

*autonomiczny generator indukcyjny,  
sterowanie polowo-zorientowane  
badania symulacyjne*

Błażej JAKUBOWSKI\*, Krzysztof PIENKOWSKI\*

## **SYNTEZA PRZEKSZTAŁNIKOWEGO UKŁADU STEROWANIA AUTONOMICZNYM GENERATOREM INDUKCYJNYM. CZĘŚĆ II – BADANIA SYMULACYJNE**

W artykule przedstawiono wyniki badań symulacyjnych przekształtnikowego układu sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym. Badania symulacyjne wykonano dla stanu obciążenia generatora indukcyjnego odbiornikiem rezystancyjno-indukcyjnym i przypadku zmian prędkości kątowej generatora. Przedstawiono przebiegi czasowe wielkości elektromagnetycznych oraz wykresy wektorowe wybranych zmiennych stanu układu dla rozpatrywanych stanów pracy generatora. Otrzymane wyniki badań symulacyjnych potwierdzają słuszność przyjętych założeń i metody syntezy układu sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym.

### 1. WSTĘP

Obecnie rozwijane są przekształtnikowe układy sterowania autonomicznymi generatorami indukcyjnymi [1, 3–6]. W artykule tym rozpatrywany jest przekształtnikowy układ sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym z zastosowaniem sterowania polowo-zorientowanego. Schemat obwodów sterowania przedstawiono w części pierwszej artykułu [2]. W układzie sterowania zastosowano przekształtnik energoelektroniczny AC/DC, przyłączony do generatora przez dławiki sprzęgające. Przekształtnik AC/DC oraz bateria kondensatorów zapewniają sterowanie mocy biernej do wzbudzenia generatora indukcyjnego. Obciążenie generatora stanowi trójfazowy odbiornik rezystancyjno-indukcyjny.

Artykuł ten stanowi kontynuację pracy [2], w której przedstawiono metodę doboru nastaw regulatorów oraz syntezę układu sterowania generatorem. W tej części artykułu przedstawiono wyniki analiz i badań symulacyjnych przekształtnikowego układu sterowania autonomicznego generatora indukcyjnego klatkowego.

---

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

## 2. BADANIA SYMULACYJNE

### 2.1. ANALIZA WPLYWU OBCIĄŻENIA GENERATORA W OBWODZIE PRĄDU PRZEMIENNEGO NA STABILIZACJĘ AMPLITUDY NAPIĘCIA GENERATORA $U_s$

W badaniach symulacyjnych rozpatrywano różne stany obciążenia generatora i stany pracy układu sterowania. Przyjęto, że generator indukcyjny w stanie pracy jałowej był napędzany ze stałą prędkością kątową równą  $\omega_m = 0,75\omega_{mN}$  i został wzbudzony do stanu pracy przy napięciu ustalonym. Następnie w chwili  $t = 0,2$  s do generatora dołączono symetryczny 3-fazowy odbiornik rezystorowy o mocy równej połowie mocy znamionowej generatora ( $R_o = 180 \Omega$ ), a w chwili  $t = 0,4$  s moc tego odbiornika zwiększono do mocy znamionowej generatora ( $R_o = 190 \Omega$ ). Na rysunku 1a przedstawiono przebiegi chwilowe napięcia fazowego  $u_{SA}$  stojana generatora indukcyjnego, napięcia na kondensatorze  $u_d$  w obwodzie pośredniczącym przekształtnika AC/DC oraz prądu fazowego w odbiorniku obciążenia  $i_{oA}$ . Z otrzymanych przebiegów czasowych wynika, że układ sterowania generatora zapewnia stabilizację amplitudy napięcia generatora oraz napięcia w obwodzie pośredniczącym przekształtnika przy rozpatrywanych zmianach obciążeń generatora.

