

Wpływ zjawisk w obwodzie wielko prądowym na pracę układu zasilania pieca Lukowego AC

Streszczenie. W artykule opisano zjawiska zachodzące w obwodzie wielkopiędowym elektrycznego pieca łukowego AC. Odzworowano wpływ zmian długości kolumny łukowej na parametry modelu matematycznego Pentegowa łuku elektrycznego wykorzystującego statyczną charakterystykę napięciowo-prądową. W wyniku symulacji otrzymano dynamiczne charakterystyki napięciowo-prądowe łuków elektrycznych. Na podstawie analizy danych pomiarowych przedstawiono wpływ asymetrii i zaburzeń łuku na jakość energii elektrycznej w układzie zasilania AC-EAF.

Abstract. The article describes the phenomena occurring in the high-current circuit of an AC electric arc furnace. The effect of changes in the arc column length on the parameters of the Pentegov mathematical model of the electric arc based on static voltage-current characteristics is mapped. As a result of the simulation, dynamic voltage-current characteristics of electric arcs were obtained. Based on the analysis of measurement data, the effect of asymmetry and arc disturbances on the quality of electricity in the AC-EAF power system is presented. (**Impact of phenomena in a high-current circuit for operation of the AC arc furnace supply system**).

Słowa kluczowe: piec łukowy AC, model łuku, asymetria, jakość energii elektrycznej.

Keywords: AC arc furnace, arc model, asymmetry, power quality.

Wstęp

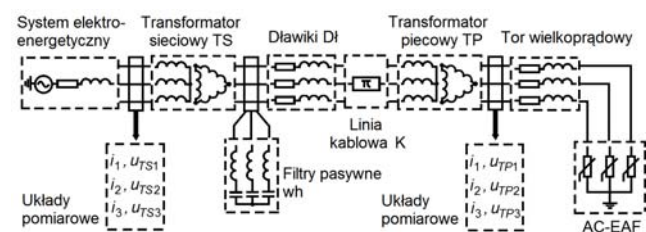
Elektryczne piece łukowe AC do wytopu stali pochodzącej ze złomu są złożonymi urządzeniami technologicznymi o bardzo dużej mocy. Ich charakterystyki napięciowo-prądowe są silnie nieliniowe i niestacjonarne, co negatywnie wpływa na system elektroenergetyczny. Praca AC-EAF wywołuje zakłócenia w układach zasilania innych użytkowników, którzy są przyłączeni do wspólnej sieci. Do tych zakłóceń należą m.in.: odchylenia i wahania napięcia, asymetria prądów i napięć, niesinusoidalny kształt napięcia itd. Piec łukowy AC generuje widmo ciągle harmonicznych prądu [1] powodując odkształcenie i wahania napięcia zasilającego. Największy wpływ mają harmoniczne rzędów 2, 3, 5 i 7 względem częstotliwości sieci zasilającej [2, 3, 4, 5, 6]. Ponadto występująca niestabilność łuku, szczególnie w początkowej fazie wytopu stali, powoduje stochastyczne zmiany prądu zasilania pieca, co czyni go odbiorem niespokojnym [2, 4, 7, 8]. Szczególnie uciążliwymi zakłóceniami są wahania napięcia, wywołane przez fluktuacje prądów łuków oraz asymetria napięć. Występują również wahania mocy biernej pieca, którym towarzyszą zmiany poboru mocy czynnej, ale o mniejszej intensywności.

Właściwy dobór parametrów elektrycznych instalacji zasilania pieca ma wpływ na stopień jego oddziaływania na sieć elektroenergetyczną oraz charakterystyki eksploatacyjne: wskaźnik zużycia energii elektrycznej na tonę stali i efektywny czas topienia złomu [9]. Współczesny piec łukowy, z punktu widzenia sterowania, jest zaawansowanym urządzeniem elektrotermicznym, którego istotnym elementem strukturalnym jest system regulacji stanów elektrycznych pieca [10]. System ten odpowiada za działanie napędu hydraulicznego ruchu elektrod, zmianę zaczepu uzwojenia transformatora piecowego oraz wybór krzywej wydajności topienia wsadu. Zapewnia to jednoczesną regulację prądu oraz długości i mocy łuków [11, 12, 13]. Racjonalizacja stanów pracy pieca łukowego polega na takim prowadzeniu procesu wytopu, aby uzyskać dużą wydajność z odpowiednio wysokim współczynnikiem mocy $\cos \varphi$ i sprawnością elektryczną pieca η_e [14].

Instalacja zasilania pieca łukowego AC

Stalownicze piece łukowe prądu przemiennego zwykle budowane są jako odbiorniki trójfazowe. Ze względu na bardzo duże moce powinny one zapewniać symetryczne obciążenie sieci. Typowy schemat układu zasilania pieca łukowego prądu przemiennego przedstawiono na rysunku 1.

Tor zasilania rozpoczyna się od transformatora sieciowego TS przyłączonego do sieci elektroenergetycznej. Po stronie średniego napięcia poprzez dławiki Dł i linię kablową K zasilany jest transformator piecowy TP. Dzięki specjalnej konstrukcji transformator TP umożliwia w szerokim zakresie regulację napięcia podawanego do elektrod. Do jego uzwojeń wtórnych, połączonych w trójkąt, dołączony jest tor wielkopiędowy. W celu ograniczenia oddziaływania instalacji pieca na system elektroenergetyczny (wh prądów, duża moc bierna), na poziomie średniego napięcia instaluje się alternatywnie: filtry pasywne wh, filtry pasywne wh doposażone w człon TCR lub filtr aktywny STATCOM [4].

