

Jurij WARECKI*
Michał GAJDZICA*

ANALIZA PROCESÓW ZACHODZĄCYCH PODCZAS ZAŁĄCZANIA TRANSFORMATORA PIECA ŁUKOWEGO ZASILANEGO Z UKŁADU Z FILTRAMI WYŻSZYCH HARMONICZNYCH

Praktyka eksploatacji układów zasilania pieców łukowych prądu przemiennego pokazała, że wielokrotne komutacje technologiczne transformatorów piecowych mogą stać się przyczyną uszkodzenia transformatora systemowego i innych urządzeń sieci zasilającej. W pracy zbadano wpływ konfiguracji sieci zasilającej na charakter procesów przejściowych jednostki piecowej średniej mocy 50 MVA. Analizę zachodzących procesów przejściowych w układzie zasilania pieca łukowego przeprowadzono stosując model zrealizowany w pakiecie Matlab/Simulink.

SŁOWA KLUCZOWE: prąd rozruchowy, transformator piecowy, filtr wyższych harmonicznych

1. WPROWADZENIE

Piece łukowe prądu przemiennego (Alternating Current Electric Arc-Furnace (AC-EAF)) 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. 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 [4, 5]. Cykl topienia metalu w piecach łukowych prądu przemiennego obejmuje trzy podstawowe, uogólnione etapy technologiczne: 1) roztapianie 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 roztapiania wsadu charakteryzuje się największym poborem mocy elektrycznej, a piec w tym czasie zużywa 60-80% całej energii elektrycznej cyklu technologicznego. W kolejnych

* Akademia Górniczo-Hutnicza im. Stanisława Staszica w Krakowie.

obserwuje się mniejsze wahania mocy spowodowane stabilniejszym paleniem łuku elektrycznego.

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 (Static Var Compensator (SVC)) [8]. Eksploatacja układów zasilania wykorzystujących SVC wykazała, że zapewniają one dynamiczną kompensację mocy biernej, wprowadzają symetryzację napięć i prądów a także zmniejszają wahania napięcia. Z kolei wykorzystanie w układach SVC filtrów wyższych harmonicznnych, skutkuje ograniczeniem zniekształcenia napięć w sieci zasilającej.

W artykule przeprowadzono analizę wpływu mocy transformatora systemowego oraz konfiguracji układu kompensacyjno-filtracyjnego SVC na charakter prądów przejściowych podczas włączeń technologicznych transformatora piecowego.

