

Załączanie transformatora pieca łukowego w sieci z układem filtrów wyższych harmonicznyc

Streszczenie. Wielokrotne komutacje technologiczne transformatorów piecowych mogą stać się przyczyną uszkodzenia transformatora systemowego i innych urządzeń sieci zasilającej. Na przykładzie modelu jednostki piecowej z układem SVC zrealizowanego w pakiecie Matlab/Simulink, zbadano procesy przejściowe w obwodach systemu zasilającego podczas włączenia transformatora pieca łukowego. Omówiono wpływ charakterystyk impedancyjnych systemu zasilającego na charakter zachodzących procesów oraz wartości przepięć i przetężeń na kondensatorach i dławikach filtrów SVC.

Abstract. The practice of operating AC electrical arc furnace power supply systems has shown that frequent energizing unloaded furnace transformer can cause damage of the system transformer and other system equipment. To examination of the transients under furnace transformer energizing a model of an arc furnace unit consisting SVC within Matlab/Simulink software was developed. The supply system impedance characteristics impact on the transient nature and on the overvoltage and overcurrent magnitudes of the SVC filter capacitors and reactors has been shown. (Energizing arc furnace transformer in power grid involving harmonic filter installation).

Słowa kluczowe: prąd rozruchowy, transformator piecowy, filtr wyższych harmonicznyc, tyrystorowy kompensator statyczny

Keywords: inrush current, arc furnace transformer, harmonic filter, static VAR compensator

Wprowadzenie

Piece łukowe prądu przemiennego AC - EAF (Alternating Current Electric Arc-Furnace) zaliczane są do odbiorników skupionych dużej mocy, o nieliniowych charakterystykach dynamicznych. Praktyka eksploatacji pieców łukowych wielkiej mocy wykazuje, że urządzenia układów ich zasilania ulegają częstym awariom na skutek przetężeń oraz przepięć komutacyjnych [1,2,3]. Zmiany mocy elektrycznej podczas wytopu zależą głównie od jakości wsadu, dokładności pracy układu sterowania a także od zachodzących procesów cieplnych. Dane statystyczne informują, że w ciągu doby liczba komutacji transformatora piecowego wynosi średnio 20-40 cykli łączeniowych. Technologia topienia metalu w piecach łukowych prądu przemiennego obejmuje trzy podstawowe, uogólnione etapy technologiczne: 1) roztopianie wsadu, 2) świeżenie kąpieli oraz 3) rafinowanie kąpieli. Każde stadium charakteryzuje określona zmiana mocy czynnej w czasie oraz liczba wymaganych komutacji, z tendencją do jej zmniejszania oraz stabilizacji procesów w ostatnim z cykli. Pierwsze stadium w chwili roztopiania wsadu charakteryzuje się największą mocą elektryczną, a piec w tym czasie zużywa 60-80% całej energii elektrycznej cyklu technologicznego. W kolejnych obserwuje się mniejsze wahania mocy spowodowane stabilniejszym paleniem łuku elektrycznego [4, 5].

Mając na celu zapewnienie kompatybilności elektromagnetycznej pieców łukowych prądu przemiennego z układami zasilania stosuje się różne rozwiązania techniczne. Najskuteczniejszą poprawę jakości energii elektrycznej w sieci zasilającej zapewniają tyrystorowe kompensatory statyczne SVC (Static Var Compensator). Eksploatacja układów zasilania wykorzystujących SVC wykazała, że zapewniają one dynamiczną kompensację mocy bierniej, wprowadzają symetryzację napięć i prądów a także zmniejszają wahania napięcia. Z kolei wykorzystanie w układach SVC filtrów wyższych harmonicznyc, skutkuje ograniczeniem zniekształcenia napięć w sieci zasilającej [6].

Zewnętrzne zasilanie pieców łukowych prądu przemiennego realizuje się z wykorzystaniem napięcia z zakresu 6...400kV, w zależności od ich pojemności wsadowej oraz stanów pracy. W przypadku jednego lub kilku pieców o małej pojemności wsadowej w granicach zakładów przemysłowych, stosuje się napięcia 6 lub 10 kV. Zasilanie jednostek o średniej lub dużej pojemności

wsadowej (20...100 Mg), lub dużej liczby pieców łukowych o małej pojemności wsadowej, realizuje się poprzez stosowanie napięcia z zakresu 35...220 kV. Z kolei zasilanie pieców łukowych prądu przemiennego największej mocy (o pojemności wsadowej 200...400 Mg), pracujących w topologii promieniowej prowadzi się napięciem między 110 a 400 kV, przez co ograniczony zostaje ich negatywny wpływ na system elektroenergetyczny. Zasilanie pieców łukowych poprzez pośrednie podstacje rozdzielcze realizowane jest typowym napięciem dla danego kraju, co wynika z budowy oraz prowadzonej technologii wytopu stali [5]. Eksploatacja jednostek piecowych różnej mocy, pracujących w złożonych układach zasilania, wymaga tym samym stosowania bardziej lub mniej skomplikowanych układów filtrujących o różnych, możliwych stanach pracy oraz układów SVC [7,8,9].

