

Analiza pracy elektrowni wiatrowej z dwustronnie zasilanym generatorem indukcyjnym

1. Wprowadzenie

Ze względu na dużą zmienność mocy i prędkości obrotowej turbin wiatrowych, w elektrowniach wiatrowych najczęściej stosuje się generatory indukcyjne. Dominują tu zwłaszcza dwustronnie zasilane generatory indukcyjne (DZGI) (ang. *Doubly Fed Induction Generator* – DFIG).

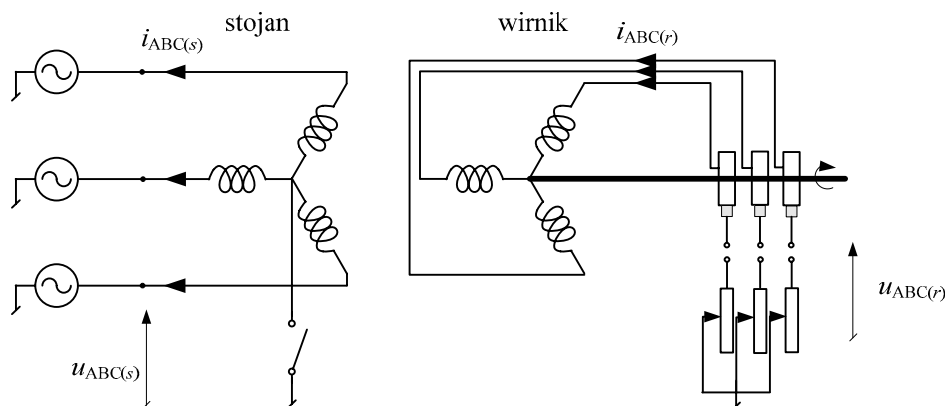
Modelowanie takich instalacji ma na celu poznanie zjawisk, które zachodzą podczas stanów przejściowych – zarówno w części mechanicznej, jak i elektrycznej – ale także weryfikację nowych metod sterowania. Ważnym zagadnieniem jest także analiza oddziaływania tych niespokojnych źródeł energii elektrycznej na sieć elektroenergetyczną (zwłaszcza sieć rozdzielczą, do której są one zazwyczaj przyłączone), a także ich wpływu na automatykę zabezpieczeniową.

Termin *maszyna indukcyjna* obejmuje bardzo szeroką rodzinę wirujących maszyn elektrycznych, w których siła elektromagnetyczna (*sem* – w generatorach) lub siła elektrodynamiczna (*sed* – w silnikach) powstaje w wyniku oddziaływania dwóch przemieszczających się względem siebie pól magnetycznych stojana i wirnika. Źródłem pola magnetycznego wirnika jest prąd, który jest wywoływany w rezultacie przemieszczania się jego uzwojeń (lub zwartych klatek) względem pola magnetycznego stojana. W przeciwieństwie do maszyn synchronicznych, pola magnetyczne stojana i wirnika mają w tym wypadku różną częstotliwość, co jest niezbędnym warunkiem funkcjonowania tych maszyn – dlatego często nazywa się je *maszynami asynchronicznymi*.

W przypadku generatorów DZGI stosuje się maszyny indukcyjne pierścieniowe (ang. *wound*), których wirniki mają standardowe uzwojenia (połączone w gwiazdę lub trójkąt), wyprowadzone na zewnątrz poprzez pierścienie ślizgowe (ang. *slip rings*) (rys. 1). W przypadku silnika pierścieniowego takie rozwiązanie pozwala przyłączyć do uzwojenia wirnika dodatkową oporność, co znakomicie ułatwia jego rozruch: przy rozruchu ta oporność jest duża, by w miarę nabierania przez wirnik prędkości obrotowej była zmniejszana do zera.

Generatory indukcyjne z dwustronnym zasilaniem (ang. *doubly-fed*) mają budowę podobną do maszyn pierścieniowych, w tym jednak przypadku pierścienie służą do zasilania uzwojeń wirnika z zewnętrznego źródła o określonej częstotliwości, co może służyć do regulacji prędkości obrotowej (w silniku) lub częstotliwości generowanego napięcia (w generatorach). W pewnych warunkach właściwości takich maszyn są podobne do właściwości maszyn synchronicznych: oddziaływanie obu pól, stojana i

wirnika, o częstotliwościach odpowiednio f_{rs} oraz f_r , ustalają ‘synchroniczną’ prędkość obrotową wirnika, określoną przez poślizg zgodnie z (1).



Rys. 1. Model maszyny indukcyjnej pierścieniowej

Kierunek wirowania obu pól: stojana i wirnika jest taki sam, zatem nieodzownym warunkiem indukowania się napięcia w uzwojeniu wirnika jest występowanie różnicy prędkości wirowania pola elektromagnetycznego stojana i prędkości obrotowej wirnika. Wielkość ta jest określana przez poślizg:

$$s = \frac{n_1 - n_e}{n_1} = \frac{\omega_1 - \omega_e}{\omega_1} \quad (1)$$

gdzie: n_1 – prędkość obrotowa synchroniczna (odpowiada jej prędkość kątowna ω_1), n_e – prędkość obrotowa pola wirnika (odpowiada mu prędkość kątowna pola elektrycznego wirnika ω_e).

Występowanie poślizgu (o wartości różnej od zera) jest zatem nieodzownym warunkiem pracy maszyny asynchronicznej (indukcyjnej), co odróżnia ją od maszyny synchronicznej.

W przypadku maszyny o liczbie par biegunów $p > 1$ pulsacja pola wirnika wynika z pomnożenia prędkości kątownej wirnika ω_r przez liczbę par biegunów:

$$\omega_e = p \omega_r \quad (2)$$

co pozwala określić prędkość kątowną wirowania wirnika:

$$\omega_r = \frac{\omega_1(1-s)}{p} \quad (3)$$

W symetrycznym uzwojeniu wirnika wytwarzany jest prąd o częstotliwości:

$$f_r = \frac{sf_1}{p} = \frac{s}{1-s} \frac{n_r}{60} \text{ (Hz)} \quad (4)$$

gdzie $n_r = n$ – prędkość obrotowa wirnika maszyny (obr/min).

Wartość poślizgu zależy od stanu pracy maszyny. W przypadku silnika na początku rozruchu $s = 1$, po czym wielkość poślizgu maleje do określonej wartości $s > 0$, zależnej od obciążenia. W przypadku generatora indukcyjnego poślizg może być dodatni ($s > 0$) – praca podsynchroniczna lub ujemny ($s < 0$) – praca nadsynchroniczna, co zależy od równowagi mocy czynnej turbiny napędzającej oraz oddawanej do sieci.

2. Model matematyczny

Szczegółowy opis modelu matematycznego maszyny indukcyjnej pierścieniowej jest podany w książce [11]. Poniżej podane są tylko zależności niezbędne do śledzenia algorytmu sterowania maszyną, który jest zapisany w postaci programu w języku MODELS.

Matematyczny model części elektrycznej

Maszyna jest sterowana za pomocą napięcia wirnika w składowych fazowych: $\mathbf{u}_{ABC(r)}$ (rys. 1). Częstotliwość tego napięcia jest równa różnicy pomiędzy częstotliwością sieciową i częstotliwością pola elektromagnetycznego wirnika. W rozpatrywanym algorytmie stosowane są następujące układy współrzędnych:

- układ współrzędnych trójfazowych związany ze stojanem (układ stacjonarny);
- układ współrzędnych $0\alpha\beta$ związany ze stojanem (stacjonarny);
- układ współrzędnych $0dq$ związany z wirnikiem (obraca się z prędkością kątową elektromagnetycznego pola wirnika:
 $\omega_{rp} = p \omega_r$, p – liczba par biegunów maszyny;
- układ współrzędnych trójfazowych związanych z wirnikiem (obraca się z prędkością kątową ω_{rp} ;
- układ współrzędnych ortogonalnych xy związany z głównym strumieniem stojana, który przemieszcza się z prędkością kątową ω_{sm} .

Wykres wektorowy wszystkich wielkości związanych z modelem układu sterowania jest pokazany na rys. 2.

