

## Zmodyfikowany układ wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym

**Streszczenie.** W artykule przedstawiono zmodyfikowany układ generacji energii elektrycznej składający się z generatora synchronicznego i równoległego przekształtnika energoelektronicznego. W zmodyfikowanym układzie generator synchroniczny jest źródłem mocy czynnej a przekształtnik energoelektroniczny dostarcza moc bierną. Zastosowanie przekształtnika energoelektronicznego umożliwia zwiększenie maksymalnej mocy czynnej pozyskiwanej z generatora synchronicznego oraz zwiększa moc pozorną układu. Opracowane sterowanie zmodyfikowanym układem wytwarzania energii elektrycznej zostało zweryfikowane badaniami symulacyjnymi stanów przejściowych.

**Abstract.** The paper presents a modified power generation system of a wound rotor synchronous generator equipped in parallel connected power electronic converter. The synchronous generator is a source of active power whereas the power electronic converter delivers reactive power. In such an arrangement the generator is producing more active power that responds apparent power in conventional system. The paper presents the theory of modified generating system, control concept and results of computer simulation related to transient states (**Modified power generation system of a wound rotor synchronous generator**)

**Słowa kluczowe:** zmodyfikowany układ wytwarzania energii elektrycznej, regulacja mocy biernej, generator synchroniczny

**Keywords:** modified power generation system, reactive power control, synchronous generator, power electronics, converter control

doi:10.12915/pe.2014.08.01

### Wstęp

W obecnym stanie techniki generator synchroniczny jest podstawowym źródłem energii elektrycznej zarówno czynnej jak i biernej. Do generacji mocy czynnej i biernej stosowane są również układy złożone z generatora synchronicznego, który generuje moc czynną i bierną, generatora indukcyjnego, który pobiera moc bierną i generuje moc czynną, oraz ze statycznego przekształtnika który dostarcza moc biernej [4, 5, 6]. Z tego powodu generatory synchroniczne są budowane przy założeniu znamionowego współczynnika mocy  $\cos\varphi = 0,8$ . Przyjęcie  $\cos\varphi = 0,8$  oznacza, że znamionowy prąd czynny generatora osiąga 80% a prąd bierny 60% prądu znamionowego generatora. Zatem prąd czynny wywołuje około 64% strat czynnych a prąd bierny 36% strat czynnych w uzwojeniach stojana generatora synchronicznego. Dla zapewnienia wytwarzania odpowiedniej mocy biernej indukcyjnej wymagany jest odpowiednio duży prąd magnesowania czyli prąd uzwojenia wirnika. Prąd ten jest znacznie większy od wartości spełniającej warunek pracy ze współczynnikiem mocy  $\cos\varphi = 1$ . Zatem uzyskanie możliwości dostarczania mocy biernej indukcyjnej jest związane z dodatkowymi stratami mocy w obwodzie wirnika. Można uznać, że głównym celem elektrowni jest dostarczenie mocy czynnej, która jest podstawą funkcjonowania współczesnego społeczeństwa. Natomiast moc bierna służy jedynie zapewnieniu funkcjonowania niektórych urządzeń elektrycznych.

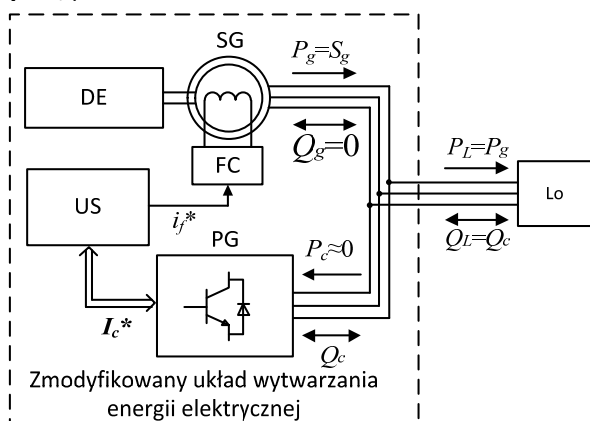
Istotną zaletą generatora synchronicznego jest zdolność do ciągłej regulacji prądu biernego. Natomiast konieczność dostarczania mocy biernej pogarsza współczynnik wykorzystania materiałów służących do budowy generatora a straty mocy czynnej od prądu biernego wymagają odpowiednio powiększonego systemu chłodzenia i są

przyczyną dodatkowych strat. Zwarta budowa generatora oraz obecność sił wewnątrz konstrukcji utrudnia w znacznym stopniu jego chłodzenie.

