczas włączania filtru lub grupy filtrów, przebadano dla trzech typowych schematów komutacyjnych:

Schemat I Włączenie pojedynczego filtru – F2, lub F3, lub F5.

Schemat II Włączenie wszystkich filtrów – F2 + F3 + F5.

Schemat III Włączenie pojedynczego filtru, gdy pozostałe jednostki układu FC

są podłączone do szyny.

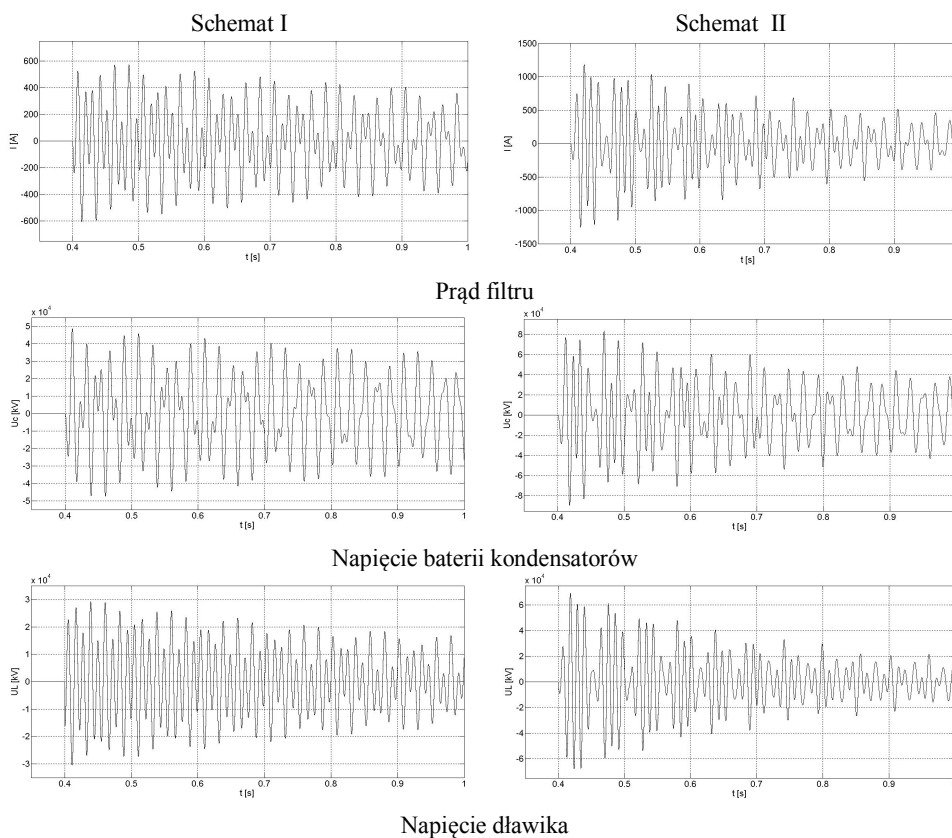
Wariant 1 – włączenie filtru F-2, podczas gdy F3 i F5 pracują;

Wariant 2 – włączenie filtru F-3, podczas gdy F2 i F5 pracują;

Wariant 3 – włączenie filtru F-5, podczas gdy F2 i F3 pracują.

I. Prądy oraz napięcia przejściowe w układzie filtrów A

Na rysunku 2 podano oscylogramy prądów oraz napięć przejściowych dla najbardziej obciążonej fazy obwodu filtru F-2 typu LC, dla schematów komutacyjnych I i II w układzie filtrująco-kompensacyjnym A, z transformatorem systemowym o mocy 80 MVA.