W celu realizacji algorytmu niezbędne są pomiary następujących wielkości:

- trójfazowe prądy stojana: $\mathbf{i}_{ABC(s)}$,
- trójfazowe napięcia stojana: $\mathbf{u}_{ABC(s)}$,
- trójfazowe prądy wirnika: $\mathbf{i}_{ABC(r)}$,
- prędkość kąтова wirnika ω_r .

W powyższym opisie występują wielkości trójfazowe, do oznaczenia których stosuje się następującą konwencję:

$\mathbf{u}_{ABC(s)} = [u_{A(s)}(t) \ u_{B(s)}(t) \ u_{C(s)}(t)]^T$ - w odniesieniu do napięć stojana i podobnie do innych wielkości.

W układach współrzędnych prostokątnych pomija się składową zerową, gdyż w rozważanych zastosowaniach wielkości te nie odgrywają istotnej roli (praktycznie wpływają na moc lub moment układu). W tych układach współrzędnych stosuje się reprezentację poszczególnych wielkości w postaci wektorów zespolonych, na przykład:

$\psi_{ds} + j\psi_{qs} = \underline{\Psi}_s$ - wektor strumienia stojana odniesiony do wirnika;

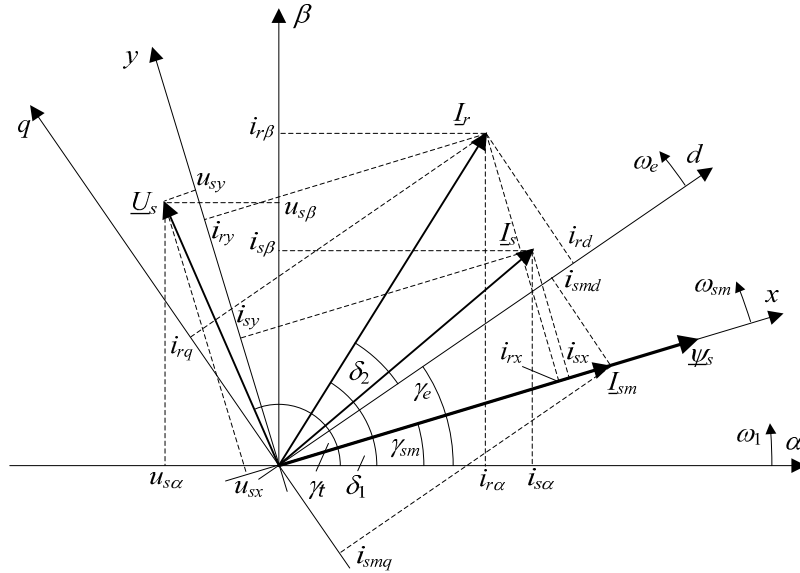
$\psi_{dr} + j\psi_{qr} = \underline{\Psi}_r$ - wektor strumienia wirnika;

$\underline{U}_s = u_{as} + ju_{bs}$ - wektor napięcia stojana itd.

Model matematyczny symetrycznej maszyny indukcyjnej można wyprowadzić na podstawie jej równań odniesionych do układu trójfazowego:

$$\begin{bmatrix} \mathbf{u}_{ABC(s)} \\ -\mathbf{u}_{ABCr(r)} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} \mathbf{R}_s & \\ & \mathbf{R}_{rr} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} \mathbf{i}_{ABC(s)} \\ \mathbf{i}_{ABCr(r)} \end{bmatrix} - \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \underline{\Psi}_{ABC(s)} \\ \underline{\Psi}_{ABCr(r)} \end{bmatrix} \quad (5)$$

gdzie: indeks (s) wskazuje na wielkości stojana, (r) - wirnika, a dodatkowy indeks 'r' wskazuje na to, że stosowne wielkości są odniesione do napięcia uzwojenia wirnika.



Rys. 2. Wykres wektorowy maszyny indukcyjnej w odniesieniu do wektora strumienia

Znaki poszczególnych wyrażeń w (5) wynikają z przyjętych kierunków napięć i prądów, jak na rys. 1.

Wektory poszczególnych wielkości na rys. 2 są związane z wielkościami trójfazowymi za pomocą znanych przekształceń macierzowych pomiędzy wyszczególnionymi powyżej układami współrzędnych. W szczególności mamy:

- transformację pomiędzy układem trójfazowym stojana i układem $0\alpha\beta$ stojana:

$$\begin{aligned}\mathbf{i}_{0\alpha\beta(s)} &= \mathbf{C}^{-1} \cdot \mathbf{i}_{ABC(s)} \\ \mathbf{i}_{ABC(s)} &= \mathbf{C} \cdot \mathbf{i}_{0\alpha\beta(s)}\end{aligned}\quad (6)$$

gdzie:

$$\mathbf{C} = \sqrt{\frac{2}{3}} \begin{bmatrix} \frac{1}{\sqrt{2}} & 1 & 0 \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ \frac{1}{\sqrt{2}} & -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix} \quad (7)$$

Przy pominięciu składowej zerowej (patrz uwaga powyżej), powyższe przekształcenia przyjmują następującą postać:

$$\begin{aligned}\mathbf{i}_{\alpha\beta(s)} &= \mathbf{C}_{32} \cdot \mathbf{i}_{ABC(s)} \\ \mathbf{i}_{ABC(s)} &= \mathbf{C}_{23} \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta(s)}\end{aligned}\quad (8)$$

gdzie:

$$\mathbf{C}_{32} = \frac{2}{3} \begin{bmatrix} 1 & -\frac{1}{2} & -\frac{1}{2} \\ 0 & \frac{\sqrt{3}}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}, \quad \mathbf{C}_{23} = \begin{bmatrix} 1 & 0 \\ -\frac{1}{2} & \frac{\sqrt{3}}{2} \\ -\frac{1}{2} & -\frac{\sqrt{3}}{2} \end{bmatrix}$$

- transformacja pomiędzy układem $\alpha\beta$ i dq :

$$\begin{aligned}\mathbf{i}_{dq(r)} &= \mathbf{E}_1^{-1}(\gamma_e) \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta(s)} \\ \mathbf{i}_{\alpha\beta(s)} &= \mathbf{E}_1(\gamma_e) \cdot \mathbf{i}_{dq(r)}\end{aligned}\quad (9)$$

$$\text{gdzie: } \mathbf{E}_1(\gamma_e) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_e & \sin \gamma_e \\ -\sin \gamma_e & \cos \gamma_e \end{bmatrix}, \quad \mathbf{E}_1^{-1}(\gamma_e) = \begin{bmatrix} \cos \gamma_e & -\sin \gamma_e \\ \sin \gamma_e & \cos \gamma_e \end{bmatrix}.$$

Kąt γ_e jest kątem pomiędzy płaszczyzną współrzędnych stojana i wirnika, który jest bezpośrednio związany z położeniem wirnika (rys. 2):

$$\frac{d\gamma_e}{dt} = p\omega_r = \omega_e \quad (10)$$

W rozważanym przypadku mierzona jest prędkość kątowna wirnika ω_r , więc kąt γ_e jest wyznaczany następująco:

$$\gamma_e = \int_0^t p\omega_r d\tau + \gamma_{e0} \quad (11)$$

Matematyczny model części mechanicznej

Podstawowe równanie równowagi mechanicznej obracającego się wirnika jest następujące:

$$J \frac{d\omega_r}{dt} + D\omega_r = T_e - T_m \quad (12)$$

gdzie: J – moment bezwładności obracającego się układu, ($\text{kg}\cdot\text{m}^2$); D – współczynnik tłumienia, ($\text{N}\cdot\text{m}/(\text{rad/s})$); T_m – moment mechaniczny, ($\text{N}\cdot\text{m}$); ω_r – prędkość kątowna wirnika, (rad/s); T_e – moment elektromagnetyczny, ($\text{N}\cdot\text{m}$) (w szczelinie powietrznej).

