

MONITOROWANIE CZĘSTOTLIWOŚCI PIECA ŁUKOWEGO WYKORZYSTUJĄCE
TECHNIKĘ FAZOROWĄSzymon BARCZENTEWICZ¹, Krzysztof DUDA², Andrzej BIEN³

1. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
tel.: +48 12 617 28 57 e-mail: barczent@agh.edu.pl
2. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
tel.: +48 12 617 28 41 e-mail: kduda@agh.edu.pl
3. AGH Akademia Górniczo-Hutnicza w Krakowie
tel.: +48 12 617 28 01 e-mail: abien@agh.edu.pl

Streszczenie: Artykuł prezentuje wyniki eksperymentu wykonanego w hucie stali. System pomiarowy wykorzystany do przeprowadzenia pomiarów jest oparty na systemie czasu rzeczywistego z układem FPGA, który pozwala na wykonanie pomiarów sygnałów analogowych. Trzy fazy napięcia i prądu zostały zmierzone w trzech wybranych punktach sieci zasilającej. Analiza częstotliwości ujawniła ciekawe zjawisko, w którym po wyłączeniu pieca łukowego częstotliwości napięcia i prądu w wewnętrznej części huty zmniejszyła się zamiast zwiększyć, jak można by się spodziewać. To nieoczekiwane zjawisko zostało zarejestrowane z pomocą PMU i potwierdzone przez analizę MatrixPencil. Przeprowadzone pomiary potwierdziły zasadność monitorowania częstotliwości napięcia zasilania pieców łukowych za pomocą analizy fazora.

Słowa kluczowe: piec łukowy, analiza częstotliwości, synchronofazor.

1. WSTĘP

Piece łukowe są przyczyną zaburzeń napięć i prądów w punkcie wspólnego przyłączenia w sieciach elektroenergetycznych. Te zaburzenia znacząco obniżają jakość energii elektrycznej. W ostatnich latach badacze zajmujący się piecami łukowymi skupiają się głównie na analizie harmonicznym i interharmonicznym oraz metod ich kompensowania [1, 2]. Ta praca skupia się na monitorowaniu częstotliwości pieców łukowych. Najbardziej popularną nieparametryczną metodą wykorzystywaną do wyznaczania częstotliwości jest transformacja Fouriera. W tej pracy wykorzystana została analiza częstotliwości, oparta o pomiar fazora napięcia, z zastosowaniem filtra FIR o płaskiej charakterystyce amplitudowej [3]. Zastosowana metoda spełnia, jako jedna z nielicznych w literaturze, wymagania stawiane w standardzie IEEE C37.118.1 [4, 5]. Jednostki do pomiaru fazora (PMU - *Phasor Measurement Unit*) są szeroko wykorzystywane w sieciach transmisyjnych. Dotychczas PMU były uważane za bardzo kosztowne i specjalistyczne urządzenia. Ostatnio jednak nastąpił spadek ich cen. W literaturze pojawia się coraz więcej aplikacji technologii fazorowej w sieciach średniego a nawet niskiego napięcia. Trwa też interesująca dyskusja o możliwościach wykorzystania PMU w ocenie jakości

energii elektrycznej. W niniejszej pracy autorzy proponują nowatorskie zastosowanie PMU do monitorowania częstotliwości napięcia zasilającego piec łukowy.

Podczas pomiarów wykonanych w hucie stali w Ostrowcu Świętokrzyskim, z piecami łukowymi, zaobserwowano anomalię polegającą na tym, że po wyłączeniu pieca łukowego częstotliwość napięcia i prądu sieci zasilającej zmniejszyła się zamiast wzrosnąć. Zarejestrowane zjawisko potwierdzone zostało z pomocą analizy DTFT oraz analizy MatrixPencil [7].

1.1. Definicja fazora

Pomiar fazora wykonywany jest za pomocą PMU zainstalowanych w sieci elektroenergetycznej. Fazor rejestrowany jest w czasie rzeczywistym oraz zsynchronizowany z czasem absolutnym z dokładnością do 1μs. Dla sygnału sinusoidalnego

$$x(t) = \cos(\omega_0 t + \varphi(t)), \quad (1)$$

gdzie $\omega_0 = 2\pi f_0$ jest podstawową pulsacją w rad/s, f_0 jest częstotliwością podstawową w Hz, $a(t)$ jest zmieniającą się w czasie amplitudą a $\varphi(t)$ jest zmieniającą się w czasie fazą. Fazor dany jest wzorem

$$p(t) = \frac{a(t)}{\sqrt{2}} e^{j\varphi(t)}. \quad (2)$$

Dla częstotliwości podstawowej $f_0 = 50$ Hz, fazor powinien być wyliczony 10, 25 albo 50 razy na sekundę.

