

GENERATOR Z MASZYNĄ PIERŚCIENIOWĄ O BEZPOŚREDNIM STEROWANIU NAPIĘCIA WYJŚCIOWEGO

SLIP-RING INDUCTION GENERATOR WITH DIRECT OUTPUT VOLTAGE CONTROL

Abstract: The main advantage of the variable speed power generation systems with slip-ring induction generator related to cage or synchronous generator is low power and low costs of the power electronics. As the speed range is limited the power converter can be designed on few percent of the generator power, that provide lower losses and costs and higher efficiency.

The Direct Voltage Control method of slip ring induction generator is presented in this paper. This method bases on stator voltage vector feedback, that permits the generator can operate as a stand-alone set e.g. in island power systems. Moreover an autonomous operation mode provide the grid connected generator is useful even after the mains outage and can supply isolated part of a grid load.

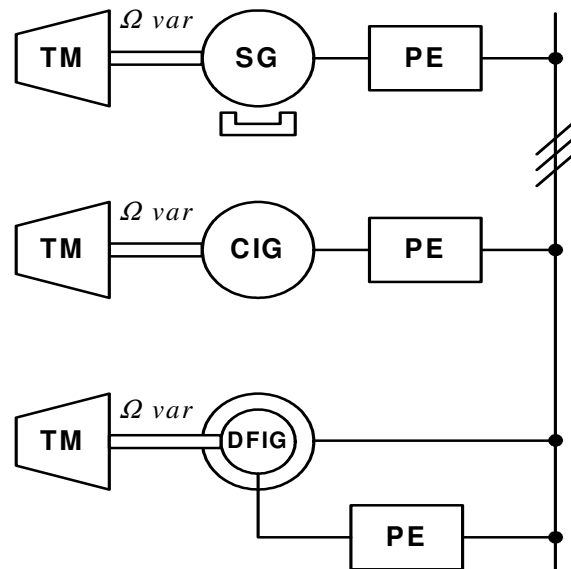
The Direct Voltage Control method uses a space vector theory. A stator voltage vector represented in the reference frame rotating with synchronous speed has fixed magnitude and position when the stator voltage amplitude, frequency and phase are fixed. To obtain the fixed values of the voltage vector amplitude and position, two voltage regulators are applied. One of them based on reference and actual stator voltage amplitude is responsible for rotor current amplitude. The second regulator based on reference and actual stator voltage angle referred to synchronous frame is responsible for rotor current frequency.

Applied stator voltage control method do not use any information about the rotor speed or position, therefore it can be called sensorless. Moreover an instantaneous value of the generated stator voltage is controlled that provide not only fixed voltage frequency and amplitude but also controlled voltage phase. This is an important advantage in grid and generated voltage synchronization process.

1. Wstęp

Układy wytwarzania energii elektrycznej stosowane powszechnie w energetyce odnawialnej wykorzystują generatory klatkowe lub synchroniczne dołączone bezpośrednio do systemu energetycznego. Współpraca z siecią takiego generatora odbywa się ze stałą prędkością wynikającą z częstotliwości sieci. Szttywne połączenie generatora z systemem energetycznym uniemożliwia regulację prędkości i dopasowanie się do optymalnego punktu pracy turbiny mechanicznej w celu uzyskania jak największej sprawności układu.

Zastosowanie przekształtnikowych układów odsprzęgających pozwala na pracę zespołów prądotwórczych ze zmienną prędkością, oraz pozwala na pracę samodzielną turbozespołów przy prędkościach różnych od prędkości synchronicznej. Przekształtnik pośredniczący w przekazywaniu energii z generatora do systemu energetycznego w przypadku generatora klatkowego lub synchronicznego musi umożliwić przeniesienie pełnej mocy generatora (rys. 1).



Rys. 1. Generatory: synchroniczny SG, klatkowy CIG i pierścieniowy DFIG współpracujące z systemem energetycznym z zastosowaniem przekształtnika.

