

System stabilizacji napięcia i częstotliwości samowzbudnego generatora indukcyjnego

Streszczenie. W artykule przedstawiono układ z samowzbudnym generatorem indukcyjnym. Został on zrealizowany na bazie silnika klatkowego i jest przeznaczony do zastosowań w małych elektrowniach wiatrowych lub wodnych. Podstawowymi zaletami takiego generatora są niezawodność, prosta konstrukcja, duża trwałość, bezobsługowość oraz niski koszt. W przedstawionym rozwiązaniu generator nie jest skojarzony z siecią zasilającą i stanowi jednostkę autonomiczną. Dla realizacji zadania stabilizacji napięcia i częstotliwości współpracuje on z przekształtnikiem AC/DC. W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych oraz eksperymentalnych układu generatora z przekształtnikiem przy sterowaniu predykcyjnym.

Abstract. In the paper self-excited induction generator system has been presented. It has been made on the base of cage induction motor, and it is intended for small hydroelectric and wind power plants. The basic advantages of the system are reliability, simple construction, and durability as well self-service and low cost of production. In the presented solution, generator is not connected with distribution system and represents an autonomous system. For voltage and frequency stabilization purpose its works with AC/DC converter. The paper presents the result of simulation research, as well experimental result obtained on laboratory model of generator with converters and prediction control. (**Voltage and Frequency Stabilization System with Self-Excited Induction Generator**).

Słowa kluczowe: samowzbudny generator indukcyjny, moc chwilowa, predykcja, sterowanie dyskretne.

Keywords: self-excited induction generator, instantaneous power, shunt converter, prediction, discrete control.

Wstęp

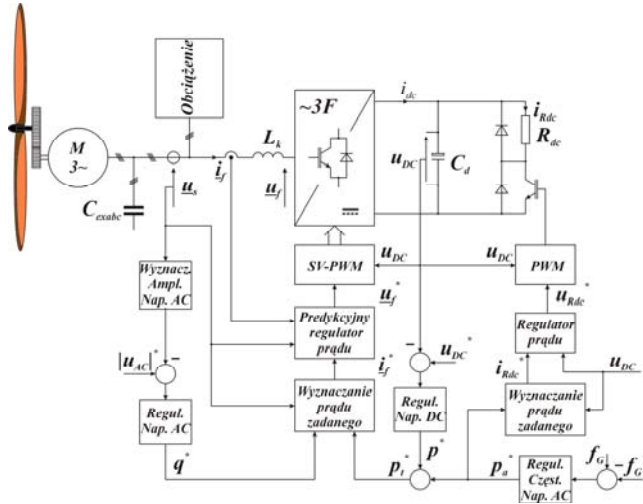
W ostatnich latach odnawialne źródła energii przyciągają coraz większą uwagę zarówno wytwórców jak i odbiorców energii elektrycznej. Wymóg zwiększenia produkcji energii ze źródeł odnawialnych potęguje jeszcze to zainteresowanie. Poszukiwane są rozwiązania, które będą mogły współpracować zarówno z siecią energetyczną jak i będą stanowić autonomiczne źródła energii na ograniczonym obszarze. Te ostatnie są izolowane od dużych systemów energetycznych i pracują na potrzeby lokalne bez dalekiego przesylu. Eliminowane są w ten sposób znaczne straty energii. Elektrownie tego typu mogą być wyposażone w generatory synchroniczne z magnesami trwałymi lub też w samowzbudne generatory indukcyjne. Ze względów ekonomicznych generatory synchroniczne z magnesami trwałymi nie obejmują całego zakresu małych elektrowni. W małych elektrowniach wodnych i rzadziej wiatrowych stosuje się generatory indukcyjne z maszyną klatkową. Charakteryzują się one wieloma korzystnymi cechami jak niezawodność, prostota konstrukcji, duża trwałość, bezobsługowość oraz niski koszt. Poza tym maszyny te mogą pracować zarówno w trybie silnikowym jak i generatorowym. Nie wymaga to więc stosowania maszyn o specjalnej konstrukcji dostosowanej do aktualnego trybu pracy. W systemach wytwarzania energii, współpracujących z siecią, prąd wzbudzenia jest pobierany wprost z niej. W rozwiązaniach autonomicznych wymagane jest jednak samowzbudzenie się generatora. W tym przypadku korzystne jest to, że do wytworzenia strumienia magnetycznego w maszynie nie jest wymagane zewnętrzne źródło zasilania. Bateria kondensatorów podłączonych do zacisków maszyny oraz pozostałość magnetyczna w wirniku wywołują efekt samowzbudzenia przy określonej prędkości kątowej. Wymagana pozostałość magnetyczna jest naturalną własnością maszyny. Wartość minimalną i maksymalną pojemności można natomiast wyliczyć w oparciu o dostępne publikacje [1-4]. Wyznaczona wartość pojemności zapewnia samowzbudzenie się generatora. Stała jej wielkość nie gwarantuje jednak pewnej pracy generatora w różnych warunkach obciążenia i prędkości kątowej wału. Jeszcze do niedawna dla zapewnienia pracy w zmieniających się warunkach powszechnie stosowano przełączane baterie kondensatorów [5-7]. Obecnie do tego celu w coraz większym stopniu wykorzystuje się trójfazowe

