

Jurij WARECKI*
Michał GAJDZICA*

PRAKTYKA DOBORU FILTRÓW HARMONICZNYCH DLA UKŁADÓW ZASILANIA PIECÓW ŁUKOWYCH

Praktyka eksploatacji układów filtrujących w złożonych systemach zasilania pieców łukowych prądu przemiennego pokazała, że wielokrotne komutacje technologiczne zachodzące w układzie, dosyć często są przyczyną uszkodzenia elementów składowych układu filtrującego. Generowane amplitudy prądów i napięć wielokrotnie przewyższają wartości znamionowe i ustalone baterii kondensatorów oraz dławików układów kompensacyjnych. W pracy zbadano wpływ topologii systemu zasilania na wartości uderów 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. Korzystając ze standardów oraz norm omówiono praktykę doboru parametrów filtra uwzględniającą stany przejściowe. Porównano parametry kondensatorów oraz dławików obwodów filtrujących wyznaczonych z pozycji zapewnienia ich bezawaryjnej pracy w stanach przejściowych.

SŁOWA KLUCZOWE: filtr wyższych harmoniczných, proces przejściowy, bateria kondensatorów, dławik

1. WPROWADZENIE

Zastosowanie złożonych układów filtrujących wysokiego napięcia znajduje powszechne zastosowanie w systemach zasilania energetyki zawodowej oraz układach przemysłowych. Bezpośrednią przyczyną jest wzrost liczby układów energoelektronicznych w systemach zasilających a także elektrycznych urządzeń łukowych w instalacjach zakładów przemysłowych, powodujących zniekształcenie pobieranych prądów. Podstawowym elementem obwodów kompensacyjnych w systemach zasilających jest kilka pojedynczych gałęzi filtrujących, odpowiednio projektowanych oraz strojonych do częstotliwości rezonansowej. Parametry konfigurowanego układu filtrującego oraz ich schemat połączeń, wynikają z układu zasilającego, mocy oraz charakterystyk obciążenia nieliniowego. Procedura doboru parametrów poszczególnych filtrów uwzględnia poziom wyższych harmoniczných prądu zasilanego obciążenia oraz stosowanego kompensatora mocy biernej (w

* AGH Akademia Górniczo-Hutnicza.

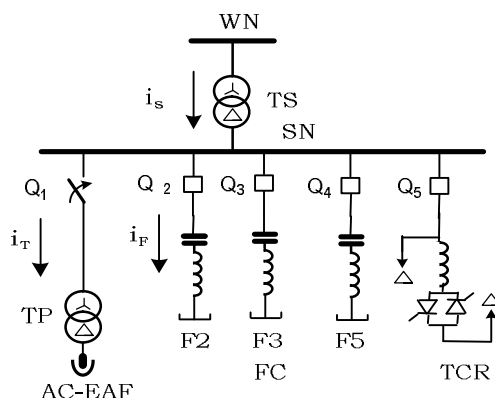
przypadku wykorzystywania energoelektronicznych układów sterowania). Pod uwagę brane są również odchylenia pojemności kondensatorów oraz indukcyjności dławików występujące na skutek warunków środowiskowych i niedokładności technologicznych. W praktyce inżynierskiej przyjmuje się, aby bezpieczny punkt rezonansowy filtru przypadał na obszar 2...10% poniżej wartości dokładnej częstotliwości rezonansowej filtru [1]. Przy tym układ filtrujący spełnia z reguły swoje podstawowe funkcje w systemie: ogranicza wpływ wyższych harmonicznych na sieć zasilającą oraz obniża poziom pobieranej z sieci mocy biernej. Stawiane kryterium doboru filtru nie jest jednak wystarczające, gdyż nie uwzględnia oddziaływania prądów oraz napięć w stanach przejściowych, czego wynikiem są częste przegrzania oraz uszkodzenia izolacji filtru. Prawdopodobieństwo uszkodzeń rośnie, ze wzrostem liczby i czasu utrzymywania w systemie stanów przejściowych.

Uszkodzenia filtrów na skutek stanów przejściowych obserwuje się bardzo często w systemach zasilania pieców łukowych prądu przemiennego wielkiej mocy. Praktyka ich eksploatacji wskazuje, iż na skutek licznych cykli łączeniowych transformatora piecowego wynikających z technologii wytopu stali [3, 4], częstym awariom oraz poważnym uszkodzeniom ulegają elementy składowe układu filtrującego. Przyczyną tego zjawiska są udary prądowe oraz przepięcia generowane w chwili komutacji technologicznych, których amplitudy znacznie przekraczają wartości znamionowe oraz ustalone parametrów układu kompensacyjnego. Zbyt częste uszkodzenia elementów filtru, skutkują postojem urządzenia lub ciągów urządzeń, a tym samym generują duże koszty związane ze stratą produkcyjną.

