

Adam HEYDUK
Politechnika Śląska, Gliwice

MODELOWANIE PRĄDÓW ZWARCIOWYCH W SIECIACH KOPALNIANYCH ZASILAJĄCYCH GRUPY SILNIKÓW INDUKCYJNYCH

Streszczenie. W referacie przedstawiono wybrane zagadnienia związane z modelowaniem przebiegów przejściowych występujących podczas symetrycznych i niesymetrycznych zwarć w sieciach zasilających grupy silników indukcyjnych. Celem analizy była ocena wpływu prądów generowanych przez te silniki na wartości prądów wykrywanych przez nadprądowe zabezpieczenia zwarciove. Charakterystyczną cechą prezentowanego podejścia jest obliczeniowe rozdzielenie analizy stanów elektromagnetycznych i elektromechanicznych.

SHORT-CIRCUIT CURRENT MODELING IN MINE POWER NETWORKS SUPPLYING GROUPS OF INDUCTION MOTORS

Summary. The paper presents selected problems of electromagnetic transient modelling during three-phase and two-phase short-circuits in mine power networks supplying groups of induction motors. The purpose of this analysis was to evaluate the influence of motor-generated currents on current values sensed by overcurrent protection devices. The special feature of presented approach is computational separation of electromagnetic and electromechanic transients. Particular attention was paid to the possibility of decreasing the value of short-circuit current in remaining cables of multi-cable line.

1. Wprowadzenie

Silniki indukcyjne są podstawowymi maszynami elektrycznymi stosowanymi w napędach maszyn górniczych. Stanowią więc najistotniejszą grupę odbiorników energii elektrycznej w podziemiach kopalń [2]. Stąd też wynikać może istotny wpływ tych silników na przebieg zjawisk zwarciowych [1,3,11] w sieciach kopalnianych.

Uproszczone modelowanie silników indukcyjnych w stanie zwarcia polega na traktowaniu ich jako źródeł o określonej impedancji i sile elektromotorycznej – podobnie jak generatorów synchronicznych. Istotna różnica między silnikiem indukcyjnym a generatorem synchronicznym polega jednak na tym, że silnik nie ma (jak generator synchroniczny) turbiny napędzającej i utrzymującej stałą prędkość obrotową, ale za to sam napędza jakieś urządzenie. Ponieważ w chwili tuż przed zwarciem wirnik silnika (i mechanizm napędzanej maszyny) mają pewną energię kinetyczną, więc po wystąpieniu zwarcia w przewodzie zasilającym energia ta wyzwala się, podtrzymując początkową prędkość obrotową. Jednak w wyniku oddziaływania momentu hamującego napędzanego urządzenia prędkość ta zmniejsza się z czasem do zera [4].

Prąd dopływający z silnika do miejsca zwarcia generowany jest przez napięcie indukowane w uzwojeniu stojana przez strumień wirnika skojarzony z tym uzwojeniem. Wartość tego prądu jest ograniczona przez wewnętrzną impedancję silnika. Częstotliwość składowej okresowej różni się od częstotliwości sieci początkowo tylko o niewielką wartość związaną z poślizgiem wirnika, a następnie stopniowo zmniejsza się z szybkością zależną od momentu hamującego oraz łącznej bezwładności wirnika oraz napędzanej maszyny. Szczególnie interesujący wydaje się wpływ silników na przebieg czasowy rozptywu prądów zwarciovych w sieciach o bardziej złożonej konfiguracji, np. w sieciach zawierających linie wiązkowe.

Konieczność zasilania grupy silników (np. jednej stacji kompaktowej) wiązką dwóch lub trzech kabli lub przewodów oponowych występuje już wówczas, gdy prąd obciążenia tej grupy przekracza (z uwzględnieniem ewentualnych dodatkowych obostrzeń związanych ze stopniem niebezpieczeństwa wybuchu metanu) dopuszczalną obciążalność długotrwałą jednego kabla przewodu o największym dopuszczalnym (ze względu na rozmiary zastosowanych w dobieranej aparaturze łączeniowej ognioszczelnych wpustów kablowych) przekroju. Przyjmując maksymalny dopuszczalny przekrój żyły roboczej przewodu oponowego 95 mm^2 i odpowiadającą mu obciążalność długotrwałą 314A, konieczność zasilania grupy silników więcej niż jednym przewodem występuje (przy przyjętych średnich wartościach współczynnika obciążenia $k_0=0.8$, współczynnika mocy $\cos\varphi=0.87$ i sprawności $\eta=0.9$) dla napięcia znamionowego 1000V już przy sumarycznej mocy

$$P = \sqrt{3} \cdot 314 \cdot 0.87 \cdot 0.9 \cdot 1000 \cdot \frac{1}{0.8} = 532 \text{ kW}$$

