

Maciej Wieczorek, Eugeniusz Rosolowski
Politechnika Wroclawska, Wroclaw

MODELOWANIE SILNIKA INDUKCYJNEGO DO SYMULACJI ZWARĆ WEWNĘTRZNYCH DOZIEMNYCH

MODELLING OF INDUCTION MOTOR FOR INTERNAL GROUND FAULTS SIMULATION

Abstract: This article presents a mathematical model by which the transient behaviour of an induction motor with a winding fault can be successfully analyzed. Traditional models of electrical machines are based on electrical circuit equations and equations of motion (so called mechanical circuit model). Mathematical model of induction motor described in this way is composed of differential and algebraic equations. Generally, it is an arrangement of high order set of equations containing nonlinear functions. Motor's parameters that occur in the mentioned case are hard to identify, which is the reason that the model is extremely hard to use directly. The squirrel cage motor was chosen for further investigation. The model was prepared in the ATP – EMTP simulation program. Included simulation results show its fundamental properties. It can be seen that it is a tool handy to use, enabling an easy way to obtain the simulation results by any given conditions. In the following stages the ground fault model is presented and described in detail. Included examples demonstrate basic characteristics of the proposed model and its application for internal fault analysis in the complex system included motor, load and a supplying network.

1. Wprowadzenie

Ochrona zwarciova silników indukcyjnych jest bardzo ważnym zagadnieniem, zwłaszcza w odniesieniu do silników dużej mocy. Układ zabezpieczenia powinien być prosty, a jednocześnie powinien zapewniać dużą selektywność działania, która jest zazwyczaj uwarunkowana możliwością rozróżnienia prądu zwarciowego od prądu rozruchowego silnika.

Uszkodzenia izolacji stojana należą do najczęściej spotykanych uszkodzeń w silnikach elektrycznych. Oprócz tego, bardzo często spotykanym uszkodzeniem jest utrata zasilania w jednej z faz, co jest główną przyczyną niepoprawnej pracy silników elektrycznych. Diagnozowanie uszkodzeń w silnikach elektrycznych jest bardzo ważną czynnością, pozwalającą zabezpieczyć silnik przed skutkami zakłóceń. W celu szczegółowej analizy zjawisk towarzyszących zwarciom w silniku można posłużyć się adekwatnym modelem maszyny.

Tradycyjne modele maszyn elektrycznych bazują na równaniach obwodu elektrycznego oraz równaniach ruchu (tzw. modele obwodowe). Model matematyczny silnika indukcyjnego opisany w ten sposób składa się zarówno z równań różniczkowych, jak i algebraicznych. Jest to układ wysokiego rzędu zawierający funkcje nieliniowe o okresowo zmiennych współczynnikach. Parametry silnika występujące we wspomnianych wzorach są trudno identyfiko-

walne, co sprawia, że model ten jest wyjątkowo trudny do bezpośredniego zastosowania [8].

Występujące podczas pracy silnika wibracje, mogą prowadzić do poluzowania śrub na zaciskach maszyny lub naprężeń mechanicznych, które w konsekwencji mogą doprowadzić do utraty zasilania w jednej z faz uzwojeń. Zwarcia zwojowe i międzyzwojowe są powodowane przez różne czynniki oddziaływujące bezpośrednio na stojan. np. mechaniczne naprężenia podczas montażu lub podczas pracy maszyny, a także wyładowania niezupełne wywołane wysokim napięciem między zwojami, (w sytuacji kiedy stojan jest zasilany ze źródła z modulacją szerokości impulsów) mogą powodować uszkodzenia izolacji, a w konsekwencji przepływ prądu zwarciowego [7]. W literaturze dostępne są różne rozwiązania dotyczące detekcji zwarc wewnątrznych [1], [2], [3], [4], [5], [6]. Detekcja uszkodzeń w silnikach elektrycznych jest szeroką dziedziną badań, stale powiększającą się o nowe algorytmy. Widać zatem jak istotne jak budowanie modeli komputerowych silnika, w których mogą być symulowane zwarcia wewnętrzne.