Współczesna technika dysponuje źródłami mocy biernej w postaci przekształtników energoelektronicznych zapewniających szybką i ciągłą regulację mocy czynnej i biernej. Zatem zdolność do wytwarzania mocy biernej przekształtników może być wykorzystana do konstrukcji generatora synchronicznego zintegrowanego z przekształtnikiem, w której zadanie dostawy mocy czynnej jest realizowane przez generator synchroniczny a źródłem mocy biernej jest statyczny przekształtnik energoelektroniczny. Możliwe jest dołączenie przekształtnika szeregowo z generatorem synchronicznym [3] lecz wtedy generator może generować moc pozorną równą mocy pozornej znamionowej, przekształtnik jest projektowany na moc maksymalną i w przypadku uszkodzenia przekształtnika nie ma możliwości dalszej generacji energii do obciążenia. W artykule przedstawiono teorię i sterowanie zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej złożonego z generatora synchronicznego i równoległego przekształtnika energoelektronicznego. Rozważony jest przypadek nowego układu, w którym zachowany jest prąd znamionowy generatora o współczynniku mocy  $\cos\varphi_n = 1$ , przy jednoczesnym udziale przekształtnika wytwarzającego moc bierną, zespołu prądotwórczego z warunkiem  $\tan\varphi_n = 0,75$ . W wyniku rozbudowy układu wytwarzania energii elektrycznej, poprzez dołączenie przekształtnika energoelektronicznego, moc pozorna nowego układu wyniesie 125% a moc czynna generatora wzrośnie z wartości 80% do wartości 100% dotychczasowej mocy pozornej generatora synchronicznego. Powiększenie mocy czynnej generatora będzie wymagało odpowiedniego wzmocnienia jego konstrukcji mechanicznej.

## Topologia zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej

Schemat podstawowy obwodu silnoprądowego zmodyfikowanego zespołu prądotwórczego jest przedstawiony na rysunku 1. Trójfazowy generator synchroniczny SG ma przyłączony równolegle czterokwadrantowy przekształtnik energoelektroniczny PG. Przekształtnik wytwarza prąd sinusoidalny o regulowanej amplitudzie i fazie odniesionej do napięcia dostarczanego przez generator synchroniczny. Podczas pracy generatora na sieć sztywną moc czynna generatora jest regulowana momentem silnika napędowego a moc bierna poprzez regulację prądu wzbudzenia [2]. Natomiast podczas pracy autonomicznej czyli na tzw. „wyspę” obciążenie decyduje o rozplywie mocy czynnej i biernej przy czym moment napędowy zapewnia stabilizację prędkości (częstotliwości) a prąd wzbudzenia stabilizację napięcia stojana. W agregatach prądotwórczych z generatorem synchronicznym stosowane są układy automatycznej regulacji napięcia które regulują wartość wyjściowego napięcia generatora [1, 7]. Zatem realizacja założenia zerowej mocy biernej generatora pracującego na wyspę wymaga złożonego układu regulacji. Przekształtnik PG pobiera z generatora moc czynną  $P_c$  potrzebną do pokrycia strat podczas wytwarzania mocy biernej. Uwzględniając wysoką sprawność przekształtnika można wstępnie przyjąć przybliżenie  $P_c \approx 0$ . Układ sterowania US zmodyfikowanego generatora realizuje regulację prądu wzbudzenia  $i_f$  oraz prądu  $I_c$  przekształtnika.



Rys.1. Koncepcja zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej

W artykule rozważono dwa przypadki pracy zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej. W pierwszym przypadku generator synchroniczny dostarcza taką samą moc czynną jak w przypadku pracy z  $\cos(\varphi) = 0,8$  a przekształtnik energoelektroniczny dostarcza moc bierną wynikającą z założenia  $\sin(\varphi) = 0,6$ . Rozwiązanie takie cechuje się zmniejszonymi stratami mocy w generatorze synchronicznym. Natomiast drugi przypadek dotyczy pracy generatora z prądem czynnym równym znamionowemu prądowi pozornemu i z  $\cos(\varphi) = 1$  co skutkuje zwiększoną mocą czynną i pozorną zespołu prądotwórczego.

### Założenia dla zmodyfikowanego układu wytwarzania energii

Zmodyfikowany układ wytwarzania energii elektrycznej przedstawiono na rysunku 1. Nowy, zmodyfikowany układ wytwarzania energii elektrycznej składa się z generatora synchronicznego SG napędzanego np. silnikiem Diesla, i równolegle dołączonego przekształtnika energoelektronicznego PG. Moc czynna  $P_L$  dostarczana do obciążenia jest

sumą mocy czynnej generatora  $P_g$  i mocy czynnej  $P_c$  przekształtnika a moc bierna układu  $Q_L$  jest sumą mocy biernej generatora synchronicznego  $Q_g$  i przekształtnika  $Q_c$