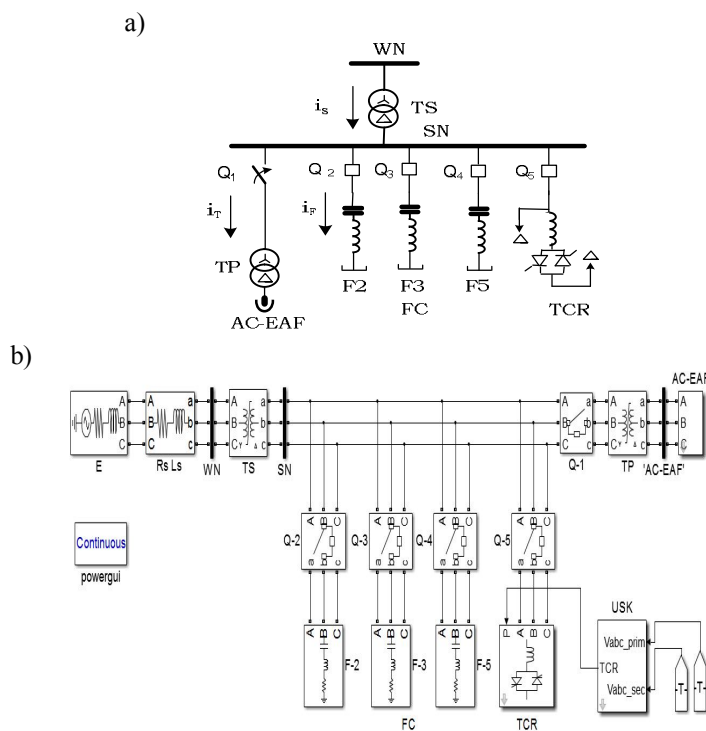
2. CHARAKTERYSTYKA MODELOWANEGO SYSTEMU ZASILANIA ELEKTRYCZNEGO AC-EAF

Wybierając wariant zasilania AC-EAF dużej mocy, uwzględnia się następujące czynniki: moc zwarcia 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 AC-EAF 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 AC-EAF, ma bezpośredni wpływ na wartość amplitud prądów łączeniowych oraz charakter zachodzących procesów nieustalonych. Symulację procesów włączania transformatora piecowego oraz badanie wpływu różnych kombinacji układu kompensacyjnego na przebiegi przejściowe, zrealizowano z wykorzystaniem schematu układu zasilania z rys. 1.

Układ przemysłowy pieca łukowego prądu przemiennego zasilany jest z sieci wysokiego napięcia 110 kV poprzez transformator mocy TS, o układzie połączeń Yd11. Instalację zasilania AC-EAF tworzą: szyna średniego napięcia SN zasilająca układ kompensacyjny oraz transformator piecowy TP o mocy 50 MVA i grupie połączeń Yd1. Układ filtrujący FC (Filter Circuit) tworzą filtry: F-2, F-3, F-5 o parametrach elementów umieszczonych w tabeli 1, pracujące w wskazanym zakresie strojenia dla poszczególnych filtrów.

Za płynną regulację składowej biernej podstawowej harmonicznnej prądu dławika odpowiada układ TCR (Thyristor Controlled Reactor). W zależności od

struktury układu przemysłowego, zasilanie jednostki piecowej może odbywać się z transformatorów systemowych o mocach: 80, 120 i 160 MVA.



Rys. 1. Schematy modelowanego układu zasilania pieca łukowego AC-EAF z udziałem układu kompensacyjnego: a) topologia układu , b) układ symulacyjny

Tabela 1. Parametry elementów układu FC

Filtr	Obszar strojenia	Pojemność C [μF]	Indukcyjność L [mH]	Rezystancja R [Ω]	I _{nom} [A]
F2	1,86	89,51	28,30	0,24	447,51
F3	2,79	70,74	15,91	0,19	398,52
F5	4,65	152,81	2,64	0,05	921,24

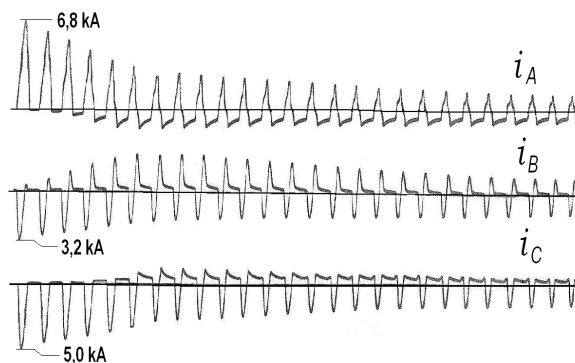
Układ symulacyjny elektrycznego pieca łukowego tworzą: transformator mocy TS, zasilany z trójfazowego źródła napięcia przemiennego E o parametrach sieci R_s, L_s. Zasilanie pieca łukowego odbywa się poprzez transformator piecowy TP, włączany wyłącznikiem Q1. W chwilach komutacji TP, układ kompensatora SVC pozostaje załączony zapewniając bilansowanie mocy biernej na szynie średniego napięcia.

3. PRĄD ROZRUCHOWY TRANSFORMATORA

Transformatory średniej mocy przeznaczone do stalowniczych procesów elektrotermicznych charakteryzują typowe wartości parametrów: $S_n = 15 \dots 55$ MVA, $U_z(\%) = 3,1 - 8,2$ %, $I_o(\%) = 1,08 - 1,3$ %. Głównym elementem odróżniającym transformator piecowy od typowego transformatora mocy jest obecność dużej liczby zaczełów, zlokalizowanych od strony niskiego napięcia.

