

*elektrownie wiatrowe, układy przekształtnikowe, generator PMSG,
modele matematyczne, badania symulacyjne*

Piotr GAJEWSKI*, Krzysztof PIENKOWSKI*

MODELOWANIE I ANALIZA ELEKTROWNI WIATROWEJ Z GENERATOREM PMSG

W artykule przedstawiono przekształtnikowe układy elektrowni wiatrowych z generatorami synchronicznymi z magnesami trwałymi (PMSG). Opisano modele matematyczne elementów elektrowni wiatrowej: turbiny wiatrowej, układu mechanicznego turbiny wiatrowej, generatora PMSG oraz wybranych przekształtników energoelektronicznych. Przeprowadzono badania symulacyjne przekształtnikowego układu elektrowni wiatrowej z bezpośrednim połączeniem turbiny wiatrowej z generatorem PMSG. Badania symulacyjne wykazały możliwość stabilizacji napięcia wyjściowego i częstotliwości przy zmiennej prędkości wiatru.

1. WSTĘP

Obecnie rozwijane są systemy elektrowni wiatrowych w których następuje przetwarzanie energii kinetycznej wiatru na energię elektryczną. Podstawowym elementem elektrowni wiatrowej jest turbina wiatrowa sprzężona przez przekładnię mechaniczną lub bezpośrednio z generatorem elektrycznym. Najpowszechniej stosowane są generatory elektryczne prądu zmiennego o konstrukcji maszyny indukcyjnej lub synchronicznej [1], [9].

Generatory indukcyjne odznaczają się dużą prostotą konstrukcji, niezawodnością pracy i niskimi kosztami eksploatacji. Istotną wadą układów z generatorami indukcyjnymi jest pobór dużej mocy biernej oraz duże trudności wykonania generatorów o niskich prędkościach obrotowych. Z tych powodów w elektrowniach wiatrowych są coraz częściej stosowane generatory synchroniczne. Generatory synchroniczne z magnesami trwałymi PMSG (*Permanent Magnet Synchronous Generator*) są obecnie wprowadzane szczególnie w nowoczesnych systemach elektrowni wiatrowych o dużej

* Instytut Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Politechnika Wroclawska, ul. Smoluchowskiego 19, 50-372 Wrocław, piotr.gajewski@pwr.wroc.pl, krzysztof.pienkowski@pwr.wroc.pl

mocy. Mimo wysokich kosztów wykonania generatory te charakteryzują się prostotą konstrukcji, wysoką sprawnością i niskimi kosztami eksploatacji [1], [6], [9].

Projektowanie, budowa i sterowanie systemów elektrowni wiatrowych z generatorami PMSG wymaga poznania stanów elektromechanicznych i elektromagnetycznych występujących w tych systemach. Analiza tych stanów wymaga znajomości odpowiednich modeli matematycznych tych systemów. Celem artykułu jest przedstawienie modeli matematycznych i metod modelowania wybranych systemów elektrowni wiatrowej z generatorami synchronicznymi z magnesami trwałymi (PMSG) i z przekształtnikowymi układami przetwarzania energii elektrycznej.

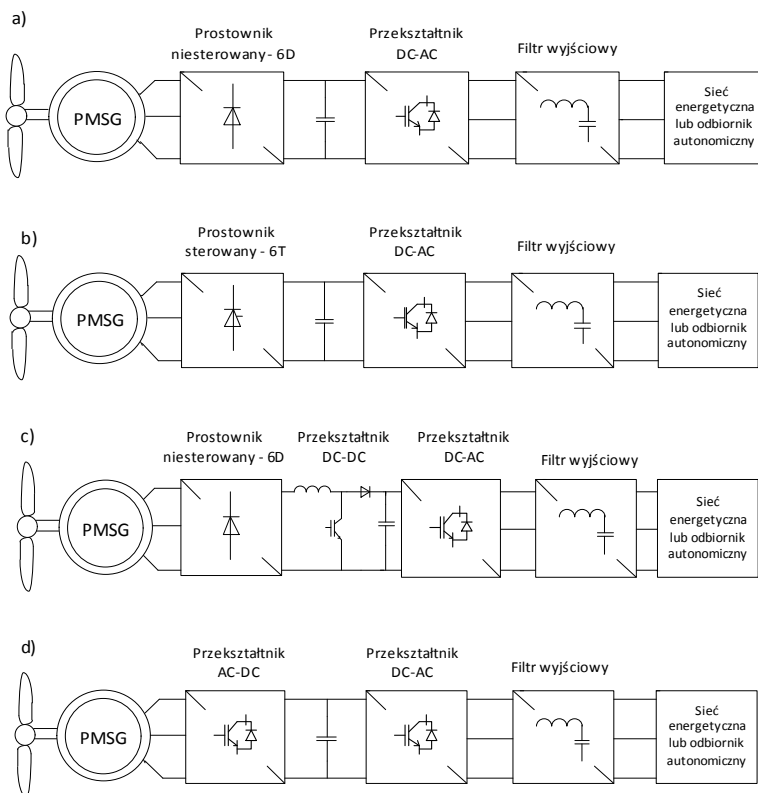
2. UKŁADY ELEKTROWNI WIATROWYCH Z GENERATORAMI PMSG

Nowoczesne systemy elektrowni wiatrowych są najczęściej wykonywane jako układy o zmiennej prędkości kątowej turbiny, które zapewniają optymalny wybór punktów pracy turbiny i możliwość pełnego wykorzystania energii kinetycznej wiatru. Do powszechnego stosowania tych systemów przyczynił się intensywny rozwój przekształtników energoelektronicznych i metod ich sterowania.

