

Współpraca źródeł wiatrowych z PMSG z siecią elektroenergetyczną w stanach nieustalonych - wybrane zagadnienia

Streszczenie. W artykule przedstawiono zagadnienie matematycznego modelowania struktur siłowni wiatrowych z generatorami synchronicznymi PMSG (Permanent Magnet Synchronous Generator) współpracujących z siecią elektroenergetyczną, ze szczególnym uwzględnieniem badań symulacyjnych nieustalonych stanów pracy takich źródeł. Wyniki badań mogą być wykorzystane m.in. do oceny wielkości elektrycznych w miejscu przyłączenia elektrowni do sieci, a także do analiz możliwości utrzymania źródła wiatrowego w pracy podczas zakłóceń (np. zwarć) w sieci. Szczególną uwagę poświęcono kwestii modelowania układów przekształtnikowych zapewniających właściwą współpracę źródła z siecią elektroenergetyczną. Do kompozycji modeli wykorzystano procedury dostępne w środowisku programu PSCAD/EMTDC™.

Abstract. The problem of mathematical modeling of the wind sources implementing Permanent Magnet Synchronous Generator (PMSG) co-operating with electrical power network is discussed in the paper. Special attention is paid to the simulation of transient states that may occur in such sources operation. The simulations results may be used e.g. for evaluation of the electrical quantities at the point of common coupling as well as for the analysis of the source drive-through possibility during disturbances (e.g. faults) in the network. Particular consideration has been drawn to the modeling of power electronics interface, which enables proper cooperation of the wind source and the network. For the models composition the procedures of PSCAD/EMTDC™ program has been used. (**Cooperation of the PMSG-based Wind Sources with Power Networks During Transients – Chosen Problems**).

Słowa kluczowe: turbiny wiatrowe, generatory synchroniczne z magnesami trwałymi (PMSG), stany nieustalone.

Keywords: wind turbines, permanent magnet synchronous generators (PMSG), transient states.

doi:10.12915/pe.2014.03.12

Wprowadzenie

Niniejszy artykuł wpisuje się w zagadnienie pracy elektrowni wiatrowych (EW) w systemie elektroenergetycznym, w zakresie matematycznego modelowania źródeł wiatrowych dla potrzeb badań stanów dynamicznych, a w szczególności nieustalonych stanów elektromagnetycznych związanych na przykład ze zwarzaniem lub innymi procesami łączeniowymi zachodzącymi w otoczeniu źródła. Zastosowane w tym celu oprogramowanie PSCAD/EMTDC umożliwia realizację tzw. modelu fizycznego [5], to znaczy takiego, w którym reprezentowane są matematycznie wszystkie, istotne elementy układu. W przypadku źródeł wiatrowych są to przede wszystkim modele: wiatru, turbiny, generatora, układu przekształtnikowego, łączników, transformatorów, linii i systemu. Szczególną uwagę poświęcono kwestii modelowania układów przekształtnikowych stosowanych dla poprawienia warunków współpracy źródła wiatrowego z siecią.

Moc mechaniczna uzyskiwana ze strumienia wiatru zależy od jego energii kinetycznej oraz od konstrukcji i parametrów przetwornika (turbiny wiatrowej) [5]. Z kolei sterowanie mocą uzyskiwaną z przepływającego przez przetwornik strumienia powietrza odbywa się na zasadzie regulacji kąta nachylenia łopatek względem płaszczyzny obrotu koła turbiny (ang. *pitch control*) lub przez ustawienie łopatek w tzw. pozycji przeciągania (*stall control*). Przy modelowaniu turbiny uwzględnia się ponadto wahania momentu mechanicznego, które przenoszą się na wielkości wyjściowe elektrowni wiatrowej, tzn. na jakość wytwarzanej energii. Wahania te wynikają m.in. z takich czynników, jak: niesymetria koła wiatrowego oraz efekt przechodzenia koła przez „cień” wieży elektrowni.

W energetyce wiatrowej, do przemiany energii mechanicznej w elektryczną, wykorzystywane są zarówno generatory asynchroniczne (indukcyjne) jak i synchroniczne. Z różnych względów (zwłaszcza ekonomicznych) przeważają zastosowania tych pierwszych, przy czym w większości są to maszyny indukcyjne klatkowe dwubiegowe. Oprócz nich stosowane są również: maszyny indukcyjne pierścieniowe dwustronnie zasilane (DFIG), maszyny synchroniczne wolnobieżne, stosunkowo nieliczne maszyny indukcyjne jednobiegowe, a także generatory

synchroniczne szybkoobrotowe z magnesami trwałymi [1].

