

Zbigniew OLCZYKOWSKI¹
Jacek CZYŻ²

WYZNACZANIE PARAMETRÓW ELEKTRYCZNYCH TORU WIELKOPięDOWEGO PIECA ŁUKOWEGO

W artykule autorzy zaprezentowali metodę wyznaczania rezystancji i reaktancji toru wielkopiędowego w oparciu o pomiary miernikiem parametrów jakości energii elektrycznej. Metoda została zweryfikowana na rzeczywistych instalacjach zasilających urządzenia łukowe, a otrzymane wyniki odniesiono do wartości parametrów toru wielkopiędowego wyznaczonych innymi metodami.

DETERMINATION OF ELECTRIC PERFORMANCE HEAVY CURRENT LINE EAF

In the paper authors expressed the method of appointing the resistance and the reactance of the heavy current line based on measuring the quality of the electric energy parameters. The method was verified on practical installations powering arc, and received scores were related to the value of parameters of the heavy current line appointed with other methods.

1. WSTĘP

Tor wielkopiędowy to zespół elementów obwodu pieca łukowego połączony szeregowo, obejmujący elektrody, system szyn strony wtórnej (uchwyty elektrod, szyny lub rury ramion elektrod, przewody giętkie oraz połączenia szyn do transformatora) przeznaczony do dostarczania mocy elektrycznej z transformatora do wsadu [4].

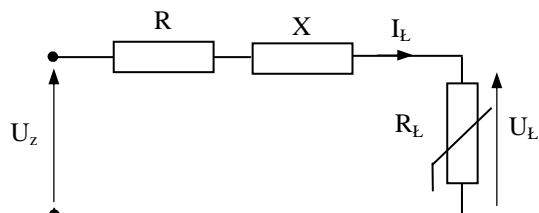
Znajomość parametrów toru wielkopiędowego pozwala na wyznaczenie charakterystyk roboczych urządzenia łukowego, które to charakterystyki przedstawiają związki pomiędzy podstawowymi wielkościami elektrycznymi i cieplnymi określającymi stan pracy pieca w funkcji prądu łuku [2].

Charakterystyki robocze określane są dla poszczególnych stopni transformatora piecowego i mogą być wyznaczone metodami obliczeniowymi lub dla pracujących urządzeń metodami pomiarowymi. Jedną z metod, przedstawioną w niniejszym referacie, jest metoda oparta na próbie zwarcia elektrod z wsadem. Zwarcie przeprowadza się przy jednoczesnym zanurzeniu wszystkich trzech elektrod w roztopionym metalu przy zasilaniu

¹Zbigniew Olczykowski, Politechnika Radomska, 26-600 Radom, ul. Malczewskiego 29, tel. +48 48 3617769
z.olczykowski@pr.radom.pl,

²Jacek Czyż, HSW-Huta Stali Jakościowych Spółka Akcyjna, Stalowa Wola, ul. Kwiatkowskiego 1, jacczy@o2.pl

pieca najmniejszym napięciem i największą indukcyjnością w torze wielkoprądowym, co ogranicza wartość przepływającego prądu zwarcia.



Rys. 1. Uproszczony schemat elektryczny urządzenia łukowego

R, X - parametry toru wielkoprądowego

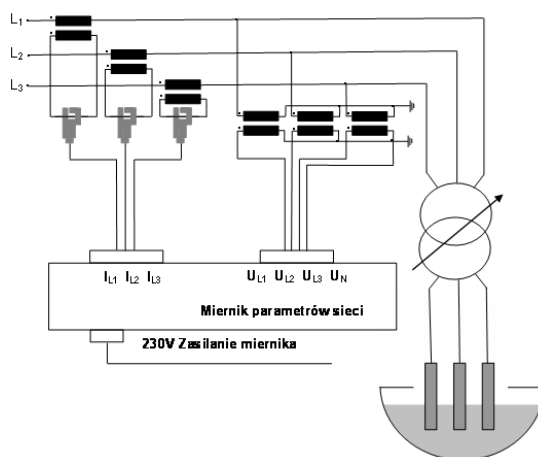
U_z - napięcie fazowe strony wtórnej transformatora

U_L, I_L - napięcie i prąd łuku

R_L - rezystancja łuku

2. POMIARY PARAMETRÓW TORU WIELKOPRĄDOWEGO

Pomiary przeprowadzone zostały podczas trójfazowego zwarcia elektrod z wsadem w czasie normalnej pracy pieca po roztopieniu wsadu. Podczas próby w stalowni nie pracował inny piec łukowy. Ograniczony został w ten sposób wpływ równoległe pracującego pieca na wytop w urządzeniu, w którym przeprowadzana była próba zwarcia [5,6,8].