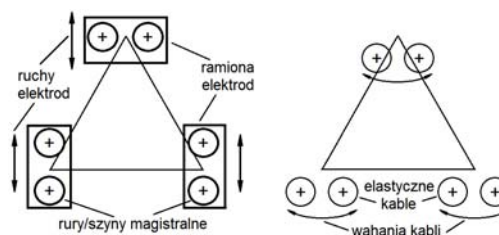


Rys. 1. Schemat zastępczy instalacji zasilania pieca łukowego AC

Analizując impedancje poszczególnych elementów, tworzących tor zasilania pieca wg schematu przedstawionego na rysunku 1, można stwierdzić, że aż do toru wielkopiędowego występuje symetria [15]. Asymetria impedancji fazowych pojawia się dopiero po stronie wtórnej transformatora piecowego i wynika z nieliniowości łuku (asymetria eksploatacyjna) oraz budowy toru wielkopiędowego (asymetria konstrukcyjna).

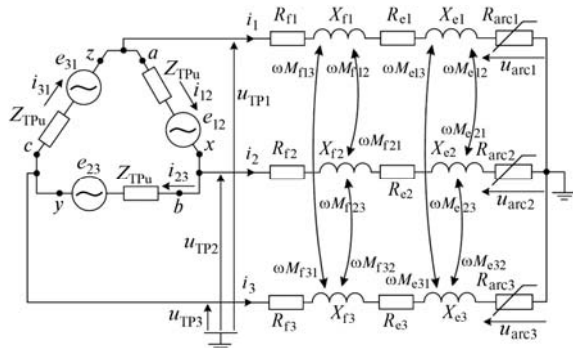
Konfiguracja toru wielkopiędowego pieca

Obwód wtórny nowoczesnego pieca łukowego jest zazwyczaj triangulowany w całości, przy czym dąży się do triangulacji równobocznej (rys. 2) [16].



Rys. 2. Schemat triangulacji wtórnego obwodu elektrycznego transformatora piecowego [16]

Każda z faz toru wieloprądowego pieca jest utworzona z szeregowo połączonych: odcinka przewodu elastycznego, odcinka przewodu sztywnego umieszczonego w ramieniu elektrody i elektrody połączonej z przewodem sztywnym za pomocą specjalnego uchwytu. Równoważny obwód wtórny transformatora piecowego z uwzględnieniem odchyłń od trójkątnej konfiguracji toru wieloprądowego (wg rys. 2) i elektrod z założeniem, że impedancje faz transformatora TP są równe (symetria), co przedstawiono na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat zastępczy obwodu wtórnego transformatora piecowego TP z trójkątną konfiguracją toru wieloprądowego i elektrod (oprac. wg [8, 13, 16, 17])

e_{12} , e_{23} , e_{31} – sem (na biegu jałowym) uzwojeń wtórnych transformatora piecowego; u_{TP1} , u_{TP2} , u_{TP3} – napięcia fazowe po stronie wtórnej transformatora TP; i_1 , i_2 , i_3 – prądy fazowe w torze wieloprądowym; Z_{TPu} – impedancja uzwojenia transformatora piecowego składająca się z rezystancji R_{TPu} i reaktancji X_{TPu} ; X_{f1} , X_{f2} , X_{f3} – reaktancje indukcyjne kabli elastycznych; R_{f1} , R_{f2} , R_{f3} – rezystancje kabli elastycznych; ωM_{f12} , ωM_{f21} , ωM_{f13} , ωM_{f31} , ωM_{f23} , ωM_{f32} – reaktancje indukcyjne wzajemne kabli elastycznych; X_{e1} , X_{e2} , X_{e3} – reaktancje indukcyjne szyn magistralnych z uwzględnieniem elektrod; R_{e1} , R_{e2} , R_{e3} – rezystancje szyn magistralnych z uwzględnieniem rezystancji elektrod; ωM_{e12} , ωM_{e21} , ωM_{e13} , ωM_{e31} , ωM_{e23} , ωM_{e32} – reaktancje indukcyjne wzajemne części sztywnej toru i elektrod; u_{arc1} , u_{arc2} , u_{arc3} – napięcia łuku poszczególnych faz.

Nierówność reaktancji faz obwodu wtórnego wynika z mniejszej długości środkowego ramienia elektrody. Natomiast w trakcie pracy pieca, triangulacja nie może być utrzymywana w całym obwodzie wtórnym z uwagi na: różny stopień zużycia elektrod, nierównomierny poziom wsadu pod elektrodami oraz konieczność ciągłej regulacji długości łuku, zwłaszcza na etapie roztopiania wsadu [8]. Wymusza to ruchy pionowe elektrod (rys. 2) i przesunięcie ich ramion z pożądanej konfiguracji trójkąta, co wpływa na indukcyjności wzajemne między fazami [13, 16] i zmianę reaktancji poszczególnych faz. Ruchy pionowe elektrod powodują przemieszczenie elastycznych kabli zasilających, a występujące podczas wytopu prądy fazowe wytwarzają siły elektrodynamiczne i w rezultacie wahania kabli [8, 16]. Zmiany prądów fazowych i konfiguracji kabli elastycznych powodują nierówność reaktancji indukcyjnych wzajemnych ωM_{12} , ωM_{13} , ωM_{23} . Skutkuje to asymetrią całkowitej impedancji każdej gałęzi w trójkącie (rys. 3). W konsekwencji podczas pracy pieca łukowego napięcia fazowe transformatora piecowego u_{TP1} , u_{TP2} , u_{TP3} są nierówne [17].

Należy zaznaczyć, że pomimo opisanych zjawisk, w nowoczesnych piecach łukowych budowanych z triangularem toru wieloprądowym decydujący wpływ na stany asymetryczne ma nieliniowość i zmienność charakterystyk łuków [18].

Czynniki wpływające na zmiany długości łuków w AC-EAF

Łuk elektryczny stanowi silnie nieliniowy element obwodu elektrycznego, w którym następuje skoncentrowana w stosunkowo małej objętości przemiana energii elektrycznej w ciepło i w inne formy energii (np. hałas, wibracje, przepływy

gazowe). Dużej prędkości przepływów gazowych towarzyszy zjawisko turbulencji, a w jej wyniku losowe deformacje oraz przemieszczenia kolumny plazmowej. Niejednorodnej strukturze wsadu i położenia elektrod odpowiadają zmiany właściwości emisyjnych powierzchni i przemieszczania plam łukowych.