2. Matematyczny opis zjawisk towarzyszących zwarciom w sieciach zasilających silniki indukcyjne

Do analizy stanów nieustalonych w silnikach indukcyjnych przyłączonych do źródła o stałej częstotliwości najkorzystniej zastosować opis wektorowy w układzie współrzędnych wirującym z prędkością synchroniczną ω_s [6,7,9]. Poślizg silnika oznaczono jako S , rezystancję i indukcyjność uzwojenia stojana jako R_s, L_s , indukcyjność uzwojenia wirnika jako R_w, L_w , a indukcyjność wzajemną jako L_M . Zespólone wektory przestrzenne prądów, strumieni

zdefiniowane są jako
$$\vec{i}_s = \frac{2}{3} [i_{sa} + \alpha \cdot i_{sb} + \alpha^2 i_{sc}], \quad \vec{i}_w = \frac{2}{3} [i_{wa} + \alpha \cdot i_{wb} + \alpha^2 i_{wc}]$$

$$\vec{\Psi}_s = \frac{2}{3} [\Psi_{sa} + \alpha \cdot \Psi_{sb} + \alpha^2 \Psi_{sc}], \vec{\Psi}_w = \frac{2}{3} [\Psi_{wa} + \alpha \cdot \Psi_{wb} + \alpha^2 \Psi_{wc}]$$
 itp., przy czym

$$\alpha = e^{j\frac{2\pi}{3}} = -\frac{1}{2} + j\frac{\sqrt{3}}{2}, \quad \alpha^2 = e^{j\frac{4\pi}{3}} = -\frac{1}{2} - j\frac{\sqrt{3}}{2}$$
. (mimo formalnego podobieństwa z

przekształceniem stosowanym w metodzie składowych symetrycznych należy tu zwrócić uwagę na fakt że jego zastosowanie jest w tym przypadku związane raczej z przestrzennym rozmieszczeniem poszczególnych uzwojeń w silniku).

Równanie napięciowe obwodu stojana ma wówczas postać:

$$\vec{u}_s = R_s \vec{i}_s + j\omega_s \vec{\Psi}_s + \frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} \tag{1}$$

równanie napięciowe obwodu wirnika:

$$0 = R_w \vec{i}_w + j \underbrace{S\omega_s}_{\omega_s - \omega_m} \vec{\Psi}_w + \frac{d\vec{\Psi}_w}{dt} \tag{2}$$

zespólony wektor przestrzenny strumienia stojana:

$$\vec{\Psi}_s = L_s \vec{i}_s + L_M \vec{i}_w \tag{3a}$$

zespólony wektor przestrzenny strumienia wirnika:

$$\vec{\Psi}_w = L_w \vec{i}_w + L_M \vec{i}_s \tag{3b}$$

Początkowe wartości zespolonych wektorów przestrzennych prądów i strumieni w chwili wystąpienia zwarcia ($t=0$):

$$\vec{\Psi}_{s0} = L_s \vec{i}_{s0} + L_M \vec{i}_{w0} \tag{4a}$$

$$\vec{\Psi}_{w0} = L_M \vec{i}_{s0} + L_w \vec{i}_{w0} \tag{4b}$$

można wyznaczyć z równań (1)(2) dla stanu ustalonego ($\frac{d\vec{\Psi}_s}{dt} = 0, \frac{d\vec{\Psi}_w}{dt} = 0$):

$$\vec{u}_{s0} = R_s \vec{i}_{s0} + j\omega_s \vec{\Psi}_{s0} \tag{5}$$

$$0 = R_w \bar{i}_{w0} + jS\omega_s \bar{\Psi}_{w0} \quad (6)$$

jako

$$\bar{i}_{s0} = \frac{R_w + jS\omega_s L_w}{R_s R_w - \omega^2 S (L_s L_w - L_M^2) + j\omega_s (SR_s L_w + R_w L_s)} \bar{u}_{s0} \quad (7a)$$

$$\bar{i}_{w0} = \frac{-jS\omega_s L_M}{R_w + jS\omega_s L_w} \bar{i}_{s0} \quad (7b)$$

Transformata Laplace'a równania (1) przy warunkach początkowych (7a)(7b) będzie miała wówczas postać:

$$\bar{U}_s(s) = R_s \bar{I}_s(s) + j\omega_s (L_s \bar{I}_s(s) + L_M \bar{I}_w(s)) + s (L_s \bar{I}_s(s) + L_M \bar{I}_w(s)) - (L_w \bar{i}_{s0} + L_M \bar{i}_{w0}) \quad (8)$$

a transformata równania (2) postać:

$$0 = R_w \bar{I}_w(s) + jS\omega_s (L_w \bar{I}_w(s) + L_M \bar{I}_s(s)) + s (L_w \bar{I}_w(s) + L_M \bar{I}_s(s)) - (L_w \bar{i}_{w0} + L_M \bar{i}_{s0}) \quad (9)$$