przekształtniki AC/DC [8]. Realizują one stabilizację napięcia przemiennego generatora. W ograniczonym zakresie umożliwiają również stabilizację częstotliwości. Trójfazowe przekształtniki AC/DC charakteryzują się korzystnymi właściwościami dla tego rodzaju zastosowań. Występujący w nich obwód napięcia stałego pozwala na realizację dodatkowych zadań. Można do nich zaliczyć ładowanie baterii akumulatorów, wstępne obciążenie generatora oraz tłumienie procesów przejściowych w stanach dynamicznych. W rozwiązaniach układowych przekształtnik najczęściej sprzężony jest z generatorem za pomocą filtra typu 'L' [8-10]. Filtr ten wraz z pojemnością wzbudzającą generatora tworzy filtr wyższego rzędu typu 'LC'. Konsekwencją tego typu sprzężenia jest niska zawartość wyższych harmonicznych prądu stojana. Możliwość realizacji sterowania w synchronicznym lub stacjonarnym układzie współrzędnych zapewnia natomiast wysoką dynamikę oraz dużą dokładność. Stała częstotliwość łącznych oraz zastosowanie predykcji eliminującej przesunięcie fazowe pomiędzy pomiarami wielu wielkości i sterowaniem gwarantuje dobre współdziałanie przekształtnika AC/DC z samowzbudnym generatorem indukcyjnym. W takim zestawieniu samowzbudne generatory indukcyjne mogą funkcjonować w siłowniach zarówno wiatrowych jak i wodnych.

Autonomiczny układ zasilania z Samowzbudnym Generatorem Indukcyjnym

Jak wyżej wspomniano generator indukcyjny stosunkowo łatwo się wzbudza. Do tego celu wymagana jest jednak pomocnicza bateria kondensatorów. Dodatkowo wał generatora indukcyjnego musi być napędzany z prędkością, która jest zależna od zastosowanej pojemności oraz istniejącej pozostałości magnetycznej w maszynie. Brak któregokolwiek z wyżej wymienionych czynników uniemożliwia samowzbudzenie generatora. W ogólnym przypadku generowane napięcie może mieć różną wartość i częstotliwość zależnie od pojemności baterii i prędkości kątowej wału. Po samowzbudzeniu generatora problemem staje się zmienne obciążenie. W skrajnym przypadku może ono doprowadzić do odwzbudzenia generatora. Obciążenie wywołuje nie tylko spadek napięcia wyjściowego ale również zmniejszenie jego częstotliwości. W celu eliminacji wyżej wymienionych niekorzystnych zjawisk, w artykule

zaproponowano zastosowanie w układzie bocznikowym generatora indukcyjnego przekształtnika AC/DC. Schemat takiego rozwiązania przedstawiono na rysunku 1. W układzie tym sterowanie przekształtnikiem realizowane jest w oparciu o definicję mocy chwilowej podaną przez Hirofumi Akagi'ego (1) [11].



Rys.1. Schemat blokowy generatora indukcyjnego współpracującego z przekształtnikiem AC/DC

$$(1) \quad \begin{aligned} \vec{s} &= \vec{u}_s \vec{i}_s^*, \quad p = \text{Re}(\vec{u}_s \vec{i}_s^*), \quad q = \text{Im}(\vec{u}_s \vec{i}_s^*) \\ p &= u_{s\alpha} i_{s\alpha} + u_{s\beta} i_{s\beta}, \quad q = u_{s\beta} i_{s\alpha} - u_{s\alpha} i_{s\beta} \end{aligned}$$

Ma ono zagwarantować stabilizację napięcia stałego u_{DC} w obwodzie przekształtnika oraz napięcia przemiennego $|u_{AC}|$ na zaciskach generatora. Sygnały wyjściowe z regulatorów napięć realizujących powyższe zadania stanowią odpowiednio zadaną moc czynną p^* oraz zadaną moc bierną q^* . Realizację dyskretną regulatorów napięcia przedstawiają zależności (2).

$$(2) \quad \begin{aligned} p^*[k] &= K_{P_DC} \left[(u_{DC}^*[k] - u_{DC}[k]) \right] \\ &\quad + K_{I_DC} \sum_{m=0}^k \left[(u_{DC}^*[m] - u_{DC}[m]) \right] \\ q^*[k] &= K_{P_AC} \left[(|u_{AC}[k]|^* - |u_{AC}[k]|) \right] \\ &\quad + K_{I_AC} \sum_{m=0}^k \left[(|u_{AC}[m]|^* - |u_{AC}[m]|) \right] \end{aligned}$$

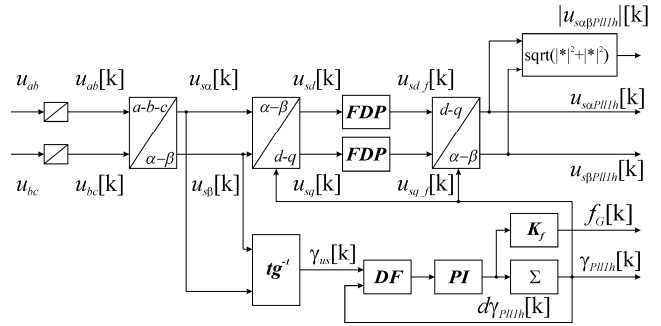
Wyznaczone w ten sposób moce dotyczą chwili bieżącej $[k]$. Ponieważ algorytm sterowania realizowany jest w postaci dyskretniej nie jest możliwe w tym samym momencie wyznaczanie nowego sterowania i stosowanie go. W związku z powyższym w algorytmie sterowania zastosowano predykcję. Na pierwszym etapie obliczeń, w oparciu o moce zadane, wyznaczane są zadane wartości prądów wyjściowych przekształtnika $i_{s\alpha}^*[k]$ oraz $i_{s\beta}^*[k]$ (3).