Cechą charakterystyczną pracy stalowniczych pieców łukowych prądu przemiennego (AC-EAF) jest słaba stabilność płonienia łuków. Wynika ona nie tylko z okresowych zmian kierunku przepływu prądów, ale także z różnych oddziaływań zewnętrznych na kolumny plazmowe. Należą do nich oddziaływania mechaniczne, wynikające z ruchów elektrod grafitowych, wibracji wysięgników elektrodowych, przemieszczania stałych materiałów wsadowych i kołysania kąpeli metalowej, a także dorywczo doprowadzane poprzez lance zewnętrzne gazy i pył węglowy. Wszystkie wymienione oddziaływania prowadzą do zmian długości łuków, które ze względu na duże masy elektrod grafitowych, złomu i kąpeli, charakteryzują się stosunkowo małymi prędkościami ruchów. Znacznie silniejszy wpływ mają oddziaływania elektromagnetyczne prądów w sąsiednich łukach i elektrodach. Efektem są bardzo szybkie zmiany długości kolumn łukowych, które ulegają zarówno odchyleniom, jak również przesunięciom [19].

Szczególnie duże zmiany długości łuków występują podczas startu pieca i w trakcie jego wyłączania. W pierwszym przypadku, po zwarciu elektrod ze wsadem następuje ich unoszenie, prowadzące do zapłonu i rozciągania łuków, aż do osiągnięcia zadanych wartości rezystancji kolumn plazmowych. W drugim przypadku gaszenie łuków następuje w wyniku ich rozciągnięcia, co umożliwia racjonalne oszczędzanie aparatury komutacyjnej. W trakcie wytopu intensywne zmiany długości łuków występują w stadium topienia wsadu. Mają one równocześnie charakter deterministyczny i losowy. W stanach świeżenia i rafinowania metalu następuje uspokojenie pracy pieca.

Model matematyczny łuku elektrycznego

Złożoność i losowość zmian charakteru łuku powoduje, że matematyczne ujęcie stanów pracy pieca łukowego jest trudnym zadaniem. Tym niemniej opracowano szereg modeli deterministycznych i stochastycznych łuku stosując następujące podejścia [20, 21]:

- przedstawienie łuku jako źródła napięcia sterowanego w dziedzinie czasu - odcinkowo liniowa aproksymacja charakterystyki napięcia-prądu ($u-i$) łuku,
- ujęcie związku między napięciem łuku a jego długością,
- opisanie łuku jako rezystancji zmieniającej się w czasie,
- opisanie łuku jako procesu stochastycznego.

W modelowaniu procesów w AC-EAF zwykle zakłada się stałe długości łuków. Jednak z powodu silnych nieliniowości charakterystyk statycznych i dynamicznych łuków pomijanie zmian ich długości może zniekształcać oceny stabilności pracy i oddziaływania pieców na sieci zasilające. Aby możliwe było symulacyjne zbadanie stanów asymetrii pracy pieców (w szerokich zakresach zmian prądów i długości kolumny łukowej), wymagane jest zastosowanie odpowiednich modeli matematycznych łuku. Duży zakres zmian natężenia prądu roboczego powoduje, że popularne proste modele matematyczne łuku elektrycznego mogą mieć ograniczone zastosowanie. Obecnie coraz częściej stosuje się modele hybrydowe, kojarzące model Mayra i Cassiego [22]. Podobne rezultaty można osiągnąć stosując uniwersalny model Pentegowa [23]. Wykorzystuje on statyczną charakterystykę napięciowo-prądową i umożliwia łatwe uwzględnienie zmian długości kolumny łuku poprzez wprowadzenie dodatkowej zmiennej [24, 25].

Z równania bilansu energetycznego kolumny łuku można otrzymać równanie różniczkowe liniowe I rzędu:

$$(1) \quad \theta \frac{di_{\theta}^2}{dt} + i_{\theta}^2 = i^2$$

gdzie: i_{θ} - prąd stanu (równoważny temperaturze plazmy), θ - oznacza stałą czasową modelu matematycznego.

W ogólnym przypadku zależność między napięciem u kolumny łuku, a prądem łuku i określa wzór:

$$(2) \quad u = \frac{U(i_{\theta})}{i_{\theta}} i$$

gdzie: $U(i_{\theta})$ - charakterystyka napięciowo-prądowa statyczna kolumny łuku.

W zależności od wybranej charakterystyki statycznej można uzyskać różne warianty modelu łuku. Można do nich zaliczyć model Mayra i model Cassiego. W stosunku do takich przypadków opracowano szereg metod eksperymentalnego wyznaczania parametrów modeli [25]. Jeśli przyjmie się charakterystykę statyczną łuku z uwzględnieniem jego długości l w postaci zależności:

$$(3) \quad U(I, l) = A + Bl + \frac{P_M I}{I^2 + I_W^2}$$

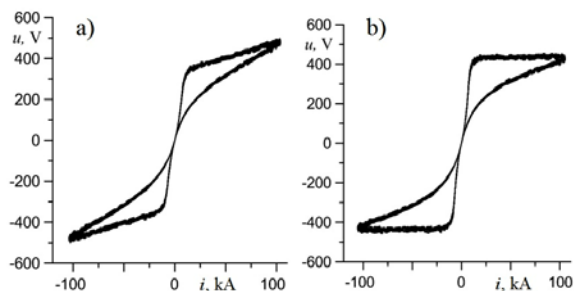
to w przybliżeniu można odwzorowywać jego właściwości w pełnym zakresie natężenia prądu. Parametr A odpowiada sumie przebiegów spadków napięcia. Parametr B jest nazywany gradientem napięcia ze względu na odchylenie łuku od osi elektrody. Natomiast parametr P_M jest związany z zakresem słaboprądowym [24]. Odciętej I_W punktu ekstremalnego odpowiada określona wartość napięcia zapłonu.