Projektowanie i testowanie odpowiednich algorytmów zabezpieczeniowych wymaga ich bezpośredniej weryfikacji. Oszczędne podejście w tej mierze prowadzi przez zastosowanie wiarygodnych modeli komputerowych. Modelo-

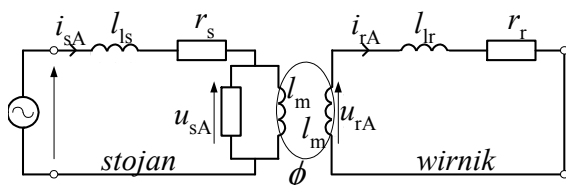
wanie zwarć w maszynach elektrycznych niesie za sobą konieczność uporania się z matematycznym zapisem niesymetrycznych stanów wewnętrznych maszyny.

W literaturze można znaleźć wiele propozycji na temat modelowania zwarć międzyzwojowych w stojanie. Stosunkowo słabo rozpoznane jest natomiast zagadnienie modelowania zwarć doziemnych w uzwojeniach stojana silników indukcyjnych. Tym właśnie problemom poświęcony jest niniejszy referat.

W artykule przedstawiono sposób tworzenia modelu silnika indukcyjnego, przy wykorzystaniu programu ATP/EMTP. Prezentowany model umożliwi symulowanie różnego rodzaju zakłóceń istotnych z punktu widzenia analizy pracy silnika. Szczególną uwagę zwrócono właśnie na sposób modelowania zwarć wewnętrznych doziemnych, obejmujących dowolną liczbę zwojów.

2. Model matematyczny silnika indukcyjnego - ogólny

Schemat zastępczy maszyny asynchronicznej (rys. 1.) uwzględnia przede wszystkim działanie strumienia głównego ϕ , który indukuje w uzwojeniu stojana napięcie u_{sA} , a w uzwojeniu wirnika napięcie u_{rA} . Indukcyjności: stojana l_{s0} i wirnika l_{r0} , odzwierciedlają odpowiednie strumienie rozproszenia, natomiast rezystancje uzwojeń przedstawiają elementy r_s i r_r . Przy zmianie poślizgu zmienia się zarówno napięcie u_{rA} indukowane w uzwojeniu wirnika jak i jego częstotliwość. W związku z tym, w jego obwodzie płyną prądy o zmieniającej się częstotliwości.



Rys. 1. Schemat zastępczy maszyny asynchronicznej

Obwód elektryczny silnika indukcyjnego można opisać układem równań (1), gdzie trzy fazy stojana i wirnika przedstawione są w postaci wektorów: u_{sABC} , i_{sABC} oraz ϕ_{ABC} są wektorami napięć, prądów i strumieni stojana; i_{rABC} oraz ϕ_{rABC} są natomiast wektorami prądów i strumieni wirnika. Dla rozpatrywanej maszyny symetrycznej mamy: $R_s = r_s I$ oraz $R_r = r_r I$, gdzie I jest macierzą jednostkową.

$$\begin{aligned} u_{sABC} - u_N &= R_s i_{sABC} + \frac{d\phi_{sABC}}{dt}, \\ 0 &= R_r i_{rABC} + \frac{d\phi_{rABC}}{dt}, \\ \phi_{sABC} &= L_s i_{sABC} + L_m i_{rABC}, \\ \phi_{rABC} &= L_m^T i_{sABC} + L_r i_{rABC}, \\ u_N &= i_N r_N [1 \ 1 \ 1]^T. \end{aligned} \quad (1)$$

Obwód mechaniczny silnika indukcyjnego może być opisany przez równania (2) i (3), gdzie ω_r jest prędkością kątową wirnika, J momentem bezwładności, m_m momentem mechanicznym, a p_b – liczbą par biegunów.

$$J \frac{d\omega_r(t)}{dt} = m_{em} - m_m, \quad (2)$$

$$m_{em} = p_b (i_{sABC})^T \frac{\partial L_m(\theta)}{\partial \theta} i_{rABC}. \quad (3)$$