$$(3) \quad \begin{bmatrix} i_{s\alpha}^*[k] \\ i_{s\beta}^*[k] \end{bmatrix} = K * \begin{bmatrix} u_{s\alpha PLL}[k] & u_{s\beta PLL}[k] \\ u_{s\beta PLL}[k] & -u_{s\alpha PLL}[k] \end{bmatrix} * \begin{bmatrix} p[k]^* \\ q[k]^* \end{bmatrix}$$

gdzie: $K = 1 / (u_{s\alpha PLL}^2[k] + u_{s\beta PLL}^2[k])$

Pomocniczo wykorzystuje się składowe podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego generatora. Filtrowane

one są z pełnego napięcia przy wykorzystaniu dyskretnego algorytmu pętli śledzenia fazy PLL (Rys.2).



Rys.2. Schemat blokowy algorytmu PLL i układu filtracji napięcia wyjściowego generatora

Na drugim etapie obliczeń dokonuje się już właściwej predykcji prądu zadanego na chwilę następną. Zakłada się przy tym jego sinusoidalny przebieg i częstotliwość równą częstotliwości podstawowej harmonicznej napięcia wyjściowego generatora. Do ostatecznego określenia wartości prądu zadanego wykorzystuje się zmianę kąta fazowego napięcia podstawowej harmonicznej pomiędzy kolejnymi momentami próbkowania. Wyznaczana ona jest również za pomocą algorytmu PLL. Wartości składowych prądu zadanego dla chwili $[k+2]$ obliczane są więc według zależności (4).

$$(4) \quad \begin{aligned} i_{s\alpha}^*[k+2] &= i_{s\alpha}^*[k] * \cos(2 * d\gamma_{PLLh}) - i_{s\beta}^*[k] * \sin(2 * d\gamma_{PLLh}) \\ i_{s\beta}^*[k+2] &= i_{s\alpha}^*[k] * \sin(2 * d\gamma_{PLLh}) + i_{s\beta}^*[k] * \cos(2 * d\gamma_{PLLh}) \end{aligned}$$

Na bazie wyliczonych składowych prądu zadanego dla chwili $[k+2]$ wyznaczane są napięcia zadane przekształtnika dla chwili $[k+1]$ (5).

$$(5) \quad \begin{aligned} u_{f\alpha}^*[k+1] &= u_{s\alpha PLL}[k+1] + (i_{s\alpha}^*[k+2] - A i_{s\alpha}[k+1]) / B \\ u_{f\beta}^*[k+1] &= u_{s\beta PLL}[k+1] + (i_{s\beta}^*[k+2] - A i_{s\beta}[k+1]) / B \end{aligned}$$

gdzie: $A = \exp(-T_s/T_e)$, $B = (1-A)/R_f$, $T_e = L_f/R_f$

Występujące w powyższych zależnościach składowe prądu przekształtnika oraz napięcia generatora dla chwili $[k+1]$ wyznaczane są za pomocą predykcji. Przy czym składowe prądu dla chwili $[k+1]$ wyznaczane są w oparciu o wartości składowych prądu i napięć dla chwili $[k]$ (6)

$$(6) \quad \begin{aligned} i_{s\alpha}[k+1] &= A i_{s\alpha}[k] + B(u_{f\alpha}^*[k] - u_{s\alpha PLL}[k]) \\ i_{s\beta}[k+1] &= A i_{s\beta}[k] + B(u_{f\beta}^*[k] - u_{s\beta PLL}[k]) \end{aligned}$$

natomiast składowe napięć generatora dla chwili $[k+1]$ przy założeniu stałej prędkości wirowania wektorów harmonicznym tego napięcia (7).

$$(7) \quad \begin{aligned} u_{s\alpha PLL}[k+1] &= u_{s\alpha PLL}[k] \cos(d\gamma_{PLL}[k]) - u_{s\beta PLL}[k] \sin(d\gamma_{PLL}[k]) \\ u_{s\beta PLL}[k+1] &= u_{s\alpha PLL}[k] \sin(d\gamma_{PLL}[k]) + u_{s\beta PLL}[k] \cos(d\gamma_{PLL}[k]) \end{aligned}$$

W celu uzyskania stabilizacji częstotliwości napięcia wyjściowego generatora, w obwodzie prądu stałego przekształtnika AC/DC zastosowano elektroniczny układ obciążający. Zrealizowany on został na bazie przerywacza prądu stałego pracującego z obciążeniem rezystancyjnym. Wartość wymaganego obciążenia jest wyznaczana za pomocą regulatora częstotliwości (8).

$$p_d^*[k] = K_{P_{f_G}} \left[(f_G^*[k] - f_G[k]) \right] + K_{I_{f_G}} \sum_{m=0}^k \left[(f_G^*[m] - f_G[m]) \right] \quad (8)$$

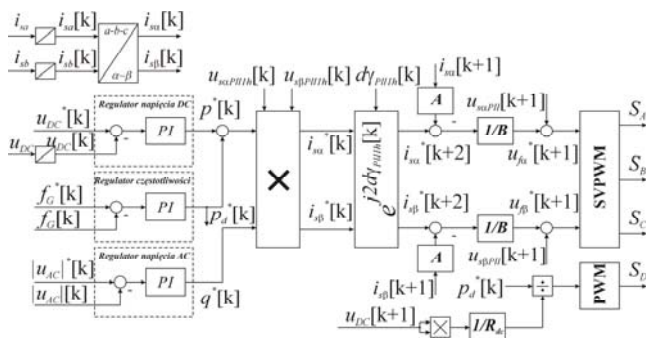
Działanie układu ujawnia się dopiero w momencie gdy częstotliwość napięcia wyjściowego przekracza częstotliwość zadaną.