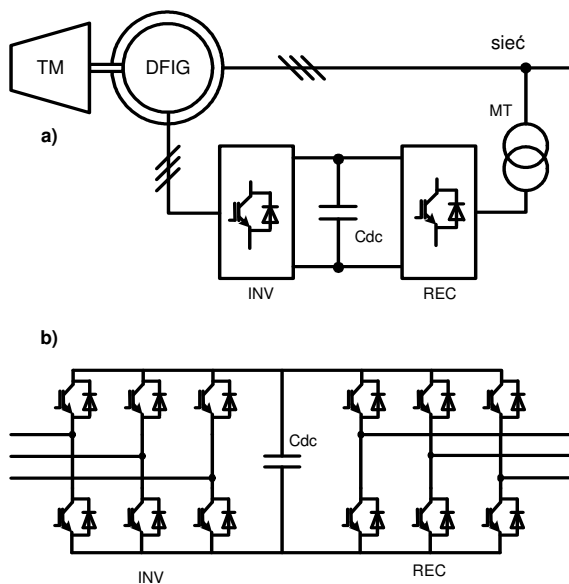
W przypadku maszyny pierścieniowej przekształtnik dołączony do wirnika maszyny (rys. 1) służy do dostarczania mocy wzbudzenia oraz mocy poślizgu co stanowić może jedynie kilka procent mocy generatora proporcjonalnie do roboczego zakresu prędkości w odniesieniu do prędkości synchronicznej. Typowy zakres mocy przekształtnika to 25% mocy generatora przy zakresie prędkości 33% powyżej i poniżej prędkości synchronicznej [1].

Zastosowanie maszyny pierścieniowej z przekształtnikiem w obwodzie wirnika jako generatora w turbinach o zmiennej prędkości mechanicznej jest więc w pełni uzasadnione przy mocach rzędu 1MW i powyżej. Sprawność takiego generatora w stosunku do generatora klatkowego czy synchronicznego z przekształtnikiem jest większa o 2-3% [1].

2. Układ generatora pierścieniowego

2.1. Układ współpracujący z siecią

W obwodzie wirnika maszyny pierścieniowej dość często stosuje się dwa trójfazowe tranzystorowe przekształtniki mostkowe ze wspólnym obwodem pośredniczącym napięcia stałego, zapewniające przepływ mocy poślizgu w obydwu kierunkach (rys. 2). Transformator dopasowujący MT obniża napięcie obwodu pośredniczącego DC do poziomu wynikającego z roboczego zakresu prędkości generatora



Rys. 2. Struktura przekształtnika w obwodzie wirnika generatora pierścieniowego zapewniająca dwukierunkowy przepływ mocy poślizgu.

Większość opracowywanych metod regulacji układów wytwarzania energii elektrycznej z maszyną indukcyjną pierścieniową wykorzystuje sprzężenie od składowych mocy czynnej i biernej oddawanej przez stojan maszyny do systemu energetycznego [1][2][3]. Sztynny system energetyczny zapewnia energię wzbudzenia generatora oraz stabilność napięcia stojana niezależnie od stanów dynamicznych układu z generatorem pierścieniowym.

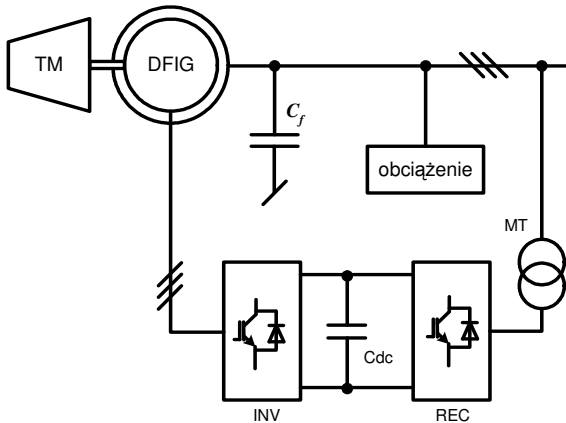
Układ wytwarzania energii elektrycznej współpracujący z systemem energetycznym wyposażony w regulację składowych mocy nie pozwala na poprawną pracę przy zaniku napięcia w systemie. W tej sytuacji układ generatora musi zostać odłączony i może zostać przyłączony do systemu dopiero po ponownym pojawieniu się napięcia w sieci.

Kontrola parametrów napięcia stojana po odłączeniu generatora od systemu pozwala na poprawną pracę i zasilanie części wydzielonych z sieci odbiorników. Wymaga to jednak opracowania odpowiedniej metody regulacji.

2.2. Układ pracujący samodzielnie

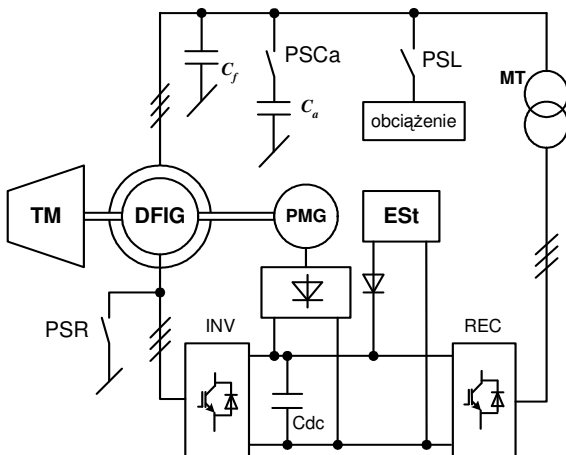
Generator współpracujący z systemem może przejść na pracę samodzielną zasilając bezprzerwowo część odbiorników wydzieloną z systemu energetycznego. Pracujący samodzielnie układ wytwarzania energii elektrycznej z generatorem pierścieniowym można zastosować również do zasilania odbiorników podczas awarii systemu energetycznego w układach zasilania rezerwowego, jak również w układach pracujących na wyspach, w siłowniach okrętowych itp.