Transmitancja układu regulacji amplitudy napięcia stojana generatora opisana jest wzorem [2]:

$$H_z(s) = \frac{u_{sy}}{u_{sy}^*} = \frac{1}{s^2 \frac{T_{c1}T_{c2}}{K_{Ru}K_c} + s \frac{T_{c2}}{K_{Ru}K_c} + 1} \quad (1)$$

gdzie:  $K_c$ ,  $K_{Ru}$ ,  $T_{c1}$ ,  $T_{c2}$  – oznaczają odpowiednio współczynniki wzmacnienia oraz stałe czasowe transmitancji  $H_c(s)$  [2]. Z analizy teoretycznej wynika, że dla danych przyjętych do doboru regulatorów ( $T_{c1} = 12,2$  ms,  $T_{c2} = 34,6$  ms,  $K_c = 37$  V/A,  $K_{Ru} = 0,0191$  A/V) z obliczeń analitycznych otrzymuje się, że czas regulacji napięcia do chwili osiągnięcia stanu ustalonego jest równy  $t_r = 143$  ms. Wyniki symulacji przedstawione na rys.1a potwierdzają poprawność przyjętych założeń i zgodność czasu regulacji otrzymanego z obliczeń analitycznych i badań symulacyjnych.

Na podstawie podobnego postępowania wyznaczono czas regulacji napięcia  $u_d$  w obwodzie DC przekształtnika AC/DC. Transmitancja układu regulacji napięcia  $u_d$  ma następującą postać [2]:

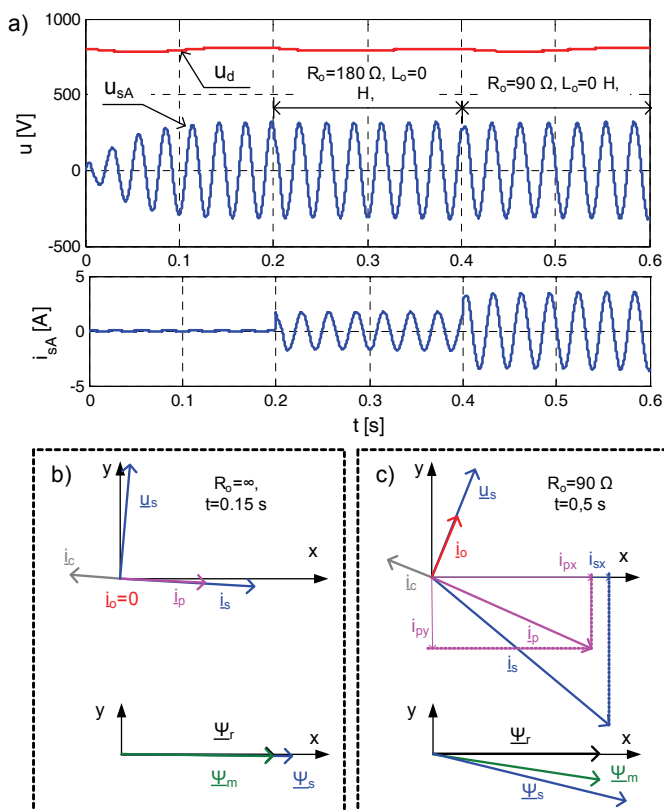
$$H_{zF}(s) = \frac{u_d}{u_d^*} = \frac{1}{s^3 8T_{zp}^3 + s^2 8T_{zp}^2 + s 4T_{zp} + 1} \quad (2)$$

gdzie:  $T_{zp}$  – stała czasowa zoptymalizowanego układu regulacji prądu  $i_{py}$  [2].

Dla danych przyjętych do doboru regulatorów  $K_{Rp} = 2,61$  V/A,  $K_p = 5$  A/V,  $T_p = 250$  ms,  $T_{zp} = T_p/(K_{Rp}K_p) = 191$  ms obliczony analitycznie czas regulacji napięcia  $u_d$

wynosi  $t_r = 254$  ms. Wyniki symulacji przedstawione na rys. 1a potwierdzają poprawność przyjętych założeń i wyznaczenia czasu regulacji.

