

*autonomiczny generator indukcyjny,  
układ przekształtnikowy, sterowanie*

Błażej JAKUBOWSKI\*, Krzysztof PIENKOWSKI\*

## **AUTONOMICZNE GENERATORY INDUKCYJNE Z PRZEKSZTAŁTNIKAMI TYPU STATCOM**

W artykule omówiono przekształtnikowe układy autonomicznych generatorów indukcyjnych klatkowych. Przedstawiono klasyfikację i przegląd topologii przekształtnikowych układów autonomicznych generatorów indukcyjnych. Przeprowadzono analizę porównawczą przekształtnikowych układów autonomicznych generatorów indukcyjnych z zastosowaniem układów przekształtnikowych stosowanych w sieciach prądu przemiennego do kompensacji mocy biernej – przekształtniki typu STATCOM oraz przekształtników o układach topologicznych równoległych filtrów aktywnych stosowanych do eliminacji wyższych harmonicznych. Omówiono metody sterowania przekształtnikowych układów autonomicznych generatorów indukcyjnych przy zmianach parametrów odbiorników stanowiących obciążenie generatora.

### **1. WPROWADZENIE**

Autonomiczne generatory indukcyjne stanowią źródła energii elektrycznej przewidywane do zastosowań w miejscach odległych od sieci elektrycznych lub jako rezerwowe źródła energii, wykorzystywane w stanach awaryjnych. Zaletą generatorów indukcyjnych klatkowych jest ich prostota konstrukcji, stosunkowo małe wymiary i ciężar, duża niezawodność pracy, brak elementów stykowych, możliwość pracy w trudnych warunkach środowiskowych. Znaczną wadą generatorów indukcyjnych jest konieczność zapewnienia mocy biernej niezbędnej do wytwarzania wirującego pola magnetycznego w szczelinie powietrznej maszyny. W konwencjonalnych układach autonomicznych generatorów indukcyjnych źródłem mocy biernej jest bateria kondensatorów przyłączona do zacisków stojana generatora. W wielu przypadkach obciążenie generatora indukcyjnego może zmieniać się dynamicznie z powodu zmian liczby przyłączanych odbiorników lub zmian parametrów tych

---

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

odbiorników. Zapewnienie stałej wartości amplitud napięć wytwarzanych przez generator indukcyjny wymaga odpowiedniego sterowania mocą bierną dostarczaną do generatora. Stosowane dotychczas konwencjonalne metody sterowania są oparte na zmianie liczby sekcji baterii kondensatorów wzbudzenia. Wadą tych układów jest mała dokładność sterowania, duża liczba wymaganych łączników oraz stosunkowo długie czasy reakcji układu sterowania. Z tych względów w nowoczesnych układach autonomicznych generatorów indukcyjnych rozwijane są przekształtnikowe układy wzbudzenia.

W przekształtnikowych układach wzbudzenia źródłem mocy biernej dostarczanej do generatora indukcyjnego jest odpowiednio sterowany przekształtnik energoelektroniczny. Przedmiotem wielu dotychczasowych prac jest analiza i badania przekształtnikowych układów wzbudzenia generatorów indukcyjnych opartych na wykorzystaniu metod sterowania częstotliwościowego maszyn indukcyjnych [4, 5]. Metody te wymagają stosowania złożonych algorytmów sterowania, estymacji wielu wielkości elektromagnetycznych i mechanicznych generatora oraz identyfikacji parametrów elektromagnetycznych generatora.

