

## Bezczujnikowe przyłączenie do sieci generatora indukcyjnego klatkowego sterowanego przekształtnikiem elektronicznym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono proces wspomaganego przekształtnikiem synchronizowanego przyłączenia do sieci wzbudzonego generatora indukcyjnego klatkowego napędzanego turbiną o nieregulowanej prędkości obrotowej. Przekształtnik NPC kontroluje proces wzbudzenia generatora oraz stabilizuje amplitudę napięcia generatora. Układy odbierające energię („hamujące”) w obwodzie stałoprądowym przekształtnika umożliwiają synchronizację napięcia generatora i sieci bez pomiaru prędkości. Po przyłączeniu generatora do sieci, równolegle podłączony przekształtnik może pełnić funkcję regulowanego źródła mocy biernej.

**Abstract.** The paper presents synchronization and connection to grid a squirrel-cage induction generator driven by uncontrollable micro turbine. The excitation of the generator is provided by the NPC inverter. A generator and grid voltages synchronization is made without speed sensor by using energy dissipation systems located in DC-link. When generator is connected to grid, the NPC inverter may work as reactive power source. (**Synchronized connection to grid of inverter excited induction generator driven by micro turbine without speed sensor**).

**Słowa kluczowe:** przekształtnik NPC, generator indukcyjny klatkowy, przyłączenie do sieci, źródło mocy biernej.

**Keywords:** NPC inverter, cage induction generator, grid connection, reactive power source.

### Wstęp

Generatory indukcyjne znajdują zastosowanie w układach wytwarzania energii z silnikiem o spalaniu wewnętrznym, hydroelektrowniach czy elektrowniach wiatrowych. Generatory indukcyjne klatkowe najczęściej współpracują z prostymi turbinami małej mocy o nieregulowanej prędkości obrotowej. Cechą determinującą stosowanie generatora indukcyjnego w takich prostych układach mechanicznych jest możliwość jego bezpośredniego przyłączenia do sieci energetycznej [1], [2]. Najczęstszym sposobem przyłączenia do sieci generatora indukcyjnego jest doprowadzenie układu wirującego do wartości prędkości jak najbliższej prędkości znamionowej i przyłączenie generatora do sieci [3], [4], [5]. Takie przyłączenie generatora do sieci powoduje przepływ prądu o wartości będącej wielokrotnością prądu znamionowego generatora, co wywołane jest wstępnym magnesowaniem obwodu magnetycznego generatora. Ponadto prąd ten wywołuje spadek napięcia w lokalnej sieci niskiego napięcia, co zakłóca pracę odbiorników dołączonych do tej sieci [3], [4]. Zastosowanie równoległego przekształtnika dołączonego do sieci, pozwala dostarczyć niezbędną generatorowi moc bierną podczas przyłączania go do sieci,

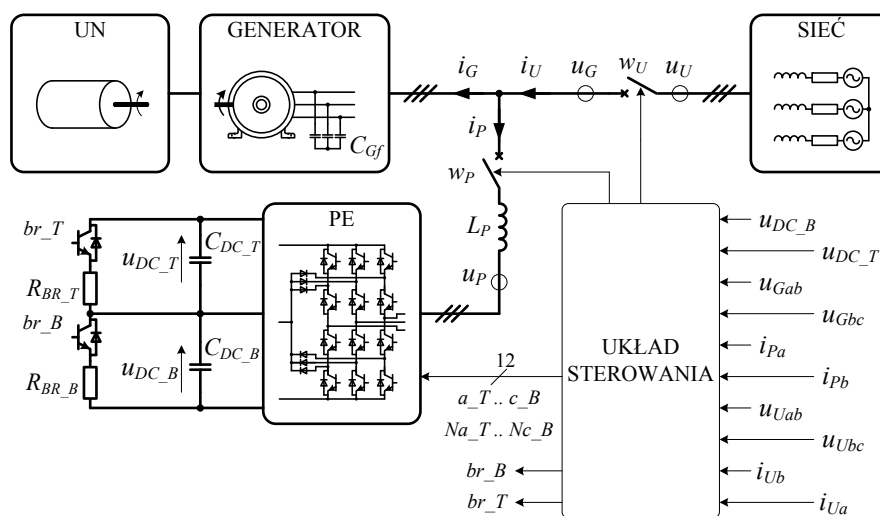
zmniejszając tym samym prąd sieci i spadek napięcia wywołany przyłączeniem [3], [4].

Odmianym sposobem przyłączania generatora indukcyjnego do sieci jest wzbudzenie przekształtnikowe generatora [6], [7], a następnie zsynchronizowanie napięcia autonomicznego generatora z napięciem sieci. W [8] zaproponowano metodę synchronizowanego przyłączenia do sieci generatora indukcyjnego klatkowego, gdzie wykorzystano wpływ obciążenia generatora na jego prędkość wirowania. Moc pobraną z generatora wytraca się w układzie brake-chopper dołączonym do obwodu pośredniczącego prądu stałego przekształtnika.

W niniejszym artykule proponuje się metodę synchronizowanego przyłączenia do sieci, w której regulacji podlega bezpośrednio częstotliwość napięcia stojana generatora [9], [10], [11], [12], w przeciwieństwie do regulacji prędkości, gdzie wymagany jest pomiar bądź jej złożona estymacja [8].

### Układ wytwarzania energii z generatorem indukcyjnym i równoległym przekształtnikiem energoelektronicznym

Schemat układu wytwarzania energii z generatorem indukcyjnym klatkowym i równoległym przekształtnikiem energoelektronicznym przedstawiono na rys. 1.



Rys.1. Schemat układu wytwarzania energii z generatorem indukcyjnym klatkowym i równoległym przekształtnikiem elektronicznym (PE- przekształtnik energoelektroniczny, UN- układ napędzający).

Układ napędzający generatora nie posiada regulacji prędkości obrotowej, ale posiada zdolność samodzielnego rozpędzenia się do prędkości przekraczającej prędkość synchroniczną generatora. Do stojana generatora na stałe jest dołączona bateria kondensatorów o pojemności  $C_{Gf}$ , która nie powoduje zjawiska samowzbudzenia generatora [13]. Do generatora indukcyjnego poprzez wyłącznik  $w_p$  dołączany jest przekształtnik energoelektroniczny. Funkcję tą pełni trójpoziomowy przekształtnik o topologii NPC, który zapewnia mniejsze tętnienia prądu wyjściowego, w porównaniu do tradycyjnego przekształtnika dwupoziomowego, co pozwala na zmniejszeniu filtra indukcyjnego  $L_p$ . Ponadto topologia NPC, pomimo większej liczby łączników półprzewodnikowych, umożliwia zmniejszenie strat mocy względem strat porównywalnego przekształtnika dwupoziomowego [14]. Do kondensatorów obwodu stałoprądowego przekształtnika przyłączone są układy odbierające energię, w których wytracana jest energia pobierana z generatora podczas synchronizacji. Wzbudzony przekształtnikowo generator, po synchronizacji napięcia generatora z napięciem sieci, jest łączony z siecią wyłącznikiem  $w_U$ . W badaniach pomija się problemy z działaniem łączników, np. opóźnienie załączenia, niejednoczesność zwierania styków wyłącznika trójfazowego, itp. Model symulacyjny opracowano w środowisku symulacyjnym PowerSIM.