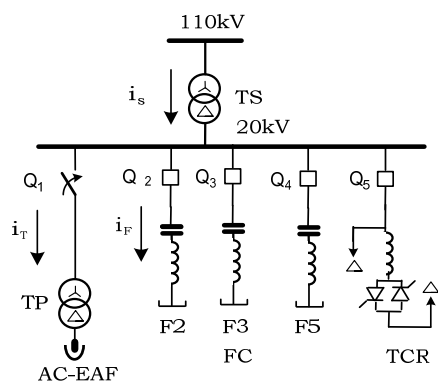
Celem artykułu jest analiza stanów przejściowych w obwodach poszczególnych filtrów, pracujących w różnych układach roboczych jednostki filtro-kompensacyjnej, podczas włączeń technologicznych transformatora piecowego oraz omówienie wpływu układu zasilającego na charakter procesu przejściowego. Modelowanie układu zasilania oraz systemu kompensacyjno-filtracyjnego przeprowadzono w oparciu o pakiet Matlab/Simulink. Funkcje dostępne w programie, pozwoliły na przeprowadzenie szczegółowych analiz oraz obserwacji złożonych procesów przejściowych zachodzących w układzie zasilania elektrycznego pieca łukowego.

Charakterystyka systemu zasilania elektrycznego pieca łukowego

Wybierając wariant zasilania pieca łukowego dużej mocy, uwzględnia się następujące czynniki: moc zwarciowa w punkcie przyłączenia pieca lub grupy pieców, liczbę oraz ich typ, moc znamionową transformatorów piecowych wraz z dysponowanymi poziomami napięć zewnętrznego zasilania elektrycznego, charakterystyki częstotliwościowe sieci elektrycznej względem węzła przyłączenia a także środki polepszenia kompatybilności elektromagnetycznej z układami zasilania elektrycznego. Realizacja topologii połączeń systemu przemysłowego między punktem przyłączenia transformatora systemowego a transformatorów piecowych, wynika bezpośrednio z układu hutniczego, mocy oraz liczby pieców łukowych. Sposób połączeń wewnętrznych w chwili komutacji pieca

łukowego, ma bezpośredni wpływ na wartość amplitud prądów łączeniowych oraz charakter zachodzących procesów niestabilnych w układzie.

Wszystkie wymienione czynniki wymagają badań, opracowania efektywnych środków sterowania stanami quasi-ustalonymi oraz komutacyjnymi układami zasilania pieca łukowego. Z kolei badania eksperymentalne zachodzących procesów elektromagnetycznych wymagają znacznych nakładów czasowych oraz stosowania odchyłek od rygorów technologicznych. Część z nich jest niebezpieczna dla wyposażenia elektroenergetycznego lub w ogóle nie możliwa do zrealizowania. Z tego też powodu korzysta się z metod modelowania matematycznego oraz symulacji komputerowych. Toteż symulację procesów włączania transformatora piecowego oraz zbadanie wpływu różnych kombinacji układu kompensacyjnego na przebiegi przejściowe, zrealizowano z wykorzystaniem ekwiwalentnego układu zasilania z rysunku 1.



Rys. 1. Schemat ideowy modelowanego układu zasilania pieca łukowego AC-EAF z udziałem układu kompensacyjnego

Układ przemysłowy pieca łukowego prądu przemiennego zasilany jest z sieci wysokiego napięcia 110 kV poprzez transformator systemowy TS, o układzie połączeń Yd11. Instalację zasilania AC-EAF tworzą: szyna średniego napięcia 20kV, zasilająca układ kompensacyjny, oraz transformator piecowy TP o mocy 50 MVA o grupie połączeń Yd1. W zależności od struktury układu przemysłowego oraz liczby podłączonych pieców łukowych zasilanie całego układu może odbywać się z transformatorów TS o mocach od 80 do 160 MVA.

Płynną kompensacja mocy biernej zapewniana jest przy pomocy układu nadążnego kompensatora statycznego typu SVC. Tworzy go dwa rodzaje elementów: regulowane tyrystorowo dławiki TCR (Thyristor Controlled Reactor) oraz układ stałych filtrów wyższych harmonicznych FC (Filter Circuit). Moc bierna pracującego układu SVC wynika z wypadkowej mocy filtrów oraz dławika, a jej regulacja odbywa się w sposób ciągły poprzez sterowanie kątem zapłonu tyrystorów TCR.

Modelowany układ filtrujący FC badanego systemu zasilania zrealizowano w oparciu o filtry F2, F3, F5. Moc układu FC jest sumą mocy biernych poszczególnych filtrów pasywnych: $Q_{F2}+Q_{F3}+Q_{F5} = Q_{FC}$. Z kolei dobór parametrów poszczególnych filtrów wyższych harmonicznych odbywa się z uwzględnieniem poziomu wyższych harmonicznych pieca łukowego i TCR. Przy tym należy brać pod uwagę odchylenia pojemności kondensatorów oraz indukcyjności dławików filtrów występujące wskutek warunków środowiskowych i niedokładności technologicznych. W przypadku większości kondensatorów przyjmuje się zmiany wartości pojemności z powodu warunków środowiskowych na poziomie $\pm 2\%$ oraz $(-5\%...+10)\%$ - z powodów technologicznych. W konsekwencji dopuszcza się zmiany