$$(1) \quad P_L = P_g + P_c$$

$$(2) \quad Q_L = Q_g + Q_c$$

Głównym założeniem sterowania układem jest przyjęcie zerowej mocy biernej generatora czyli  $Q_g = 0$ . W przypadku pracy autonomicznej generatora, gdy obciążenie wymaga dostarczenia mocy czynnej i biernej, moc bierną obciążenia dostarcza przekształtnik PG. Do prawidłowej pracy przekształtnika niezbędne jest dostarczenie mocy czynnej na pokrycie strat w przekształtniku. Moc czynna pobierana przez przekształtnik jest mała w porównaniu z mocą czynną generowaną przez generator SG  $P_c \ll P_g$  i może być pominięta a zatem  $P_c \approx 0$ . Biorąc pod uwagę powyższe uproszczenie otrzymuje się w stanie ustalonym

$$(3) \quad P_L = P_g$$

Jeśli  $Q_g = 0$  wtedy moc bierna obciążenia jest równa mocy biernej przekształtnika

$$(4) \quad Q_L = Q_c$$

W przypadku pracy autonomicznej nie ma możliwości regulacji mocy czynnej generatora synchronicznego, a regulator prędkości silnika napędowego utrzymuje stałą prędkość niezależnie od obciążenia. Układ regulacji prądu wzbudzenia generatora synchronicznego zapewnia utrzymanie napięcia generatora na zadanej wartości. Standardowe napięcie generatora synchronicznego jest zależne od zapotrzebowania odbiorników, np. moduł przewodowego napięcia dla odbiorników 400V/50Hz jest równy 565V. Układ regulacji US zadaje odpowiedni prąd wyjściowy przekształtnika  $I_c^*$  taki aby przekształtnik generował moc bierną równą mocy biernej obciążenia  $Q_L = Q_c$ , wtedy moc bierna generatora jest równa zero  $Q_g = 0$ .

### Moc zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej

Generator synchroniczny może wygenerować długotrwałą moc pozorną oznaczaną jako moc znamionową generatora synchronicznego  $S_{gN}$ . Zastosowanie przekształtnika do generacji mocy biernej umożliwia generację większej mocy czynnej w generatorze synchronicznym. Można rozważyć dwa przypadki 1) gdy obciążenie jest zasilane tylko z generatora synchronicznego i 2) gdy obciążenie zasilane jest ze zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej.

1) Obciążenie zasilane z generatora synchronicznego (układ klasyczny):

Jeśli współczynnik mocy obciążenia  $\cos(\varphi_L) = 0,8$ , to wówczas generator synchroniczny może wygenerować moc czynną równą 0,8 mocy pozornej znamionowej, oraz moc bierną równą 0,6 mocy pozornej znamionowej.

$$(5) \quad P_g = 0,8 \cdot S_{gN}$$

$$(6) \quad Q_g = 0,6 \cdot S_{gN}$$

W takim przypadku moc pozorna generowana do obciążenia  $S_L$  jest równa mocy znamionowej generatora synchronicznego.

$$(7) \quad S_L = S_{gN}$$

2) Obciążenie zasilane ze zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej:

W przypadku zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej generator synchroniczny nie generuje

mocy bierniej, zatem może wytwarzać moc czynną równą liczbowo mocy pozornej znamionowej.

$$(8) \quad P_g = S_{gN}$$

Moc czynna przekształtnika jest w przybliżeniu równa zero zatem moc czynna obciążenia jest równa mocy czynnej generowanej przez generator. Zakładając, że układ zmodyfikowany również cechuje się współczynnikiem mocy  $\cos(\varphi_L) = 0,8$  wyznacza się moc pozorną

$$(9) \quad P_L = 0,8 \cdot S_L$$

Zatem

$$(10) \quad S_L = \frac{P_L}{0,8} = 1,25 \cdot S_{gN}$$

Wzór ten będzie prawdziwy jeśli przekształtnik będzie wytwarzał odpowiednią moc bierną. W tym przypadku układ zmodyfikowany wytwarza moc pozorną równą 1,25 mocy znamionowej generatora synchronicznego a moc bierna dostarczona przez przekształtnik jest równa 0,6 mocy pozornej nowego układu. Zatem jeśli generator synchroniczny nie generuje mocy bierniej, to wówczas moc bierna obciążenia jest równa mocy bierniej przekształtnika

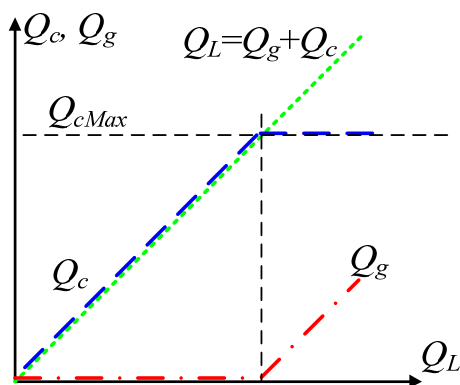
$$(11) \quad Q_c = Q_L = 0,6 \cdot S_L = 0,6 \cdot 1,25 \cdot S_{gN} = 0,75 \cdot S_{gN}$$

Czyli moc znamionowa przekształtnika powinna być równa 0,75 mocy znamionowej generatora synchronicznego.