Z rozwiązania układu równań (8) (9) można wyznaczyć transformatę Laplace'a zespolonego wektora przestrzennego prądu stojana jako

$$\begin{aligned} \bar{I}_s(s) = & \frac{s \cdot (L_w L_s - L_M^2) + R_w L_s + j\omega_s (SL_w L_s - L_M^2)}{M(s)} \bar{i}_{s0} + \\ & + \frac{L_M R_w + j\omega_s L_M L_w (S-1)}{M(s)} \bar{i}_{w0} + \frac{s \cdot L_w + R_w + j\omega_s SL_w}{M(s)} \bar{U}_s(s) \end{aligned} \quad (10a)$$

gdzie mianownik (decydujący o charakterze przebiegów przejściowych) jest wielomianem drugiego stopnia

$$\begin{aligned} M(s) = & s^2 \cdot (L_s L_w - L_M^2) + s \cdot [R_s L_w + R_w L_s + j\omega_s (1+S)(L_s L_w - L_M^2)] + \\ & + R_s R_w - \omega_s^2 S (L_s L_w - L_M^2) + j\omega_s (L_s R_w + SL_w R_s) \end{aligned} \quad (10b)$$

Dzieląc licznik i mianownik wyrażenia (10a) przez czynnik $L_s L_w$, uzyskuje się:

$$\begin{aligned} \bar{I}_s(s) = & \frac{s \cdot \left(1 - \frac{L_M^2}{L_s L_w}\right) + \frac{R_w}{L_w} + j\omega_s \left(S - \frac{L_M^2}{L_s L_w}\right)}{M_1(s)} \bar{i}_{s0} + \\ & + \frac{\frac{L_M R_w}{L_w L_s} + j\omega_s \frac{L_M}{L_s} (S-1)}{M_1(s)} \bar{i}_{w0} + \frac{s \cdot \frac{1}{L_s} + \frac{R_w}{L_w L_s} + j\omega_s \frac{S}{L_s}}{M_1(s)} \bar{U}_s(s) \end{aligned} \quad (11a)$$

gdzie

$$\begin{aligned} M_1(s) = & s^2 \cdot \left(1 - \frac{L_M^2}{L_s L_w}\right) + s \cdot \left[\frac{R_s}{L_s} + \frac{R_w}{L_w} + j\omega_s (1+S)\right] \left(1 - \frac{L_M^2}{L_s L_w}\right) + \\ & + \frac{R_s R_w}{L_s L_w} - \omega_s^2 S \left(1 - \frac{L_M^2}{L_s L_w}\right) + j\omega_s \left(\frac{R_w}{L_w} + S \frac{R_s}{L_s}\right) \end{aligned} \quad (11b)$$

a wprowadzając pojęcia (łatwiejszych do oszacowania) bezwymiarowych współczynników

rozproszenia stojana $\sigma_s = \frac{L_s}{L_M} - 1$, wimnika $\sigma_w = \frac{L_w}{L_M} - 1$ i wypadkowego współczynnika.

rozproszenia $\sigma = 1 - \frac{1}{(1 + \sigma_s)(1 + \sigma_w)} = 1 - \frac{L_M^2}{L_s L_w}$ oraz stałych czasowych wimnika $T_w = \frac{L_w}{R_w}$ i

stojana $T_s = \frac{L_s}{R_s}$ (pozwalających łatwiej zinterpretować dynamikę zachodzących procesów)

uzyskuje się postać

$$\begin{aligned} \vec{I}_\sigma(s) = & \frac{T_s T_w s \cdot \sigma + T_s + j \omega_s T_s T_w (s + \sigma - 1)}{M_\sigma(s)} \vec{i}_{s0} + \\ & + \frac{\frac{T_s}{(1 + \sigma_s)} + j \frac{T_w T_s (S - 1) \omega_s}{(1 + \sigma_s)}}{M_\sigma(s)} \vec{i}_{w0} + \frac{1}{R_s} \frac{s \cdot T_w + 1 + j S \omega_s T_w}{M_\sigma(s)} \vec{U}_s(s) \end{aligned} \quad (12a)$$

oraz

$$M_\sigma(s) = T_s T_w \sigma s^2 + s \cdot [T_w + T_s + j \omega_s (1 + S) \sigma T_s T_w] + 1 - \omega_s^2 T_s T_w S \sigma + j \omega_s (T_s + S T_w) \quad (12b)$$

Dalsza analiza otrzymanych zależności (a zwłaszcza obliczenie wartości prądu po zaniknięciu elektromagnetycznego stanu ustalonego z zależności $\vec{I}_s(t \rightarrow \infty) = \lim_{s \rightarrow 0} s \cdot \vec{I}_s(s)$ - wartość niezerową może przyjmować wówczas jedynie ostatni składnik wzoru (12a)) wymaga podstawienia odpowiedniej (w zależności od rodzaju analizowanego zwarcia) transformaty Laplace'a wektora przestrzennego napięcia sieci (wyrażonej w wirującym z prędkością synchroniczną układzie współrzędnych), np. :