Generatory indukcyjne klatkowe mogą współpracować z różnorodnymi typami układów napędzających, które różnią się możliwością sterowania prędkością obrotową, wartością prędkości maksymalnej, zależnością momentu obrotowego od prędkości, itd. Zastosowany układ napędzający posiada zdolność rozpędzenia się do prędkości przekraczającej prędkość synchroniczną generatora, a wytwarzany moment napędowy nie przekracza wartości  $T_T$ . Charakterystykę zmienności momentu napędzającego  $t_T$  w funkcji prędkości obrotowej  $\omega_{TG}$  można opisać równaniem:

$$(1) \quad t_T = f(\omega_{TG}) = T_T - T_T \cdot \exp(-k_D \cdot [\omega_{TM} - \omega_{TG}]),$$

gdzie:  $T_T$  - moment obrotowy układu napędzającego;  $\omega_{TM}$  - prędkość maksymalna układu napędzającego;  $k_D$  - stała konstrukcyjna układu napędzającego charakteryzująca zależność strat momentu napędowego w funkcji prędkości  $\omega_{TG}$ ; stała przybiera wartości  $< 0, 0 \div 1, 0 >$ .

Wektorowe równanie prądowe układu wytwarzania energii z generatorem indukcyjnym i równoległym przekształtnikiem energoelektronicznym, zgodnie z oznaczeniami schematu z rys. 1, przybiera postać:

$$(2) \quad \bar{i}_U - \bar{i}_P - \bar{i}_G = 0,$$

a prąd generatora  $i_G$  wynosi:

$$(3) \quad \bar{i}_G - \bar{i}_S - \bar{i}_C = 0,$$

gdzie:  $\bar{i}_S$  - wektor prądu statora maszyny indukcyjnej;  $\bar{i}_C$  - wektor prądu baterii kondensatorów  $C_{Gf}$ .

W układzie zastosowano model trójfazowej i symetrycznej maszyny indukcyjnej klatkowej o liniowym obwodzie magnetycznym. Wektorowe równania napięciowe dla obwodów stojana i wirnika oraz równania strumieniowo-prądowe wyrażone w układzie wirującym z dowolną prędkością  $\omega_K$  i z wielkościami wirnika sprowadzonymi do obwodu stojana przybierają postacie [15]:

$$(4) \quad \bar{u}_G = R_S \cdot \bar{i}_S + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_S + j \cdot \omega_K \cdot \bar{\psi}_S,$$

$$(5) \quad 0 = R_R \cdot \bar{i}_R + \frac{d}{dt} \bar{\psi}_R + j \cdot (\omega_K - \omega_E) \cdot \bar{\psi}_R,$$

$$(6) \quad \bar{\psi}_S = L_S \cdot \bar{i}_S + L_M \cdot \bar{i}_R,$$

$$(7) \quad \bar{\psi}_R = L_R \cdot \bar{i}_R + L_M \cdot \bar{i}_S,$$

gdzie:  $\bar{u}_G, \bar{i}_S, \bar{\psi}_S$  - wektory napięcia, prądu oraz strumienia skojarzonego z uzwojeniem stojana;  $R_S, L_S$  - rezystancja i indukcyjność własna uzwojenia stojana;  $\bar{i}_R, \bar{\psi}_R$  - wektory prądu oraz strumienia skojarzonego z uzwojeniem wirnika sprowadzone do obwodu stojana;  $R_R, L_R$  - rezystancja i indukcyjność własna uzwojenia wirnika sprowadzone do obwodu stojana;  $L_M$  - indukcyjność magnesowania;  $\omega_E$  - elektryczna prędkość kątowna wirnika.

Moment elektromagnetyczny generatora  $t_G$  wynosi:

$$(8) \quad t_G = -\frac{3}{2} p_B \cdot L_M \cdot \text{Im}(\bar{i}_S^* \cdot \bar{i}_R),$$

gdzie:  $p_B$  - liczba par biegunów.

Równanie równowagi zespołu wirującego:

$$(9) \quad J_{TG} \cdot \frac{d}{dt} \omega_{TG} = t_T + t_G,$$

gdzie:  $J_{TG}$  - sumaryczny moment bezwładności zespołu wirującego;  $\omega_{TG}$  - prędkość obrotowa zespołu wirującego.

Przekształtnik trójpoziomowy NPC zamodelowano zakładając równomierny rozkład napięć na kondensatorach obwodu pośredniczącego prądu stałego przekształtnika  $u_{DC_T} = u_{DC_B}$  i zastępując każdą z gałęzi idealnym łącznikiem trójstanowym. Stan łącznika jest powiązany z sygnałami sterującymi łącznikami półprzewodnikowymi. Możliwe stany przełączeń opisane są funkcją:

$$(10) \quad s_z(t) = \begin{cases} 1, & \text{dla } z_T = z_B = 1 \text{ i } N_{z_T} = N_{z_B} = 0 \\ 0, & \text{dla } z_T = N_{z_B} = 0 \text{ i } N_{z_T} = z_B = 1 \\ -1, & \text{dla } z_T = z_B = 0 \text{ i } N_{z_T} = N_{z_B} = 1 \end{cases}$$

gdzie:  $z$  jest oznaczeniem fazy  $z = \{a, b, c\}$ ;  $z_T, z_B, N_{z_T}$  i  $N_{z_B}$  są sygnałami sterującymi kolejnymi tranzystorami w gałęzi zaczynając od tranzystora dołączonego do potencjału dodatniego obwodu pośredniczącego prądu stałego przekształtnika; wartości  $\{0, 1\}$  przy opisie stanów sygnałów sterujących oznaczają, odpowiednio, łącznik otwarty i zamknięty.

Dla tak opisanej funkcji przełączeń wartość napięcia fazowego przekształtnika  $u_{Pz}$  uśredniona za okres PWM wynosi:

$$(11) \quad u_{Pz} = \frac{1}{T_S} \int_{t-T_S}^t s_z(\tau) \cdot u_{DC} d\tau = d_z \cdot u_{DC},$$

gdzie:  $T_S$  jest odwrotnością częstotliwości przełączeń  $T_S = 1/f_S$ ;  $u_{DC}$  jest napięciem obwodu pośredniczącego prądu stałego przekształtnika będącym sumą  $u_{DC_T}$  i  $u_{DC_B}$ ;  $d_z$  jest współczynnikiem wypełnienia.

Równania napięciowe i prądowe przekształtnika przybierają postacie:

$$(12) \quad u_{Gz} - R_P \cdot i_{Pz} - L_P \cdot \frac{d}{dt} i_{Pz} - d_z \cdot u_{DC} = 0,$$

$$(13) \quad C_{DC} \cdot \frac{d}{dt} u_{DC} + \frac{1}{R_{BR}} \cdot d_{BR} \cdot u_{DC} = \sum_{z=a,b,c} d_z \cdot i_{Pz},$$

gdzie:  $u_{Gx}$ - napięcie fazowe generatora;  $i_{pz}$ - prąd fazowy przekształtnika;  $C_{DC}$ - pojemność zastępcza obwodu pośredniczącego prądu stałego przekształtnika będąca sumą szeregowo połączonych pojemności  $C_{DC\_B}$  i  $C_{DC\_T}$ ;  $R_{BR}$ - rezystancja zastępcza obwodu pośredniczącego prądu stałego przekształtnika będąca sumą szeregowo połączonych rezystancji  $R_{BR\_B}$  i  $R_{BR\_T}$ ;  $d_{BR}$ - uśredniony współczynnik wypełnienia sygnału sterującego łącznikami brake- chopper.