Turbozespół pracujący samodzielnie powinien zapewniać standaryzowane napięcie (np. 220V/50Hz) dla przyłączonych do niego odbiorników. Układ generatora pierścieniowego powinien zostać ponadto wyposażony w kondensatory filtrujące na stojanie (rys. 2) w celu eliminacji harmonicznych wywołanych na skutek procesów łączeniowych. Indukcyjność rozproszenia generatora wraz z pojemnością dołączoną do stojana stanowi filtr dolnoprzepustowy wygładzający przebieg napięcia wyjściowego. Kondensatory C_f oprócz właściwości filtrujących pełnią również rolę kompensatora części mocy biernej potrzebnej do magnesowania maszyny.



Rys. 3. Układ generatora pierścieniowego pracującego samodzielnie z przekształtnikiem w obwodzie wirnika.

Układ pracującego samodzielnie generatora pierścieniowego w aplikacjach wyspowych wymaga zastosowania metody uzyskania pierwotnego wzbudzenia. Poprzez dołączenie na czas rozruchu dodatkowych kondensatorów do obwodu stojana (rys. 4) oraz chwilowe zwarcie zacisków wirnika za pomocą łącznika PSR uzyskuje się tzw. samowzbudzenie maszyny co skutkuje naładowaniem kondensatora Cdc w obwodzie pośredniczącym przekształtnika [4]. Innym sposobem wstępnego naładowania obwodu napięcia stałego jest wykorzystanie małego akumulatora ESt lub połączonego przez prostownik diodowy generatora z magnesami trwałymi PMG o mocy rzędu ułamków procenta mocy generatora pierścieniowego DFIG. Po wstępnym naładowaniu kondensatora w obwodzie napięcia stałego przekształtnika układ generatora pierścieniowego jest gotowy do pracy autonomicznej.



Rys. 4. Metody osiągnięcia wzbudzenia autonomicznego generatora pierścieniowego.

4. Regulacja napięcia wyjściowego generatora pierścieniowego.

Regulacja w układzie generatora pierścieniowego odbywa się poprzez sterowanie prądem wirnika. Zarówno praca autonomiczna jak i współpraca z systemem energetycznym wymaga wymuszenia w obwodzie wirnika prądu o odpowiedniej amplitudzie, częstotliwości oraz fazie.

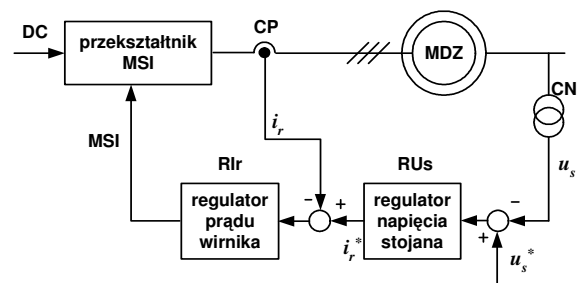
Wymuszenie w wirniku prądu stałego powoduje, że generator pierścieniowy pracuje jak generator synchroniczny, czyli częstotliwość generowanego na stojanie napięcia wynika z prędkości obrotowej wirnika.

Wymuszając w wirniku prąd przemienny o częstotliwości f_r otrzymuje się na stojanie napięcie o częstotliwości f_s równej sumie częstotliwości wynikającej z mechanicznego obrotu wirnika f_m oraz częstotliwości obrotu pola względem wirnika f_r (poślizgu).

$$f_s = f_m + f_r \quad (1)$$

Przy zmiennej prędkości mechanicznej wirnika regulacja częstotliwości napięcia stojana musi odbywać się przez zmianę częstotliwości prądu wirnika. Amplituda generowanego na stojanie napięcia zależy od amplitudy prądu wirnika oraz obciążenia, zatem regulacja amplitudy napięcia stojana odbywa się przez sterowanie amplitudą prądu wirnika.