- dla normalnej pracy (bez zwarcia) będzie to

$$\vec{U}_{ns}(s) = \frac{2U}{s\sqrt{3}} \quad \text{gdzie } U \text{ oznacza wartość skuteczną napięcia sieci.}$$

$$\vec{i}_{ns} = \frac{2}{\sqrt{3}} U \frac{R_w + j \omega_s S L_w}{R_s R_w + S \omega_s^2 (L_M^2 - L_s L_w) + j \omega_s (L_s R_w + S \cdot L_w R_s)} \quad (13a)$$

czyli

$$\vec{i}_{ns} = U \frac{(1 + j \omega_s S T_w)}{R_s \cdot [1 - S \omega_s^2 \sigma T_s T_w + j \omega_s (T_s + S \cdot T_w)]} \quad (13b)$$

- dla zwarcia trójfazowego

$$\vec{U}_{3s}(s) = 0$$

czyli również $\vec{i}_{3s} = 0$

$$(14)$$

- dla zwarcia dwufazowego U_2 (np. dla $u_B = u_C = -\frac{1}{2} u_A(t)$) $\vec{U}_{2s}(s) = \frac{U}{s\sqrt{3}}$

$$\vec{i}_{2s} = \frac{U}{\sqrt{3}} \cdot \frac{R_w + j\omega_s SL_w}{R_s R_w + S\omega_s^2 (L_M^2 - L_s L_w) + j\omega_s (L_s R_w + S \cdot L_w R_s)} \quad (15a)$$

$$\vec{i}_{2u} = \frac{U}{\sqrt{3}} \frac{(1 + j\omega_s ST_w)}{R_s \cdot [1 - S\omega_s^2 \sigma T_s T_w + j\omega_s (T_s + S \cdot T_w)]} \quad (15b)$$

Do odtworzenia przebiegu czasowego składowych przejściowych najlepiej wykorzystać wzór Heaviside'a (twierdzenie o rozkładzie). Jeżeli występujący w mianowniku wzoru (12a) wielomian drugiego stopnia $M_\sigma(s)$ ma dwa pierwiastki zespolone sprzężone $s_1 = \alpha + j\beta$, $s_2 = \alpha - j\beta$, to przebieg czasowy wektora przestrzennego prądu stojana będzie miał ogólną postać

$$\vec{i}_s(t) = \sum_{i=1}^2 \frac{[T_s T_w s_i \cdot \sigma + T_s + j\omega_s T_s T_w (s_i + \sigma - 1)] \vec{i}_{s0} + \left[\frac{T_w}{(1 + \sigma_s)} + j \frac{T_w T_s (S - 1) \omega_s}{(1 + \sigma_s)} \right] \vec{i}_{w0}}{2s_i \sigma T_s T_w + T_s + T_w + j(1 + S) \omega_s T_s T_w} e^{(\alpha + j\beta)t} + \vec{i}_u(t)$$

czyli

$$\vec{i}_s(t) = \sum_{i=1}^2 \frac{T_s T_w s_i \cdot \sigma + T_s + j\omega_s T_s T_w (s_i + \sigma - 1)}{2s_i \sigma T_s T_w + T_s + T_w + j(1 + S) \omega_s T_s T_w} \cdot \vec{i}_{s0} \cdot e^{(\alpha + j\beta)t} + \sum_{i=1}^2 \frac{T_w - jT_w T_s (1 - S) \omega_s}{2s_i \sigma T_s T_w + T_s + T_w + j(1 + S) \omega_s T_s T_w} \cdot \frac{\vec{i}_{w0}}{1 + \sigma_s} \cdot e^{(\alpha + j\beta)t} + \vec{i}_u(t) \quad (17)$$

gdzie $\vec{i}_u(t)$ oznacza przebieg czasowy wektora składowej prądu zależnej od przebiegu czasowego napięcia sieci zasilającej.

Ponieważ dla spotykanych w praktyce parametrów silników zachodzi $\alpha_i < 0$, to te składowe przejściowe (dwa pierwsze składniki wzoru 17) będą miały przebieg wykładniczo zanikający. Ponieważ $\beta < \omega_s$, to pulsacja składowych okresowych będzie nieco mniejsza od pulsacji sieci (o wartość poślizgu silnika – początkowo małą, później nieco rosnącą). Tak złożona postać wzoru (17) wiąże się z faktem, że na przebieg czasowy prądu stojana mają wpływ zarówno procesy związane z zanikaniem energii zmagazynowanej (przed momentem zwarcia) oraz w polu magnetycznym uzwojenia stojana, jak i w polu wirnika

Ostatnim zadaniem jest odtworzenie z przebiegu zespolonego wektora przestrzennego $\vec{i}_s(t)$ przebiegów chwilowych poszczególnych prądów fazowych. Odbywa się to w dwóch etapach:

1. przekształcenie wektora przestrzennego $\vec{i}_s(t)$ wyrażonego w wirującym (z prędkością synchroniczną ω_s) układzie współrzędnych na wektor $\vec{i}_{0s}(t)$ wyrażony w nieruchomym układzie współrzędnych (używamy zwykle w analizie sieci elektroenergetycznych)

$$\vec{i}_{0s}(t) = \vec{i}_s(t) \cdot e^{j\omega_s t} \quad (18)$$
 (łatwe do analitycznego obliczenia wielkości stałe w układzie wirującym stają się wówczas wielkościami sinusoidalnie zmiennymi w układzie nieruchomym).