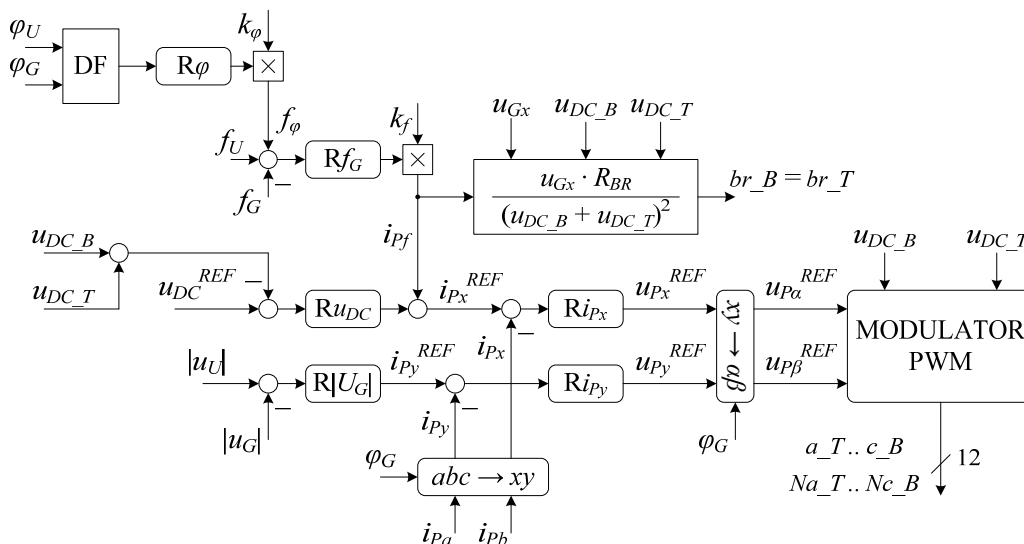
Układ sterowania przekształtnikiem (rys. 2) jest zorientowany względem wektora napięcia stojana generatora  $u_G$  [16]. Po przejściu z naturalnego układu odniesienia  $abc$  do układu  $xy$  wirującego zgodnie z wektorem napięcia stojana generatora  $u_G$  tak, że oś  $x$  układu odniesienia wiruje współbieżnie z wektorem napięcia stojana generatora, następuje rozdzielanie wektora prądu przekształtnika na składową w osi  $x$  i osi  $y$ , odpowiadające odpowiednio za składową czynną i składową bierną prądu przekształtnika.

Wartość zadana składowej  $y$  wektora prądu przekształtnika jest otrzymywana z regulatora modułu wektora napięcia stojana generatora  $R|U_G|$  według zależności:

$$(14) \quad i_{Py}^{REF} = (|U_U| - |U_G|) \cdot (k_U + \frac{k_U}{T_U \cdot s}),$$

gdzie:  $s$ - operator Laplace'a;  $k_U$ ,  $T_U$ - wzmocnienie i czas zdwojenia regulatora proporcjonalno- całkującego  $R|U_G|$ . Natomiast wartość zadana składowej  $x$  wektora prądu przekształtnika przyjmuje postać:

$$(15) \quad i_{Px}^{REF} = (u_{DC}^{REF} - u_{DC}) \cdot (k_{DC} + \frac{k_{DC}}{T_{DC} \cdot s}) + k_f \cdot (f_U + f_\phi - f_G) \cdot (k_F + \frac{k_F}{T_F \cdot s}),$$



Rys.2. Schemat sterowania przekształtnikiem energoelektronicznym podczas synchronizowanego przyłączenia generatora do sieci (DF- detektor różnicy faz;  $k_f = \{0, 1\}$  jest sygnałem aktywującym regulację częstotliwości napięcia stojana generatora  $f_G$ ,  $k_\phi = \{0, 1\}$  jest sygnałem aktywującym układ dopasowania fazy napięcia stojana generatora  $\phi_G$  do fazy napięcia sieci  $\phi_U$ ).

Tabela 1. Parametry przekształtnika energoelektronicznego i filtru indukcyjnego AC.

gdzie:  $s$ - operator Laplace'a;  $k_{DC}$ ,  $T_{DC}$ - wzmocnienie i czas zdwojenia regulatora proporcjonalno- całkującego  $Ru_{DC}$ ;  $k_F$ ,  $T_F$  - wzmocnienie i czas zdwojenia regulatora proporcjonalno- całkującego  $Rf_G$ ;  $k_f$  sygnał aktywujący regulację częstotliwości napięcia generatora i przyjmujący wartości:

$$(16) \quad k_f = \begin{cases} 0, & \text{dla } |U_G| < |U_U| \\ 1, & \text{dla } |U_G| = |U_U| \end{cases}$$

$f_\phi$  we wzorze (15) jest wartością wyjściową układu dopasowania fazy napięcia generatora  $\phi_G$  do fazy napięcia sieci  $\phi_U$  i opisana jest zależnością:

$$(17) \quad f_\phi = k_\phi \cdot \sin \varphi_U \cdot \cos \varphi_G,$$

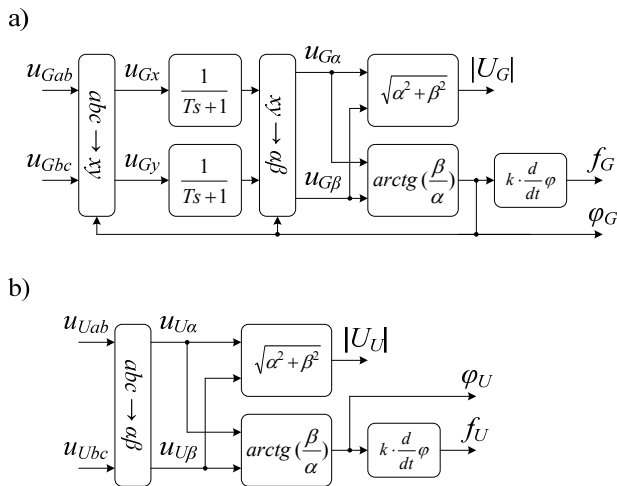
gdzie:  $k_\phi$  jest sygnałem aktywującym układ dopasowania fazy napięcia stojana generatora z fazą napięcia sieci i przyjmującym wartości:

$$(18) \quad k_\phi = \begin{cases} 0, & \text{dla } (f_G - f_U) > 0,5 \text{ i } (f_G - f_U) < -0,5 \\ 1, & \text{dla } 0,5 \geq (f_G - f_U) \geq -0,5 \end{cases}$$

Wyznaczanie kąta i modułu napięcia stojana generatora i napięcia sieci przedstawiono na rys. 3. Ze względu na zakłócenia w napięciu generatora wywołanymi przełączeniami przekształtnika zastosowano filtrację składowych  $u_{Gx}$  i  $u_{Gy}$  za pomocą filtrów dolnoprzepustowych. Ponadto wykorzystując zmianę kątów położenia wektorów napięć wyznaczono bezpośrednio ich częstotliwości.

Parametry przekształtnika i filtru indukcyjnego obwodu prądu przemiennego przekształtnika przedstawiono w tabeli 1.

Parametr	Wartość
Pojemności kondensatorów obwodu pośredniczącego prądu stałego $C_{DC\_B} = C_{DC\_T}$	2,2 [mF]
Rezystancje układów hamujących $R_{BR\_B} = R_{BR\_T}$	10 [Ω]
Indukcyjność filtru $L_P$	1,8 [mH]
Rezystancja filtru $R_P$	0,2 [Ω]

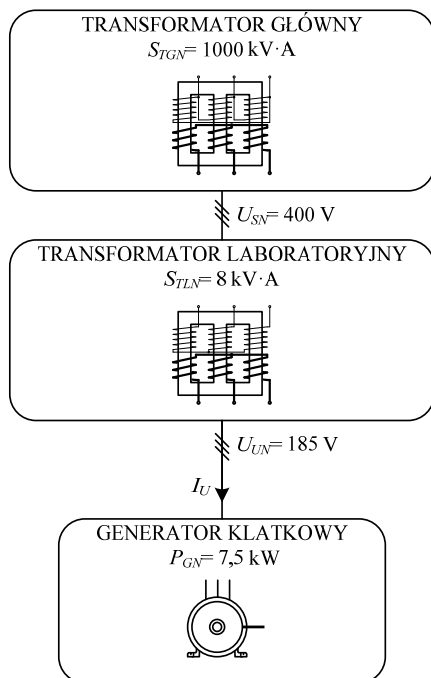


Rys.3. Wyznaczanie częstotliwości oraz współrzędnych biegunowych wektorów napięć: a) stojana generatora  $u_G$ ; b) sieci  $u_U$ .

