

Kazimierz Jagiela², Janusz Rak¹, Marek Gała¹

¹Politechnika Częstochowska, Częstochowa, ²ATH, Bielsko-Biała

ASYMETRIA NAPIĘCIOWO - PRĄDOWA W TORZE ZASILANIA PIECA ŁUKOWEGO AC

VOLTAGE-CURRENT ASYMMETRY IN THE AC ARC FURNACE SUPPLY LINE

Streszczenie: Piece łukowe AC są odbiornikami energii elektrycznej dużej mocy o chaotycznym poborze prądów niesinusoidalnych, zwłaszcza w pierwszej fazie topienia stali. Taki charakter pracy powoduje negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą w postaci wahań napięcia, asymetrii oraz odkształcenia przebiegu napięcia od sinusoidy. W artykule przedstawiono analizę asymetrii napięć i prądów w torze zasilania pieca łukowego AC. Na podstawie zarejestrowanych komputerowo danych pomiarowych obliczono za pomocą szybkiej transformaty Fouriera podstawowe harmoniczne przebiegów napięć i prądów w poszczególnych punktach toru zasilania. Następnie wyznaczono składowe symetryczne kolejności zgodnej i przeciwnej, współczynniki asymetrii oraz średnie wartości impedancji fazowych na poziomie niskiego i średniego napięcia dla stanu roztopiania i rafinacji.

Abstract: AC arc furnaces are loads of high-power electric power with chaotic non-sinusoidal currents, especially in the first phase of steel melting. This type of work causes a negative impact on the supply network in the form of voltage fluctuations, asymmetry and distortion of the sinusoidal voltage waveform. The paper presents the analysis of asymmetry of voltages and currents in the power supply path of an AC arc furnace. The basic harmonics of voltage and current waveforms at individual points of the power line were calculated using the Fast Fourier Transform on the basis of computer-recorded measurement data. Next, the symmetrical components of the consistent and opposite order, the asymmetry coefficients and the mean values of phase impedances at the low and medium voltage level were determined for the melting and refining state.

Słowa kluczowe: piec łukowy AC, nieliniowe obciążenie, składowe symetryczne, współczynniki asymetrii

Keywords: AC arc furnace, nonlinear load, symmetrical components, asymmetry coefficients

1. Wstęp

Współcześnie w procesach metalurgicznych powszechnie stosuje się elektryczne piece łukowe prądu przemiennego do wytopu stali pochodzącej ze złomu, a także konwertory elektryczne, w których proces technologiczny przewiduje mieszanie ciekłej surówki ze złomem. Piec łukowy AC jest nieliniowym odbiorem elektroenergetycznym dużej mocy o niespokojnym charakterze pracy ze względu na niestabilną charakterystykę napięciowo-prądową łuku, zwłaszcza w początkowej fazie wytopu [1, 8, 10]. Powoduje to negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą w postaci wahań napięcia, asymetrii oraz odkształcenia przebiegu napięcia od sinusoidy. Potwierdzają to przebiegi napięć i prądów w sieci średniego napięcia zarejestrowane podczas procesu wytopu stali [10, 12]. Piec łukowy prądu przemiennego generuje ciągłe widmo harmonicznych prądu [11], przy czym najbardziej znaczące są harmoniczne rzędu 2, 3, 5 i 7 względem częstotliwości sieci zasilającej [1, 10, 14]. Ze względu na odkształcenia prądów i relatywnie niski współczynnik

mocy PF (*Power Factor*) w instalacjach zasilania pieców łukowych stosowane są pasywne filtry wyższych harmonicznych, układy nadążnej kompensacji mocy biernej SVC (ang. *Static Var Compensator*), a także filtry aktywne typu STATCOM. Urządzenia te ograniczają zawartość wyższych harmonicznych prądu, a dla częstotliwości sieci zasilającej ($f_s = 50$ Hz) stanowią układ kompensacji mocy biernej [6].

Właściwy dobór parametrów elektrycznych instalacji zasilania pieca łukowego wpływa na stopień jego oddziaływania na sieć elektroenergetyczną oraz charakterystyki eksploatacyjne: wskaźnik zużycia energii elektrycznej na tonę stali i efektywny czas topienia złomu [13]. Na poziom wskaźników energetycznych, stabilność pracy pieca (bez wyłączeń) i ograniczenie oddziaływania na sieć zasilającą istotny wpływ mają także parametry hydraulicznego napędu elektrod pieca [7].