Dodatkowe obciążenie zmieniając się w kierunku przeciwnym niż zmiany obciążenia użytkowego generatora powoduje utrzymanie zadanej częstotliwości napięcia wyjściowego. Poza tym zakresem pracy układ jest w sposób naturalny wyłączony. Dla zapewnienia dobrej dynamiki działania układu stabilizacji częstotliwości, informacja o wielkości dodatkowego obciążenia generatora jest równocześnie podawana na sterowanie AC/DC.

W związku z powyższym całkowita moc czynna jaka jest brana pod uwagę przy wyznaczaniu prądu zadanego wyraża się zależnością (9).

$$p_i^*[k] = p^*[k] + p_d^*[k] \quad (9)$$

Schemat blokowy algorytmu sterowania przekształtnikiem współpracującym z samowzbudnym generatorem indukcyjnym został przedstawiony na rysunku 3.



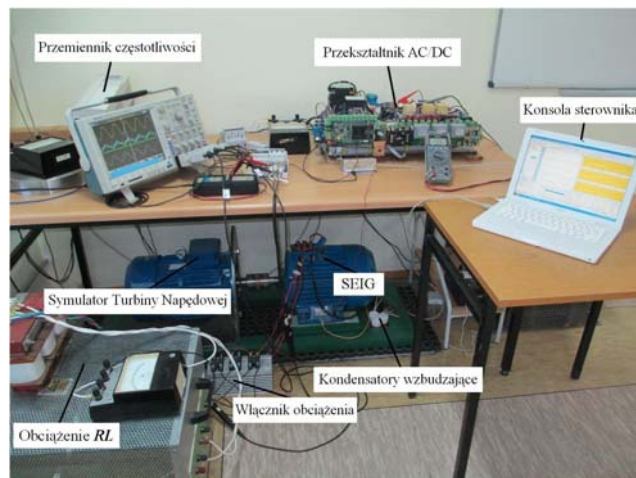
Rys.3. Schemat blokowy algorytmu sterowania przekształtnikiem

Badania symulacyjne i eksperymentalne układu generatora

Badania symulacyjne układu z samowzbudnym generatorem indukcyjnym przeprowadzono przy wykorzystaniu pakietu oprogramowania PSIM w wersji 8. Obejmowały one procesy: samowzbudzenie, bieg jałowy i obciążenie. Do obciążania generatora wykorzystano symetryczny odbiornik trójfazowy typu liniowego. Dane znamionowe zostały podane w załączniku. W procesie symulacji badano zachowanie się układu zarówno w stanach ustalonych jak i przejściowych. Stany ustalone obejmowały bieg jałowy i pracę z ustalonym obciążeniem. Stany przejściowe natomiast dotyczyły procesu rozruchu i odpowiedzi układu na zakłócenie wywołane zmianą obciążenia. W trakcie badań rejestrowano przebiegi napięcia stałego u_{DC} przekształtnika AC/DC, napięcia przemiennego generatora indukcyjnego u_{AC} oraz jego częstotliwość f_G . Rejestrowano również prądy: obciążenia, generatora oraz przekształtnika AC/DC.

W celu weryfikacji wyników badań symulacyjnych został zbudowany układ eksperymentalny. Rysunek 4 prezentuje jego konstrukcję. Natomiast w dodatkach podano parametry najistotniejszych elementów układu. W prezentowanym rozwiązaniu algorytm sterowania przekształtnikiem AC/DC został napisany w języku C i jest realizowany z wykorzystaniem Zestawu Startowego TMDSEZ28335 z procesorem zmiennoprzecinkowym TMS320F28335

Tekstas Instrument. Do generacji kodu sterującego i monitorującego działanie układu wykorzystano oprogramowanie CCSv3.3 firmy TI. W mikrokontrolerze sygnałowym zaimplementowano algorytm, który z niewielkimi korektami i uzupełnieniami przeniesiono z biblioteki *.dll wykorzystywanej w symulacjach w programie PSIM.



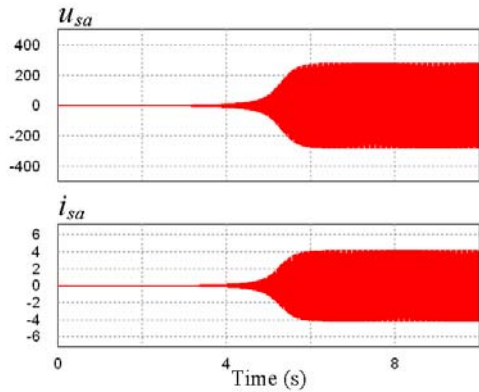
Rys.4. Laboratoryjne stanowisko badawcze

W układzie modelowym mierzono amplitudę i częstotliwość napięcia generatora, napięcie obwodu DC, prądy przekształtnika oraz obciążenia. Do pomiarów wykorzystano oscyloskop firmy Tektronix serii DPO4000 wyposażony w różnicowe sondy napięciowe typu P5205A, oraz sondy prądowe typu TCP0030A. Ostatecznie na bazie pomiarów dokonano weryfikacji stabilizacji wartości zadanych.