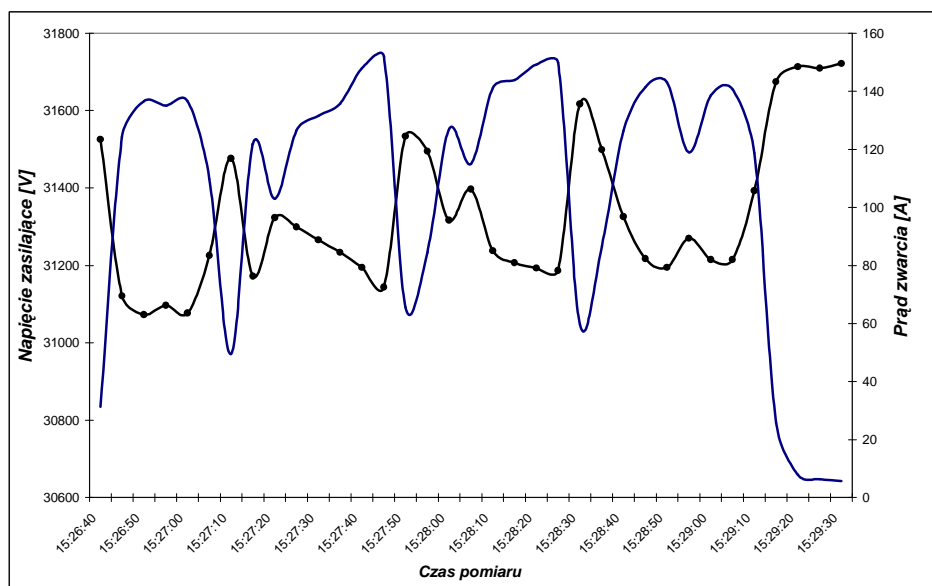
Rys. 2. Pomiar parametrów toru wielkoprądowego pieca łukowego

Podczas próby przełącznik zaczepek transformatora piecowego został ustawiony na najniższym zaczepek, by zapewnić prąd zwarcia zbliżony do prądu znamionowego pieca.

Elektrody zostały opuszczone w taki sposób, że ich końce zostały zanurzone w ciekłym metalu zapewniając całkowite zwarcie, a następnie unieruchomione. Próba została przeprowadzona czterokrotnie.

Rejestracji prądów, napięć i mocy (niezbędnych do wyznaczenia reaktancji i rezystancji toru wielkoprądowego) dokonano przy pomocy miernika parametrów sieci - Memobox 800. Zapewnia on możliwość pomiarów podstawowych parametrów jakości energii elektrycznej, zarówno zgodnie z normą PN-EN-50160, jak i przy krótkich interwałach pomiędzy kolejnymi próbkami. Podczas próby zwarcia przyjęto interwały pięciosekundowe. Memobox 800 wyposażony został w cęgi prądowe, dzięki czemu pomiaru można dokonywać bez konieczności rozłączania obwodów wtórnych przekładników prądowych. Miernik podłączony został po stronie pierwotnej transformatora piecowego, poprzez istniejące przekładniki prądowe i napięciowe.

Na rys. 2 przedstawiony został schemat pomiarowy podstawowych wielkości elektrycznych niezbędnych do wyznaczenia rezystancji i reaktancji toru wielkoprądowego. Rys. 3 obrazuje wybrane przebiegi zarejestrowane podczas przeprowadzonej czterokrotnie próby zwarcia. Do wyznaczenia parametrów torów wielkoprądowych przyjęto wielkości średnie wyznaczone z pięciosekundowych interwałów pomiarowych.