W artykule przeprowadzono analizę procesów przejściowych zachodzących w obwodzie filtrów, pracujących w określonej konfiguracji układu kompensacyjnego SVC systemu zasilania pieca łukowego. Korzystając ze standardów oraz norm omówiono praktykę doboru parametrów elementów układu filtro-kompensującego z uwzględnieniem stanów ustalonych oraz przejściowych.

2. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU FILTRÓW

Instalację przyjętą w badaniach tworzą układ kompensacyjny SVC wraz z piecem łukowym AC-EAF zasilanym przez transformator piecowy TP o mocy 50 MVA z szyny średniego napięcia SN. Jednostka pieca łukowego prądu przemiennego oraz układ SVC zasilane są z sieci wysokiego napięcia 110 kV poprzez transformator mocy TS. Układ FC (Filter Circuit) występuje jako człon filtracyjno-kompensacyjny SVC. W zależności od struktury (liczby jednostek łukowych) podłączenie całego układu do sieci wysokiego napięcia może odbywać przy pomocy transformatorów systemowych o mocach od 80 do 160 MVA, rysunek 1. Za płynną regulację składowej biernej podstawowej harmonicznej prądu układu kompensacyjnego odpowiada obwód TCR (Thyristor Controlled Reactor).



Rys. 1. Schemat układu kompensacyjnego w systemie zasilania pieca łukowego AC-EAF

Podłączenie jednostek filtrujących F-2, F-3 oraz F-5 o parametrach elementów umieszczonych w tabeli 1 do szyny średniego napięcia, wykonano odpowiednio poprzez wyłączniki: Q2, Q3, i Q4. Podczas włączeń transformatora piecowego, układ kompensatora SVC pozostaje załączony zapewniając tym samym bilansowanie mocy biernej na szynie średniego napięcia.

Tabela 1. Parametry elementów układu FC

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

Wartości średnie harmonicznych prądu pieca łukowego, będące podstawą dla doboru parametrów kondensatorów oraz dławików zainstalowanego układu filtrującego FC, dla stanów ustalonych systemu zasilającego podano tabeli 2.

Tabela 2. Wartości średnie prądów pieca łukowego

Numer harmonicznej	I_h [A]
2,0	105
3,0	460
5,0	315

3. PROCESY PRZEJŚCIOWE W UKŁADACH FILTRUJĄCYCH

W przemysłowych systemach zasilania, których specyfika działania oraz parametry elektryczne wymagają zastosowania złożonej konfiguracji układu FC, występowanie pewnych cykli łączeniowych generuje powstawanie niebezpiecznych napięć przejściowych oraz udarów prądowych na elementach filtrów. Szczególnym przypadkiem tego typu operacji jest włączanie transformatora do szyn zasilających. Zachodzącym podczas komutacji jednostki procesom przejściowym towarzyszą duże amplitudy prądów rozruchowych. Stąd w powiązaniu z dużą liczbą cykli łączeniowych w ciągu doby, jak to można zaobserwować w instalacjach z transformatorem piecowym [2], operacja ta stanowi poważne zagrożenie eksploatacyjne dla filtrów układu FC. Ważnymi czynnikami oprócz wymienionych jest punkt przyłączenia układu przemysłowego do sieci zasilającej a także moc zwarciova determinowana głównie poprzez moc pozorną zainstalowanych transformatorów. Generalnie, wyższa moc znamionowa transformatora systemowego, determinuje powstawanie wyższych amplitud włączeniowych prądów przejściowych, a także wydłuża ich czas oddziaływania w obwodzie filtrującym.

Jak wskazuje przeprowadzona analiza [2, 5, 6] największe zagrożenie dla elementów układu FC powodują właśnie stany przejściowe podczas włączeń transformatorów. W zależności od strojenia poszczególnych filtrów i konfiguracji ich układu, obserwuje się różny charakter stanu przejściowego oraz amplitudy napięć i prądów przejściowych w obwodzie filtrującym.

4. SYMULACJA PROCESÓW PRZEJŚCIOWYCH

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 zwarciovej układu zasilania oraz zmian strojenia filtrów na charakter przejściowych napięć oraz prądów.