Wymagania wobec generatorów stosowanych w źródłach wiatrowych koncentrują się na następujących aspektach: utrzymanie napięcia, wymiana mocy biernej, regulacja napięcia, regulacja częstotliwości i ograniczenie mocy. Generatory o stałej prędkości, których moc czynna regulowana jest kątem pochylenia łopatek, jako takie nie są w stanie aktywnie uczestniczyć w procesie utrzymania stabilności sieci o ile nie zostaną dodatkowo wyposażone w zasobnik energii.

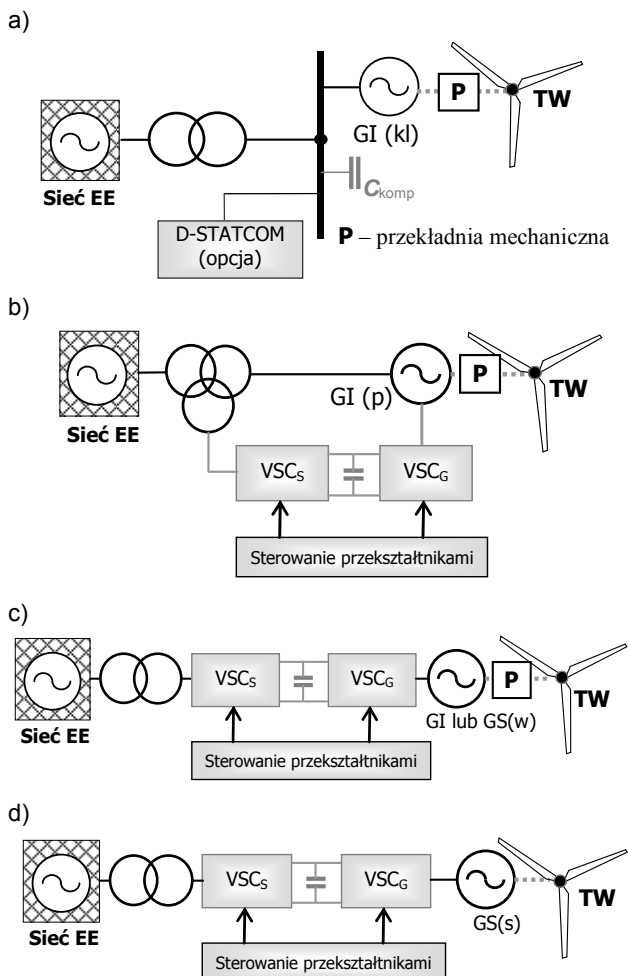
W dalszej części artykułu opisane zostaną podstawowe struktury funkcjonalne elektrowni wiatrowych sklasyfikowane w zależności od zastosowanego rodzaju generatora i układu przekształtnikowego, a także od sposobu przyłączenia do sieci.

Układy energoelektroniczne w elektrowniach wiatrowych – wybrane zagadnienia

Maszyny indukcyjne i synchroniczne wykorzystywane w elektrowniach wiatrowych mogą współpracować z siecią przy zastosowaniu różnych układów połączeń i środków technicznych. Typowe warianty przedstawiono na rys. 1. We współczesnych rozwiązaniach istotną rolę w zakresie współpracy źródła wiatrowego z siecią pełnią układy energoelektroniczne, poprawiają one warunki pracy źródła m.in. w zakresie regulacji mocy biernej. Stosowane rozwiązania pozwalają na to, by siłownia wykorzystywała maksimum mocy wiatru, natomiast regulacja mocy czynnej i biernej dostarczanej do sieci odbywa się na poziomie układu przekształtnikowego. Należy jednak zaznaczyć, że układy takie znacznie podwyższają koszty elektrowni, a także zwiększają stopień złożoności układu wytwórczego.

Głównym kryterium klasyfikacji układów przekształtnikowych stosowanych w EW jest ich moc znamionowa odniesiona do mocy układu wytwórczego. Rozróżnia się zatem przekształtniki „pełnomocowe” (*full scale power electronics units*) oraz przekształtniki o mocy wystarczającej dla zadanego zakresu regulacji (*partial scale power electronics units*). W układach z klatkowym lub pierścieniowym generatorem indukcyjnym (np. rys. 1a) stosowane są różne sposoby sterowania pracą turbiny (tzn. *pitch*, *stall*, *active stall*), natomiast elementy i układy energo-

elektroniczne mają niewielką moc, bowiem stosowane są do kompensacji mocy biernej (np. STATCOM), a także do soft startu oraz do załączania dodatkowej rezystancji w obwód wirnika, co pozwala na pracę siłowni przy prędkości zmieniającej się w niewielkim zakresie (2÷4%).