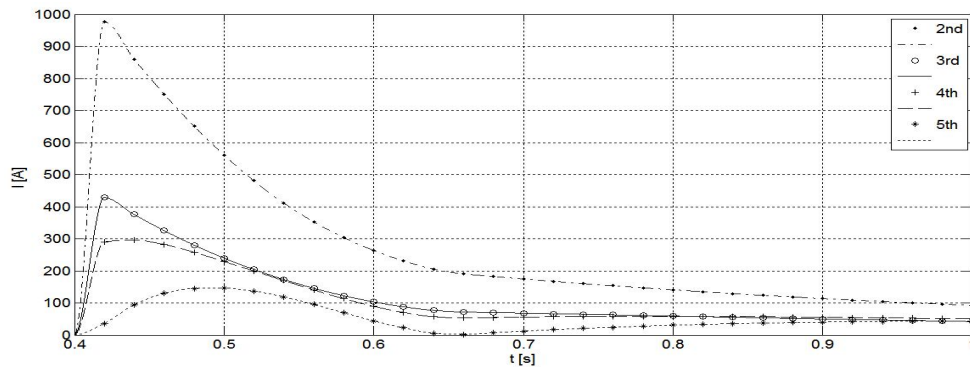
Komutacjom technologicznym transformatora piecowego zasilającego piec łukowy towarzyszą duże amplitudy prądów włączania. Ich wartości przewyższają wartości znamionowe prądów obciążenia 5-7 krotnie. Przyczyną powstawania przetężeń podczas włączania transformatorów do sieci zasilającej, jest głębokie nasycenie rdzeni układów magnetycznych, prowadzące do wzrostu prądów magnesowania. W najcięższych warunkach komutacji, a w szczególności w chwili przejścia napięcia zasilającego przez zero, największe amplitudy strumienia magnetycznego wynoszą: $\Phi_o = (2,2 \div 2,3)\Phi_m$. Głębokie nasycenie nieliniowego obwodu magnetycznego o reluktancji R_μ wzrasta tysiące razy, co z kolei przyczynia się odpowiednio do zwiększania prądu magnesowania.

Prąd rozruchowy w chwili włączania jednostek transformatorowych pieców łukowych, oprócz dużej amplitudy charakteryzują: jednokierunkowość, osiągnięcie wartości maksymalnej w pierwszej połowie okresu po załączeniu oraz oddziaływanie do chwili aż rdzeń transformatora nie osiągnie pełnego, nominalnego namagnesowania. Przykładowy oscylogram prądu włączania trójfazowej jednostki piecowej średniej mocy 50MVA zamieszczono na rys. 2.



Rys. 2. Prądy włączania transformatora piecowego, otrzymany z pomiarów

Prąd włączania cechują również wyższe harmoniczne typu ciągłego, których zmiana utrzymuje się aż do chwili osiągnięcia przez prąd magnesujący stanu ustalonego. Powyższy fakt potwierdza przeprowadzona analiza Fouriera dla stanu włączania transformatora piecowego, rys. 3.



Rys. 3. Zmiana wyższych harmonicznych prądu podczas włączenia jednostki piecowej 50 MVA

4. CHARAKTERYSTYKA UKŁADU SVC

Układ SVC to układ nadążny systemu zasilania pieca łukowego prądu przemiennego, należący do grupy układów typu TCR-FC, o tyrystorowo regulowanej indukcyjności dławika. Tworzą go dwa rodzaje elementów: regulowane dławiki TCR oraz stałe filtry wyższych harmonicznych FC. 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.

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 i indukcyjności dławików filtrów występujące wskutek warunków środowiskowych i niedokładności technologicznych. W przypadku większości kondensatorów zmiany wartości pojemności z powodu warunków środowiskowych wynoszą $\pm 2\%$ oraz $(-5\% \dots +10\%)$ - z powodów technologicznych. W konsekwencji, dopuszcza się zmiany pojemności filtru w zakresie $-7\% \dots +12\%$. W przypadku indukcyjności przyjmuje się odchyłkę technologiczną w zakresie $\pm 3\%$. Stąd możliwy zakres odchylenia punktu rezonansowego od wyznaczonej wartości zawiera się w przedziale $0,93h \leq h_r \leq 1,05h$. W praktyce inżynierskiej przyjmuje się, że bezpieczny punkt rezonansowy filtru h_r przypada na obszar między 2 - 10% poniżej wartości dokładnej częstotliwości rezonansowej filtru. 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. Modelując trójfazowe układy filtrujące badanego systemu zasilania, wprowadzono częstotliwości strojenia poszczególnych filtrów zgodnie z tabelą 1.

