

Bernard BARON  
Sławomir PAWLIKOWSKI

### **METODA IDENTYFIKACJI REZYSTANCJI FAZOWYCH ODBIORNIKÓW TRÓJFAZOWYCH WIELKIEJ MOCY BEZ DOSTĘPNEGO PUNKTU ZEROWEGO ODBIORNIKA**

Streszczenie. Artykuł prezentuje metodę identyfikacji rezystancji zastępczych odbiorników trójfazowych wielkiej mocy o zastępczym schemacie gwiazdowym bez dostępnego pomiarowo punktu zerowego odbiornika. Identyfikacji dokonuje się opierając się na pomiarach napięć fazowych transformatora, prądów fazowych zasilania, kątów przesunięcia fazowego oraz wyznaczonych wcześniej zastępczych reaktancjach toru wieloprądowego odbiornika. Algorytm obliczeniowy polega na optymalizacji przyjętego arbitralnie wskaźnika jakości.

### **METHOD FOR IDENTIFICATION OF PHASE RESISTANCES OF THREE-PHASE LARGE POWER LOADS WITH INACCESSIBLE NEUTRAL POINT**

Summary. In the paper a method for identification of phase powers of three-phase large power loads with measurement inaccessible neutral point has been presented. In order to carry out this identification measurement of time variables of supply voltages and phase currents as well as the knowledge of previous determined substitute phase reactances are needed. An algorithm for resistance parameters of assumed model identification based on non-linear optimisation method has been presented.

### **EIN IDENTIFIZIERVERFAHREN VON PHASENRESISTANZEN DER DREIPHASIGEN HOCHLEISTUNGSSYSTEMEN OHNE ZUGANG ZUM NEUTRALPUNKT DER LAST**

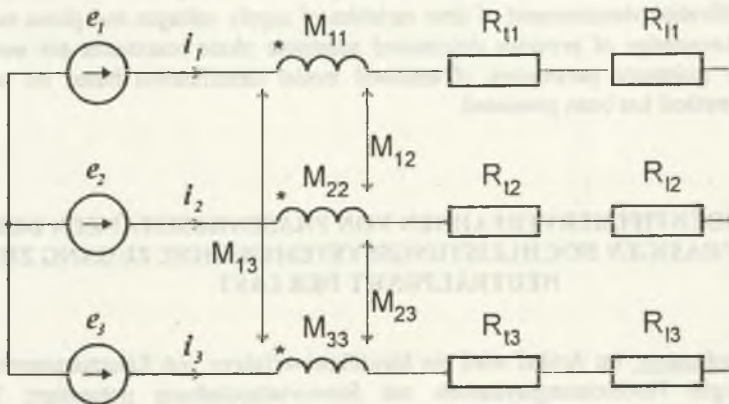
Zusammenfassung. Im Artikel wird ein Identifizierverfahren von Ersatzphasenresistanzen der dreiphasigen Hochleistungssystemen mit Sternersatzschaltung präsentiert. Es wird angenommen, daß der Neutralpunkt der Last unzugänglich ist. Das Identifizieren erfolgt basierend nur auf den Messungen von Phasenspannungen und Strömen und deren Phasenverschiebungen an der einspeisenden Seite, sowie auf den früher bestimmten Ersatzphasenreaktanzen. Der Algorithmus beruht auf der Optimierung einer willkürlich angenommenen Gütezahl.

## I. WSTĘP

Jedną z podstawowych grup odbiorników trójfazowych o mocy powyżej 1 MVA są elektrotermiczne urządzenia grzejne. Można wśród nich wyróżnić urządzenia łukowe, w których energia cieplna uzyskiwana jest z łuku elektrycznego otwartego lub osłoniętego. Prowadzenie określonego procesu technologicznego w tych urządzeniach uwarunkowane jest nie tylko ich konstrukcją, ale również znajomością podstawowych parametrów elektrycznych w dowolnych stanach pracy. Szczęólnego znaczenia nabiera zagadnienie identyfikacji mocy fazowych tych odbiorników w aspekcie osiągania przez nie stanów pracy optymalnych pod względem energetycznym, którymi są stany bliskie symetrii mocy fazowych [3][5][7].

Większość rozwiązań konstrukcyjnych urządzeń łukowych zawiera niesymetryczne układy torów wielkoprądowych, co przy typowych eksploatacyjnych stanach fazowej symetrii prądowej prowadzi do znacznych asymetrii mocy fazowych (zjawisko fazy mocnej i fazy słabej). Bieżąca znajomość wartości mocy fazowych umożliwia symetryzację mocy poprzez korektę napięcia zasilającego oraz regulację położenia elektrod.

Zwykle do analizy pracy urządzeń łukowych przyjmuje się model o schemacie gwiazdowym przedstawiony na rys. 1.