Model opisany powyższymi równaniami może być przekształcony z układu A-B-C do układu α - β -0 za pomocą macierzy transformacji $T_{\alpha\beta 0}$, przedstawionej poniżej [9]:

$$T_{\alpha\beta 0} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & -\frac{\sqrt{3}}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{2} & \frac{1}{2} & \frac{1}{2} \end{bmatrix}.$$

Model określony równaniami (1) przyjmuje teraz strukturę wyznaczoną układem równań (4) i (5a), (5b):

$$\begin{aligned} u_{s\alpha\beta} &= R_s i_{s\alpha\beta} + \frac{d\phi_{s\alpha\beta}}{dt}, \\ u_{s0} &= r_s i_{s0} + \frac{d\phi_{s0}}{dt}, \\ 0 &= R_r i_{r\alpha\beta} + \frac{d\phi_{r\alpha\beta}}{dt} - p_b \omega_r K_1 \phi_{r\alpha\beta}, \\ 0 &= r_r i_{r0} + \frac{d\phi_{r0}}{dt}. \end{aligned} \quad (4)$$

gdzie strumienie są określone wzorami:

$$\phi_{s\alpha\beta} = L_s i_{s\alpha\beta} + L_m i_{r\alpha\beta}, \quad (5a)$$

$$\phi_{s0} = l_{s0} i_{s0},$$

$$\phi_{r\alpha\beta} = L_m i_{s\alpha\beta} + L_r i_{r\alpha\beta}, \quad (5b)$$

$$\phi_{r0} = l_{r0} i_{r0}.$$

gdzie:

$$\mathbf{u}_{s\alpha\beta} = [u_{s\alpha} \ u_{s\beta}]^T, \quad \mathbf{i}_{s\alpha\beta} = [i_{s\alpha} \ i_{s\beta}]^T, \quad \mathbf{i}_{r\alpha\beta} = [i_{r\alpha} \ i_{r\beta}]^T$$

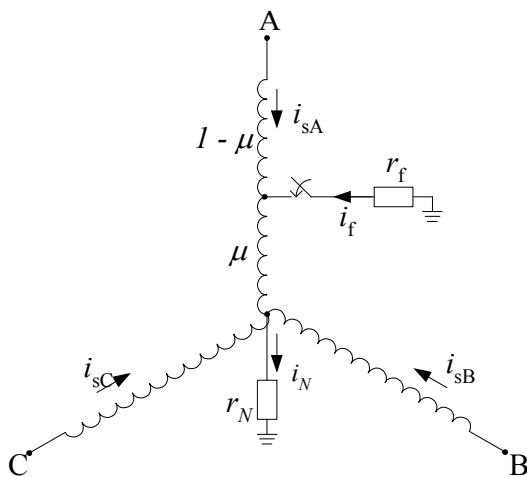
są odpowiednio wektorami napięć, prądów stojana i prądów wirnika w układzie α - β . Natomiast macierz $\mathbf{K}_1 = \begin{bmatrix} 0 & -1 \\ 1 & 0 \end{bmatrix}$.

Moment elektromagnetyczny silnika jest opisany równaniem (6):

$$m_{em} = \frac{3}{2} p_b (\phi_{s\beta} i_{s\alpha} - \phi_{s\alpha} i_{s\beta}). \quad (6)$$

3. Model matematyczny silnika indukcyjnego do symulacji zwarcí doziemnych

Wystąpienie zwarcia doziemnego w uzwojeniu fazy A dzieli to uzwojenie na dwie części w proporcji: μ oraz $(1-\mu)$, jak to zostało przedstawione na rys. 2. Zakłada się, że fazy A, B i C mają jednakową liczbę zwojów.