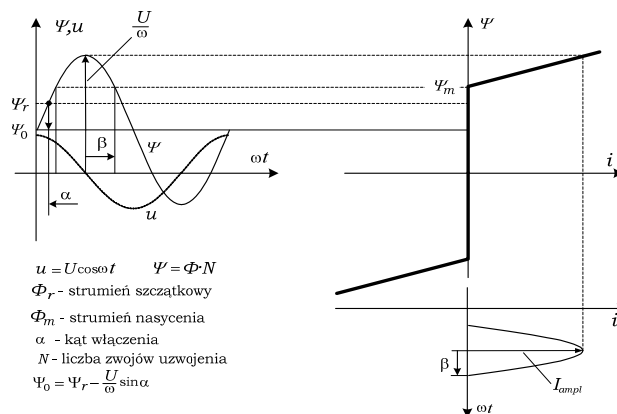
pojemności filtru w zakresie $-7\%...+12\%$. W przypadku dławików filtracyjnych bez rdzenia ferromagnetycznego przyjmuje się odchyłkę technologiczną w zakresie $\pm 3\%$. Stąd możliwy zakres odchylenia punktu rezonansowego filtru od wyznaczonej dokładnej wartości h mamy w przedziale $0,93h \leq h_r \leq 1,05h$. W praktyce inżynierskiej przyjmuje się, aby bezpieczny punkt rezonansowy filtru h_r przypadał na obszar $2...10\%$ poniżej wartości dokładnej częstotliwości rezonansowej filtru h . Prowadzi to do przesuwania punktów rezonansowych charakterystyk impedancyjno-częstotliwościowych całego systemu zasilającego w kierunku niższych wartości. Eksploatacja układów filtrujących w warunkach przemysłowych, strojonych powyżej obszaru bezpiecznego dowiodła, że wraz z upływem czasu oraz wskutek postępującego starzenia elementów, pracujące układy stają się przyczyną rezonansów prądowych dla częstotliwości innych harmonicznych. Wprowadzone częstotliwości strojenia poszczególnych filtrów, uwzględniające możliwy zakres odchyłek wraz z parametrami elementów umieszczono w tabeli 1.

Tabela 1. Parametry projektowe elementów układu FC

Filtr	Punkt rezonansu	C μF	L mH	R Ω	I_{nom} A	Q_{nom} MVar
F2	1,86	28,30	103,59	0,27	144,34	5,00
F3	2,79	152,01	8,57	0,07	632,49	22,00
F5	4,65	113,90	4,12	0,04	433,01	15,00

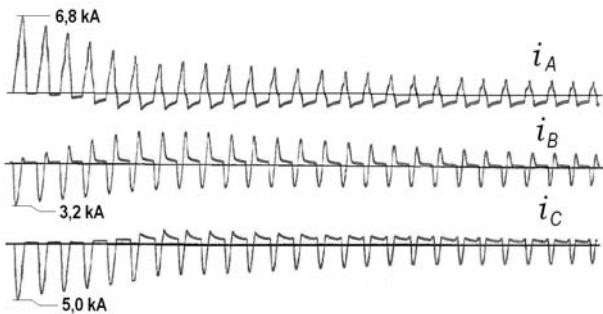
Prąd rozruchowy transformatora piecowego

Transformatory średniej mocy przeznaczone do stalowniczych procesów elektrotermicznych charakteryzują typowe wartości parametrów: moc znamionowa - $15...55$ MVA oraz napięcie zwarcia - $3,1...8,2\%$ [4]. Komutacjom technologicznym transformatora piecowego zasilającego elektryczny piec łukowy towarzyszą duże amplitudy prądów włączania. Ich wartości przewyższają wartości znamionowe prądów obciążenia $5...7$ krotnie. Przyczyną powstawania przetężeń podczas włączania transformatorów do sieci zasilającej, jest głębokie nasycenie rdzeni układów magnetycznych, prowadzące do wzrostu prądów magnesowania. Najgorszym przypadkiem, kiedy mówi się o ekstremalnych warunkach włączania jest stan, w którym wartość strumienia magnetycznego przekracza ponad dwa razy poziom jaki wynika z normalnych warunków pracy: $\Phi_{max} = (2,2...2,3)\Phi_{ust}$. W zaistniałej sytuacji uzyskujemy głębokie nasycenie nieliniowego obwodu magnetycznego, co z kolei przyczynia się odpowiednio do zwiększania amplitudy prądu magnesowania (rysunek 2).



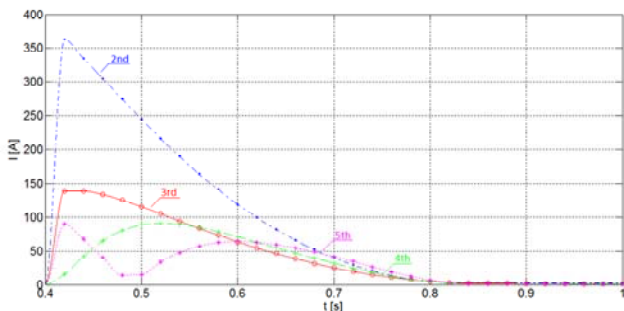
Rys. 2. Powstawanie prądu rozruchowego transformatora

Prąd rozruchowy w czasie włączania jednostek transformatorowych pieców łukowych, oprócz dużej amplitudy charakteryzują: jednokierunkowość, osiągnięcie wartości maksymalnej w pierwszej połowie okresu po załączeniu oraz przejściowe oddziaływanie na układ do chwili aż rdzeń transformatora nie osiągnie pełnego, nominalnego namagnesowania. Przykładowy oscylogram prądu włączania trójfazowej jednostki piecowej o mocy 50 MVA, zasilanej z transformatora systemowego o mocy 160 MVA, uzyskany z pomiarów, dla analizowanego układu połączeń z rysunku 1, zamieszczono na rysunku 3.