Systemy elektrowni wiatrowych mogą pracować jako sieciowe przy oddawaniu energii elektrycznej do sieci elektrycznej lub jako autonomiczne przy zasilaniu pojedynczego odbiornika lub grupy odbiorników [9]. W zależności od sposobu połączenia turbiny wiatrowej z generatorem elektrycznym systemy elektrowni wiatrowych można podzielić na systemy z przekładnią mechaniczną i systemy bezprzekładniowe (bezpośrednie). Obecnie coraz częściej są rozwijane i stosowane systemy bezprzekładniowe, które odznaczają się prostotą konstrukcji i mniejszymi kosztami eksploatacji, ale wymagają stosowania generatorów wolnoobrotowych, czyli o dużej liczbie par biegunów. Rozwój tego typu konstrukcji jest szczególnie uzasadniony w przypadku stosowania generatorów synchronicznych z magnesami trwałymi (PMSG).

W układach elektrowni wiatrowych z generatorami PMSG do przetwarzania energii elektrycznej wytwarzanej przez generator stosuje się przekształtniki energoelektroniczne [9]. Wybrane przekształtnikowe układy elektrowni wiatrowych z generatorem PMSG przedstawiono na rys. 1. Charakterystyczną cechą tych układów jest występowanie kilkustopniowego przetwarzania energii elektrycznej przez różnego rodzaju przekształtniki energoelektroniczne oraz konieczność wykonania każdego z przekształtników na pełną moc elektryczną generatora (*full-scale converter*).

W układach elektrowni wiatrowych można wyróżnić dwa podstawowe typy przekształtników energoelektronicznych w zależności od miejsca ich przyłączenia: przekształtnik maszynowy AC/DC, przyłączony do uzwojenia twornika generatora i przekształtnik sieciowy DC/AC przyłączony do sieci lub do autonomicznego odbiornika energii elektrycznej.



Rys. 1. Przekształtnikowe układy elektrowni wiatrowych z generatorem PMSG:

- a) z prostownikiem niesterowanym 6D i z przekształtnikiem DC-AC;
- b) z prostownikiem sterowanym 6T i z przekształtnikiem DC-AC;
- c) z prostownikiem niesterowanym 6D, przekształtnikiem DC-DC i z przekształtnikiem DC-AC;
- d) z przekształtnikiem AC-DC i DC-AC w układzie 'back to back'

Przekształtnik maszynowy AC/DC może być wykonany jako niesterowany prostownik diodowy (mostek 6D) lub jako sterowany prostownik tyrystorowy (mostek 6T) – rys. 1a, b). W niektórych układach jest stosowany prostownik z dodatkowym przekształtnikiem DC/DC typu boost – rys. 1c. Zadaniem tego przekształtnika jest podwyższanie napięcia stałego na wyjściu przekształtnika AC/DC przy niskich prędkościach turbiny wiatrowej [3]. W nowoczesnych układach jako przekształtnik maszynowy jest coraz częściej stosowany przekształtnik AC/DC o topologii prostownika PWM z zastosowaniem zaworów o komutacji wymuszonej – rys. 1d).

Przekształtnik sieciowy DC/AC dokonuje przekształcania energii elektrycznej otrzymywanej z przekształtnika maszynowego na energię elektryczną prądu zmiennego o wartościach zgodnych z wymaganiami sieci energetycznej lub odbiornika autonomicznego AC. W układach elektrowni wiatrowych przekształtnik sieciowy DC/AC

jest wykonany jako przekształtnik o topologii falownika napięcia i sterowaniu PWM. W układzie jak na rys. 1d oba przekształtniki: maszynowy i sieciowy mogą tworzyć pojedynczy złożony przekształtnik AC/DC/AC typu 'back-to-back'.

3. MODELE MATEMATYCZNE ELEMENTÓW SYSTEMU ELEKTROWNI WIATROWEJ

3.1. MODEL TURBINY WIATROWEJ

Moc mechaniczna P_t wytwarzana przez turbinę wiatrową o osi poziomej jest opisana równaniem [1], [3], [5], [8], [9]:

$$P_t = 0.5 \rho \pi R^2 v_w^3 \cdot C_p(\lambda, \beta), \quad (1)$$

$$\lambda = \omega_t R / v_w \quad (2)$$

gdzie:

- R – promień łopatek turbiny wiatrowej,
- ρ – gęstość masowa powietrza,
- v_w – prędkość wiatru,
- C_p – współczynnik mocy turbiny,
- λ – współczynnik szybkobieżności turbiny,
- β – kąt nachylenia łopat turbiny,
- ω_t – prędkość kątowna wału turbiny.

Współczynnik mocy turbiny C_p jest nieliniową funkcją współczynnika szybkobieżności λ i kąta nachylenia łopat turbiny β [8], [9]. Pracę turbiny wiatrowej przy maksymalnej mocy mechanicznej uzyskuje się przy optymalnej wartości współczynnika szybkobieżności turbiny λ . Optymalnej wartości współczynnika szybkobieżności odpowiada maksymalna wartość współczynnika mocy turbiny C_p [1], [8], [9].

Moment mechaniczny M_t wytwarzany przez turbinę wiatrową wynosi:

$$M_t = \frac{P_t}{\omega_t} = 0.5 \rho \pi R^3 v_w^2 \cdot C_t(\lambda, \beta) \quad (3)$$

gdzie C_t jest współczynnikiem momentu turbiny:

$$C_t(\lambda, \beta) = C_p(\lambda, \beta) / \lambda. \quad (4)$$

Z zależności (1)–(4) wynika, że moc mechaniczna i moment mechaniczny turbiny wiatrowej przy danej prędkości wiatru mogą być sterowane przez zmianę współczynnika szybkobieżności turbiny oraz przez zmianę kąta nachylenia łopat turbiny.