Wyniki badań symulacyjnych charakterystyk U-I łuku

W celu weryfikacji poprawności modelu przeprowadzono symulacje stanów asymetrycznych występujących podczas startu pieca w dwóch przypadkach:

- 1) długości łuków w fazach L2 i L3 były jednakowe i wynosiły $l = 0,08$ m, natomiast w fazie L1 następował zapłon łuku realizowany od stanu zwarcia i rozciąganie kolumny z prędkością $0,5$ m/s aż do zgaszenia łuku.
- 2) długość łuku w fazie L3 była stała i wynosiła $l = 0,08$ m, natomiast w fazach L1 i L2 następowały zapłony łuków realizowane od stanu zwarcia. Następnie odbywało się rozciąganie łuków aż do ich zgaszenia.

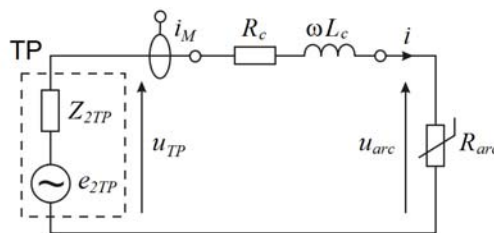
Wyniki wykonanych symulacji wykazały, że zniekształcenia dynamicznych pętli histerezy występują nie tylko w fazie z łukiem rozciągającym, ale także i w fazach sąsiednich [18]. Dalsze badania dotyczyły wpływu zmian parametrów modelu łuku (3) na kształt charakterystyk dynamicznych $u-i$. Wybrane wyniki przedstawiono na rysunku 4.



Rys. 4. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuku z założeniami $l_0 = 0,2$ m, $I_w = 20$ kA, $\theta = 0,3$ ms ze zmianami parametrów modelu: a) $P_M = 20$ kW; b) $P_M = 50$ kW.

Obliczenia parametrów zastępczych obwodu wielkopiękowego

Źródłem zaburzeń napięciowo-prądowych w instalacji pieca łukowego AC są zjawiska związane z naturą łuku, co bezpośrednio wpływa na parametry elektroenergetyczne obwodu wtórnego transformatora piecowego TP. Schemat zastępczy jednofazowy obwodu niskiego napięcia toru zasilania pieca łukowego przedstawiono na rysunku 5.



Rys. 5. Uproszczony schemat zastępczy obwodu niskiego napięcia pieca łukowego AC

W schemacie zastępczym (rys. 5) parametry impedancji Z_{2TP} , $Z_C = R_C + j\omega L_C$ oraz rezystancji łuku R_{arc} wynikają ze schematu zastępczego obwodu wtórnego transformatora piecowego (rys. 3). Harmoniczna podstawowa napięcia fazowego U_{TP} strony wtórnej transformatora stanowi różnicę geometryczną między wartością siły elektromotorycznej fazowej e_{2TP} (stan jałowy) strony dolnego napięcia transformatora piecowego, a spadkiem napięcia na impedancji zwarcia transformatora Z_{2TP} z wymuszeniem prądowym pochodzącym od pierwszej harmonicznej prądu i w torze wielkopiękowym. Reaktancję X_C toru wielkopiękowego można obliczyć jako:

$$(4) \quad X_C = \omega \{ [L_f \pm M_f(\alpha)] + [(L_e + M_e)] \} = \omega L_C$$

gdzie: L_f i L_e - indukcyjności własne kabli elastycznych (f) i elektrod (e); $M_f(\alpha)$ i M_e - indukcyjności wzajemne kabli elastycznych (f) zależne od kąta wychylenia α i elektrod (e).

Wartości indukcyjności własnych i wzajemnych można wyznaczyć dwoma sposobami:

- 1) z próby zwarcia zgodnie ze standardem normy IEC676 [26];
- 2) na podstawie obliczeń z wykorzystaniem wzorów podanych według zależności (5) i (6) [27, 28, 29, 30].

$$(5) \quad L_{f,e} = \frac{\mu_0 \ell_{f,e}}{2\pi} \left[\ln \frac{2\ell_{f,e}}{r_{g.m.r.f,e}} - 1 \right]$$

$$(6) \quad M_{f,e} = \frac{\mu_0 \ell_{f,e}}{2\pi} \left[\frac{\ell_{f,e} + \sqrt{\ell_{f,e}^2 + d_{g.m.d.f,e}^2}}{d_{g.m.d.f,e}} - \frac{\sqrt{\ell_{f,e}^2 + d_{g.m.d.f,e}^2}}{\ell_{f,e}} + \frac{d_{g.m.d.f,e}}{\ell_{f,e}} \right]$$

gdzie: $\ell_{f,e}$ - długość przewodów giętkich (f) lub elektrod (e);

$r_{g.m.r.f,e} = \sqrt[3]{r_1 \cdot r_2 \cdot r_3}$ - średnia geometryczna promieni d_{Δ} kabli elastycznych (f) i elektrod (e);

$d_{g.m.d.f,e} = \sqrt[3]{d_1 \cdot d_2 \cdot d_3}$ - średnia geometryczna odległości między kablami elastycznymi (f) i elektrodami (e).

Rezystancja zastępcza R_C obliczana jest ze znanego wzoru:

$$(7) \quad R_C = \frac{\ell_f}{\gamma_f \cdot S_f} + \frac{\ell_e}{\gamma_e \cdot S_e}$$

gdzie:

γ_f, γ_e - przewodność właściwa kabli elastycznych (f) i elektrod (e);

S_f, S_e - pole przekroju kabli elastycznych (f) i elektrod (e).

Wartości elementów składowych impedancji Z_C obwodu wtórnego pieca łukowego (rys. 5) zostały wyliczone według zależności (4+7), zweryfikowane pomiarowo, a ich miary w poszczególnych fazach zestawiono w tabeli 1.

