

DOI: 10.5604/01.3001.0009.5193

UKŁAD STEROWANIA MAŁĄ ELEKTROWNIĄ WIATROWĄ Z GENERATOREM ASYNCHRONICZNYM

Kamil Moźdzynski¹, Tomasz Gajowik¹, Krzysztof Rafał², Mariusz Malinowski¹¹Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ²Politechnika Warszawska, Instytut Techniki Ciepłej

Streszczenie. Artykuł przedstawia układ sterowania elektrownią wiatrową z generatorem asynchronicznym klatkowym o mocy 11 kW. Generator asynchroniczny w porównaniu do generatora synchronicznego cechuje niższy koszt i większa niezawodność, jednak ze względu na zjawiska związane ze wzbudzeniem, konieczne jest stosowanie bardziej złożonego układu przekształtnikowego oraz dodatkowej aparatury wspomagającej działanie elektrowni wiatrowej w rzeczywistych warunkach. W rezultacie układ sterowania przekształtnika energoelektronicznego sprzęgającego generator z siecią energetyczną wymaga dodatkowego rozbudowania o możliwość zarządzania całą elektrownią. W artykule omówiono zagadnienia i wyniki eksperymentalne związane ze stanami pracy systemu małej elektrowni wiatrowej oraz pętlami sterowania procesem przetwarzania mocy.

Słowa kluczowe: Odnawialne źródła energii, Sterowanie mocą, Przekształtnik AC-DC-AC, Generator indukcyjny, Elektrownia wiatrowa.

CONTROL A SMALL WIND TURBINE WITH ASYNCHRONOUS GENERATOR

Abstract. The article presents the control system wind turbine with asynchronous squirrel cage generator with a capacity of 11 kW. Asynchronous generator compared to the synchronous generator characterized by a lower cost and higher reliability, but because of the phenomena associated with excitation, it is necessary to use a more complex system of the converter and an additional devices supporting the operation of the wind power plant under realistic conditions. As a result, control of the power electronic inverter coupling generator with power grid requires additional expand on the ability to manage the entire power plant. The article discusses the issues and experimental results related to the states of the system of small wind power plant and process control loops of power processing.

Keywords: Renewable energy sources, Power control, AC-DC-AC Power converter, Induction generator, Wind energy generation.

Wstęp

Nieustanny rozwój technologii odnawialnych źródeł energii OZE sprawia, że opracowanych jest coraz więcej alternatywnych rozwiązań. W rezultacie systemy OZE stają się powszechnie dostępne, a pojedyncze gospodarstwa domowe mogą zostać wyposażone w instalacje wytwarzające energię elektryczną na potrzeby własne i ewentualną nadwyżkę dostarczać do sieci elektroenergetycznej. Szczególnie istotny jest tu wskaźnik ekonomiczny dotyczący opłacalności instalacji OZE, opierający się o potencjalną ilość generowanej energii w porównaniu do ceny tej energii zakupionej od generalnego dystrybutora. Z punktu widzenia mikrogeneracji istnieją dwa najbardziej powszechne typy instalacji: słoneczna i wiatrowa. O opłacalności decydują tu warunki pogodowe panujące na danym obszarze oraz koszt aparatury. Północne obszary Ziemi charakteryzują się relatywnie małą liczbą dni słonecznych, dodatkowo mały kąt padania promieni na panele znacząco obniża zdolność przetwarzania energii. Stąd korzystną alternatywę stanowią elektrownie wiatrowe.

1. Mała elektrownia wiatrowa

Rozpatrując systemy elektrowni wiatrowych małej i średniej mocy do 100 kW przeważają elektrownie z poziomą osią obrotu [7]. Jako przetwornik energii mechanicznej na elektryczną stosowane są: generatory synchroniczne (ang. *Permanent Magnet Synchronous Generator – PMSG*). Natomiast alternatywą jest generator asynchroniczny, który cechuje znacznie niższy koszt produkcji i większa niezawodność. Obecnie stosowane są trzy metody sprzęgania generatora asynchronicznego z siecią. Połączenie bezpośrednie (rys. 1a), gdzie utrzymywana jest stała prędkość obrotowa generatora [2]. Kolejną możliwością jest zastosowanie generatora asynchronicznego zasilanego dwustronnie [6] (ang. *Doubly Fed Induction Generator – DFIG*), gdzie obwód stojana jest bezpośrednio połączony z siecią, natomiast układ przekształtnikowy dołączony jest do obrotu wirnika (rys. 1b). Ze względu na złożoność jest rzadko stosowana z małych elektrowni wiatrowych. Ostatnia konfiguracja to generator asynchroniczny klatkowy, którego obwód stojana dołączony jest do układu przekształtnikowego AC-DC-AC (rys. 2). Podstawowy wymóg stawiany systemom elektrowni wiatrowych to maksymalizacja generowanej energii w jak najszerszym zakresie prędkości wiatru, co uzyskuje się przez regulację prędkości obrotowej wirnika. Dodatkowo porządana jest

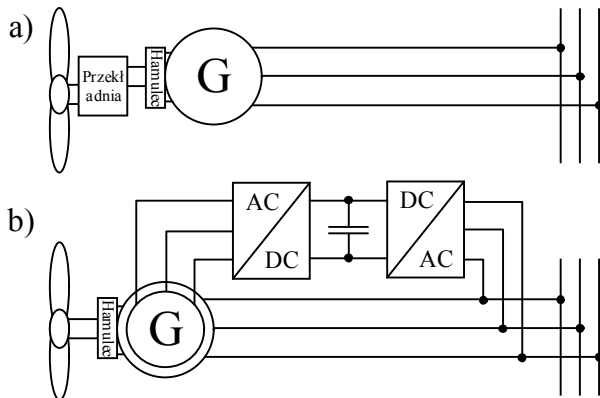
możliwość dołączenia zasobnika energii. W rezultacie jedynie sprzężenie obrotu stojana z siecią poprzez przekształtnik AC-DC-AC spełnia wymienione wymagania.