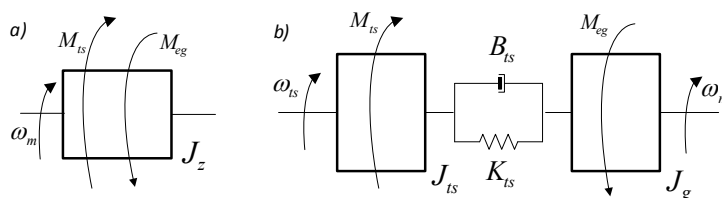
3.2. MODELE UKŁADU MECHANICZNEGO ELEKTROWNI WIATROWEJ

Układ mechaniczny elektrowni wiatrowej składa się z łopatek turbiny, piasty turbiny, wirnika generatora oraz wału mechanicznego zapewniającego połączenie przez przekładnię mechaniczną lub bezpośrednie turbiny i generatora. Istotne znaczenie ma uwzględnienie właściwości układu mechanicznego stanowiącego połączenie turbiny wiatrowej i generatora elektrycznego. Układ ten może być rozpatrywany jako idealnie sztywny lub jako układ o skończonej sztywności, czyli układ o właściwościach sprężysto-tłumiących.

Rozróżnia się następujące modele układu mechanicznego elektrowni wiatrowej [2], [8]:

- Model 1-masowy – oparty na założeniu nieskończenie dużej sztywności wszystkich elementów układu mechanicznego;
- Model 2-masowy – oparty na uwzględnieniu sprężysto-tłumiących właściwości połączenia mechanicznego turbiny wiatrowej i generatora;
- Modele wielomasowe – oparte na uwzględnieniu sprężysto-tłumiących właściwości wielu elementów składowych systemu mechanicznego elektrowni wiatrowej.

Na rysunku 2. przedstawiono model 1-masowy i model 2-masowy układu mechanicznego elektrowni wiatrowej, stosowane w typowej analizie. W przypadku połączenia turbiny wiatrowej z generatorem przez przekładnię mechaniczną w modelach tych wielkości i parametry mechaniczne turbiny wiatrowej należy rozpatrywać jako wprowadzone do prędkości kątowej wału generatora.



Rys. 2. Modele układu mechanicznego elektrowni wiatrowej:
a) układ 1-masowy; b) układ 2-masowy

Dla modelu 1-masowego równanie ruchu układu mechanicznego elektrowni wiatrowej ma postać:

$$J_z \cdot \frac{d}{dt} \omega_m = M_{ts} - M_{eg} \quad (5)$$

gdzie:

$$J_z = J_{ts} + J_g, \quad J_{ts} = J_t / i^2, \quad M_{ts} = M_t / i, \quad (6)$$

J_t, J_g – odpowiednio rzeczywisty moment bezwładności turbiny wiatrowej i wirnika generatora,

- M_{ts}, J_{ts}, J_z – odpowiednio sprowadzony moment mechaniczny turbiny wiatrowej, sprowadzony moment bezwładności turbiny wiatrowej i całkowity moment bezwładności układu mechanicznego,
- M_{eg} – moment elektromagnetyczny generatora,
- ω_m – prędkość kątowna wirnika generatora,
- i – przełożenie przekładni mechanicznej,
- t – czas.

Dla modelu 2-masowego układ mechaniczny elektrowni wiatrowej opisuje następujący układ równań:

$$J_{ts} \cdot \frac{d}{dt} \omega_{ts} = M_{ts} - (K_{ts} \cdot \Delta\varphi + B_{ts} \cdot \Delta\omega), \quad (7)$$

$$J_g \cdot \frac{d}{dt} \omega_m = (K_{ts} \cdot \Delta\varphi + B_{ts} \cdot \Delta\omega) + M_{eg}, \quad (8)$$

$$\frac{d}{dt} \Delta\varphi = \Delta\omega \quad (9)$$

gdzie:

$$\varphi_{ts} = i \cdot \varphi_t, \quad \Delta\varphi = \varphi_{ts} - \varphi_m, \quad \omega_{ts} = i \cdot \omega_t, \quad \Delta\omega = \omega_{ts} - \omega_m, \quad (10)$$

- K_{ts}, B_{ts} – odpowiednio sprowadzony współczynnik sprężystości skrętnej i sprowadzony współczynnik tłumienia skrętnego układu mechanicznego turbiny wiatrowej,
- φ_{ts}, φ_m – odpowiednio sprowadzony kąt obrotu wirnika turbiny i kąt obrotu wirnika generatora,
- ω_{ts} – sprowadzona prędkość kątowna wirnika turbiny.

3.3. MODEL GENERATORA PMSG

Przy modelowaniu 3-fazowego generatora synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSG) przyjęto następujące powszechnie stosowane założenia upraszczające [3], [5], [8], [9]: symetria 3-fazowego uzwojenia stojana, liniowość obwodów magnetycznych generatora, pominięcie prądów wirowych i histerezy magnetycznej, sinusoidalny kształt SEM indukowanych w uzwojeniu stojana, pomijalny wpływ żłobków stojana oraz brak uzwojeń tłumiących w wirniku. Rozpatrywana jest ogólna konstrukcja generatora z wirnikiem cylindrycznym lub jawnobiegunowym.

Model matematyczny generatora PMSG został sformułowany po przekształceniu równań fazowych maszyny do równań wyrażonych w wirującym, prostokątnym układzie współrzędnych $d-q$, o osi d współliniowej z osią strumienia magnetycznego magnesów trwałych.