2. Instalacja pieca łukowego AC

Piece łukowe AC należą do grupy odbiorów elektroenergetycznych charakteryzujących się

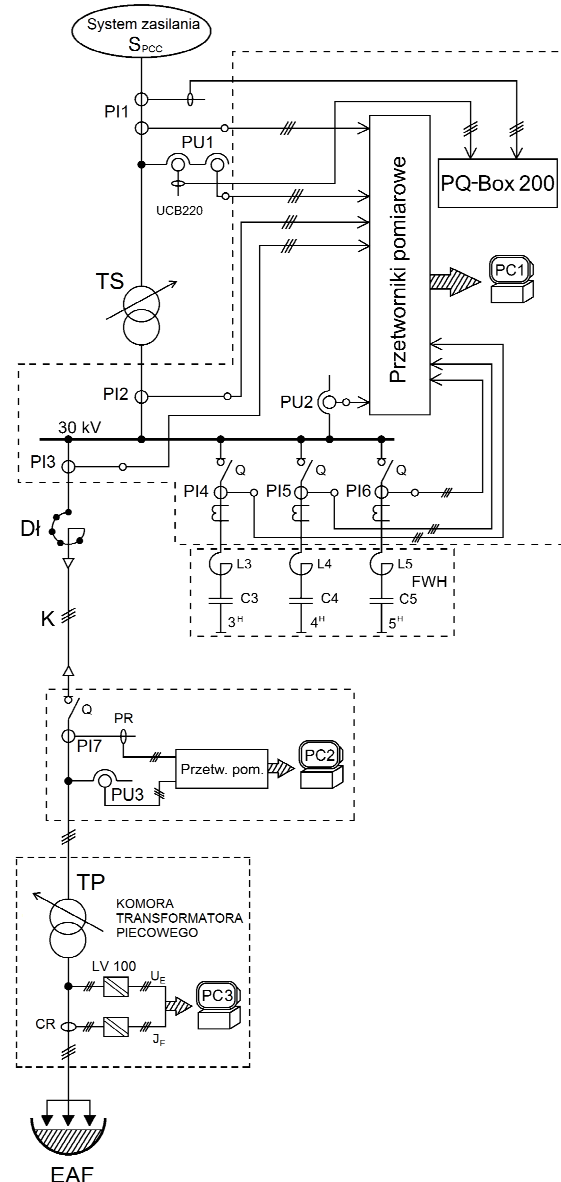
dużym lub bardzo dużym poborem mocy czynnej i biernej. Z uwagi na istotę i rodzaj pracy pieca, można go analizować jako obiekt będący ciągle w stanie nieustalonym w dodatku chaotycznym. Z tych względów układ zasilania pieca łukowego z zasady jest autonomiczną instalacją o przykładowym schemacie pokazanym na rysunku 1, który zawiera również elementy układów pomiarowych. Zasadniczy tor zasilania pieca łukowego rozpoczyna się od transformatora sieciowego TS przyłączonego do elektroenergetycznej sieci wysokiego napięcia o mocy zwarcia S_{PCC} . Z rozdzielni średniego napięcia 30 kV wyprowadzony jest tor kablowy K zasilający transformator piecowy TP. Na odpływie z rozdzielni umieszczony jest dławik liniowy Dł wyposażony w zaczepty, co umożliwia skokową nastawę jego reaktancji. Transformator piecowy TP o specjalnej konstrukcji umożliwia w szerokim zakresie regulację napięcia i prądu strony wtórnej - elektrod pieca. Regulacja mocy czynnej dostarczanej do pieca realizowana jest przez specjalny układ regulacji, który steruje przełącznikiem zaczeptów oraz hydraulicznym układem napędowym elektrod ustawiając je w odpowiednim położeniu [7].

W celu ograniczenia generacji wyższych harmonicznych prądów zastosowano trójgałęziowy zespół filtrów pasywnych FWH z obwodami L-C dostrojonymi do częstotliwości rezonansu szeregowego. W układzie zasilania pieca łukowego pokazanym na rysunku 1 zainstalowano filtry wyższych harmonicznych zestrojone na częstotliwości rezonansowe o rzędach $r=3$, $r=4$ i $r=5$. Piec łukowy EAF zasilany jest bezpośrednio z transformatora piecowego TP wyposażonego w przełącznik zaczeptów umożliwiającą jednoczesną regulację napięcia strony wtórnej oraz reaktancji transformatora TP. Długość łuku, uzależniona bezpośrednio od położenia elektrod, wpływa na wypadkową wartość impedancji łuku $Z_L=R_L+jX_L$.