Rys. 2. Trójfazowe uzwojenie stojana ze zwarcie doziemnym w fazie A

Na podstawie (1), Model silnika, w którym występuje zwarcie jak na rys. 2, może być opisany następującym układem równań:

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{sABC} - \mathbf{u}_N &= \mathbf{R}_s (\mathbf{i}_{sABC} + \boldsymbol{\mu}_{ABC} i_f) + \frac{d\boldsymbol{\phi}_{sABC}}{dt}, \\ 0 &= \mathbf{R}_r \mathbf{i}_{rABC} + \frac{d\boldsymbol{\phi}_{rABC}}{dt}, \\ \boldsymbol{\phi}_{sABC} &= \mathbf{L}_s (\mathbf{i}_{sABC} + \boldsymbol{\mu}_{ABC} i_f) + \mathbf{L}_m(\theta) \mathbf{i}_{rABC}, \\ \boldsymbol{\phi}_{rABC} &= \mathbf{L}_m^T(\theta) (\mathbf{i}_{sABC} + \boldsymbol{\mu}_{ABC} i_f) + \mathbf{L}_r \mathbf{i}_{rABC}, \end{aligned} \quad (7)$$

gdzie: $\boldsymbol{\mu}_{ABC} = [\mu, 0, 0]^T$ - wektor reprezentujący udział uzwojenia objętego zwarcie, i_f - prąd zwarciowy.

Podobnie jak w przypadku modelu podstawowego, równania silnika (7) należy przetransformować (za pomocą macierzy $\mathbf{T}_{\alpha\beta 0}$) z układu A-B-C do układu α - β -0.

$$\begin{aligned} \mathbf{u}_{s\alpha\beta} &= \mathbf{R}_s (\mathbf{i}_{s\alpha\beta} + \mathbf{T}_{\alpha\beta} \boldsymbol{\mu}_f i_f) + \frac{d\boldsymbol{\phi}_{s\alpha\beta}}{dt}, \\ u_{s0} &= r_s (i_{s0} + \mathbf{T}_0 \boldsymbol{\mu}_f i_f) + \frac{d\phi_{s0}}{dt}, \\ 0 &= \mathbf{R}_r \mathbf{i}_{r\alpha\beta} + \frac{d\boldsymbol{\phi}_{r\alpha\beta}}{dt} - p_b \omega_r \mathbf{K}_1 \boldsymbol{\phi}_{r\alpha\beta}, \\ 0 &= r_s i_{r0} + \frac{d\phi_{r0}}{dt}. \end{aligned} \quad (8)$$

gdzie strumienie są określone wzorami:

$$\begin{aligned} \boldsymbol{\phi}_{s\alpha\beta} &= \mathbf{L}_s (\mathbf{i}_{s\alpha\beta} + \mathbf{T}_{\alpha\beta} \boldsymbol{\mu}_f i_f) + \mathbf{L}_m \mathbf{i}_{r\alpha\beta}, \\ \phi_{s0} &= l_{ls} (i_{s0} + \mathbf{T}_0 \boldsymbol{\mu}_f i_f), \\ \boldsymbol{\phi}_{r\alpha\beta} &= \mathbf{L}_r \mathbf{i}_{r\alpha\beta} + \mathbf{L}_m (\mathbf{i}_{s\alpha\beta} + \mathbf{T}_{\alpha\beta} \boldsymbol{\mu}_f i_f), \\ \phi_{r0} &= l_{lr} i_{r0}, \\ \boldsymbol{\mu}_f &= [\mu, 0]^T. \end{aligned} \quad (9)$$

Moment elektromagnetyczny silnika podczas zwarcia jest opisany równaniem (10):

$$m_{em} = \frac{3}{2} p_b (\phi_{s\beta} i_{s\alpha} - \phi_{s\alpha} i_{s\beta}) + p_b \mu \phi_{s\beta} i_f. \quad (10)$$

Parametry zwarcia mogą być łatwo modyfikowane przez zmianę dwóch wielkości: miejsca wystąpienia μ oraz rezystancję r_f (rys. 2).

4. Wyniki symulacji

Selektywny algorytm ochrony przed zwarciami w maszynie przede wszystkim powinien odróżniać prądy towarzyszące zwarciom wewnętrznym od prądów rozruchowych, które kilkakrotnie przekraczają prąd znamionowy. Ważne jest też, by wykrywać zwarcie wewnętrzne w trakcie rozruchu. W celu rozróżnienia takich stanów, stosuje się różne mierzalne wielkości elektryczne, za pomocą których można definiować kryterium działania zabezpieczenia. Takimi wielkościami mogą być, na przykład, składowe symetryczne prądu silnika.