Rys. 3. Prądy włączania transformatora piecowego, otrzymane z pomiarów

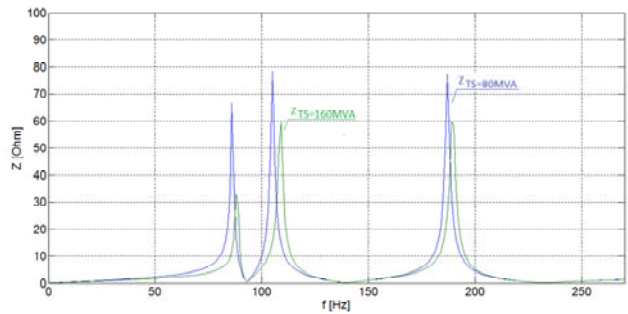
Prąd włączania cechują również wyższe harmoniczne, których zmiana utrzymuje się aż do chwili osiągnięcia przez prąd magnesujący stanu ustalonego. Zmianę amplitud kluczowych wyższych harmonicznych na podstawie analizy Fouriera dla prądu rozruchowego fazy A przedstawia rysunek 4.



Rys. 4. Zmiana wyższych harmonicznych prądu podczas włączania jednostki piecowej 50 MVA

Mając na celu ocenę wpływu mocy transformatora systemowego TS na zmianę wypadkowych charakterystyk częstotliwościowych systemu, wyznaczono impedancje wypadkowe symulowanego układu dla przypadku zasilania instalacji przemysłowej z transformatorów systemowych o mocach 80 i 160 MVA. Przeprowadzone badania obejmowały możliwe podczas eksploatacji układy FC - zarówno pojedynczych jednostek jak i grupę wszystkich pracujących filtrów. W tym przeanalizowano charakterystyki tych układów zasilanych z transformatorów systemowych o różnych mocach. Dla przykładu na rysunku 5 przedstawiono uzyskane charakterystyki częstotliwościowe dla przypadku pracy pełnej konfiguracji układu filtrującego.

Prezentowane charakterystyki informują, jak zmienia się wartość sumarycznej impedancji układu zasilania przy zmianach częstotliwości prądu przepływającego w systemie. W poliharmonicznym warunkach mogą one być użyte do oceny tendencji zmian napięć poszczególnych harmonicznych, w czasie oddziaływania analizowanego widma harmonicznych.



Rys. 5. Porównanie charakterystyk częstotliwościowych układu zasilanego z transformatorów systemowych różnych mocy

Analiza procesów włączeniowych

A. Wpływ topologii układu zasilania na charakter stanów przejściowych

Wartości prądów włączania transformatora piecowego zależne są od mocy zwarciowej na szynach przyłączenia jednostki piecowej. Na moc zwarciową układu przemysłowego w największym stopniu ma wpływ moc transformatora zasilającego. Komutację transformatora TP zasilającego elektryczny piec łukowy zrealizowano w układzie zasilania z rysunku 1. Przyjęto, że w chwili włączania nie uczestniczy układ TCR, a zadeklarowany model transformatora piecowego uwzględnia następujące resztkowe wartości namagnesowania:

faza rdzenia	A	B	C
Φ_r , j.w.	0,6	0	-0,6

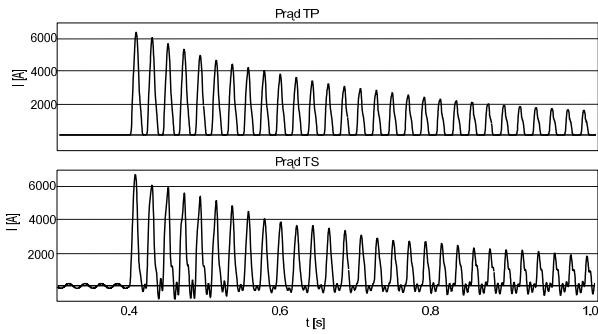
Odpowiada to wysokiej wartości nasycenia rdzenia układu magnetycznego jednostki trójfazowej w chwili rozruchu. Wartości uzyskanych maksymalnych amplitud prądów rozruchowych transformatora piecowego, zasilanego z transformatorów systemowych o różnych mocach znamionowych umieszczono w tabeli 2.

Tabela 2. Maksymalne amplitudy prądów rozruchowych

Moc znamionowa transformatora TS, MVA	80	160
Amplituda prądu transformatora TP, kA	5,78	6,82

Z punktu widzenia prądów włączeniowych badanej topologii zasilania pieca łukowego, maksymalne amplitudy prądu początkowego obserwujemy w przypadku układu z transformatorem systemowym dużej mocy. Mniejsza wartość indukcyjności wypadkowej toru zasilania, w połączeniu z nasyceniem rdzenia transformatora piecowego, prowadzi do wzrostu wartości amplitud prądów przejściowych.