3. Metody pomiaru parametrów toru zasilania pieca łukowego AC

Do pomiarów wartości chwilowych napięć i prądów w układzie zasilania pieca łukowego AC (EAF) na poziomie wysokiego, średniego i niskiego napięcia zastosowano komputery PC1, PC2 i PC3 wyposażone w karty DAQ oraz oprogramowanie aplikacyjne DasyLab umożliwiające emulację wielokanałowego oscyloskopu cyfrowego i rejestrację danych pomiarowych. Zaletą komputerowej rejestracji przebie-

gów chwilowych napięć i prądów w instalacji pieca łukowego jest możliwość dalszego przetwarzania danych pomiarowych i analizy jakości parametrów energii z zastosowaniem m.in. szybkiej transformaty Fouriera FFT [9]. W celu kontroli pomiarów zastosowano równolegle w węzle wysokiego napięcia analizator klasy A typu PQ-Box 200.



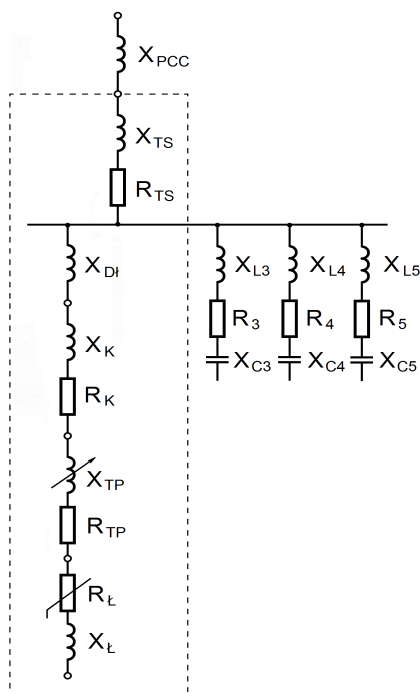
Rys. 1. Schemat instalacji i pomiarów toru zasilania pieca łukowego AC

Ze względu na niezbędną separację galwaniczną komputerowego systemu pomiarowego od sieci elektroenergetycznej do obwodów wtórnych przekładników napięciowych i prądowych dołączono przetworniki prądowe i napięciowe LEM typu LA i LV o gwarantowanej liniowości przetwarzania $\pm 0,2\%$.

Zgodnie ze schematem podanym na rysunku 1 mierzone były jednocześnie przebiegi napięcia w trzech fazach na poziomie wysokiego i średniego napięcia oraz prądów: pierwotnego i wtórnego transformatora sieciowego TS, pierwotnego transformatora piecowego TP oraz prądów filtrów wyższych harmoniczných [6]. W obwodzie niskiego napięcia mierzono napięcia fazowe oraz za pomocą cewek Rogowskiego [8] prąd elektrod pieca łukowego AC. Do wyznaczenia wskaźników charakteryzujących jakość parametrów zasilania niezbędne jest określenie zawartości harmoniczných w przebiegach napięć i prądów [2, 3, 9]. Analiza harmoniczna napięć i prądów dokonana na trzech poziomach napięć pozwala dla odkształconych przebiegów wyznaczyć podstawowe harmoniczne, na bazie których w drugiej procedurze oblicza się składowe symetryczne i wynikające z tego współczynniki asymetrii napięciowej i prądowej.

4. Parametry toru prądowego pieca łukowego AC

Na bazie schematu przedstawionego na rysunku 1 dla potrzeb analizy asymetrii napięciowo – prądowej utworzono schemat impedancyjny instalacji zasilania pieca łukowego AC.



Rys. 2. Tor impedancyjny instalacji pieca łukowego AC sprowadzony na napięcie 30 kV

Główny tor prądowy (rys. 2) zawiera pięć podstawowych elementów składowych: system

elektroenergetyczny, transformator sieciowy, kabel średniego napięcia, transformator piecowy oraz odbiornik, w postaci łuku elektrycznego. Drugą grupę stanowi zespół filtrów wyższych harmoniczných FWH (rys. 1) złożonych z trzech gałęzi R-L-C dla filtrów trzeciej, czwartej i piątej harmonicznej. Wartości impedancji poszczególnych elementów schematu z rysunku 2, w przeliczeniu na poziom średniego napięcia przedstawiono w tabeli 1.

Tabela 1.

Wartości impedancji schematu z rysunku 2

Elementy obwodu	Z [Ω]
System elektroenergetyczny X _{PCC}	j 0,1165
Transformator sieciowy R _{TS} , X _{TS}	2,077 + j 1,557
Dławik szeregowy X _{DI}	j 2,624
Kabel R _K , X _K	0,0652 + j 0,167
Transformator piecowy R _{TP} , X _{TP}	1,853+j (0,68 ÷2,44)
Łuk elektryczny R _L , X _L	Z _L - rys. 9
Filtr 3 ^H (R ₃ , X _{L3} , X _{C3})	0,084 + j (8,1 – 68,1)
Filtr 4 ^H (R ₄ , X _{L4} , X _{C4})	0,055 + j (4,3 – 66,4)
Filtr 5 ^H (R ₅ , X _{L5} , X _{C5})	0,072 + j (4,55 – 110,6)