Składowe symetryczne służą do analizy układów trójfazowych za pomocą wektorów o zgodnej, przeciwnej i zerowej kolejności faz. Metoda składowych symetrycznych ułatwia analizę wirujących maszyn elektrycznych prądu sinusoidalnego w stanach ustalonych. Przekształcenie prądów fazowych i_{sA} , i_{sB} , i_{sC} w ich

składowe symetryczne odbywa się wg znanego równania macierzowego (11).

$$\begin{bmatrix} I_1 \\ I_2 \\ I_0 \end{bmatrix} = \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 1 & a & a^2 \\ 1 & a^2 & a \\ 1 & 1 & 1 \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{sA} \\ i_{sB} \\ i_{sC} \end{bmatrix}. \quad (11)$$

gdzie: $a = e^{j2\pi/3}$.

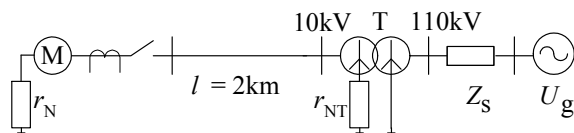
Aby zaprojektować algorytmy działania zabezpieczeń, które skutecznie będą eliminowały zwarcia towarzyszące pracy silników, niezbędne staje się wykonanie serii symulacji odwzorowujących te zakłócenia.

Do badań symulacyjnych wykorzystano silnik klatkowy o mocy 2 MW, zasilany napięciem 10 kV. Parametry elektryczne modelu silnika wyznaczono za pomocą programu WindSyn, wykorzystując do tego celu dane znamionowe [8]:

$$\begin{aligned} l_m &= 0,494435 \text{ H}, & r_s &= 0,360737 \Omega, \\ l_{ls} &= 0,011482 \text{ H}, & r_r &= 1,16853 \Omega, \\ l_{lr} &= 0,011482 \text{ H}. \end{aligned}$$

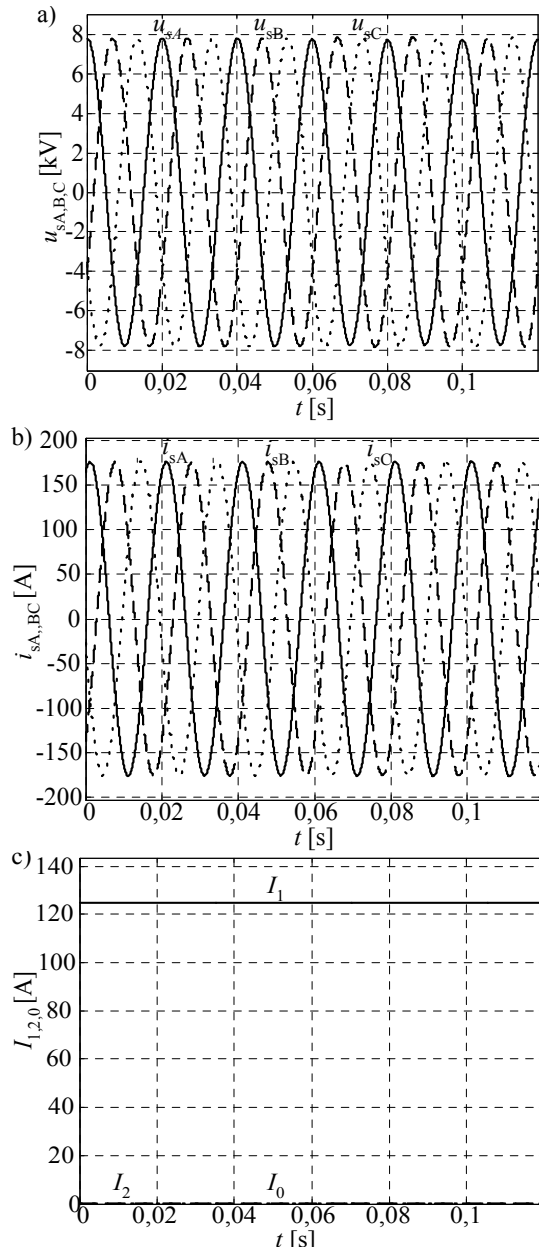
Schemat modelu symulacyjnego przedstawiono na rys. 3. Rezystor $r_{NT} = 50\Omega$, został dobrany tak, aby składowa zerowa prądu podczas zwarcia doziemnego w linii, nie przekraczała 150A. W wyniku takiego podejścia, na rezystorze odkłada się spadek napięcia, który w konsekwencji powoduje wzrost napięcia na zaciskach silnika podczas zwarcia.