Równania modelu matematycznego generatora synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSG) przedstawia następujący układ równań [5], [8], [9]:

- równania napięciowe twornika:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} R_s & \\ & R_s \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} - \begin{bmatrix} & -\omega_e \\ \omega_e & \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} u_{sd} \\ u_{sq} \end{bmatrix}; \quad (11)$$

- równania strumieniowo-prądowe:

$$\begin{bmatrix} \psi_{sd} \\ \psi_{sq} \end{bmatrix} = - \begin{bmatrix} L_d & \\ & L_q \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_{sd} \\ i_{sq} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \psi_{PM} \\ 0 \end{bmatrix}; \quad (12)$$

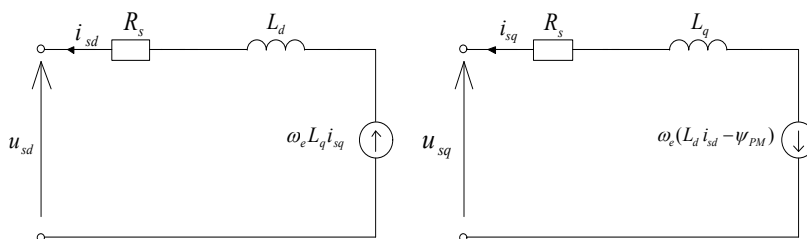
- równanie momentu elektromagnetycznego generatora:

$$M_{eg} = \frac{3}{2} p_b [-\psi_{PM} i_{sq} + (L_d - L_q) \cdot i_{sd} i_{sq}] \quad (13)$$

gdzie:

- u_{sd}, u_{sq} – składowe napięć stojana w osi d i q ,
- i_{sd}, i_{sq} – składowe prądów stojana w osi d i q ,
- ψ_{sd}, ψ_{sq} – składowe strumieni sprzężonych stojana w osi d i q ,
- ψ_{PM} – strumień sprzężony magnesów trwałych,
- ω_e – elektryczna prędkość kątowna wirnika generatora,
- L_d, L_q – indukcyjność uzwojenia stojana w osi d i q ,
- R_s – rezystancja fazowa uzwojenia stojana,
- p_b – liczba par biegunów generatora.

Interpretacja obwodowa równań modelu matematycznego generatora PMSG została przedstawiona na rys. 3.



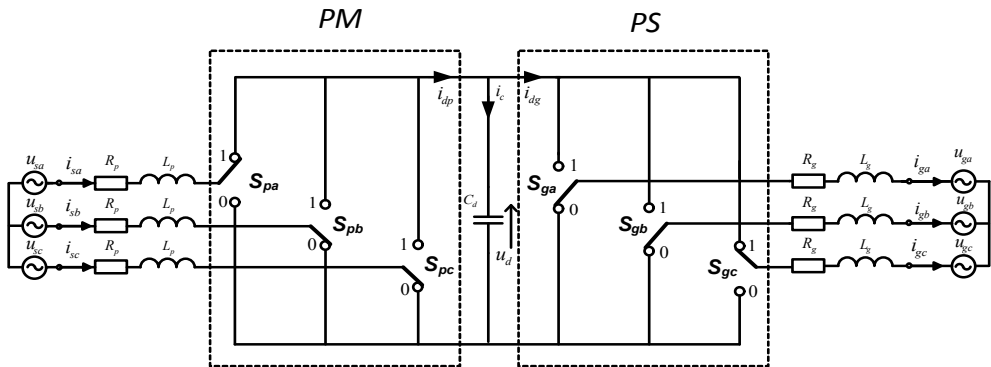
Rys. 3. Model obwodowy generatora PMSG w osiach d - q

3.4. MODELE UKŁADÓW PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH

W analizie rozpatrywane są najczęściej modele matematyczne układów przekształtnikowych, które zostały oparte na założeniu dwustanowego charakteru pracy

elementów energoelektronicznych przekształtników. Rzeczywisty układ przekształtnika energoelektronicznego może być zastąpiony wtedy równoważnym modelem łącznikowym przekształtnika [5]. W pracy przedstawiono modele łącznikowe wybranych układów przekształtnikowych, najczęściej stosowanych w sieciowych i autonomicznych układach elektrowni wiatrowych z generatorami PMSG.

Na rysunku 4. przedstawiono model łącznikowy układu przekształtnikowego elektrowni wiatrowej z generatorem PMSG i z przekształtnikiem AC/DC/AC, złożonym z przekształtnika maszynowego AC/DC i przekształtnika sieciowego DC/AC. Oba przekształtniki są połączone wspólnym obwodem pośredniczącym prądu stałego z baterią kondensatorów C_d . Przekształtnik maszynowy PM jest przyłączony do stojana generatora przez 3-fazowy dławik L_p . Przekształtnik sieciowy PS jest przyłączony do sieci lub odbiornika przez 3-fazowy dławik L_g . Przekształtnik maszynowy jest prostownikiem aktywnym PWM, a przekształtnik sieciowy jest falownikiem napięcia z modulacją PWM. W typowych zastosowaniach oba przekształtniki są wykonane jako przekształtniki 2-poziomowe. Każdy przekształtnik jest złożony z 3 gałęzi, z których każda zbudowana jest z górnego i dolnego łącznika energoelektronicznego (tranzystora IGBT z diodą zwrotną). W modelach łącznikowych działanie każdej gałęzi przekształtnika jest zamodelowane za pośrednictwem idealnego klucza dwupołożeniowego. W opisie matematycznym stany kluczy przekształtnika są opisywane za pomocą dwuwartościowych funkcji przełączających, które mogą być bezpośrednio powiązane ze stanami logicznymi sygnałów sterujących zaworami energoelektronicznymi w gałęziach przekształtnika. Położeniu górnemu danego klucza odpowiada wartość funkcji przełączającej $S = 1$, a położeniu dolnemu wartość funkcji $S = 0$.