Wykorzystanie generatora asynchronicznego w każdym przypadku wymaga dodatkowej aparatury wspomagającej proces wytwarzania energii elektrycznej. Wynika to przede wszystkim z braku wewnętrznej wzbudzenia generatora, co komplikuje procedurę zatrzymania elektrowni w warunkach nadmiernej prędkości wiatru. W małych elektrowniach wiatrowych zazwyczaj nie stosuje się regulacji kąta nachylenia łopatek względem kierunku strumienia wiatru celu regulacji prędkości obrotowej turbiny. Natomiast alternatywę stanowi ster kierunku gondoli, który ustawia płaszczyznę obrotu łopatek turbiny równoległe do strumienia wiatru, co z kolei wyklucza zdolność systemu do generowania energii. Dodatkowo proces zatrzymywania elektrowni wspierany jest przez zewnętrzny hamulec mechaniczny.

Dotychczas w literaturze skupiano się na pojedynczych aspektach sterowania generatorem indukcyjnym, pomijając szereg istotnych czynników związanych z realnymi warunkami pracy. Podstawowa topologia przekształtnika AC-DC-AC okazuje się niewystarczająca do kompleksowej obsługi elektrowni wiatrowej z generatorem indukcyjnym. Konieczna jest rozbudowa systemu o dodatkowe moduły kontroli i monitorowania aparatury wspomagającej proces przygotowania elektrowni. Natomiast sam przekształtnik musi zostać wyposażony w dodatkowe układy przetwarzania DC-DC do zasobnika energii i rezystora hamującego oraz AC-DC do wstępnego ładowania obrotu pośredniczącego. Również rzadko poruszana jest tematyka scenariuszy działania i maszyn stanów systemu autonomicznego jakim niewątpliwie jest elektrownia wiatrowa. Układ sterowania przekształtnika AC-DC-AC odpowiedzialny był jedynie za regulację toru przetwarzania energii, a do obsługi dodatkowych modułów automatyki zazwyczaj stosowano sterowniki PLC.

Artykuł prezentuje układ sterowania małą elektrownią wiatrową z generatorem asynchronicznym zaimplementowany w pojedynczym układzie przekształtnikowym zarządzającym pracą wszystkich elementów systemu. W pierwszej kolejności przedstawiono zbiór zagadnień związanych z kolejnymi stopniami przetwarzania energii oraz wzbudzania generatora asynchronicznego. Następnie wykonano analizę zachowania elektrowni w warunkach rzeczywistych, co jest istotne dla doboru metod sterowania elementów składowych systemu. W kolejnej części dobrano metody sterowania przetwarzaniem energii, zoptymalizowane pod względem złożoności obliczeń oraz

zminimalizowano zależność układu sterowania od liczby parametrów poszczególnych elementów systemu. Proponowany układ sterowania zaimplementowano i zweryfikowano na stanowisku eksperymentalnym oraz przedstawiono uzyskane wyniki regulacji w stanach dynamicznych.



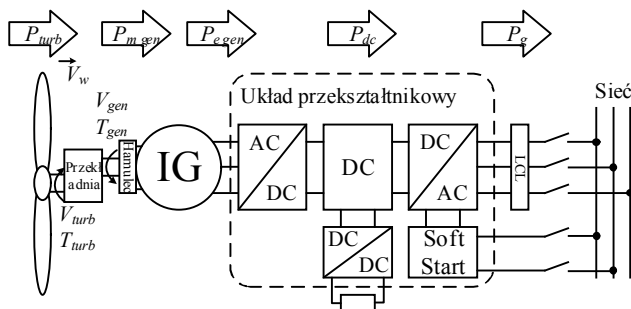
Rys. 1. Metody sprzężenia generatora asynchronicznego z siecią elektroenergetyczną: a) bezpośrednie, b) generator asynchroniczny pierścieniowy

1.1. Przetwarzanie energii w elektrowni wiatrowej z generatorem asynchronicznym

Zastosowanie generatora indukcyjnego w elektrowni wiatrowej wymaga dobrania dodatkowych elementów przetwarzających parametry mocy oraz układów zabezpieczających system w przypadku utraty kontroli przez centralny układ sterowania. Na rysunku 2 przedstawiono schemat systemu z oznaczeniem kolejnych stopni przetwarzania energii. W pierwszej kolejności wymuszony jest ruch obrotowy Ω_{twrb} pod wpływem wiejącego wiatru V_w . Jednak typowe prędkości obrotowe małych turbin dochodzą do 200 obr/min, wykorzystując stosunkowo niski zakres seryjnie produkowanych maszyn indukcyjnych. Z kolei prędkość synchroniczną generatora można obniżyć stosując większą liczbę biegunów magnetycznych w stojanie. Jednak zwiększa to koszt konstrukcji, a zastosowanie większej liczby biegunów nie wyeliminuje konieczności stosowania przekładni sprzęgającej turbinę z generatorem.

Kolejny etap przetwarzania polega na wzbudzeniu generatora i bezpośredniej kontroli momentu elektromagnetycznego T_e . Zaimplementowany w układzie przekształtnikowym układ sterowania poszukuje maksymalnej wartości generowanej mocy elektrycznej dla danej prędkości wiatru V_w poprzez regulację zadanej prędkości obrotowej generatora V_{gen}^* .

Hamowanie generatora indukcyjnego powoduje zwiększanie energii gromadzonej w obwodzie pośredniczącym, co przekłada się na zwiększanie napięcia w obwodzie pośredniczącym U_{dc} . Następnie, gdy przekroczony zostanie ustalony próg napięcia U_{dc} to regulator oblicza wartość prądu referencyjnego I_d^* . Szczególne istotne jest tu zachowanie możliwie jak najwyższej jakości parametrów prądu i napięcia oraz odpowiednia reakcja na awaryjne stany pracy sieci.