Tabela 1. Wartości składowych impedancji Z_C

Faza	R_c [mΩ]	L_c [μH]
L1	0,151	5,84
L2	0,135	5,46
L3	0,152	5,84

Eksperymentalne wyznaczenie charakterystyk napięciowo-prądowych dynamicznych łuków

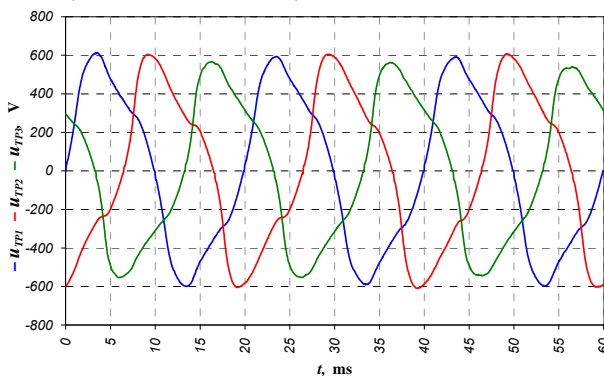
Do wyznaczenia charakterystyk napięciowo-prądowych łuków podczas pracy pieca wykorzystano zarejestrowane przebiegi napięć fazowych i prądów po stronie wtórnej transformatora piecowego TP (rys. 1). Do pomiaru prądów w torze wieloprądowym zastosowano cewki Rogowskiego (sygnał i_M na rysunku 5).

W obwodzie wtórnym transformatora TP, obciążeniem jest łuk elektryczny o nieliniowej rezystancji R_{arc} . Wartość napięcia łuku u_{arc} można obliczyć z równania Kirchhoffa obwodu niskiego napięcia (rys. 5) w dowolnym przedziale próbkowania $j \in \{1, N\}$ jako:

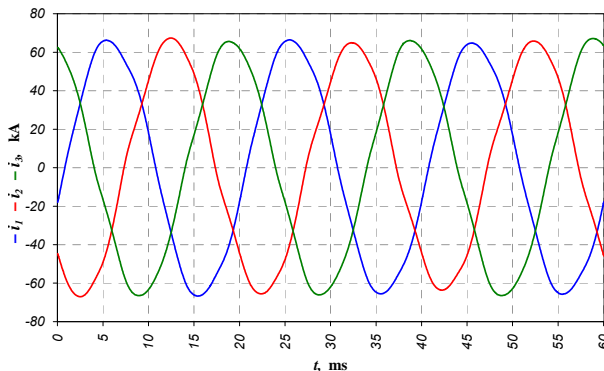
$$(8) \quad u_{arc}(j) = u_{TP}(j) - R_C i(j) - L_C \text{grad}\{i(j)\}$$

gdzie: R_C i L_C to rezystancja i indukcyjność toru wieloprądowego, $i = c \cdot i_M$ (c - współczynnik przetwarzania cewki Rogowskiego; i_M - rejestrowany sygnał prądu), N - liczba próbek pomiarowych w okresie $T = 20$ ms, indeks $j = 1, \dots, N$.

Przebiegi wartości chwilowych napięć fazowych strony wtórnej transformatora piecowego w stadiach roztopiania i rafinacji przedstawiono na rysunkach 6 i 7.



Rys. 6. Wartości chwilowe napięć fazowych u_{TP} strony wtórnej transformatora piecowego TP w stadium roztopiania

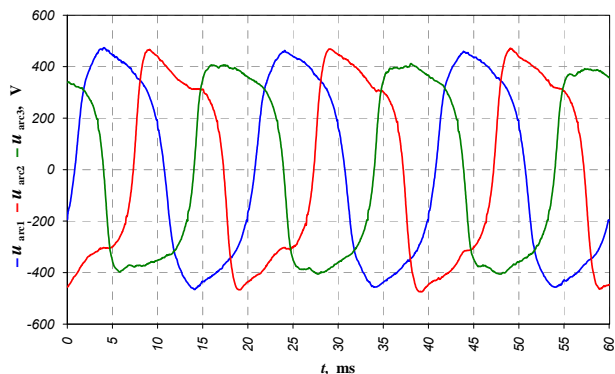


Rys. 7. Wartości chwilowe prądów fazowych strony wtórnej transformatora piecowego TP w stadium rafinacji

W czasie burzliwego etapu roztopiania, prąd i jest bardzo odkształcony, chwilowe napięcia fazowe wykazują

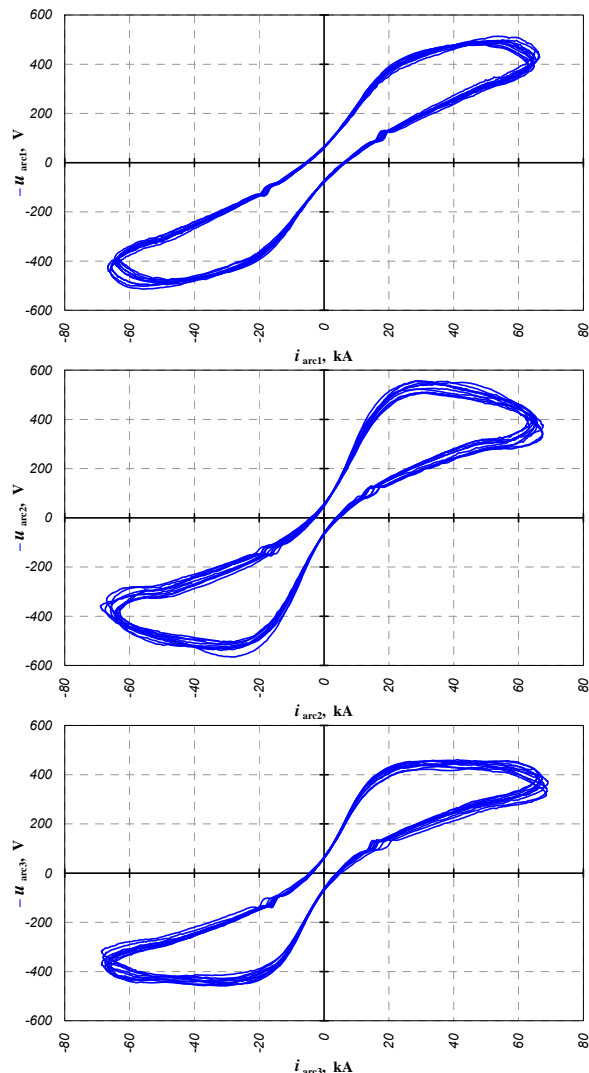
również odkształcenia w stosunku do fali sinusoidalnej. Stopień odkształcenia napięć fazowych transformatora ewoluuje w czasie pracy pieca przyjmując prawie sinusoidalne przebiegi w stadium rafinacji (rys. 7).