Rys. 4. Model łącznikowy przekształtnika maszynowego PM i sieciowego PS

Opis matematyczny generatora PMSG z przekształtnikiem AC/DC/AC przedstawia następujący układ równań:

- równania przekształtnika maszynowego AC/DC:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = -\frac{R_p}{L_p} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_p} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{pa} \\ S_{pb} \\ S_{pc} \end{bmatrix} \cdot u_d + \frac{1}{L_p} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix} \quad (14)$$

gdzie:

$u_{sa}, u_{sb}, u_{sc}, i_{sa}, i_{sb}, i_{sc}$ – odpowiednio napięcia fazowe i prądy fazowe stojana generatora zasilające przekształtnik maszynowy,

u_d – napięcie w obwodzie pośredniczącym,

L_p, R_p – indukcyjność i rezystancja dławika przekształtnika maszynowego,

S_{pa}, S_{pb}, S_{pc} – funkcje przełączające przekształtnika maszynowego;

• równania przekształtnika sieciowego (odbiornikowego) DC/AC:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} = -\frac{R_g}{L_g} \cdot \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_g} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{ga} \\ S_{gb} \\ S_{gc} \end{bmatrix} \cdot u_d + \frac{1}{L_g} \cdot \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix} \quad (15)$$

gdzie:

u_{ga}, u_{gb}, u_{gc} – odpowiednio napięcia fazowe sieci zasilającej przekształtnik sieciowy (lub napięcia fazowe odbiornika),

i_{ga}, i_{gb}, i_{gc} – prądy fazowe przekształtnika sieciowego (lub odbiornika),

L_g, R_g – indukcyjność i rezystancja dławika przekształtnika sieciowego,

S_{ga}, S_{gb}, S_{gc} – funkcje przełączające przekształtnika sieciowego;

• równania obwodu pośredniczącego przekształtnika AC/ DC/AC:

$$\frac{d}{dt} u_d = \frac{1}{C_d} \cdot (i_{dp} - i_{dg}) \quad (16)$$

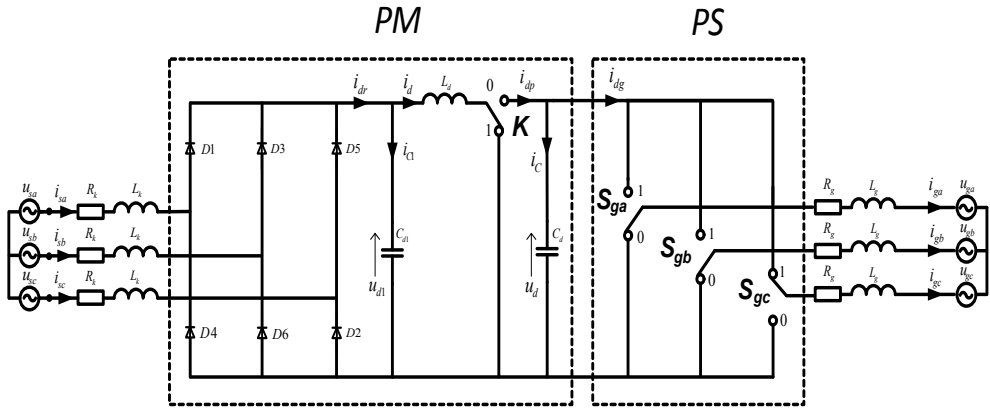
$$i_{dp} = S_{pa} i_{sa} + S_{pb} i_{sb} + S_{pc} i_{sc}, \quad i_{dg} = S_{ga} i_{ga} + S_{gb} i_{gb} + S_{gc} i_{gc} \quad (17)$$

gdzie:

i_{dp}, i_{dg} – odpowiednio prąd w obwodzie pośredniczącym przekształtnika maszynowego i sieciowego,

C_d – pojemność kondensatora w obwodzie pośredniczącym przekształtników.

Na rysunku 5 przedstawiono model łącznikowy systemu z generatorem PMSG, w którym przekształtnik maszynowy PM jest złożony z 3-fazowego prostownika mostkowego diodowego połączonego kaskadowo z przekształtnikiem DC/DC podwyższającym napięcie (typu boost). Prostownik diodowy jest przyłączony do uzwojenia stojana generatora przez 3-fazowy dławik komutacyjny L_k .



Rys. 5. Model łącznikowy przekształtnika maszynowego PM i sieciowego PS

Model łącznikowy 3-fazowego prostownika diodowego został opisany za pośrednictwem dwuwartościowych funkcji przełączających F_{ra} , F_{rb} , F_{rc} , określających stan przewodzenia każdej gałęzi prostownika. Funkcje przełączające prostownika diodowego zostały zdefiniowane jako funkcje Heaviside'a i wyrażone następująco [7]:

$$F_{rk} = F_{rk}(i_{sk}) = \begin{cases} 1 & \text{dla } i_{sk} \geq 0 \\ 0 & \text{dla } i_{sk} < 0 \end{cases} \quad k = a, b, c. \quad (18)$$

W modelu łącznikowym przekształtnika DC/DC podwyższającego napięcie stan przewodzenia tranzystora mocy i diody rzeczywistego przekształtnika DC/DC zamodelowano za pomocą idealnego łącznika dwustanowego K. W modelu matematycznym stan tego łącznika jest opisywany za pomocą dwuwartościowej funkcji przełączającej K. Położeniu górnemu łącznika odpowiada wartość funkcji przełączającej $K = 0$, a położeniu dolnemu łącznika wartość $K = 1$. Dla przyjętego modelu łącznikowego przekształtnika przy założeniu ciągłości prądu w gałęzi z indukcyjnością L_d równania stanu przekształtnika można sformułować na podstawie równań Kirchhoffa.