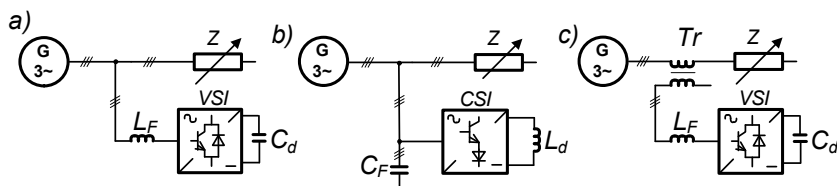
Przy stosowaniu autonomicznych generatorów indukcyjnych preferowane są niskie koszty wykonania i eksploatacji oraz proste algorytmy sterowania. Możliwości takie zapewniają układy wzbudzenia generatorów indukcyjnych oparte na wykorzystaniu układów przekształtnikowych stosowanych w sieciach prądu przemiennego do kompensacji mocy biernej (układy typu STATCOM) oraz do aktywnej filtracji niepożądanych składowych prądów lub napięć w sieci [1–3, 6, 7]. W artykule tym dokonano przeglądu tego rodzaju przekształtnikowych układów wzbudzenia generatora oraz omówiono wybrane algorytmy i metody sterowania.

## 2. PRZEKSZTAŁTNIKOWE UKŁADY AUTONOMICZNYCH GENERATORÓW INDUKCYJNYCH

Przekształtnikowy układ typu STATCOM do sterowania mocy biernej generatora indukcyjnego może być zrealizowany z zastosowaniem sterowanego prądowo przekształtnika energoelektronicznego typu AC/DC o topologii przekształtnika częstotliwości. Wyróżnia się dwa podstawowe rodzaje przekształtników AC/DC: falownik napięcia (VSI) i falownik prądu (CSI). Każdy z tych przekształtników może generować moc bierną pojemnościową lub indukcyjną, zapewniając warunki niezbędne do wzbudzenia generatora. Podstawowe układy przyłączenia przekształtnika do generatora indukcyjnego przedstawiono na rys. 1.

W zależności od rodzaju połączenia obwodów przekształtnika z obwodami generatora indukcyjnego i obwodami odbiorników wyróżnia się układy o połączeniu równoległym i szeregowym. Możliwe jest również zastosowanie układu o połączeniu równoległo-szeregowym. Przedmiotem dalszych rozważań będą układy równoległe

z VSI (rys. 1a), ponieważ układy te odznaczają się najlepszymi właściwościami i prostotą sterowania.



Rys. 1. Przekształtnikowe układy wzbudzenia autonomicznego generatora indukcyjnego:

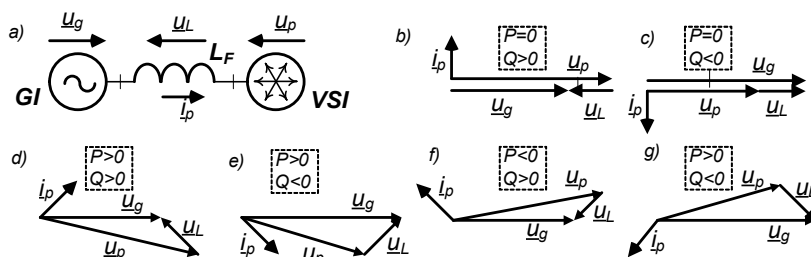
a) układ równoległy z VSI; b) układ równoległy z CSI; c) układ szeregowy z VSI

Fig. 1. Converter schemes of autonomous induction generator:

a) parallel circuit with VSI; b) parallel circuit with CSI; c) serial circuit with VSI

Przekształtnikowy układ równoległy składa się ze sterowanego prądowo falownika napięcia (VSI) z kondensatorem  $C_d$  o dużej pojemności przyłączonym do obwodu DC przekształtnika. Obwody po stronie AC przekształtnika są przyłączone do generatora indukcyjnego przez dławiki sprzęgające  $L_F$ .

Na rys. 2a przedstawiono uproszczony układ złożony z generatora indukcyjnego GI i przekształtnika VSI. Dla tego układu wyznaczono wykresy wskazowe dla podstawowych napięć i prądów fazowych (rys. 2b–g). Wykresy te ilustrują podstawowe zasady sterowania przepływem mocy bierniej  $Q$  i mocy czynnej  $P$  w równoległym układzie generatora indukcyjnego z przekształtnikiem VSI.