Rys. 1. Uproszczone schematy układów przyłączenia źródeł wiatrowych do sieci: a) układ z generatorem indukcyjnym klatkowym, b) układ z generatorem indukcyjnym pierścieniowym dwustronnie zasilanym (DFIG), c) układ z generatorem indukcyjnym klatkowym lub synchronicznym wolnoobrotowym, d) układ z generatorem synchronicznym szybkoobrotowym (PMSG)

Układ z dwustronnie zasilanym generatorem indukcyjnym (rys. 1b) wykorzystuje przekształtnik średniej mocy (ok. 30% mocy znamionowej generatora), który steruje prądem wirnika, umożliwiając pracę siłowni przy zakresie zmian prędkości obrotowej rzędu 60% prędkości synchronicznej. Rozwiązanie to obciążone jest wyższym kosztem, ale oferuje znacznie lepsze możliwości współpracy z siecią w stosunku do opisanych wcześniej rozwiązań. Odnosi się to zwłaszcza do kompensacji lub wytwarzania mocy biernej, a także lepszego wykorzystania energii wiatru i tolerancji na zakłócenia zwarciami w sieci [12].

Na rysunkach 1c i 1d pokazano przykładowe struktury EW wykorzystujące „pełnomocowe” układy przekształtnikowe. Wady tych rozwiązań to: wysoki koszt oraz dodatkowe straty wynikające z przetwarzania energii. Przeciwwagę stanowią jednak istotne zalety, do których należy zaliczyć: odseparowanie generatora od sieci, co pozwala na szybkie sterowanie mocą czynną i bierną na poziomie przekształtnika sieciowego VSC_S, a także daje

możliwość wyeliminowania przekładni mechanicznej przy zastosowaniu generatora synchronicznego wielobiegunowego (w tym przypadku wymagany jest dodatkowy przekształtnik do zasilania obwodu wzbudzenia) lub generatora synchronicznego z magnesami trwałymi (PMSG).

Warto zauważyć, że szczególne wymagania dla układów przekształtnikowych stwarzają farmy wiatrowe typu off-shore, których moce znamionowe oraz znaczenie dla systemu jest porównywalne z elektrowniami klasycznymi. W takich farmach układy przekształtnikowe stosuje się m.in. w kompensatorach energoelektronicznych dużej mocy (ASVC) oraz w zaawansowanych interfejsach HVDC [2].

Współczesne EW wykorzystują różne struktury układów energoelektronicznych, w tym przekształtnikowe źródła napięcia (*Voltage Sourced Converters*) sterowane z pomocą technik PWM (*Pulse Width Modulation*). Struktury te zostały zamodelowane i zaimplementowane do badań symulacyjnych z wykorzystaniem procedur programu EMTDC oraz graficznego interfejsu PSCAD.

Modelowanie wybranych elementów elektrowni wiatrowej do symulacji stanu nieustalonego

Istotnym zagadnieniem modelowania matematycznego elementów układu elektroenergetycznego jest charakter analizy rozpatrywanego stanu tego układu. Z uwagi na to, że stan ustalony w SEE praktycznie nie występuje, bardzo często dopuszcza się w modelowaniu szereg uproszczeń zakładających tzw. stan quasi-ustalony [5]. Takie założenie przyjmuje się na przykład w obliczeniach rozpyłów prądów obciążeniowych elementów układu, określanych jako rozpyły mocy. Szczególnym „wyzwaniem” dla modelowania są stany nieustalone, które, w pewnym uproszczeniu, można podzielić na: stany elektromechaniczne, związane z oddziaływaniem układów regulacji źródeł energii oraz stany elektromagnetyczne, związane ze skokowymi zmianami napięć i prądów wywołanych na przykład operacjami łączeniowymi, a zwłaszcza zvarciami w systemie.

W niniejszym artykule odniesiono się zwłaszcza do stanów nieustalonych elektromagnetycznych, dla modelowania których można zastosować zaawansowane procedury obliczeniowe realizowane w dziedzinie czasu (lub czasu i częstotliwości), dostępne w programach typu EMTD (*Electro-magnetic Transients Program*) [3]. W dalszej części zostaną krótko opisane podstawowe elementy modelu siłowni wiatrowej zrealizowanego w środowisku programu PSCAD/EMTDC.

Moment na wale turbiny siłowni wiatrowej można zapisać równaniem:

$$(1) \quad T_m = \frac{\rho}{2} \pi \cdot R^3 \cdot C_p(\lambda, \vartheta) \cdot v_w^2$$

gdzie: ρ - gęstość powietrza, R - długość łopaty turbiny, v_w - prędkość wiatru, $C_p(\lambda, \vartheta)$ - współczynnik zależny od tzw. wyróżnika szybkobieżności λ oraz kąta nachylenia łopaty ϑ .