W pierwszej części badań przeprowadzono symulację pracy silnika ze zwarcie doziemnym, przy następujących parametrach zwarcia: $\mu = 1\%$, rezystancja zwarcia $r_f = 0,1 \Omega$. Ponadto, przyjęto wartość rezystancji uziemienia punktu neutralnego $r_N = 10\Omega$. Zwarcie zachodzi w czasie $t_{zw} = 0,06 \text{ s}$.



Rys.3. Schemat modelu symulacyjnego

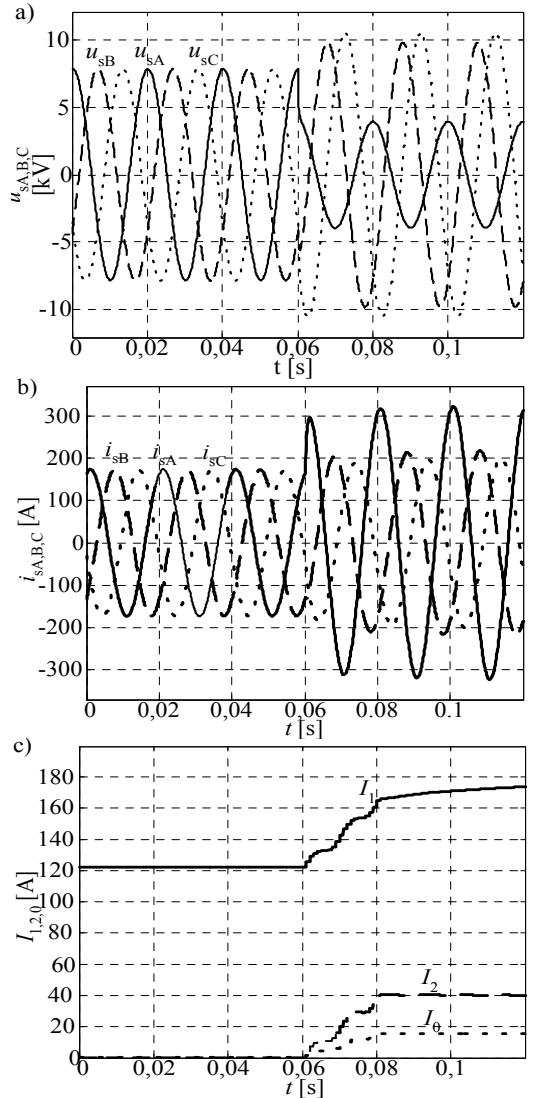
Przypadek ten, pokazuje jak trudno jest zidentyfikować tego rodzaju zakłócenie, w sytuacji gdy zwarcie występuje w pobliżu punktu neutralnego. Wyniki symulacji zostały zaprezentowane na rys. 4. Nietrudno zauważyć, że napięcie na zaciskach (rys. 4a) i prąd stojana (rys. 4b) nie niosą żadnej informacji o zwarcie. Obrazują to również składowe symetryczne (rys. 4c) – składowa przeciwna I_2 i zerowa I_0 są bliskie 0.