5. Wskaźniki asymetrii napięciowo - prądowej i impedancje fazowe toru

Określenie wskaźników asymetrii dla napięć i prądów należy rozpatrywać w kategorii przebiegów sinusoidalnych, bowiem zgodnie z definicją podlegają one obrotom o wersor ± 120° el. Piec łukowy AC z uwagi na charakterystykę łuku elektrycznego zaliczany jest do odbiorników nieliniowych, co oznacza, że z sieci elektroenergetycznej pobierany jest prąd odkształcony. Powoduje to tym samym odkształcenia napięć na poszczególnych jego poziomach wartości. W przypadku przebiegów odkształconych trójfazowe napięcia fazowe można zapisać w formie przedstawionej zależnością (1):

$$u_{L1}(t) = U_{L(1)} \sin(\omega t + \varphi_1) + \sum_{i=2}^{\infty} U_{(L1)i} \sin(i\omega t + \varphi_1 - \alpha_i) \tag{1}$$

$$u_{L2}(t) = U_{L(2)} \sin(\omega t + \varphi_2 - \frac{2\pi}{3}) + \sum_{i=2}^{\infty} U_{(L2)i} \sin(i\omega t + \varphi_2 - \beta_i)$$

$$u_{L3}(t) = U_{L(3)} \sin(\omega t + \varphi_3 + \frac{2\pi}{3}) + \sum_{i=2}^{\infty} U_{(L3)i} \sin(i\omega t + \varphi_3 - \gamma_i)$$

Niesymetryczny układ trójfazowych napięć pierwszych harmoniczných $u_{L1(1)}(t)$, $u_{L2(1)}(t)$, $u_{L3(1)}(t)$, zapisanych w postaci zespolonej

$\{\underline{U}_{L1(1)}, \underline{U}_{L2(1)}, \underline{U}_{L3(1)}\}$ można zgodnie z metodą składowych symetrycznych, rozłożyć na trzy układy składowych: zerowych $\underline{U}_{0(1)}$, zgodnych $\underline{U}_{1(1)}$ i przeciwnych $\underline{U}_{2(1)}$, stosując zapis transformacyjny:

$$\begin{pmatrix} \underline{U}_{0(1)} \\ \underline{U}_{1(1)} \\ \underline{U}_{2(1)} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{U}_{L1(1)} \\ \underline{U}_{L2(1)} \\ \underline{U}_{L3(1)} \end{pmatrix} \quad (2)$$

gdzie:

$$a = e^{j\frac{2}{3}\pi} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2} \quad (3)$$

Zespolony współczynnik asymetrii napięć fazowych w postaci zespolonej definiuje się jako:

$$\underline{\alpha}_u = \frac{\underline{U}_{2(1)}}{\underline{U}_{1(1)}} \quad (4)$$

gdzie: $\underline{U}_{1(1)}$ – składowa symetryczna kolejności zgodnej napięć fazowych dla pierwszej harmonicznej (1); $\underline{U}_{2(1)}$ – składowa symetryczna kolejności przeciwnej napięć fazowych dla pierwszej harmonicznej $n = 1$.

Współczynnik asymetrii napięć fazowych wyrażany jest jako moduł zespolonego współczynnika asymetrii (4):

$$\alpha_u = |\underline{\alpha}_u| \cdot 100\% = \left| \frac{\underline{U}_{2(1)}}{\underline{U}_{1(1)}} \right| \cdot 100\% \quad (5)$$

Norma IEC 61000-4-30 [4] jak również publikacja [5] podają, że stopień asymetrii napięć międzyprzewodowych można wyznaczyć z zależności (6):

$$\alpha_{um} = \frac{U_{m2(1)}}{U_{m1(1)}} = \sqrt{\frac{1 - \sqrt{3 - 6\beta}}{1 + \sqrt{3 - 6\beta}}} \quad (6)$$

gdzie:

$$\beta = \frac{U_{12(1)}^4 + U_{23(1)}^4 + U_{31(1)}^4}{(U_{12(1)}^2 + U_{23(1)}^2 + U_{31(1)}^2)^2} \quad (7)$$

W publikacji [5] wykazano, że $\alpha_u = \alpha_{um}$.