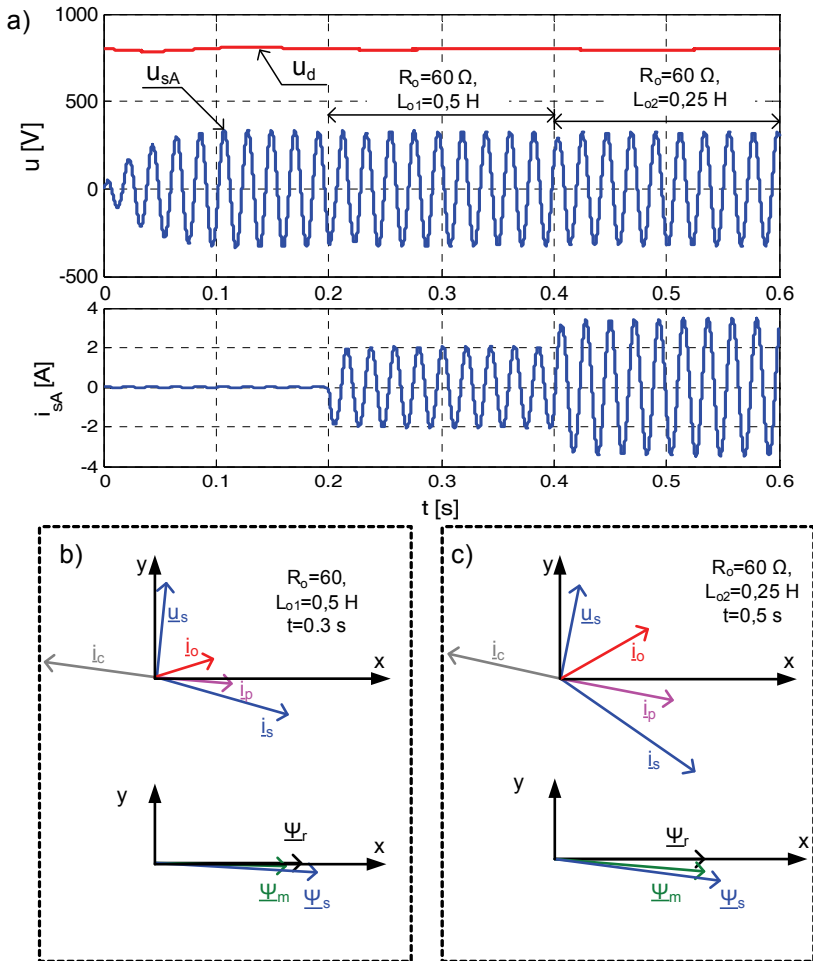
Na rys. 1b i 1c przedstawiono odpowiednio wykresy wektorów przestrzennych prądów, napięć i strumieni magnetycznych badanego układu dla stanu pracy generatora bez obciążenia oraz z obciążeniem znamionowym. Z wykresów tych wynika, że utrzymanie stałej wartości amplitudy napięcia na zaciskach generatora po wzroście obciążenia przy stałej prędkości kątowej generatora, wymaga odpowiednio zwiększenia amplitud wektorów strumieni sprzężonych stojana i wirnika. Po obciążeniu generatora mocą czynną następuje również zmiana wartości kątów między wektorami strumieni sprzężonych (fizycznie odpowiada to przesunięciu osi pól magnetycznych stojana i wirnika).



Rys. 1. Obciążenie generatora mocą czynną a) przebiegi czasowe, b) wykresy wektorowe – na biegu jałowym c) wykresy wektorowe – stan obciążenia znamionowego  
 Fig. 1. Load of induction generator with active power a) plots, b) vector diagram – no load, c) vector diagram – rated load

Z analizy wykresu na rys. 1c wynika, że w stanie ustalonym wektor prądu przekształtnika  $\underline{i}_p$  jest opóźniony względem wektora napięcia stojana generatora  $\underline{u}_s$  o kąt

równy  $90^\circ$ . Oznacza to, że przekształtnik jest wtedy źródłem mocy bierniej indukcyjnej wymaganej do pracy generatora, a źródłem mocy czynnej dostarczanej do odbiornika jest tylko generator. Stan ten potwierdza poprawność działania rozpatrywanego przekształtnikowego układu sterowania.