Opis matematyczny systemu z generatorem PMSG z prostownikiem diodowym, przekształtnikiem DC/DC typu boost i przekształtnikiem DC/AC przedstawia następujący układ równań:

- równania prostownika diodowego i obwodu prądu wyprostowanego:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} = -\frac{R_k}{L_k} \cdot \begin{bmatrix} i_{sa} \\ i_{sb} \\ i_{sc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_k} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} F_{ra} \\ F_{rb} \\ F_{rc} \end{bmatrix} \cdot u_{d1} + \frac{1}{L_k} \cdot \begin{bmatrix} u_{sa} \\ u_{sb} \\ u_{sc} \end{bmatrix}, \quad (19)$$

$$\frac{d}{dt} u_{d1} = \frac{1}{C_{d1}} \cdot (i_{dr} - i_d) = \frac{1}{C_{d1}} \cdot (S_{ra}i_{sa} + S_{rb}i_{sb} + S_{rc}i_{sc} - i_d) \quad (20)$$

gdzie:

- u_{d1} – napięcie wyprostowane prostownika diodowego,
- i_{dr}, i_d – odpowiednio prąd wyprostowany prostownika i prąd wejściowy przekształtnika DC/DC,
- L_k, R_k – indukcyjność i rezystancja dławika komutacyjnego prostownika diodowego,
- C_{d1} – pojemność kondensatora w obwodzie prądu wyprostowanego,
- F_{ra}, F_{rb}, F_{rc} – funkcje przełączające prostownika diodowego;
- równania stanu przekształtnika DC/DC typu boost:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_d \\ u_d \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_d}{L_d} & -\frac{1-K}{L_d} \\ \frac{1-K}{C_d} & 0 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} i_d \\ u_d \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{1}{L_d} & 0 \\ 0 & -\frac{1}{C_d} \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} u_{d1} \\ i_{dg} \end{bmatrix}; \quad (21)$$

- równania przekształtnika sieciowego (odbiornikowego) DC/AC:

$$\frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} = -\frac{R_g}{L_g} \cdot \begin{bmatrix} i_{ga} \\ i_{gb} \\ i_{gc} \end{bmatrix} - \frac{1}{L_g} \cdot \frac{1}{3} \begin{bmatrix} 2 & -1 & -1 \\ -1 & 2 & -1 \\ -1 & -1 & 2 \end{bmatrix} \cdot \begin{bmatrix} S_{ga} \\ S_{gb} \\ S_{gc} \end{bmatrix} \cdot u_d + \frac{1}{L_g} \cdot \begin{bmatrix} u_{ga} \\ u_{gb} \\ u_{gc} \end{bmatrix}, \quad (22)$$

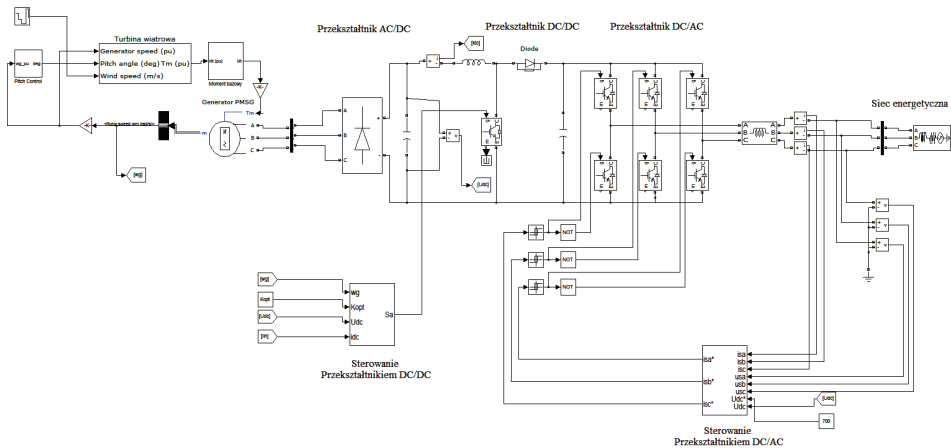
$$i_{dg} = S_{ga}i_{ga} + S_{gb}i_{gb} + S_{gc}i_{gc}. \quad (23)$$

4. ANALIZA I BADANIA SYMULACYJNE WYBRANEGO UKŁADU ELEKTROWNI WIATROWEJ

Na podstawie przedstawionych modeli matematycznych przekształtnikowych układów elektrowni wiatrowych został opracowany program symulacyjny wybranego układu elektrowni wiatrowej z generatorem PMSG i wykonane badania symulacyjne. W badaniach symulacyjnych rozpatrywano przekształtnikowy układ elektrowni wiatrowej z przekształtnikiem maszynowym złożonym z diodowego prostownika mostkowego i z przekształtnika DC/DC typu boost oraz z 3-fazowym przekształtnikiem sieciowym AC/DC z tranzystorami IGBT. W programie symulacyjnym uwzględniono możliwość oddawania energii do sieci 3-fazowej AC lub do 3-fazowego autonomicznego odbiornika AC o zadanej mocy i współczynniku mocy. Do sterowania zaworów przekształtnika DC/DC i przekształtnika DC/AC zastosowano odpowiednie metody modulacji szerokości impulsów PWM.

