

Praca pieca łukowego AC w systemie elektroenergetycznym

Streszczenie. W artykule opisano instalację zasilania pieca łukowego prądu przemiennego. Elektryczny piec łukowy AC, ze względu na dynamiczny charakter pracy łuku elektrycznego, negatywnie oddziałuje na sieć zasilającą w postaci generowania wyższych harmonicznych, wahań napięcia oraz asymetrii. Przedstawiono wybrane wyniki pomiarów przeprowadzonych po stronie niskiego napięcia, gdzie nieliniowe prądy łuków są źródłem zaburzeń oraz w punkcie wspólnego przyłączenia sieci wysokiego napięcia. Instalacja pieca łukowego na poziomie średniego napięcia wyposażona jest w trójgałęziowy pasywny filtr wyższych harmonicznych, który spełnia podwójną funkcję: redukcji harmonicznych oraz kompensacji mocy biernej dla składowej podstawowej. Analizę pracy pieca łukowego AC przeprowadzono dla pełnego cyklu wytopu stali obejmującego stany roztopienia (pierwszy i drugi kosz złomowy) oraz rafinacji stali.

Abstract. The article presents the AC power supply installation. The AC electric arc furnace, due to the dynamic nature of the electric arc work, has a negative effect on the supply network in the form of generating higher harmonics, voltage fluctuations and asymmetries. Selected results of measurements on the low-voltage side are presented, where non-linear arc currents are a source of disturbances and at the high-voltage network connection point. The installation of an arc furnace at the medium voltage level is equipped with a three-branch passive higher harmonics filter, which has a dual function: harmonics reduction and reactive power compensation for the basic component. The analysis of AC arc furnace operation for the full steel smelting cycle including melting (first and second scrap bin) and refining is shown. (**Operation of AC arc furnace in the power system**).

Keywords: AC arc furnace, power quality, nonlinear load, higher harmonics

Słowa kluczowe: piec łukowy AC, jakość energii elektrycznej, nieliniowe obciążenie, wyższe harmoniczne

Wstęp - charakterystyka instalacji pieców łukowych

We współczesnych stalowniach, w procesach metalurgicznych wytopu stali pochodzącej ze złomu, stosowane są powszechnie elektryczne piece łukowe prądu przemiennego AC. Najistotniejszym elementem instalacji pieca łukowego jest układ zasilania w energię elektryczną. Przy projektowaniu instalacji zasilania pieca istotny jest dobór mocy urządzeń tworzących tor zasilania w relacji do znamionowej masy wsadu oraz sposób przyłączenia do systemu elektroenergetycznego o mocy zwarcia S_{PCC} [1].

Piece łukowe są odbiornikami nieliniowymi o dużej mocy, których praca w istotnym stopniu może powodować degradację jakości energii elektrycznej. Właściwy dobór parametrów elektrycznych instalacji zasilania pieca ma decydujący wpływ na stopień jego oddziaływania na sieć elektroenergetyczną oraz charakterystyki eksploatacyjne: wskaźnik zużycia energii elektrycznej na tonę stali i efektywny czas topienia złomu. Ze względu na niestabilną charakterystykę napięciowo-prądową łuku, zwłaszcza w fazie roztopienia złomu, piec łukowy AC stanowi silnie nieliniowy odbiór elektroenergetyczny o niespokojnym charakterze pracy [2, 3, 4, 5]. Powoduje to negatywne oddziaływanie na sieć zasilającą i zaburzenia jakości energii w postaci wahań napięcia (migotanie światła), asymetrii oraz generowania harmonicznych i interharmonicznych powodujących odkształcenie przebiegów prądów i napięć od kształtu sinusoidalnego [5, 6, 7].

Elektryczny piec łukowy prądu przemiennego (EAF) generuje widmo ciągle harmonicznych prądu [8], przy czym najbardziej znaczące są harmoniczne rzędów 2, 3, 5 i 7 względem częstotliwości sieci zasilającej [2, 4, 5, 7, 9]. Relatywnie niski jest wskaźnik PF (ang. *Power Factor*), co ma miejsce szczególnie na początku procesu wytopu stali, przy jednoczesnym występowaniu dynamicznych zmian poboru mocy czynnej i biernej [3, 4, 7]. Utrzymanie właściwych parametrów napięć i prądów w punkcie wspólnego przyłączenia do sieci elektroenergetycznej wiąże się z zapewnieniem optymalnej struktury systemu zasilania nieliniowego odbiornika energii elektrycznej jakim jest piec łukowy AC. Wśród metod ograniczenia negatywnych skutków pracy pieców łukowych wyróżnia się alternatywne zastosowanie w instalacji zasilania: filtrów pasywnych L-C, filtrów pasywnych L-C wspomaganych pracą nadążnego

kompensatora mocy biernej indukcyjnej TCR, lub też filtru aktywnego STATCOM [5, 7, 10]. Urządzenia te ograniczają nie tylko zawartość wyższych harmonicznych prądu, ale dla częstotliwości podstawowej zapewniają dodatkowo kompensację mocy biernej [7].