Rys. 1. Schemat modelu elektrycznego trójfazowego urządzenia łukowego  
 Fig. 1. Electrical model circuit of three-phase arc appliance

Poszczególne elementy reprezentują:

- $e_1, e_2, e_3$  - napięcia fazowe transformatora zasilającego,
- $i_1, i_2, i_3$  - prądy przewodowe fazowe,
- $M_{ii}$  - współczynniki indukcyjności własnej i wzajemnej toru wielkoprądowego,
- $R_{1i}$  - rezystancje fazowe toru wielkoprądowego,
- $R_{1i}$  - rezystancje reprezentujące część grzejną urządzenia.

W przypadku urządzeń łukowych o łuku otwartym (piece stalownicze) identyfikacja zastępczych parametrów modelu dokonywana jest metodą zwarć eksploatacyjnych na podstawie pomiarów odniesionych do metalowej wanny pieca stanowiącej punkt zerowy odbiornika. Punkt ten jest pomiarowo niedostępny w przypadku urządzeń łukowych o łuku osłoniętym. Ponadto nie jest możliwe wyznaczenie parametrów zastępczych metodą zwarć eksploatacyjnych ze względów konstrukcyjnych, a oparcie się tylko na wielkościach pomiarowo dostępnych (napięcia fazowe i prądy przewodowe) powoduje niejednoznaczność zagadnienia. Dlatego też identyfikacja parametrów modelu urządzeń o łuku osłoniętym musi opierać się na specjalnych algorytmach bazujących na metodach optymalizacyjnych.

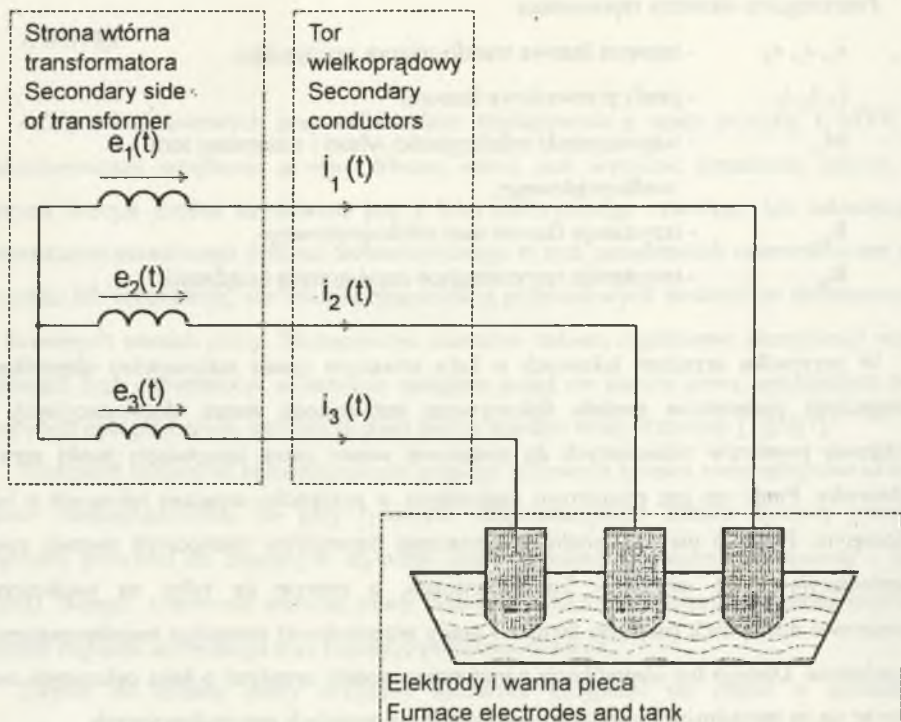
## 2. MODEL MATEMATYCZNY ODBIORNIKA

Jako przykład rozważanego odbiornika przyjęto piec oporowo-łukowy. Układ zasilający taki piec składa się z autotransformatora umożliwiającego niezależną regulację napięcia w poszczególnych fazach za pomocą przełącznika zaczepów, transformatora piecowego o układzie połączeń uzwojeń Dy, toru wielkoprądowego i elektrod (rys.2).

Za podstawę konstrukcji modelu matematycznego pieca oporowo-łukowego wraz z siecią krótką przyjmuje się możliwości pomiarowe istniejące na obiekcie rzeczywistym. Założenie to podyktowane jest koniecznością identyfikacji podstawowych parametrów modelu opierając się na wielkościach mierzonych w trakcie trwania procesu.