Przeprowadzając analizę procesów włączeniowych określono również wpływ zadeklarowanego układu SVC na charakter prądu włączeniowego. W tym przypadku podczas stanu przejściowego pracuje układ regulacji TCR. Uwzględniając w modelu powyższe warunki namagnesowania resztkowego i oddziaływanie układu kompensacyjnego uzyskano odpowiednie oscylogramy dla procesu włączeniowego. Na rysunku 6 zamieszczono oscylogramy prądów fazy A systemowego ($S_{TS} = 160$ MVA) i piecowego transformatora, które charakteryzują proces. Z przeprowadzonej analizy uzyskanych oscylogramów wynika, że układ kompensacyjny SVC w stanie przejściowym powoduje dodatkowe zniekształcenie prądów transformatora systemowego wskutek zmiany charakterystyk częstotliwościowych systemu zasilania.



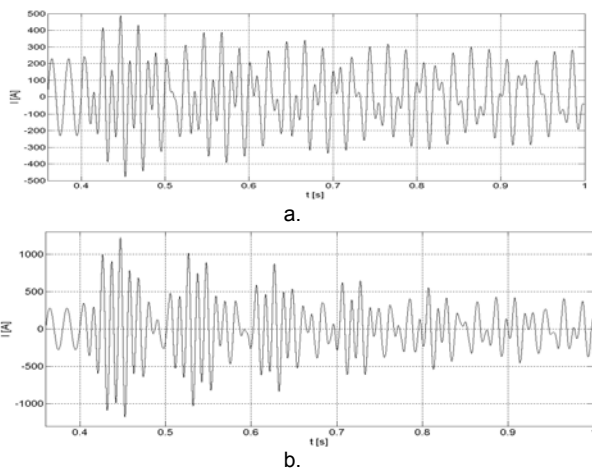
Rys. 6. Prądy przejściowe transformatorów po komutacji transformatora piecowego

W celu zbadania oddziaływania konfiguracji filtrów wyższych harmonicznych na procesy przejściowe podczas włączania transformatora piecowego, przebadano poszczególne układy pracy zgodnie z tabelą 3.

Tabela 3. Topologia połączeń układu FC

Nazwa układu	Konfiguracja układu
układ A	Podłączono pojedynczy filtr – F2, lub F3, lub F5
układ B	Podłączono wszystkie filtry – F2+F3+F5

Na rysunku 7 zamieszczono przykładowe oscylogramy prądów chwilowych wybranej fazy filtru F2, podczas włączania transformatora piecowego zasilanego z transformatora systemowego o mocy 80 MVA, przy pracy układu z pojedynczą jednostką F2 (a) oraz zespołem filtrów w układzie B (b). Można widocznie zaobserwować inny charakter procesu przejściowego oraz wartości amplitud prądu w obu przypadkach. Włączenie pobudza oscylacje amplitudy drugiej harmonicznej w obwodzie filtru, która ma decydujący wpływ na charakter procesu. W normalnym układzie SVC, gdy w obwodzie FC są podłączone wszystkie filtry, stan przejściowy charakteryzują znacznie większe amplitudy prądu oraz dłuższy czas utrzymywania się stanu nieustalonego. Wskazuje to na większą rezonansową czułość obwodu zasilania z układem B na częstotliwości drugiej harmonicznej.



Rys. 7. Prądy przejściowe filtru F2 w układach A (a) i B (b)

Bardzo zbliżone charakterystyki stanu przejściowego otrzymujemy podczas włączania transformatora piecowego zasilanego z transformatora systemowego o mocy 160 MVA dla obu układów FC, co wskazuje na nieznaczny wpływ wyznaczonych zmian sumarycznej indukcyjności zasilania na charakter przejściowych prądów drugiej harmonicznej.

Natomiast przeprowadzona analiza oscylogramów uzyskanych podczas badań wskazuje, że stany przejściowe w obwodach filtrów F3 i F5 są mniej zależne od konfiguracji układu filtrów FC i mocy znamionowej transformatora systemowego. Oznacza to, że dla trzeciej i piątej harmonicznej w badanych częstotliwościowych przedziałach, występują umiarkowane zmiany rezonansowych właściwości obwodu zasilania. Rezultaty badań stanów przejściowych w obwodach filtrów, przy włączaniu transformatora piecowego omówiono w tabeli 4.

Tabela 4. Maksymalne amplitudy prądów w obwodach układu FC

Moc TS, MVA		80		160	
Układ połączeń FC		A	B	A	B
Amplituda prądu F2	kA	0,49	1,22	0,48	1,05
	j.w. ^(*)	2,41	5,99	2,36	5,15
Amplituda prądu F3	kA	2,11	2,13	1,80	2,16
	j.w. ^(*)	2,37	2,38	2,02	2,42
Amplituda prądu F5	kA	1,95	1,97	1,44	1,89
	j.w. ^(*)	3,19	3,22	2,35	3,09

^(*) Wartość bazowa - amplituda prądu znamionowego

Dla wszystkich filtrów obserwujemy występowanie maksymalnych wartości prądu przejściowego, po pewnym czasie od chwili włączenia transformatora piecowego. Wynika to z właściwości układów na odpowiednich częstotliwościach w stanach przejściowych. W tym oczywistym jest fakt, że „ocena statyczna” na podstawie charakterystyk częstotliwościowych (jak na rysunku 4) i wartości harmonicznych składowych prądów włączenia transformatora, nie może być brana pod uwagę podczas analizy liczbowej amplitud prądów przejściowych w obwodach filtrujących.