Dla modelu w składowych $0dq$ moment elektromagnetyczny można obliczyć na podstawie wielkości stojana lub wirnika:

$$T_e = p(\psi_{ds}i_{qs} - \psi_{qs}i_{ds}) = p(\psi_{dr}i_{qr} - \psi_{qr}i_{dr}) \quad (13)$$

Moc przekazywana ze stojana do wirnika silnika (lub w kierunku przeciwnym – w generatorze) jest związana z momentem elektromagnetycznym następującą zależnością:

$$P_e = T_e\omega_r = T_e \frac{(1-s)\omega_1}{p} \quad (14)$$

Jeśli uwzględnić straty mocy ΔP w maszynie (elektryczne i mechaniczne), to moc P_1 dostarczona do niej może być określona następująco:

$$P_1 = P_e + \Delta P = \frac{P_e}{\eta} \quad (15)$$

gdzie η jest sprawnością maszyny.

Podczas pracy prądnicowej zachodzi relacja $T_m > T_e$, natomiast jeśli maszyna jest silnikiem napędzającym układ mechaniczny, to występuje zależność odwrotna: $T_m < T_e$.

Gdy silnik jest połączony z napędzaną maszyną poprzez sprzęgło elastyczne lub jeśli wał łączący obie jednostki wykazuje pewną elastyczność, to moment T_w przekazywany przez silnik do napędzanej maszyny można określić następująco:

$$T_w = T_w(t) = K_w(\gamma_r(t) - \gamma_m(t)) = K_w \int_0^t (\omega_r(\tau) - \omega_m(\tau)) d\tau + T_{w0} \quad (16)$$

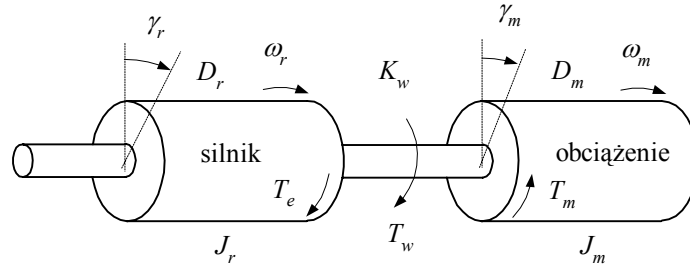
gdzie: γ_r, γ_m – kąty położenia skupionych mas silnika (wirnika) i maszyny, odpowiednio; K_w – współczynnik sprężystości wału łączącego silnik z maszyną; $T_{w0} = T_w(0)$.

Zwarty układ opisany zależnością (12) zostaje wówczas podzielony na dwie części połączone wałem (rys. 3). Ich dynamika jest opisana następującymi zależnościami:

$$J_r \frac{d\omega_r}{dt} + D_r \omega_r = T_e - T_w \quad (17)$$

$$J_m \frac{d\omega_m}{dt} + D_m \omega_m = T_w - T_m \quad (18)$$

przy czym moment T_w jest określony jak w (12).



Rys. 3. Układ mechaniczny z dwoma wirującymi masami

W ten sposób model mechaniczny układu napędowego silnik–maszyna z elastycznym połączeniem jest określony przez równania (17)–(18). Model ten można łatwo rozszerzyć na większą liczbę połączonych wzajemnie elementów. Pozwala to analizować zjawiska dynamiczne (zmienne naprężenia, oscylacje mechaniczne) w wałach napędowych. Przyjęcie sztywnego połączenia ($K_w \rightarrow \infty$) prowadzi do modelu o jednej ekwiwalentnej masie, przy czym: $D = D_r + D_m$, $J = J_r + J_m$, $\omega = \omega_r = \omega_m$.

Ponieważ model części elektrycznej silnika (prądnicy) jest reprezentowany za pomocą odpowiedniego obwodu elektrycznego, więc wygodnie jest także w ten sposób

odwzorować przedstawiony powyżej model części mechanicznej¹. Łatwo zauważyć, że równania (17)–(18) mogą być interpretowane jako zależności określające dynamikę ekwiwalentnych obwodów elektrycznych:

$$C_r \frac{du_r}{dt} + \frac{1}{R_r} u_r = i_e - i_w \quad (19)$$

$$C_m \frac{du_m}{dt} + \frac{1}{R_m} u_m = i_w - i_m \quad (20)$$

Ekwiwalent elektryczny zależności (16) można znaleźć przez zróżniczkowanie tego równania:

$$\frac{1}{K_w} \frac{dT_w}{dt} = \omega_r - \omega_m \leftrightarrow L_w \frac{di_w}{dt} = u_r - u_m \quad (21)$$

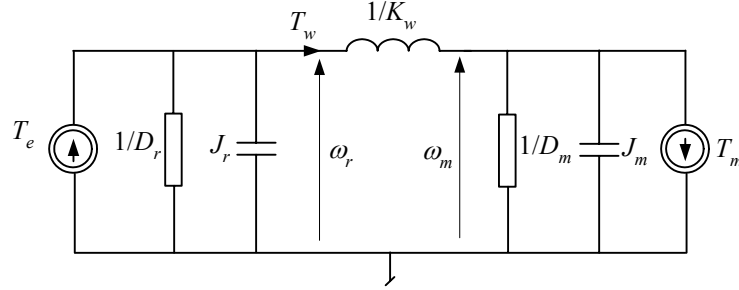
Obowiązuje tu zatem następująca równoważność wielkości mechanicznych i elektrycznych:

moment inercji	J (kg·m ²)	\leftrightarrow	pojemność	C (F);
współczynnik tłumienia	D (N·m/(rad/s))	\leftrightarrow	przewodność	$1/R$ (1/Ω);
moment obrotowy	T (N·m)	\leftrightarrow	prąd	i (A);
prędkość kątowa	ω (rad/s)	\leftrightarrow	napięcie	u (V);
współcz. sprężystości	K (N·m/rad)	\leftrightarrow	1/indukcyjność	$1/L$ (1/H);
przesunięcie kątowe	γ (rad)	\leftrightarrow	strumień magn.	ψ (V·s).

Równaniom (19)–(21) odpowiada schemat obwodu elektrycznego jak na rys. 4. Źródło prądowe T_e odpowiada momentowi elektrycznemu, który jest określany w modelu silnika zgodnie z (13), natomiast T_m przedstawia źródło prądu stałego, którego amplituda odpowiada momentowi obciążenia (1 A = 1 N·m). Różne charakterystyki tego obciążenia można odwzorowywać przez modyfikację bieżącej wartości prądu. Wartości napięcia w rozpatrywanym obwodzie bezpośrednio odpowiadają prędkościom obrotowym ω_r , ω_m , zgodnie z relacją: 1 V \leftrightarrow 1 rad/s.

W modelu ATP-EMTP moment elektromagnetyczny T_e jest określany w modelu maszyny, natomiast moment mechaniczny T_m napędzanego układu należy zadać w postaci źródła prądowego. W rozpatrywanym modelu jest to źródło prądowe sterowane z układu nadzorującego, dzięki czemu można zmieniać jego wartość podczas symulacji (rys. 4). Przyjęto także, sztywne połączenie pomiędzy obu masami ($K_w \rightarrow \infty$), co redukuje schemat z rys. 4 do jednego ekwiwalentnego obwodu. Napięcie mierzone w tym obwodzie jest równe prędkości kątowej wirnika ω_r .

¹ Taki sposób jest stosowany w programie ATP-EMTP: użytkownik powinien przygotować odpowiedni ekwiwalentny obwód.



Rys. 4. Ekwiwalentny obwód elektryczny

3. Algorytm sterowania generatorem indukcyjnym

W modelu analizowanego generatora indukcyjnego w postaci maszyny pierścieniowej z dwustronnym zasilaniem wybrano zasadę sterowania mocą czynną i bierną maszyny w układzie współrzędnych xy związanym ze strumieniem głównym odniesionym do stojana maszyny. Moce stojana są w takim przypadku określone następującymi zależnościami:

$$\begin{aligned} P_s &= \frac{2}{3} (u_{sx} i_{sx} + u_{sy} i_{sy}) \approx \frac{2L_s}{3L_m} U_s i_{ry} \\ Q_s &= \frac{2}{3} (u_{sy} i_{sx} - u_{sx} i_{sy}) \approx \frac{2L_s}{3L_m} U_s (i_{rx} - I_m) \end{aligned} \quad (22)$$

Jak widać, moce: czynna i bierna są niezależnie określone przez składowe prądu we współrzędnych xy .