Rys. 2. Prądy i napięcia przejściowe filtru F-2 typu LC, przy strojeniu $h_r = 1,86$ dla układu A

Włączenie filtru harmonicznych w układzie kompensacji mocy biernej obciążeń przemysłowych powoduje oscylacje drugiej harmonicznej w obwodzie jednostki filtrującej. W przypadku włączenia wszystkich jednostek układu FC ob-

serwuje się znacznie większe amplitudy prądu oraz dłuższy czas utrzymywania się stanu nieustalonego w obwodzie filtru. Obserwowana sytuacja wskazuje na istotny wpływ innych filtrów na charakter oscylacji w obwodzie wybranego filtru, w przypadku włączeń technologicznych tego układu filtrów. Charakter rejestrowanych przepięć łączeniowych wynika bezpośrednio z przebiegów prądu, jednak podział napięcia między pojemnością a indukcyjnością filtru zależy od wartości oraz częstotliwości strojenia danego obwodu filtrującego.

Tabela 3. Maksymalne amplitudy prądów i napięć przejściowych układu FC, wyznaczone dla projektowego i dokładnego strojenia, układ A

Strojenie projektowe								
Moc TS, MVA		80	160		80	160	80	160
Filtr	Amplituda prądu filtru			Amplituda napięcia				
					Kondensator		Dławik	
F-2	kA	1,26	1,21	kV	89,59	81,11	69,14	66,55
	j.w. ^(*)	6,20	5,95	j.w. ^(*)	3,91	3,54	10,43	10,03
F-3	kA	3,39	3,65	kV	43,85	43,93	16,47	18,14
	j.w. ^(*)	3,81	4,10	j.w. ^(*)	2,34	2,35	6,86	7,55
F-5	kA	1,98	2,09	kV	40,23	38,57	6,70	7,59
	j.w. ^(*)	3,24	3,42	j.w. ^(*)	2,35	2,25	8,48	9,61
Strojenie dokładne								
Moc TS, MVA		80	160		80	160	80	160
Filtr	Amplituda prądu filtru			Amplituda napięcia				
					Kondensator		Dławik	
F-2	kA	1,34	1,30	kV	82,13	83,12	63,04	65,39
	j.w. ^(*)	6,59	6,39	j.w. ^(*)	3,58	3,62	9,51	9,86
F-3	kA	3,35	3,68	kV	45,29	42,32	14,89	16,63
	j.w. ^(*)	3,76	4,13	j.w. ^(*)	2,42	2,26	6,20	6,92
F-5	kA	2,06	2,24	kV	40,17	38,85	6,00	6,92
	j.w. ^(*)	3,37	3,66	j.w. ^(*)	2,34	2,27	7,59	8,76

(*) Wartość bazowa - amplituda prądu znamionowego oraz amplituda napięcia roboczego dławika oraz kondensatorów danego filtru przy napięciu znamionowym na szynie.

Analiza pozostałych stanów przejściowych w obwodzie filtru drugiej harmoniczej, w układach kompensacji mocy biernej zasilanych z transformatorów systemowych o mocach od 80 do 160 MVA nie wskazuje na znaczącą zmianę charakterystyk stanu przejściowego dla obu schematów komutacyjnych FC, co świadczy o słabym oddziaływaniu indukcyjności zasilania na charakter przejściowy. W tabeli 3 podano maksymalne amplitudy prądów oraz napięć przejściowych uzyskane w badaniach schematów komutacyjnych I i II.

Większe amplitudy oraz ich krotności uzyskujemy w przypadku włączania wszystkich filtrów, niż w przypadku pojedynczej jednostki filtrującej w systemie

przemysłowym. Wzrost liczby jednostek komutujących skutkuje również wydłużeniem czasu utrzymywania się w obwodzie stanów przejściowych. Relatywnie większe krotności prądu układu FC obserwujemy w chwili strojenia elementów filtrów w oparciu o idealną wartość częstotliwości rezonansowej h_r , a także podczas zasilania układu z transformatora systemowego o większej mocy.

Podczas bezpośredniego włączania układu FC do sieci zasilającej możemy obserwować relatywnie większe krotności amplitud prądów przejściowych niż w przypadku włączania transformatora przemysłowego [7, 8].