Rys. 2. Schemat systemu małej elektrowni wiatrowej z generatorem indukcyjnym

1.2. Warunki pracy elektrowni wiatrowej

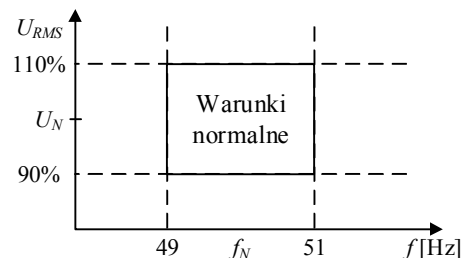
Warunki działania elektrowni wiatrowej uzależnione są od czynników wewnętrznych systemu takich jak stan techniczny poszczególnych elementów systemu oraz czynników zewnętrznych: prędkość wiatru V_w i stan napięcia sieci U_g .

Uszkodzenie pojedynczego elementu w większości przypadków skutkuje utratą kontroli lub utratę możliwości uruchomienia procesu przetwarzania energii (tab. 1). Natomiast wykrywanie usterek może odbywać się w sposób pośredni, czyli bez sygnału sprzężenia zwrotnego z monitorowanego modułu. Zgodnie z uruchomionym scenariuszem pracy powinny zachodzić ściśle powiązane i przewidywalne zjawiska. Stąd na podstawie poszczególnego sprawnego modułu, można ocenić poprawność działania drugiego.

Tabela 1. Wpływ uszkodzenia poszczególnych elementów na pracę systemu.

Element	Skutek awarii	Detekcja
Uszkodzenie czujnika prędkości wiatru	Uniemożliwia ocenę rozruchu lub zatrzymania	Brak lub stała wartość sygnału przetwornika
Uszkodzenie łopat turbiny	Drgania turbiny	Sygnał z czujnika drgań
Przerwa w obwodzie rezystora hamującego	Utrata możliwości hamowania elektrycznego przy jednoczesnym zaniku napięcia sieciowego	Pomiar spadku napięcia w obwodzie pośredniczącym
Przerwa w obwodzie cewki hamulca	Utrata możliwości zwolnienia hamulca	Po zwolnieniu hamulca prędkość obrotowa równa zero
Przerwa w obwodzie steru kierunku	Utrata możliwości prostopadłego ustawienia płaszczyzny wirowania łopat do kierunku wiatru	Zbyt niska prędkość obrotowa i brak generowanej energii
Brak sygnału czujnika prędkości obrotowej	Konieczność sterowania bezczujnikowego	Stała wartość prędkości po zwolnieniu hamulca

Ocena parametrów sieci przez układ sterowania jest szczególnie ważna ze względu na normy i wytyczne dla sprzęgania OZE z siecią elektroenergetyczną [9, 10]. Ściśle określają nominalne warunki dla wartości parametrów napięcia sieciowego. Wykroczenie poza przez zdefiniowany okres czasu, musi skutkować natychmiastowym odłączeniem systemu od sieci.

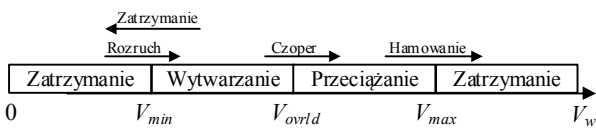


Rys. 3. Zakres pracy sieciowego układu przekształtnikowego

Jeśli wszystkie elementy systemu działają poprawnie i parametry napięcia sieci znajdują się w przedziale wartości znamionowych scenariusz pracy elektrowni uzależniony jest od prędkości wiatru. Rysunek 4. przedstawia zakresy prędkości wiatru wskazujące granice dla poszczególnych stanów systemu. Zakres prędkości wiatru od wartości zerowej do minimalnej V_{min} oznacza, że system znajduje się w stanie beczynności i oczekuje na moment, w którym prędkość wiatru będzie na tyle duża, że produkcja energii pokryje potrzeby własne systemu. Jeśli przez określony czas uśredniona prędkość wiatru utrzymuje się powyżej wartości minimalnej to system może wejść w stan generacji. Następuje zwolnienie hamulca oraz przyłączenie układu przekształtnikowego do sieci i wzbudzenie generatora. Normalna praca systemu trwa do prędkości wiatru, która odpowiada mocy maksymalnej do której został zaprojektowany układ przekształtnikowy. Jednak ze względu na częste porywy wiatru

mogą one powodować jedynie chwilowe przeciążenia. W tej sytuacji zatrzymywanie turbiny nie jest korzystne. A układ przekształtnikowy powinien wytrzymać przeciążenia przez określony czas do momentu przekroczenia bezpiecznej temperatury pracy elementów półprzewodnikowych.

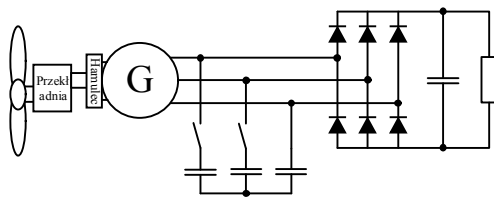
Dłuższe przeciążenie układu przekształtnikowego lub przekroczenie i ciągłe utrzymanie prędkości wiatru powyżej prędkości maksymalnej powoduje uruchomienie procedury hamowania turbiny. Łopaty w małych elektrowniach wiatrowych w większości przypadków nie posiadają kąta nachylenia, w rezultacie rozpędzenie turbiny do nadmiernej prędkości spowoduje urwanie łopat. Procedura hamowania w pierwszej kolejności polega na hamowaniu zwiększonym momentem elektromagnetycznym, a nadmiar energii przekazywany jest na rezystor. Następnie składany jest ster kierunku, ustawiający przekrój wirowania łopat równoległe do kierunku wiatru i zwalniana jest blokada hamulca mechanicznego.