Z kolei moc mechaniczną uzyskiwaną przez przetwornik wiatru można obliczyć ze wzoru:

$$(2) \quad P_m = \frac{\rho}{2} \pi \cdot R^2 \cdot C_p(\lambda, \vartheta) \cdot v_w^3$$

Z uwagi na to, że badania symulacyjne będą się odnosiły głównie do elektromagnetycznych stanów nieustalonych, wykorzystano uproszczony model sieci z odbiorami skupionymi w kilku wybranych punktach, pominięto regulację turbiny i reprezentowano ją za pomocą

stałego momentu mechanicznego lub stałej mocy mechanicznej na wale.

Jak wspomniano, generatory synchroniczne wielobiegunowe z magnesami trwałymi znajdują coraz szersze zastosowanie w energetyce wiatrowej. Wykonywane są one w rozmaitych wariantach konstrukcyjnych [1], ale dla poznania związków z ich pracą zjawisk można je opisać za pomocą uogólnionego modelu matematycznego.

Równania opisujące model PMSG w dziedzinie czasu można zapisać w postaci:

$$(3) \quad \frac{d}{dt} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} = \begin{bmatrix} -\frac{R_s}{L_d} & \frac{L_q p \omega_m}{L_d} \\ -\frac{L_d p \omega_m}{L_q} & -\frac{R_s}{L_q} \end{bmatrix} \begin{bmatrix} i_{ds} \\ i_{qs} \end{bmatrix} + \begin{bmatrix} \frac{u_{ds}}{L_d} \\ \frac{u_{qs} - p \omega_m \psi_{pm}}{L_q} \end{bmatrix}$$

gdzie: i_{ds}, i_{qs} - składowe prądu stojana; u_{ds}, u_{qs} - składowe napięcia stojana; R_s - rezystancja uzwojeń stojana; L_d, L_q - składowe (podłużna i poprzeczna) indukcyjności, p - liczba par biegunów; ψ_{pm} - strumień magnetyczny.

Moment elektromagnetyczny PMSG można zapisać wzorem:

$$(4) \quad T_e = \frac{3}{2} p [\psi_{pm} i_{qs} + (L_d - L_q) i_{ds} i_{qs}]$$

Równanie ruchu generatora przyjmuje postać:

$$(5) \quad \frac{d\omega_m}{dt} = \frac{1}{2H} (T_e - F\omega_m - T_m)$$

$$\omega_m = \frac{d\theta_m}{dt}$$

gdzie: H jest momentem bezwładności, F współczynnikiem tarcia, T_m momentem mechanicznym, ω_m mechaniczną prędkością kątową wirnika, p liczbą par biegunów.

Modelowanie i symulacja układów przekształtnikowych w analizie stanów nieustalonych wymaga dokładnego odwzorowania procesów zachodzących w bardzo krótkich przedziałach czasowych (rzędu μs) związanych ze zmianą stanu zaworów energoelektronicznych. W programie EMTDC zastosowano w tym celu podejście oparte na metodzie zmiennej struktury analizowanego układu.

Wybrane wyniki badań symulacyjnych

Pierwszym etapem badań jest kompozycja modelu turbiny i generatora wraz z ich podstawowymi układami regulacji. W efekcie uzyskuje się w płaszczyźnie graficznej (PSCAD) schemat zbliżony do pokazanego na rys. 3. Do badań symulacyjnych przyjęto maszynę synchroniczną o mocy $S_{rG}=3$ MW, $U_{rG}=690$ V i liczbie par biegunów $p=100$.

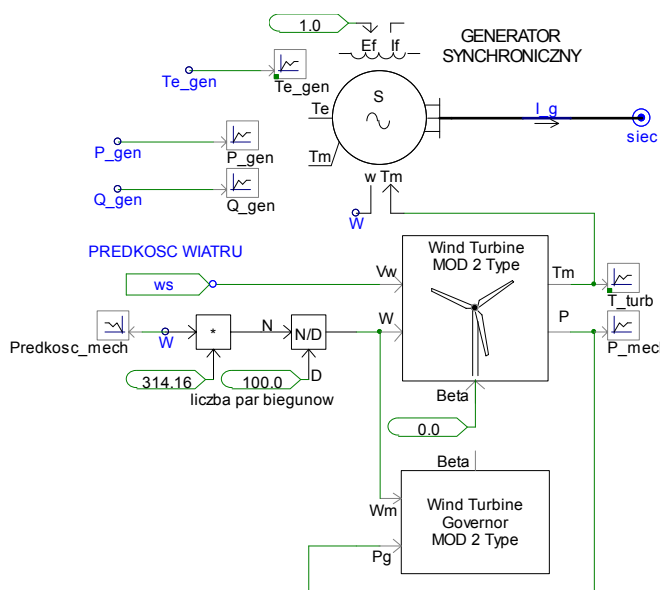
W celu weryfikacji modelu układu generator obciążono rezystancyjnie, odpowiednio do maksymalnej mocy czynnej ($\beta=0$) przy prędkości wiatru $v_w=15$ m/s. W wyniku przeprowadzonych symulacji otrzymano m.in. przebiegi wielkości elektrycznych (moce czynna i bierna generatora) i mechanicznych (momentu turbiny i generatora, prędkości i mocy) pokazane na rys. 4.