W przypadku amplitud napięć przejściowych oraz ich krotności generowanych na dławikach i kondensatorach filtrów układu FC analiza wykazała duże podobieństwo do przebiegów powstających na elementach podczas komutacji transformatora przemysłowego [7, 8]. Podczas włączania zarówno pojedynczego filtra jak i grupy filtrów układu FC, którego elementy wyznaczono w oparciu o dokładny punkt rezonansowy, uzyskano większe wartości maksymalne przebiegów niż w przypadku niedostrojonych filtrów. Proces komutacji filtrów wyższych harmonicznych strojonych precyzyjnie oraz zasilanych z transformatora systemowego o większej mocy przebiega nieco dłużej, a oscylacje ulegają wolniejszemu tłumieniu.

Przeprowadzając analizę wariantów pracy układu filtrującego A ze schematu komutacyjnego III stwierdza się, iż jedynie w przypadku włączania filtra F-5 i pracujących pozostałych jednostkach FC wartości maksymalnych amplitud prądów oraz przebiegów przejściowych na elementach jednostki komutującej przekraczają maksymalne amplitudy prądów oraz napięć przejściowych uzyskane podczas włączania tegoż filtra w I i II schemacie komutacyjnym. Uzyskane na podstawie symulacji wartości wraz z odpowiadającymi im krotnościami podano w tabeli 4.

Tabela 4. Maksymalne amplitudy prądów i napięć przejściowych dla III schematu komutacyjnego, wyznaczone dla dokładnego strojenia, układ A – wariant 3

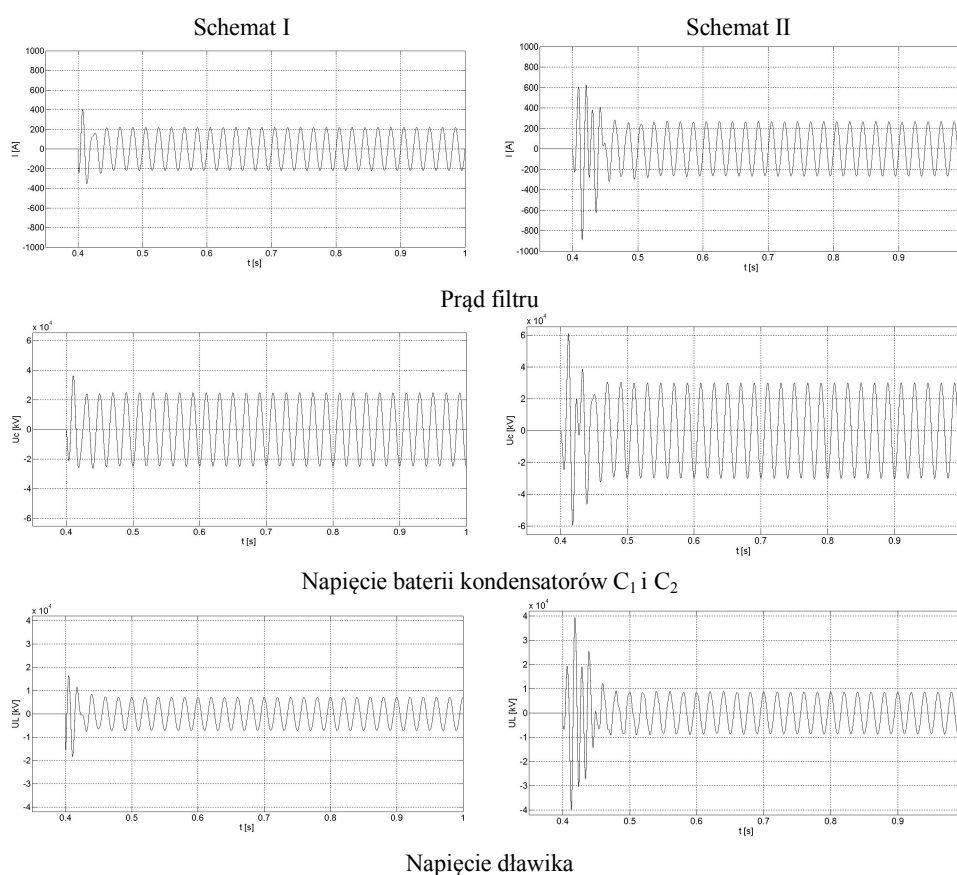
Moc TS, MVA		80	160		80	160	80	160
Filtr	Amplituda prądu filtra			Amplituda napięcia				
	kA				Kondensator		Dławik	
F-2	kA	0,66	0,65	kV	51,92	51,16	29,95	29,48
	j.w. ^(*)	3,25	3,20	j.w. ^(*)	2,26	2,23	4,52	4,44
F-3	kA	3,14	3,12	kV	43,56	41,69	17,79	16,99
	j.w. ^(*)	3,53	3,50	j.w. ^(*)	2,33	2,23	7,40	7,07
F-5	kA	2,93	2,99	kV	42,70	41,05	11,91	12,08
	j.w. ^(*)	4,79	4,89	j.w. ^(*)	2,49	2,40	15,07	15,29