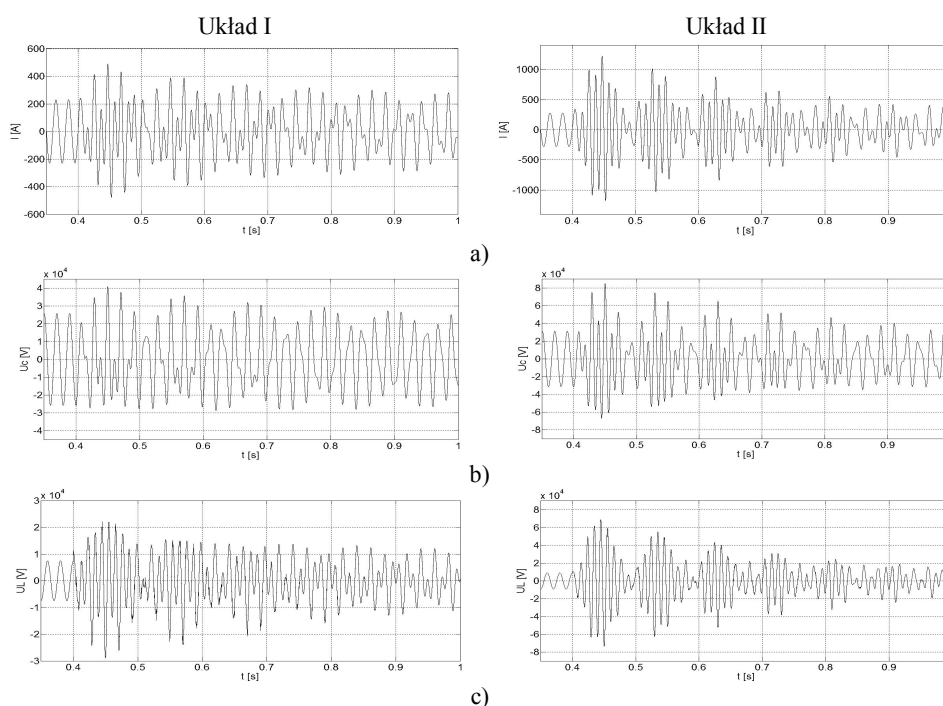
Podczas pracy układu kompensacyjnego możliwe są różne jego konfiguracje, dlatego wpływ topologii połączeń filtrów wyższych harmonicznych oraz punktu strojenia na zmianę amplitud poszczególnych napięć oraz prądów przejściowych każdego z elementów filtru układu FC, podczas włączania transformatora piecowego, przebadano dla dwóch skrajnych topologii, zgodnie z tabelą 3.

Na rysunku 2 podano oscylogramy prądów oraz napięć przejściowych dla najbardziej obciążonej fazy obwodu filtru F-2, podczas włączenia transformatora piecowego, w układzie z transformatorem systemowym o mocy 80 MVA, przy pracy układu z pojedynczym filtrem F-2 oraz zespołem filtrów.

Tabela 3. Topologia połączeń układu FC

Oznaczenie układu	Konfiguracja układu
Układ I	Podłączono pojedynczy filtr – F2, lub F3, lub F5
Układ II	Podłączono wszystkie filtry – F2+F3+F5

Włączenie transformatora powoduje silne oscylacje amplitudy drugiej harmonicznej w obwodzie filtru. W przypadku, podłączenia wszystkich jednostek układu FC, obserwuje się znacznie większe amplitudy prądu oraz dłuższy czas utrzymywania się stanu nieustalonego w obwodzie filtru. Obserwowana sytuacja wskazuje na większą rezonansową czułość obwodu zasilania w przypadku podłączenia wszystkich filtrów układu FC na częstotliwości drugiej harmonicznej. Charakter rejestrowanych przebiegów napięciowych wynika bezpośrednio z przebiegów prądu, jednak podział napięcia między pojemnością a indukcyjnością filtru zależy od wartości oraz częstotliwości strojenia tego filtru. Stąd wniosek, iż składowe wyższych częstotliwości prądów przejściowych generują większe krotności przebiegów na dławikach niż na kondensatorach filtru.



Rys. 2. Oscylogramy: prądów (a) i napięć przejściowych baterii kondensatorów (b) oraz dławika (c) filtru F-2, przy strojeniu $h_r = 1,86$ dla różnej topologii połączeń układu FC

Analiza stanów przejściowych w obwodzie filtra drugiej harmonicznej w układach zasilanych z transformatorów systemowych o mocach od 80 do 160 MVA nie wskazuje na znaczącą zmianę charakterystyk stanu przejściowego dla obu konfiguracji układu FC, co świadczy o słabym oddziaływaniu indukcyjności zasilania na charakter przejściowy. Rezultaty pozostałych badań stanów przejściowych w układach filtrów, podczas włączania transformatora piecowego podano w tabeli 4.