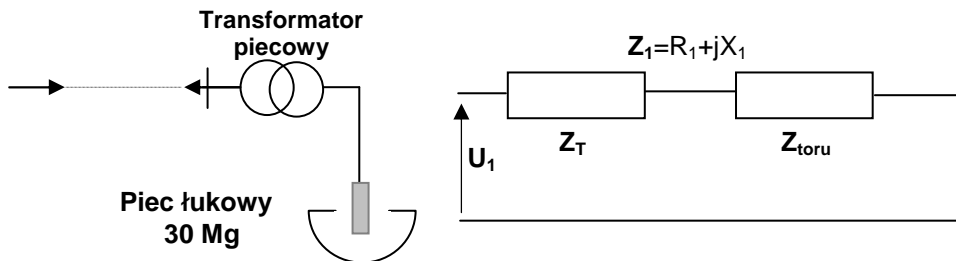


Rys. 3. Przebiegi napięcia zasilającego oraz prądu podczas próby zwarcia w piecu łukowym

3. WYZNACZENIE PARAMETRÓW TORU

Jak już wspomniano, do obliczeń przyjęto wartości średnie dla wszystkich faz, dla danej próby zwarcia: $U_1 = 31,89$ kV, $I_1 = 145,2$ A $P_1 = 2,0$ MW. Podobne wyliczenia można

dokonać dla każdej z faz osobno. Na rys. 4 przedstawiono jednofazowy schemat układu zasilającego stalownię (a) oraz schemat zastępczy sieci zasilającej piec łukowy (b).



Rys. 4. Jednofazowy schemat układu zasilającego stalownię (a) oraz schemat zastępczy sieci zasilającej piec łukowy (b)

Obliczenia rezystancji i reaktancji (wartości średnie) toru wielkopiędowego wraz z transformatorem piecowym odniesione do strony pierwotnej $U_1 = 31,89 \text{ kV}$ wynoszą:

$$Z_1 = \frac{U_1}{I_1} = \frac{31890\text{V}}{145,2\text{A}} = 219,63\Omega \quad (1)$$

$$R_1 = \frac{P_1}{I_1^2} = \frac{20000000\text{W}}{(145,3\text{A})^2} = 94,86\Omega \quad (2)$$

$$X_1 = \sqrt{Z_1^2 - R_1^2} = \sqrt{219,63^2 - 94,86^2} = 198,09\Omega \quad (3)$$

Podstawą do wyznaczenia parametrów schematu zastępczego transformatora są jego parametry znamionowe. W obliczeniach odniesiono je do strony pierwotnej, a następnie wyliczenia końcowe przeliczono na stronę wtórną:

S_n - moc znamionowa w [MVA]

$$S_n = 10,606 \text{ MVA};$$

k_T - przekładnia stanowiąca stosunek napięcia znamionowego U_{nG} uzwojenia górnego napięcia do napięcia znamionowego U_{nD} uzwojenia dolnego napięcia (lub stosunkiem liczny zwojów poszczególnych uzwojeń)

$$k_T = 200;$$

ΔP_{Cu} - znamionowe straty mocy czynnej w uzwojeniach transformatora w [MW]

$$\Delta P_{Cu} = 0,179885 \text{ MW};$$

ΔU_z - napięcie zwarcia wyrażone w procentach napięcia znamionowego [%];

$$\Delta U_z = 14,91\%$$

Impedancja fazowa transformatora wynosi zatem:

$$Z_T = \frac{\Delta U_z \cdot U_n^2}{100 \cdot S_n} = \frac{14,91 \cdot (30kV)^2}{100 \cdot 10,606VA} = 12,65\Omega \quad (4)$$

Rezystancja transformatora wynosi odpowiednio:

$$R_T = \frac{\Delta P_{Cu} \cdot U_n}{S_n^2} = \frac{0,179885MW \cdot (30kV)^2}{(10,606MVA)^2} = 1,44\Omega \quad (5)$$