B. Wpływ odchyień parametrów filtrów na procesy przejściowe

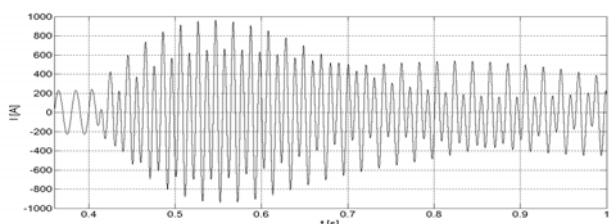
Badając wpływ odchyień parametrów kondensatorów i dławików filtrów na zachodzące w modelowanym układzie procesy przejściowe, określono skutki wynikające ze zmian wartości częstotliwości rezonansowej filtru na wartości prądów oraz charakter procesu. Wartości tak wyznaczonych parametrów układu FC, z idealnie sparametryzowanym dla każdego filtru punktem rezonansowym f_r zamieszczono w tabeli 5.

Tabela 5. Parametry elementów układu FC wyznaczone w oparciu o dokładną wartość częstotliwości rezonansowej

Filtr	Punkt rezonansu	C μ F	L mH	R Ω	I_{nom} A	Q_{nom} MVA _r
F2	2,0	29,86	84,94	0,24	144,34	5,00
F3	3,0	155,05	7,27	0,06	632,49	22,00
F5	5,0	114,64	3,54	0,03	433,01	15,00

Na rysunku 8 zaprezentowano zmianę prądu przejściowego fazy A filtru F2 strojonego do precyzyjnej wartości częstotliwości rezonansowej i pracującego jako pojedynczy filtr w układzie zasilanym z transformatora systemowego o mocy znamionowej 80 MVA. Odchylenia parametrów filtrów nie mają bezpośredniego wpływu na wartości prądów rozruchowych transformatora piecowego oraz systemowego. Natomiast obserwuje się duże zmiany amplitud prądów przejściowych oraz zmianę charakteru i wydłużenie czasu trwania stanu nieustalonego w obwodzie filtru. Strojenie do częstotliwości rezonansowej powoduje wzrost wartości amplitud prądów przejściowych filtrów F2 i F5 badanego układu FC. W przypadku filtru F3

obserwujemy sytuację odwrotną, gdzie strojenie oparte o dokładną wartość częstotliwości rezonansowej, wywołuje obniżenie wartości amplitud prądów przejściowych.



Rys. 8. Prąd przejściowy filtra F2, strojenie $h_r = 2,00$

W tabeli 6 porównano ze sobą maksymalne amplitudy prądów przejściowych filtrów w układzie FC, które występują przy strojeniu projektowym oraz podczas odchyłek parametrów, powodujących dokładną częstotliwość rezonansową h_r .

Tabela 6. Maksymalne amplitudy prądów przejściowych układu FC, wyznaczone dla projektowego i dokładnego punktu strojenia

Filtr	Punkt strojenia, h_r	Amplituda prądu	
		kA	j.w.
F2	1,86	0,49	2,14
	2,00	0,96	4,20
F3	2,79	2,11	1,92
	3,00	1,70	1,56
F5	4,65	1,95	2,75
	5,00	2,74	3,74

Na podstawie uzyskanych danych można wnioskować, iż zmiana charakteru procesu przejściowego przy eksploatacyjnych zmianach parametrów kondensatorów i dławików filtrów, odbywa się zgodnie z odpowiednimi zmianami częstotliwościowych właściwości obwodu zasilania, spowodowanymi występującymi odchyleniami parametrów. W innej topologii układu zasilania oraz innej konfiguracji filtrów wyższych harmonicznych możemy oczekiwać zupełnie innej relacji zmian.

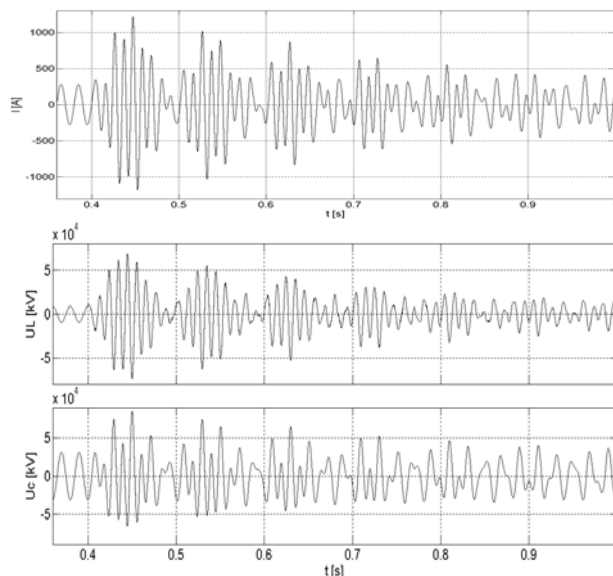
C. Przepięcia powstające na elementach filtrów