Rys. 2. Obciążenie generatora indukcyjnego mocą czynną oraz bierną a) przebiegi czasowe, wykresy wektorowe b) – dla obciążenia odbiornikiem  $R_o-L_{o1}$  c) dla obciążenia odbiornikiem  $R_o-L_{o2}$

Fig. 2. Load induction generator with active and reactive power a) plots, b) vector diagrams with load  $R_o-L_{o1}$ , c) vector diagrams with load  $R_o-L_{o2}$

Działanie układu sterowania zapewnia zmniejszenie również wpływu obciążenia na zmiany częstotliwości napięcia na zaciskach stojana generatora indukcyjnego. Jest to realizowane przez odpowiednią zmianę amplitudy wektora prądu przekształtnika.

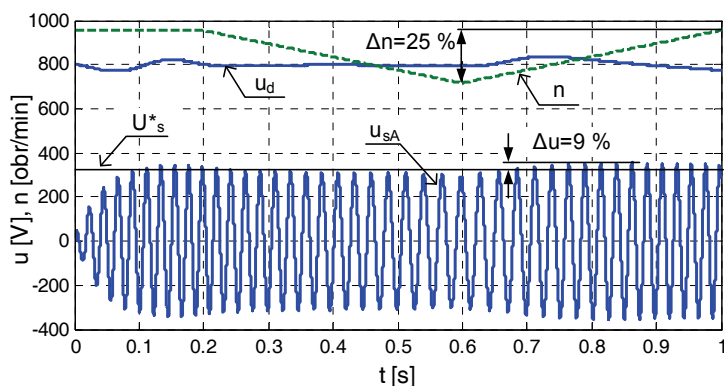
Na rysunku 2a przedstawiono przebiegi chwilowe napięcia oraz prądu stojana generatora oraz napięcia w obwodzie prądu stałego przekształtnika AC/DC. Rozpatrywano podobny przebieg zmiany obciążenia jak dla badań przedstawionych na rys. 1a. Różnica polegała na przyjęciu, że przyłączany odbiornik miał charakter rezystancyjno-indukcyjny o następujących parametrach:  $R_o = 60 \Omega$ ,  $L_{o1} = 0,5 \text{ H}$ ,  $L_{o2} = 0,25 \text{ H}$ .

Z wyników badań symulacyjnych przedstawionych na rys. 2a wynika, że układ sterowania zapewnia utrzymywanie stałej wartości amplitudy wektora napięcia fazowego generatora. Jak widać, nawet przy stosunkowo małym współczynniku mocy odbiornika, układ sterowania jest w stanie stabilizować napięcie na zaciskach generatora indukcyjnego.

Na rysunkach 2b i 2c przedstawiono wykresy wektorowe prądów, napięć i strumieni sprzężonych dla poszczególnych stanów obciążenia generatora. Wykresy te są podobne do otrzymanych z analizy generatora przy obciążeniu rezystorowym generatora.

## 2.2. ANALIZA WPLYWU ZMIAN PRĘDKOŚCI KĄTOWEJ GENERATORA NA STABILIZACJĘ NAPIĘCIA GENERATORA $U_s$

Przeprowadzono badania symulacyjne generatora indukcyjnego przy zmiennej prędkości kątowej wirnika i stałych parametrach odbiornika obciążającego. Wymuszano liniowe zmiany prędkości kątowej wirnika w funkcji czasu w przedziale 75–100%% prędkości znamionowej wirnika.



Rys. 3. Wpływ zmian prędkości kątowej wału generatora na stabilizację napięcia  $u_{sA}$  oraz  $u_d$   
Fig. 3. Influence of changes of the angular velocity of the generator into voltage  $u_{sA}$  and  $u_d$  stabilization

Przebiegi chwilowe napięcia stojana generatora  $u_{sA}$  oraz napięcia  $u_d$  w obwodzie pośredniczącym przekształtnika AC/DC przy zmianach prędkości obrotowej  $n$  wirnika generatora przedstawiono na rys. 3. Z przebiegów tych wynika, że mimo stosunkowo dużych zmian prędkości wirnika generatora układ sterowania zapewnia utrzymanie

z wystarczającą praktycznie dokładnością wartości amplitudy napięcia generatora równej zadanej. Z rysunku 3 wynika także, że przy zmianach prędkości generatora występują nieznaczne zmiany częstotliwości napięcia fazowego generatora. Te zmiany częstotliwości można wyeliminować przez odpowiednie sterowanie obciążeniem generatora lub przez oddziaływanie na układ regulacji turbiny napędzającej generator [5, 6].