(*) Wartość bazowa - amplituda prądu znamionowego oraz amplituda napięcia roboczego dławika oraz kondensatorów danego filtra przy napięciu znamionowym na szynie.

Z chwilą jednak włączenia filtra F-3 podczas pracy pozostałych jednostek FC (wariant 2) maksymalne amplitudy prądu oraz napięcia rejestrowanego na dławiku F-5 przekraczają wartości uzyskane dla schematów komutacyjnych I i II. Poza tym możemy stwierdzić, iż we wszystkich wariantach włączeń filtrów układu FC zgodnie z III schematem komutacyjnym obserwowany stan przejściowy trwa krócej.

II. Prądy oraz napięcia przejściowe w układzie filtrów B

Na rysunku 3 dla porównania przebiegu stanów przejściowych zaprezentowano oscylogramy prądów oraz napięć najbardziej obciążonej fazy obwodu filtra F-2 klasy "C", uzyskane podczas modelowania schematów komutacyjnych I i II zasilanych z transformatora systemowego o mocy 80 MVA.



Rys. 3. Prądy i napięcia przejściowe filtra F-2 klasy "C", przy strojeniu $h_r = 1,86$ dla układu B

Włączanie układu FC z filtrem klasy "C" wywołuje wzrost amplitudy prądu przejściowego w układzie filtrującym, jednak dzięki rezystancji tłumiącej R_T składowa przejściowa ulega szybszemu wytłumieniu. Obserwowany przebieg stanu przejściowego charakterny jest zarówno dla obwodu filtra 2-go rzędu jak i pozostałych filtrów pasywnych LC. W tabeli 5 omówiono maksymalne amplitudy prądów oraz napięć przejściowych uzyskane dla układu B, w schematach komutacyjnych I i II.

Tabela 5. Maksymalne amplitudy prądów i napięć przejściowych układu FC, wyznaczone dla projektowego i dokładnego strojenia, układ B

Strojenie projektowe								
Moc TS, MVA		80	160		80	160	80	160
Filtr	Amplituda prądu filtru			Amplituda napięcia				
					Kondensator		Dławik	
F-2	kA	0,89	0,85	kV	60,92	58,12	39,91	38,94
	j.w. ^(*)	4,38	4,18	j.w. ^(*)	2,66	2,53	6,02	5,87
F-3	kA	3,42	3,69	kV	45,32	45,20	16,44	18,14
	j.w. ^(*)	3,84	4,14	j.w. ^(*)	2,42	2,40	6,84	7,55
F-5	kA	2,03	2,14	kV	41,15	39,33	6,72	7,26
	j.w. ^(*)	3,32	3,50	j.w. ^(*)	2,40	2,29	8,51	9,19
Strojenie dokładne								
Moc TS, MVA		80	160		80	160	80	160
Filtr	Amplituda prądu filtru			Amplituda napięcia				
					Kondensator		Dławik	
F-2	kA	0,92	0,87	kV	61,45	58,75	37,60	37,36
	j.w. ^(*)	4,52	4,28	j.w. ^(*)	2,68	2,56	5,67	5,63
F-3	kA	3,38	3,71	kV	41,62	42,66	14,80	16,63
	j.w. ^(*)	3,80	4,17	j.w. ^(*)	2,22	2,28	6,16	6,92
F-5	kA	1,93	1,97	kV	41,25	39,79	6,03	6,70
	j.w. ^(*)	3,16	3,22	j.w. ^(*)	2,41	2,32	7,63	8,48