Pod względem właściwości regulacyjnych współczesny piec łukowy AC stanowi zaawansowane urządzenie mechatroniczne, którego istotnym elementem jest system sterowania stanami elektrycznymi pieca [11]. System ten odpowiada za działanie hydraulicznego napędu pozycjonowania elektrod, zmianę zaczepek transformatora piecowego i wybór krzywej wydajności podczas operacji topienia wsadu w celu utrzymania odpowiedniego poziomu mocy łuku elektrycznego, która jest niezbędna dla efektywnego prowadzenia procesu technologicznego. Wyróżnia się następujące sposoby regulacji zapewniające [12]:

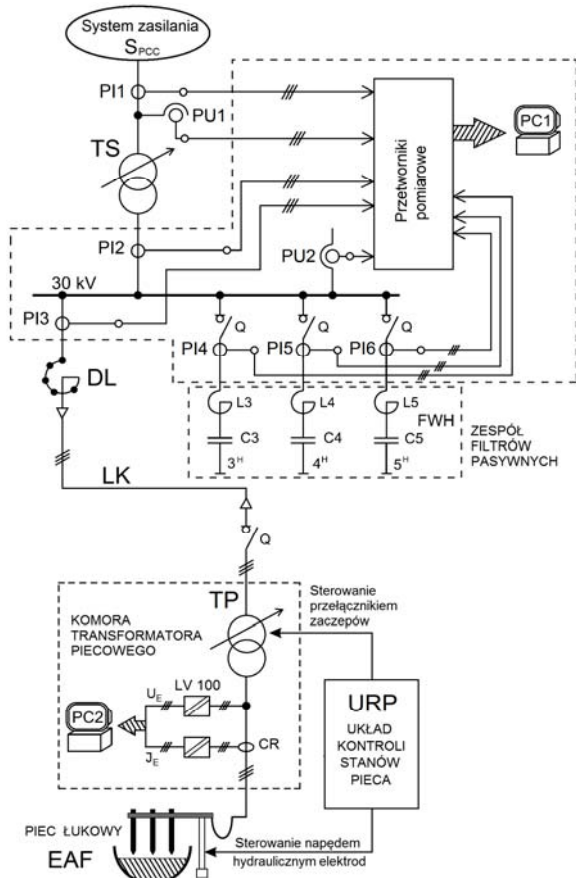
- stałą wartość impedancji $Z = U/I = \text{const}$,
- stałą wartość napięcia łuku $U_{\text{arc}} = \text{const}$,
- stałą wartość rezystancji łuku $R_{\text{arc}} = \text{const}$.

Opis instalacji zasilania pieca łukowego AC

Piec łukowy AC należy do grupy nieliniowych odbiorów elektroenergetycznych dużej mocy charakteryzujących się dynamicznie zmiennym poborem mocy czynnej i biernej, zwłaszcza w stadium roztopienia wsadu. Ponadto EAF jako źródło harmonicznych powodujących odkształcenie napięć i prądów, stwarza problemy związane z jakością energii w systemie, co wpływa na działanie innych odbiorników podłączonych do sieci elektrycznej. Z tych względów piec łukowy z zasady posiada autonomiczny układ zasilania, przyłączany do krajowego systemu elektroenergetycznego w sposób zapewniający odpowiednią moc zwarcia, niezbędną do prawidłowego i szybkiego wytopu stali, a także utrzymania parametrów jakościowych energii elektrycznej.

Na rysunku 1 przedstawiono schemat systemu zasilania pieca łukowego prądu przemiennego EAF zainstalowanego w hucie stali. Energia elektryczna doprowadzana jest do instalacji pieca z systemu elektroenergetycznego o mocy zwarcia S_{PCC} za pośrednictwem transformatora sieciowego TS zasilającego rozdzielnię średniego napięcia 30 kV. Transformator piecowy TP konwertora elektrycznego podłączony jest do szyn rozdzielni średniego napięcia poprzez dławik liniowy DL i linię kablową LK. Dzięki specjalnej

konstrukcji transformator TP umożliwia w szerokim zakresie regulację pod obciążeniem napięć podawanych do elektrod. Regulacja mocy czynnej dostarczanej do pieca realizowana jest przez układ kontroli stanów pracy pieca (URP), który steruje przełącznikiem zacze- pów oraz hydraulicznym układem napędowym elektrod ustawiając je w odpowiednim położeniu [11, 12, 13].



Rys. 1. Schemat instalacji zasilania pieca łukowego AC oraz rozmieszczenie elementów układu pomiarowego

W celu ograniczenia oddziaływania wyższych harmonicznych prądów na system elektroenergetyczny, na poziomie średniego napięcia 30 kV zainstalowano trójgałęziowy zespół filtrów pasywnych FWH z obwodami L-C dostrojonymi do częstotliwości rezonansu szeregowego. Poszczególne filtry zostały zestrojone na częstotliwości rezonansowe o rzędach $r = 3$, $r = 4$ i $r = 5$. Dla częstotliwości sieci zasilającej $f_s = 50$ Hz zespół filtrów FWH stanowi układ kompensacji mocy biernej.

Metodyka pomiarów w torze zasilania pieca łukowego

Rozmieszczenie elementów układu pomiarowego do rejestracji przebiegów napięć i prądów w instalacji zasilania pieca łukowego AC na poziomie wysokiego, średniego i niskiego napięcia pokazano na rysunku 1. Do pomiaru wartości chwilowych zastosowano komputery PC1 i PC2 wyposażone w karty DAQ oraz oprogramowanie DasyLab umożliwiające emulację wielokanałowego oscyloskopu cyfrowego i rejestrację danych pomiarowych.