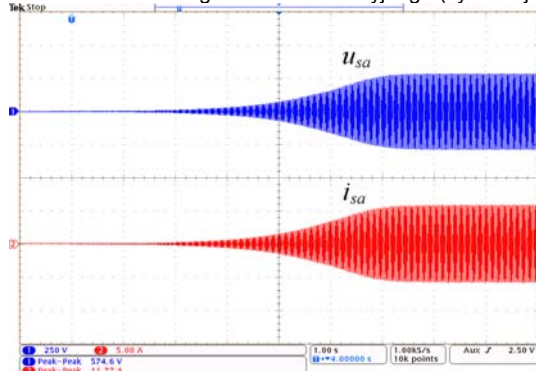
Model laboratoryjny generatora zrealizowano na bazie silnika indukcyjnego skojarzonego w trójkąt. Konsekwencją tego jest brak przewodu zerowego w układzie. Uniemożliwiło to bezpośrednią realizację zasilania odbiorników jednofazowych. Możliwość realizacji tego zadania daje natomiast generator skojarzony w gwiazdę. Stosowanie tego rodzaju obciążenia wprowadza jednak asymetrię prądów w poszczególnych fazach. Prowadzi to do powstawania pulsującego momentu obciążenia na wale generatora w trakcie obrotów. Prezentowany w artykule układ nie posiada zdolności kompensacji powyższych zjawisk. Dla rozwiązania wymienionych problemów wymagany byłby układ 3 fazowy 4 przewodowy lub 3 fazowy 4 gałęziowy [12]. W związku z powyższym w artykule ograniczono się jedynie do przypadku obciążenia symetrycznego trójfazowego.

Oscylogramy (5,6) prezentują proces samowzbudzenia generatora. Przebiega on w czasie z różną prędkością zależną od bieżącego punktu pracy na charakterystyce magnesowania. Na zakończenie procesu prąd wzbudzenia i napięcie generatora osiągają wartości ustalone wynikające z końcowej prędkości obrotowej i pojemności wzbudzającej. W układzie modelowym zastosowano pojemność o wartości $C_f = 20[\mu F]$ co dało czas samowzbudzenia t powyżej 6[s] i końcowe napięcie fazowe U_s na poziomie 200[V]. Oscylogramy badań eksperymentalnych (6) potwierdzają wyniki badań symulacyjnych (5) o możliwości uzyskania pewnego samowzbudzenia.

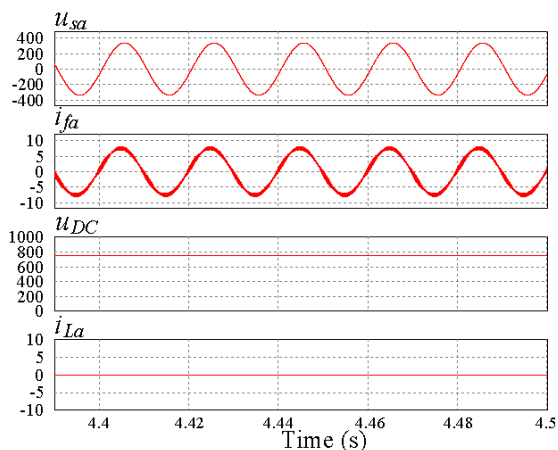
Oscylogramy (7,8,9,10) przedstawiają stany ustalone pracy generatora z włączonymi wszystkimi układami stabilizacji. Oscylogramy (7,8) dotyczą pracy generatora na biegu jałowym, natomiast (9,10) obciążenia odbiornikiem typu 'RL'. Wartości elementów obciążenia zostały podane w załączniku. W obserwowanych stanach stabilizowane parametry są dobrze utrzymywane.



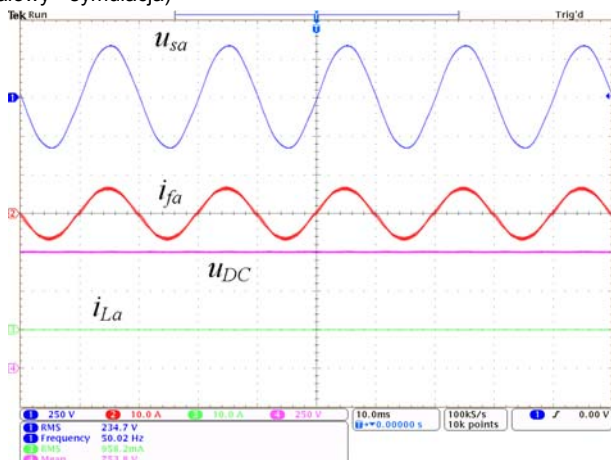
Rys.5. Samowzbudzenie generatora indukcyjnego (symulacja)



Rys.6. Samowzbudzenie generatora (eksperyment)

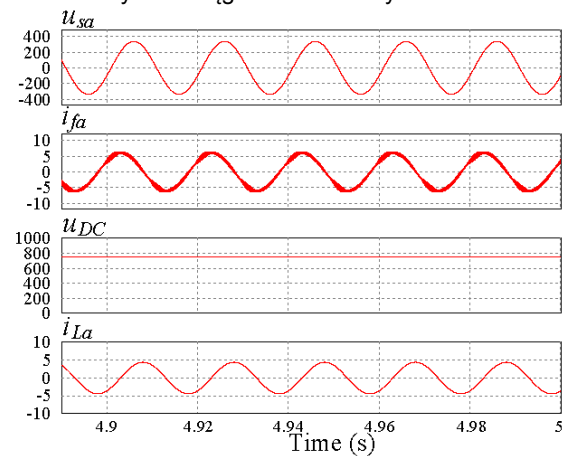


Rys.7. Oscylogramy napięć i prądów w stanie ustalonym (bieg jałowy - symulacja)