Rys. 4. Schemat zależności stanów pracy elektrowni od prędkości wiatru

2. Wzbudzenie generatora asynchronicznego

Charakterystyka mechaniczna silnika indukcyjnego umożliwia pracę silnikową lub generatorową w zależności od prędkości obrotowej i wzbudzenia. Jeśli generator jest zewnętrznie napędzany, można wykorzystać dwie możliwości wzbudzenia: poprzez dołączenie baterii kondensatorów włączonych równoległe do uzwojeń stojana, wykorzystując zjawisko magnetyzmu szczątkowego w obwodzie magnetycznym wirnika generatora [14, 16]. Drugi sposób wzbudzenia polega na dołączeniu trójfazowego źródła napięcia do obwodu stojana. W przypadku dołączenia źródła nieregulowanego, poprzez stałe przyłączenie do sieci elektroenergetycznej (rys. 1a) wiąże się z wystąpieniem udaru prądowego [2] oraz brakiem kontroli nad dynamicznymi stanami pracy generatora. O ile istnieją sposoby łagodnego załączania i odłączania generatora, to brak kontroli skutkuje brakiem optymalnego generowania energii. Regulowane źródło napięcia w postaci przekształtnika AC/DC/AC umożliwia łagodne wzbudzenie generatora i kontrolę stanów dynamicznych, przy jednoczesnej maksymalizacji energii pobieranej z generatora dzięki algorytmom śledzenia maksymalnego punktu mocy (ang. *Maximum Power Point Tracking MPPT*) [3, 12].

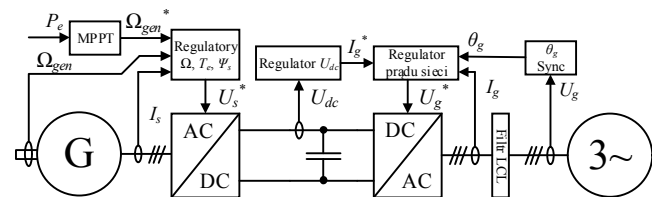


Rys. 5. Schemat układu samowzbudnego generatora asynchronicznego klatkowego

Układ przekształtnikowy AC/DC/AC potrzebuje energii do wzbudzenia generatora, która musi zostać zgromadzona w obwodzie pośredniczącym. W przypadku załączenia rozładowanych kondensatorów do sieci, poprzez diody mostka tranzystorowego przepływnie prąd impulsowy, który może uszkodzić elementy półprzewodnikowe i wprowadza zakłócenia do sieci. W celu uniknięcia impulsu prądowego podczas wstępnego ładowania kondensatorów, stosuje się układ łagodnego ładowania (Soft Start). Mimo, że przygotowanie systemu do generacji wymaga pobrania energii z sieci elektroenergetycznej, to fakt zasilania z sieci powoduje, że układ sterowania jest w stanie szybko przygotować system do wytwarzania energii.

3. Układ sterowania

Układ sterowania małą elektrownią wiatrową podzielono na dwa główne zagadnienia związane z realizacją scenariusza pracy systemu oraz regulacją wielkości fizycznych w procesie przetwarzania energii. Scenariusz pracy realizowany jest poprzez implementację maszyny stanów kierowanej poprzez wyszczególnione zdarzenia takie jak: przekroczenie zadanego progu prędkości wiatru, wykroczenie parametrów napięcia sieci poza wartości normatywne czy sygnał uszkodzenia elementu systemu. Natomiast w celu kontroli procesu przetwarzania energii (rys. 6.) konieczny jest dobór i implementacja odpowiednich metod sterowania w czasie rzeczywistym. Jako nadrzędne wielkości wyróżniono: Moc generowaną P_e , prędkość obrotową generatora Ω_{gen}^* oraz napięcie w obwodzie pośredniczącym U_{dc} . Na ich podstawie wyznaczane są kolejno wartości referencyjne dla prędkości obrotowej Ω_{gen}^* , momentu elektromagnetycznego T_e^* , oraz składowej prądu sieci I_d^* . Aktuatorami są moduły tranzystorowe otrzymujące sygnał PWM modulujący napięcia wyjściowe U_s^* , U_g^* .



Rys. 6. Schemat blokowy układu sterowania torem przetwarzania energii

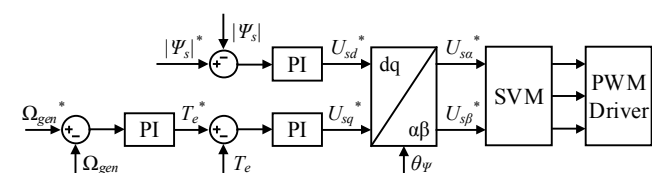
3.1. Regulacja prędkości turbiny

Regulacja prędkości turbiny Ω_{turb} jest szczególnie istotna w celu uzyskania maksymalnej mocy mechanicznej dla danej prędkości wiatru V_w . Poprzez sprzężenie turbiny z generatorem właściwa regulacja prędkości odbywa się po stronie generatora sterowanego wektorowo. Spośród znanych metod regulacji wektorowej napędów prądu przemiennego najpowszechniej stosowane są dwie: metoda bezpośredniego sterowania momentem (DTC-SVM) [10] oraz metoda zorientowana połowo (FOC) [11, 15]. W obu metodach wykorzystuje się parametry generatora do estymacji wielkości potrzebnych do procesu regulacji. Jednak w metodzie DTC-SVM wykorzystywana jest jedynie rezystancja uzwojeń stojana R_s , której wartość można łatwo wyznaczyć.

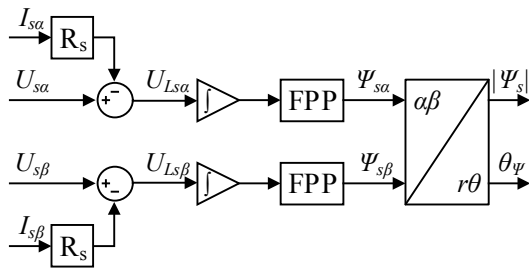
W pracy generatorowej zakres niskich prędkości jest pomijany, ze względu na minimalną prędkość wiatru potrzebną rozruchu generatora. Również dynamika zmian prędkości obrotowej jest mała ze względu na duży moment bezwładności turbiny J_{turb} .