Rys. 2. Zasada sterowania przepływem mocy bierniej  $Q$  i mocy czynnej  $P$  w układzie równoległym z VSI

Fig. 2. Principle of control of reactive power  $Q$  and active power  $P$  in parallel scheme with VSI

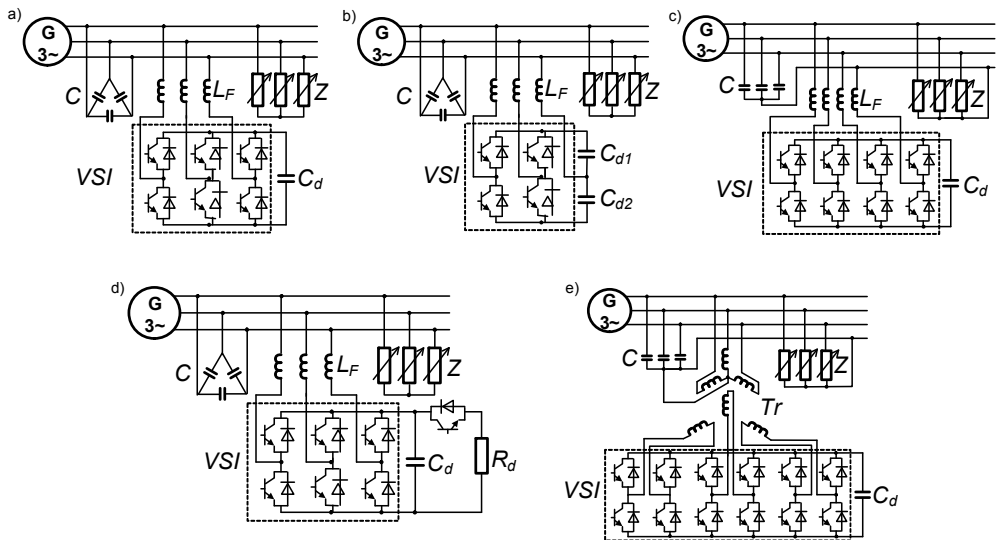
Na podstawie tych wykresów mogą być sformułowane podstawowe zasady sterowania przekształtnikiem VSI przy współpracy z generatorem indukcyjnym:

1) Przekształtnik VSI jest źródłem mocy bierniej pojemnościowej ( $Q > 0$ ) jeżeli amplituda napięcia fazowego po stronie AC przekształtnika VSI jest większa od amplitudy napięcia fazowego generatora. Jeżeli warunek ten nie jest spełniony to przekształtnik VSI jest źródłem mocy bierniej indukcyjnej ( $Q < 0$ ).

2) Przekształtnik VSI jest odbiornikiem mocy czynnej ( $P > 0$ ) jeżeli wskaz napięcia fazowego po stronie AC przekształtnika VSI jest opóźniony w fazie względem wskaz napięcia fazowego generatora. Jeżeli wskaz napięcia fazowego VSI wyprzedza w fazie wskaz napięcia fazowego generatora, to przekształtnik VSI jest źródłem mocy czynnej ( $P < 0$ ).

Przez sterowanie przekształtnikiem VSI z zastosowaniem sterowania MSI można odpowiednio wymuszać pożądaną wartość amplitudy i kąta fazowego składowej podstawowej napięcia przekształtnika VSI, a przez to sterować zarówno przepływem mocy biernej i czynnej w przekształtnikowym układzie wzbudzenia generatora indukcyjnego.

Na rys. 3 przedstawiono wybrane przekształtnikowe układy autonomicznych generatorów indukcyjnych z zastosowaniem przekształtników VSI o topologiach wykorzystywanych w sieciach do kompensacji mocy biernej i filtracji aktywnej. W układach tych zastępczy odbiornik Z reprezentuje grupę odbiorników symetrycznych lub niesymetrycznych o dowolnym charakterze obciążenia i układzie połączeń.