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

Zgodnie ze schematem podanym na rysunku 1 zarejestrowano jednocześnie przebiegi napięcia w trzech fazach

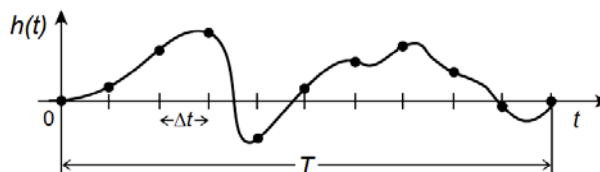
na poziomie WN i SN, prądów pierwotnego i wtórnego transformatora sieciowego TS, prądu pierwotnego transformatora piecowego TP oraz prądów filtrów wyższych harmonicznych [7]. W obwodzie niskiego napięcia po stronie wtórnej transformatora TP zmierzono napięcia fazowe oraz za pomocą cewek Rogowskiego [3] prądy elektrod pieca łukowego.

Jakość energii elektrycznej dostarczanej w punkcie wspólnego przyłączenia (PWP) jest uregulowana prawnie w normach i rozporządzeniach [14, 15]. Do wyznaczenia wskaźników charakteryzujących parametry jakości zasilania konieczne jest określenie zawartości harmonicznych w przebiegach napięć i prądów [16, 17]. W przypadku badanej instalacji pieca łukowego AC niezbędna jest rejestracja sygnałów napięć międzyprzewodowych oraz prądów fazowych pobieranych z systemu przez układ zasilania pieca (strona pierwotna TS). Dla wyjaśnienia poziomu zakłóceń występujących w miejscu przyłączenia instalacji zasilania pieca do systemu elektroenergetycznego fundamentalne znaczenie ma wyznaczenie adekwatnych wskaźników jakości energii na poziomie niskiego napięcia tj. po stronie wtórnej transformatora piecowego TP. Zjawiska związane z łukiem elektrycznym powodują zaburzenie prądów fazowych, szczególnie w stadium roztopienia złomu stalowego. Odształcone prądy płynące w torze zasilania pieca łukowego są przyczyną deformacji napięć w punkcie PWP.

Analiza harmoniczna odształconych przebiegów oparta o dyskretną transformatę Fouriera FFT pozwala wyznaczyć widma harmonicznych i stopień odształcenia przebiegów. Poza określeniem podstawowych harmonicznych, istotne są również współczynniki asymetrii napięciowej i prądowej. Niezbędne dane dostarczają cyfrowe narzędzia pomiarowe umożliwiające próbkowanie i rejestrację okresowych sygnałów ciągłych z częstotliwością co najmniej 10 kHz.

Ciągły sygnał $h(t)$ próbkowany jest dla N kolejnych wartości zmierzonych w odstępach czasu Δt (rys. 2) w taki sposób, że:

$$(1) \quad h(t) \equiv h(t_k), \quad t_k \equiv k \cdot \Delta t, \quad k = 0, 1, 2, \dots, N-1$$



Rys. 2. Próbkowanie sygnałów napięć/prądów

Szereg Fouriera ciągu okresowego ma tylko N różnych zespolonych wyrazów wykładniczych, z których każdy ma okres będący podwielokrotnością podstawowego okresu Δt . Zatem okresowy ciąg $H(n)$ można przedstawić w postaci szeregu Fouriera zawierającego tylko N wyrazów o postaci:

$$(2) \quad H(n) = \Delta t \sum_{k=0}^{N-1} h_k \exp\left(\frac{2\pi i k n}{N}\right)$$

dla $n = -\frac{N}{2}, \dots, \frac{N}{2}$

Wykorzystując dyskretną transformatę Fouriera według algorytmu (2) uzyskuje się widma wyższych harmonicznych zarejestrowanych przebiegów napięć i prądów w poszczególnych punktach toru zasilania pieca łukowego dla stadium roztopienia złomu i rafinacji.

Norma [18] a także Rozporządzenie Ministra Gospodarki [15] definiują współczynnik odształcenia harmonicznymi napięcia zasilającego THD_U następująco:

$$(3) \quad THD_U = \frac{\sqrt{\sum_{r=2}^{40} U_r^2}}{U_1}$$

gdzie: U_r – wartości skuteczne poszczególnych wyższych harmonicznych napięcia do rzędu $r = 40$; U_1 – wartość skuteczna napięcia pierwszej harmonicznej.

Analogicznie definiowany jest współczynnik THD_I dla prądów fazowych:

$$(4) \quad THD_I = \frac{\sqrt{\sum_{r=2}^{40} I_r^2}}{I_1}$$

gdzie: I_r – wartości skuteczne poszczególnych wyższych harmonicznych prądu do rzędu $r = 40$; I_1 – wartość skuteczna prądu pierwszej harmonicznej.

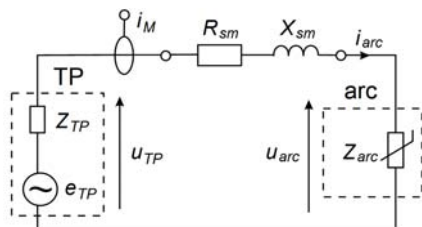
Miara asymetrii jest współczynnik asymetrii napięć fazowych wyrażany jest jako moduł zespolonego współczynnika asymetrii określony wzorem (5):

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

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

Charakterystyka źródła zaburzeń w instalacji pieca łukowego prądu przemiennego

Zjawiska związane z łukiem elektrycznym we wnętrzu pieca AC są źródłem zaburzeń w postaci odkształceń napięć i prądów w obwodzie w wtórnym transformatora piecowego. Ma to bezpośredni wpływ na fluktuację mocy czynnej i biernej pobieranych przez piec łukowy. Schemat zastępczy obwodu niskiego napięcia toru zasilania pieca z zaznaczonymi wielkościami mierzonymi (i_M , u_{TP}) pokazano na rysunku 3.