Zastosowanie zmodyfikowanego generatora umożliwia generację większej mocy pozornej niż moc znamionowa generatora synchronicznego. Ponadto zastosowanie przekształtnika umożliwia szybszą zmianę generowanej mocy bierniej, co jest pożądane przy szybkich zmianach obciążenia jak np. załączenie lub odłączenie silnika indukcyjnego.

### Charakterystyka pracy zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej

Zmodyfikowany układ wytwarzania energii elektrycznej składa się z dwóch podzespołów o znacznie różniących się właściwościach regulacyjnych. Podczas pracy autonomicznej prąd generatora synchronicznego zmienia się wraz z obciążeniem czyli obwód prądowy generatora ma charakter otwarty. Natomiast prąd przekształtnika jest regulowany a jego wartość maksymalna wynika z wartości zadanej.



Rys 2. Rozpływ mocy bierniej w przypadku maksymalnej mocy bierniej przekształtnika mniejszej niż moc bierna obciążenia

Ograniczenie maksymalnego prądu przekształtnika skutkuje ograniczeniem dostarczania maksymalnej mocy bierniej. Rysunek 2 przedstawia zależność generowanych

mocy biernych przez przekształtnik  $Q_c = f(Q_L)$  i generator synchroniczny  $Q_g = f(Q_L)$  w funkcji mocy obciążenia  $Q_L$ . Zgodnie z (2) moc dostarczona do obciążenia jest sumą mocy bierniej przekształtnika i generatora synchronicznego. W przypadku gdy moc bierna obciążenia jest mniejsza od zadanej maksymalnej mocy bierniej przekształtnika  $Q_L < Q_{cMax}$  całą moc bierną generuje przekształtnik a generator synchroniczny nie generuje mocy bierniej czyli  $Q_g = 0$ .

Jeżeli moc bierna obciążenia jest większa od zadanej maksymalnej mocy bierniej przekształtnika  $Q_L > Q_{cMax}$  to wówczas przekształtnik generuje moc bierną równą zadanej mocy bierniej  $Q_{cMax}$  a generator synchroniczny dostarcza brakującą moc bierną  $Q_g = Q_L - Q_{cMax}$ .

W przypadku generatora synchronicznego o mocy  $S_{gN} = 720\text{kVA}$  znamionowa moc bierna generatora jest równa  $Q_{gN} = 432\text{kVar}$ . Jeśli w zmodyfikowanym układzie wytwarzania energii elektrycznej zastosowany będzie przekształtnik o  $Q_{pN} = 300\text{kVar}$  a obciążenie wymaga mocy bierniej równej mocy znamionowej generatora  $Q_{LN} = 432\text{kVar}$ , to generator synchroniczny będzie dostarczał moc bierną  $Q_g = 132\text{kVar}$ . Jeśli natomiast moc bierna obciążenia jest mniejsza od mocy znamionowej przekształtnika to całkowitą moc bierną dostarcza tylko przekształtnik.

### Regulacja zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej

Schemat zastępczy zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej przedstawia rysunek 3. W generatorze synchronicznym indukuje się napięcie  $E_g$ , które jest zależne od prądu wzbudzenia  $i_f$ . W generatorze synchronicznym występuje spadek napięcia na reaktancji generatora  $X_g$ . Prąd generatora synchronicznego w wirującym układzie współrzędnych x-y ma dwie składowe:

$$(12) \quad \mathbf{I}_g = i_{gx} + j i_{gy}$$

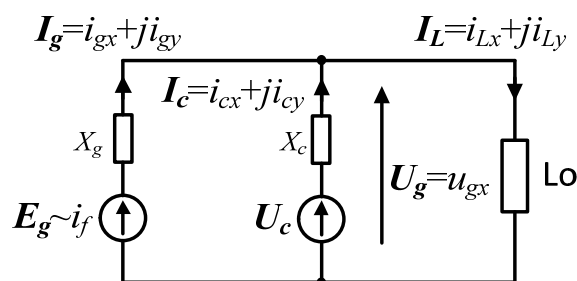
Przekształtnik PG reprezentowany jest jako źródło napięcia  $U_c$ . Na wyjściu przekształtnika znajduje się dławik reprezentowany przez reaktancję  $X_c$ . Podobnie jak dla generatora prąd przekształtnika ma dwie składowe:

$$(13) \quad \mathbf{I}_c = i_{cx} + j i_{cy}$$

Napięciem wyjściowym zmodyfikowanego układu wytwarzania energii jest napięcie  $U_g$ . Oś x układu współrzędnych x-y jest zgodna z wektorem napięcia wyjściowego generatora  $U_g$ , czyli wektor napięcia wyjściowego  $U_g$  ma tylko jedną składową w osi x, czyli  $u_{gx}$ .