W toku projektowania filtrów dobór parametrów ich kondensatorów i dławików przeprowadza się na podstawie charakterystyk ustalonych i przejściowych stanów możliwych układów pracy całego systemu [10]. W tym celu podczas komutacji transformatora piecowego określono wartości oraz charakter przepięć na elementach filtrów pracujących w przyjętych konfiguracjach. Charakter napięcia przejściowego powiązany jest z przebiegami prądu, lecz podział tego napięcia między pojemnością a indukcyjnością filtra zależy od ich wartości oraz częstotliwości prądu przejściowego. Dlatego składowe wyższych częstotliwości napięcia przejściowego powodują większe krotności przepięć na dławikach niż na kondensatorach filtrów. Omówione szczegóły ilustrują oscylogramy z rysunku 9 dla napięć chwilowych zadanej fazy dławika U_L oraz baterii kondensatorów U_C filtra F2, pracującego w układzie zasilanym z transformatora systemowego o mocy 80 MVA. Na rysunku zamieszczono też oscylogram prądu procesu przejściowego filtra, dla ilustracji charakteru podziału napięć przejściowych.

Wartości maksymalnych amplitud napięć przejściowych na elementach filtrów w czasie komutacji transformatora piecowego podano w tabelach 7 i 8 poniżej.

Analiza przepięć generowanych w stanie przejściowym na dławikach oraz kondensatorach filtrów badanych konfiguracji układu FC wykazała, że przy względnie umiarkowanych krotnościach przepięć na kondensatorach

obserwujemy znacznie wyższe krotności przepięć na izolacji dławików. Następnym czynnikiem, który ma wpływ tak na krotności przepięć na kondensatorach jak i na krotności przepięć na izolacji dławików, jest to rezonansowa czułość obwodu dla pewnej częstotliwości widma. Możemy obserwować to zjawisko dla drugiej harmonicznej badanego systemu zasilania ze wszystkimi podłączonymi filtrami FC (układ B) na podstawie danych tabeli 7 i 8.



Rys. 9. Prąd i napięcia przejściowe filtra F2 dla układu B

Tabela 7. Maksymalne amplitudy napięć na kondensatorach FC

Moc TS, MVA	Układ połączeń FC	80		160	
		A	B	A	B
Amplituda napięcia F2	kV	40,83	85,01	40,77	74,73
	j.w. ^(*)	1,78	3,71	1,77	3,26
Amplituda napięcia F3	kV	30,30	31,20	28,73	34,55
	j.w. ^(*)	1,62	1,67	1,54	1,85
Amplituda napięcia F5	kV	21,76	28,15	21,73	25,68
	j.w. ^(*)	1,27	1,65	1,27	1,50

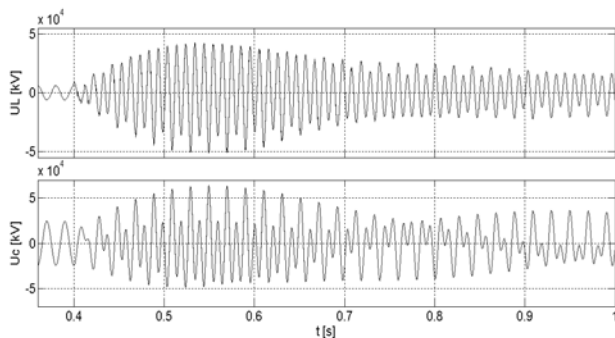
^(*)Wartość bazowa - amplituda napięcia roboczego kondensatorów danego filtra przy napięciu znamionowym na szynie

Tabela 8. Maksymalne amplitudy napięć na dławikach FC

Moc TS, MVA	Układ połączeń FC	80		160	
		A	B	A	B
Amplituda napięcia F2	kV	28,98	73,57	28,13	61,56
	j.w. ^(*)	4,37	11,10	4,24	9,28
Amplituda napięcia F3	kV	10,43	12,04	9,59	13,95
	j.w. ^(*)	4,34	5,01	3,99	5,81
Amplituda napięcia F5	kV	8,43	8,59	8,40	7,46
	j.w. ^(*)	10,67	10,87	10,63	9,44

^(*)Wartość bazowa - amplituda napięcia roboczego dławika danego filtra przy napięciu znamionowym na szynie

Jak to wyżej omówiono, znaczny wpływ na charakter procesu przejściowego ma dokładność strojenia filtra, która zależna jest od odchyłek parametrów kondensatorów i dławików filtra. Przeprowadzając analizę przepięć na dławikach oraz kondensatorach filtrów, wyznaczono wartości amplitud odpowiednich napięć chwilowych, dla określonego poprzednio przypadku, gdy odchylenia parametrów powodowały strojenie filtrów o ściśle zadanej częstotliwości rezonansowej h_r . Dla porównania na rysunku 10 podano przykładowe oscylogramy napięć na dławikach i kondensatorach fazy A, przy dokładnym strojeniu filtra F2.



Rys. 10. Napięcia dławika oraz kondensatorów filtru F2, strojenie $h_r = 2,00$

W tabeli 9 przedstawiono porównanie wartości amplitud napięć przejściowych dławików i kondensatorów poszczególnych filtrów uzyskane podczas symulacji procesów łączeniowych w badanych warunkach.