Dokonując pomiaru amplitudy $|u_s|$ oraz częstotliwości napięcia u_s generowanego na stojanie generatora pierścieniowego można wymusić metodą regulacyjną odpowiedni prąd wirnika w celu osiągnięcia wartości zadanych amplitudy i częstotliwości napięcia stojana. Dzięki temu można wyeliminować czujniki prędkości obrotowej i położenia wirnika (rys.5).



Rys. 5. Koncepcja metody regulacji napięcia stojana bez czujnika wielkości mechanicznych.

Zastosowanie teorii wektora przestrzennego do realizacji metody regulacji pokazanej na rysunku 5 powoduje regulację wartości chwilowych generowanego napięcia.

Symetryczne napięcie trójfazowe stojana u_{sa} , u_{sb} , u_{sc} sprowadzone do wirującego z prędkością synchroniczną Ω_{us}^* układu współrzędnych dq daje wektor \mathbf{u}_s opisany dwiema współrzędnymi \mathbf{u}_{sd} , \mathbf{u}_{sq} .

$$\mathbf{u}_s = \mathbf{u}_{sd} + j\mathbf{u}_{sq} \quad (2)$$

Współrzędne tego wektora są obliczone według

$$\mathbf{u}_{sd} = \frac{2}{3} \left[\left(u_{sa} - \frac{1}{2}u_{sb} - \frac{1}{2}u_{sc} \right) \cos(\Omega_{us}^* t) + \frac{\sqrt{3}}{2} (u_{sb} - u_{sc}) \sin(\Omega_{us}^* t) \right] \quad (3)$$

$$\mathbf{u}_{sq} = \frac{2}{3} \left[- \left(u_{sa} - \frac{1}{2}u_{sb} - \frac{1}{2}u_{sc} \right) \sin(\Omega_{us}^* t) + \frac{\sqrt{3}}{2} (u_{sb} - u_{sc}) \cos(\Omega_{us}^* t) \right] \quad (4)$$

są stałe w czasie jeśli częstotliwość napięcia trójfazowego odpowiada prędkości wirowania układu współrzędnych.

Jeśli zatem układ regulacji zapewni stałe wartości składowych wektora napięcia stojana \mathbf{u}_{sd} , \mathbf{u}_{sq} w wirującym układzie współrzędnych dq , co odpowiada stałej amplitudzie i kątowi położenia wektora w układzie współrzędnych biegunowych $A\phi$ to odpowiadające wektorowi napięcia trójfazowe stojana u_{sa} , u_{sb} , u_{sc} będzie stałe co do amplitudy, częstotliwości i fazy.

Przekształcając wektor do współrzędnych biegunowych otrzymuje się odsprężoną regulację amplitudy i częstotliwości napięcia stojana. Reprezentacja wektora w układzie współrzędnych biegunowych jako amplitudy i kąta położenia odbywa się za pomocą

$$|\mathbf{u}_s| = \sqrt{u_{sd}^2 + u_{sq}^2} \quad (5)$$

$$\alpha_{us} = a \tan \left(\frac{u_{sq}}{u_{sd}} \right) \quad (6)$$

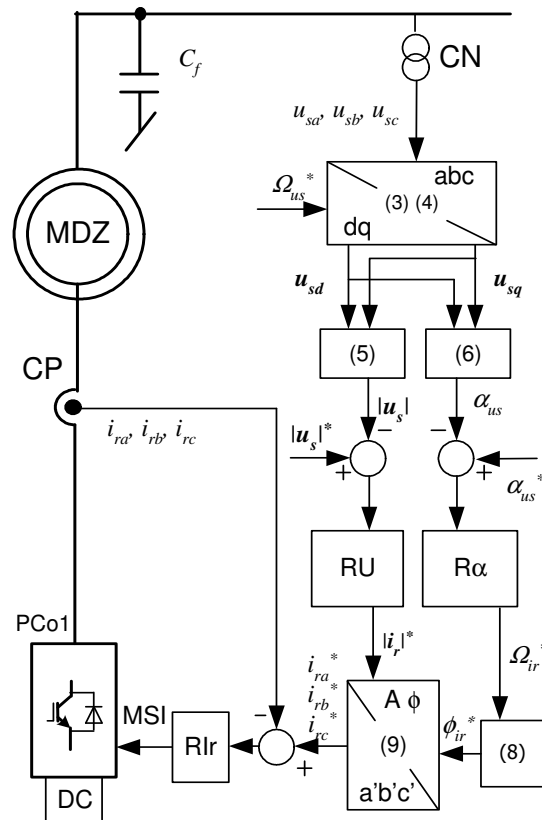
Proponowana metoda Bezpośredniej Regulacji Napięcia [4][5][6] jest schematycznie zaprezentowana na rysunku 6. Dwa regulatory wektora napięcia stojana (RU – regulator amplitudy, $R\alpha$ – regulator kąta) zastosowano do wyznaczenia drogą regulacyjną odpowiednio zadanych wartości amplitudy $|\mathbf{i}_r|^*$ oraz prędkości kątovej Ω_{ir}^* wektora prądu wirnika. Wartość zadana kąta wektora prądu stojana wynosi

$$\alpha_{us}^* = 0, \quad (7)$$

co oznacza, że wektor zadany napięcia stojana pokrywa się z osią d wirującego układu współrzędnych.