Reaktancja transformatora:

$$X_T = \sqrt{Z_T^2 - R_T^2} = \sqrt{12,65^2 - 1,44^2} = 12,57\Omega \quad (6)$$

Wyliczenie rezystancji i reaktancji toru wielkopięradowego odniesionych do napięcia górnego $U_1 = 30kV$:

$$R_{toru} = R_1 - R_T = 94,86 - 1,44 = 93,42\Omega \quad (7)$$

$$X_{toru} = X_1 - X_T = 198,09 - 12,57 = 185,52\Omega \quad (8)$$

Po przeliczeniu na stronę wtórną przy przekładni $k_T = 200$ otrzymujemy wartości rezystancji i reaktancji toru wielkopięradowego (bez reaktancji i rezystancji transformatora)

$$R_{2toru} = \frac{R_{toru}}{k_T^2} = \frac{93,42\Omega}{200^2} = 2,34m\Omega \quad (9)$$

$$X_{2toru} = \frac{X_{toru}}{k_T^2} = \frac{185,52\Omega}{200^2} = 4,64m\Omega \quad (10)$$

Poniżej przedstawiono alternatywne wyliczenia parametrów toru wielkopięradowego zaproponowane w normie [4]. Obliczenia reaktancji toru wielkopięradowego zostały wykonane przy założeniu wzbudzenia znamionowego transformatora i pominięciu rezystancji, które w jednostce piecowej nie mają znacznego wpływu na prądy zwarcia. Najprostszym sposobem wyznaczenia reaktancji toru wielkopięradowego, to posługiwanie się w obliczeniach jednostkami względnymi, przy których krotność ustalonego prądu zwarcia (odniesiona do prądu znamionowego danego zaczepru) transformatora zasilającego piec łukowy i_{zu} wyraża się zależnością:

$$i_{zu} = \frac{100}{x_{tp} + x_{tr} + x_s} \quad (11)$$

gdzie: x_{tp} – reaktancja w [%] toru wielkopięradowego i pieca łukowego,

x_{tr} – reaktancja zwarcia transformatora (równa napięciu zwarcia) w [%],

x_s – reaktancja sieci w [%] „widziana” z zacisków 30kV transformatora.

Podane wyżej reaktancje pętli zwarcia – wyłączając sam transformator, dla którego są one wartościami zadanymi - określają niżej podane zależności :

- tor wieloprądowy

$$x_{tp} = \frac{I_{DN} \cdot X_{tp}}{U_{DN}} \cdot 100\% \quad (12)$$

gdzie: I_{DN} – fazowy prąd znamionowy strony DN transformatora odpowiadający danemu zaczeptowi,

X_{tp} – reaktancja w $[\Omega]$ toru wieloprądowego i pieca łukowego,

U_{DN} – napięcie znamionowe danego zaczeptu strony DN transformatora.

- reaktancja sieci GN

$$x_s = \frac{S_n}{S_{zs}} \cdot 100\% \quad (13)$$

gdzie: S_n – moc znamionowa transformatora na danym zaczeptie w [MVA],

S_{zs} – moc zwarciowa sieci 6kV w [MVA].

Punktem wyjścia do określenia reaktancji toru wieloprądowego pieca łukowego jest zależność (1) i zalecana dla danego pieca krotność prądu zwarcia ustalonego i_{zu} . Według danych podanych w [1,3] krotność ta wynosi 3..3,5 dla pieca „małego” (0,5...6Mg) oraz 2,5..3,2 dla pieca „średniego” (10...50Mg).

Poniżej podano podstawowe parametry elektryczne przyjęte do wyznaczenia reaktancji toru wieloprądowego.

- moc zwarciowa na zaciskach 30kV transformatora 500 MVA,
- parametry transformatora piecowego na zaczeptach „+”, „0” i „-”
- przekładnia napięciowa 30kV/425-287,5-150V,
- moce znamionowe 20/20-15,935-8,314MVA,
- prądy znam. fazowe 0,3849-0,3067-0,16/27,169-32,00-32,00kA,
- napięcia zwarcia 5,33-8,99-20,66%.