Prąd obciążenia  $I_L$  jest sumą prądów generatora synchronicznego i przekształtnika:

$$(14) \quad \mathbf{I}_L = \mathbf{I}_g + \mathbf{I}_c = i_{Lx} + j i_{Ly}$$



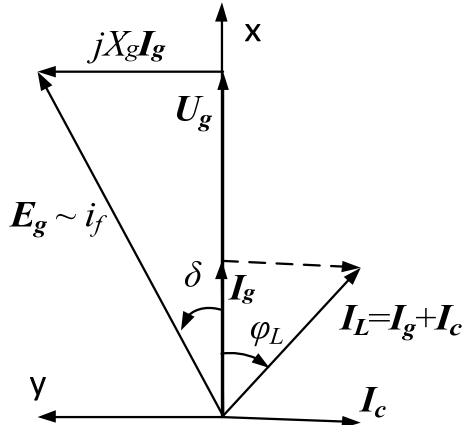
Rys 3. Schemat zastępczy zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej

Na rysunku 4 przedstawiono wykres wektorowy zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej. Wektor napięcia indukowanego generatora  $E_g$  zależy od prądu wzbudzenia generatora. Kąt  $\delta$ , między wektorami  $U_g$  i  $E_g$ , jest kątem położenia wirnika. W przypadku pracy

autonomicznej, nie ma możliwości regulacji kąta  $\delta$ , gdyż tylko obciążenie decyduje o tej wartości. Zmieniając prąd wzbudzenia, można osiągnąć zerową moc bierną generowaną przez generator synchroniczny.

Układ sterowania US utrzymuje wartość prądu przekształtnika  $I_c$  równy zadanej wartości, realizowane jest to poprzez odpowiednioysterowane napięcie wyjściowe przekształtnika  $U_c$ .

Zgodnie z (14) prąd obciążenia jest sumą prądu generatora i prądu przekształtnika. Moc pozorna obciążenia jest równa iloczynowi napięcia wyjściowego generatora  $U_g$  i sprzężonej wartości prądu obciążenia  $I_L^*$ :



Rys.4. Wykres wektorowy zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej

$$(15) \quad S_L = U_g \cdot I_L^* = u_{gx} \cdot (i_{Lx} + j i_{Ly})^* = u_{gx} \cdot (i_{Lx} - j i_{Ly}) = u_{gx} \cdot i_{Lx} - j u_{gx} \cdot i_{Ly}$$

Moc czynna obciążenia jest częścią rzeczywistą a moc bierna częścią urojoną mocy pozornej:

$$(16) \quad P_L = i_{Lx} \cdot u_{gx}$$

$$(17) \quad Q_L = -i_{Ly} \cdot u_{gx}$$

Układ regulacji zmodyfikowanego generatora przedstawiono na rysunku 5. Regulację prądu przekształtnika energoelektronicznego przeprowadzono metodą „Current Control of Voltage Source Converter” (CC-VSC). Przyjęto obciążenie symetryczne trójfazowe. Obciążenie  $Lo$  jest zasilane z generatora synchronicznego SG oraz z przekształtnika PG. Regulacja napięcia wyjściowego odbywa się poprzez zmianę prądu wzbudzenia generatora  $i_f$ . Układ regulacji przekształtnika otrzymuje sygnał zadany prądu biernego generatora  $i_{gy}^* = 0$ .