Podobne przekształcenia dotyczą współczynnika asymetrii prądów fazowych definiowanego jako:

$$\alpha_I = |\underline{\alpha}_I| \cdot 100\% = \left| \frac{\underline{I}_{2(1)}}{\underline{I}_{1(1)}} \right| \cdot 100\% \quad (8)$$

gdzie składowe $\underline{I}_{1(1)}$ oraz $\underline{I}_{2(1)}$ są określone:

$$\begin{pmatrix} \underline{I}_{0(1)} \\ \underline{I}_{1(1)} \\ \underline{I}_{2(1)} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} \underline{I}_{L1(1)} \\ \underline{I}_{L2(1)} \\ \underline{I}_{L3(1)} \end{pmatrix} \quad (9)$$

Impedancję toru prądowego w poszczególnych punktach instalacji pieca łukowego wyznaczono na podstawie zarejestrowanych napięć i prądów przy zastosowaniu zależności:

$$|Z_x| = \frac{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T u_x^2(t) dt}}{\sqrt{\frac{1}{T} \int_0^T i_x^2(t) dt}} \quad (10)$$

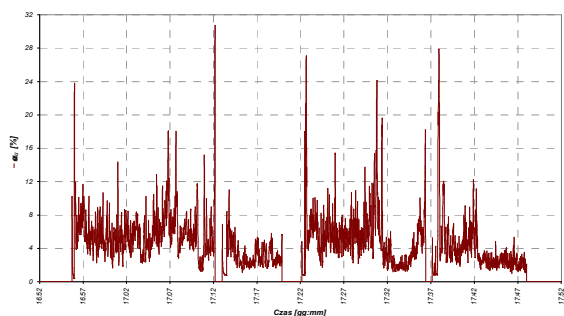
dla $x \in \{L1, L2, L3\}$.

6. Wyniki eksperymentu pomiarowego

Celem wykonanych badań pomiarowych było określenie współczynników asymetrii napięć i prądów, określonych wzorami (5) i (8), dla poszczególnych poziomów napięć instalacji pieca łukowego oddalonych od źródła zaburzeń tj. łuku. W badanej instalacji pieca rozróżnia się trzy poziomy:

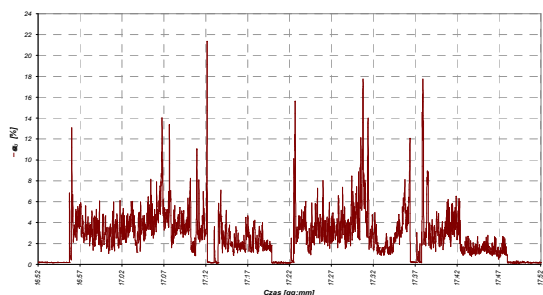
- poziom napięcia niskiego strony dolnej transformatora piecowego (elektrody pieca);
- poziom średniego napięcia (strona górna transformatora piecowego i strona dolna transformatora sieciowego);
- poziom wysokiego napięcia (strona górna transformatora sieciowego, punkt wspólnego przyłączenia do systemu).

Dla tych trzech poziomów zaprezentowane zostały trzy wykresy (rys. 3, 4 i 5) zmienności współczynników asymetrii napięć wykreślone dla pełnego cyklu wytopu tj. pierwszego i drugiego kosza złomowego. W trakcie trwania procesu topienia drugiego kosza nastąpiło zadziałanie zabezpieczenia nadprądowego, które spowodowało wyłączenie zasilania transformatora piecowego. Największe wartości współczynnika asymetrii napięć widoczne są dla stanu załączenia pieca i zmian pozycji przełącznika zaczepów transformatora piecowego. Źródłem zaburzeń jest łuk elektryczny, który w obwodzie niskiego napięcia powoduje, że maksymalne wartości asymetrii napięciowej α_u mieszczą się w przedziale od 18% do 31% (rys. 3), przy wartości średniej dla I kosza ok. 6% i dla II kosza ok. 4,5% (tabela 2).



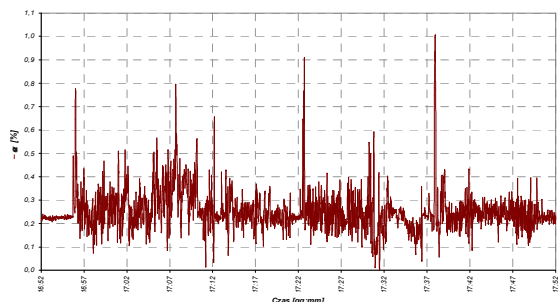
Rys. 3. Współczynnik asymetrii napięć strony wtórnej transformatora piecowego

Profil zmian współczynnika asymetrii α_u na poziomie średniego napięcia (rys. 4) odpowiada w zasadzie profilowi przedstawionemu na rysunku 3. Jednak wartości tych współczynników są nieco mniejsze, bowiem $\alpha_{u\max}$ mieszczą się w przedziale 14 ÷ 21,5 %.



Rys. 4. Współczynnik asymetrii napięć strony pierwotnej transformatora piecowego

Najniższe wartości maksymalnych wskaźników asymetrii napięć występują na poziomie punktu wspólnego przyłączenia instalacji pieca łukowego do systemu elektroenergetycznego. Ich wartości w zasadzie nie przekraczają 1% (rys. 5).