Rozpatrywany przekształtnikowy układ elektrowni wiatrowej z generatorem PMSG został również zaimplementowany w środowisku Matlab/Simulink z zastosowaniem

standardowych bloków symulacyjnych poszczególnych układów składowych systemu. Zaletą tego modelu jest możliwość ujęcia w badaniach symulacyjnych rzeczywistych nieliniowych właściwości elementów energoelektronicznych przekształtników bez konieczności zakładania dwustanowej pracy tych elementów. Jest to jednak związane z większą złożonością modelu i koniecznością stosowania obliczeń z mniejszym krokiem całkowania. W opracowanym modelu symulacyjnym uwzględniono dodatkowo możliwość sterowania mocy mechanicznej turbiny wiatrowej przez zmianę kąta nachylenia łopat turbiny. Schemat opracowanego w środowisku Matlab/Simulink modelu symulacyjnego przekształtnikowego układu elektrowni wiatrowej przedstawiono na rys. 6.



Rys. 6. Model symulacyjny przekształtnikowego układu elektrowni wiatrowej w środowisku Matlab/Simulink

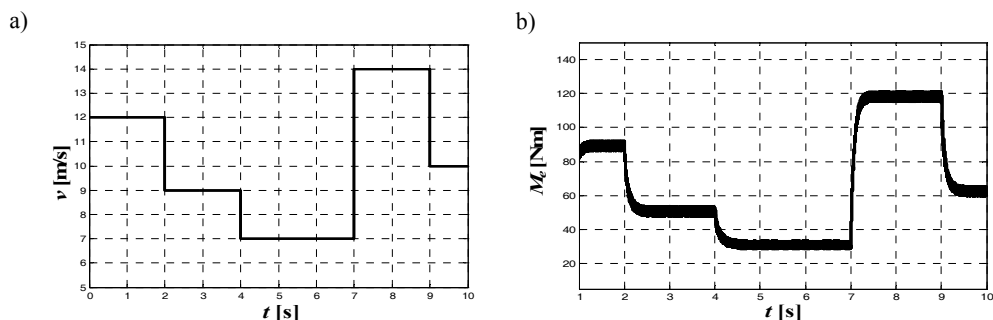
Do badań przyjęto system elektrowni wiatrowej z wolnoobrotowym wielobiegunowym generatorem PMSG, sprzężonym bezpośrednio z turbiną wiatrową. Dane i parametry generatora PMSG wykorzystywanego w badaniach symulacyjnych przedstawiono w Tabeli 1. Przyjęto model 1-masowy układu mechanicznego turbiny wiatrowej.

Tabela 1. Dane i parametry generatora synchronicznego z magnesami trwałymi

Nazwa danej lub parametru	Wartość
Moc znamionowa P_N	10 kW
Prędkość znamionowa ω_N	36 rad/s
Liczba par biegunów p_b	3
Rezystancja stojana R_s	0,985 Ω
Indukcyjność stojana w osi d i q $L_s = L_d = L_q$	10 mH
Strumień magnesów trwałych ψ_{PM}	0,9 Vs
Moment bezwładności J_z	0,3 kgm ²

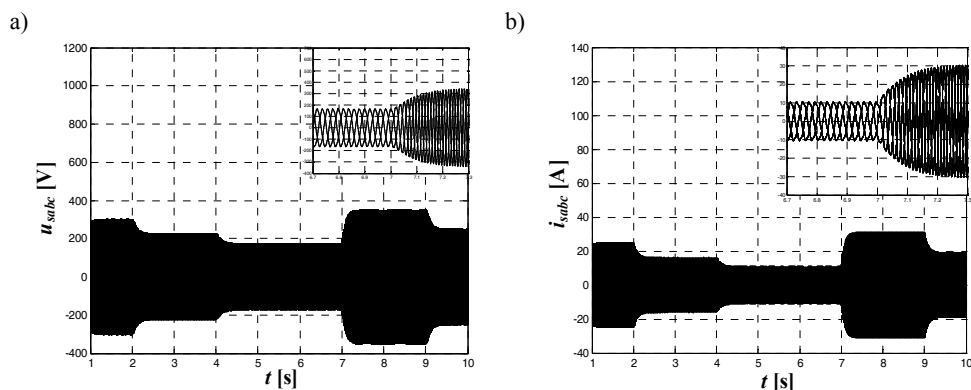
Na podstawie opracowanych modeli i programów symulacyjnych wykonano badania symulacyjne stanów elektromechanicznych i elektromagnetycznych przekształtnikowego systemu elektrowni wiatrowej z generatorem PMSG. W pracy tej przedstawiono wybrane wyniki badań, szczególnie wyniki badań zostały podane w [4].

W badaniach symulacyjnych założono, że praca elektrowni wiatrowej występuje przy założonej zmiennej prędkości wiatru o przebiegu przedstawionym na rys. 7a. Przyjęto, że kąt nachylenia łopatek turbiny miał wartość równą 0 deg i podczas zmian prędkości wiatru nie ulegał zmianie. Na rysunku 7b przedstawiono przebieg chwilowy momentu elektromagnetycznego M_e generatora PMSG, a na rys. 8 przebiegi chwilowe napięć i prądów fazowych 3-fazowego generatora PMSG wyznaczone przy założonej zmienności prędkości wiatru. Zwiększonej prędkości wiatru odpowiada odpowiednio zwiększenie prędkości kątowej turbiny wiatrowej i wirnika generatora. Powoduje to w następstwie zmianę wartości amplitud napięć i prądów fazowych otrzymywanych z generatora PMSG oraz częstotliwości tych przebiegów.