Częstotliwość chwilowa f_{in} dla (1) wynika z pierwszej pochodnej argumentu funkcji kosinus w (1)

$$f_{in}(t) = f_0 + \frac{1}{2\pi} \frac{d\varphi(t)}{dt}. \quad (3)$$

Sygnał cyfrowy $x[n]$, odpowiadający (1), uzyskiwany jest za pomocą przetwornika ADC, wyposażonego w analogowy filtr antyaliasingowy

$$x[n] = a[n] \cos(\Omega_0 n + \varphi[n]), \quad \Omega_0 = 2\pi \frac{f_0}{f_s}, \quad (4)$$

gdzie f_s jest częstotliwością próbkowania sygnału w Hz.

Częstotliwość chwilowa dla (1) obliczana jest zgodnie ze wzorem

$$f_{in}[n] = f_0 + \frac{f_s \varphi[n+1] - \varphi[n-1]}{2\pi} \quad (5)$$

1.2. Filtry FIR z oknami płaskimi

W tej pracy fazor wyliczony jest za pomocą filtra FIR o doskonale płaskiej charakterystyce amplitudowej [3]. Filtr ten projektowany jest jako modulowane częstotliwościowo, doskonale płaskie okno kosinusowe [6] w postaci

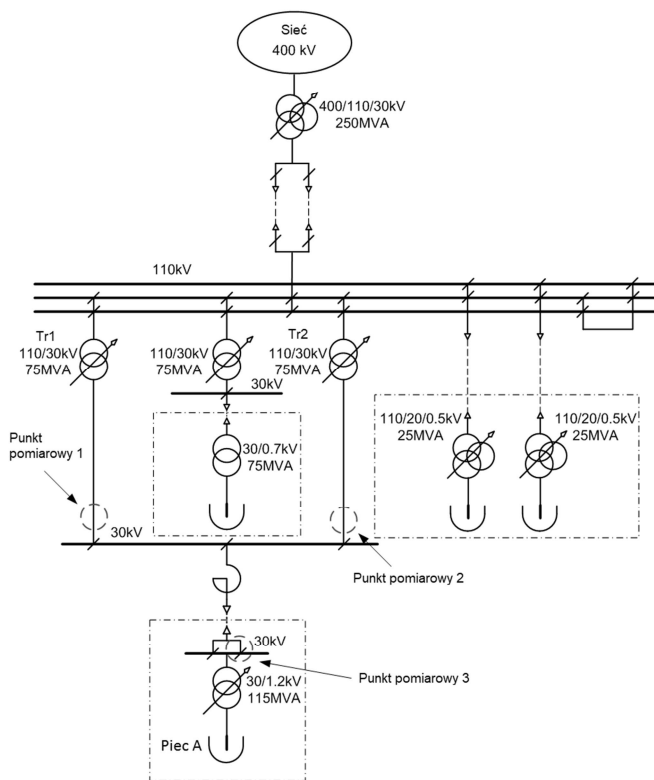
$$h_M[n] = \begin{cases} \sum_{m=0}^M a_M[m] \cos\left(m \frac{\pi}{N} n\right), & n = -N, \dots, N \\ 0, & \text{w przeciwnym wypadku} \end{cases} \quad (6)$$

gdzie M jest rzędem okna a $a_M[m]$ są to współczynniki okna M -tego rzędu. Okno składa się z $L=2N+1$ próbek.

W [3] wykazano, że metoda obliczania fazora, oparta o okna płaskie, spełnia wymagania standardu IEEE C37.118.1 jako jedna z nielicznych dostępnych w literaturze.