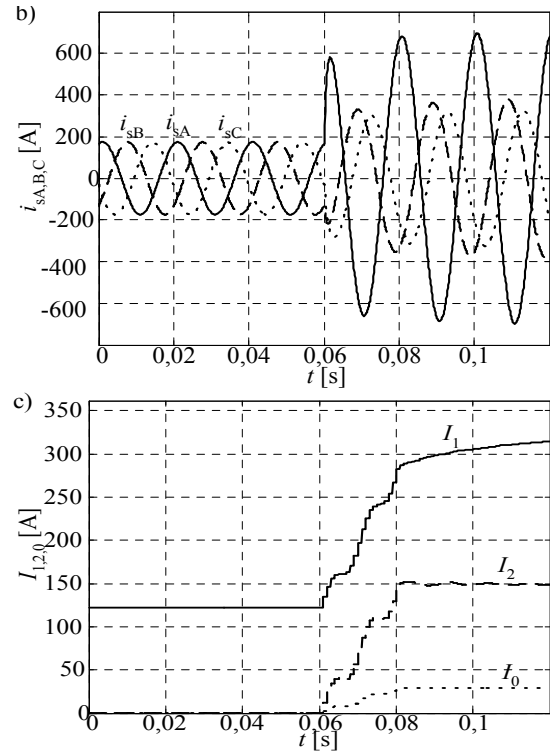
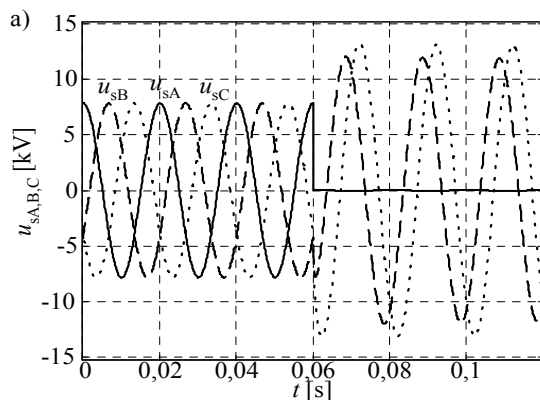
Rys. 4. Wykresy: (a) napięcie na zaciskach, (b) prąd stojana, (c) składowe symetryczne prądu, $\mu = 1\%$, $r_f = 0,1 \Omega$

Wraz z oddalaniem się miejsca zwarcia od punktu neutralnego można zaobserwować zarówno spadek napięcia, jak i wzrost prądu w fazie zwartej A. Zostało to zaprezentowane na rys. 5 i 6, przedstawiających zwarcie doziemne w sytuacji kiedy $r_f = 0,1 \Omega$, $r_N = 10\Omega$, a wartość parametru μ , który wyznacza miejsce zwarcia wynosi odpowiednio 50% i 99%. Takie przebiegi napięć i prądów przenoszą się bezpośrednio na wartości składowych symetrycznych (rys 5c i 6c). Widać, że w rozważanych przypadkach, składowe symetryczne prądów: przeciwna i zerowa, przyjmują już

znaczne wartości. Wraz z oddalaniem się miejsca zwarcia od punktu neutralnego uzwojenia, zwiększają się wartości prądów składowej przeciwnej i zerowej.

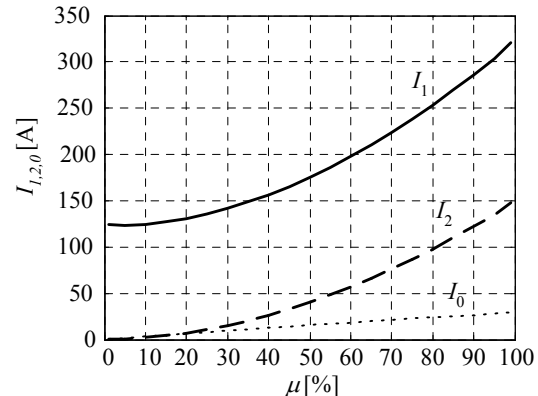


Rys. 5. Wykresy: (a) napięcie na zaciskach, (b) prąd stojana, (c) składowe symetryczne prądu, $\mu = 50\%$, $r_f = 0,1\Omega$



Rys. 6. Wykresy: (a) napięcie na zaciskach, (b) prąd stojana, (c) składowe symetryczne prądu, $\mu = 99\%$, $r_f = 0,1\Omega$