W rozpatrywanym przypadku przyjęto do obliczeń krotność prądu zwarcia $i_{zu}=1,133$ odpowiadającą stosunkowi prądu zmierzonego podczas próby zwarcia transformatora i prądu znamionowego transformatora odpowiadającemu danemu zaczeptowi.

$$i_{zu} = \frac{201,22A}{204A} = 0,9863 \quad (14)$$

$$X_{tr} = u_{\%} = 15,09\% \quad (15)$$

$$x_s = \frac{10,60MVA}{500MVA} \cdot 100\% = 2,12\% \quad (16)$$

$$i_{zu} = \frac{100}{x_{tp} + x_{tr} + x_s}, \quad (17)$$

więc:

$$x_{tp} = \frac{100 - i_{zu} \cdot (x_{tr} + x_s)}{i_{zu}} \quad (18)$$

$$x_{tp} = \frac{100 - 0,9863 \cdot (15,09 + 2,12)}{0,9863} = 84,18\% \quad (19)$$

$$x_{tp} = \frac{I_{DN} \cdot X_{tp}}{U_{DN}} \cdot 100\% \quad (20)$$

$$X_{tp} = \frac{x_{tp} \cdot U_{DN}}{I_{DN} \cdot 100\%} = \frac{84,18\% \cdot 191,3V}{32,0kA \cdot 100\%} = 0,005032\Omega = 5,032m\Omega \quad (21)$$

4. PODSUMOWANIE

Ze względu na to, że przez tor wielkoprądowy przepływają bardzo duże prądy jego parametry elektryczne (rezystancja i reaktancja) mają wpływ na charakterystyki robocze pieca łukowego. Tor wielkoprądowy powinien charakteryzować się zatem: najmniejszą rezystancją i reaktancją (duży współczynnik mocy), symetrią konstrukcyjną (eliminacja fazy mocnej i słabej), skuteczną niezależną regulacją przesuwu elektrod.

Reaktancja toru wielkoprądowego nie może być jednak zbyt mała z uwagi na warunki pracy pieca (stabilna praca łuku). Poprawę stabilności można uzyskać przez włączenie w obwód prądowy dławika. Znajomość parametrów toru wielkoprądowego pomocna jest zatem do określenia punktu pracy urządzenia łukowego oraz stwierdzenia konieczności instalowania dławika.

Zaproponowana przez autorów metoda pozwala w prosty sposób wyznaczyć reaktancję i rezystancję toru wielkoprądowego. Wykorzystywane są dane pomiarowe dostępne z analizatora parametrów jakości energii elektrycznej. Standardowo, podczas pomiarów mających określić jakość napięcia w sieci zasilającej (np. zgodnie z PN-EN-50160) przyjmowane są dziesięciominutowe średnie wartości skuteczne napięcia zasilającego, które przy próbie zwarcia trwającej do kilkunastu sekund, nie dają miarodajnych wyników. Dlatego też, podczas przeprowadzanych prób zwarcia analizator musiał zostać odpowiednio przeprogramowany, by uzyskać jak najmniejsze interwały pomiarowe, co z kolei ma wpływ na dokładność otrzymywanych wyników pozwalających na wyznaczenie rezystancji i reaktancji toru wielkoprądowego.

4. LITERATURA

- [1] Dmochowski Z.: *Stan aktualny i perspektywy rozwoju łukowych urządzeń elektrotermicznych*, Gospodarka Paliwami i Energią. Nr 8, 1997
- [2] Hering M.: *Podstawy elektrotermii*, WNT, Warszawa, 1992
- [3] Kurbiel A.: *Elektrotermiczne urządzenia łukowe*, WNT, Warszawa, 1988
- [4] *Metody badań pieców z łukiem bezpośrednim*, PN-93/E (idt IEC 676)

-
- [5] Olczykowski Z.: *Superpozycja wahań napięcia przy pracy odbiorników łukowych*. Przegląd elektrotechniczny, Nr 5, 2002r.
- [6] Olczykowski Z.: *Methods of determination of the voltage fluctuations and light flicker at simultaneous operation of three-phase arc furnaces*. Electrical Power Quality and Utilisation. Vol. IX, No 1, 2003r. str. 47-58,
- [7] PN-EN 50160: 1998 (2002) – *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych*
- [8] Figura R., Szychta L: Pumping energy consumption in water transportation systems, Archives of Transport System Telematics, Vol. 3, Issue 2, May 2010, pp. 40-45, ISSN 1899-8208