Rys. 3. Schemat zastępczy obwodu niskiego napięcia pieca łukowego AC (dla pojedynczej fazy)

gdzie: Z_{TP} – impedancja uzwojenia transformatora piecowego TP składająca się z rezystancji R_{TP} i reaktancji X_{TP} ; e_{TP} – sem uzwojenia wtórnego transformatora TP; X_{sm} – reaktancja indukcyjna szyny magistralnej; R_{sm} – rezystancja szyny magistralnej z uwzględnieniem rezystancji elektrody; u_{arc} – napięcie łuku; u_{TP} – napięcie fazowe strony wtórnej transformatora TP.

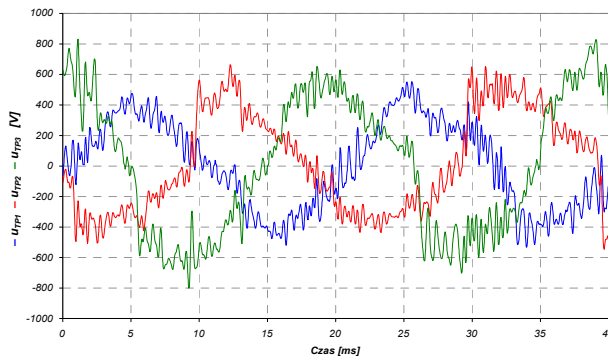
Długość łuku, która jest uzależniona od napięcia u_{TP} i położenia elektrod, wpływa na nieliniowo zmienną wartość impedancji łuku $Z_{arc} = R_{arc} + jX_{arc}$. Ponadto zmiana położenia przełącznika zaczerw uzwojeń transformatora piecowego TP powoduje skokową zmianę jego impedancji Z_{TP} .

Łuk elektryczny o nieliniowej impedancji Z_{arc} , której część rzeczywistą i urojoną określono np. w [19] jest obciążeniem prądowym w obwodzie wtórnym transformatora TP. Rezystancję R_{sm} i reaktancję X_{sm} obwodu można ocenić na podstawie testów zwarcia zgodnie z normą IEC 676 [20]. Zmierzony sygnał i_M jest proporcjonalny do prądu łuku i_{arc} :

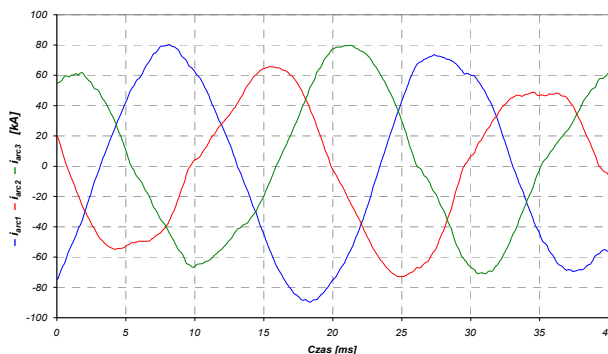
$$(6) \quad i_M(n) = c \cdot i_{ARC}(n)$$

gdzie stała c jest współczynnikiem wzmocnienia cewek Rogowskiego.

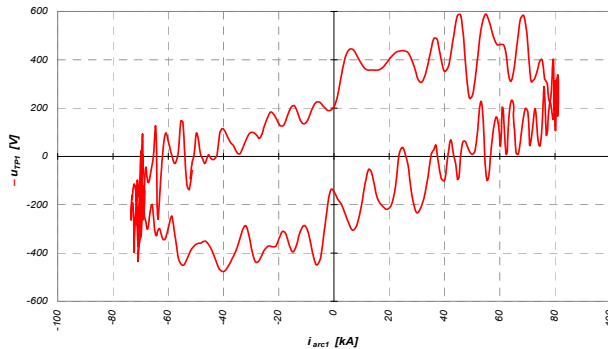
Wartości chwilowe napięć fazowych u_{TP} i prądów fazowych i_{arc} strony wtórnej transformatora TP podczas roztopiania pokazano na rysunkach 5 i 6. Ilustrują one stopień odkształcenia przebiegów oraz asymetrię prądów wynikające z nieliniowości oraz dynamicznych zmian łuku elektrycznego. Niestabilność łuku w stadium roztopiania złomu pokazuje charakterystyka $u_{TP} - i_{arc}$ przedstawiona na rysunku 6.



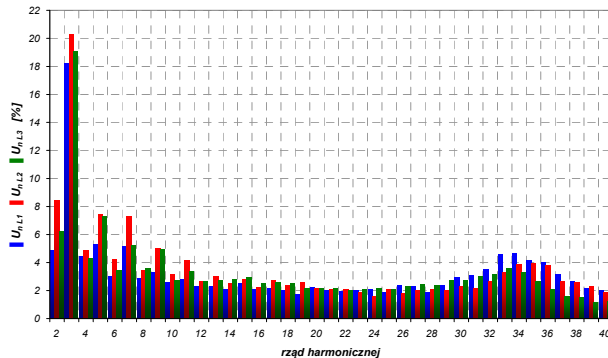
Rys. 4. Wartości chwilowe napięć fazowych u_{TP} strony wtórnej transformatora piecowego TP podczas roztopiania wsadu



Rys. 5. Wartości chwilowe prądów fazowych strony wtórnej transformatora piecowego TP podczas roztopiania wsadu