(*) Wartość bazowa - amplituda prądu znamionowego oraz amplituda napięcia roboczego dławika oraz kondensatorów danego filtru przy napięciu znamionowym na szynie

Analiza wyników badań wskazuje, iż podobnie jak w przypadku układu filtrów A podczas zasilania systemu z transformatora o większej mocy znamionowej oraz strojenia układu filtrującego w oparciu o dokładną wartość częstotliwości rezonansowej uzyskujemy nieco większe krotności prądów i przepięć przejściowych generowane na izolacji elementów. W systemach o innej topologii i konfiguracji układu kompensacyjno-filtrującego SVC można spodziewać się innej relacji wartości przejściowych. Komutacja filtrów LC w obwodzie z filtrem klasy "C" dzięki rezystancji R_T skraca czas utrzymywania się stanu przejściowego.

Badania układu B w schematach komutacyjnych III informują, iż podobnie jak dla układu filtrów A, jedynie z chwilą włączania jednostki F-5 podczas pracy układu FC (wariant 3) obserwuje się większe wartości maksymalnych amplitud prądów oraz napięć przejściowych niż ma to miejsce w schematach komutacyjnych I i II. W tym przypadku jednak, we wszystkich analizowanych wariantach pracy obecność rezystancji tłumiącej filtru klasy "C" skraca czas oscylacji prądów przejściowych w układzie filtrującym. Wyznaczone podczas modelowania wartości maksymalnych amplitud prądów i napięć przejściowych oraz odpowiadające im krotności zamieszczone w tabeli 6.

Tabela 6. Maksymalne amplitudy prądów i napięć przejściowych układu komutacyjnego III, wyznaczone dla dokładnego strojenia, układ B – wariant 3

Moc TS, MVA	80		160			80		160	
Filtr	Amplituda prądu filtru				Amplituda napięcia				
	kA				kV	Kondensator		Dławik	
F-2	kA	0,48	0,47		kV	38,52	37,89	22,24	21,18
	j.w. ^(*)	2,36	2,31	j.w. ^(*)	1,68	1,65	3,35	3,19	
F-3	kA	2,63	2,71		kV	43,08	41,21	16,96	16,87
	j.w. ^(*)	2,95	3,04	j.w. ^(*)	2,30	2,20	7,06	7,02	
F-5	kA	2,80	2,88		kV	42,05	40,48	14,68	14,75
	j.w. ^(*)	4,58	4,71	j.w. ^(*)	2,45	2,36	18,58	18,67	

^(*) Wartość bazowa - amplituda prądu znamionowego oraz amplituda napięcia roboczego dławika oraz kondensatorów danego filtru przy napięciu znamionowym na szynie.

W analizowanym układzie połączeń procesom włączania jednostki F-3 również towarzyszą wyższe poziomy amplitudy prądu oraz napięcia dławika filtru F-5 w odniesieniu do wartości przejściowych dla schematów komutacyjnych I i II.

5. WNIOSKI

Analiza uzyskanych wyników badań przykładowego układu kompensacyjno-filtrującego pozwoliła sformułować następujące wnioski i rekomendacje.

Podczas włączeń pojedynczych filtrów układu FC obserwujemy najniższy poziom przepięć na elementach komutującego filtru.

Jednoczesne włączanie filtrów wywołuje najwyższe w porównywanych schematach włączeniowych amplitudy prądów i napięć przejściowych na bateriach kondensatorów i dławikach poszczególnych jednostek, w obu badanych układach FC (A i B) a także najdłuższy czas utrzymywania się stanu przejściowego. Jak wynika z badań, dla filtru drugiej harmonicznej krotność przepięć na baterii jest na poziomie 3,9 a na dławiku filtrującym wynosi ona 10,5. Z kolei krotności przepięć rejestrowanych na bateriach filtru trzeciej i piątej harmonicznej nie przekraczają 2,5, a na dławikach filtrujących wynoszą odpowiednio 7...9,5.