### Przyłączenie wirującego generatora indukcyjnego klatkowego do sieci energetycznej

Mikroelektrownie wyposażone w generatory indukcyjne są najczęściej przyłączane na końcowych odcinkach linii zasilających [3]. W terenach nisko zurbanizowanych sieci dystrybucyjne niskiego napięcia cechują się małymi mocami przesyłowymi oraz dużymi impedancjami. Stąd generatory indukcyjne przyłączane są do szyn rozdzielczych transformatorów SN/nN, których moc  $S_{TN}$  odniesiona do mocy generatora  $P_{GN}$  nie spełnia warunku (19) [5], który gwarantuje nieprzekroczenie dopuszczalnych spadków napięcia odbiorników dołączonych do tego transformatora [17]:

$$(19) \quad \frac{S_{TN}}{P_{GN}} \geq 5.$$



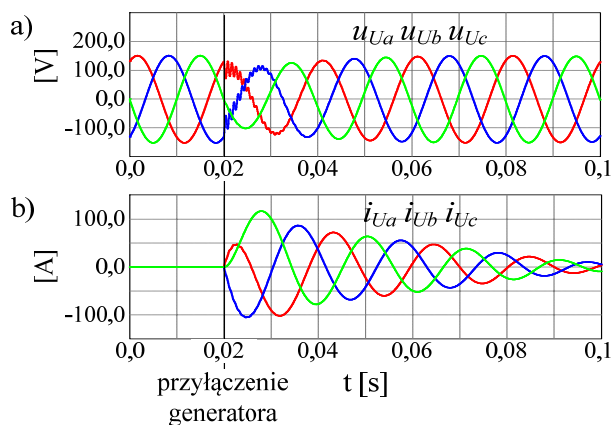
Rys.4. Schemat sieci laboratoryjnej obniżonego napięcia  $U_{UN} = 185 \text{ V}$ .

Schemat laboratoryjnej sieci zasilającej, przedstawiono na rys. 4. Sieć laboratoryjna składa się z szeregowo połączonych transformatora głównego 15,75/0,4 kV o mocy  $S_{TGN} = 1000 \text{ kV}\cdot\text{A}$  i transformatora laboratoryjnego 400/185 V o mocy  $S_{TLN} = 8 \text{ kV}\cdot\text{A}$  do którego przyłączany jest generator indukcyjny o mocy  $P_{GN} = 7,5 \text{ kW}$  (o parametrach podanych w tab. 2). Porównywalna moc generatora do mocy transformatora, w modelowanym układzie, zapewnia przekroczenie dopuszczalnych spadków napięć podczas bezpośredniego przyłączenia wirującego generatora.

Wyniki symulacyjne bezpośredniego przyłączenia generatora indukcyjnego klatkowego do sieci laboratoryjnej  $U_{UN} = 185 \text{ V}$  przedstawiono na rys. 5. Przyłączenie generatora wirującego z prędkością  $n_{TG} = 1600 \text{ obr/min}$  do sieci laboratoryjnej powoduje przepływ prądu o wartości chwilowej  $i_U = 120 \text{ A}$  i spadek napięcia wynoszący około 33%  $U_{UN}$ . Stan przeciążenia prądowego generatora utrzymuje się przez około 40 ms.

Tabela 2. Parametry maszyny indukcyjnej klatkowej.

Parametr	Wartość
Moc znamionowa $P_{MN}$	7,5 [kW]
Napięcie znamionowe $U_{MN}$	3 x 220 [V]
Prąd znamionowy $I_{MN}$	27,1 [A]
Prędkość znamionowa pracy silnikowej $n_{MN}$	1450 [obr/min]
Współczynnik mocy $\cos\varphi_{MN}$	0,82
Rezystancja stojana $R_S$	0,328 [ $\Omega$ ]
Indukcyjność stojana $L_S$	33,8 [mH]
Rezystancja wirnika sprowadzona do obwodu stojana $R_R$	0,195 [ $\Omega$ ]
Indukcyjność wirnika sprowadzona do obwodu stojana $L_R$	33,8 [mH]
Indukcyjność magnesująca $L_M$	32,5 [mH]
Moment bezwładności mas wirujących $J_{TG}$	0,2 [kg·m <sup>2</sup> ]



Rys.5. Bezpośrednie przyłączenie generatora indukcyjnego klatkowego o mocy  $P_{GN} = 7,5 \text{ kW}$  wirującego z prędkością  $n_{TG} = 1600 \text{ obr/min}$  do transformatora laboratoryjnego. Moment napędzający wynosi  $T_T = 7 \text{ Nm}$ : a) przebiegi napięć fazowych strony wtórnej transformatora laboratoryjnego; b) przebiegi prądów strony wtórnej transformatora laboratoryjnego.

Przedstawione na rys. 5 wyniki przedstawiają bezpośrednie przyłączenie generatora o mocy  $P_{GN} = 7,5 \text{ kW}$  i napięciu  $U_{GN} = 220 \text{ V}$  do sieci laboratoryjnej o napięciu  $U_{UN} = 185 \text{ V}$ , uzyskanej dzięki zastosowaniu transformatora laboratoryjnego o mocy  $S_{TLN} = 8 \text{ kV}\cdot\text{A}$ . Prąd rozruchowy generatora zależy od wartości napięcia zasilania, stąd badania procesu przyłączenia generatora do sieci w warunkach obniżonego napięcia zasilania (w porównaniu do znamionowego napięcia generatora) mogą być

obarczone błędem. W celu sprawdzenia wpływu napięcia zasilania na proces przyłączenia generatora do sieci zbudowano model o identycznej impedancji źródła zasilania i napięciu równym napięciu generatora  $U_{UN} = U_{GN}$ .

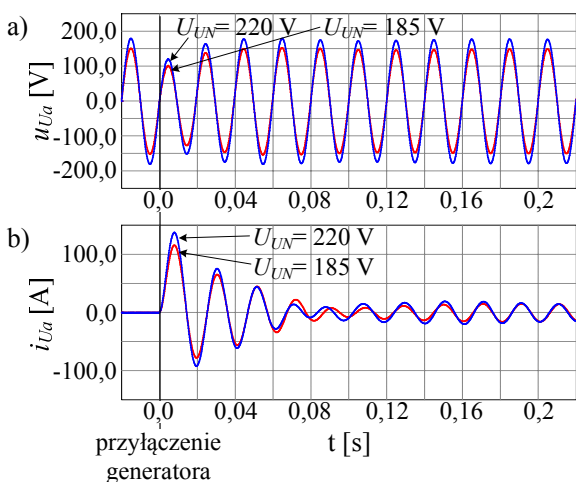
Wyniki symulacyjne porównujące prąd przyłączeniowy oraz napięcie fazowe podczas przyłączenia generatora do sieci o stałej impedancji i różnych napięciach przedstawiono na rys. 6. Maksymalna wartość amplitudy prądu przyłączeniowego dla napięcia zasilającego równego  $U_{UN} = 185 \text{ V}$  wynosi około  $i_U^{MAX}(185 \text{ V}) = 120 \text{ A}$ , a dla napięcia zasilającego  $U_{UN} = 220 \text{ V}$   $i_U^{MAX}(220 \text{ V}) = 140 \text{ A}$ . Dla stałej impedancji sieci wzrost amplitudy prądu przyłączeniowego jest proporcjonalny do wzrostu napięcia zasilania:

$$(20) \quad \frac{i_U^{MAX}(220 \text{ V})}{i_U^{MAX}(185 \text{ V})} = \frac{220}{185}$$

Maksymalne spadki napięcia zasilającego wywołane prądem przyłączeniowym dla obu wartości napięć są identyczne i wynoszą 33%  $U_{UN}$ .