Tabela 9. Maksymalne amplitudy napięć przejściowych dla projektowego i dokładnego strojenia filtrów FC

Filtr	Napięcie	Punkt strojenia, h_r	Amplituda napięcia	
			kV	j.w.
F2	U_L	1,86	28,98	4,37
		2,00	51,04	7,69
	U_C	1,86	40,83	1,78
		2,00	63,83	2,78
F3	U_L	2,79	10,43	4,34
		3,00	7,91	3,29
	U_C	2,79	30,30	1,62
		3,00	27,18	1,45
F5	U_L	4,65	8,43	10,67
		5,00	10,18	12,88
	U_C	4,65	21,76	1,27
		5,00	27,84	1,62

Podobnie jak dla prądów przejściowych (tabela 6) przy dokładnym strojeniu, w przypadku filtrów F2 oraz F5 obserwujemy wzrost wartości amplitud napięć w porównaniu z projektowym strojeniem filtrów, wykonanym zgodnie z zachowaniem procentowej odchyłki technologicznej. Z kolei filtr F3 cechują przeciwnie właściwości co do tych opisywanych.

Podsumowanie i wnioski

Przeprowadzona analiza wykazała, że decydujący wpływ na zachodzące procesy przejściowe mają: wypadkowa moc zwarciowa systemu zasilającego oraz parametry układu kompensacyjno-filtrującego, co w sumie wyznacza właściwości częstotliwościowe sieci elektrycznej względem węzła przyłączenia.

Eksploatacja jednostek piecowych różnych mocy, pracujących w złożonych układach zasilania, wymaga stosowania bardziej skomplikowanych układów SVC o różnych możliwych stanach pracy. Ponieważ dobór parametrów kondensatorów i dławików filtrów SVC przeprowadza się na podstawie parametrów ustalonych i przejściowych stanów całego systemu, ważnym etapem na drodze projektowania jest, aby podczas badań symulacyjnych zostały uwzględnione możliwe konfiguracje i stany pracy systemu zasilania. Jak potwierdza praktyka, często procesy przejściowe zachodzące w obwodach układu przyczyniają się do uszkodzeń oraz awarii

poszczególnych jednostek systemu zasilania pieców łukowych.

Ważnym elementem wpływającym na charakter oraz czas utrzymywania się w obwodzie stanów przejściowych jest poprawny dobór oraz odpowiednia konfiguracja układu filtrującego. Jak wynika z uzyskanych wyników, nieuwzględnienie na etapie projektowania tolerancji parametrów kondensatorów i dławików filtrów, może prowadzić do nasilania intensywności procesów przejściowych. Dlatego należy zadbać żeby na etapie projektowania punkt rezonansowy każdego z filtrów dobrać w taki sposób, aby znajdował się poniżej ściśle określonej wartości dokładnej częstotliwości rezonansowej filtru. Wartość tej odchyłki będzie tym większa, im większa jest tolerancja technologiczna parametrów wykorzystywanych kondensatorów i dławików.

Na podstawie wyników badań, przeprowadzonych dla wybranego systemu zasilania pieca łukowego, możemy stwierdzić niezbędność badań indywidualnych dla oznaczenia charakterystyk stanów przejściowych każdego nowoprojektowanego układu zasilania pieców łukowych.

Podziękowania:

Praca finansowana z badań statutowych AGH - 11.11.210.198 .

LITERATURA

- [1] Abou-Safe A., Kettleborough G., Modeling and Calculating the In-Rush Currents in Power Transformers, Damascus Univ., Journal Vol. (21)-No. (1)2005.
- [2] Turner Ryan A., Smith Kenneth S., Transformer Inrush Currents, Harmonic analysis in interconnected systems, IEEE industry applications magazine, Sept/Oct 2010.
- [3] Witte J.F., DeCesaro F.P., Mendis S.R., Damaging Long-Term Overvoltages on Industrial Capacitor Banks due to Transformer Energization Inrush Currents, IEEE Transactions on industry applications, vol. 30, no. 4, July/August 1994.
- [4] Sawicki A., Zagadnienia energetyczne wybranych urządzeń elektrycznych systemów stalowniczych, Częstochowa 2010.
- [5] Wciślik S., Elektrotechnika pieców łukowych prądu przemiennego- zagadnienia wybrane, Kielce 2011.
- [6] Silva.A., Hultqvist L., Wilk-Wilczynski A., Steel plant performance, Power supply system design and Power Quality aspects, 54th Electric Furnace Conference - Dec. 96.
- [7] Arya S., Bhalja B., Simulation of steel melting furnace in MATLAB and its effect on power quality problems, National Conference on Recent Trends in Engineering & Technology, 13-14 May 2011.
- [8] Varetzky 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.
- [9] www.ABB.com/FACTS SVC the key to better arc furnace economy.
- [10] 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.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Jurij Warecki, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Podstawowych Problemów Energetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: jwarecki@agh.edu.pl; mgr inż. Michał Gajdzica, Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie, Wydział Energetyki i Paliw, Katedra Podstawowych Problemów Energetyki, Al. Mickiewicza 30, 30-059 Kraków, E-mail: michal.gajdzica@wp.pl.