Tabela 4. Maksymalne amplitudy prądów oraz napięć przejściowych w obwodach FC

		Moc TS, MVA							
		80		160		80		160	
Filtr	Amplituda prądu filtru			Amplituda napięcia					
				Kondensator			Dławik		
F2	kA	1,22	1,05	kV	85,01	74,73	73,57	61,56	
	j.w. ^(*)	5,99	5,15	j.w. ^(*)	3,71	3,26	11,10	9,28	
F3	kA	2,13	2,16	kV	31,20	34,55	12,04	13,95	
	j.w. ^(*)	2,38	2,42	j.w. ^(*)	1,67	1,85	5,01	5,81	
F5	kA	1,97	1,89	kV	28,15	25,68	8,59	7,46	
	j.w. ^(*)	3,22	3,09	j.w. ^(*)	1,65	1,50	10,87	9,44	

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

Z analizy maksymalnych amplitud prądów przejściowych wynika, że dla wszystkich filtrów układu FC obserwujemy maksymalne wartości prądu przejściowego, po pewnym czasie od chwili włączenia transformatora piecowego. Fakt ten wynika z właściwości układów na odpowiednich częstotliwościach w stanach przejściowych. W przypadku maksymalnych napięć przejściowych na elementach filtrów, przy względnie umiarkowanych krotnościach przepięć na kondensatorach obserwujemy znacznie wyższe krotności przepięć na izolacji dławików.

Odchylenia parametrów filtrów nie mają bezpośredniego wpływu na wartości prądów rozruchowych transformatorów TS oraz TP. Obserwuje się jednak duże zmiany amplitud prądów przejściowych, ich charakteru oraz zmianę czasu trwania stanu nieustalonego w obwodzie filtru. Zmiana charakteru procesu przejściowego wynika z odpowiednich zmian częstotliwościowych parametrów systemu zasilania. W przypadku innej topologii układu zasilania oraz konfiguracji filtrów wyższych harmonicznych możemy oczekiwać zupełnie innej relacji zmian.

Dla przykładu w tabeli 5, podano wartości maksymalnych amplitud prądów oraz napięć przejściowych w przypadku pojedynczego filtru w układzie FC, zasilanym z transformatora 80 MVA. Przytoczone dane charakteryzują wpływ strojenia układu filtrującego na zmianę prądów oraz napięć przejściowych filtrów.

Tabela 5. Maksymalne amplitudy prądów oraz napięć przejściowych dla filtrów FC

Filtr	Punkt strojenia	Amplituda prądu przejściowego		Element filtru	Amplituda napięcia przejściowego	
		kA	j.w.		kV	j.w.
F2	2,00	0,96	4,20	Dławik	51,04	7,69
				Kondensator	63,83	2,78
F3	3,00	1,70	1,56	Dławik	7,91	3,29
				Kondensator	27,18	1,45
F5	5,00	2,74	3,74	Dławik	10,18	12,88
				Kondensator	27,84	1,62

5. DOBÓR PARAMETRÓW FILTRU Z UWZGLĘDNIENIEM STANÓW PRZEJŚCIOWYCH

Dobór parametrów filtrów układu FC, uwzględniający stany przejściowe odbywa się na podstawie kryteriów wynikających z norm projektowych odnośnie dławików filtrujących [7] oraz standardów [8] i współczynników korygujących [5, 6] dotyczących projektowania baterii kondensatorów energetycznych, tabela 6.

Tabela 6. Kryteria doboru parametrów filtrów oraz baterii kondensatorów układu FC

DŁAWIK	Stan ustalony	- projektowa wartość skuteczna napięcia	$U_R = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} U_h^2}$
		- projektowa wartość skuteczna prądu	$I_R = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$
		- wartość skuteczna prądu zwarciovego	$I_{SC} = \frac{U_{rob}}{X_L \sqrt{3}}$
	Stan przejściowy	- projektowa wartość skuteczna napięcia	$U_R = \frac{U_{pk}}{1,5 \sqrt{2}}$
- projektowa wartość skuteczna prądu		$I_{SC} = \frac{I_{pk}}{\sqrt{2}} \cdot 3$	
BATERIA KONDENSATORÓW	Stan ustalony	- projektowa wartość skuteczna napięcia	$U_c \geq \sum_{h=1}^{\infty} U_h$
		- projektowa wartość skuteczna prądu	$I_c = \sqrt{\sum_{h=1}^{\infty} I_h^2}$
	Stan przejściowy	- projektowa wartość skuteczna napięcia	$U_c = \frac{U_{pk}}{2,5 \sqrt{2}}$