### Badania symulacyjne synchronizowanego przyłączenia generatora do sieci energetycznej

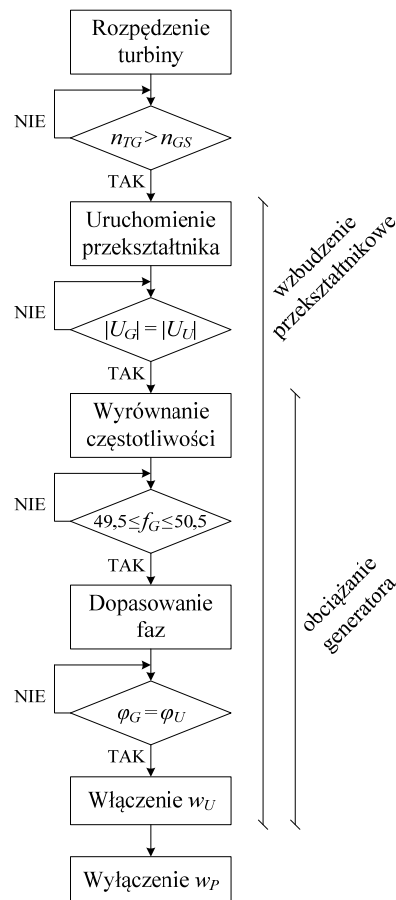
Algorytm synchronizowanego przyłączenia do sieci wirującego z prędkością nadsynchroniczną generatora indukcyjnego klatkowego przedstawiono na rys. 7.



Rys.6. Porównanie procesów bezpośredniego przyłączenia generatora indukcyjnego klatkowego o mocy  $P_{GN} = 7,5 \text{ kW}$  i napięciu  $U_{GN} = 220 \text{ V}$  do sieci o stałej impedancji i wartościach napięcia  $U_{UN} = 185 \text{ V}$  oraz  $U_{UN} = 220 \text{ V}$ . Moment napędzający i prędkość obrotowa wynoszą odpowiednio  $T_T = 7 \text{ Nm}$  i  $n_{TG} = 1600 \text{ obr/min}$ : a) przebieg napięcia fazowego sieci; b) przebieg prądu sieci.

Proces wspomaganego przez przetwornik bezudarowego przyłączenia generatora do sieci energetycznej rozpoczyna się od rozpedzenia zespołu wirującego do prędkości nadsynchronicznej, a następnie wzbudzeniu generatora przy pomocy przetwornika elektronicznego. Zastosowanie przetwornika pozwala na pełną kontrolę procesu wzbudzenia i utrzymanie napięcia stojana generatora  $U_G$  bliskiego napięciu sieci  $U_U$  [6-12]. Po zrównaniu się modułu napięcia stojana generatora z modułem napięcia sieci  $|U_G| = |U_U|$  następuje pobieranie z generatora mocy czynnej i wytracanie jej w rezystorach hamujących przetwornika. Skutkuje to zmniejszeniem prędkości zespołu wirującego, a tym samym zmniejszeniem częstotliwości napięcia stojana generatora. Gdy różnica częstotliwości napięcia sieci i stojana generatora jest mniejsza niż 0,5 Hz następuje uruchomienie układu

dopasowania fazy napięcia generatora do fazy napięcia sieci. Gdy faza napięcia generatora zrówna się z fazą napięcia sieci  $\varphi_G = \varphi_U$  następuje włączenie  $w_U$ . Następnie przetwornik energoelektroniczny zostaje wyłączony i odłączony od sieci.

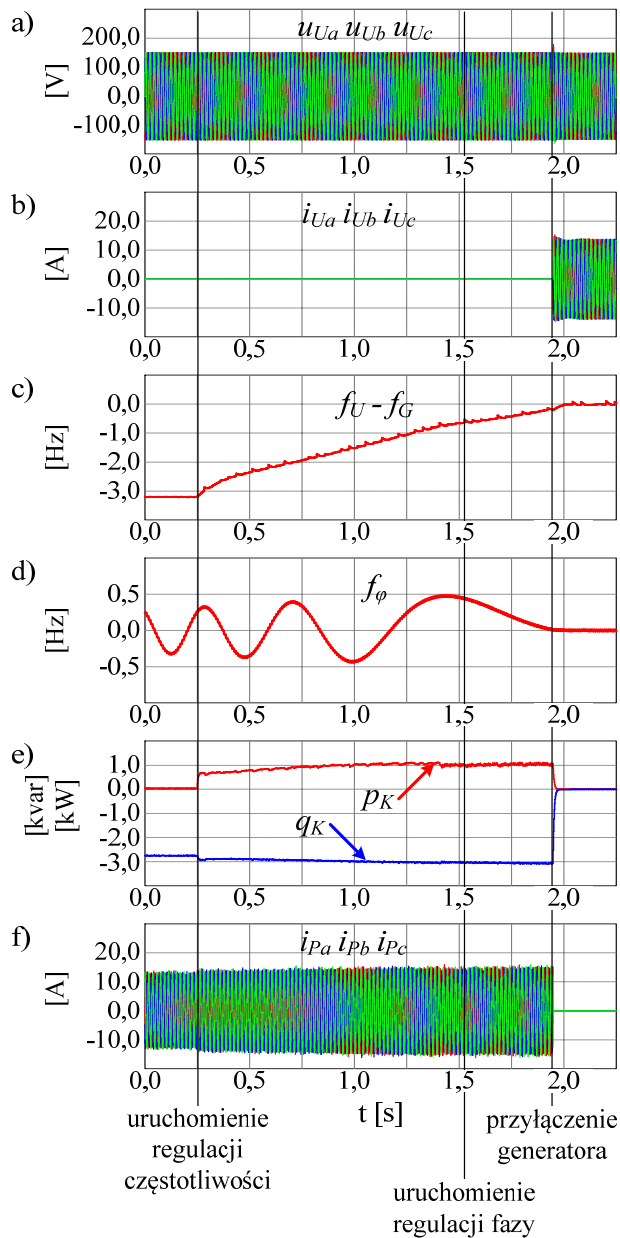


Rys.7. Algorytm bezczujnikowej metody kontrolowanego przez przetwornik synchronizowanego przyłączenia wirującego z prędkością nadsynchroniczną generatora indukcyjnego klatkowego do sieci energetycznej. ( $n_{GS}$ - prędkość synchroniczna maszyny indukcyjnej)