W mocy całkowitej generatora należy także uwzględnić moc związaną z obwodem wirnika:

$$\begin{aligned} P_r &= -\frac{2}{3} (u_{rx} i_{rx} + u_{ry} i_{ry}) \\ Q_r &= -\frac{2}{3} (u_{ry} i_{rx} - u_{rx} i_{ry}) \end{aligned} \quad (23)$$

która stanowi niewielką część mocy całkowitej. Znak ujemny przed wyrażeniami (23) wynika z przyjętego kierunku prądu wirnika (rys. 1).

Ostatecznie, algorytm określania napięcia wirnika generatora: $\mathbf{u}_{ABC(r)}$ jest następujący.

1. Określenie warunków początkowych
2. Pomiar wielkości wejściowych: $\mathbf{u}_{ABC(s)}$, $\mathbf{i}_{ABC(s)}$, $\mathbf{i}_{ABC(r)}$, ω_r .
3. Obliczenie wielkości w składowych $\alpha\beta$:

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta(s)} = \mathbf{C}_{32} \cdot \mathbf{i}_{ABC(s)},$$

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta(s)} = \mathbf{C}_{32} \cdot \mathbf{u}_{ABC(s)},$$

$$U_s = \sqrt{u_\alpha^2 + u_\beta^2} - \text{amplituda napięcia stojana}$$

$$\mathbf{i}_{\alpha\beta(r)} = \mathbf{C}_{32} \cdot \mathbf{i}_{ABC(r)} = \mathbf{i}_{dq(r)}.$$

4. Wyznaczenie kąta położenia wirnika i poślizgu:

$$\gamma_e = \int_0^t p \omega_r d\tau + \gamma_{e0}$$

$$\omega_{sl} = \omega_s - p \omega_r - \text{poślizg}$$

5. Określenie składowych prądu wirnika (odniesionego do stojana):

$$\mathbf{i}_{dq(r)} = \mathbf{E}_1^{-1}(\gamma_e) \cdot \mathbf{i}_{\alpha\beta(s)}$$

6. Określenie składowych prądu magnesującego (odniesionego do stojana):

$$i_{smd} = i_{rd} - \frac{L_s}{L_m} i_{s\alpha}$$

$$i_{smq} = i_{rq} - \frac{L_s}{L_m} i_{s\beta}$$

$$I_{sm} = \sqrt{i_{smd}^2 + i_{smq}^2}$$

$$\gamma_{sm} = \arctg \frac{i_{smq}}{i_{smd}}$$

7. Określenie składowych prądu wirnika w płaszczyźnie xy (odniesionego do stojana):

$$\mathbf{i}_{xy} = \mathbf{E}_1(\gamma_{sm}) \cdot \mathbf{i}_{dq}$$

8. Regulator PI mocy czynnej i biernej (zewnętrzny):

$$\Delta P = P_{ref} - P$$

$$\Delta Q = Q_{ref} - Q$$

$$i_{rxref} = K_{PI} \Delta Q + K_{I1} \int_0^t \Delta Q d\tau + i_{rxref0}$$

$$i_{ryref} = K_{PI} \Delta P + K_{I1} \int_0^t \Delta P d\tau + i_{ryref0}$$

9. Regulator PI napięcia wirnika (wewnętrzny):

$$\Delta i_{rx} = i_{rxref} - i_{rx}$$

$$\Delta i_{ry} = i_{ryref} - i_{ry}$$

$$u_{prx} = K_{P2}\Delta i_{rx} + K_{I2} \int_0^t \Delta i_{rx} d\tau + u_{prx0}$$

$$u_{pry} = K_{P2}\Delta i_{ry} + K_{I2} \int_0^t \Delta i_{ry} d\tau + u_{pry0}$$

$$u_{drx} = -\omega_{sl} \sigma L_r i_{ry}$$

$$u_{dry} = \omega_{sl} \sigma L_r (\sigma_1 I_{sm} - i_{rx})$$

$$u_{rx} = u_{drx} + u_{prx}$$

$$u_{ry} = u_{dry} + u_{pry}$$

10. Określenie napięcia wirnika w składowych fazowych:

$\gamma = \gamma_{sm} - \gamma_e$ - kąt między płaszczyzną xy i płaszczyzną dq (rys. 2),

$$\mathbf{u}_{\alpha\beta(r)} = \mathbf{E}_1^{-1}(\gamma) \cdot \mathbf{u}_{xy(r)}$$

$$\mathbf{u}_{ABC(r)} = \mathbf{C}_{23} \cdot \mathbf{u}_{\alpha\beta(r)}$$

Użyte w powyższym algorytmie parametry są określane następująco:

L_m – indukcyjność magnesowania,

$L_s = L_{ls} + L_m$ - indukcyjność stojana,

$L_r = L_{lr} + L_m$ - indukcyjność wirnika,

$$\sigma = 1 - \frac{L_m^2}{L_s L_r},$$

$$\sigma_1 = \frac{1 - \sigma}{\sigma},$$

$K_{P1}, K_{I1}, K_{P2}, K_{I2}$ - nastawy regulatorów PI.

Syntezę regulatorów PI można przeprowadzić na podstawie schematu zastępczego regulowanego obwodu. Dla obwodu regulacji napięcia wirnika w obu składowych odpowiednie układy są pokazane na rys. 5. Jak widać, dla obu składowych obiekty regulacji są pierwszego rzędu. Zakładając, że zastępcza stała czasowa układu z regulatorem PI wynosi T_{n2} , s, otrzymamy następujące związki:

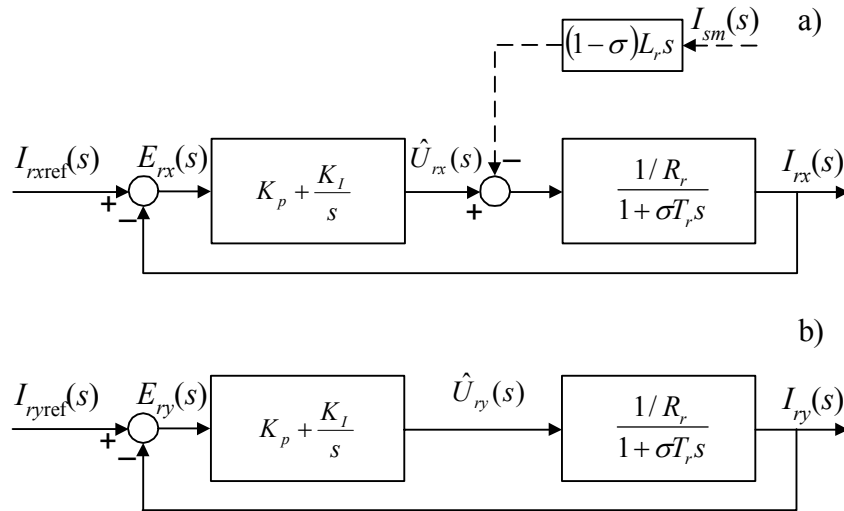
$$K_{P2} = \frac{\sigma L_r}{T_{n2}}, \quad K_{I2} = \frac{R_r}{T_{n2}} \quad (24)$$

gdzie R_r – oporność obwodu wirnika.

Podobna analiza układu sterowania mocami: czynną i bierną prowadzi do następujących zależności:

$$K_{I1} = \frac{2\sqrt{3}L_s}{3\sqrt{2}U_n L_m T_{n1}}, \quad K_{P1} = T_{n2} K_{I1}, \quad (25)$$

gdzie: U_n – znamionowe napięcie zasilania (międzyprzewodowe, wartość skuteczna),
 T_{n1} – zakładana stała czasowa stanu przejściowego układu.