Rys. 3. Wybrane układy generatora indukcyjnego z zastosowaniem przekształtnika VSI  
Fig. 3. The examples of converter schemes of induction generator with VSI converter

W układach na rys. 3 występuje stacjonarna bateria kondensatorów połączonych w trójkąt lub w gwiazdę. Zastosowanie tej baterii pozwala na obniżenie mocy przekształtnika VSI, którego zadaniem jest dostarczanie tylko odpowiednio sterowanej dodatkowej mocy biernej dla zapewnienia wymaganych warunków pracy generatora.

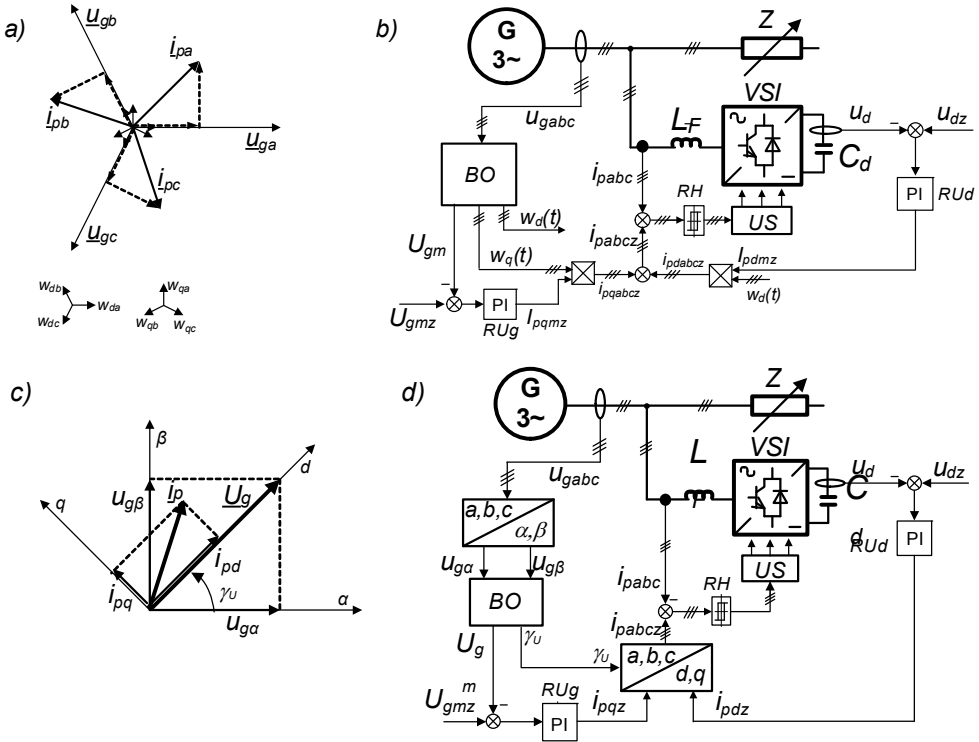
Układ z rys. 3a jest układem podstawowym złożonym z 3-gałęziowego 2-poziomowego przekształtnika VSI. Układ z rys. 3b z przekształtnikiem 2-gałęziowym