Widać, że po skokowej zmianie parametrów w chwili startu symulacji następuje proces regulacji, w wyniku którego dochodzi do ustalenia wartości (po ok. 40 s) m.in. momentów i mocy. Moc bierna nie występuje z uwagi na czynny charakter obciążenia generatora.

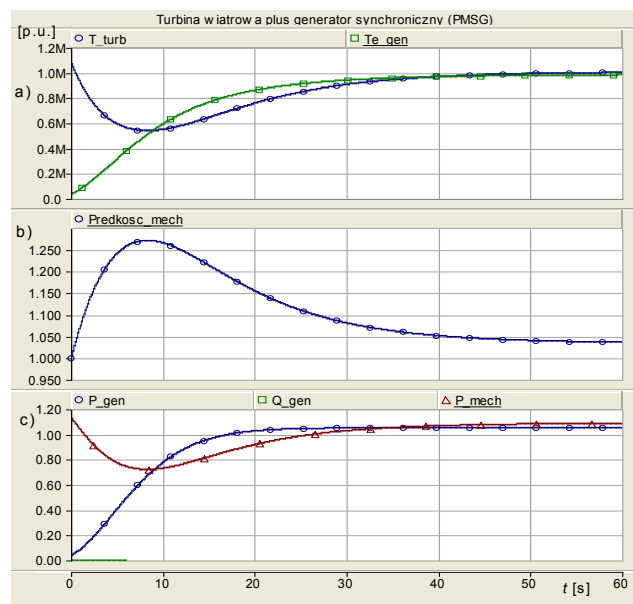
W kolejnych etapach modelowania wprowadzono m.in.: model prostownika, gałęzi stałoprądowej, zabezpieczenia przeciwprzepięciowego, rezystora, który zapobiega zwarceniu przekształtnika w stanie rozładowania kondensatora oraz dławika po stronie stałoprądowej.

Na rys. 5 pokazano przebiegi momentów i mocy siłowni wiatrowej, a na rys. 6 przebiegi napięcia i prądu po stronie DC prostownika.

Uzyskanie pełnego modelu źródła wiatrowego wymaga wprowadzenia modelu falownika, doboru kondensatora na jego wyjściu oraz doboru transformatora sprzęgający źródło z siecią.



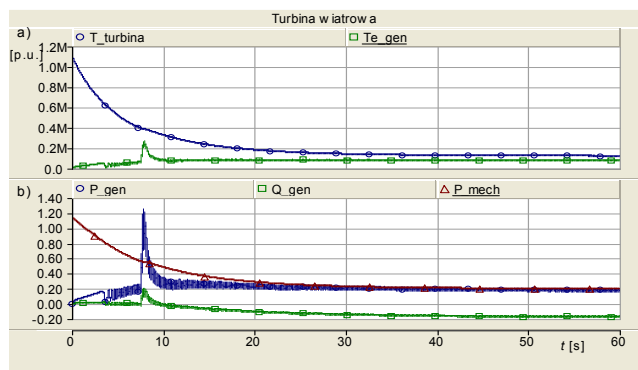
Rys. 3. Uproszczony schemat układu turbina wiatrowa – generator synchroniczny (PMSG)



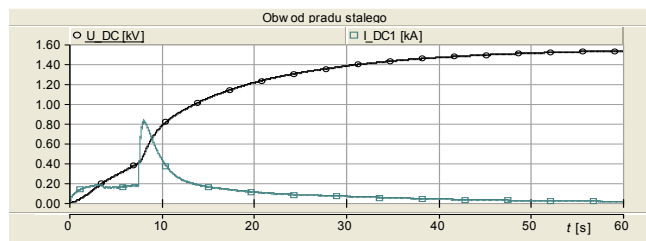
Rys. 4. Przebiegi zmian: a) momentów turbiny i generatora, b) prędkości mechanicznej, c) mocy mechanicznej oraz mocy czynnej i biernej generatora w modelu z rys. 3

W wariancie uproszczonym przyjęto źródło o mocy 1 MVA, które przyłączone jest do sieci rozdzielczej 20 kV przez falownik prądu i transformator podwyższający napięcie. Prędkość wiatru wynosiła 13 m/s, a w chwili zwarcia generator wytwarzał ok. 25% mocy znamionowej. Zwarcie trójfazowe w sieci, które wystąpiło w 45 s i trwało 700 ms (rys. 7) spowodowało zapad napięcia w PCC o głębokości ok. 60% (rys. 7a), którego skutkiem był wzrost mocy wyjściowej (rys. 7b), a także wzrost momentu elektromagnetycznego i mocy bierniej.