Rys. 5. Współczynnik asymetrii napięć strony pierwotnej transformatora sieciowego

W celach porównawczych w tabeli 2 zestawiono wartości współczynników asymetrii α_u dla trzech miejsc pomiaru: TP-w (strona wtórna transformatora piecowego - elektrody pieca), TP-p (strona pierwotna transformatora piecowego - średnie napięcie) i TS-p (strona pier-

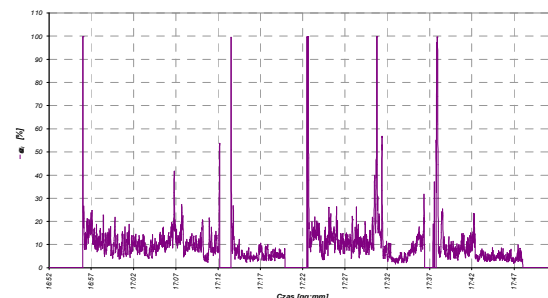
wotna transformatora sieciowego, punkt wspólnego przyłączenia).

Tabela 2.

Wartości współczynników asymetrii napięć α_u

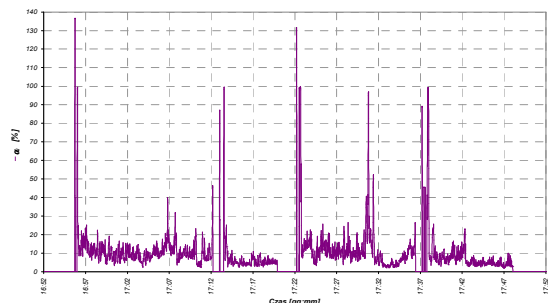
Miejsce pomiaru	I kosz			II kosz		
	$\alpha_{u\max}$ [%]	$\alpha_{u\min}$ [%]	α_{uav} [%]	$\alpha_{u\max}$ [%]	$\alpha_{u\min}$ [%]	α_{uav} [%]
TP-w	31	2	6	28	2	4,5
TP-p	21,5	1	3	18	1	2,5
TS-p	0,8	0,05	0,2	1,0	0,05	0,2

Podobną analizę przeprowadzono dla prądów fazowych w torze prądowym pieca łukowego wyznaczając współczynniki asymetrii prądowej α_i dla trzech miejsc pomiarowych. Wykresy zmian współczynników asymetrii prądowych α_i przedstawiono na rysunkach 6, 7 i 8.



Rys. 6. Współczynnik asymetrii prądów strony wtórnej transformatora piecowego

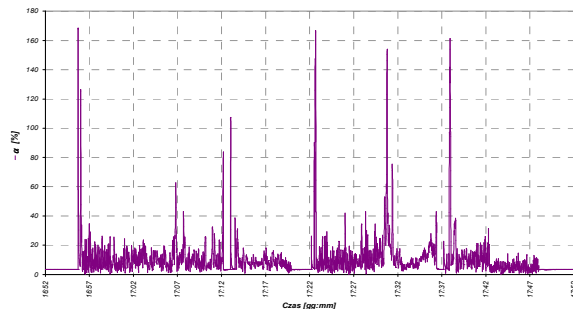
W zasadzie można stwierdzić, iż ich profile są niemal identyczne, a wartości w przybliżeniu porównywalne. W stanie załączenia pieca podczas I i II kosza, jak również po ponownym załączeniu pieca do pracy po zadziałaniu zabezpieczeń, asymetria prądów α_i osiąga wartość 100% (rys. 6).



Rys. 7. Współczynnik asymetrii prądów strony pierwotnej transformatora piecowego

W przebiegu zmian α_i na poziomie średniego napięcia, w którym występuje węzeł prądowy z filtrami wyższych harmonicznymi, w stanach

załączenia pieca następuje wzrost asymetrii prądów do wartości 135% i 131% (rys.7).



Rys. 8. Współczynnik asymetrii prądów strony pierwotnej transformatora sieciowego

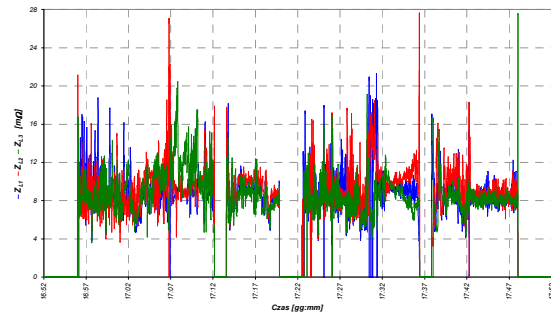
Podobny charakter zauważalny jest w wykresie zaprezentowanym na rysunku 8. Na poziomie systemu elektroenergetycznego asymetria prądów podczas załączenia pieca łukowego do pracy osiąga wartości ok. 170% natomiast w stanie quasi-ustalonym ma średnią wartość ok. 8% (tabela 3). W tabeli 3 zestawiono wartości maksymalne, minimalne i średnie współczynników asymetrii prądowych wyznaczone dla trzech miejsc toru zasilania pieca na podstawie analizy zarejestrowanych przebiegów prądów oraz wskaźników obliczonych według wzorów (8) i (9).