Wielkości elektryczne dostępne pomiarowo na piecu karbidowym to napięcia fazowe strony wtórnej transformatora piecowego  $e_1(t)$ ,  $e_2(t)$ ,  $e_3(t)$  i prądy fazowe  $i_1(t)$ ,  $i_2(t)$ ,  $i_3(t)$ . Ze względu na duże prądy znamionowe pieców oporowo-łukowych pomiar prądu w torze





Rys. 2. Wielkości elektryczne dostępne pomiarowo na piecu lukowo-oporowym  
 Fig. 2. Measurement accessible electrical quantities of arc-resistance furnace

wielkoprowodowym za pomocą zainstalowanych tam przekładników nie jest możliwy. W tym przypadku prądy pieca mogą być odtwarzane za pomocą odpowiednich układów przekładników prądowych, umieszczonych po stronie pierwotnej transformatora piecowego [5]. Istnieje również możliwość pomiaru prądu w torze za pomocą cewek Rogowskiego. Cewka taka jest nawinięta na giętym rdzeniu, najczęściej nieferromagnetycznym, który obejmuje przewody z prądem. Siła elektromotoryczna indukowana w cewce, proporcjonalna do pochodnej prądu, podana na układ całkujący staje się proporcjonalna do prądu w przewodach.

W przyjętym modelu punkt zerowy gwiazdy rezystancji fazowych jest pomiarowo niedostępny, co powoduje istotne trudności w identyfikacji parametrów  $R_1$ ,  $R_2$ ,  $R_3$ ,  $M_{11}$ ,  $M_{22}$ ,  $M_{33}$ ,  $M_{12}$ ,  $M_{23}$ ,  $M_{31}$ .

Indukcyjności własne i wzajemne można w zasadzie uważać w przyjętym schemacie za niezależne od położenia elektrod. Części giętkie sieci krótkiej pieców oporowo-łukowych w przeciwieństwie do pieców łukowych stalowniczych nieznacznie zmieniają położenie względem siebie, co oznacza pomijalnie małą zmianę zastępczych indukcyjności wzajemnych sieci krótkiej. Na pewną niewielką zmianę wartości indukcyjności własnych sieci krótkiej ma wpływ zmienne położenie elektrod względem pancerza stalowego wanny pieca.

Badania przeprowadzone na piecach karbidowych [5] wykazały, że w trakcie stabilnej pracy wartość skuteczna prądu deformacji wynosi około 2% wartości skutecznej prądów fazowych. Z taką więc dokładnością można założyć liniowość rezystancji fazowych modelu. Ponadto założono, że napięcia zasilające są nieodkształcone.

Równania opisujące układ z rys. 1 przyjmują postać:

$$j\omega M_{11}I_1 + j\omega M_{12}I_2 + j\omega M_{13}I_3 + R_1I_1 - j\omega M_{12}I_2 - j\omega M_{22}I_2 - j\omega M_{23}I_3 - R_2I_2 = \underline{E}_1 - \underline{E}_2,$$

$$j\omega M_{12}I_1 + j\omega M_{22}I_2 + j\omega M_{23}I_3 + R_2I_2 - j\omega M_{12}I_1 - j\omega M_{23}I_2 - j\omega M_{33}I_3 - R_3I_3 = \underline{E}_2 - \underline{E}_3,$$

$$I_1 + I_2 + I_3 = 0,$$

$$R_i = R_{i1} + R_{i2}, \quad i = 1, 2, 3.$$

(2.1)

Po przekształceniach otrzymujemy:

$$I_3 = I_1 - I_2,$$

$$j\omega(M_{11} - M_{12} + M_{23} - M_{31})I_1 + R_1I_1 - j\omega(M_{22} - M_{12} + M_{31} - M_{23})I_2 - R_1I_1 = \underline{E}_1 - \underline{E}_2,$$

$$j\omega(M_{22} - M_{12} + M_{31} - M_{23})I_2 + R_2I_2 - j\omega(M_{33} - M_{23} + M_{12} - M_{31})I_1 - R_3I_3 = \underline{E}_2 - \underline{E}_3.$$

(2.2)

Można więc wprowadzić trzy zastępcze indukcyjności:

$$L_1 = M_{11} - M_{12} + M_{23} - M_{31},$$

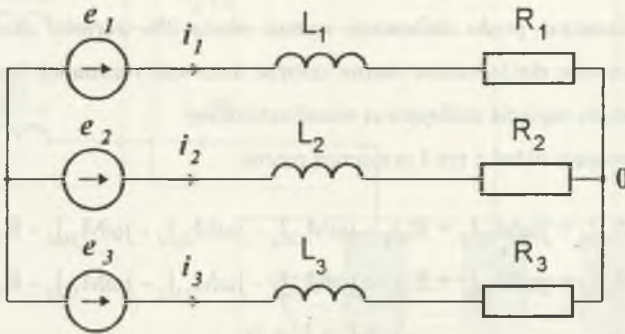
$$L_2 = M_{22} - M_{12} + M_{31} - M_{23},$$

$$L_3 = M_{33} - M_{23} + M_{12} - M_{31}.$$

(2.3)

Wobec tak przyjętych założeń schemat zastępczy sieci krótkiej pieca oporowo-lukowego przy niedostępnym punkcie 0 przyjmuje postać przedstawioną na rys.3.