5. SYMULACJA PROCESÓW WŁĄCZENIOWYCH

A. Prądy włączenia transformatora piecowego

Wartości prądów włączania transformatora piecowego zależne są od mocy zwarciowej na szynie przyłączenia jednostki piecowej. Na moc zwarciową w największym stopniu ma wpływ transformator systemowy. Wartości maksymalnych amplitud prądów rozruchowych transformatora piecowego dla układów zasilania o różnych mocach transformatorów systemowych umieszczono w tabeli 2. W modelu uwzględniono resztkową wartość namagnesowania na poziomie $0,6\Psi_{nom}$. Z punktu widzenia prądów łączeniowych badanej topologii zasilania AC-EAF, maksymalne amplitudy prądu początkowego obserwuje się w przypadku układu z transformatorem systemowym o największej mocy. Zmniejszenie indukcyjności wypadkowej toru zasilania, w połączeniu z głębokim nasyceniem rdzenia transformatora piecowego, prowadzi do wzrostu wartości prądu w chwili komutacji.

Tabela 2. Maksymalne amplitudy prądów rozruchowych transformatora piecowego

Moc znamionowa transformatora układu zasilania [MVA]	80	120	160
Amplituda prądu transformatora piecowego [kA]	6,32	8,16	8,55

B. Wpływ topologii filtrów na procesy przejściowe

Określając sposób oddziaływania konfiguracji filtrów wyższych harmonicznnych na procesy przejściowe podczas włączania transformatora piecowego, przebadano poszczególne układy pracy zgodnie z tabelą 3.

Tabela 3. Topologia połączeń układu FC

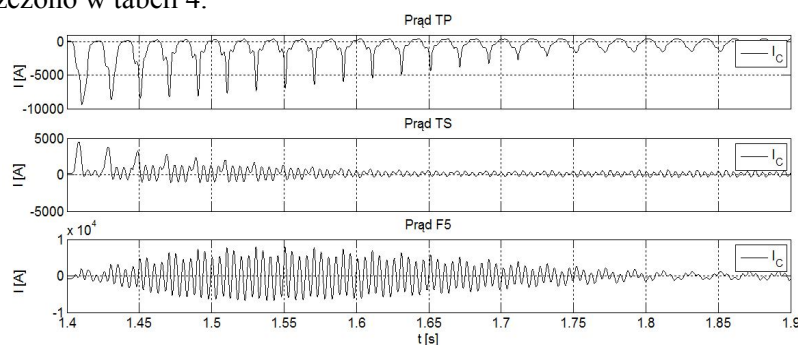
Klasyfikacja układu	Konfiguracja układu
Układ I	Podłączono pojedynczy filtr – F2, lub F3, lub F5
Układ II	Podłączono wszystkie filtry – F2+F3+F5

Na rysunku 4 podano oscylogramy prądów chwilowych dla wybranej fazy podczas włączania transformatora piecowego, w układzie zasilającym z transformatorem systemowym o mocy 160 MVA, przy podłączeniu układu FC z pojedynczym filtrem F5. Można wyraźnie zaobserwować, że maksymalne amplitudy prądu przejściowego w obwodzie filtru występują po pewnym czasie od początku włączenia TP, kiedy prąd piątej harmonicznej transformatora piecowego