z rozdzielonymi kondensatorami w obwodzie DC co pozwala na zmniejszenie liczby sterowanych zaworów energoelektronicznych przekształtnika. Układy te są stosowane w przypadku zasilania z generatora odbiorników 3-fazowych bez przewodu neutralnego [1, 2, 6]. W układzie z rys.3c zastosowano 4-gałęziowy przekształtnik VSI pozwalający na zasilanie przez generator indukcyjny odbiorników 3-fazowych z przewodem neutralnym oraz odbiorników 1-fazowych. Podobne właściwości posiada układ z 3-gałęziowym VSI z rozdzielonymi kondensatorami w obwodzie DC, których punkt połączenia stanowi punkt przyłączenia przewodu neutralnego. W układzie z rys. 3d przekształtnik VSI współpracuje z dodatkowym przerywaczem okresowym do sterowania wytracaniem mocy czynnej na rezystancji  $R_d$ . Stosowanie tego typu układu jest uzasadnione w przypadku gdy generator indukcyjny jest napędzany np. przez nieregulowaną turbinę o stałej mocy, a pobór mocy przez przyłączone do generatora odbiorniki jest mniejszy od dostarczanej mocy [7]. Układ z rys. 3d przedstawia układ transformatorowy pozwalający na galwaniczne oddzielenie obwodów przekształtnika od obwodów generatora indukcyjnego i odbiorników. Przekształtnik VSI składa się z trzech jednofazowych mostkowych falowników napięcia zasilanych przez uzwojenia wtórne transformatora 3-fazowego. W obwodzie DC wspólnym dla trzech falowników znajduje się kondensator o dużej pojemności. Zaletą takiego układu topologicznego jest możliwość optymalnego doboru poziomu napięcia w obwodzie DC przekształtnika oraz możliwość oddzielnego sterowania wielkości elektromagnetycznych w każdej fazie układu.

### 3. STEROWANIE PRZEKSZTAŁTNIKOWYCH UKŁADÓW AUTONOMICZNYCH GENERATORÓW INDUKCYJNYCH

Na rysunkach 4a i 4b przedstawiono zasadę i układ sterowania przekształtnikowym generatorem indukcyjnym z wykorzystaniem jako zmiennych 3-fazowych wielkości elektromagnetycznych generatora i przekształtnika. Prądy fazowe po stronie AC przekształtnika są tu rozpatrywane jako suma wartości chwilowych prądów czynnych współfazowych z napięciami fazowymi generatora i prądów biernych przesuniętych w fazie o kąt równy  $\pi/2$ . Amplituda prądów czynnych jest wyznaczana przez regulator napięcia w obwodzie pośredniczącym VSI, a amplituda prądów biernych przez regulator napięcia generatora. Na podstawie wartości pomiarowych w bloku obliczeniowym BO wyznaczana jest wartość chwilowa amplitudy napięcia generatora oraz chwilowe 3-fazowe napięcia jednostkowe  $w_d(t)$  i  $w_q(t)$  o przebiegach współfazowych i prostopadłych do wektorów napięć fazowych. Napięcia jednostkowe w blokach mnożących są mnożone przez wyznaczone w układzie regulacji amplitudy składowych czynnych i biernych prądów przekształtnika. Po zsumowaniu otrzymanych w ten sposób zadanych prądów czynnych i biernych otrzymuje się wartości zadane chwilowych prądów fazowych przekształtnika. Histerezyowe układy regulacji dokonują

porównania wartości zadanych prądów chwilowych przekształtnika z wartościami pomiarowymi i na podstawie odchyłek regulacji generują impulsy sterowania zaworami energoelektronicznymi przekształtnika.



Rys. 4. Układy sterowania generatorem indukcyjnym z przekształtnikiem VSI:

a), b) zasada i układ sterowania z wykorzystaniem zmiennych 3-fazowych; c),

d) zasada i układ sterowania z wykorzystaniem zmiennych w układzie wirującym  $d, q$ ;

Fig. 4. The control of induction generator with VSI converter: a), b) principle and control scheme with application of 3-phase variables; c), d) principle and control scheme with application of variables in rotating system  $d, q$