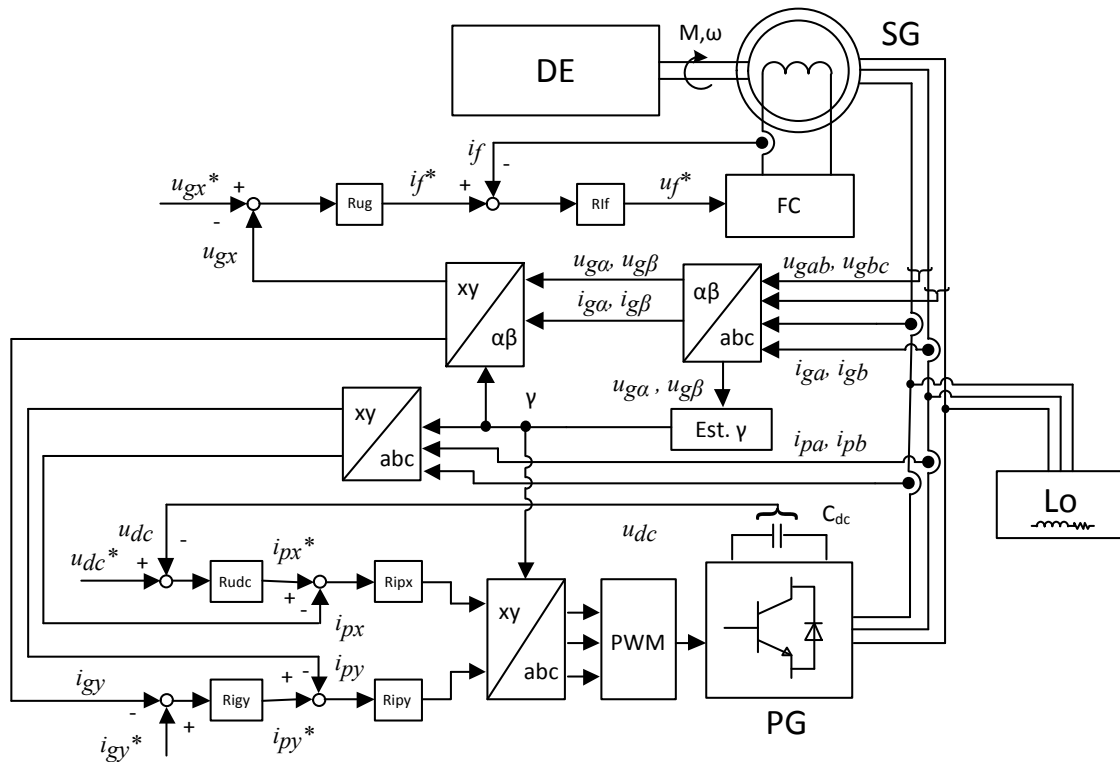
W układzie regulacji mierzone są wartości napięć przewodowych  $u_{gab}, u_{gbc}$  i prądów fazowych generatora  $i_{ga}, i_{gb}$ , które są transformowane do układu współrzędnych x-y. Generator synchroniczny podczas pracy autonomicznej wytwarza stałą wartość modułu napięcia wyjściowego  $u_{gx}$ . Realizowane jest to poprzez regulator napięcia Rug, który wytwarza sygnał zadanego prądu wzbudzenia  $i_f^*$ . Regulator prądu wzbudzenia Rif wytwarza zadane napięcie wzbudzenia  $u_f^*$  dla przekształtnika wzbudzenia FC.

W przypadku układu współrzędnych x-y zgodnego z wektorem napięcia wyjściowego generatora  $U_g$ , równania mocy przekształtnika przyjmują postać

$$(18) \quad P_c = i_{cx} \cdot u_{gx}$$

$$(19) \quad Q_c = -i_{cy} \cdot u_{gx}$$

Prąd  $i_{px}$  przekształtnika PG odpowiada za wartość napięcia kondensatora  $C_{dc}$ , zatem regulator napięcia Rucd kondensatora  $u_{dc}$  wytwarza sygnał zadanego prądu przekształtnika,  $i_{px}^*$ .



Rys.5. Układ regulacji zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej

Równania mocy generatora SG

$$(20) \quad P_g = i_{gx} \cdot u_{gx}$$

$$(21) \quad Q_g = -i_{gy} \cdot u_{gx}$$

Zgodnie z (21) regulację mocy biernej generatora synchronicznego osiąga się poprzez regulację składowej y prądu generatora  $i_{gy}$ . Zatem zerową wartość prądu biernego generatora realizuje się poprzez zadanie  $i_{gy}^* = 0$  oraz zadanie prądu przekształtnika  $i_{py}^*$  wyznaczoną przez regulator prądu generatora Rigy. W ten sposób moc bierna układu generatora zmodyfikowanego jest dostarczana przez przekształtnik energoelektroniczny PG

### Stany przejściowe zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej

Badania stanów przejściowych zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym ze sterowaniem wg rysunku 5 przeprowadzono stosując generator o mocy 720 kVA (dane w Tabeli 1). Badania obejmują stany przejściowe redukcji obciążenia mocą bierną generatora synchronicznego poprzez przejęcie obciążenia przez przekształtnik energoelektroniczny.