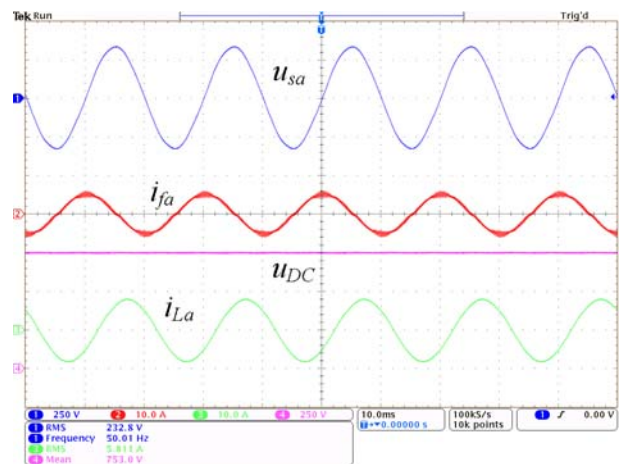


Rys.8. Oscylogramy napięć i prądów w stanie ustalonym (bieg jałowy generatora - eksperyment)

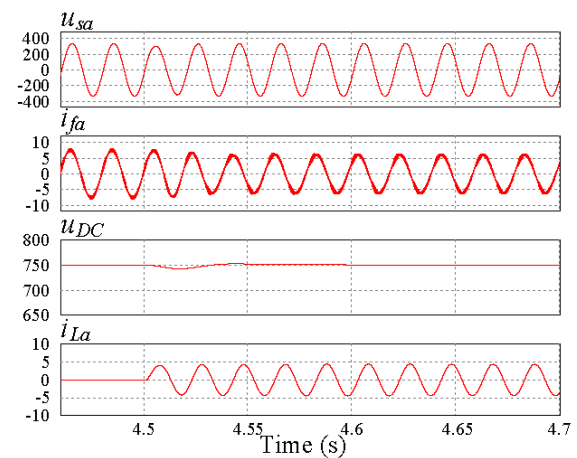
Na zakończenie badań symulacyjnych i eksperymentalnych na oscylogramach (11,12,13,14) zaprezentowano odpowiedź układu na zakłócenie w postaci skokowej zmiany obciążenia, zwiększenia i zmniejszenia. W trakcie prób zarejestrowano przejściowe zmiany napięcia stałego oraz zmiennego. Nie przekraczają one jednak dopuszczalnych wartości. Po fazie przejściowej układ stosunkowo szybko osiąga stan ustalony.



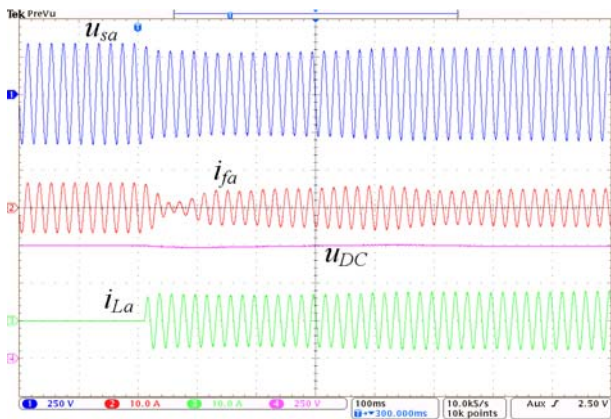
Rys.9. Oscylogramy napięć i prądów w stanie ustalonym (obciążenie generatora - symulacja)



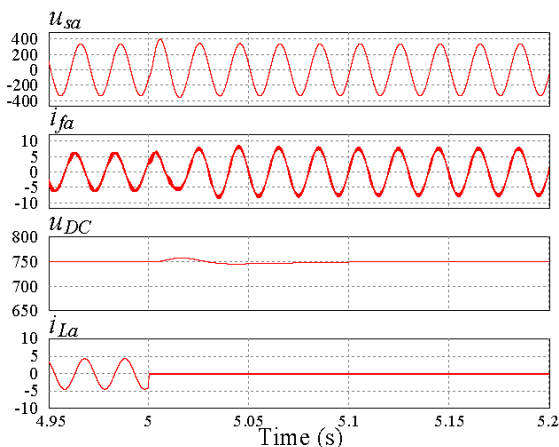
Rys.10. Oscylogramy napięć i prądów w stanie ustalonym (obciążenie generatora - eksperyment)



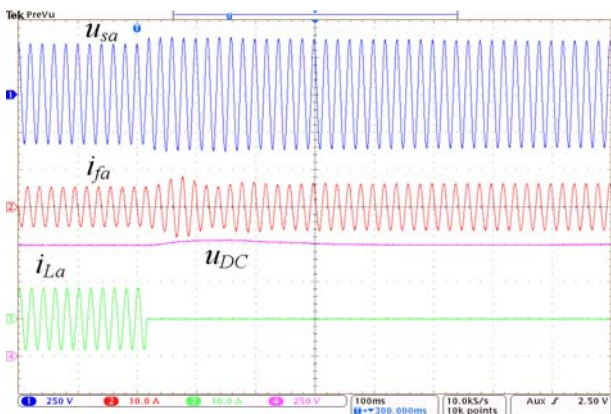
Rys.11. Odpowiedź układu na skokową zmianę obciążenia generatora (wzrost obciążenia - symulacja)