Analizując zamieszczone przebiegi widać, że składowa przeciwna i zerowa prądu maszyny zależą od miejsca wystąpienia zwarcia. Ilustrują to wykresy prezentowane na rys. 7. Na podstawie schematu analizowanego obwodu (rys. 3) widać, że wartość prądu zwarcia doziemnego w obwodzie stojana silnika zależy także od sposobu uziemienia punktu neutralnego sieci zasilającej (rezystancja r_{NT}) oraz od wartości zastępczej rezystancji uziemienia punktu neutralnego maszyny (rezystancja r_N). Zagadnienia te są przedmiotem dalszych badań autorów.



Rys. 7. Zależność składowej zgodnej, przeciwnej i zerowej od miejsca położenia zwarcia w uzwojeniu fazy A; $r_f = 0,1\Omega$

5. Podsumowanie

W artykule przedstawiono problematykę związaną z modelowaniem silników indukcyjnych, na przykładzie silnika klatkowego, powszechnie stosowanego w różnorodnych układach napędowych. Model został wykonany za pomocą pakietu ATP/EMTP. Zamieszczone wyniki symulacji prezentują jego właściwości. Można zauważyć, że jest to wygodne do stosowania narzędzie, pozwalające w prosty sposób uzyskać wyniki symulacji według zadanych warunków. Kolejne etapy prac poświęcone będą opracowaniu algorytmów, skutecznie wykrywających zwarcia wewnętrzne występujące w silnikach indukcyjnych. Ważna jest także ocena wpływu charakteru uzziemienia punktu neutralnego sieci zasilającej na selektywność detekcji wystąpienia zwarcia.

6. Literatura

- [1]. Arkan M., Kostic-Perovic D., Unsworth P.J., *Modelling and simulation of induction motors with inter-turn faults for diagnostics*, Electric Power Systems Research 75, 2005.
- [2]. Arkan, M., Perovic, D. K., and Unsworth, P.: *Online stator fault diagnosis in induction motors*, IEDEE proceedings on electrical power applications, Vol. 148, No. 6, 2001.
- [3]. Briz, Fernando, Degner, Michael W., Zamaron, Antonio, and Guerrero, Juan M.: *On-line stator winding fault diagnosis in inverter-fed ac machines using high frequency signal injection*, 37th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial applications of Electrical Energy, 2002.
- [4]. Cruz, Sergio M. A. and Cardoso, A. J. Marques: *Stator winding fault diagnosis in three-phase synchronous and asynchronous motors, by extended park's vector approach*, IEEE Transaction on Industrial Applications, Vol. 37, No. 5, 2001.
- [5]. Cash, M. A., Habetler, T. G., and Kliman, G. B.: *Isulation failure prediction in induction machines using line-neutral voltages*, IEEE Industry Applications Conference, Thirty-Second IAS Annual Meeting, IAS '97, 1997.
- [6]. Garcia, Pablo, Briz, Fernando, Denger, Michael W. and Diez, Alberto B.: *Diagnostics of induction machines using the zero sequence voltage*, Proceedings of the IEEE 39th IAS Annual Meeting, Seattle, Washington, 2004.
- [7]. Jesper S. Thomsen, Carsten S. Kallesoe, *Stator fault modelling of induction motors* International Symposium on Power Electronics, Elektrical drives, Automation and motion, Speedam 2006.
- [8]. Rosołowski E, Wieczorek M, *Modelowanie silnika indukcyjnego do symulacji zwarć we-*

wewnętrznych, Materiały X Konferencji Naukowo – Technicznej Petro Eltech 2009, Soczewka, 20-22 maja 2009.

[9]. Sengupta S, Chattopadhyay S, and Mitra M, *Power quality assessment in V-V, Clarke and Park domain*, International Universities Power Engineering Conference, Brighton 2007

Autorzy

Maciej Wieczorek
 maciej.wieczorek@pwr.wroc.pl
 Eugeniusz Rosołowski
 eugeniusz.rosolowski@pwr.wroc.pl
 Instytut Energoelektryki
 Politechnika Wroclawska
 50-370 Wrocław