Włączanie poszczególnych filtrów do szyny z podłączonymi innymi filtrami badanego układu FC wykazuje podobne do poprzedniego schematu komutacyjnego wartości przepięć na bateriach filtrów trzeciej i piątej harmonicznej, lecz istotnie niższe krotności przepięć ($< 2,3$) dla baterii filtru drugiej harmonicznej.

W przypadku konfiguracji układu FC z wykorzystaniem filtru klasy "C" obserwujemy istotne obniżenie krotności przepięć przejściowych na bateriach kondensatorów (1,7... 2,7) i dławikach (3,2... 6,0) filtru drugiej harmonicznej, dla wszystkich badanych schematów włączeniowych. Natomiast nie ma to praktycznie wpływu na krotności przepięć na bateriach filtrów trzeciej i piątej harmonicznej. Charakterystyczną cechą tego układu jest również krótki czas zaniżania stanu przejściowego.

Moc zwarciova na szynie z chwilą podłączania układu kompensacyjno-filtrującego oraz dokładność strojenia poszczególnych filtrów nie mają istotnego wpływu na poziom rejestrowanych napięć przejściowych.

LITERATURA

- [1] Vatani M.R., Solati Alkaran D., Sanjari M.J., Gharehpetian G. B., A Practical Method for Optimized Reactive Power Sharing Among Passive Filters, International Conference on Renewable Energies and Power Quality (ICREPQ'14) Cordoba (Spain), 8th to 10th April, 2014, ISSN 2172-038 X, No.12 April 2014.
- [2] Dudley Richard F., Fellers Clay L., Special Design Considerations for Filter Banks in Arc Furnace Installations, IEEE Transactions on industry applications, vol. 33, no. 1, January/February 1997, p.226-233.
- [3] Warecki J., Gajdzica M., Praktyka doboru filtrów harmoniczných dla układów zasilania pieców łukowych, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej, Elektryka no. 2015, s. 45–53.
- [4] Bonner J.A., Hurst W.M., Rocamora R.G., Dudley R.F., Sharp M.R., Twiss J.A., Selecting Ratings For Capacitors And Reactors In Applications Involving Multiple Single-Tuned Filters, IEEE Transactions on Power Delivery, Vol.10, No.1., Jan. 1995, p.547-555.
- [5] Makram Elam B., Subramaniam E.V., Girgis Adly A., Harmonic Filter Design Using Actual Recorded Data, Conference Paper, IEEE 1992, No. 92 B2, p. B2-1 – B2-7.
- [6] Lin Kun-Ping, Lin Ming-hoon, Lin Tung-Ping, An Advanced komputer Code for Single-Tuned Harmonic Filter Design, IEEE Transactions on industry applications, vol. 34, no. 4, July/August 1998, p.640-648.
- [7] Warecki J., Gajdzica M., Analiza procesów podczas załączania transformatora pieca łukowego zasilanego z układu z filtrami wyższych harmoniczných, Zeszyty Naukowe Politechniki Poznańskiej. Elektryka. – 2014 no.79, s. 279-286.
- [8] Warecki J., Gajdzica M., Załączanie transformatora pieca łukowego w sieci z układem filtrów wyższych harmoniczných, Przegląd Elektrotechniczny 2015 R. 91 nr 4, s. 64–69.

**ENERGIZING HARMONIC FILTERS WITHIN INDUSTRIAL
REACTIVE POWER COMPENSATION SYSTEMS**

The practice of operating reactive power compensation systems involving passive multiple, single-tuned filter circuits (FC) has shown, that energizing the configured-in harmonic filter can cause damage of the filter components. Examination and comparison of supply system and FC configuration impact on switching overvoltages and overcurrents under the harmonic filters energizing were carried out. The influence of the filters tuning on transient behavior was analyzed too. The transient analysis has been carried out by simulating two type of FC within Matlab/Simulink software. For the first case the FC was configured solely by LC units, for the second case a "C" type filter was included to the FC.

(Received: 29. 01. 2016, revised: 25. 03. 2016)