Całkowanie zadanej prędkości kątovej wektora prądu wirnika prowadzi do wyznaczenia kąta wektora prądu wirnika względem wirnika.

$$\phi_{ir}^*(t) = \int \Omega_{ir}^*(\tau) d\tau \quad (8)$$



Rys. 6. Schemat metody Bezpośredniej Regulacji Napięcia autonomicznego generatora pierścieniowego.

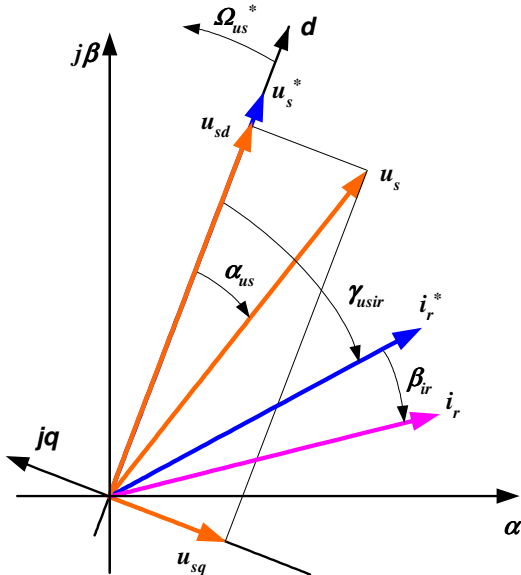
Transformacja zadanego wektora prądu wirnika i_r^* z wirującego biegunowego układu współrzędnych $A\phi$ do układu $a'b'c'$ związanego z wirnikiem odbywa się za pomocą

$$\begin{bmatrix} i_{ra}^* \\ i_{rb}^* \\ i_{rc}^* \end{bmatrix} = |i_r^*| \cos \begin{bmatrix} \phi_{ir}^* \\ \phi_{ir}^* - 2\pi/3 \\ \phi_{ir}^* + 2\pi/3 \end{bmatrix} \quad (9)$$

Osiągnięte w ten sposób trzy zadane sygnały dla trzech prądów wirnika i_{ra}^* , i_{rb}^* , i_{rc}^* są wielkościami odniesienia dla regulatora prądu wirnika RIr.

Działanie regulatora kąta α_{us}^* wektora napięcia stojana $R\alpha$ decyduje o zadanej prędkości kątowej Ω_{ir}^* prądu wirnika i powoduje jego odpowiednie przesunięcie tak, by wytwarzany wektor napięcia stojana pokrywał się z wektorem zadanym.

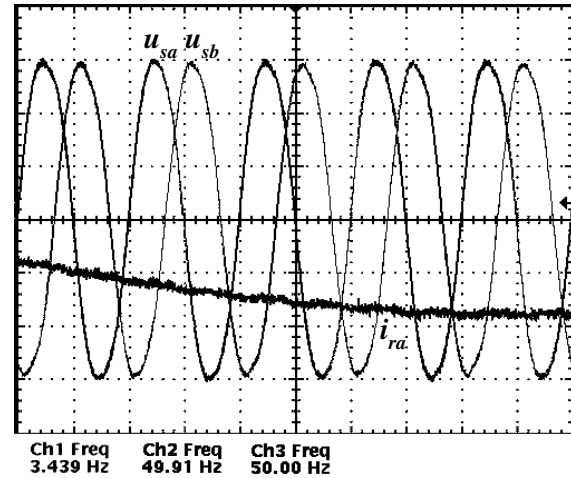
W stanie dynamicznym wywołanym zmianą prędkości obrotową wirnika odchylenie wektora napięcia stojana u_s od pozycji zadanej niesie informację, że wektor prądu wirnika i_r powinien zostać przesunięty o kąt β_{ir} do pozycji i_r^* (rys. 7), w której wektor napięcia stojana u_s pokryje się z wektorem zadanym u_s^* .