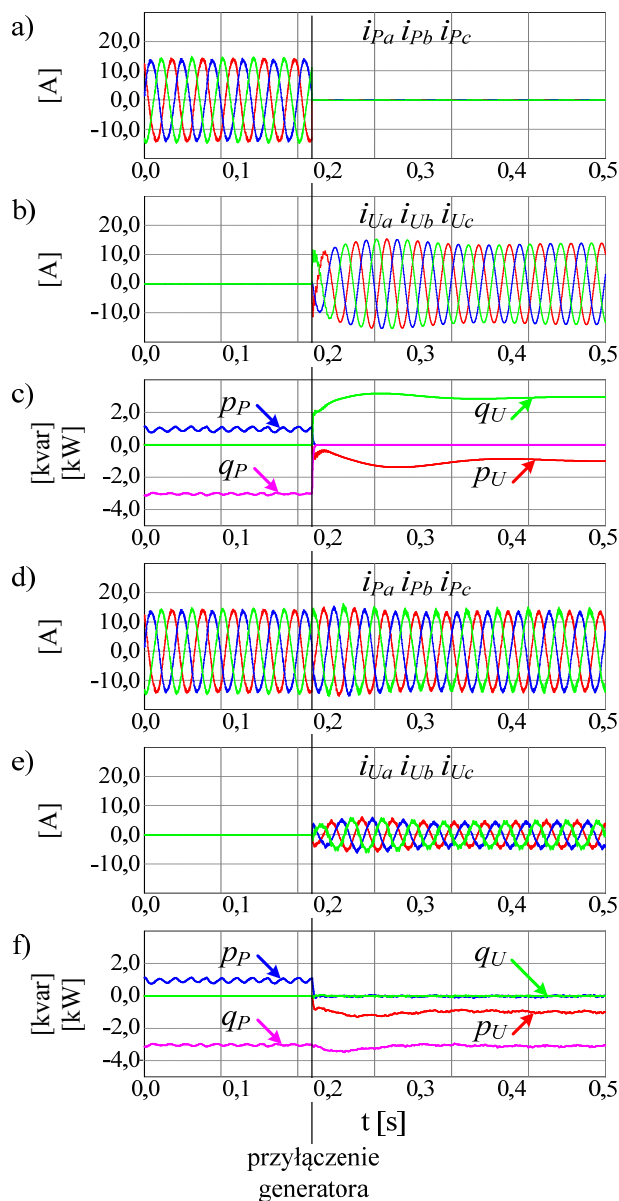
Wyniki działania proponowanej metody przyłączenia generatora indukcyjnego klatkowego do sieci dla modelu symulacyjnego przedstawiono na rys. 8. Podczas próby prędkość zespołu wirującego wynosi  $n_{TG} = 1600 \text{ obr/min}$ , a moment napędowy wynosi  $T_T = 7 \text{ Nm}$ . Badania symulacyjne potwierdzają skuteczność proponowanej bezczujnikowej metody synchronizowanego przyłączenia do sieci wzbudzonego przetwornikiem generatora indukcyjnego. Przyłączenie generatora do sieci nie powoduje zakłóceń w napięciu sieci, a amplituda prądu sieci podczas przyłączenia nie przekracza połowy prądu znamionowego generatora  $0,5 \cdot I_{MN}$ . W czasie procesu synchronizacji, tj. wyrównania częstotliwości  $(f_U - f_G) \rightarrow 0$  i dopasowania fazy napięcia stojana generatora do fazy napięcia sieci  $f_\varphi \rightarrow 0$ , przetwornik pobiera maksymalnie  $p_p = 1 \text{ kW}$  mocy czynnej i  $q_p = -3 \text{ kvar}$  mocy biernej, a amplitudy prądów przetwornika nie przekraczają  $i_p = 15 \text{ A}$ . Przedstawiony proces wyrównywania częstotliwości rozpoczyna się dla  $t = 0,25 \text{ s}$  i trwa 1,7 s, a proces wyrównywania faz napięć sieci i generatora rozpoczyna się dla  $t = 1,55 \text{ s}$  i trwa około 0,4 s.

Zastosowanie przetwornika może zostać rozszerzone o funkcję źródła mocy biernej pobieranej z sieci w czasie pracy generatora. Wówczas po przyłączeniu generatora do sieci przetwornik nie zostaje wyłączony, a jedynie zmienia strukturę sterowania. Regulator amplitudy napięcia

generatora  $R|U_G|$  zostaje zastąpiony regulatorem mocy biernej sieci  $Rq_U$ , co zostało dokładniej opisane w [18], [19], [20]. Porównanie prądów przekształtnika i sieci oraz mocy czynnych i biernych sieci i generatora podczas przyłączenia synchronizowanego, dla przypadku wyłączenia przekształtnika po przyłączeniu generatora i dla przypadku kontynuacji pracy przekształtnika jako regulowanego źródła mocy biernej, przedstawiono na rys. 9.



Rys.8. Badania symulacyjne bezczujnikowego procesu kontrolowanego przekształtnikiem synchronizowanego przyłączenia do sieci wzbudzonego generatora indukcyjnego klatkowego, który dołączony jest do układu napędzającego o wartości momentu napędowego  $T_r=7$  Nm i prędkości obrotowej  $n_{TG}=1600$  obr/min: a) napięcia fazowe sieci; b) prądy sieci; c) różnica częstotliwości napięcia sieci i częstotliwości napięcia stojana generatora; d) przebieg sygnału różnicy faz napięcia generatora i sieci; e) moc czynna i bierna przekształtnika; f) prądy przekształtnika.



Rys.9. Kontrolowane przekształtnikiem synchronizowane przyłączenie do sieci wzbudzonego generatora indukcyjnego klatkowego- porównanie procesu przyłączenia bez i z kompensacją mocy biernej po przyłączeniu generatora do sieci: abc) prądy przekształtnika, prądy sieci i moce czynne i biernie sieci i przekształtnika bez kompensacji mocy biernej po przyłączeniu generatora do sieci; def) prądy przekształtnika, prądy sieci i moce czynne i biernie sieci i przekształtnika z kompensacją mocy biernej po przyłączeniu generatora do sieci.

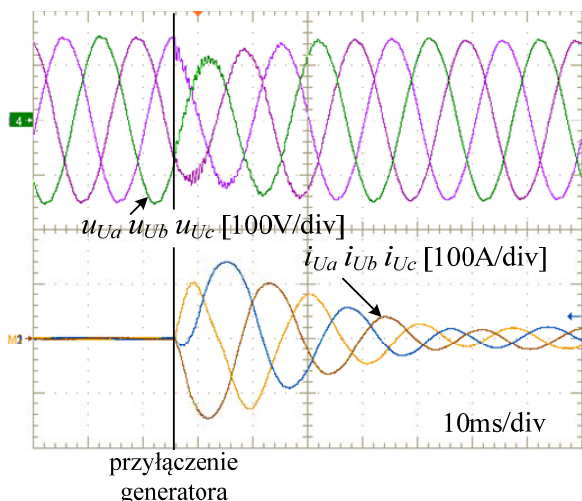
Prądy przekształtnika pracującego jako kompensator mocy biernej generatora nie zmniejszyły zauważalnie swojej wartości w porównaniu do pracy przekształtnika jako regulatora napięcia stojana generatora, gdyż zarówno podczas wzbudzenia, synchronizacji, jak i pracy jako kompensator mocy biernej dominującą składową prądu przekształtnika jest składowa bierna. Amplituda prądu sieci bez kompensacji mocy biernej po przyłączeniu generatora nie przekracza  $i_U=15$  A, natomiast z zastosowaniem kompensacji nie przekracza  $i_U=8$  A. Wartości chwilowe mocy przekształtnika przed przyłączeniem generatora wynoszą odpowiednio: dla składowej biernej  $q_P=-3$  kvar i składowej czynnej  $p_P=1$  kW. Po przyłączeniu generatora moc bierna sieci wynosi  $q_U=3$  kvar, a moc czynna sieci  $p_U=-1$  kW. Oznacza to, że w przypadku oddawania do sieci

przez generator indukcyjny 1 kW mocy czynnej, pobierana jest z sieci moc bierna o wartości 3 kvar. Elektroniczna kompensacja mocy biernej pozwala niezbędnej generatorowi mocy biernej wytworzyć lokalnie  $q_U=0$ , przez co do sieci jest oddawana jedynie moc czynna. Przekształtnik pobiera wówczas moc bierną  $q_P=-3$  kvar i moc czynną o wartości bliskiej zeru, niezbędną do pokrycia strat w przekształtniku.