Tabela 3.

Wartości współczynników asymetrii prądów α_i

Miejsce pomiaru	I kosz			II kosz		
	$\alpha_{I\max}$ [%]	$\alpha_{I\min}$ [%]	$\alpha_{I\text{av}}$ [%]	$\alpha_{II\max}$ [%]	$\alpha_{II\min}$ [%]	$\alpha_{II\text{av}}$ [%]
TP-w	100	5	10	100	5	10
TP-p	130	5	10	100	5	10
TS-p	160	4	8	160	4	8

Uzupełnieniem wykresów asymetrii napięciowych i prądowych w trzech miejscach instalacji pieca łukowego AC są dwa wykresy zmian modułu impedancji (rys. 9 i 10) obliczonych na podstawie wzoru (10), w którym dla przebiegów odkształconych wyliczone zostały wartości skuteczne napięć i prądów uśrednione w okresie jednej sekundy. Szczególnie interesujący jest przebieg zmian modułu impedancji fazowych strony wtórnej transformatora pieca (rys. 9). Bowiern impedancja ta zawiera dwie składowe: impedancję zwarcia obwodu wtórnego transformatora wraz z elektrodami oraz impedancję łuku $|Z_L| = R_L + jX_L$.



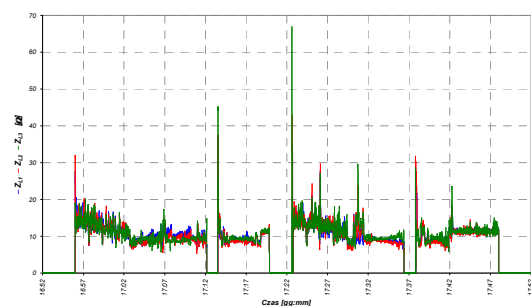
Rys. 9. Wykres zmian impedancji fazowych strony wtórnej transformatora piecowego

Znając parametry zwarcia trójfazowego elektrod pieca oraz rezystancję elektrod można oszacować impedancję łuku. Średnie wartości impedancji zaprezentowane na rysunkach 9 i 10 dla poszczególnych faz zostały zbiorczo zebrane w postaci tabelarycznej (tab.4) z podziałem na część rzeczywistą i urojoną dla stanu roztopienia złomu i rafinacji stali.

Tabela 4

Wartości impedancji fazowych

Strona wtórna TP			
Cykl pracy pieca	Wartości średnie impedancji dla fazy [mΩ]		
Faza	L1	L2	L3
Roztapianie	8,47+j4,48	7,48+j4,44	7,4+j3,95
Rafinacja	7,51+j3,72	7,52+j4,1	7,09+j4,01
Strona wtórna TS			
Cykl pracy pieca	Wartości średnie impedancji dla fazy [Ω]		
Faza	L1	L2	L3
Roztapianie	11,01+j8,09	11,18+j8,51	11,36+j8,04
Rafinacja	9,35+j6,47	9,16+j6,63	9,45+j6,55



Rys.10. Wykres zmian impedancji fazowych strony pierwotnej transformatora piecowego

Zmiany impedancji wyliczonej po stronie średniego napięcia (rys. 10) są mniej burzliwe niż zmiany impedancji po stronie elektrod pieca.

7. Podsumowanie

W artykule przedstawiono wyniki badań asymetrii napięć i prądów w trzech punktach autonomicznej instalacji pieca łukowego AC. Punkty pomiarowe dobrane zostały do trzech