W przypadku farmy wiatrowej o znacznej mocy, przyłączanej np. do sieci rozdzielczej 110 kV należy zapewnić, aby napięcie było utrzymywane na stałym poziomie (1 p.u.), a ponadto przebiegi napięć fazowych źródła (przekształtnika sieciowego) muszą być w pełni zsynchronizowane z napięciami sieci. W tym celu w miejsce prostego falownika należy zastosować przekształtnikowe źródło napięcia oraz pętlę fazową w układzie sterowania. Źródło takie odpowiada strukturze typowego kompensatora D-STATCOM. Parametry sterowania przełączaniem metodę takiego źródła można zoptymalizować stosując metodę opisaną np. w [11].



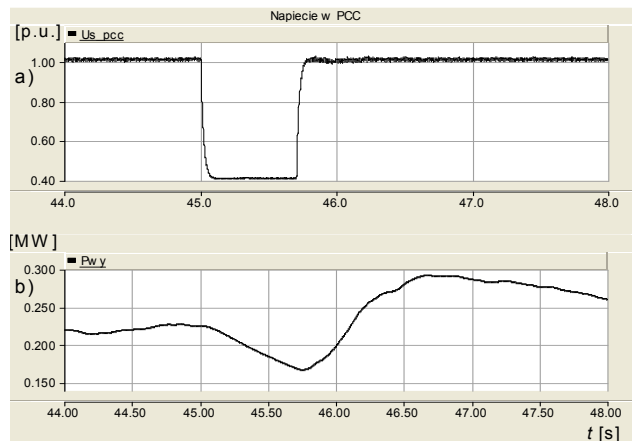
Rys. 5. Przebiegi zmian: a) momentów turbiny i generatora, b) mocy mechanicznej oraz mocy czynnej i bierniej generatora



Rys. 6. Przebiegi prądu i napięcia po stronie stałoprądowej układu przekształtnikowego elektrowni wiatrowej

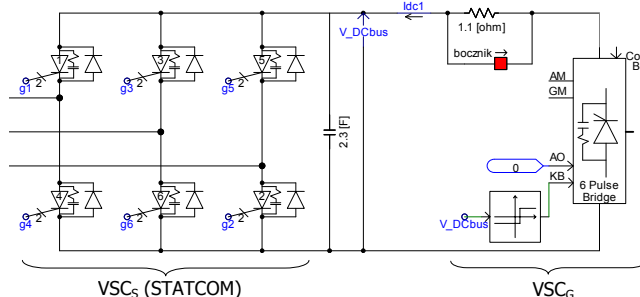
Uwagi do sterowania i zabezpieczeń układu z PMSG

W większości zainstalowanych obecnie elektrowni wiatrowych stosowane jest automatyczne wyłączenie turbozespołu w sytuacji awarii w sieci powodującej zapad napięcia. Ponowne załączenie następuje po przywróceniu stanu normalnego. Aby jednak nie dochodziło do częstego wyłączania źródeł wiatrowych stawia się im coraz wyższe wymagania w zakresie odporności na zapady napięcia wywołane np. zwarciami w sieci (*fault ride through capability*) [10]. Jest to jedno z podstawowych zadań układu sterująco-zabezpieczeniowego. W rozpatrywanym przypadku źródła wiatrowego z PMSG kwestią kluczową jest sterowanie układem przekształtnikowym wyprowadzającym moc ze źródła do sieci, a w szczególności poziomem napięcia gałęzi stałoprądowej. Do sterowania przekształtnikami wykorzystuje się znane techniki SVM (*Space Vector Modulation*) i PWM (*Pulse Vector Modulation*) oraz ich modyfikacje [2, 14].



Rys. 7. Przebiegi zmian: a) napięcia w PCC i mocy oddawanej przez źródło podczas zwarcia w sieci

Na rysunku 8 przedstawiono fragment schematu układu z przekształtnikowym źródłem napięcia w postaci 6-pulsowego STATCOMu sterowanego przy wykorzystaniu PWM ($m_t=33$) i zsynchronizowanego z napięciem sieci za pomocą pętli fazowej, a na rys. 9 przedstawiono przebiegi wybranych wielkości STATCOM podczas zwarcia w sieci.