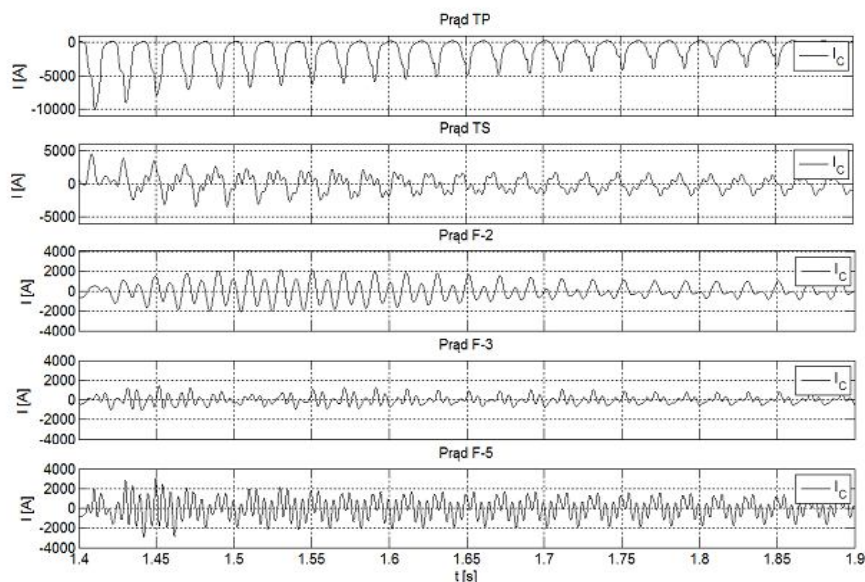
osiąga maksymalne amplitudy. Wskutek oddziaływania prądu filtru F5 następuje silne zmniejszenie amplitud prądu przejściowego transformatora zasilającego, co skutkuje łagodzeniem mechanicznych stresów w mocowaniach jego uzwojeń.

Na rysunku 5 pokazano przebiegi prądów w układzie zasilającym jak dla przypadku powyżej z transformatorem 160MVA, w sytuacji pracy wszystkich filtrów układu FC.

Porównując wyniki modelowania z rysunku 4 i rysunku 5 można stwierdzić tak zmianę charakteru prądów przejściowych transformatora systemowego i filtru F5, jak i zmianę ich amplitud. Obecność wszystkich filtrów, skutkuje zmianą charakterystyk częstotliwościowych układu zasilania, co powoduje wskazane zmiany. Rezultaty pozostałych badań stanów włączania transformatora piecowego zamieszczono w tabeli 4.



Rys. 4. Prądy przejściowe transformatorów oraz filtru F-5, Układ I



Rys. 5. Oscylogramy prądów chwilowych transformatorów oraz filtrów, Układ II

Tabela 4. Maksymalne amplitudy prądów w obwodach układów filtrujących

Moc TS [MVA]	80		120		160	
Układ połączeń FC	I	II	I	II	I	II
Amplituda prądu F2 [kA]	2,4	2,7	2,3	2,9	2,3	2,8
Amplituda prądu F3 [kA]	1,8	2,1	2,0	2,1	2,0	2,2
Amplituda prądu F5 [kA]	3,0	5,2	8,2	3,5	7,0	3,0

Z przeprowadzonej analizy amplitud prądów obwodów filtrujących wynika, że decydujący wpływ na ich wartość oraz charakter zmian mają charakterystyki częstotliwościowe układu zasilania, które zależne są od liczby pracujących w systemie filtrów wyższych harmoniczných.

6. WNIOSKI

Wykonane badania wskazują, że moc transformatora systemowego zasilającego przemysłowe układy AC-EAF wpływa na wartość amplitud prądu rozruchowego transformatora piecowego. Praca układu filtrującego w różnych konfiguracjach podczas włączania jednostki piecowej objawia się silnym wpływem wypadkowych charakterystyk częstotliwościowych układu na wartości amplitud oraz charakter prądów przejściowych poszczególnych filtrów.

LITERATURA

- [1] Varesky 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.
- [2] Abou-Safe A., Kettleborough G., Modeling and Calculating the In-Rush Currents in Power Transformers, Damascus Univ., Journal Vol. (21)-No. (1)2005.
- [3] Turner Ryan A., Smith Kenneth S., Transformer Inrush Currents, Harmonic analysis in interconnected systems, IEEE industry applications magazine, Sept/Oct 2010.
- [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] 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.
- [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] [www.ABB.com/FACTS SVC](http://www.ABB.com/FACTS_SVC) the key to better arc furnace economy.

**TRANSIENTS ANALYSIS DURING ARC FURNACE TRANSFORMER
ENERGIZATION IN ENVIRONMENT OF HARMONIC FILTERS**

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 devices. To examination of supply system configuration impact on switching transient nature an example of 50 MVA arc furnace unit was chosen. The transient analysis has been carried out by simulating within Matlab/Simulink software.