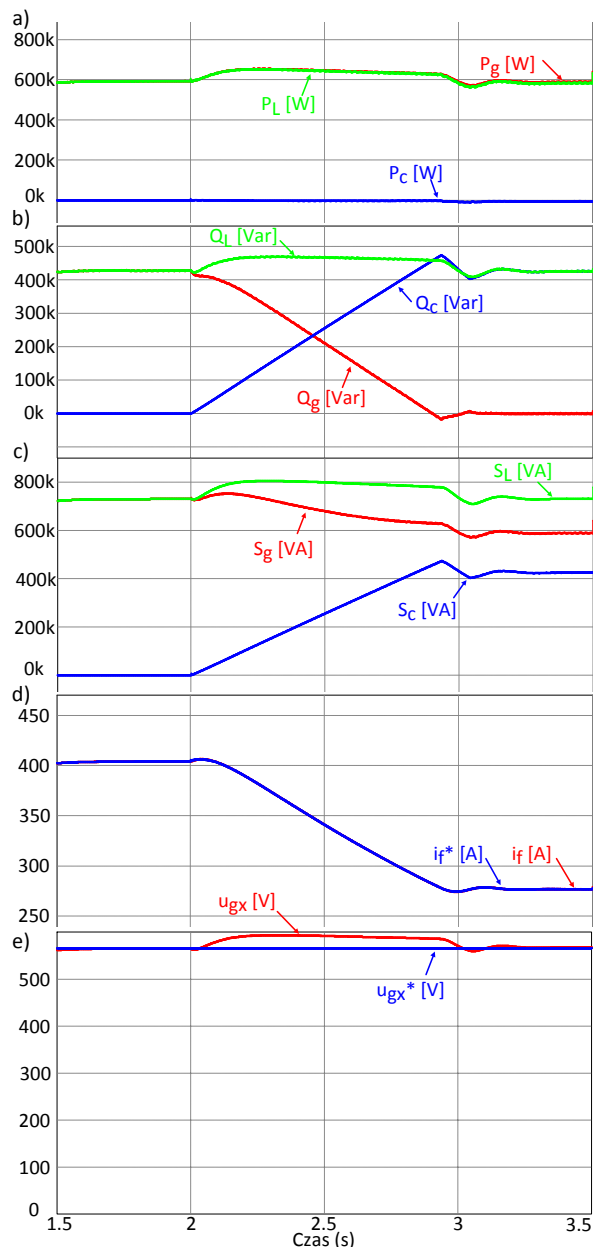
Rysunek 6 przedstawia stan przejściowy pracy zmodyfikowanego układu wytwarzania energii, w którym w stanie początkowym ( $t < 2s$ ) generator synchroniczny jest obciążony mocą znamionową  $S_{gN} = 720kVA$ ,  $P_g = 576kW$ ,  $Q_g = 432kVar$ , przy współczynniku mocy  $\cos(\varphi_L) = 0,8$ . W chwili  $t = 2s$  podany zostaje sygnał zerowego prądu biernego generatora  $i_{gy}^* = 0$ . W wyniku działania układu regulacji zaczyna się zmniejszać prąd wzbudzenia  $i_f$ , od wartości 400A do wartości 277A, (Rys. 6d), maleje moc bierna generatora  $Q_g$  (Rys. 6b) od wartości 432kVA do 0 oraz wzrasta moc bierna przekształtnika  $Q_c$  od 0 do 432kVA (Rys. 6b). Jeżeli przejmowanie mocy biernej przez przekształtnik jest zbyt szybkie to wówczas obwód wzbudzenia, cechujący się dużą stałą czasową, nie nadąża za zmianami mocy biernej i w efekcie następuje przewzbudzenie generatora i wzrost indukowanego napięcia (Rys. 6e). W układzie regulacji z rysunku 6 ograniczono szybkość narastania prądu biernego przekształtnika i wskutek tego ograniczenia przyrost napięcia generatora jest niewielki (Rys. 6e).

W wyniku wzrostu napięcia generatora następuje, w stanie przejściowym, przyrost mocy czynnej obciążenia.

W stanie ustalonym, od chwili  $t = 3,3s$ , generator synchroniczny dostarcza tylko znamionową moc czynną  $P_g = 576kW$ . Moc bierną generuje przekształtnik  $Q_c = 432kVar$ . W tym stanie prąd generatora jest równy składowej czynnej odpowiadającej prądowi znamionowemu przy współczynniku mocy  $\cos(\varphi_L) = 0,8$ . Zatem po przejęciu mocy biernej obciążenia, przez przekształtnik, zmniejsza się prąd stojana. Przekształtnik pobiera nieznaczną wartość mocy czynnej wynikającą ze strat w półprzewodnikach.