2. Odtworzenie przebiegów czasowych chwilowych wartości prądów w poszczególnych fazach jako:

$$i_A(t) = \text{Re} \left\{ \overline{i_{0s}}(t) \right\} \quad (19a)$$

$$i_B(t) = -\frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \overline{i_{0s}}(t) \right\} + \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Im} \left\{ \overline{i_{0s}}(t) \right\} \quad (19b)$$

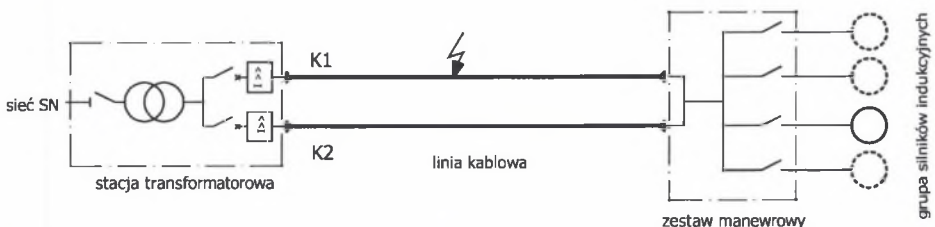
$$i_C(t) = -\frac{1}{2} \text{Re} \left\{ \overline{i_{0s}}(t) \right\} - \frac{\sqrt{3}}{2} \text{Im} \left\{ \overline{i_{0s}}(t) \right\} \quad (19c)$$

3. Przykład obliczeniowy

Jako ilustrację powyższych rozważań przedstawiono obliczenia w przykładowej sieci składającej się ze stacji transformatorowej IT3SF-2/1000/6/1 ($U_{ng}=6000\text{V}, U_{nd}=1000\text{V}, \Delta P_{jal}=2.7\text{ kW}, \Delta P_{obc}=5.8\text{ kW}$) zasilającej dwuprzewodową linią wiązkową ($2 \times \text{YHKGXeky } 3 \times 95 \text{ mm}^2 + 25 \text{ mm}^2$) o długości 500 m wieloodpływową stację kompaktową (zestaw manewrowy). Ze stacji tej zasilane są (przewodami oponowymi OnGbekz-G $3 \times 50 + 25 \text{ mm}^2$ o długości 100 m każdy) cztery pracujące jednocześnie silniki SGP 355L-4 ($P_n=250\text{ kW}, U_n=1000\text{ V}, I_n=142\text{ A}, \eta_n=94.5\%, \cos \varphi_n=0.88, \frac{I_m}{I_n} = 5.6 M_n=1620\text{ N}\cdot\text{m}, J_m=5.6\text{ kg}\cdot\text{m}^2$).

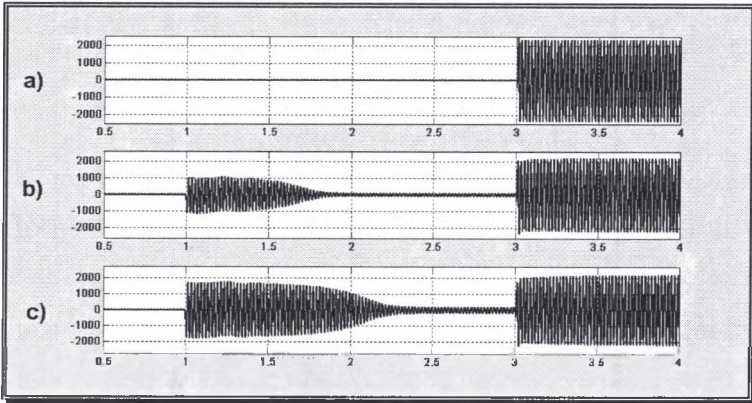
W sytuacji gdy analizowane silniki nie są jednakowe, należy zastosować jedną z metod poszukiwania parametrów silnika zastępczego, odwzorowującego dynamikę całej rozpatrywanej grupy [8] [10]. Należy podkreślić, że przedstawiony powyżej opis analityczny jest w tym przypadku bardzo korzystny, gdyż umożliwia dopasowywanie parametrów silnika zastępczego na drodze porównywania charakterystyk częstotliwościowych (transmitancji).