poziomów napięć od niskiego podłączonego do elektrod pieca po wysoki w punkcie wspólnego przyłączenia do sieci elektroenergetycznej. Źródłem zaburzeń jest łuk elektryczny będący elementem nieliniowym z chaotycznie zmienną rezystancją w zależności od długości łuku oraz pozycji przełącznika zaczeptów transformatora piecowego. Przedstawione na rysunkach od 3 do 5 zmiany współczynników asymetrii napięć α_u pokazują, iż największa asymetria występuje u źródła tj. na poziomie niskiego napięcia w czasie roztopiania złomu, przy czym maleje uzyskując wartości poniżej 1% na poziomie przyłączenia do sieci wysokiego napięcia. Asymetria prądów fazowych w torze zasilania pieca łukowego AC utrzymuje się na stałym poziomie, a w węźle średniego napięcia gdzie przyłączone są trzy gałęzie pasywnych filtrów wyższych harmonicznnych (rys. 1) następuje nawet wzrost asymetrii, szczególnie podczas stanu załączenia pieca łukowego (rys. 7 i 8). Świadczy to o pogorszeniu warunku symetryzacji prądów fazowych. Do uzyskania symetrii prądów fazowych najlepszym rozwiązaniem jest zastosowanie filtru aktywnego. Obliczenie impedancji zastępczej, szczególnie dla obwodu wtórnego transformatora piecowego, jest bardzo istotne z uwagi na identyfikację parametrów R i X łuku elektrycznego. Znajomość wartości tych parametrów przydatna jest do modelowania, z wykorzystaniem narzędzi komputerowych, wpływu pracy pieca łukowego AC na elektroenergetyczną sieć wysokiego napięcia.

8. Literatura

- [1]. Alonso M.A.P., Donsión M.P.: *An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis*. IEEE Transaction on Power Delivery, vol. 19, No.1, January 2004, pp. 367-373.
- [2]. Baggini A. (Editor), *Handbook of Power Quality*. University of Bergamo-Italy, John Wiley & Sons, Ltd, USA 2008.
- [3]. Czarnecki L.S.: *Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć*. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [4]. IEC 61000-4-30: *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*.
- [5]. Jagieła K., Gała M.: *Nomograficzna metoda wyznaczania współczynnika asymetrii w trójfazowych sieciach elektroenergetycznych*. Przegląd Elektrotechniczny, Rok 80 Nr 1/2004, s. 21-26.
- [6]. Jagieła K., Gała M., Kępiński M., Rak J.: *Influence of Harmonic Filters on the Operation of AC Arc Furnace Power Installation* (in:) Conference on Electrotechnology: Processes, Models, Control and Computer Science, 12-14 Nov. 2018, Kielce.
- [7]. Jagieła K., Gała M., Rak J., Kępiński M.: *Eksperymentalny pomiar parametrów i charakterystyk hydraulicznego napędu elektrod pieca łukowego*. Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej, nr 54, 2017, s. 83-87.
- [8]. Jagieła K., Rak J., Gała M., Kępiński M.: *Identification of Electric Power Parameters of AC Arc Furnace Low Voltage System*. Proceedings 14th International Conference Harmonics and Quality of Power, Bergamo, Italy, 26-29. Sept. 2010.
- [9]. Kuśmierk Z.: *Zastosowanie komputerowych technik pomiarowych do badania jakości energii elektrycznej*. Jakość i Użytkowanie Energii Elektrycznej, Tom 1-Zeszyt 1, 1995, s. 47-53.
- [10]. Liu Y.J., Chang G.W., Hong R.C.: *Curve-fitting-based method for modeling voltage-current characteristic of an ac electric arc furnace*. Electric Power Systems Research, No. 80 (2010), 572-581.
- [11]. Montanari G.C., Loggini M., Cavallini A., Pitti L., Zaninelli D.: *Arc-model furnace for study of flicker compensation in electrical networks*. IEEE Transaction on Power Delivery, Vol. 9, No.4, October 1994, pp. 2026-2036.
- [12]. Rak J.: *Influence of AC arc furnace on parameters of industrial medium-voltage network*. Proceedings 5th International Conference EPQU'99, Cracow, Poland, 1999, pp. 315-322.
- [13]. Rak J., Gała M., Jagieła K., Kępiński M.: *Wpływ parametrów instalacji zasilania pieca łukowego na wskaźniki elektroenergetyczne procesu wytopu stali*. Przegląd Elektrotechniczny (Electrical Review), ISSN 0033-2097, R.93 NR 1/2017, s. 5-8.
- [14]. Vervenne I., Van Reusel K., Belmans R.: *Electric arc furnace modeling from a "power quality" point of view*. Proceedings 9th International Conference on Electrical Power Quality and Utilisation, EPQU 2007, Barcelona, Spain, 2007, pp. 1-6.

Autorzy

dr hab. inż. Kazimierz Jagieła, prof. ATH,
 e-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com
 Akademia Techniczno-Humanistyczna
 w Bielsku-Białej
 Wydział Budowy Maszyn i Informatyki
 ul. Willowa 2, 43-309 Bielsko-Biała
 dr inż. Janusz Rak, e-mail: jrak@el.pcz.czyst.pl
 dr inż. Marek Gała, e-mail:
 m.gala@el.pcz.czyst.pl
 Politechnika Częstochowska Wydział Elektryczny
 Al. Armii Krajowej 17, 42-200 Częstochowa