Rys. 7. Wykres wektorowy napięcia stojana oraz prądu wirnika w stanie dynamicznym wywołanym zmianą prędkości mechanicznej

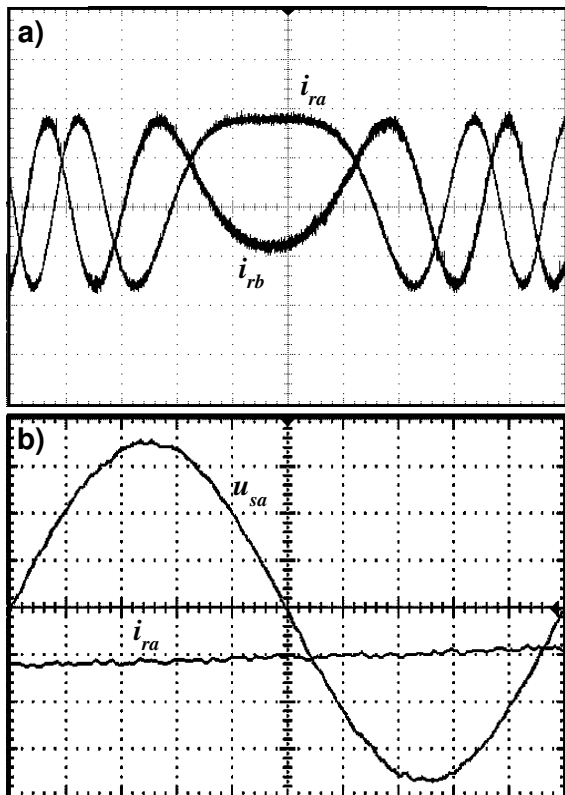
5. Wyniki badań laboratoryjnych

Proponowaną metodę regulacji napięcia autonomicznego generatora pierścieniowego sprawdzono w układzie laboratoryjnym z maszyną pierścieniową o mocy 2,2 kW oraz napięciu stojana 220/380V i napięciu wirnika 61V. Częstotliwość napięcia generowanego na stojanie jest sumą częstotliwości prądu wirnika i częstotliwości odpowiadającej prędkości mechanicznej (1). Oscylogram napięć dwóch faz stojana u_{sa} , u_{sb} oraz prąd fazy wirnika i_{ra} w stanie ustalonym przy prędkości 900 obr/min przedstawiono na rysunku 8.



Rys. 8. Oscylogram napięć stojana u_{sa} , u_{sb} w dwu fazach oraz prądu jednej fazy wirnika i_{ra} przy prędkości mechanicznej 900 obr/min

Stała częstotliwość i amplituda napięcia stojana są zachowane niezależnie od prędkości obrotowej wirnika poprzez dopasowanie częstotliwości prądu wirnika do aktualnej prędkości mechanicznej. Na rysunku 9a przedstawiono zachowanie się prądu wirnika przy zmianie prędkości mechanicznej w zakresie od 800 obr/min do 1200 obr/min, podczas gdy w części b tego rysunku pokazano wybrany jeden okres generowanego napięcia podczas zmiany prędkości. W tym zakresie prędkości mamy do czynienia z przekroczeniem prędkości synchronicznej, która dla badanego generatora wynosi 1000 obr/min. Przy przekraczaniu prędkości synchronicznej wektor prądu wirnika zmienia swój kierunek wirowania względem wirnika na przeciwny powodując zmianę kolejności faz prądów wirnika i charakterystyczny ich przebieg jak na rysunku 9a.

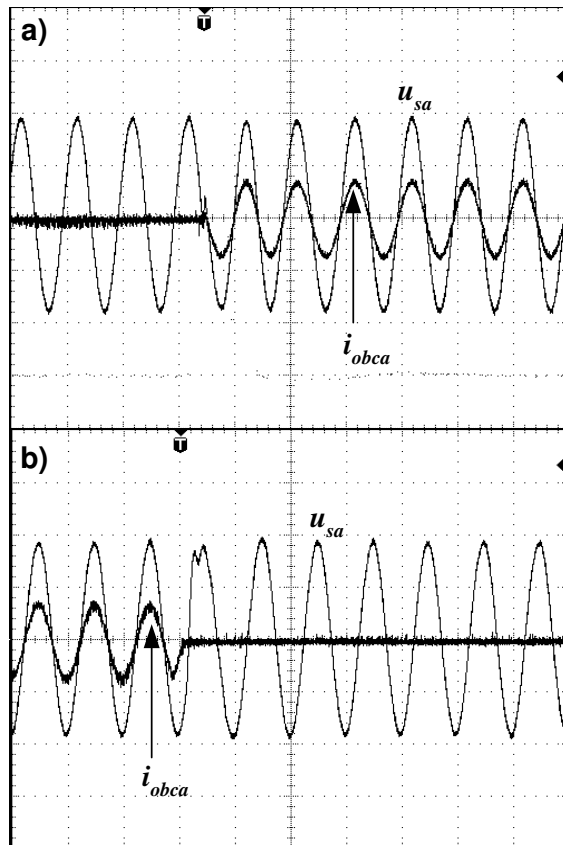


Rys. 9. Prądy wirnika i_{ra} , i_{rb} (a), oraz prąd wirnika i_{ra} i jeden okres napięcia stojana u_{sa} (b) podczas zmiany prędkości obrotowej od 800 do 1200 obr/min