Rys.12. Odpowiedź układu na skokową zmianę obciążenia generatora (wzrost obciążenia - eksperyment)



Rys.13. Odpowiedź układu na skokową zmianę obciążenia generatora (redukcja obciążenia - symulacja)



Rys.14. Odpowiedź układu na skokową zmianę obciążenia generatora (redukcja obciążenia - eksperyment)

W ramach badań dokonano również analizy wyższych harmonicznych napięcia wyjściowego generatora. W początkowej fazie badań włączono jedynie układy stabilizacji napięcia przemiennego oraz stałego obwodu przekształtnika AC/DC. W zakresie prędkości obrotowych generatora odpowiadających częstotliwości napięcia wyjściowego poniżej jego synchronicznej jak i bliskiej synchronicznej zarejestrowano niewielką zawartość wyższych harmonicznych. W pierwszym przypadku, dla $f_G = 48.05[\text{Hz}]$ było to $THD_U = 1.85[\%]$ a w drugim dla $f_G = 50.06[\text{Hz}]$ uzyskano $THD_U = 1.4[\%]$.

Po włączeniu układu stabilizacji częstotliwości przy prędkości obrotowej powyżej synchronicznej zawartość wyższych harmonicznych kształtowała się następująco: przy braku obciążenia $THD_U = 1.45[\%]$, a po włączeniu obciążenia bliskiego znamionowemu zawartość ustaliła się na poziomie $THD_U = 1.38[\%]$.

Pomiarów zawartości wyższych harmonicznych napięcia dokonano za pomocą oscyloskopu firmy Texas Instrument serii DPO4000 wyposażony w moduł analizy mocy DPO4PWR. We wszystkich rejestrowanych przebiegach obserwowano śladowe zawartości piątej harmonicznej. Niskie zawartości wyższych harmonicznych, zarówno na biegu jałowym jak i z obciążeniem, uzyskano dzięki zastosowaniu w sterowaniu predykcji prądu zadanego i napięcia generatora oraz kompensacji czasu martwego i spadków napięcia na elementach. Nieznacznie zwiększyło to złożoność algorytmu sterowania nie pociągając jednak zmian w sprzęcie.

Uzyskane wyniki pomiarów zostały zebrane w tabeli 1. Przedstawiono w niej zawartość wyższych harmonicznych odniesioną do wartości podstawowej harmonicznej oraz wartości skutecznej napięcia. Przedstawione pomiary świadczą również o dobrej stabilizacji wyjściowego napięcia przemiennego generatora.

Tabela 1. Współczynnik THD napięcia wyjściowego generatora

Częstotliwość	THD-F	THD-R	RMS
48.05 Hz	1.85 %	1.85 %	233 V
50.06 Hz	1.40 %	1.41 %	231 V
50.01 Hz	1.45 %	1.46 %	231 V
50.01 Hz	1.38 %	1.39 %	231 V

Podsumowanie

Samowzbudny Generator Indukcyjny może stanowić atrakcyjne rozwiązanie dla małych autonomicznych elektrowni wiatrowych lub wodnych. Wymaga on jednak samowzbudzenia i stabilizacji napięcia oraz częstotliwości. W artykule przedstawiono rozwiązanie, które realizuje powyższe cele. Dotychczasowe przełączane baterie kondensatorów, dostarczające mocy bierniej do magnesowania, zostały obecnie zastąpione przekształtnikiem AC/DC. Pełni on w układzie funkcję płynnie regulowanego źródła mocy bierniej. Dodatkowo, zastosowanie przekształtnika, umożliwia realizację stabilizacji częstotliwości w zakresie prędkości powyżej synchronicznej. Sterowanie tym układem zostało zaimplementowane w sterowniku mikroprocesorowym. Wyznacza to dyskretne działanie algorytmu. W celu eliminacji przesunięcia fazowego związanego z próbkowaniem wielu wielkości wejściowych w układzie zastosowano predykcję. Pozwala ona na wyznaczenie sterowania z jedno krokowym wyprzedzeniem. Z wyprzedzeniem wyznaczone są również wartości zadane. W przedstawionym rozwiązaniu stosowana predykcja realizowana jest między innymi w oparciu o działanie algorytmu pętli śledzenia fazy PLL. Umożliwia on również odtwarzanie podstawowej oraz wyższych harmonicznych napięcia generatora. Realizacja predykcji dla poszczególnych harmonicznych pozwala ostatecznie wyznaczyć wartości napięcia z wymaganym wyprzedzeniem. Na bazie tych napięć wyznaczone są nowe sterowania.

W artykule zaproponowano zastosowanie predykcji i definicji mocy chwilowej do sterowania przekształtnikiem współpracującym z generatorem indukcyjnym. Do wyznaczania przyszłych wartości napięcia generatora, prądów zadanego i falownika wykorzystano jedno i dwukrokową predykcję. Realizowany w systemie algorytm sterowania bazuje na definicji mocy chwilowej H. Akagiego. Dzięki takiemu podejściu, w zaproponowanym rozwiązaniu,

uniknięto histerezowych regulatorów prądu. W miejsce regulatorów pojawił się natomiast algorytm SVPWM. Zapewnia on stałą częstotliwość łączeń elementów mocy $f_{sw} = 10$ [kHz] i gwarantuje uporządkowany sposób ich łączenia. Jest to nowe rozwiązanie dla tego typu zastosowania.

Przedstawione w artykule rozwiązanie charakteryzuje się dobrą stabilizacją napięcia wyjściowego generatora. Ograniczoną możliwością stabilizacji częstotliwości przy wykorzystaniu układu elektronicznego obciążenia oraz dobrą stabilizacją napięcia stałego.