Identyfikowane indukcyjności zastępcze  $L_1, L_2, L_3$  można uważać za stałe i niezależne od położenia elektrod, natomiast rezystancje fazowe  $R_1, R_2, R_3$  zależą nie tylko od położenia elektrod, ale również od wsadu.



Rys.3. Schemat modelu pieca łukowo-oporowego przy niedostępnym punkcie "0"

Fig. 3. Arc-resistance furnace model circuit for unaccessible neutral point "0"

### 3. IDENTYFIKACJA REZYSTANCJI I MOCY FAZOWYCH ODBIORNIKA

Rozkład wektora gęstości prądu w kąpeli wanny pieca zależy nie tylko od składu mieszanki i położenia elektrod, lecz również od napięć fazowych. W tej sytuacji przyjęcie do identyfikacji parametrów i wielkości elektrycznych pieca według schematu gwiazdy (rys.3) wyklucza śledzenie potencjału jej węzła, a tym samym śledzenie napięć fazowych względem tego węzła. Dlatego też równoczesna identyfikacja rezystancji fazowych i reaktancji zastępczych na podstawie mierzonych na obiekcie rzeczywistym wielkości jest niemożliwa (niejednoznaczność zagadnienia). Z drugiej strony giętkie połączenia między elektrodami a torem wielkoprądowym występujące na piecu karbidowym zmieniają usytuowanie względem siebie, co powoduje niewielkie zmiany indukcyjności wzajemnych poszczególnych faz, a tym

samym reaktancji zastępczych. Przyjęcie reaktancji zastępczych wyznaczonych np. metodą podaną w pracy [1] pozwala więc jedynie na określenie punktu, w otoczeniu którego występują ich wahania. Stwarza to problem niejednoznaczności identyfikacji rezystancji fazowych, którego rozwiązanie umożliwia, wobec braku dodatkowych danych elektrycznych, arbitralny wybór pewnego sposobu identyfikacji w możliwie najmniejszym otoczeniu rozwiązania dokładnego.

### 3.1. Sformułowanie problemu identyfikacji rezystancji i mocy fazowych odbiornika

Punktem wyjścia identyfikacji rezystancji fazowych wsadu są zespolone równania oczkowe (2.1). Gdyby w tych równaniach znane były reaktancje zastępcze toru  $\omega L$ , wówczas przy znanych prądach przewodowych  $I_1, I_2, I_3$  oraz napięciach przewodowych  $E_{12}$  i  $E_{23}$ , rezystancje fazowe wsadu  $R_i$  można by wyznaczyć jednoznacznie.

Metody wyznaczenia reaktancji zastępczych zostały omówione w pracy [1]. Reaktancji nie można jednak przyjąć jako wartości stałych ze względu na to, że zmiana usytuowania części giętkich toru pieca karbidowego powoduje zmiany (niewielkie) indukcyjności wzajemnych, a tym samym zmiany reaktancji zastępczych sieci krótkiej. Dlatego też w dalszych rozważaniach przyjmuje się jako zmienne składowe wektora  $Z$ .

$$Z = \begin{Bmatrix} R_1 \\ R_2 \\ R_3 \\ \omega L_{11} \\ \omega L_{22} \\ \omega L_{33} \end{Bmatrix}.$$

(3.1)

Układ równań rozpisany dla części rzeczywistych i urojonych przyjmuje postać:

$$A Z = B,$$

(3.2)



gdzie

$$\mathbf{A} = \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{I_{-1}\} & -\operatorname{Re}\{I_{-2}\} & 0 & -\operatorname{Im}\{I_{-1}\} & \operatorname{Im}\{I_{-2}\} & 0 \\ \operatorname{Im}\{I_{-1}\} & -\operatorname{Im}\{I_{-2}\} & 0 & \operatorname{Re}\{I_{-1}\} & -\operatorname{Re}\{I_{-2}\} & 0 \\ 0 & \operatorname{Re}\{I_{-2}\} & -\operatorname{Re}\{I_{-3}\} & 0 & -\operatorname{Im}\{I_{-2}\} & \operatorname{Im}\{I_{-3}\} \\ 0 & \operatorname{Im}\{I_{-2}\} & -\operatorname{Im}\{I_{-3}\} & 0 & \operatorname{Re}\{I_{-2}\} & -\operatorname{Re}\{I_{-3}\} \end{pmatrix},$$

$$\mathbf{B} = \begin{pmatrix} \operatorname{Re}\{E_{-1}\} & -\operatorname{Re}\{E_{-2}\} \\ \operatorname{Im}\{E_{-1}\} & -\operatorname{Im}\{E_{-2}\} \\ \operatorname{Re}\{E_{-2}\} & -\operatorname{Re}\{E_{-3}\} \\ \operatorname{Im}\{E_{-2}\} & -\operatorname{Im}\{E_{-3}\} \end{pmatrix} \quad (3.3)$$