Na rysunkach 4c i 4d przedstawiono zasadę i układ sterowania przekształtnikowym generatorem indukcyjnym z wykorzystaniem zmiennych rozpatrywanych w wirującym prostokątnym układzie współrzędnych  $d, q$  o osi  $d$  współliniowej z przestrzennym wektorem napięcia fazowego generatora. Chwilowa wartość składowej  $d$  prądu przekształtnika jest wyznaczana przez regulator napięcia w obwodzie pośredniczącym VSI, a chwilowa wartość składowej  $q$  prądu przekształtnika jest wyznaczana przez regulator napięcia fazowego generatora. Po transformacji odwrotnej wartości chwilowe składowych prądów przekształtnika są przekształcane do wielkości 3-fazowych i sterowanie ma identyczną postać jak w przypadku omówionym powyżej. Na pod-

stawie wartości pomiarowych w bloku obliczeniowym BO wyznaczana jest wartość chwilowa amplitudy napięcia generatora oraz wartość chwilowa kąta położenia wektora napięć fazowych, wymaga do odpowiedniej orientacji układu współrzędnych i transformacji odwrotnej zmiennych elektromagnetycznych. Wyznaczanie chwilowego położenia kąтового wektora napięcia generatora może być też zrealizowane przez zastosowanie pętli synchronizacji fazowej (PLL).

Analiza i badania symulacyjne omawianych układów przekształtnikowych będą przedmiotem dalszych prac autorów.

#### 4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie przedstawionych układów przekształtnikowych autonomicznego generatora indukcyjnego pozwala na realizację metod sterowania, opartych na algorytmach odpowiedniego sterowania przepływem mocy biernej i czynnej między generatorem indukcyjnym, a przekształtnikiem VSI. Zaletą tych metod sterowania są proste algorytmy sterowania oraz możliwość zastosowania stosunkowo łatwo mierzalnych wielkości elektromagnetycznych – prądów i napięć w układzie. Z tych względów stosowanie tych układów jest szczególnie uzasadnione do sterowania autonomicznych generatorów indukcyjnych, pracujących w warunkach silnych zakłóceń ze strony zmiennego obciążenia generatora.

#### LITERATURA

- [1] CHATTERJEE J.K., PERUMAL B.V., GOPU N.R., *Analysis of operation of a self-excited induction generator with generalized impedance controller*, IEEE Transactions on Energy Conversion, 2006, Vol. 22, No. 2, 307–315.
- [2] CHAUHAN Y.K., JAIN S.K., SINGH B., *Static Volt Ampere Reactive Compensator for Self-Excited Induction Generator Feeding Dynamic Load*, Electric Power Components and Systems, 2008, Vol. 36, No. 102, 1080–1101.
- [3] CHEN W.L., HUANG Y.G., PIEN C.H., *Control and Performance Analysis for a Capacitor-coordinated Static Synchronous Compensator to Enhance Dynamic Compensation Capability*, Electric Power Components and Systems, 2011, Vol. 39, No. 10, 991–1006.
- [4] JAKUBOWSKI B., PIEŃKOWSKI K., *Sterowanie autonomicznym generatorem indukcyjnym ze wzbudzeniem przekształtnikowym*, Zeszyty Problemowe, Maszyny Elektryczne, Komel, 2010, Nr 88, 123–128.
- [5] JAKUBOWSKI B., PIEŃKOWSKI K., *Analiza układów polowo-zorientowanego sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, Vol. 87, No. 11, 111–115.
- [6] SINGH B., KASAL G.K., *Analysis and Design of Voltage and Frequency Controllers for Isolated Asynchronous Generators in Constant Power Applications*, Proc. of International Conference on Power Electronics, Drives and Energy Systems, PEDES '06, 2006, 1–7.
- [7] SINGH B., MURTHY S.S., GUPTA S., *A Voltage and Frequency Controller for Self-Excited Induction Generators*, Electric Power Components and Systems, 2006, Vol. 34, No. 2, 141–157.

## ISOLATED INDUCTION GENERATORS WITH STATCOM CONVERTER SYSTEMS

The paper deals with the review of converter systems of isolated induction generators. The article describes the controllers for control of self-excited induction generator (SEIG) supplying static/dynamic, balanced/unbalanced AC loads. The converters used for reactive power compensation (STATCOM type) and active filtering are considered. The converter schemes of isolated induction generator are presented and the comparison of converter schemes is performed. The principles of control and control schemes are presented and discussed.