Metoda DTC-SVM wymaga estymacji wartości strumienia stojana Ψ_s oraz momentu elektromagnetycznego T_e . Do tego celu wykorzystywany jest model napięciowy silnika indukcyjnego (rys. 8). Operacja całkowania musi być połączona z filtrem górnoprzepustowym ze względu na możliwość wystąpienia składowej stałej zależnej od początkowego kąta fazowego całkowanego napięcia na indukcyjności stojana U_{Ls} [5, 8]. Estymacja momentu elektromagnetycznego T_e wyznaczana jest według następującego równania:

$$T_e = \frac{3}{2} p_b \Psi_s I_q \quad (1)$$



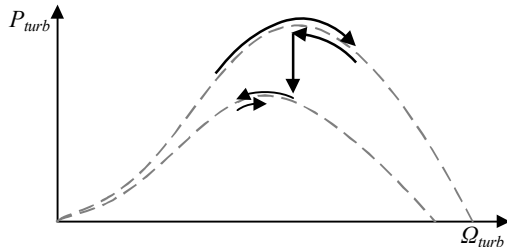
Rys. 7. Schemat blokowy metody bezpośredniego sterowania momentem DTC-SVM



Rys. 8. Schemat blokowy estymatora strumienia i momentu elektromagnetycznego

3.2. Śledzenie maksymalnego punktu mocy

Możliwość regulacji generowanej mocy jest największą zaletą wektorowego sterowania generatorem. Do tego celu konieczne jest wyznaczenie referencyjnej prędkości obrotowej generatora Ω_{gen}^* . Metody śledzenia maksymalnego punktu mocy dzielą się na dwie podstawowe grupy: uwarunkowane znajomością charakterystyki turbiny oraz oparte o iteracyjne algorytmy poszukiwania [3]. Układ sterowania z zaprogramowaną charakterystyką znacznie szybciej wyznacza punkt maksymalnej mocy. W tym wypadku sterowanie dostosowane jest tylko do jednego typu generatora. Analizując zależności pomiędzy mocą, prędkością obrotową i prędkością wiatru turbiny uwidacznia się prosty schemat podążania za maksymalnym punktem mocy (rys. 9). Regulując prędkość obrotową turbiny, układ sterowania poszukuje punktu maksymalnej generowanej mocy. Zmiany prędkości odbywają się w jednym kierunku, do momentu przekroczenia punktu mocy maksymalnej i odnotowania spadku mocy generowanej. Następnie zmiana prędkości zaczyna podążać w kierunku przeciwnym i system ponownie osiąga punkt mocy szczytowej.

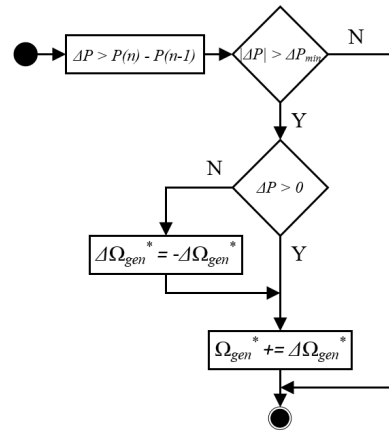


Rys. 9. Śledzenie maksymalnego punktu mocy po charakterystyce turbiny

Algorytm MPPT inkrementalny [12] eliminuje konieczność programowania charakterystyki turbiny, a sam algorytm zajmuje bardzo małą ilość zasobów jednostki obliczeniowej. Wartość prędkości zadanej Ω_{gen}^* wyznaczana jest na podstawie prostego algorytmu (rys. 10), w którym pod uwagę brany jest przyrost mocy dla zadanego kierunku zmian prędkości obrotowej. Moc generatora P_e wyznaczana jest na podstawie składowych $\alpha\beta$ prądów i napięć stojana według zależności (2).

W pierwszym kroku obliczana jest wartość przyrostu mocy ΔP w stałym okresie czasu. Jeśli wartość absolutna różnicy jest większa od zadeklarowanej wartości minimalnej ΔP_{min} to w następnej kolejności sprawdza się czy nastąpił spadek czy przyrost mocy. W przypadku spadku generowanej mocy zmieniany jest kierunek zmian prędkości referencyjnej Ω_{gen}^* o ustaloną wartość różnicy $\Delta\Omega_{gen}^*$. Ocena przyrostu mocy na podstawie estymowanej wartości chwilowej P_e jest nie właściwa ze względu na potencjalne szumy, stąd dodatkowo konieczne jest zastosowanie filtracji cyfrowej. Istotnym aspektem algorytmu MPPT jest okres iteracji algorytmu. Przyjęcie zbyt małego lub za dużego okresu może skutkować zawieszeniem algorytmu wokół jednego punktu charakterystyki.

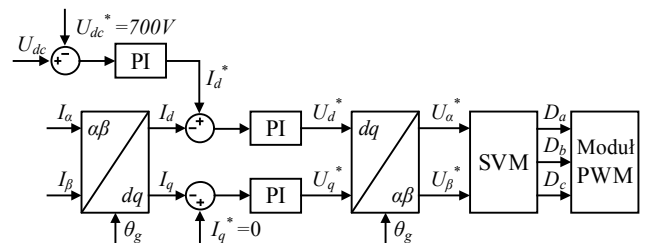
$$P_e = 1.5(U_{sa}I_{sa} + U_{s\beta}I_{s\beta}) \quad (2)$$



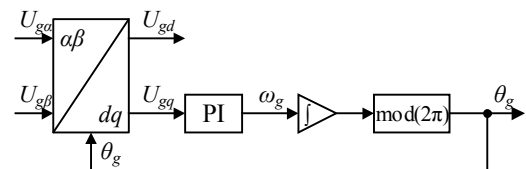
Rys. 10. Algorytm inkrementalnego śledzenia maksymalnego punktu mocy

3.3. Regulacja napięcia obwodu pośredniczącego i prądu sieci

Napędzany i wzbudzony generator asynchroniczny hamowany układem przekształtnikowym, dostarcza energię do obwodu pośredniczącego, co skutkuje zwiększeniem napięcia U_{dc} . Nadwyżka energii w kondensatorach jest przekazywana do sieci. W celu regulacji napięcia obwodu pośredniczącego oraz prądu sieci zastosowano metodę sterowania zorientowaną napięciowo (ang. *Voltage Oriented Control – VOC*) [11] (rys. 11). Metodę cechuje bardzo dobra dynamika regulacji i prostota sterowania. Regulacja prądu odbywa się w wirującym układzie odniesienia dq . Wartość referencyjna składowej I_d^* zadawana jest przez nadrzędny regulator napięcia obwodu pośredniczącego. Natomiast wartość referencyjna składowej prądu I_q^* jest równa zero, w celu utrzymania jednostkowego współczynnika mocy. Metody doboru nastaw regulatorów proporcjonalno-całkujących są obszernie opisane w literaturze [13].