### Weryfikacja wyników z modelu symulacyjnego w układzie laboratoryjnym

Wyniki badań modelu symulacyjnego zweryfikowano w układzie laboratoryjnym. Rolę układu napędzającego w układzie laboratoryjnym pełni silnik indukcyjny o mocy znamionowej  $P_N=7,5$  kW i napięciu znamionowym  $U_N=400$  V, który zasilany jest z przemiennika częstotliwości z zastosowaniem sterowania wektorowego. Układ napędowy umożliwia sterowanie prędkością i ograniczanie maksymalnego momentu wytwarzanego w silniku.

Na rys. 10 przedstawiono oscylogram bezpośredniego przyłączenia do transformatora laboratoryjnego generatora indukcyjnego klatkowego wirującego z prędkością  $n_{TG}=1600$  obr/min i z ograniczonym momentem napędowym do 15% momentu znamionowego silnika. Amplituda prądu przyłączeniowego sieci osiąga wartość 140 A i czterokrotność prądu znamionowego strony wtórnej transformatora  $I_{TDN}$ . Zapad napięcia sieci wynosi 30%  $|U_{UN}|$ . Przeciążenie transformatora oraz zapad napięcia w sieci utrzymują się przez około 40 ms.



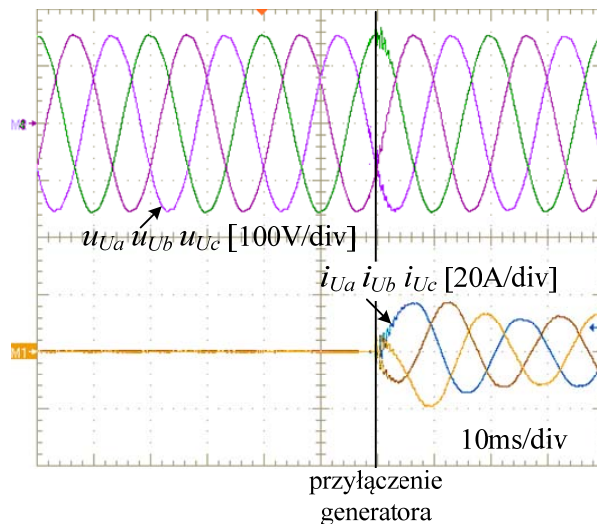
Rys.10. Oscylogram przedstawiający napięcie i prąd strony wtórnej transformatora laboratoryjnego podczas bezpośredniego przyłączenia generatora indukcyjnego wirującego z prędkością  $n_{TG}=1600$  obr/min. Moment napędzający został ograniczony do 15% momentu znamionowego silnika.

Oscylogram z rys. 11 przedstawia napięcie i prąd strony wtórnej transformatora laboratoryjnego w chwili synchronizowanego przyłączenia wzbudzonego generatora indukcyjnego wirującego z prędkością  $n_{TG}=1600$  obr/min i z ograniczonym momentem napędowym do 15% momentu znamionowego silnika. Po przyłączeniu generatora do sieci przekształtnik jest wyłączony. Amplituda prądu sieci podczas przyłączenia nie przekracza  $i_U=20$  A, a w napięciu sieci nie występuje zapad.

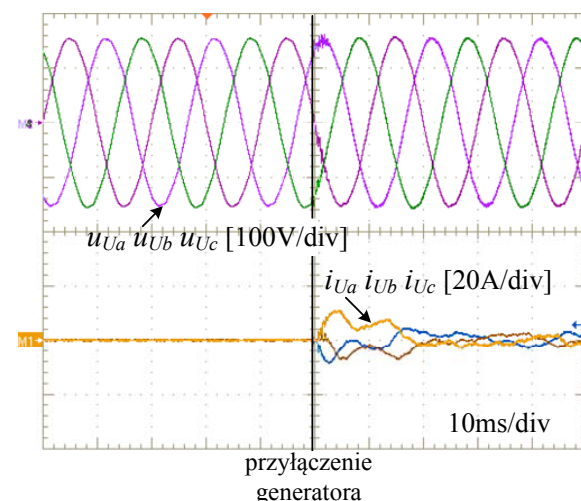
Na rys. 12 przedstawiono oscylogram napięcia i prądu strony wtórnej transformatora laboratoryjnego w chwili synchronizowanego przyłączenia generatora dla przypadku, gdy po przyłączeniu przekształtnik pracuje jako kompensator mocy biernej. W tym przypadku również nie

występuje zapad napięcia, a amplituda prądu sieci podczas przyłączenia nie przekracza  $i_U=10$  A.

Na rys. 13 przedstawiono oscylogram prezentujący moc bierną i czynną oraz prądy kompensatora podczas procesu synchronizacji napięć sieci i generatora. Moc czynna pobierana przez przekształtnik podczas synchronizacji wynosi około  $p_P=1$  kW. Moc bierna przekształtnika zależna jest od obciążenia generatora. Podczas wzbudzenia wartość mocy biernej przekształtnika wynosi  $q_P=-2,7$  kvar, a podczas synchronizacji wzrasta do około  $q_P=-3,3$  kvar. Prąd przekształtnika pracującego jako kompensator mocy biernej sieci nie zmniejsza zauważalnie wartości, w porównaniu do wartości prądu przekształtnika podczas procesu synchronizacji.



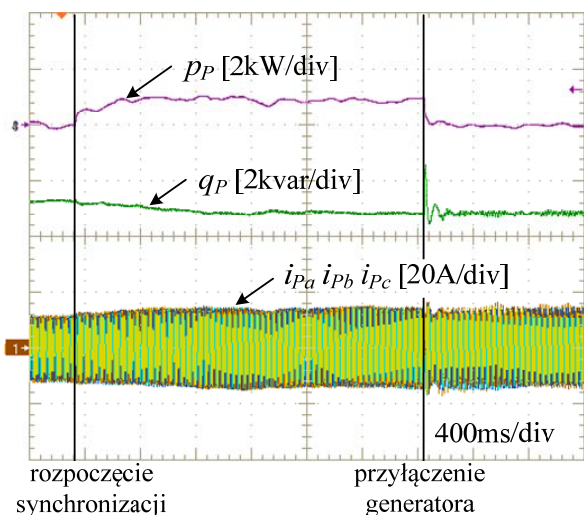
Rys.11. Oscylogram przedstawiający napięcie i prąd strony wtórnej transformatora laboratoryjnego podczas synchronizowanego przyłączenia do sieci generatora indukcyjnego wirującego z prędkością  $n_{TG}=1600$  obr/min. Moment napędzający został ograniczony do 15% momentu znamionowego silnika. Przekształtnik po przyłączeniu generatora do sieci został wyłączony.



Rys.12. Oscylogram przedstawiający napięcie i prąd strony wtórnej transformatora laboratoryjnego podczas synchronizowanego przyłączenia do sieci generatora indukcyjnego wirującego z prędkością  $n_{TG}=1600$  obr/min. Moment napędzający został ograniczony do 15% momentu znamionowego silnika. Przekształtnik po przyłączeniu generatora do sieci pracował jako kompensator mocy biernej.