Schemat analizowanej sieci przedstawiono na rys. 1, a na rys. 2,3,4,5 wyniki obliczeń przeprowadzonych za pomocą programu Matlab/Simulink™. Analizowano przypadki zwarcia trójfazowego i dwufazowego w połowie długości kabla K1 i wpływ grupy silników na prąd płynący przez zabezpieczenie kabla K2. Obliczeniowe miejsce zwarcia wybrano w ten sposób, gdyż wówczas wpływ silników uwydatnia się najwyraźniej.



Rys. 1. Schemat sieci analizowanej w przykładzie obliczeniowym

Fig. 1. Power network circuit diagram used in the computational example



Rys. 2. Przebiegi prądu w fazie B przy zwarciu dwufazowym B-C

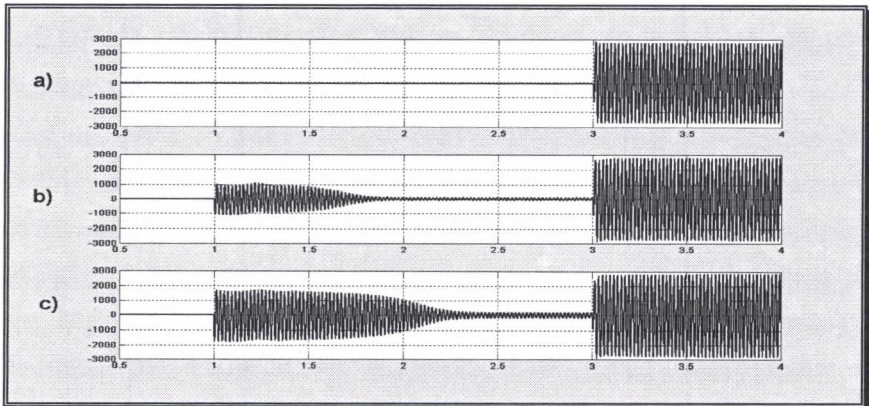
- a) wszystkie silniki wyłączone
- b) załączona połowa silników
- c) wszystkie silniki załączone

Wyraźnie widoczny wpływ silników – im więcej silników załączonych, tym niższa wartość prądu zwarciovego

Fig. 2. Startup and short-circuit current in phase B during a two-phase B-C short circuit

- a) all motors disconnected
- b) two motors connected
- c) all motors connected

The more motors are connected, the lower are values of the short circuit current



Rys. 3. Przebiegi prądu w fazie B przy zwarciu trójfazowym A-B-C

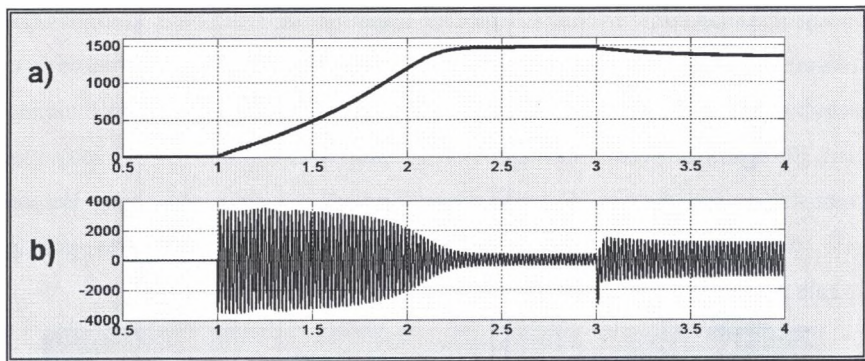
- d) wszystkie silniki wyłączone
- e) załączona połowa silników
- f) wszystkie silniki załączone

wpływ silników znacznie mniejszy niż na rys. 2 (występuje tylko w pierwszej chwili bezpośrednio po zwarciu)

Fig. 3. Startup and short-circuit current in phase B during a three-phase A-B-C short circuit

- d) all motors disconnected
- e) two motors connected
- f) all motors connected

Motor influence is significantly lower than of fig 2. (only immediately after the short-circuit, during a very short time period)



Rys. 4. Przebiegi prędkości i prądu fazy B przy zwarciovym dwufazowym B-C

a) przebieg prędkości

b) przebieg prądu pobieranego lub oddawanego przez grupę silników do sieci

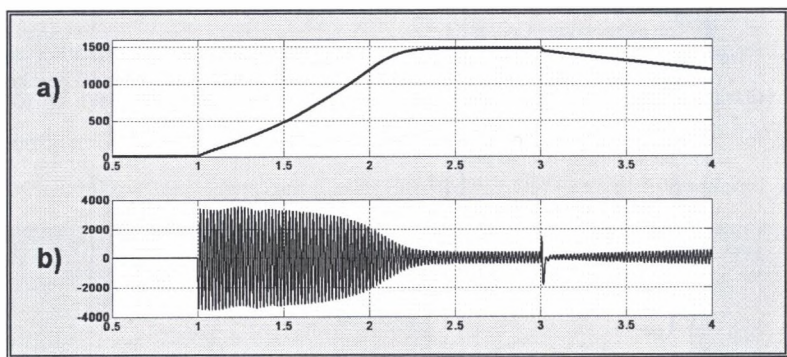
Prędkość zmienia się stosunkowo wolno (możliwe jest więc obliczeniowe rozdzielanie stanów elektromagnetycznych i elektromechanicznych)