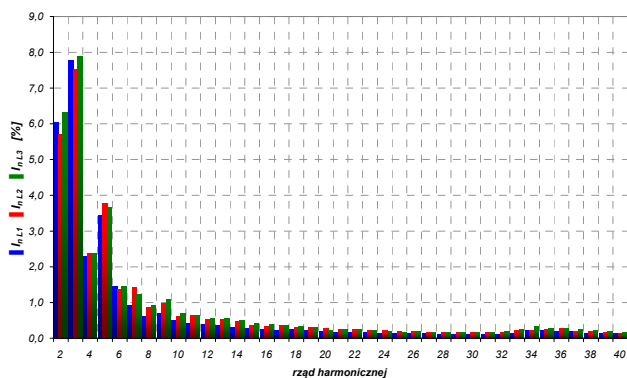
Rys. 6. Charakterystyka $u_{TP} - i_{arc}$ w stadium roztopiania (faza L1)



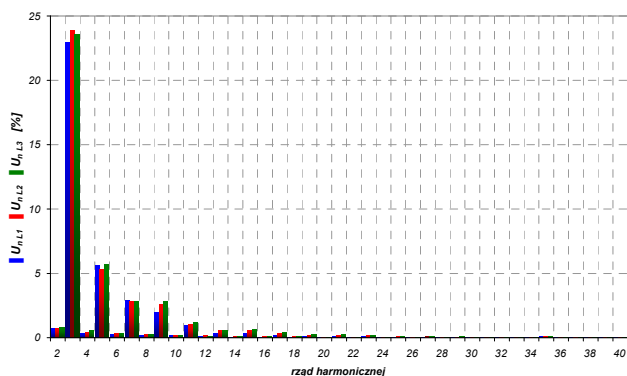
Rys. 7. Widmo wyższych harmonicznych napięć po stronie wtórnej transformatora TP podczas wytopu - stadium roztopiania

Do analizy pracy pieca łukowego w dziedzinie częstotliwości wykorzystano składowe harmoniczne napięć u_{TP} po stronie wtórnej transformatora piecowego TP i prądów łuku i_{arc} uzyskane w wyniku transformacji FFT. Widma wh napięć i prądów dla stadiów roztopiania i rafinacji pokazano na rysunkach od 7 do 10. Wykresy te wskazują, że:

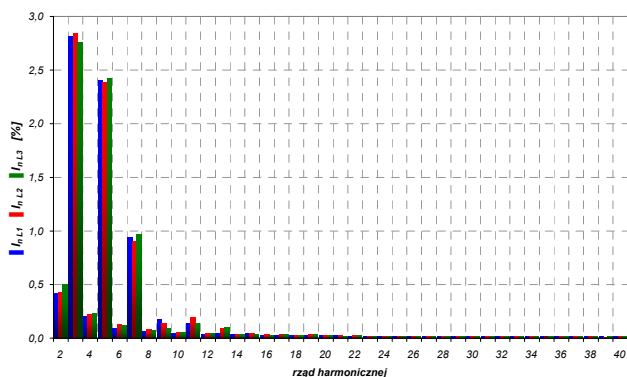
- w stadium roztopiania złomu piec łukowy AC generuje ciągłe spektrum harmonicznych prądu, przy czym dominują 2., 3., 4. i 5. harmoniczne; również widmo harmonicznych napięcia jest ciągle z lokalnym maksimum w pobliżu $r = 34$,
- w stadium rafinacji piec wytwarza głównie harmoniczne nieparzyste prądu aż do 15. rzędu, największe wartości osiągają harmoniczne rzędów 3., 5. i 7.; podobny rozkład (jedynie harmoniczne nieparzyste) wykazuje widmo napięć,
- 3. harmoniczna napięcia jest największa zarówno w fazie roztopiania ($18 \pm 20\%$) jak i rafinacji (ponad 23%).



Rys. 8. Widmo wyższych harmonicznych prądów po stronie wtórnej transformatora TP podczas wytopu - stadium roztopiania

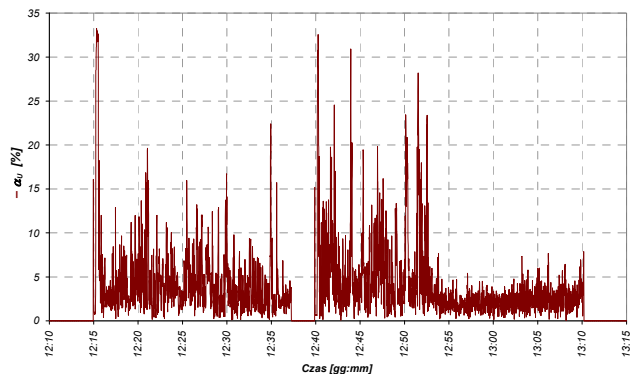


Rys. 9. Widmo wyższych harmonicznych napięć po stronie wtórnej transformatora TP podczas wytopu - stadium rafinacji



Rys. 10. Widmo wyższych harmonicznych prądów po stronie wtórnej transformatora TP podczas wytopu - rafinacja

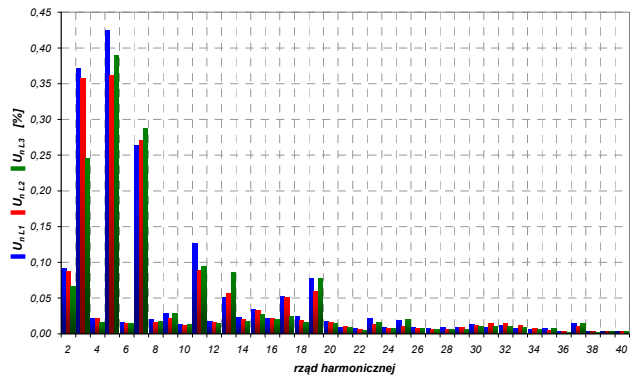
Przedstawiony na rysunku 11 przebieg współczynnika asymetrii napięciowej α_{u_i} po stronie wtórnej transformatora TP w stadium roztopiania wynosi $3 \pm 7\%$ (I kosz) oraz $3 \pm 12\%$ (II kosz), a podczas rafinacji $2 \pm 4\%$. Występujące impulsowo wartości dochodzące do 30% są wynikiem „zrywania” łuku.