2. ZASILANIE I SYSTEM POMIAROWY

2.1. Zasilanie huty stali



Rys. 1. Schemat zasilania huty stali wraz z zaznaczonymi punktami pomiarowymi

Schemat zasilania huty stali zaprezentowano na rysunku 1. Huta zasilana była z sieci 400 kV poprzez transformator 250 MVA. W hucie pracowały dwie pary pieców, składające się z pieca łukowego oraz kadziowego. Obie pary oddalone były od siebie o 500 metrów oraz miały oddzielne linie zasilania. Moc pozorna pierwszej pary pieców wynosiła 115 MVA dla pieca łukowego i 75 MVA

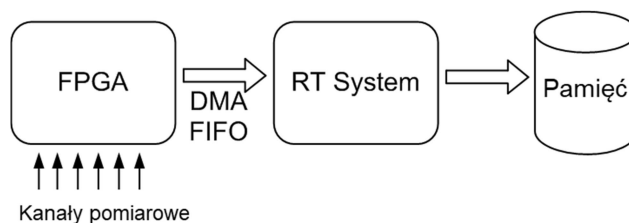
dla pieca kadziowego. Moc pozorna drugiej pary wynosiła po 25 MVA dla obu pieców.

Piec łukowy o najwyższej mocy jest zasilony z dwóch transformatorów o mocy 75 MVA z linii 110 kV. Pracujące równolegle transformatory były tego samego typu i producenta, najprawdopodobniej ich obciążenie nie jest jednak symetryczne. Pomiary przeprowadzono w trzech różnych punktach.

Wybór punktów pomiarowych miał na celu ocenienie wpływu pieca łukowego A na sieć oraz tłumienie zaburzeń przez transformatory Tr1 oraz Tr2.

2.2. System pomiarowy

System pomiarowy oparty jest na systemie czasu rzeczywistego z układem FPGA cRIO-9024. System ten pozwala na zintegrowanie ośmiu różnych modułów, takich jak: moduły pomiarowe, cyfrowe lub sterujące. Wykorzystana konfiguracja zawiera trzy moduły do pomiaru prądu oraz trzy moduły do pomiaru napięcia. Rozdzielczość przetworników ADC w modułach pomiarowych wynosi 24 bity a maksymalna częstotliwość próbkowania to 50 kHz. W przeprowadzonych badaniach częstotliwość próbkowania wynosiła 12,5 kHz.



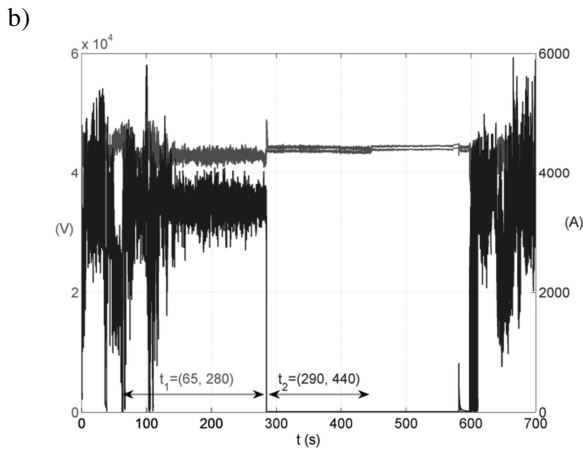
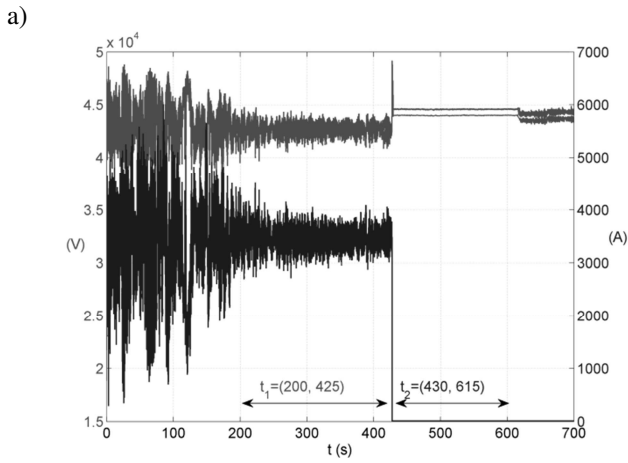
Rys. 2. Schemat blokowy systemu pomiarowego

Rysunek 2 przedstawia schemat blokowy opisujący budowę systemu. W każdym punkcie pomiarowym przeprowadzono pomiar trzech prądów i napięć. Wszystkie przeprowadzone pomiary próbkowano synchronicznie, zgodnie z jednym zegarem. Dane zapisywano za pośrednictwem kolejki FIFO z DMA do systemu czasu rzeczywistego. Dane zapisywano w równoległym wątku.