Rys. 11. Metoda sterowania prądem sieci zorientowana napięciowo.



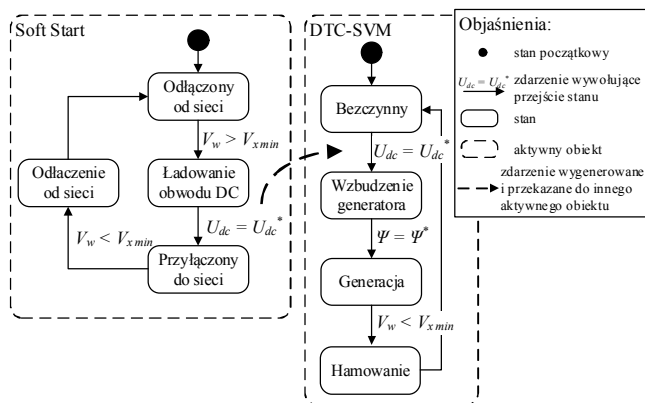
Rys. 12. Schemat blokowy układu śledzenia kąta fazowego SRF-PLL.

Opisana w poprzednim akapicie metoda regulacji prądu sieciowego wymaga znajomości kąta fazowego θ_g przebiegu napięcia sieci. W tym celu stosuje się układy zamkniętej pętli fazowej [15] (ang. *Phase Locked Loop*). Od układów PLL wymaga się jak najdokładniejszej estymacji kąta fazowego, również pod wpływem wszelkiego rodzaju zaburzeń napięcia. Wynika to między innymi z faktu, że znajomość kąta fazowego jest też wykorzystywana do wyznaczenia idealnego przebiegu napięcia sieci. Na podstawie idealnego przebiegu napięcia określa się stan sieci oraz ocenia wystąpienie ewentualnych zaburzeń. W układzie sterowania zastosowano strukturę Synchronicznego układu odniesienia (ang. *Synchronous Reference Frame PLL – SRF-PLL*). Szczególną zaletą układu jest mała złożoność i brak

konieczności zachowania odpowiedniej kolejności faz. Wadą jest brak odporności na zaburzenia, dlatego podane napięcie na wejściu musi być filtrowane z zachowaniem zerowego przesunięcia fazowego, względem mierzonego napięcia sieci.

3.4. Maszyna stanów pracy elektrowni wiatrowej

Podstawą działania wszelkich urządzeń i systemów autonomicznych jest implementacja maszyny stanów zaprojektowana na podstawie scenariusza działania systemu. W niniejszej pracy wykorzystano technikę maszyn stanów kierowanej zdarzeniami [13] (ang. *Event-Driven State Machine*). Technika ta polega na wyróżnieniu aktywnych obiektów, posiadających własne maszyny stanów, które reagują na zdefiniowane zdarzenia pochodzące od poszczególnych elementów systemu, jak również od innych aktywnych obiektów. Jeśli dane zdarzenie ma istotny wpływ na działanie aktywnego obiektu, to jest przez niego nasłuchiwane i obiekt odpowiednio zareaguje w przypadku wystąpienia tego zdarzenia. Taką relację określa mianem "subskrypcji". Aktywne obiekty w układzie sterowania małą elektrownią wiatrową to moduły: DTC-SVM, VOC, Soft Start, hamulec, rezystor hamujący, moduł monitorowania i oceny stanu elementów systemu itd. W rezultacie układ sterowania nie zawiera jednej głównej maszyny stanów kontrolującej jednocześnie wszystkie moduły systemu. Zastosowano zbiór maszyn stanów, które komunikują się między sobą, jak również z elementami zewnętrznymi systemu. Przykładowe zdarzenia jakie wpływają na działanie maszyn stanów to: przekroczenie określonych prędkości wiatru $V_{w\ min}$, $V_{w\ max}$, sygnał uszkodzenia danego elementu, przekroczenie dopuszczalnej wartości prądu. Zdarzenia generowane przez obiekty aktywne dotyczą zazwyczaj przejścia do zadanego stanu. Przykładowo moduł Soft Start informuje pozostałe moduły o zakończeniu operacji ładowania obwodu pośredniczącego (rys. 13). Wykorzystany model jest zgodny z fundamentalnymi zasadami dobrej praktyki programistycznej. Mimo złożoności problemu projektowania maszyn stanów, program jest modularny, skalowalny i łatwy w modyfikacji. Sposób implementacji bloków funkcjonalnych zastosowanych metod sterowania jest szczegółowo opisany w [4].



Rys. 13. Przykład maszyny stanów pokazujący wpływ zdarzeń na stany aktywnych obiektów

4. Implementacja układu sterowania i wyniki eksperymentalne

W celu realizacji projektu zaprojektowano od podstaw kompleksowy system automatyki wraz układem przekształtnikowym do obsługi elektrowni wiatrowej z generatorem asynchronicznym. Jako centralną jednostkę obliczeniową zastosowano mikrokontroler sygnałowy TMS320F28069 firmy Texas Instruments. Układ ten jest dedykowany do sterowania urządzeń energoelektronicznych w czasie rzeczywistym. Zawiera dwa rdzenie obsługujące arytmetykę zmiennoprzecinkową