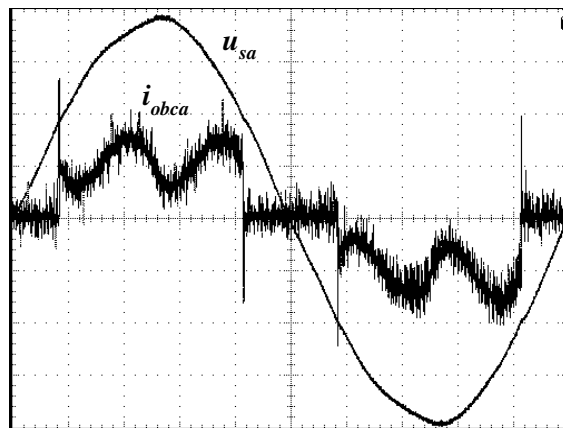
Proponowany układ regulacji autonomicznego generatora pierścieniowego utrzymuje stałą amplitudę i częstotliwość generowanego napięcia również w przypadku zmiany obciążenia. Na rysunku 10a przedstawiono oscylogram napięcia stojana u_{sa} i prądu obciążenia i_{obc} podczas załączenia 75% obciążenia znamionowego generatora, podczas gdy w części b tego rysunku przedstawiono oscylogram napięcia stojana i prądu obciążenia podczas wyłączenia 75% obciążenia znamionowego. Przed włączeniem i po wyłączeniu obciążenia układ generatora pracuje nieobciążony.

Przypadek dołączenia obciążenia nieliniowego w postaci trójfazowego mostka diodowego z filtrem wyjściowym LC zaprezentowano na rysunku 11. Odbiornik rezystancyjny o mocy 25% obciążenia generatora dołączony do wyjścia prostownika nie wpływa niekorzystnie na przebieg napięcia generatora. W przypadku dołączenia odbiornika o większej mocy (50% mocy generatora) strome narastanie zbrocza prądu obciążenia powoduje odkształcenie generowanego napięcia (rys. 12).

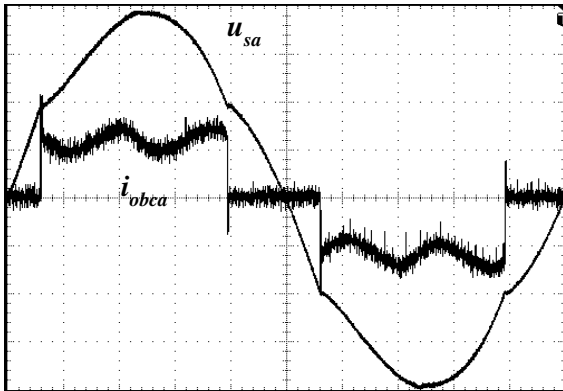
Kompensacja odkształceń generowanego napięcia za pomocą forsowania odpowiedniego kształtu prądu wirnika (rys. 14) minimalizuje negatywny wpływ obciążenia nieliniowego, jednak z powodu dużej indukcyjności generatora małej mocy nie eliminuje całkowicie tego zjawiska.



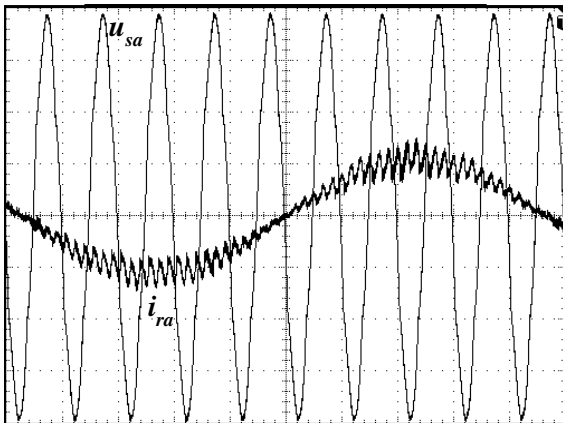
Rys. 10. Napięcie stojana u_{sa} i prąd obciążenia i_{obc} podczas załączenia (a) oraz wyłączenia (b) 75% obciążenia znamionowego generatora.