W obszarze stabilizacji częstotliwości straty mocy na R_{dc} stanowią poważny problem. Obniżają one sprawność całego systemu generatora. W związku z powyższym należałoby rozważyć możliwość innego sposobu wstępnego obciążenia w tym obszarze pracy. W najprostszym rozwiązaniu może to być akumulacja ciepła w izolowanym zbiorniku wody lub w podgrzewaczach [15]. W bardziej zaawansowanych przypadkach będą to zasobniki energii z kołem zamachowym, superkondensatory lub baterie akumulatorów [12, 14].

Prezentowane rozwiązanie stwarza jednak możliwość zablokowania stabilizacji częstotliwości. Staje się wówczas dostępna realizacja algorytmu MPPT dla OZE. W tym przypadku układ realizujący MPPT wymaga pełnego przetwarzania energii i jest bardziej złożony. Realizacji tego zagadnienia nie obejmował temat artykułu.

Załącznik

Samowzbudny Generator Indukcyjny

$P_N = 5.5$ [kW] (7,5 HP) $U_{1N} = 380V$ (Δ) $I_{1N} = 11.3$ [A]

Symulator turbiny wiatrowej

$P_N = 7.5$ [kW] (10 HP) $U_{1N} = 400V$ (Δ) $I_{1N} = 14.6$ [A]

Obciążenie liniowe

$P_N = 3222$ [W], $f_N = 50$ [Hz], $\cos\phi = 0.78$,

$R_L = 30.0$ [Ω], $L_L = 76.5$ [mH]

Autor: dr inż. Andrzej Kasprowicz, Akademia Morska w Gdyni, Katedra Automatyki Okrętowej, ul. Morska 83, 81-225 Gdynia, E-mail: a.kasprowicz@we.am.gdynia.pl

LITERATURA

- [1] Wang L., Lee C.H., A novel Analysis on the Performance of an Isolated Self-Excited Induction Generator, *IEEE Trans. On Energy Conversion.*, vol. 12, (1997), no. 2, 109-117
- [2] Malik N.H., Al-Bahrani A.H., Influence of the Terminal Capacitor on the performance characteristics of a self excited induction generator, *Generation, Transmission and Distribution, IEE Proceedings C*, vol. 137, (1990), Issue 2, 168-173
- [3] Seyoum D., The Dynamic Analysis and Control of a Self-Excited Induction Generator Driven by a Wind Turbine, *The University of New South Wales, School of Electrical Engineering and Telecommunications*, Ph. Thesis, (2003), 1-324
- [4] Godoy Simões M., Farret Felix A., *Renewable Energy Systems: Design and Analysis with Induction Generators*, CRC Press, (2004), 384
- [5] Al-Saffar M.A., Nho E., Lipo T.A., Controlled Shunt Capacitor Self-Excited Induction Generator, *IEEE Industry Applications Conference*, vol. 2, (1998), 1486-1490.
- [6] Marduchus C., *Switched Capacitor Circuits for Reactive Power Generation*, Brunel University, Ph.D. Thesis, (1983)
- [7] Ahmed T., Hiraki E., Nakaoka M., Noro O., Three-Phase Self-Excited Induction Generator Driven by Variable-Speed Prime Mover for Clean Renewable Energy Utilizations and Its Terminal Voltage Regulation Characteristics by Static VAR Compensator, *IEEE Trans. ON Industry Applications*, vol. 40, (2004) Issue 4, 978-988
- [8] Lopes L. A. C., Almeida R.G., Operation aspects of an isolated wind driven induction generator regulated by a shunt voltage source inverter, *35th IAS Annual Meeting and World Conference on Industrial Applications of Electrical Energy*, vol 1-5, (2000), 2277-2282
- [9] Marra E.G., Pomilio J.A., Self-excited induction generator controlled by a VS-PWM bidirectional converter for rural applications, *IEEE Trans. ON Industrial Applications*, vol. 35,(1999), Issue 4, 877-883
- [10] Sousa G.C.D., Martins F.N., Rey J.P., Bruinsma J.A., An autonomous induction generator system with voltage regulation, *Power Electronics and Drive Systems, Proceedings 4th IEEE International Conference on*, vol. 1, (2001), 94 - 98
- [11] Akagi H., Kanazawa Y., Nabae A., Generalized theory of the instantaneous reactive power in three-phase circuits, *Conf. Rec. IEEEJ-IPEC*, (1983), 1375-1386.
- [12] Barrado J. A., Griño R., Valderrama-Blavi H., Power-Quality Improvement of a Stand-Alone Induction Generator Using a STATCOM With Battery Energy Storage System, *IEEE Tran On. Power Delivery*, vol. 25, (2010), no. 4, 2734-2741
- [13] Jakubowski B., Pieńkowski K., Analysis and synthesis of converter control system of autonomous induction generator with field oriented control, *Arch. of Electrical Engineering*, vol. 62, (2013), no. 2, 267-279
- [14] Banerji A., Biswas S.K., Singh B., Voltage and Frequency Controller for An Autonomous Asynchronous Generator, *International Journal on Electrical Engineering and Informatics*, vol 6, (2014), no. 2,
- [15] Thomsen B., Guerrero J., Thøgersen P., Faroe Islands Wind-Powered Space Heating Generator Microgrid Using Self-Excited 220 kW Induction Generator, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, vol. 5, (2014), no. 4, 1361-1366. 10.1109/TSTE.2014.2339373