Rys. 5. Schematy blokowe układu regulacji napięcia wirnika generatora

Stałe czasowe T_{n1} , T_{n2} należy wybierać zgodnie z następującą zasadą:

$T_{n1} = 0,02..0,05$ (większa wartość dla generatorów większej mocy),

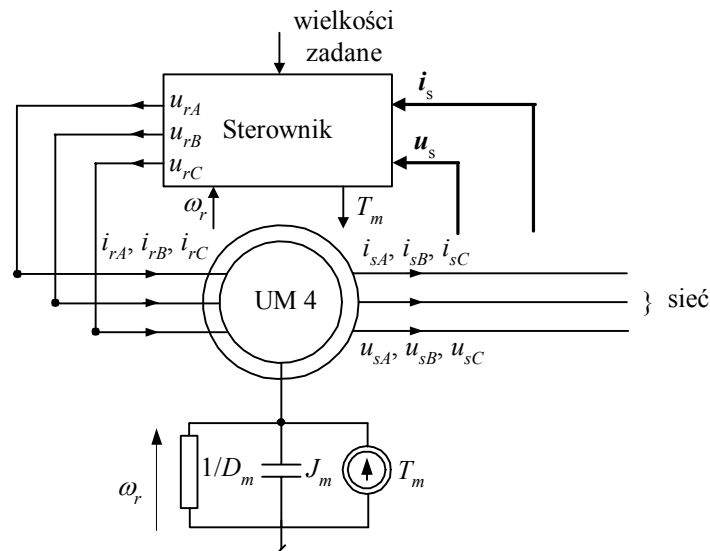
$T_{n2} = 0,005..0,02$ (większa wartość dla generatorów większej mocy).

4. Model ATP–EMTP

Do badania analizowanego generatora został utworzony model w programie ATP–EMTP. Struktura modelu jest pokazana na rys. 6. Dla uproszczenia pominięto w nim przekształtniki elektroniczne w obwodzie zasilania wirnika.

Schemat modelu w edytorze ATPDraw, pokazany na rys. 7. W miejsce układu przekształtnikowego źródło napięciowe w obwodzie wirnika zostało dla uproszczenia przedstawione za pomocą sterowanych źródeł napięciowych. W obwodzie wirnika znajduje się także niezależne źródło prądowe, które jest wykorzystywane do wymuszenia określonych warunków początkowych w modelu generatora (okres załączenia tego źródła prądowego obejmuje czas przed rozpoczęciem symulacji: $(-1,0)-(0)$ s. Zadanyimi wielkościami są tu: - amplituda prądu wirnika (jest to źródło 3-fazowe), - częstotliwość (w stanie początkowym jest ona zależna od poślizgu s (%): $f = 100 s f_1$).

Poślizg jest tutaj zawsze określany jako wielkość dodatnia, natomiast przy poślizgu ujemnym w szereg ze źródłem umieszczany jest układ do transpozycji faz (aby uzyskać odwrotny kierunek wirowania). Początkowa faza tego prądu także powinna być określona dla fazy A.

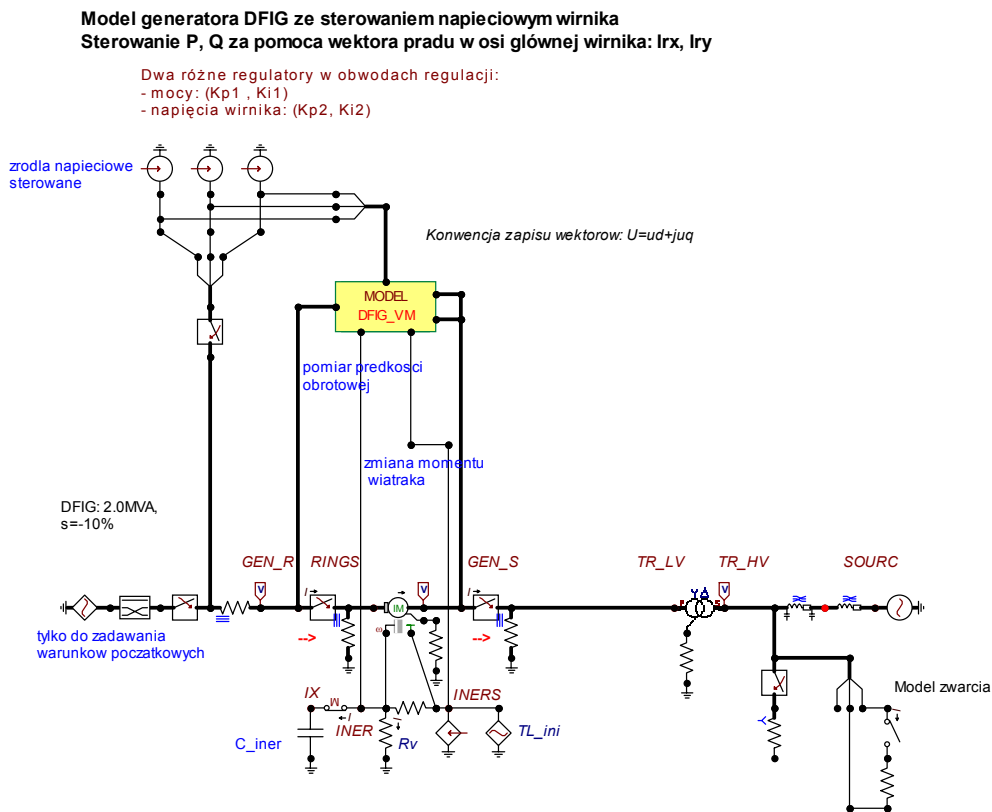


Rys. 6. Struktura modelu EMTP generatora indukcyjnego

Wielkości te mają istotny wpływ na stan początkowy po uruchomieniu symulacji. Dokładne wartości tych wielkości są obliczane w bloku INIT programu umieszczonego w module DFIG_VM. Można je odczytać w pliku *.LIS dostępnym po każdym uruchomieniu symulacji. Dla załączonego przykładu blok tych danych jest następujący:

```
KP_1= .302825E-3 KI_1= .060565034 Tn1= .02
KP_2= .022141361 KI_2= .7878 Tn2= .005
Ir_al= 802.630426 Ir_be= -47.778105 - from measurement
Is_al= -44.454693 Is_be= -34.203017 - from measurement
gam_e= -1.5707956
Vs_be= -1.6295425 Vs_al= 571.374947 gam_sm= -1.5737561
Is_be= -34.203017 Is_al= -44.454693 Isab= 56.0898039
Irx= 802.768447 Iry= -45.401831 Ism= 767.622225 gam_sm= -1.5737561
Vrx= 3.00419931 Vry= -58.781316 om_sl= -31.415927
Ir_al= 802.630518 Ir_be= -47.778219 - estimated
|Ir|= 804.051308 angle= 3.40662819
Ps= -38013.767 Qs= 29427.0137
Pr= -7620.6837 Qr= 70577.0846 Vs= 571.377271
Te= -264.10721
Tv= 345.575192
```

$TRs = .048996942$
 $TRr = 22.1071218$
 $T_Lini = 587.734178$



Rys. 7. Schemat analizowanego modelu ATPDraw

Dane odnoszące się do omawianego źródła prądowego (amplituda i faza) zostały wytluszczone. Informacje te można użyć do właściwego doboru prądu początkowego wirnika generatora, aby zminimalizować początkowe niezrównoważenie modelu, które może powodować gwałtowny stan przejściowy po uruchomieniu modelu ze zmienionymi danymi. Można w tym celu posłużyć się następującą iteracyjną procedurą:

1. Określić parametry modelu i stosownie do nich wprowadzić odpowiednie wartości poszczególnych elementów modelu. Przyjąć początkowe wartości amplitudy (parametr *Amplitude*) i fazy (parametr *ph*) trójfazowego źródła prądowego w obwodzie wirnika generatora: AC3PH (blok zmiany kierunku faz w tym obwodzie powinien wystąpić tylko w przypadku ujemnego poślizgu początkowego generatora). Częstotliwość tego źródła (parametr *f*) należy

określić na podstawie znamionowej częstotliwości (f_i) sieci oraz poślizgu (s), przy czym zawsze należy wziąć wartość dodatnią: $f = |100s/f_i|$. Przyjąć czas symulacji dostateczny do obserwacji początkowego stanu po uruchomieniu modelu, np. 1.0s.

2. Uruchomić symulację i po zakończeniu obliczeń odczytać z pliku: *nazwa.lis* wartości parametrów: **|Ir|** oraz **angle** (jak w przytoczonym powyżej fragmencie tego zbioru). Wpisać te wartości jako parametry źródła prądowego AC3PH w miejsce: *Amplitude* oraz *ph*, odpowiednio.
3. Powtarzać pkt. 2 do momentu, aż zaniknie początkowy stan przejściowy (do obserwacji można wybrać przebiegi prądu wirnika).