Korzystając z równania (8), pomierzonych przebiegów napięć fazowych strony wtórnej transformatora piecowego (rys. 6 i 7) oraz prądów mierzonych z użyciem cewek Rogowskiego w stadium roztopiania oraz rafinacji, można określić zmiany napięć fazowych łuków u_{arc} . Przykładowo na rysunku 8 przedstawiono przebiegi chwilowe napięć fazowych łuków w stadium roztopiania.



Rys. 8. Wartości chwilowe napięć łuków u_{arc} w stadium roztopiania

Charakterystyki łuków $u_{arc} - i_{arc}$ w poszczególnych fazach L1, L2 i L3 przedstawiono na rysunku 9.



Rys. 9. Charakterystyki napięciowo-prądowe dynamiczne łuków w AC-EAF w fazach L1, L2 i L3 w stadium rafinacji

Przebieg charakterystyk łuku przedstawionych na rysunku 9 odpowiada trójfazowej pracy pieca w stanie zrównoważenia [2]. Występuje również dobra zbieżność z charakterystykami u -i łuków uzyskanymi w układzie modelowym (rys. 4).

Wpływ zaburzeń łuku na jakość energii elektrycznej

Do oceny jakości energii elektrycznej w punkcie przyłączenia instalacji pieca łukowego do systemu elektroenergetycznego przyjęto trzy parametry dotyczące:

- asymetrii napięć fazowych,
- wskaźników $THD U$ napięć fazowych,
- spektrum harmonicznych prądów pobieranych z systemu.

Jako wielkości charakteryzującej asymetrię napięć fazowych po stronie pierwotnej transformatora sieciowego TS użyto wskaźnika $k_{u2(1)}$ określonego wzorem (9):

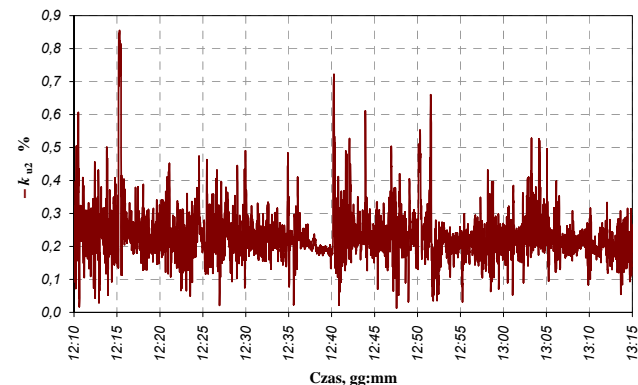
$$(9) \quad k_{u2(1)} = \frac{|U_{2(1)}|}{|U_{1(1)}|} \cdot 100\%$$

Wartości zespolonych napięć kolejności zgodnych $\underline{U}_{1(1)}$, przeciwnych $\underline{U}_{2(1)}$ i zerowych $\underline{U}_{0(1)}$ pierwszych harmonicznych otrzymuje się jako wynik macierzowej procedury określonej wzorem:

$$(10) \quad \begin{pmatrix} \underline{U}_{0(1)} \\ \underline{U}_{1(1)} \\ \underline{U}_{2(1)} \end{pmatrix} = \frac{1}{3} \begin{pmatrix} 1 & 1 & 1 \\ 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \end{pmatrix} \cdot \begin{pmatrix} U_{L1(1)} e^{j(\omega t + \xi_{1(1)})} \\ U_{L2(1)} e^{j(\omega t - \frac{2\pi}{3} + \xi_{2(1)})} \\ U_{L3(1)} e^{j(\omega t + \frac{2\pi}{3} + \xi_{3(1)})} \end{pmatrix}$$

gdzie: $a = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}$

Wykres zmian współczynnika asymetrii napięć zasilających instalację pieca łukowego AC w pełnym cyklu wytopu zaprezentowano na rysunku 10. Można stwierdzić, iż średni poziom asymetrii wynosi ok. 0,3% z maksymalnymi wartościami, w czasie roztopiania nieprzekraczającymi 1%.



Rys. 10. Współczynnik asymetrii napięć strony pierwotnej transformatora sieciowego TS podczas pełnego cyklu wytopu

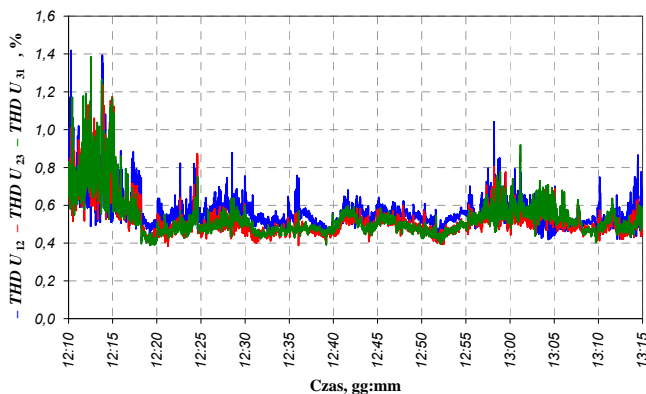
W zależności (10) wykorzystano postacie zespolone pierwszych wyrażeń zapisu harmonicznego trzech napięć fazowych przebiegów odkształconych określonych zależnością:

$$(11) \quad \begin{aligned} u_{L1}(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} U_{L1(v)} \sin(v\omega t + \xi_{1(v)}) \\ u_{L2}(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} U_{L2(v)} \sin \left[v \left(\omega t - \frac{2\pi}{3} \right) + \xi_{2(v)} \right] \\ u_{L3}(t) &= \sum_{v=1}^{\infty} U_{L3(v)} \sin \left[v \left(\omega t + \frac{2\pi}{3} \right) + \xi_{3(v)} \right] \end{aligned}$$