Rys. 11. Napięcie stojana u_{sa} i prąd obciążenia i_{obc} przy zasilaniu odbiornika nieliniowego o mocy 25% obciążenia znamionowego.

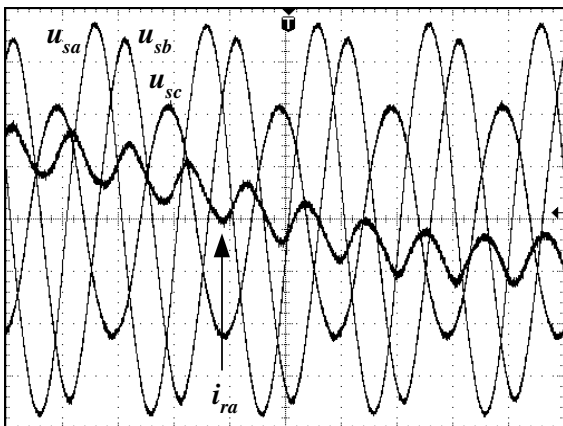


Rys. 12. Napięcie stojana u_{sa} i prąd obciążenia i_{obc} przy zasilaniu odbiornika nieliniowego o mocy 50% obciążenia znamionowego.



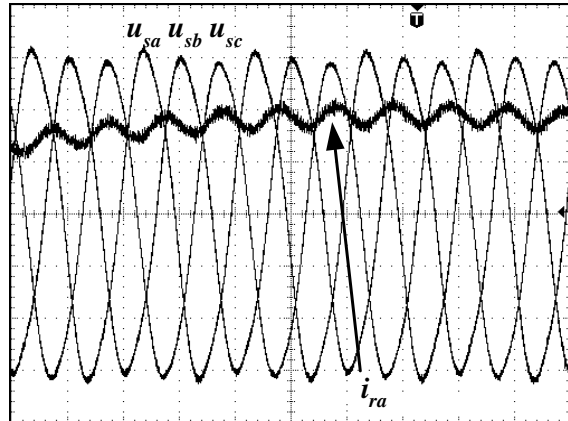
Rys. 13. Forsowanie prądu wirnika w celu eliminacji zniekształceń napięcia stojana podczas obciążenia odbiornikiem nieliniowym.

W przypadku obciążenia generatora odbiornikiem niesymetrycznym brak dostępu do punktu neutralnego stojana generatora powoduje znaczną asymetrię napięć stojana nawet przy małej asymetrii obciążenia (rys. 14).



Rys. 14. Asymetria napięć przy małej asymetrii obciążenia (20%) i braku dostępu do punktu neutralnego stojana generatora.

Zapewnienie dostępu do punktu neutralnego stojana połączonego w gwiazdę przez wyrowadzenie przewodu neutralnego powoduje poprawę symetrii napięć (rys. 15). Dzięki zastosowaniu czteroprzewodowego układu połączeń po stronie stojana możliwe jest zasilanie obciążeń asymetrycznych o niedużej asymetrii. Zasilanie obciążeń o większej asymetrii wymaga opracowania odpowiedniej metody korekcji asymetrii napięcia.



Rys. 15. Napięcia trójfazowe generatora przy małej asymetrii obciążenia (20%) i dostępie do punktu neutralnego stojana generatora.

7. Literatura

- [1]. Muller S., Deicke M., De Doncker R.W.: *Doubly fed induction generator systems for wind turbines*. IEEE Industry applications Magazine, 3/2002 s. 26-33
- [2]. Bogalecka E., Krzemiński Z.: *Sensorless control of double fed machine for wind turbines*. EPE-PEMC 2002, Cavtat&Dubrovnik, Chorwacja
- [3]. Krzemiński Z.: *Sensorless multiscalar control of double fed machine for wind power generators*. PCC 2002, Osaka, Japonia
- [4]. Iwański G., Koczara W.: *Control system of the variable speed autonomous doubly fed induction generator*. EPE-PEMC 2004, Ryga, Łotwa
- [5]. Iwański G., Koczara W.: *Sensorless stand alone variable speed system for distributed generation*. PESC 2004, Aachen, Niemcy
- [6]. Iwański G., Koczara W.: *Simple autonomous sensorless generation system with wound induction machine*. ISIE 2004, Ajaccio, Francja

Autorzy

prof. dr hab. Włodzimierz Koczara, mgr. inż. Grzegorz Iwański, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, tel. 622 73 62, fax. 622 69 56
 email: koczara@isep.pw.edu.pl
 email: iwanski@isep.pw.edu.pl