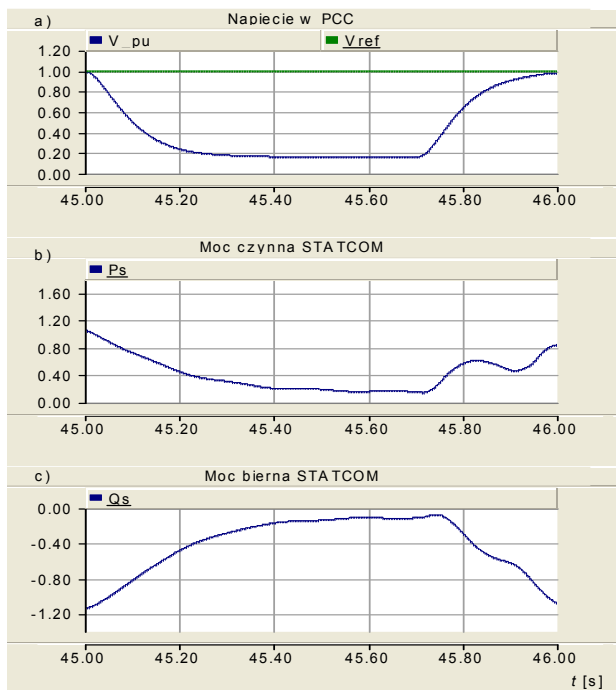


Rys. 8. Uproszczony schemat interfejsu siłowni z PMSG w tzw. wariancie „wielkoskalowym”

Zabezpieczenia od skutków rozmaitych stanów zakłóceńowych, stosowane w elektrowniach wiatrowych wykorzystują funkcje analogiczne do stosowanych w konwencjonalnych jednostkach wytwórczych z odpowiednim uwzględnieniem specyfiki siłowni wiatrowej, w tym sposobu jej przyłączenia do sieci. W szczególności istotne jest, czy mamy do czynienia z pojedynczą siłownią przyłączoną do sieci rozdzielczej, czy z farmą wiatrową złożoną z wielu turbin, z których każda może osiągać moc do 5 MW. Wpływa to istotnie na układ zabezpieczeń, który obejmuje, obok strefy generatora także układ przekształtnikowy, a ponadto strefy: transformatorów nn/SN, linii łączących ze stacją SN/WN, szyn zbiorczych SN i WN oraz transformatorów SN/WN.

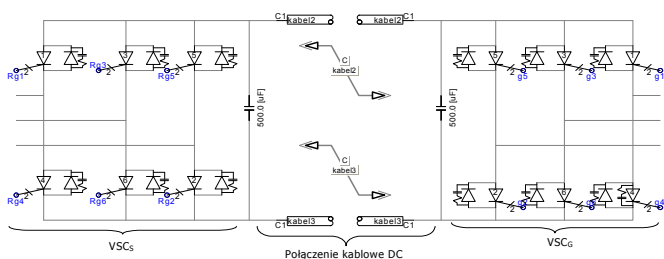
W przypadku elektrowni (farm) z generatorami PMSG szczególną uwagę należy poświęcić kwestii zapewnienia prawidłowego funkcjonowania układu przekształtnikowego, który „przenosi” moc czynną wytwarzaną przez generator. W praktyce układ zabezpieczeń dostosowany jest do jednego z dwóch rozwiązań: dla układów małej mocy stosowany jest prostownik diodowy połączony z falownikiem przez tzw. *boost-converter* (prosty przekształtnik podwyższający napięcie), a w dużych farmach (np. *off-shore*) stosuje się układ dwóch przekształtnikowych źródeł napięcia typu *back-to-back* (por. rys. 10). W pracy tych ostatnich do najgroźniejszych zakłóceń należą przetężenia w kablu stałoprądowym (związane z rozładowaniem kondensatora) oraz rozbieganie generatora na skutek nadmiaru energii. W pierwszym przypadku stosuje się zabezpieczenia

nadprądowe, natomiast w drugim stosowane są np.: wyłącznik w gałęzi prądu stałego, przetwornica DC (*chopper*) zapobiegająca nadmiernemu wzrostowi napięcia stałego, rezystor szeregowy w gałęzi DC, rezystor szeregowy i rezystor bocznikujący (obciążenie hamujące) w gałęzi AC (za generatorem) oraz dynamiczne sterowanie kątem ustawienia łopaty (*pitch control*) dla zredukowania momentu napędowego turbiny.



Rys. 9. Przebiegi zmian: a) napięcia w PCC i mocy oddawanej przez źródło STATCOM (VSC_S) podczas bliskiego zwarcia w sieci

Na rysunku 11 pokazano przykładowe przebiegi napięcia (rys. 11a) i prądu (rys. 11b) po stronie stałoprądowej oraz współczynników modulacji amplitudy i częstotliwości (rys. 11c) w układzie sterowania przekształtnikiem sieciowym (VSC_S) podczas zwarcia do ziemi linii kablowej (biegun dodatni). W źródłach „małoskalowych” *pitch control* zazwyczaj nie jest stosowany, natomiast pozostałe środki są analogiczne do wymienionych wyżej. Podstawowy cel ich stosowania stanowi rozproszenie nadmiernej energii powstałej w wyniku zakłócenia zwarciowego [13].