Rys. 7. Przebiegi chwilowe:

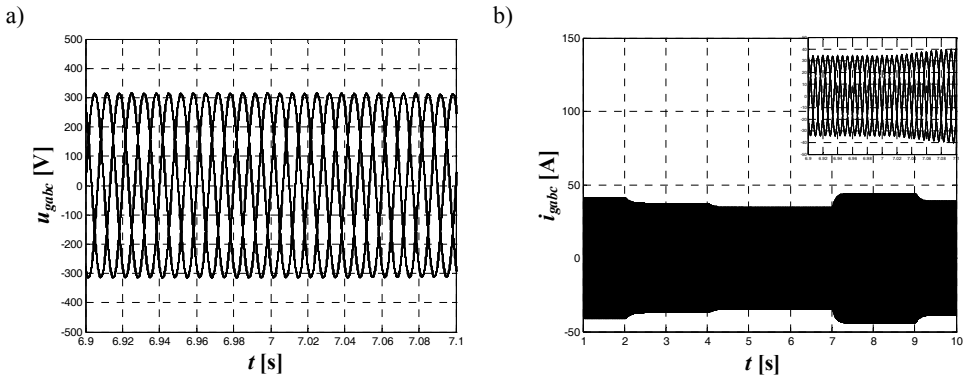
a) zadanej prędkości wiatru b) momentu elektromagnetycznego M_e generatora PMSG



Rys. 8. Przebiegi chwilowe:

a) napięć fazowych u_{sabc} generatora PMSG b) prądów fazowych i_{sabc} generatora PMSG

Z powodu dużej zmienności wielkości elektromagnetycznych otrzymywanych z generatora PMSG konieczne jest dalsze przetwarzanie energii elektrycznej przez przekształtniki energoelektroniczne. W badaniach symulacyjnych rozpatrywano przekształtnikowy układ elektrowni wiatrowej w którym przy zmiennej wartości prędkości wiatru przez odpowiednie sterowanie przekształtnikiem DC/DC i przekształtnikiem DC/AC można uzyskać stałą wartość amplitud i częstotliwości napięć wyjściowych współpracujących z siecią. Ilustruje to rys.9 na którym przedstawiono przebiegi chwilowe napięć 3-fazowej sieci oraz przebiegi chwilowe prądów fazowych w obwodach przekształtnika sieciowego.



Rys. 9. Przebiegi chwilowe:
 a) napięć fazowych u_{gabc} sieci b) prądów fazowych i_{gabc} sieci

6. WNIOSKI

Przedstawione w pracy modele matematyczne przekształtnikowych układów elektrowni wiatrowych z generatorami PMSG są oparte na ujęciu fizykalnego działania tych układów oraz uwzględnieniu wzajemnych powiązań między poszczególnymi układami. Modele te pozwalają na analizę teoretyczną i badania symulacyjne stanów elektromechanicznych i elektromagnetycznych występujących podczas różnych stanów pracy elektrowni wiatrowej. Opracowane modele matematyczne poszczególnych układów przekształtnikowych umożliwiają racjonalny wybór topologii układów przekształtnikowych oraz dobór elementów tych układów.

Przeprowadzone analizy i badania symulacyjne potwierdziły dobre właściwości przekształtnikowego układu elektrowni wiatrowej z wolnoobrotowym generatorem synchronicznym z magnesami trwałymi (PMSG). Zastosowanie odpowiednich układów przekształtnikowych i algorytmów sterowania pozwala w znacznym stopniu wyeliminować niekorzystny wpływ zmiennej prędkości wiatru na zmienność wyjścio-

wych wielkości elektromagnetycznych. Dobre właściwości badanych układów wskazują na celowość rozwoju i stosowania przekształtnikowych układów elektrowni wiatrowych z generatorami PMSG.

LITERATURA

- [1] BLAABJERG F., CHEN Z., *Power electronics for modern wind turbines*, Morgan & Claypool, New York 2006.
- [2] DUSONCHET L., MASSARO F., TELARETTI E., *Transient stability simulation of a fixed speed wind turbine by Matlab/Simulink*, Proc. of International Conference on Clean Electrical Power, ICCEP '07, 2007, 651–655.
- [3] ELTAMALY A.M., *Modeling of wind turbine driving permanent magnet generator with maximum power point tracking system*, J. of King University – Engineering Sciences, 2007, Vol. 19, 223–237.
- [4] GAJEWSKI P., *Układ do stabilizacji napięcia i częstotliwości prądnicy w elektrowni wiatrowej małej mocy*, Magisterska praca dyplomowa, Politechnika Wrocławska, Wydział Elektryczny, 2013.
- [5] HEMEIDA A.M., FARAG W.A., MAHGROUB O.A., *Modeling and control of direct driven PMSG for ultra large wind turbines*, World Academy of Science, Engineering and Technology, 2011, 59, 918–924.
- [6] MALINOWSKI M., STYNSKI S., KOLOMYJSKI W., KAZMIERKOWSKI M., *Control of Three-Level PWM Converter Applied to Variable-Speed-Type Turbines*, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2009. Vol. 56, No. 1, 69–77.
- [7] MARQUES G.D., *A Simple and Accurate System Simulation of Three-phase Diode Rectifiers*, Proc. of the 24th Ann. Conf. IECON '98, Vol. 1, 416–421.
- [8] ROLAN A., LUNA A., VAZQUEZ G., *Modeling of a variable speed wind turbine with a permanent magnet synchronous generator*, Proc. of International Symposium on Industrial Electronics ISIE '09, 2009.
- [9] WU B., LANG Y., ZARGARI N., KOURO S., *Power Conversion and Control of Wind Energy Systems*, John Wiley & Sons, 2011.

MODELING AND ANALYSIS OF WIND POWER SYSTEM WITH PMSG GENERATOR

The paper presents the converter systems of wind turbine with permanent magnet synchronous generator (PMSG). The mathematical models of converter wind power systems have been described. Simulation studies of the selected converter wind power system with direct connection of the wind turbine and PMSG generator have been presented. The simulation studies have demonstrated the ability of the considered system to stabilize the output voltage and frequency at variable wind speed.