Na bazie rozkładu harmonicznego napięć fazowych (11) można obliczyć współczynnik $THD U$ definiowany jako:

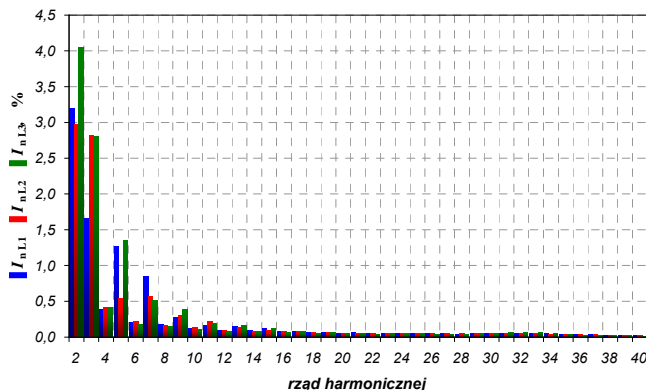
$$(12) \quad THD U_{L_i} = \frac{\sqrt{\sum_{v=2}^{40} U_{L_i(v)}^2}}{U_{L_i(1)}} \quad \text{dla } i = 1, 2, 3$$

Wykres zmian wartości współczynników $THD U$ napięć fazowych strony pierwotnej transformatora sieciowego przyłączonego do systemu elektroenergetycznego podczas pełnego cyklu wytopu przedstawiono na rysunku 11. Największe wartości współczynników $THD U$ występują w czasie roztopiania, a ich średni poziom mieści się w zakresie 1%.



Rys. 11. Współczynniki $THD U_{L1}$, $THD U_{L2}$, $THD U_{L3}$ po stronie pierwotnej transformatora sieciowego TS podczas pełnego cyklu wytopu

Miary odkształcenia prądów pobieranych z sieci elektroenergetycznej przedstawiono na rysunku 12 w postaci graficznej jako uśrednione widmo wyższych harmonicznych prądów fazowych w określonym interwale czasowym stadium roztopiania. Największe wartości dotyczą drugiej harmonicznej i osiągają poziom 4%. Taki stan jest wynikiem współdziałania filtrów wyższych harmonicznych zainstalowanych na poziomie średniego napięcia i zestrojonych na trzecią, czwartą i piątą harmoniczną.



Rys. 12. Widmo wyższych harmonicznych prądów po stronie pierwotnej transformatora sieciowego – stadium roztopiania

Wnioski

1. Zmodyfikowany model łuku opisany zależnością (3), wykazał jakościową zgodność z wynikami badań eksperymentalnych w zakresie od zapłonu łuku (stanu zwarcia) poprzez jego rozciąganie, aż do momentu zgaszenia. Kształty charakterystyk dynamicznych łuków $u_{arc} = i(i_{arc})$, zaprezentowane na rysunkach 4 i 9 wykazują pewne podobieństwo jakościowe i ilościowe.
2. Określenie charakterystyk dynamicznych łuków z wykorzystaniem eksperymentalnej metody pomiarowej było

możliwe dzięki wykorzystaniu algorytmu obliczeniowego parametrów zastępczych obwodu wysokoprądowego.

3. Zbieżność modelowych i pomiarowych charakterystyk łuków pozwoliła na określenie jakości pobieranej energii elektrycznej z sieci wysokiego napięcia. Jako parametry kryterialne obrano: wartości asymetrii napięciowej, współczynników $THD U$ napięć fazowych oraz spektralny rozkład wyższych harmonicznych prądów fazowych pobieranych przez transformator sieciowy TS. Na podstawie wykonanych pomiarów oraz niezbędnych obliczeń przedstawiono w postaci graficznej wykresy czasowe analizowanych parametrów. Stwierdzono, że wybrane kryterialne parametry nie przewyższają dopuszczalnych wartości [31].

Autorzy: Autorzy: dr inż. Marek Gała, E-mail: m.gala@el.pcz.czyst.pl; Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, SEP Oddział Częstochowski, dr hab. inż. Antoni Sawicki, E-mail: sawicki.a7@gmail.com, SEP Oddział Częstochowski; dr hab. inż. Kazimierz Jagieła, E-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com; Akademia Techniczno-Humanistyczna Bielsko-Biała, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, SEP Oddział Częstochowski; dr inż. Janusz Rak, E-mail: janer35@gmail.com, SEP Oddział Częstochowski