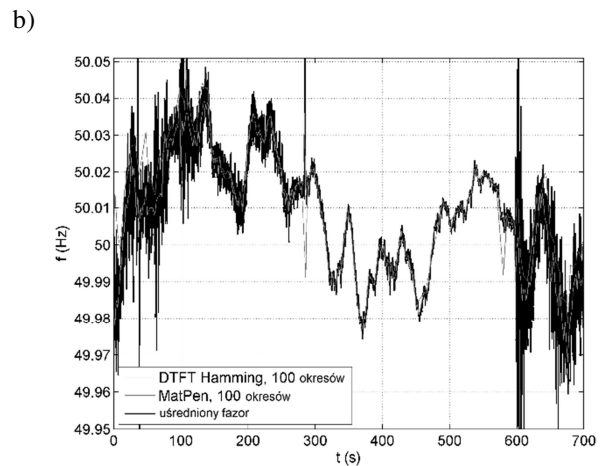
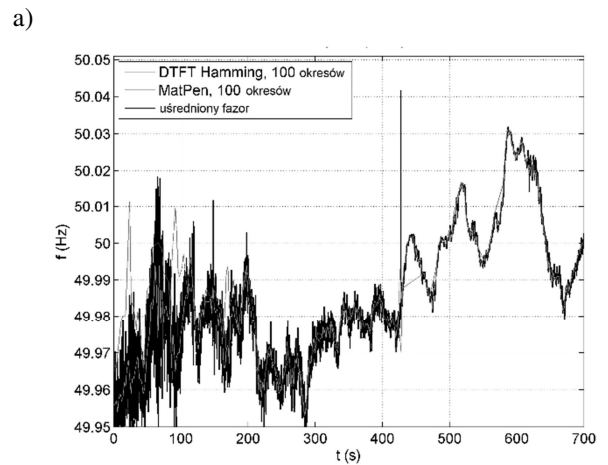
3. WYNIKI

Rysunki 3-6 przedstawiają wyniki analizy w punkcie pomiarowym nr 1. Przed obliczaniem fazorów, sygnały zostały przepróbkowane do częstotliwości 800 Hz. Fazory obliczane były względem 50 Hz, tak jak rekomendowano w [3] z oknem płaskim $M=5$, $D_0=2$, $D_N=2$, $L=207$ [2]. Rysunek 3 pokazuje obwód trójfazowego napięcia i prądu otrzymanego z obliczenia fazorów. W obu przypadkach (rysunek 3a,b) można zaobserwować znaczący spadek prądu i niewielkie zwiększenie napięcia po wyłączeniu pracy pieca. Na rysunku 3 zaznaczono przedziały czasowe t_1 i t_2 , określające czas przed i po wyłączeniu pracy pieca.

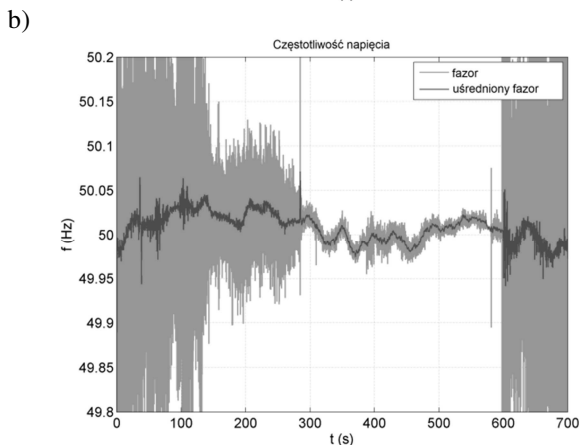
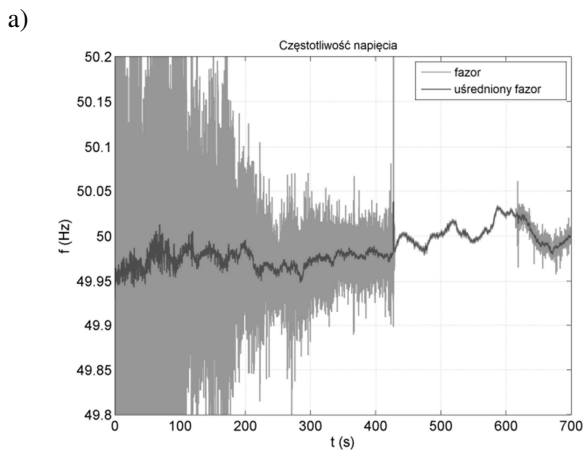
Rysunek 4 przedstawia częstotliwość obliczoną z pomocą fazora oraz częstotliwość uśrednioną przez filtr FIR o płaskiej odpowiedzi impulsowej. Średnia arytmetyczna została obliczona z 301 próbek. Na rysunku 4 można zaobserwować, że w obu przypadkach, a) oraz b), częstotliwość zmienia się inaczej, chociaż w obu przypadkach piec łukowy był wyłączany. W przypadku b) częstotliwość niespodziewanie maleje.