Fig. 4. Speed and phase B current transients during startup and two-phase (BC) unsymmetrical short circuit

a) speed transient

b) current transient

(speed changes are rather slow – therefore it is possible to separate electromagnetic and electromechanic transients)



Rys. 5. Przebiegi prędkości i prądu fazy B przy zwarciovym trójfazowym A-B-C

a) przebieg prędkości [obr/min]

b) przebieg prądu pobieranego lub oddawanego przez grupę silników do sieci

Prędkość zmienia się stosunkowo wolno (możliwe jest więc obliczeniowe rozdzielanie stanów elektromagnetycznych i elektromechanicznych)

Fig. 5. Speed and phase B current transients during startup and two-phase (ABC) symmetrical short circuit

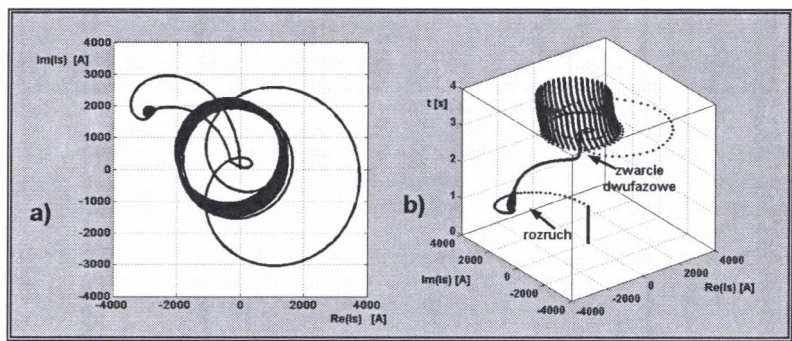
a) speed transient

b) current transient

(speed changes are rather slow – therefore it is possible to separate electromagnetic and electromechanic transients)

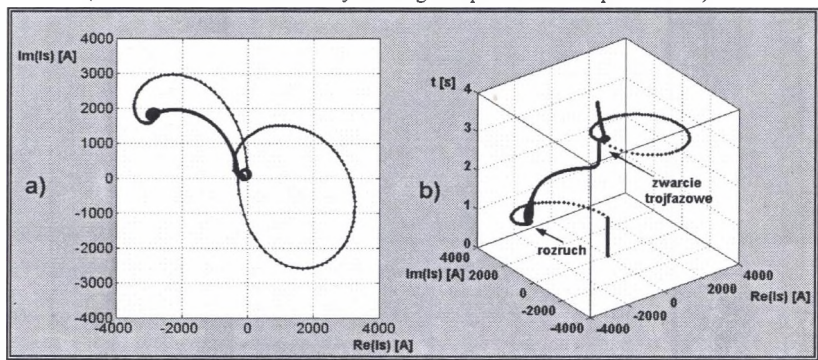
Na podstawie porównania wyników przedstawionych na rys. 2 i 3 oraz 4 i 5 widoczna jest wyraźna różnica między charakterem wpływu silników na wartości prądów zwarciovych przy zwarciovych dwufazowych i trójfazowych. Związane to jest z faktem, że przy zwarciovym trójfazowym zespolony wektor przestrzenny napięcia zasilającego przyjmuje wartość bliską

zeru (co wynika z istnienia dzielnika napięcia, jakim jest rozpatrywana konfiguracja sieci), zatem również składowa $i_u(t)$ jest pomijalnie mała. Wpływ ten jest znacznie większy przy zwarciach dwufazowych, a zatem w sytuacji gdy prądy zwarciove w sieci są mniejsze, czyli trudniejsze do wykrycia przez zabezpieczenia nadprądowe. Dla ilustracji metody wektorów przestrzennych na rys. 6 i rys. 7 przedstawiono na płaszczyźnie zespolonej bezpośrednio trajektorie wektora przestrzennego prądu stojana, będące podstawą do późniejszego wyznaczenia przebiegów prądów fazowych.