LITERATURA

- [1] 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.
- [2] Alonso M.A.P., Donsión M.P., An improved time domain arc furnace model for harmonic analysis, *IEEE Transaction on Power Delivery*, vol. 19, Issue: 1, January 2004, pp. 367-373. doi: 10.1109/TPWRD.2003.820189.
- [3] Gała M., Rak J., Jagieła K., Praca pieca łukowego AC w systemie elektroenergetycznym, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 95, Nr 12/2019, s. 246-251. doi: 10.15199/48.2019.12.56.
- [4] 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 (EPMCCS)*, 12-14 Nov. 2018, Kielce, Poland. doi: 10.1109/EPMCCS.2018.8596452.
- [5] 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*, vol. 80, 2010, pp. 572-581. doi: 10.1016/j.epr.2009.10.015.
- [6] 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*, 9-11 October 2007, Barcelona, Spain, pp. 1-6, doi: 10.1109/EPQU.2007.4424209.
- [7] Jagieła K., Rak J., Gała M., Kępiński M., Identification of Electric Power Parameters of AC Arc Furnace Low Voltage System, *14th International Conference on Harmonics and Quality of Power - ICHQP 2010*, 26-29 Sept. 2010, Bergamo, doi: 10.1109/ICHQP.2010.5625439.
- [8] Khoshkhoo H., Sadeghi S.H.H., Moini R., Talebi H.A., An efficient power control scheme for electric arc furnaces using online estimation of flexible cable inductance, *Computers and Mathematics with Applications*, vol. 62, Issue 12, December 2011, pp. 4391-4401, doi: 10.1016/j.camwa.2011.10.009.
- [9] Rak J., Gała M., Jagieła K., Kępiński M., Wpływ parametrów instalacji zasilania pieca łukowego na wskaźniki elektroenergetyczne procesu wytopu stali, *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93, Nr 1/2017, s. 5-8. doi: 10.15199/48.2017.01.02.
- [10] Nikolaev A.A., Tulupov P.G., Method of setting optimum asymmetric mode of operation of electric arc furnace, 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECA TRONICS)/17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM), 15-17 June 2016, Compiegne, France, pp. 33-37. doi: 10.1109/MECATRONICS.2016.7547111.
- [11] Gała M., Sawicki A., Jagieła K., Modeling of asymmetrical operating states of AC-EAF furnaces in the power system, *Zastosowania Elektromagnetyzmu we Współczesnej Inżynierii i Medycynie (PTZE)*, Janów Podlaski, 9-12 czerwiec 2019. IEEE Xplore, doi: 10.23919/PTZE.2019.8781701.
- [12] Jagieła K., Gała M., Rak J., Kępiński M., Eksperymentalny pomiar parametrów i charakterystyk hydraulicznego napędu elektrod pieca łukowego, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Pol. Gdańskiej*, nr 54, 2017, s. 83-87.
- [13] Wang Y., Mao Z., Tian H., Li Y., Yuan P., Modeling of electrode system for three-phase electric arc furnace, *Journal of Central South University of Technology*, vol. 17, issue 3, June 2010, pp. 560-565, doi: 10.1007/s11771-010-0523-3.
- [14] Rak J., Jagieła K., Kępiński M., Selection of electric parameters of medium voltage supply AC arc furnace, *International Conference „Technical and Economic Aspect of Modern Technology Transfer in Context of Integration with European Union”*, Kosice 2004, vol. 1, 87-94.
- [15] Jagieła K., Rak J., Gała M., Asymetria napięciowo-prądowa w torze zasilania pieca łukowego AC, *Maszyny Elektryczne - Zeszyty Problemowe*, No. 2/2019 (122), s. 123-129.
- [16] Ryff P.F., Calculation of arc-circuit asymmetry in electric-arc furnaces, *IEEE Proceedings B - Electric Power Applications*, vol. 130, No.3, 1983, pp. 213-217. doi:10.1049/ip-b.1983.0032.
- [17] Shurygin Y.A., Symmetry of Arc Furnace Operation, *Steel in Translation*, 2017, Vol. 47, Issue 11, pp. 732-736. doi: 10.3103/S0967091217110110.
- [18] Gała M., Sawicki A., Jagieła K., Rak J., Wpływ procesów inicjacji i gaszenia łuków w piecach łukowych AC na stany asymetrii układu zasilania, *Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej*, Nr 67, 2019, s. 105-109. doi: 10.32016/1.67.22.
- [19] Kruczinin A.M., Sawicki A., Piece i urządzenia łukowe. *Seria Monografie nr 74*, Wydawnictwo Politechniki Częstochowskiej, Częstochowa 2000.
- [20] Haruni A.M.O., Negnevitsky M., M. E. Haque M.E., Muttaqi K.M., Implementation of Artificial Intelligence Technique to Model Arc Furnace Responses, *Australasian Universities Power Engineering Conference*, 14-17 Dec. 2008, Sydney, Australia, pp. 1-6.
- [21] Gała M., Sawicki A., Jagieła K., Zagadnienia modelowania łuków elektrycznych pieców stalowniczych, *Śląskie Wiadomości Elektryczne*, No. 6/2018, s. 4-9.
- [22] Tseng K.J., Wang Y., Vilathgamuwa D.M., An Experimentally Verified Hybrid Cassie-Mayr Electric Arc Model for Power Electronics Simulations, *IEEE Transactions on Power Electronics*, vol. 12, no. 3, 1997, pp. 429-436. DOI: 10.1109/63.575670.
- [23] Пентегов И.В., Математическая модель столба динамической электрической дуги, *Автоматическая сварка*, (279), № 6, 1976, с. 8-12. (in Russian).
- [24] Sawicki A., Modelling the effect of external disturbances in static characteristics of unspecified and determined ignition voltages on dynamic characteristics of arc in a circuit with the current source. Part. 1. Primary analytical correlations, *Biuletyn Instytutu Spawalnictwa w Gliwicach*, Vol. 63, No. 2/2019, pp. 59-67. doi: 10.17729/ebis.2019.2/6.
- [25] Sawicki A., Haltof M., Spectral and integral methods of determining parameters in selected electric arc models with a forced sinusoid current circuit, *Archives of Electrical Engineering*, Vol. 65, no. 1, 2016, pp. 87-103. doi: 10.1515/ae-2016-0007.
- [26] IEC 60676:2011, Industrial electroheating equipment - Test methods for direct arc furnaces, Ed. 3.0, ICS 25.180.10, 2011.
- [27] Clayton R.P., Inductance: Loop and Partial. Wiley-IEEE Press, 2009, pp. 34-42.
- [28] Pănoiu M., Pănoiu C., Şora I., Modeling of Three Phase Electric Arc Furnaces. *Acta Electrotechnica*, vol.48, Nr 2, 2007, pp.124-132.
- [29] Kldiashvili V., Natriashvili T., Mebonia S., Shermaznashvili A., Analysis of the Parameters of the Ore Restoration Furnaces for Equal Power on the Shelf-Baking and Graphitized Electrodes. *Journal of Energy and Power Engineering* 10 (2016) p.786-791, doi:10.17265/1934-8975/2016.12.010.
- [30] Aliferov A.I., Bikeev R.A., Vlasov D.S., Goreva L.P., Domarov P.V.: Software Complex Calculate Inductances of Secondary Current Contacts of Electrotechnological Installations. *Proceedings of the XVII Congress*, 21-25 May 2012, St. Petersburg. Изд-во СПбГЭТУ "ЛЭТИ", p. 321-326.
- [31] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2007 r., nr 93, poz. 623 z późn. zm.)