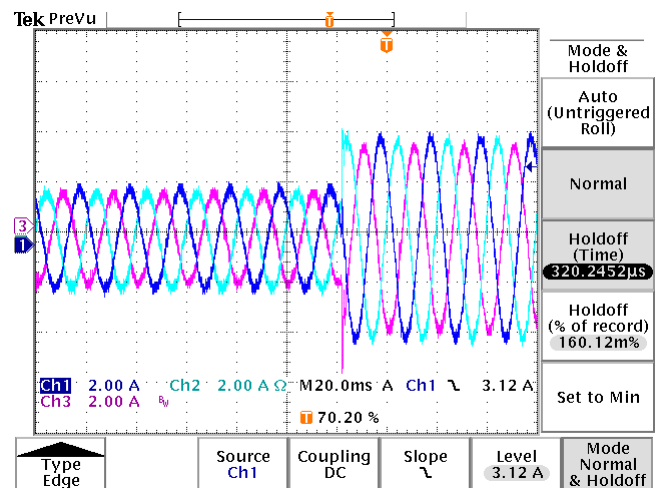
taktowane częstotliwością 90MHz. Parametry generatora zaprezentowano w tabeli 2, a parametry układu przekształtnikowego w tabeli 3. Rysunek 14 przedstawia odpowiedź sterowania prądu sieci na skokową zmianę wartości zadanej I_d . Natomiast rysunek 15 przedstawia odpowiedź prądu generatora I_s na skokową zmianę momentu. Zaprezentowane wyniki potwierdzają dobrą dynamikę układu sterowania, który używa proste w implementacji i mało złożone struktury sterowania. Rysunek 16 przedstawia fotografię systemu sprzęgającego generator indukcyjny z siecią elektroenergetyczną.

Tabela 2. Parametry generatora asynchronicznego klatkowego Siemens 1AV1164C

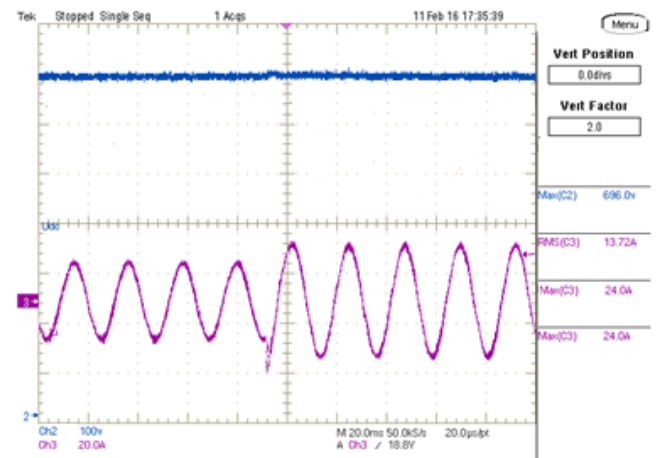
Parametr	Symbol	Wartość
Moc	P_N	11 kW
Napięcie znamionowe	U_N	690 V
Prąd znamionowy	I_N	13.9 A
Prędkość znamionowa	n_N	965 obr/min
Współczynnik mocy	$\cos \varphi$	0.77
Rezystancja stojana	R_s	1.25 Ω

Tabela 3. Parametry układu przekształtnikowego i filtra sieciowego

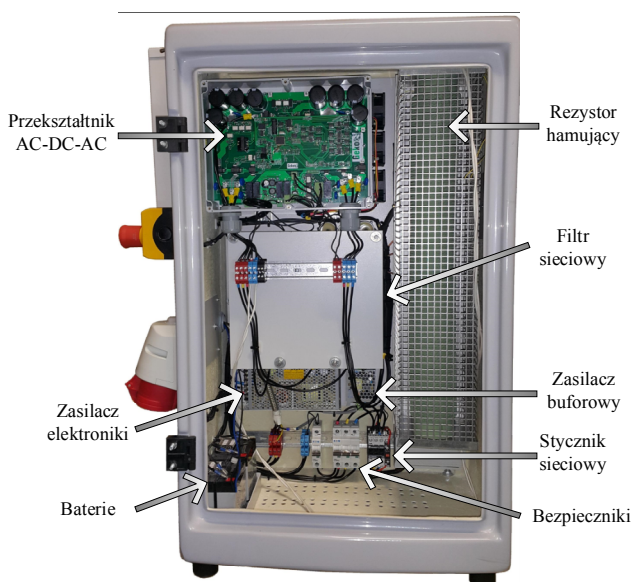
Parametr	Symbol	Wartość
Napięcie obwodu pośredniczącego	U_{dc}	700 V
Prąd maksymalny modułów IGBT	$I_{IGBT\ max}$	50 A
Temperatura maksymalna modułów IGBT	$T_{IGBT\ max}$	120 °C
Częstotliwość łączeń DTC-SVM	f_{DTC}	10 kHz
Częstotliwość łączeń VOC	f_{VOC}	15 kHz
Indukcyjności filtra sieciowego	L_1, L_2	0.5 mH, 0.5mH
Pojemność filtra sieciowego	C	8 uF



Rys. 14. Odpowiedź skokowa prądu sieci I_g



Rys. 15. Odpowiedź prądu fazowego generatora I_{su} i napięcia obwodu pośredniczącego U_{dc} na skokową zmianę momentu obciążenia T_m



Rys. 16. Fotografia systemu sprzęgającego generator indukcyjny z siecią elektroenergetyczną

5. Podsumowanie i wnioski

W artykule zaprezentowano kompleksowy układ sterowania przekształtnikiem AC-DC-AC zarządzającego całym systemem małej elektrowni wiatrowej z generatorem indukcyjnym. Szczególny nacisk został położony na analizę rzeczywistych warunków pracy systemu. W rezultacie dokonano podziału układu sterowania na dwa podstawowe zagadnienia związane z maszyną stanów oraz pętlami regulacji toru przetwarzania energii. Wykazano, że pojedynczy mikrokontroler jest w stanie obsłużyć cały system, co eliminuje konieczność stosowania dodatkowych sterowników PLC. Dobrane metody kontroli przetwarzania energii minimalizują wpływ parametrów turbiny, generatora oraz sieci na układ sterowania. Dobrane algorytmy są optymalne pod kątem zajętości zasobów obliczeniowych i pamięci cyfrowej jednostki sterującej. Działanie systemu potwierdzono wynikami eksperymentalnymi.