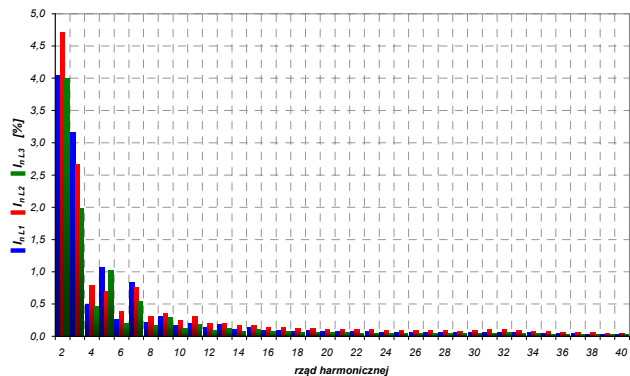
Rys. 11. Współczynnik asymetrii napięć strony wtórnej transformatora piecowego TP

Analiza oddziaływania instalacji zasilania pieca łukowego na system elektroenergetyczny

W celu przeprowadzenia analizy oddziaływania pieca łukowego AC na sieć zasilającą dokonano analizy harmonicznej przebiegów napięć oraz prądów fazowych pobieranych z systemu przez układ zasilania pieca zarejestrowanych za cały cykl wytopu. Rezultatem obliczeń są wykresy widm harmonicznych napięć i prądów dla dwóch etapów wytopu: roztopiania i rafinacji. Na rysunku 12 przedstawiono widmo wyższych harmonicznych napięć fazowych w punkcie wspólnego przyłączenia tj. po stronie wysokiego napięcia dla etapu najbardziej burzliwego tzn. roztopiania złomu. Największe procentowe wartości występują dla napięć piątej harmonicznej i wynoszą ok. 0,4%.



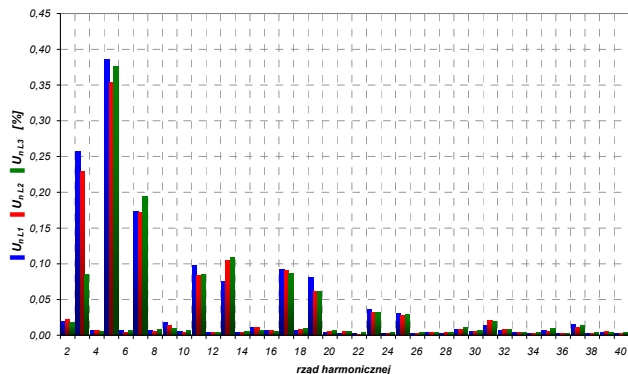
Rys. 12. Widmo wyższych harmonicznych napięć po stronie pierwotnej transformatora sieciowego - stadium roztopiania



Rys. 13. Widmo wyższych harmonicznych prądów po stronie pierwotnej transformatora sieciowego - stadium roztopiania

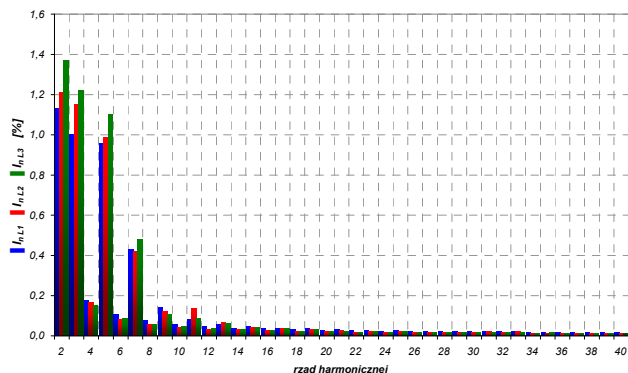
O rząd większe wartości przyjmują harmoniczne prądów pobieranych z sieci wysokiego napięcia dla stanu roztopienia (rys. 13). Dominującą harmoniczną w tym przypadku jest druga, której zawartość w prądzie fazy L2 osiąga 4,7%.

Znacznie mniejsze odkształcenia napięć i prądów występują dla etapu rafinacji. Na rysunku 14 przedstawiono wykres słupkowy harmonicznych napięć fazowych podczas rafinacji stali. Piąte harmoniczne napięć fazowych mają największe wartości wynoszące średnio ok. 0,37%.

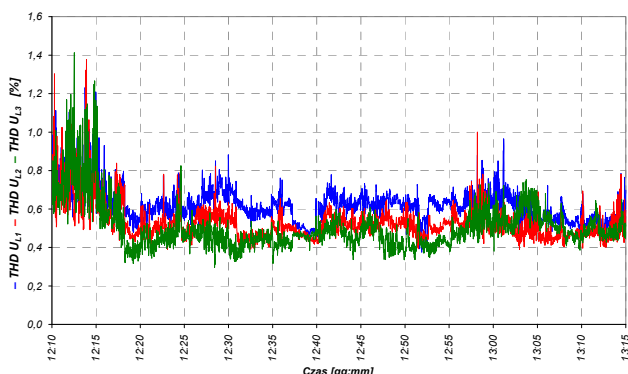


Rys. 14. Widmo wyższych harmonicznych napięć po stronie pierwotnej transformatora sieciowego - stadium rafinacji

O ile widma harmonicznych napięć nieznacznie różnią się względem siebie, to wartości harmonicznych prądów dla pasma do 40 harmonicznej zmniejszyły się (rys. 15), przy czym piąta harmoniczna pozostała na niezmienniej wartości.