## Podsumowanie

W artykule przedstawiono problem przyłączenia wirującego generatora indukcyjnego klatkowego o mocy  $P_{GN}=7,5$  kW do transformatora o mocy  $S_{TLN}=8$  kV·A. Bezpośrednie przyłączenie wirującego z prędkością  $n_{TG}=1600$  obr/min generatora do transformatora powoduje prąd łączeniowy o wartości amplitudy dochodzącej do  $i_U=120$  A i będącej trzykrotnością amplitudy prądu znamionowego generatora oraz zapad napięcia sieci wynoszący około  $30\%U_{UN}$ . Zaproponowano i przedstawiono wyniki bezczujnikowej metody synchronizowania napięć stojana generatora i sieci z wykorzystaniem przekształtnika NPC i dodatkowego elektronicznego układu hamującego dla modelu symulacyjnego. Zaproponowana metoda pozwoliła obniżyć amplitudę prądu przyłączeniowego sieci do  $i_U=15$  A i całkowicie usunąć zapad napięcia sieci, dla przyłączenia generatora o mocy podobnej do mocy transformatora. Ponadto omówiono i przedstawiono wykorzystanie przekształtnika, po przyłączeniu do sieci generatora, jako kompensatora mocy biernej. Synchronizowane przyłączenie generatora do sieci z przekształtnikiem pracującym jako kompensator mocy biernej sieci pozwoliło obniżyć amplitudę prądu przyłączeniowego sieci do  $i_U=8$  A. W modelu laboratoryjnym zweryfikowano otrzymane dla modelu symulacyjnego wyniki działania proponowanej bezczujnikowej metody synchronizowanego przyłączenia do sieci generatora indukcyjnego.



Rys.13. Oscylogram przedstawiający moc bierną i czynną oraz prądy przekształtnika podczas procesu synchronizacji napięcia stojana generatora i sieci. Prędkość generatora wynosi  $n_{TG}=1600$  obr/min. Moment napędzający został ograniczony do 15% momentu znamionowego silnika. Przekształtnik po przyłączeniu generatora do sieci pracował jako kompensator mocy biernej.

Praca jest częściowo finansowana z projektu rozwojowego nr N R01 0016 06/2009 pt. "Inteligentny układ kompensacji mocy biernej do elektrowni z maszynami indukcyjnymi" finansowanego przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju.

**Autorzy:** mgr inż. Dominik A. Górski, Politechnika Warszawska, Instytut Automatyki i Robotyki, ul. św. Andrzeja Boboli 8, 02-525 Warszawa, E-mail: [d.gorski@mchtr.pw.edu.pl](mailto:d.gorski@mchtr.pw.edu.pl);  
dr inż. Janusz Wiśniewski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [janusz.wisniewski@isep.pw.edu.pl](mailto:janusz.wisniewski@isep.pw.edu.pl);  
prof. dr hab. inż. Włodzimierz Koczara, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: [koczara@isep.pw.edu.pl](mailto:koczara@isep.pw.edu.pl);

## LITERATURA

- [1] Karolewski B., Ligocki P., Układy automatyki małej elektrowni wodnej, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 56, 24/2004
- [2] Hickiewicz J., Moch J., Zagrożenia przy pracy generatorów w małych elektrowniach wodnych, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 79, 2008, 133-137
- [3] Górski D.A., Wiśniewski J., Koczara W., Stan przejściowy przyłączenia do sieci generatora indukcyjnego z energoelektronicznym kompensatorem mocy biernej, *Przegląd Elektrotechniczny*, nr 4b, 2012, 80-86
- [4] Górski D.A., Wiśniewski J., Koczara W., Grid connection transients of small hydropower generator, *Renewable Energy & Power Quality Journal*, no 10, 2012, 14-16
- [5] Rojewski W., Sobierajski M., Warunki pracy małej elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym w sieci średniego napięcia, *Elektroenergetyczne sieci rozdzielcze - SIECI 2004 V Konferencja Naukowo - Techniczna*, 2004
- [6] Jakubowski B., Pieńkowski K.: Analysis and synthesis of converter control system of autonomous induction generator with field oriented control, *Archives of Electrical Engineering*, vol. 62, 2013, 267-279
- [7] Jakubowski B., Pieńkowski K.: Sterowanie autonomicznym generatorem indukcyjnym ze wzbudzeniem przekształtnikowym, *Zeszyty Problemowe – Maszyny Elektryczne*, nr 88, 2010, 123-128
- [8] Meier C., Schlumpf R., Strittmatter T., Jenni F.: Robust induction generator concept with parallel excitation, *Proceedings of International Exhibition and Conference for Power Electronics, Intelligent Motion, Renewable Energy and Energy Management PCIM Europe 2014*, 20-22 May 2014, 1-7
- [9] Kasprówicz A., Sterowanie samowzbudnym generatorem indukcyjnym dla zastosowań w autonomicznych systemach zasilających, *Zeszyty Naukowe Akademii Morskiej w Gdyni*, nr 62, Gru 2009, 26-36
- [10] Singh B., Murthy S.S., Gupta S., Analysis and design of electronic load controller for self-excited induction generators, *IEEE Transactions on Energy Conversion*, no 1, vol. 21, Mar 2006, 285-293
- [11] Petrea I.C., Ioan S., Daniela M., Operation of an Induction Generator Controlled by a VSI Circuit, *IEEE International Symposium on Industrial Electronics*, 04-07 Jun 2007, 2661-2666
- [12] Woei-Luen Chen, Cheng-Zhang Xie, Active Voltage and Frequency Regulator Design for a Wind-Driven Induction Generator to Alleviate Transient Impacts on Power Grid, *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, no 8, vol. 60, May 2012, 3165-3175
- [13] Molenda P.: Generator asynchroniczny w sieci energetycznej, *Zeszyty Problemowe- Maszyny Elektryczne*, nr 79, 2008
- [14] Kamiński B., Bidirectional Switch Neutral Point Clamped three-level inverter with sinusoidal voltage output, *Ph. D. Thesis*, Warszawa, Lis 2005
- [15] Kaźmierkowski M.P., Tunia H., Automatic Control of Converter-Fed Drives, *PWN*, Warszawa, 1994
- [16] Malinowski M., Kaźmierkowski M.P., Trzynaśkowski A.M., A Comparative Study of Control Techniques for PWM Rectifiers In AC Adjustable Speed Drives, *IEEE Transactions on Power Electronics*, no 6, vol. 18, Nov 2003, 1390-1396
- [17] Karolewski B., Stochmiątek W.: Analiza układu zasilania małej elektrowni wodnej, *Prace Naukowe Instytutu Maszyn, Napędów i Pomiarów Elektrycznych Politechniki Wrocławskiej*, nr 65, s. 256- 266, 2011
- [18] Koczara W., Górski D., Iwański G., Tępiński J., Wiśniewski J., Kompensacja mocy biernej generatorów indukcyjnych w małych elektrowniach wodnych, *XIII Konferencja Naukowo-Techniczna: Inwestycje w Energetyce– Bezpieczeństwo, Skok k. Bełchatowa*, Polska, 05–06 Maj 2011
- [19] Tępiński J., Wiśniewski J., Koczara W., Kompensator mocy biernej dla elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym, *Przegląd Elektrotechniczny*, (2012), nr 4b, 259-264
- [20] Wiśniewski J., Koczara W., Follow-up control of variable reactive Power of cage induction generator driver by wind turbine, *8<sup>th</sup> International Conference and Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies EVER 2013*, 27-30 Mar 2013, 1-6