Na przykład, dla załączonego modelu (plik *C_DFIG_1.ACP*) w kolejnych trzech iteracjach uzyskuje się następujące wartości amplitudy i fazy prądu wirnika:

1.0	0	- przyjęte wartości początkowe
Ir = 776.955429	angle= 2.60495738	
Ir = 803.334212	angle= 3.3602464	
Ir = 804.035291	angle= 3.40435192	

Ostatnie przybliżenia są już wystarczające – stan początkowy jest dostatecznie bliższy stanowi ustalonemu.

W tym samym bloku danych w pliku **.lis* podane są także inne wielkości, jak na przykład, nastawy regulatorów PI, obliczone na podstawie zadanych stałych czasowych T_{n1} oraz T_{n2} .

W obwodzie odtwarzającym część mechaniczną generatora znajdują się dwa źródła prądowe: jedno o stałej wartości, które w danym przypadku ma bardzo małą wartość, i jest wymagane jedynie do uruchomienia symulacji; drugie z nich jest sterowane z bloku DFIG_VM i służy do symulacji momentu napędowego wiatraka.

Model układu sterowania źródłami napięciowymi w obwodzie wirnika generatora został zrealizowany w postaci modułu MODELS (blok DFIG_VM). Na wejście tego bloku doprowadzane są pomiary prądów i napięć z zacisków generatora (parametry stojana). Na wyjście podawane są trójfazowe sygnały sterowania źródłami napięciowymi w obwodzie wirnika generatora.

Analizowany generator o mocy 2 MW i napięciu 690 V współpracuje z siecią rozdzielczą za pośrednictwem transformatora. Wszystkie dane maszyny są dostępne w oknie edycji danych bloku DFIG_VM. W stanie początkowym wirnik obraca się z prędkością nadsynchroniczną z poślizgiem $s = -10\%$, przy braku momentu napędowego od strony turbiny wiatrowej. W tym stanie generator oddaje do sieci moc: $P_{ini} = 45$ kW oraz $Q_{ini} = -100$ kVA (moc pojemnościowa).

Parametry modelu generatora oraz układu mechanicznego maszyny zostały obliczone za pomocą programu WindSyn – patrz poniżej.

5. Określenie parametrów modelu generatora

Parametry, zatem i właściwości silników indukcyjnych, mogą się dosyć istotnie różnić, w zależności od szczegółów ich budowy. W charakterze przykładu rozpatrzmy model silnika klatkowego, którego parametry są następujące:

Moc czynna	2,0 MW = 2719,2 KM
Napięcie znamionowe	690 V
Liczba par biegunów	2
Współczynnik mocy	0,92
Sprawność	0,98
Poślizg znamionowy	1 %
Prąd rozruchowy, j.w.	6,0
Moment rozruchowy, j.w.	0,65
Stała inercji H	58,0134 kgm ² .

Do obliczenia parametrów maszyny indukcyjnej{ XE "Maszyna indukcyjna:obliczanie parametrów modelu" } wygodnie jest skorzystać z programu WindSyn, który jest przeznaczony do współpracy z systemem WINDOWS [5]. Jest on dostępny w pakiecie z podstawowym programem ATP-EMTP. Po zainstalowaniu programu i przygotowaniu niezbędnych podstawowych danych silnika, postępujemy zgodnie z następującą procedurą:

1. Uruchomić program. Na pierwszym ekranie (rys. 8) należy podać adres dostępu do używanego edytora tekstowego oraz adres kartoteki, w której umieszczone zostaną pliki wyjściowe po wykonaniu obliczeń (w dolnej części okna). Przy czytaniu wprowadzanych danych liczbowych, w programie korzysta się z lokalnie ustawionego formatu zapisu liczb dziesiętnych (przecinek ',' lub kropka '.' oddzielająca część ułamkową). Ponieważ przetwarzanie w programie prowadzone jest zgodnie z formatem anglosaskim (kropka dziesiętna), więc przed rozpoczęciem obliczeń należy ustawić w systemie WINDOWS (*Panel sterowania/Opcje regionalne*) zapis liczb dziesiętnych w formacie z kropką dziesiętną. Następnie należy wybrać odpowiedni rodzaj analizowanej maszyny. W tym przypadku zaznaczono maszynę indukcyjną pierścieniową (z uzwojeniem na wirniku) (Wound rotor). Przejście do kolejnego okna danych: przycisk Continue.

2. W kolejnym kroku należy wprowadzić szczegółowe dane maszyny (rys. 9). Najważniejsze z nich, to wielkości znamionowe: moc (*Rated Power*), KM (ang. *horse power*, hp), częstotliwość zasilającego napięcia, napięcie (wartość skuteczna napięcia międzyfazowego), prędkość obrotowa (zależna od liczby par biegunów maszyny i częstotliwości sieci) oraz współczynnik mocy. Jeśli brakuje któregoś z parametrów, zaleca się pozostawienie wartości podpowiadanej przez program. Należy także podać nazwę zbioru dyskowego, w którym zostaną umieszczone wyniki obliczeń (parametry modelu silnika).

WindSyn by Gabor Furst

File

Continue Exit Help

Select type of machine

Induction Synchronous

Wound rotor
Single cage
Double cage
Deep bars

Salient Rotor
No dampers
Dampers in d axis
Dampers in d and q axis

Round Rotor
No dampers
Dampers in d and q axis

Path for output files D:\Dydaktyka\Podstaw
Path for PFE d:\eeug\pfe\
OK

Rys. 8. Okno wyboru rodzaju modelowanej maszyny

Induction motor data

Continue Exit

Enter induction motor data

System frequency	Hz	50	Starting current	p.u. full load	6
Rotor Type		Wound	Starting torque	p.u. full load	0.65
Rated power	hp	2720	Load torque at rated	p.u. of rating	1
Rated voltage L-L	kV rms	0.69	Inertia	kgm ²	58.01
Speed	r.p.m.	1500	Saturation start at p.u. current		2
Power factor (cos fi)	p.u.	0.92	Output file name + ext		Indmot.wis
Efficiency (full load)	p.u.	0.98			
Full load slip	%	1			

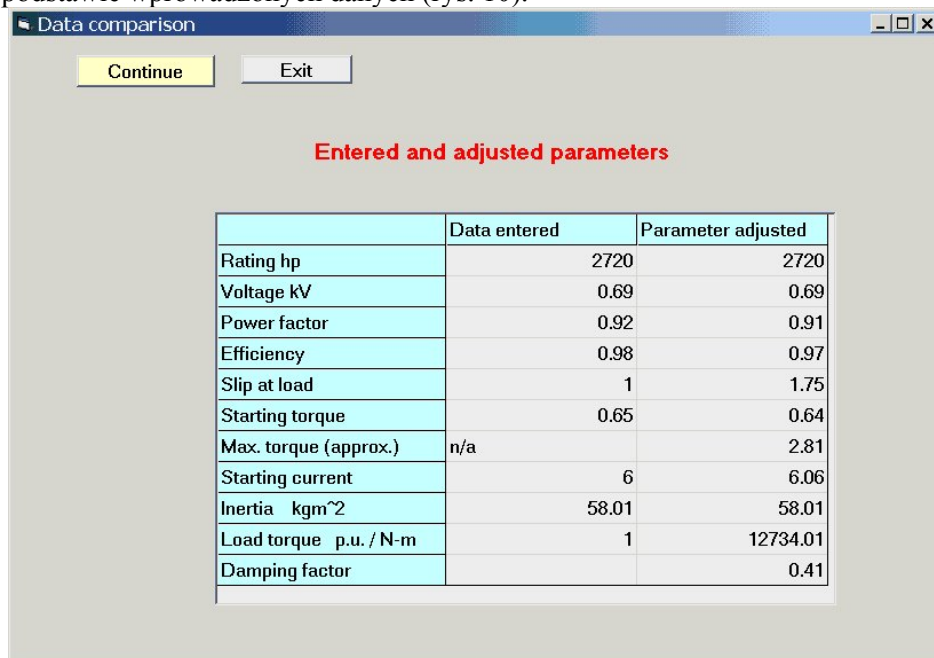
Return to type selection

Enter inertia in:

☐ kW/kVA (H)
☒ kgm²
☐ WR²

Rys. 9. Okno wprowadzania parametrów maszyny

W kolejnym oknie prezentowane są wartości parametrów, które zostały obliczone na podstawie wprowadzonych danych (rys. 10).