Rys. 15. Widmo wyższych harmonicznych prądów po stronie pierwotnej transformatora sieciowego - stadium rafinacji

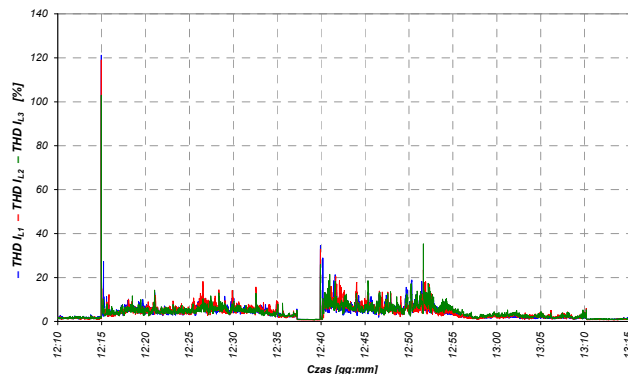


Rys. 16. Współczynniki THD_{UL1} , THD_{UL2} , THD_{UL3} po stronie pierwotnej transformatora sieciowego TS podczas pełnego cyklu wytopu

Kolejnym krokiem procedury obliczeniowej związanej bezpośrednio z analizą harmoniczną jest określenie współczynników THD dla napięć i prądów, zgodnie ze wzorami (3) i (4). Na rysunku 16 wykreślono przebiegi

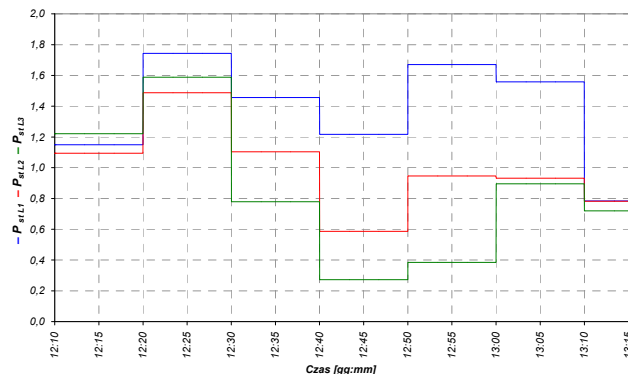
zmian współczynników THD_U dla napięć fazowych w czasie pełnego cyklu wytopu. Jak można zauważyć średnie wartości fazowe odpowiadają środkowej fazie L2 i mieszczą się w przedziale od 0,4 do 1,2 % (etap roztopienia).

W analogiczny sposób na rysunku 17 przedstawiono zmiany współczynników THD_I dla prądów fazowych w ujęciu za cały cykl wytopu. Dla prezentowanego przypadku THD_I przyjmuje największe wartości w czasie roztopienia II kosza złomowego w przedziale czasu 12:40÷12:55.

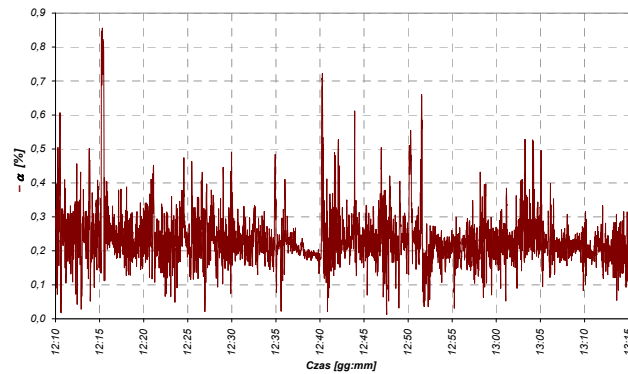


Rys. 17. Współczynniki THD_{IL1} , THD_{IL2} , THD_{IL3} po stronie pierwotnej transformatora TS podczas pełnego cyklu wytopu

Proces wytopiania stali, z punktu widzenia optymalizacji jakościowej poboru energii elektrycznej, charakteryzuje się występowaniem zaburzeń napięcia w punkcie wspólnego przyłączenia. W tym przypadku wolnozmiennie wahania napięcia powodują występowanie zjawiska migotania strumienia świetlnego żarowych źródeł światła. Miarą migotania został określony tzw. wskaźnik krótkotrwałego migotania światła P_{st} mierzony w interwale 10 minut (norma PN-EN 61000-4-15). Na rysunku 18 zilustrowano wskaźniki P_{st} dla poszczególnych faz w 10-minutowych przedziałach zmienności. Największe wskazanie P_{st} przekraczające wartość 1 występuje w fazie L1.



Rys. 18. Wskaźniki P_{st} w PWP w trakcie pełnego cyklu wytopu stali



Rys. 19. Współczynnik asymetrii napięć strony pierwotnej transformatora sieciowego TS

Rysunek 19 ilustruje zmiany współczynnika asymetrii napięciowej α_u w punkcie PWP w czasie pełnego wytopu. Średnia wartość tego współczynnika nie przekracza 0,3%.