#### 4. PODSUMOWANIE

Zastosowanie przedstawionej metody sterowania przekształtnikowym układem autonomicznego generatora indukcyjnego zapewnia stabilizację amplitudy napięcia generatora oraz napięcia w obwodzie pośredniczącym przekształtnika AC/DC. Układ sterowania zapewnia utrzymanie amplitudy napięcia generatora nawet przy stosunkowo dużych zmianach obciążenia oraz dynamicznych zmianach prędkości generatora.

Moc czynną rozpraszaną w układzie oraz pobieraną przez odbiornik dostarcza generator indukcyjny. Całkowitą moc bierną pobieraną przez generator indukcyjny oraz odbiornik zapewnia dołączona do zacisków generatora bateria kondensatorów wzbudzenia oraz przekształtnik AC/DC. W związku z tym moc pozorna przekształtnika AC/DC musi uwzględniać sumę mocy biernej generatora oraz maksymalnej mocy pobieranej przez odbiornik i może być pomniejszona o moc bierną dostarczaną z dołączonych do zacisków generatora baterii kondensatorów.

Artykuł opracowano w ramach projektu „Przedsiębiorczy doktorant – inwestycja w innowacyjny rozwój regionu” (*Program Operacyjny Kapitał Ludzki, Priorytet VIII Regionalne Kadry Gospodarki, Działanie 8.2 Transfer Wiedzy, Poddziałania 8.2.2 Regionalne Strategie Innowacji*). Projekt współfinansowany ze środków Unii Europejskiej w ramach Europejskiego Funduszu Społecznego.

#### LITERATURA

- [1] AHMED T., NISHIDA K., NAKAOKA M., *Advanced Voltage Control of Induction Generator Using Rotor Field-Oriented Control*, Proc. of Industry Application Conference, 2005, Vol. 4, 2835–2842.
- [2] JAKUBOWSKI B., PIENKOWSKI K., *Synteza przekształtnikowego układu sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym. Część I – Analiza*, Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych, Wrocław 2012.
- [3] JAKUBOWSKI B., PIENKOWSKI K., *Sterowanie autonomicznym generatorem indukcyjnym ze wzbudzeniem przekształtnikowym*, Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne, Komel, 2010, Nr 88, 123–128.
- [4] JAKUBOWSKI B., PIENKOWSKI K., *Analiza układów polowo-zorientowanego sterowania autonomicznym generatorem indukcyjnym*, Przegląd Elektrotechniczny, 2011, R. 87, Nr 11, 111–115.
- [5] SINGH B., KASAL G.K., *Solid State Voltage and Frequency Controller for a Stand Alone Wind Power Generating System*, IEEE Transactions on Energy Conversions, 2008, Vol. 23, No. 3, 1170–1177.

- [6] YOUSSEF K.H., WAHBA M.A., YOUSEF H.A., SEBAKHY O.A., *A New Method for Voltage and Frequency Control of Stand-Alone Self-Excited Generator Using PWM Converter with Variable DC Link Voltage*, Proc. of American Control Conference, Washington 2008, 2486–2491.

SYNTHESIS OF THE CONVERTER CONTROL SYSTEM  
OF AUTONOMOUS INDUCTION GENERATOR. PART II – SIMULATION STUDIES

In the paper the results of simulation studies of a converter control of the autonomous induction generator are presented. The results of investigations in case of loading the generator with active and reactive power and in case of changes of the angular speed of the shaft of the generator are considered.

The paper presents the plots and vector diagrams of selected variables of the system for different working states of the generator. The simulation results confirm the assumptions used for the synthesis of the control system of an autonomous induction generator, shown in the part I of the article.