The screenshot shows a window titled "Data comparison" with "Continue" and "Exit" buttons. Below the buttons, the text "Entered and adjusted parameters" is displayed in red. A table with three columns is shown: "Parameter", "Data entered", and "Parameter adjusted". The table contains the following data:

Parameter	Data entered	Parameter adjusted
Rating hp	2720	2720
Voltage kV	0.69	0.69
Power factor	0.92	0.91
Efficiency	0.98	0.97
Slip at load	1	1.75
Starting torque	0.65	0.64
Max. torque (approx.)	n/a	2.81
Starting current	6	6.06
Inertia kgm ²	58.01	58.01
Load torque p.u. / N-m	1	12734.01
Damping factor		0.41

Rys. 10. Okno z wyszczególnieniem wprowadzonych danych

3. W ostatnim etapie należy określić wymagane parametry, związane z rodzajem symulacji. Można tu wprowadzić dodatkowe źródło prądowe, odzwierciedlające zmianę obciążenia silnika (ang. *Extra load*) i moment jego załączenia (ang. *Time of extra load*) – rys. 11. Ponadto: sposób określenia warunków początkowych (w przykładzie wybrano *Autoinitialization*, co oznacza, że odpowiednie parametry stanu początkowego zostaną określone na podstawie początkowego stanu ustalonego, w innym przypadku użytkownik powinien podać te parametry jako dane modelu silnika). Zauważmy, że w rozpatrywanym przykładzie, początkowy poślizg (ang. *Initial slip*) przyjmuje wartość -10% co oznacza, wirnik maszyny obraca się z prędkością nadsynchroniczną. Model silnika jest opisany równaniami o zmiennych współczynnikach (ze względu na przekształcenie $0dq$), a w ogólnym przypadku, jest to model nieliniowy (przy uwzględnieniu nasycenia żelaza). Do numerycznego rozwiązywania tych równań wybrano metodę kompensacji { XE "Maszyna indukcyjna:model:metoda kompensacji" } (rys. 11).

W rezultacie, otrzymuje się dwa pliki wyjściowe, które w danym przypadku mają następujące nazwy:

- *DFIG_1.WIS*, z danymi wejściowymi oraz z parametrami modelu;

- *DFIG_1.PCH*, który przedstawia plik wejściowy modelu w formie gotowego bloku modułowego, który może być dołączany do głównego pliku danych przez zastosowanie dyrektywy *\$INCLUDE*. Zaleca się jednak stosowanie modelu w formie jak na rys. 7, do którego należy wprowadzić obliczone parametry.

Rys. 11. Okno określania sposobu obliczania modelu

Parametry modelu oraz maszyny można odczytać z pliku *DFIG_1.PCH*, którego fragment jest umieszczony poniżej. W tekście zaznaczono podstawowe parametry modelu.

```

INERS INER          1.E-6
IX                  6.E+07      {inetia in uF}
C  the damping term in ohms
    INER            .04        {damping 1/mho}
/SWITCH
C  Switch to connect the motor to the network
C  BUSMA/B/C default names change to suit
C  .....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
C <bus1><bus2><  Close >< Open  > -----8
BUSMA MOTA          -1      1000.      1
BUSMB MOTB          -1      1000.      1
BUSMC MOTC          -1      1000.      1
INERS IX            -1      1000.      1

```

wartość pojemności C_{iner}

wartość oporności R_v

```

/SOURCE
C next the source records required
C source for the mechanical analogue
14INERS -1 0.000001 .000001 -1
C the source of any additional torque (load) in N-m applied
C -ve for load +ve for generation
C .....1.....2.....3.....4.....5.....6.....7.....8
C <bus1>-1<torque ><freq. dc>-----<--Tstart><----Tstop
14INERS -1 -1.3 0.000001 100.
C U.M. DATA
19
C Col.2 = 0 Decoupled, = 1 Autoinitialize ----- Col. 15 =0 Compensation, =1
Prediction
1 0
BLANK
4 11 INER 2 .157
.002368
.002368
-9.99 INERS
C Armature coils
MOTA 1
.001793 .000056 MOTB 1
.001793 .000056 MOTC 1
C Rotor coils
.003938 .000056 ROTB 1
.003938 .000056 ROTC 1
ROTA 1
BLANK ending U.M. data

```

indukcyjności L_m

Oporność i indukcyjność stojana

Oporność i indukcyjność wirnika

Kondensator C_{iner} w powyższym pliku reprezentuje moment bezwładności obracającego się układu. Jest on umieszczony w węźle IX modelu układu mechanicznego (rys. 7). Wielkość ta jest obliczona dla samej maszyny (w przykładzie jest to $6.E+07\mu F$), bez dołączonego układu napędowego związanego z siłownią wiatrową. Jest to więc wielkość znacznie zaniżona. W modelu przyjęto wartość $1.E+9\mu F$, co odpowiada wartości momentu bezwładności $J = 1000 \text{ kg}\cdot\text{m}^2$ – co jest typową wartością dla siłowni o przyjętej mocy znamionowej.

6. Analiza wyników symulacji

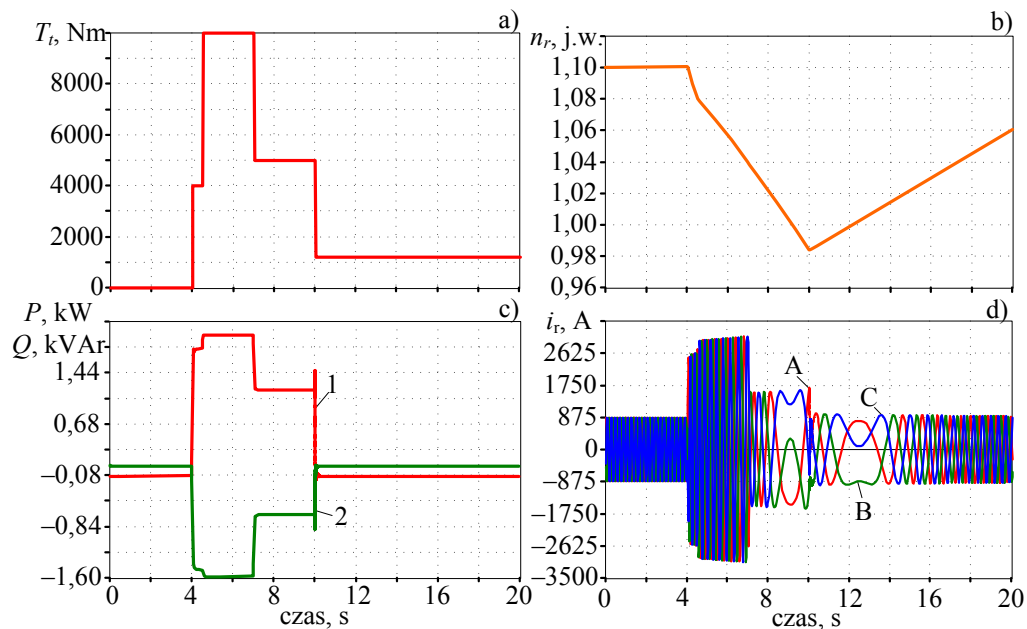
Parametry badanego generatora są podane w pkt. 5. Na ich podstawie, za pomocą programu WindSyn, obliczone zostały parametry elektryczne schematu zastępczego:

$L_m = 0,002368 \text{ H}$, $R_s = 0,001793 \Omega$, $L_{ls} = 0,000056 \text{ H}$, $R_r = 0,003938 \Omega$, $L_{lr} = 0,000056 \text{ H}$. Dane wejściowe do symulacji są następujące: przebieg zmian momentu turbiny wiatrowej T_t – jak na rys.12a, natomiast żądana moc elektryczna generatora zmienia się zgodnie wykresem na rys 12c: moc czynna P_e – krzywa 1, moc bierna Q_e – krzywa 3, co tylko nieznacznie różni się od wartości uzyskanych.