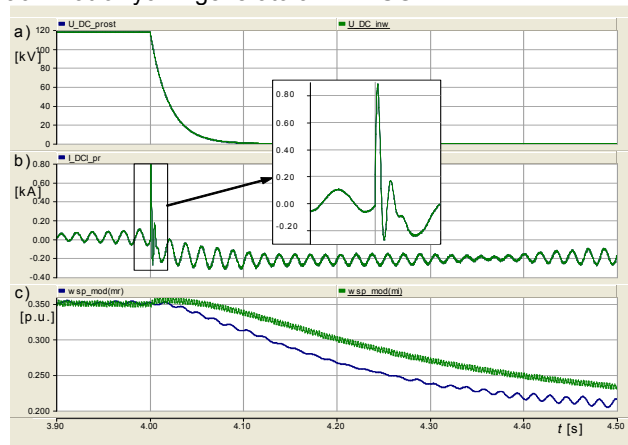


Rys. 10. Uproszczony schemat interfejsu siłowni z PMSG (wariant „wielkoskalowy” w układzie *back-to-back* z linią kablową)

Podsumowanie

W artykule opisano zagadnienie kompozycji modeli symulacyjnych elektrowni wiatrowej z PMSG dla dwóch wariantów: małoskalowego w postaci pojedynczej siłowni przyłączanej do sieci SN oraz dla wariantu wielkoskalowego (np. farma *off-shore*) przyłączonego do sieci WN. Uzyskane wyniki symulacji pokazują m.in., że prawidłowo wyłączone zwarcia w sieci nie powodują konieczności wyłączenia źródła, bowiem odpowiednie sterowanie przekształtnikami

ogranicza wpływ obniżenia napięcia spowodowanego zwarcie. Z kolei nawet krótkotrwałe zwarcie w gałęzi stałoprądowej powoduje utratę zdolności źródła do dalszej pracy z uwagi na załamanie napięcia wejściowego falownika. Zwrócono także uwagę na wybrane aspekty realizacji funkcji sterująco-zabezpieczeniowych w elektrowniach wiatrowych z generatorami PMSG.



Rys. 11. Przebiegi zmian: a) napięcia, b) prądu w gałęzi stałoprądowej i c) współczynników modulacji VSC_S podczas zwarcia doziemnego kabla prądu stałego

LITERATURA

- [1] Ackermann T. (Editor): Wind Power in Power systems. John Wiley and Sons, Ltd, 2005.
- [2] Blaabjerg F., Chen z., Kjaer s. B.: Power Electronics as Efficient Interface in Dispersed Power Generation Systems. IEEE Transactions on Power electronics, Vol. 19, No.5/2004, pp. 1184 – 1194.
- [3] EMTDC: Transient Analysis for PSCAD Power System Simulation – User’s Guide. Manitoba HVDC Research Centre Inc., Manitoba, Canada, 2003.
- [4] Hunt R., Cardenas J., Muthukrishnan V., McGinn D.: Wind Farm Protection Using an IEC 61850 Process Bus Architecture. Proceedings of Distribu-Tech Conference, March 23, 2010.
- [5] Lubośny Z.: Elektrownie wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. WNT Warszawa 2006.
- [6] Paska J.: Wytwarzanie rozproszone energii elektrycznej i ciepła. Oficyna Wydawnicza Politechniki Warszawskiej, 2010.
- [7] Strzelecki R., Benysek G. (Eds.): Power Electronics in smart electrical Energy Networks. Springer Verlag, London 2008.
- [8] Technical Paper: Wind Turbine applications in PSCAD. CEDRAT Cedex/France, 2006.
- [9] Teodorescu R., Liserre M., Rodriguez P.: Grid Converters for Photovoltaic and Wind Power Systems. John Wiley and Sons, Ltd, 2011.
- [10] Tsili M., Papathanassiou S.: Review of grid code technical requirements for wind farms. IET Renew. Power Gener. 2009, pp. 1 - 25.
- [11] Witek B.: Stany nieustalone w układzie sieć – generator indukcyjny z uwzględnieniem elementów FACTS. Kwartalnik Elektryka, Zeszyt 1/2009, Gliwice 2009, s. 89 – 102.
- [12] Witek B.: Współpraca źródeł wiatrowych z DFIG z siecią elektroenergetyczną w stacjach nieustalonych - wybrane zagadnienia. Przegląd Elektr. 2012 R. 88 nr 9a, s. 87-92.
- [13] Wojszczyk B., Herbst D., Bradt M.: Wind Generation Implementation and Power Protection, Automation and Control Challenges. Proc. of Power-Gen International, 2007, pp. 1 - 14.
- [14] Yang J.: Fault analysis and Protection for Wind Power Generation Systems. University of Glasgow, 2011.

Autor: dr inż. Bernard Witek, Politechnika Śląska, Instytut Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: Bernard.Witek@polsl.pl