Rys. 3. Obwiednia fazona trzech faz napięcia i prądu podczas wyłączenia pieca łukowego. Dla przypadku b) zaobserwowano zmniejszenie częstotliwości

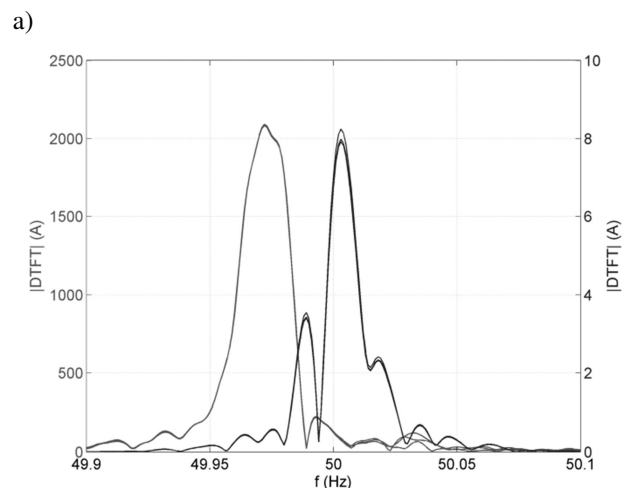


Rys. 5. Porównanie wartości chwilowych częstotliwości obliczanych za pomocą fazona, DTFT oraz MatrixPencil dla przypadków pokazanych na rysunku 3

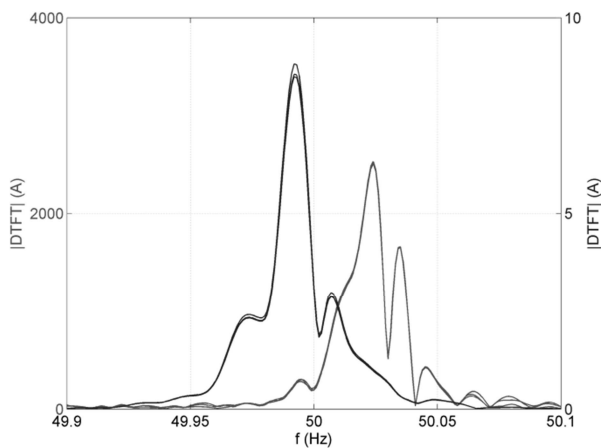


Rys. 4. Częstotliwości fazona dla przypadków pokazanych na rysunku 3

Wyniki otrzymane z analizy fazona zostały zweryfikowane i potwierdzone przez oryginalny, nie poddany repróbkowaniu sygnał. Do weryfikacji wykorzystano metodę DTFT (Discrete Time Fourier Transform) [8], algorytm Matrix-Pencil [7] oraz metodę interpolowanej dyskretnej transformaty Fouriera (IpDFT) [10, 11]. Na rysunku 5 porównano uśrednioną, chwilową częstotliwość, obliczoną przez fazon z algorytmem Matrix Pencil [7] i DTFT, oba okienkowane przez okno o długości 100 okresów częstotliwości podstawowej, tj. 2 s. Dla DTFT zastosowano okno Hamminga i ustawiono krok częstotliwości równy 0,001 Hz. Wyniki wszystkich trzech metod są zgodne.



b)



Rys. 6. Widmo DTFT prądu dla przypadków pokazanych na rysunku 3. Dla linii czerwonej DTFT obliczono w interwale t_1 a dla niebieskiej w interwale t_2

Szczególnie łatwo jest zaobserwować anormalne zachowanie częstotliwości na rysunku 6b. Rysunek 6 przedstawia analizę DTFT trzech faz prądu obliczone w przedziałach czasu t_1 i t_2 . Częstotliwość sygnałów w przedziałach czasu t_1 i t_2 obliczona została z wykorzystaniem trzy-punktowego IpDFT.