W trakcie symulacji (plik *C_DFIG_1A.ACP*) prędkość obrotowa generatora zmienia się zgodnie z krzywą na rys. 12b (podana w jednostkach względnych). Widać, że

na początku prędkość obrotowa była większa od wartości synchronicznej (wartość 1,0). Moment napędowy w tym czasie jest równy zero i przy niewielkim obciążeniu generatora w krótkim przedziale czasu nie obserwuje się zmian prędkości obrotowej całego zespołu (rys. 12b). W chwili $t = 4$ s następuje duży wzrost momentu napędowego oraz obciążenia przez zwiększenie mocy czynnej i biernej. Jednak, ze względu na przeważającą żadaną moc obciążenia, obserwuje się obniżkę prędkości obrotowej, która następnie zwiększa się od czasu $t = 10$ s, kiedy zmniejsza się moc obciążenia.

Zmianom tym towarzyszy zmiana napięcia i prądu wirnika w zakresie amplitudy i częstotliwości. Przebiegi prądów fazowych wirnika są pokazane na rys. 12d. Na początku prąd ten przybiera stosunkowo niewielką wartość, a jego częstotliwość wynika z poślizgu: $s = -10\%$, $f_r = 5$ Hz.



Rys. 12. Wyniki symulacji: a) moment wiatraka, b) prędkość obrotowa wirnika, c) zmiana mocy czynnej i biernej, d) przebiegi prądów wirnika

Po zwiększeniu obciążenia widać gwałtowny wzrost amplitudy tego prądu, a jego częstotliwość maleje zgodnie ze zmniejszaniem się prędkości obrotowej wirnika. Dla czasu $t \approx 9$ s poślizg zmienia kierunek, co odpowiada przejściu prędkości obrotowej generatora przez wartość prędkości synchronicznej (rys. 12b). W przebiegach prądu wirnika widać charakterystyczną zmianę kierunku wirowania: generator przechodzi z obszaru prędkości nadsynchronicznej w obszar prędkości podsynchronicznej. Odwrotne przejście następuje dla czasu ok. 12 s. W całym obszarze pracy rozpatrywanej instalacji moc oddawana do sieci (w tym przypadku suma mocy stojana i wirnika) jest

utrzymywana na zadanych poziomach: przebiegi mocy zadanych: P_{ref} , Q_{ref} i uzyskanych: P_n , Q_n niemal się pokrywają (rys. 12c).

Na uwagę zasługuje sposób zadawania wartości mocy czynnej, biernej oraz momentu napędowego od siłowni wiatrowej. Wielkości te są ustalane w bloku DFIG_VM (rys. 7), który jest utworzony w formie modułu MODELS. Po wybraniu opcji Edit użytkownik ma możliwość edycji programu funkcjonowania tego modułu. Podane wielkości określające ‘scenariusz’ zmiany obciążenia generatora są określone w następujących wierszach tego programu:

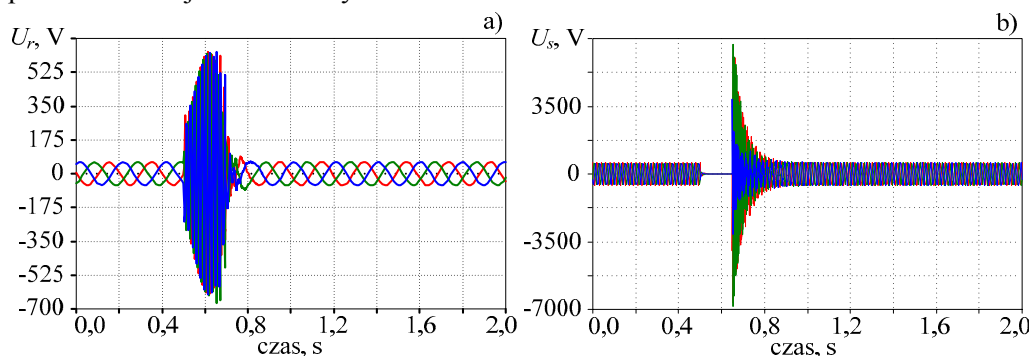
```
T_T[1..6]:=[0.0, 1.0, 4.0, 4.5, 7.0, 10.0] -- time table, s
P_P[1..6]:=[Pnini, Pnini, 1800000, 2000000, 1200000, Pnini]
Q_Q[1..6]:=[Qnini, Qnini, -1400000, -1500000, -600000, Qnini]
T_M[1..6]:=[T_WIND, T_WIND, 2000.0, 5000.0, 1500.0, 1350.0]
```

Są tu definiowane cztery tablice danych dotyczących:

- czasu wprowadzanych zmian, s – tablica T_T;
- wartości mocy czynnej, W – tablica P_P;
- wartości mocy biernej, VAr – tablica Q_Q;
- wartości momentu napędowego wiatraka, Nm – tablica T_M.

Wielkości Pnini, Qnini, T_WIND (= 0) odnoszą się do stanu początkowego. Redagując tę tablicę użytkownik może definiować (w uproszczony sposób) wymuszenia, na które powinny poprawnie reagować regulatory generatora.

Zwarcie 3-fazowe w sieci 20kV jest analizowane w modelu zamieszczonym w pliku C_DFIG_IB.ACP. Przebiegi napięć na wirniku i stojanie generatora są pokazane na rys. 13. Widać, że w stanie przejściowym wywołanym zwarcie napięcia na wirniku i na zaciskach maszyny mogą przyjmować bardzo duże wartości, co może prowadzić do uszkodzenia izolacji maszyny. Jest to podstawowy problem w ochronie przekątnikowej takich maszyn.



Rys. 13. Wyniki symulacji zwarcia w sieci 20 kV: a) przebiegi napięcia wirnika; b) przebiegi napięcia na zaciskach generatora

7. Program ćwiczenia

W ramach przygotowania do wykonania badań symulacyjnych elektrowni wiatrowej należy obliczyć parametry modelu podanej elektrowni i wielkości niezbędne do określenia ustalonego stanu początkowego. Przyjąć, że elektrownia jest połączona z systemem tak, jak to pokazano w omawianym powyżej przykładzie.

Na przykład, parametry elektrowni są następujące:

Moc czynna	850 kW
Napięcie znamionowe	690 V
Liczba par biegunów	3
Współczynnik mocy	0,92
Sprawność	0,96
Poślizg znamionowy	1,5 %
Prąd rozruchowy, j.w.	6,0
Moment rozruchowy, j.w.	0,65
Stała inercji H	24,0 kgm ² .

Przyjąć, że moment bezwładności całego obracającego się układu wynosi 350 kg·m², natomiast stan początkowy jest określony przez następujące parametry:

poślizg	−8,5%,
moc czynna	250 kW,
moc bierna	−180 kVAr.

1. Za pomocą programu Windsyn określić parametry maszyny wraz z układem mechanicznym.
2. Na bazie dostarczonego pliku C_DFIG_1.ACP utworzyć model ATPDraw z parametrami odpowiadającymi podanej maszyny.
3. Na drodze iteracyjnych przybliżeń wartości amplitudy i fazy źródła prądowego w obwodzie wirnika generatora określić ustalony stan początkowy całego układu.
4. Zbadać proces regulacji mocy czynnej i biernej generatora według zadanego scenariusza. W tym celu należy odpowiednio zredagować dane dotyczące zadanych wartości mocy czynnej, biernej i momentu napędowego w programie MODELS związanym z blokiem DFIG_VM modelu (rys. 7).
5. Zbadać przebiegi prądów i napięć w obwodach stojana i wirnika generatora przy zwarciach w sieci 20 kV.
6. Opracować wyniki i sprawozdanie z ćwiczenia.

LITERATURA

1. *ATP–EMTP Rule Book*, Canadian/American EMTP User Group, 1987-92.
2. DOMMEL H.W., *Electromagnetic Transients Program. Reference Manual (EMTP theory book)*, Bonneville Power Administration, Portland, 1986.