gdzie: U_h, I_h – wartość skuteczna harmonicznej napięcia i prądu, U_{rob} – napięcie robocze systemu zasilania ($U_{rob}=c \cdot U_n$, $c=1,1$), U_{pk}, I_{pk} – maksymalna amplituda napięcia i prądu przejściowego, X_L – reaktancja dławika filtru, podstawowej harmonicznej.

Obliczone wartości parametrów filtrów badanego układu FC, z uwzględnieniem stanów ustalonych i przejściowych zamieszczono w tabeli 7.

Tabela 7. Parametry projektowe (wskazane jako pogrubione) dla analizowanego układu FC

Filtr		Dławik			Bateria kondensatorów		
		I_R [kA]	I_{SC} [kA]	U_R^* [kV]	U_C^* [kV]	I_C [kA]	S_C [MVA]
F-2	Stan ustalony	0,17	0,39	5,23	17,20	0,17	8,68
	Stan przejściowy	0,17	2,59	34,68	21,12	0,17	10,66
F-3	Stan ustalony	0,74	4,47	1,57	14,8	0,74	32,78
	Stan przejściowy	0,74	4,58	6,58	9,77	0,74	21,64
F-5	Stan ustalony	0,50	9,85	0,89	14,3	0,50	21,40
	Stan przejściowy	0,50	4,18	4,05	7,96	0,50	11,94

(*) Wartości fazowe

Analiza maksymalnych wartości projektowych dławika oraz baterii kondensatorów wykazała, iż dobór parametrów filtra wyłącznie na podstawie stanów ustalonych jest niewystarczający dla zapewnienia bezawaryjnej pracy układu kompensacyjnego. Maksymalne amplitudy prądów oraz napięć w obwodzie FC zależą od charakterystyk częstotliwościowych całego systemu zasilania.

6. WNIOSKI

Wykonane badania wskazują, że włączenia transformatora wraz z konfiguracją układu filtrującego mają wpływ na amplitudę oraz charakter zmian prądów i napięć przejściowych układu FC. Sprecyzowane w oparciu o stany przejściowe maksymalne wielkości projektowe mogą zostać wyznaczone wyłącznie na drodze symulacji komputerowej. Fakt ten uzasadnia celowość użycia modelowania podczas procedury doboru parametrów dławika oraz baterii kondensatorów filtra układu FC. Przeprowadzona analiza potwierdza, iż parametry podawane dla stanu ustalonego nie są dostateczne, aby zapewnić bezawaryjną pracę układu filtrującego w systemie zasilania zakładu przemysłowego.

LITERATURA

- [1] Varetsky Y., 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.
- [2] Varetsky Y., Damping transients in compensated power supply system. // Proc. of VI Sc. Conf. „Electrical power networks-SIECI 2008” Poland, Szklarska Poręba, September 10–12, 2008. P.397-404.
- [3] Kruczinin M. A., Sawicki A., Piece i urządzenia łukowe, seria Monografie nr 74, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2010.
- [4] Wciślik S., Elektrotechnika pieców łukowych prądu przemiennego- zagadnienia wybrane, Kielce 2011.
- [5] 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.
- [6] 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.
- [7] ANSI C57.16-1958, “Requirements, terminology and tests codes for dry-type air-core series connected reactors”, New York, IEEE, 1958.
- [8] IEEE Std 18-1992, “IEEE Standard for Shunt Power Capacitors,” New York, IEEE, 1993.

PRACTICE OF SELECTING HARMONIC FILTER RATINGS FOR ARC FURNACE SUPPLY SYSTEMS

The practice of operating multiple single-tuned filters in AC electrical arc furnace power supply systems has shown, that frequent energizing unloaded furnace transformer can cause damage of the filters. To examination of supply and filter system configuration impact on switching transient and dynamic overvoltages and overcurrents, an example of 50 MVA arc furnace unit was chosen. The transient analysis has been carried out by simulating within Matlab/Simulink software. Using ANSI/IEEE Standards paper focuses on the selections of ratings for capacitors and air-core reactors used in multiple single-tuned harmonic filters configurations. Comparison of filter reactor and capacitor bank design based on steady state operation and transformer energizing was shown.