4. WNIOSKI

W pracy przeprowadzono analizę częstotliwości prądu i napięcia podczas pracy pieca łukowego. Do analizy wykorzystano fazor obliczany zgodnie ze standardem C37.118.1. Analiza miała na celu potwierdzić przydatność analizy fazorowej do monitorowania częstotliwości pracy pieca. Zarejestrowano interesujące zjawisko zmniejszenia się częstotliwości prądu i napięcia po wyłączeniu pieca. Zaobserwowane zjawisko potwierdzono z pomocą innych metod analizy częstotliwościowej o znacznie większej złożoności obliczeniowej.

Przeprowadzony eksperyment wskazuje na zasadność wykorzystania PMU w monitorowaniu częstotliwości napięcia zasilającego piec łukowy.

5. BIBLIOGRAFIA

1. Uz-Logoglu E., Salor O., Ermis M.: Online Characterization of Interharmonics and Harmonics of AC Electric Arc Furnaces by Multiple Synchronous Reference Frame Analysis, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52 no. 3, 2016, s. 2673–2683.
2. Vatankulu Y. E., Şentürk Z., Salor O.: Harmonics and Interharmonics Analysis of Electrical Arc Furnaces Based on Spectral Model Optimization With High-Resolution Windowing, *IEEE Transactions on Industry Applications*, vol. 52 no. 3, 2016, s. 2673–2683.
3. Duda K., Zieliński T. P.: FIR filters compliant with the IEEE standard for M class PMU, *Metrology and Measurement Systems*, vol. 23 no. 4, pp. 623–636, 2016
4. Synchrophasor Measurements for Power Systems, *IEEE Standard C37.118.1*, Dec. 2011.
5. Synchrophasor Measurements for Power Systems-Amendment 1: Modification of Selected Performance Requirements, *IEEE Standard C37.118.1a*, Apr. 2014.
6. Duda K., Zieliński T. P., Barcentewicz Sz., Perfectly flat-top and equiripple flat-top cosine Windows, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 65 iss. 7, 2016, s. 1558–1567.
7. Hua Y., Sarkar T.K.: Matrix pencil method for estimating damped/undamped sinusoid in noise, *IEEE Trans. Acoustics. Speech Signal Processing*, vol. 38, no 5, s. 814–824,.
8. Oppenheim A. V., Schafer R. W., Buck J. R.: *Discrete-Time Signal Processing*, 2nd ed. Englewood Cliffs, NJ, USA: Prentice-Hall, 1999.
9. Zieliński T. P., Duda K.: Frequency and damping estimation methods – an overview, *Metrology and Measurement Systems*, vol. 18, no. 4, 2011, s. 505–528.
10. Duda K., Zieliński T. P.: Efficacy of the frequency and damping estimation of a real-value sinusoid, *IEEE Instrumentation & Measurement Magazine*, vol. 16, iss. 2, 2013, s. 48–58.
11. Duda K., Barcentewicz Sz.: Interpolated DFT for $\sin^a(x)$ Windows, *IEEE Transactions on Instrumentation and Measurement*, vol. 63 no. 4, 2014, s. 754–760.

MONITORING OF ELECTRIC ARC FURNACE FREQUENCY USING PHASOR ANALYSIS

This paper presents the results of measurement experiment conducted in the operating steel plant. The measurement system was built with real time system with FPGA module, capable of measuring analog signals. Three phase voltages and currents were acquired in three selected points of supplying power network. Frequency analysis of measured signals revealed an interesting phenomenon, as it happened that after switching off the electric arc furnace, the frequency of the supplying voltage and current increased slightly instead of decreasing, as we would normally expect. This abnormal frequency behavior was identified by phasor analysis and also confirmed by DTFT (Discrete Time Fourier Transform) analysis, and MatrixPencil analysis. Performed measurements proved phasor analysis to be a useful application for electric arc furnace frequency monitoring.

Keywords: Electric Arc Furnace, frequency analysis, phasor analysis.