lub w postaci wskaźnikowej

$$\sum_{k=1}^6 a_{jk} z_k = b_j, \quad j = 1 \dots 4. \quad (3.4)$$

Niech  $X_j$  ( $j=1,2,3$ ) stanowią reaktancje zastępcze sieci krótkiej pieca. Ze względu na niejednoznaczność rozwiązania układu równań (3.4) przyjmuje się następujący wskaźnik jakości identyfikacji:

$$F(\mathbf{Z}) = -\sum_{j=1}^3 (z_{j+3} - X_j)^2. \quad (3.5)$$

Znak minus przed sumą wynika z poszukiwania przyjętego ekstremum (maksimum) wskaźnika jakości.

Zagadnienie identyfikacji rezystancji fazowych wsadu pieca sprowadza się więc do następującej optymalizacji statycznej.

Wyznaczyć

$$\max_{\mathbf{Z}} \{F(\mathbf{Z}); \text{ dla } \mathbf{Z} \in \Omega\}, \quad (3.6)$$



przy czym

$$\Omega = \{Z : (z_j \geq 0) \wedge \left[ \sum_{k=1}^6 a_{jk} z_k = b_j \right] \wedge (j = 1 \dots 6)\} . \quad (3.7)$$

Oznacza to, że rezystancje fazowe wsadu pieca  $z_j$  ( $j=1,2,3$ ) będą identyfikowane przez wyznaczenie minimum sumy kwadratów różnic reaktancji zastępczych toru  $X_j$  otrzymanych z pomiarów i odpowiednich reaktancji  $z_j$  ( $j=4,5,6$ ) przy spełnieniu warunku (3.4).

### 3.2. Konstrukcja algorytmu identyfikacji rezystancji i mocy fazowych odbiornika

Niech  $Z$  należy do zbioru rozwiązań dopuszczalnych ( $Z \in \Omega$ ). Aby punkt  $Z = Z + CQ$  (gdzie  $C > 0$ ) pozostawał w zbiorze rozwiązań dopuszczalnych  $\Omega$ , musi zachodzić warunek

$$A Z = B , \quad (3.8)$$

z którego wynika, że wektor  $Q$  (wzdłuż którego należy się posuwać) musi spełniać równanie

$$A Q = 0 . \quad (3.9)$$

Z konstrukcji macierzy  $A$  wynika, że jej rząd jest równy cztery, tj. jej wektory wierszowe  $a_{1j}$ ,  $a_{2j}$ ,  $a_{3j}$ ,  $a_{4j}$  są liniowo niezależne. Niech  $W$  jest podprzestrzenią rzeczywistą sześciowymiarową generowaną przez te wektory; wówczas wektor

$$G = \text{grad } F(Z) \quad (3.10)$$

można uważać za jednoznaczny sumę wektora  $W \in W$  oraz wektora  $Q$  należącego do podprzestrzeni  $D(W)$  będącej ortogonalnym dopełnieniem  $W$ , czyli

$$G = Q + W, \quad Q \in D(W), \quad W \in W . \quad (3.11)$$

Wektor  $W$  można przedstawić jako kombinację liniową wektorów  $a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}$

$$w_k = \sum_{j=1}^4 a_{jk} u_j, \quad k = 1 \dots 6, \quad (3.12)$$

czyli

$$W = A^T U. \quad (3.13)$$

Podstawiając wyrażenie (3.13) do wzoru (3.11) otrzymuje się

$$G = Q + A^T U. \quad (3.14)$$

Mnożąc równanie (3.14) lewostronnie przez macierz  $A$  oraz uwzględniając równość (3.9) otrzymuje się

$$A G = A A^T U. \quad (3.15)$$

Rozwiązując równanie (3.15) ze względu na  $U$  oraz podstawiając tak otrzymany wynik do wzoru (3.14) uzyskuje się

$$Q = G - W = HR G, \quad (3.16)$$

gdzie tzw. macierz rzutowania  $HR$  wyraża się wzorem

$$HR = I - A^T (A A^T)^{-1} A, \quad I - \text{macierz jednostkowa}. \quad (3.17)$$

Macierz  $HR$  rzutuje wektor  $G = \text{grad } F(Z)$  na ortogonalne dopełnienie podprzestrzeni generowanej przez wektory wierszowe  $a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}$  macierzy  $A$ .