Rys. 6. Trajektorja wektora przestrzennego prądu stojana przy zwarciu dwufazowym
 a) na płaszczyźnie Gaussa
 b) w przestrzeni trójwymiarowej – z dołączoną osią czasu
 (wyraźnie widoczne jest istnienie ustalonej -wirującej- składowej wektora przestrzennego prądu stojana)

Fig. 6. Stator current space-vector trajectory during a two-phase short-circuit
 a) on a complex Gauss plane
 b) in a 3D space with an added time axis
 (there can be seen a stationary rotating component of the space vector)



Rys. 7. Trajektorja wektora przestrzennego prądu stojana przy zwarciu trójfazowym
 a) na płaszczyźnie Gaussa
 b) w przestrzeni trójwymiarowej – z dołączoną osią czasu
 (wyraźnie widoczne jest istnienie ustalonej -wirującej- składowej wektora przestrzennego prądu stojana)

Fig. 7. Stator current space-vector trajectory during a three-phase short-circuit
 a) on a complex Gauss plane
 b) in a 3D space with an added time axis
 (there can be seen a fast decay of the space vector rotating component)

Przedstawiony model matematyczny dzięki rozdzieleniu modelowania stanów elektromagnetycznych i stanów elektromechanicznych jest stosunkowo łatwy do praktycznego stosowania. W przypadku analizy grupy niejednakowych silników wymaga jedynie wyznaczenia parametrów silnika zastępczego. Celowa wydaje się również próba powiązania tego modelu z modelami sieci o bardziej złożonych konfiguracjach i modelami zwarć o większej rezystancji (np. zwarcia łukowe).

4. Wnioski

Podstawą efektywnej analizy stanów nieustalonych towarzyszących zwarciom w sieciach zasilających duże grupy silników indukcyjnych jest obliczeniowe rozdzielenie elektromagnetycznych (zachodzących znacznie szybciej) i elektromechanicznych (znacznie wolniejszych) stanów nieustalonych. Elektromagnetyczne stany nieustalone w silnikach indukcyjnych i generowane przez nie prądy zwarciovowe mogą mieć istotny wpływ na wartości prądów w linii wiązkowej zasilającej silnik lub grupę silników, powodując wydłużenie czasu zadziałania zabezpieczenia zwarciovego i odcięcia dopływu energii do miejsca zwarcia. Jeżeli z uwagi na zagrożenie wybuchowe takie zjawisko jest niedopuszczalne, to należy obniżyć nastawę zabezpieczenia zwarciovego lub zapewnić jednoczesne spowodowanie otwarcia wyłączników we wszystkich torach linii wiązkowej (np. w obydwu odpywach stacji transformatorowej). Z tego też względu w rozważanym przypadku bardziej celowe wydaje się zastosowanie stacji transformatorowej z wyłącznikiem po stronie górnego napięcia.

LITERATURA

1. Bottrell G.W., Yu. L.Y.: Motor Behavior Through Power System Disturbances. IEEE Transactions on Industry Applications Vol. IA-16, No. 5, September/October 1980.
2. Ещин Е.К. Расчёты электромеханических переходных процессов в системе электроснабжения горных машин . Электротехника. No 3/1999.
3. Huenig W.C.: Calculating Short-Circuit Currents with Contributions from Induction Motors IEEE Transactions on Industry Applications. Vol. IA-18, No 2 March/April 1982.
4. Kacejko P., Machowski J.: Zwarcia w systemach elektroenergetycznych. WNT, Warszawa 2002.
5. Maljkovic Z., Cettolo M., Pawlica M. The Impact of the Induction Motor on Short-Circuit Current. IEEE Industry Applications Magazine July/August 2001.

6. Paszek W.: Dynamika maszyn elektrycznych prądu przemiennego. Wyd. Helion, Gliwice 1998.
7. Paszek W.: Stany nieustalone maszyn elektrycznych prądu przemiennego. WNT, Warszawa 1986.
8. Pillay P., Sabur S.M, Haq M.M.: A model for induction motor aggregation for power system studies. Electric Power Systems Research. Vol. 42 no. 7, 1997.
9. Pytel J.: Elektromagnetyczne stany nieustalone. Wyd. Pol. Wr., Wrocław 1983.
10. Сивокобыленко В.Ф., Павлюков В.А.: Метод эквивалентирования и расчета короткого замыкания в системе асинхронных машин. Электричество. 1979 No. 1.
11. Yu L.U., Minceff I., Hamilton D.W., Bottrell G.W.: Motor Contribution During Three Phase Short Circuit Fault. IEEE Transactions on Industry Applications, vol. IA-18. No. 6, November/December 1982.

Recenzent: Doc. dr inż. Franciszek Szczucki

Abstract

The paper presents selected problems of electromagnetic transient modeling during three-phase and two-phase short-circuits in mine power networks supplying groups of induction motors. The purpose of this analysis was to evaluate the influence of motor-generated currents on current values sensed by overcurrent protection devices. The analytical solution was found with the use of a Laplace transform and a complex-valued space-vector method. The special feature of the presented approach is a computational separation of electromagnetic and electromechanic transients. There have been presented time-transients and complex space vector trajectories. Particular attention was paid to the possibility of decreasing the value of short-circuit current in remaining cables of multi-cable line. Therefore simplified computation of minimum short-circuit currents neglecting the influence of induction motors is possible only in simple networks with a radial configuration.