Wnioski

W artykule przedstawiono wyniki kompleksowego pomiaru sygnałów napięciowo-prądowych pochodzących od źródła zaburzeń tj. łuków na elektrodach po stronie dolnego napięcia transformatora piecowego oraz ich wpływu na parametry jakości energii elektrycznej w punkcie wspólnego przyłączenia PWP. Porównano rozkłady widmowe napięć i prądów fazowych na poziomie niskiego i wysokiego napięcia dla etapu roztopiania i rafinacji. Dla określonej mocy zwarcia systemu S_{PCC} przedstawiono wykresy zmian współczynników THD_U i THD_I oraz potwierdzono, że nie przekraczają dopuszczalnych wartości określonych w normie i rozporządzeniu [14, 15]. Rozporządzenie Ministra Gospodarki [15] podaje normatywne wartości dla wskaźnika długookresowego migotania światła P_{It} . Z uwagi na zbyt krótki czas wytopu, nie można było określić P_{It} i z tego powodu zaprezentowano wskaźnik krótkookresowego migotania światła P_{st} . Normatywne wartości spełnia również współczynnik asymetrii napięć α_u (rys. 19).

Reasumując, można stwierdzić, iż pomimo znacznych zaburzeń występujących po stronie niskiego napięcia ich wpływ na parametry w punkcie przyłączenia jest niewielki. Taka okoliczność występuje w przypadku gdy $S_{PCC}/S_{TS} \geq 80$.

Projekt finansowany w ramach programu Ministra Nauki i Szkolnictwa Wyższego pod nazwą „Regionalna Inicjatywa Doskonałości” w latach 2019 - 2022 nr projektu 020/RID/2018/19, kwota finansowania 12 000 000 PLN.

Autorzy: dr inż. Marek Gała, E-mail: m.gala@el.pcz.czest.pl; dr inż. Janusz Rak, E-mail: jrak@el.pcz.czest.pl; Politechnika Częstochowska, Wydział Elektryczny, 42-200 Częstochowa, Armii Krajowej 17; prof. ATH, dr hab. inż. Kazimierz Jagiela, E-mail: kazimierz.jagiela@gmail.com; Akademia Techniczno-Humanistyczna, Wydział Budowy Maszyn i Informatyki, 43-309 Bielsko-Biała, Willowa 2

LITERATURA

- [1] Rak J., Gała M., Jagiela K., Kępiński M.: Wpływ parametrów instalacji zasilania pieca łukowego na wskaźniki elektroenergetyczne procesu wytopu stali. *Przegląd Elektrotechniczny*, R. 93, nr 1/2017, 5-8. DOI: 10.15199/48.2017.01.02.
- [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] Jagiela 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.
- [4] 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, p. 572-581. DOI: 10.1016/j.epsr.2009.10.015.
- [5] Singh A., Singh R.K., Singh A.K.: Power Quality Issues of Electric Arc Furnace and their Mitigations - A Review, *International Journal of Advanced Engineering Research and Science (IJAERS)*, Vol-4, Issue-4, April 2017, pp. 22-41
- DOI: 10.0.22161/ijaers.4.4.4
- [6] Bharath B.S., Vinayaka K.U.: Investigation of power quality disturbances in an electric arc furnace, *Proceedings International Conference on Energy, Communication, Data Analytics and Soft Computing (ICECDS)*, 1-2 Aug. 2017, Chennai, India. pp. 2268-2273
DOI: 10.1109/ICECDS.2017.8389856
- [7] Jagiela 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.
- [8] 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, Issue: 4, October 1994, pp. 2026-2036. DOI: 10.1109/61.329535.
- [9] 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 Oct. 2007, Barcelona, Spain. DOI: 10.1109/EPQU.2007.4424209.
- [10] Grünbaum R., Gustafsson T., Hasler J.-P., Larsson T., Lahtinen M.: STATCOM, a prerequisite for a melt shop expansion - performance experiences. *EEE Bologna Power Tech Conference Proceedings*, 23-26 June 2003, Bologna, Italy. DOI: 10.1109/PTC.2003.1304630.
- [11] Nikolaev A.A., Tulupov P.G.: Method of Setting Optimum Asymmetric Mode of Operation of Electric Arc Furnace. *Proceedings 11th France-Japan & 9th Europe-Asia Congress on Mechatronics (MECATRONICS)/17th International Conference on Research and Education in Mechatronics (REM)*, 15-17 June 2016, Compiègne, France. DOI: 10.1109/MECATRONICS.2016.7547111.
- [12] Jagiela 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.
- [13] Khoshkhou 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.
- [14] IEC 61000-4-30:2015 *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-30: Testing and measurement techniques - Power quality measurement methods*.
- [15] Rozporządzenie Ministra Gospodarki z dnia 4 maja 2007 r. w sprawie szczegółowych warunków funkcjonowania systemu elektroenergetycznego (Dz. U. z 2007 nr 93 poz. 623 ze zm.).
- [16] Baggini A. (Editor), *Handbook of Power Quality*. University of Bergamo-Italy, John Wiley & Sons, Ltd, USA 2008.
- [17] Czarnecki L.S.: Moce w obwodach elektrycznych z niesinusoidalnymi przebiegami prądów i napięć. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, Warszawa 2005.
- [18] IEC 61000-4-7: *Electromagnetic compatibility (EMC) - Part 4-7: Testing and measurement techniques - General guide on harmonics and interharmonics measurements and instrumentation, for power supply systems and equipment connected thereto*, Ed. 2.1, 28 October 2009.
- [19] Hocine L., Yacine D., Kamel B., Samira K.: Improvement of electrical arc furnace operation with an appropriate model. *Energy*, vol. 34, Issue 9, September 2009, pp. 1207-1214. DOI: 10.1016/j.energy.2009.03.003.
- [20] IEC 60676:2011 *Industrial electroheating equipment - Test methods for direct arc furnaces*. Ed. 3.0