Ponadto zachodzi

$$\lim_{C \rightarrow 0} \frac{1}{C} [F(\mathbf{Z} + C\mathbf{Q}) - F(\mathbf{Z})] = \text{grad } F(\mathbf{Z})\mathbf{Q} = \mathbf{G}\mathbf{Q} . \quad (3.18)$$

Jeżeli więc  $\mathbf{Q} \neq \mathbf{0}$ , to uwzględniając fakt, że  $\mathbf{W}\mathbf{Q} = \mathbf{0}$ , otrzymuje się

$$\mathbf{G}\mathbf{Q} = |\mathbf{Q}|^2 > 0 , \quad (3.19)$$

czyli na mocy wzoru (3.18) przyrost funkcji  $F(\mathbf{Z})$  wzdłuż kierunku  $\mathbf{Q}$  jest dodatni.

W danym kroku iteracyjnym parametr  $C > 0$  należy dobrać tak, aby przyrost funkcji  $F(\mathbf{Z})$  był maksymalny, a więc

$$\frac{dF(\mathbf{Z} + C\mathbf{Q})}{dC} = 0 . \quad (3.20)$$

Z warunku (3.20) wynika, że

$$C = \left[ \sum_{j=1}^3 (X_j - z_{j+3})q_{j+3} \right] / \sum_{j=1}^3 (q_{j+3})^2 . \quad (3.21)$$

Ponieważ

$$\frac{d^2F(\mathbf{Z} + C\mathbf{Q})}{d^2C} = -2 \sum_{j=1}^3 (q_{j+3})^2 < 0 , \quad (3.22)$$

więc dla  $C$  określonego wzorem (3.21) przyrost funkcji  $F(\mathbf{Z})$  w kierunku wektora  $\mathbf{Q}$  jest maksymalny.

W ten sposób określono algorytm iteracyjny pozwalający znaleźć maksimum funkcji  $F(\mathbf{Z})$ , a tym samym rezystancje wsadu pieca  $R_k = z_k$  ( $k=1,2,3$ ).

Proces iteracyjny można zakończyć, jeżeli zachodzi warunek

$$\left[ \sum_{j=1}^6 (q_j)^2 \right] / \left[ \sum_{j=1}^6 (z_j)^2 \right] < \varepsilon , \quad (3.23)$$

gdzie  $\varepsilon$  - zadana dokładność identyfikacji.

Istotną rzeczą w procesie identyfikacji rezystancji jest formowanie macierzy rzutowania  $HR$ . Według wzoru (3.17) można to osiągnąć poprzez wykonanie operacji mnożenia i odwracania macierzy na macierzy  $A$  oraz jej macierzy transponowanej  $A^T$ . Mając jednak na uwadze minimalizację ilości operacji matematycznych niezbędnych do sformułowania macierzy  $HR$  elementy tej macierzy oblicza się w sposób bezpośredni ze wzorów analitycznych.

Ponieważ wskaźnik jakości identyfikacji zależy tylko od zmiennych  $z_4, z_5, z_6$ , więc jego gradient posiada tylko trzy składowe

$$g_{j+3} = -2(z_{j+3} - X_j), \quad j = 1, 2, 3. \quad (3.24)$$

Do rzutowania gradientu wskaźnika jakości  $G = \text{grad } F(Z)$  za pomocą macierzy  $HR$  na ortogonalne dopełnienie podprzestrzeni generowanej przez wektory wierszowe  $a_{1j}, a_{2j}, a_{3j}, a_{4j}$  macierzy  $A$  wystarczy zatem znajomość trzech ostatnich kolumn macierzy  $HR$ . Oznaczmy przez  $H$  macierz prostokątną składającą się z tych kolumn

$$h_{j,k} = hr_{j,k+3}, \quad j = 1 \dots 6, \quad k = 1, 2, 3. \quad (3.25)$$

Elementy tej macierzy można wyprowadzić na podstawie zależności (3.17) w ciągu następujących przekształceń:

$$AA^T = \begin{bmatrix} |L_1|^2 + |L_2|^2 & 0 & -|L_2|^2 & 0 \\ 0 & |L_1|^2 + |L_2|^2 & 0 & -|L_2|^2 \\ -|L_2|^2 & 0 & |L_2|^2 + |L_3|^2 & 0 \\ 0 & -|L_2|^2 & 0 & |L_2|^2 + |L_3|^2 \end{bmatrix}, \quad (3.26)$$

$$(AA^T)^{-1} = W^{-1} \begin{bmatrix} |L_2|^2 + |L_3|^2 & 0 & |L_2|^2 \\ 0 & |L_2|^2 + |L_3|^2 & 0 \\ |L_2|^2 & 0 & |L_1|^2 + |L_2|^2 \\ 0 & |L_2|^2 & 0 & |L_1|^2 \end{bmatrix}$$

gdzie

$$W = |L_1|^2 |L_2|^2 + |L_2|^2 |L_3|^2 + |L_3|^2 |L_1|^2. \quad (3.27)$$



Po wykonaniu kolejnych mnożeń macierzy (3.27) przez  $A$  oraz  $A^T$  i odjęciu macierzy wynikowej od macierzy jednostkowej zgodnie ze wzorem (3.17) otrzymujemy macierz  $HR$ , której trzy ostatnie kolumny tworzą macierz  $H$  określoną zgodnie ze wzorem (3.25). Jej elementy oblicza się na podstawie następujących wzorów analitycznych:

$$\begin{aligned}
 h_{jj} &= 0, \\
 h_{j,k} &= \frac{|I_l|^2 \left[ \operatorname{Re}\{I_k\} \operatorname{Im}\{I_l\} - \operatorname{Re}\{I_j\} \operatorname{Im}\{I_k\} \right]}{W}, \\
 h_{j+3,j} &= \frac{|I_l|^2 |I_m|^2}{W}, \\
 h_{j+3,k} &= \frac{|I_l|^2 \left[ \operatorname{Re}\{I_k\} \operatorname{Re}\{I_j\} + \operatorname{Im}\{I_k\} \operatorname{Im}\{I_j\} \right]}{W}, \\
 j, k, l, m &= 1 \dots 3, \quad j \neq k \neq l \neq m.
 \end{aligned}
 \tag{3.28}$$

Zgodnie ze wzorem (3.16) rzut wektora gradientu  $Q$  przyjmie postać

$$q_j = \sum_{k=1}^3 h_{j,k} g_k, \quad j = 1 \dots 6,
 \tag{3.29}$$

gdzie

$$g_k = -2(z_{k+3} - X_k).$$

W celu zainicjowania procesu iteracyjnego należy podać pewne rozwiązanie  $Z$  należące do zbioru rozwiązań dopuszczalnych  $\Omega$  (wzór (3.7)). Przyjmuje się, że  $z_1 = X_2$ ,  $z_6 = X_3$ , natomiast pozostałe  $z_k$  dla  $k=1 \dots 4$  są rozwiązaniem układu czterech równań (3.4).

Znajomość rzutu wektora gradientu  $Q$  w każdym kroku iteracyjnym pozwala przybliżyć rozwiązanie  $Z$

$$z_j^{(k+1)} = z_j^{(k)} + Cq_j, \quad j = 1 \dots 6,
 \tag{3.30}$$

gdzie stała  $C$  określona wzorem (3.21) zapewnia maksymalny przyrost funkcji  $F(Z)$  (wzór (3.5)) i najszybszą zbieżność procesu iteracyjnego.

Po zakończeniu iteracji (spełniony warunek (2.23)) otrzymuje się rezystancje fazowe wsadu pieca  $R_k = z_k$  oraz moce fazowe  $P_k = (I_k)^2 R_k$  ( $k = 1 \dots 3$ ). Skorygowane natomiast

reaktancje zastępcze toru  $X_k = z_{1,1}$  ( $k = 1...3$ ) mogą stanowić punkt wyjścia następnego procesu identyfikacji dla nowych danych pomiarowych.

### PRZYKŁAD OBLICZENIOWY

Wielkości wejściowe procesu identyfikacji:

Wielkość	Ozn.	Jedn.	Faza 1	Faza 2	Faza 3
Napięcie fazowe	E	V	76.54	80.52	87.83
Prąd fazowy	I	kA	94.59	98.91	63.06
Kąt fazowy	$\varphi$	rad	0.89	0.43	0.65
Zastępcze reaktancje fazowe sieci krótkiej odbiornika	$X_k$	m $\Omega$	0.93	0.13	0.69

Przebieg procesu identyfikacji:

#### ITERACJA 1:

Nazwa wektora	Ozn.	Wartość kolejnej składowej wektora					
		1	2	3	4	5	6
Wektor impedancji zastępczych	<b>Z</b>	0.49	0.93	0.68	0.93	0.13	0.69
Gradient wskaźnika jakości	<b>G</b>	-4.4e-3	0	0	-	-	-
Rzut wektora gradientu	<b>Q</b>	0	-6.2e-4	1.5e-3	-1.1e-3	7.9e-4	4.2e-4

#### ITERACJA 2:

Nazwa wektora	Ozn.	Wartość kolejnej składowej wektora					
		1	2	3	4	5	6
Wektor impedancji zastępczych	<b>Z</b>	0.49	0.93	0.69	0.93	0.13	0.69
Gradient wskaźnika jakości	<b>G</b>	-1.8e-3	-1.9e-3	-1.0e-3	-	-	-
Rzut wektora gradientu	<b>Q</b>	-7.8e-5	5.9e-5	3.1e-5	-8.4e-14	4.6e-8	-1.1e-4

Wynik końcowy :

Nazwa wektora	Ozn.	Wartość kolejnej składowej wektora					
		1	2	3	4	5	6
Wektor impedancji zastępczych	Z	0.49	0.93	0.69	0.93	0.13	0.69

Obliczenie dalszych wielkości fazowych:

Wielkość	Ozn.	Jedn.	Faza 1	Faza 2	Faza 3
Rezystancja fazowa	R	m $\Omega$	0.49	0.93	0.69
Moc czynna fazowa odbiornika	P	MW	4.35	9.13	2.72
Moc czynna fazowa strony zasilania odbiornika	P <sub>D</sub>	MW	4.56	7.23	4.42
Różnica mocy czynnej fazowej i mocy strony zasilania odbiornika odniesiona do mocy fazowej	\delta	%	4.83	20.81	62.5

Powyższe wyniki wskazują na szybką zbieżność procesu iteracyjnego (dwie iteracje). Zestawienia mocy czynnych fazowych nierzonych na podstawie wielkości pomiarowo dostępnych i mocy identyfikowanych poprzez wyznaczone rezystancje ukazują wpływ zjawiska przenoszenia mocy na rozdział mocy czynnych poszczególnych faz urządzenia łukowo-oporowego.

#### 4. WNIOSKI

Przedstawiona metoda identyfikacji rezystancji zastępczych odbiorników trójfazowych wielkiej mocy pozwala na efektywne wyznaczanie parametrów rezystancyjnych gwiazdowego modelu odbiornika, co stwarza możliwość wykorzystania powyższego algorytmu w systemach automatyki czasu rzeczywistego. Istotnym ograniczeniem możliwości jego zastosowania jest klasa odbiorników o niewielkiej deformacji przebiegów prądów fazowych (poniżej kilku procent). W celu uzyskania dostatecznej dokładności identyfikacji konieczna jest konstrukcja

systemu pomiarowego zapewniającego odpowiednią jakość pomiarów w warunkach przemysłowych (obecność zakłóceń sieciowych o dużym poziomie) oraz gwarantującego równoczesność pomiarów napięć i prądów fazowych ze względu na dużą wrażliwość procesu identyfikacji na błąd kątów fazowych.

## LITERATURA

1. Baron B., Marcol A.: Identyfikacja reaktancji fazowych odbiorników trójfazowych wielkiej mocy bez dostępnego punktu zerowego odbiornika. Materiały XVII SPETO 1994.
2. Bolkowski S.: Elektrotechnika teoretyczna. Teoria obwodów elektrycznych, t.1. WNT, Warszawa 1982.
3. Czajczyński Z.: Optymalne stany eksploatacji stalowniczego pieca łukowego. Przegląd Elektrotechniczny Nr 1/1965.
4. Kręglewski T., Rogowski T., Ruszczyński A., Szymanowski J.: Metody optymalizacji w języku FORTRAN. PWN, Warszawa 1984.
5. Kurbiel A.: Elektrotermiczne urządzenia łukowe. WNT, Warszawa 1988.
6. Mańczak K.: Metody identyfikacji wielowymiarowych obiektów sterowania. WNT, Warszawa 1971.
7. Sondj F.: Ocena pracy asymetrycznego stalowniczego urządzenia łukowego oraz dobór optymalnych warunków jego pracy. Rozprawy Elektrotechniczne Tom VII Z.3 1961.
8. Chainson A.W.: Modelowanie matematyczne sieci elektrycznej stalowniczego pieca łukowego. Materiały I Konferencji: "Metody matematyczne w elektrotermii. Nagrzewanie łukowe i łukowo-oporowe". Wisła 1986.

Recenzent: Prof. dr hab. inż. Andrzej Jordan

Wpłynęło do Redakcji 25 marca 1994 r.



## Abstract

In the paper a method for identification of phase resistances of a model of three-phase large power loads with star-connected substitute circuits (Fig. 1) has been presented.

In case of arc appliances with shielded arc, e.g. arc-resistance furnaces, the only measurement accessible electrical quantities are secondary supply voltages and phase currents because star neutral point of load is not accessible (Fig. 2).

Assuming linearity of substitute resistances of model and non-deformed supply voltages the circuit from Fig. 1 can be described by equation system (2.1). Introducing substitute induction coefficients (2.3) the circuit showed in Fig. 3 has been obtained.

A solution of problem of identification of resistance parameters of the model has been made possible by previous identifying of its reactance parameters [1]. This identification enables to obtain a point in which neighbourhood the changes of reactances caused by a change of flexible parts location exist. Taking components of the vector (3.1) as variables the system of equation (3.2)...(3.4) has been obtained.

The identification problem is brought to a static optimisation task (3.6) with condition (3.7) for proposed quality index (3.5). The algorithm of identification is based on the gradient-projection method shown in (3.8)...(3.23). Considering a minimization of amount of mathematical operations being indispensable to formulate projection matrix (3.17) the elements of the matrix have been calculated directly from analytic formulas (3.28) derived from (3.24)...(3.27).

A process of the identification has been illustrated by a numerical example for assumed values of input quantities.

The presented method for identification of substitute resistances can be applied to real time automatic systems cause of the fast convergence of iteration process. The essential limitation of application possibilities of the method is a class of little phase current deformation loads.