Prace badawcze wykonano na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w ramach projektu „Opracowanie i wdrożenie technologii Małych Elektrowni Wiatrowych o mocach 5 kW i 10 kW” realizowanego w ramach programu GEKON – Generator Koncepcji Ekologicznych finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju oraz Narodowego Funduszu Ochrony Środowiska i Gospodarki Wodnej.

Literatura

- [1] Buja G. S., Kazmierkowski M. P.: Direct torque control of PWM inverter-fed AC motors—a survey. *Industrial Electronics, IEEE Transactions on* 51(4)/2004, 744–757.
- [2] Hickiewicz J., Moch J.: Zagrożenia przy pracy generatorów w małych elektrowniach wodnych. *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, 79/2008, 133–137.
- [3] Kot R., Rolak M., Malinowski M.: Comparison of maximum peak power tracking algorithms for a small wind turbine. *Mathematics and Computers in Simulation* 91/2013, 29–40.
- [4] Mozdzyński K., Rafał K., Bobrowska-Rafał M.: Application of the second order generalized integrator in digital control systems. *Archives of Electrical Engineering* 63(3)/2014, 423–437.
- [5] Mozdzyński K.: Simple digital integration algorithm with saturation and drift elimination based Second-Order Generalized Integrator. *Compatibility and Power Electronics (CPE), 2015 9th International Conference on. IEEE*, 2015.
- [6] Müller S., Deicke M., De Doncker R. W.: Doubly fed induction generator systems for wind turbines. *Industry Applications Magazine, IEEE* 8(3)/2002, 26–33.

- [7] Patil N. S., Bhosle Y. N.: A review on wind turbine generator topologies. *Power, Energy and Control (ICPEC), 2013 International Conference on. IEEE*.
- [8] Peretti L.: Digital integrators for condition monitoring: a DC and multitone signal analysis. *Power Electronics Conference (IPEC-Hiroshima 2014-ECCE-ASIA), 2014 International. IEEE*.
- [9] PN-EN 50438:2014-02, Wymagania dla instalacji mikrogeneracyjnych przeznaczonych do równoległego przyłączenia do publicznych sieci dystrybucyjnych niskiego napięcia.
- [10] Rafał K., Bielecki S., Skoczowski T.: Dynamiczna regulacja napięcia w sieci rozdzielczej z wykorzystaniem falowników generacji rozproszonej. *Przeład Elektrotechniczny*, 5/2016, [doi:10.15199/48.2016.05.10].
- [11] Rafał K., Bobrowska-Rafał M., Jasiński M.: Sterowanie przekształtnikiem AC-DC-AC elektrowni wiatrowej z magazynem energii w sieciowym i autonomicznym trybie pracy. *Przeład Elektrotechniczny* 88(4b)/2012, 198–203.
- [12] Rolak M., Kot R., Malinowski M., Goryca Z., Szuster J. T.: AC/DC converter with Maximum Power Point Tracking algorithm for complex solution of Small Wind Turbine. *Przeład Elektrotechniczny* 6/2011.
- [13] Samek M.: *Practical UML Statecharts in C/C+.* Newnes, 2008.
- [14] Szular Z.: Trójfazowy samowzbudny generator indukcyjny. *Maszyny Elektryczne: zeszyty problemowe* 104/2014, 201–206.
- [15] Teodorescu R., Liserre M., Rodriguez P.: *Grid converters for photovoltaic and wind power systems*. 29/2011, John Wiley & Sons.
- [16] Yogesh C., Sanjay K., Jain K., Singh B.: A prospective on voltage regulation of self-excited induction generators for industry applications. *Industry Applications, IEEE Transactions on* 46(2)/2010, 720–730.

Mgr inż. Kamil Mozdzyński
e-mail: mozdzynek@ee.pw.edu.pl



Tytuły inżyniera i magistra w dziedzinie Elektrotechniki uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w latach 2012 i 2013. Obecnie jest doktorantem w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej Politechniki Warszawskiej. W pracach badawczych zajmuje się przetwarzaniem sygnałów, komputerowymi systemami wbudowanymi oraz sterowaniem układów przekształtnikowych. Obecnie pracuje nad metodami sterowania pracą sieciowych układów przekształtnikowych.

Mgr inż. Tomasz Gajowik
e-mail: gajowikt@ee.pw.edu.pl



Tomasz Gajowik uzyskał tytuł magistra inżyniera na specjalizacji automatyka i inżynieria komputerowa na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Od 2013 r. jest doktorantem w Instytucie Sterowania i Elektroniki Przemysłowej. Obecnie zajmuje się tematem połączenia i współpracy odnawialnych źródeł energii z siecią energetyczną. Jest zaangażowany w projekty badawcze i rozwojowe, gdzie prowadzi badania nad przekształtnikami energoelektronicznymi.

Dr inż. Krzysztof Rafał
e-mail: krafal@itc.pw.edu.pl



Tytuł doktora inżyniera uzyskał w 2013 roku na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Obecnie pracuje jako adiunkt na Wydziale Mechanicznym Energetyki i Lotnictwa PW. Jego specjalność naukowa to układy energoelektroniczne współpracujące z siecią elektroenergetyczną, w szczególności służące przyłączeniu OZE oraz poprawie jakości energii.

Dr hab. inż. Mariusz Malinowski
e-mail: mariusz.malinowski@ee.pw.edu.pl



Mariusz Malinowski uzyskał stopień doktora habilitowanego na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej gdzie jest obecnie zatrudniony na etacie profesora. W trakcie swojej pracy zawodowej przebywał na stypendiach i stażach w Aalborg University (Dania); University of Nevada (Reno, USA); Technical University of Berlin (Niemcy); ETH Zurich (Szwajcaria); Universidad Tecnica Federico Santa Maria (Valparaíso, Chile); University of Cergy-Pontoise (Francja) i ENSEEIHT-Laplace (Tuluza, Francja).

otrzymano/received: 19.06.2016

przyjęto do druku/accepted: 30.10.2016