Na rysunku 7 przedstawiono zmianę obciążenia zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej, z obciążenia pobierającego moc pozorną  $S_L = 720kVA$  na obciążenie pobierające moc pozorną  $S_L = 900kVA$  przy czym współczynnik mocy nie został zmieniony  $\cos(\varphi_L) = 0,8$ . Po dołączeniu w chwili  $t = 3,5s$  dodatkowego obciążenia moc układu generatora zmodyfikowanego wzrasta do wartości  $S_L = 720kVA * 1,25 = 900kVA$  ( $P_L = 720kW$ ,  $Q_L = 540kVar$ ). Nowe obciążenie odpowiada zachowaniu stałego prądu generatora synchronicznego czyli w nowym stanie generator synchroniczny dostarcza moc czynną równą liczbowo znamionowej mocy pozornej  $P_g = S_{gN} = 720kW$ . Moc bierną  $Q_c = 540kVar$  dostarcza przekształtnik PG. Zatem moc pozorna nowego źródła

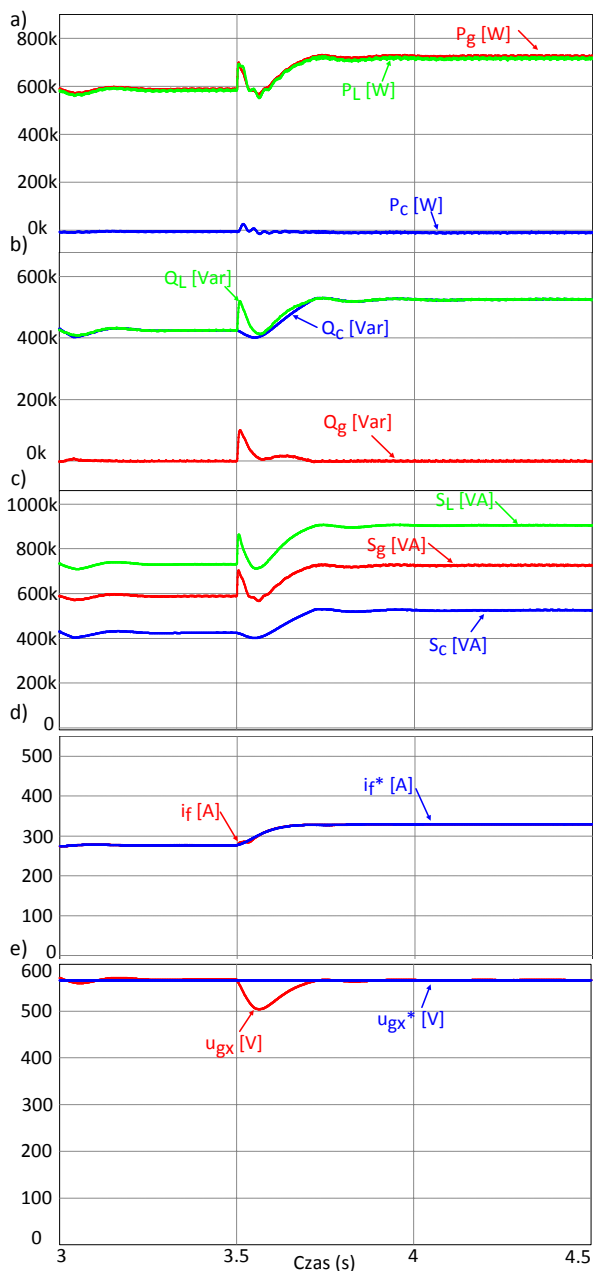
energii elektrycznej jest większa niż moc znamionowa generatora synchronicznego i wynosi 900kVA co odpowiada  $S_L = 1,25 * S_{gN}$ .



Rys. 6 Stan przejściowy przejęcia obciążenia biernego przez przekształtnik energoelektroniczny przyłączony równolegle do stojana generatora synchronicznego przy zachowaniu znamionowej mocy czynnej określonej przy współczynniku mocy  $\cos(\varphi_L) = 0,8$ , a) moce czynne generatora  $P_g$ , przekształtnika  $P_c$  i obciążenia  $P_L$ , b) moce bierne generatora  $Q_g$ , przekształtnika  $Q_c$  i obciążenia  $Q_L$ , c) moce pozorne generatora  $S_g$ , przekształtnika  $S_c$  i obciążenia  $S_L$ , d) prąd wzbudzenia generatora synchronicznego: prąd zadany  $i_f^*$  oraz prąd mierzony  $i_f$ , e) moduł wyjściowego napięcia układu wytwarzania energii elektrycznej: moduł zadany  $u_{gx}^*$  oraz moduł mierzony  $u_{gx}$

Prąd wzbudzenia generatora, w przypadku generacji mocy czynnej równej mocy pozornej znamionowej, jest mniejszy niż w przypadku generacji znamionowej mocy czynnej i biernej. Prąd wzbudzenia w przypadku generacji mocy czynnej  $P_g = 576kW$  i biernej  $Q_g = 432kVar$ ,  $t = 1,5s$ , jest równy  $i_f = 400A$ , a w przypadku generacji tylko mocy czynnej  $P_g = 720kW$ ,  $t = 4s$ , wynosi  $i_f = 330A$ . Czyli w przypadku generacji zwiększonej mocy pozornej generator synchroniczny ma mniejsze straty niż w przypadku generacji mocy znamionowej czynnej i biernej.

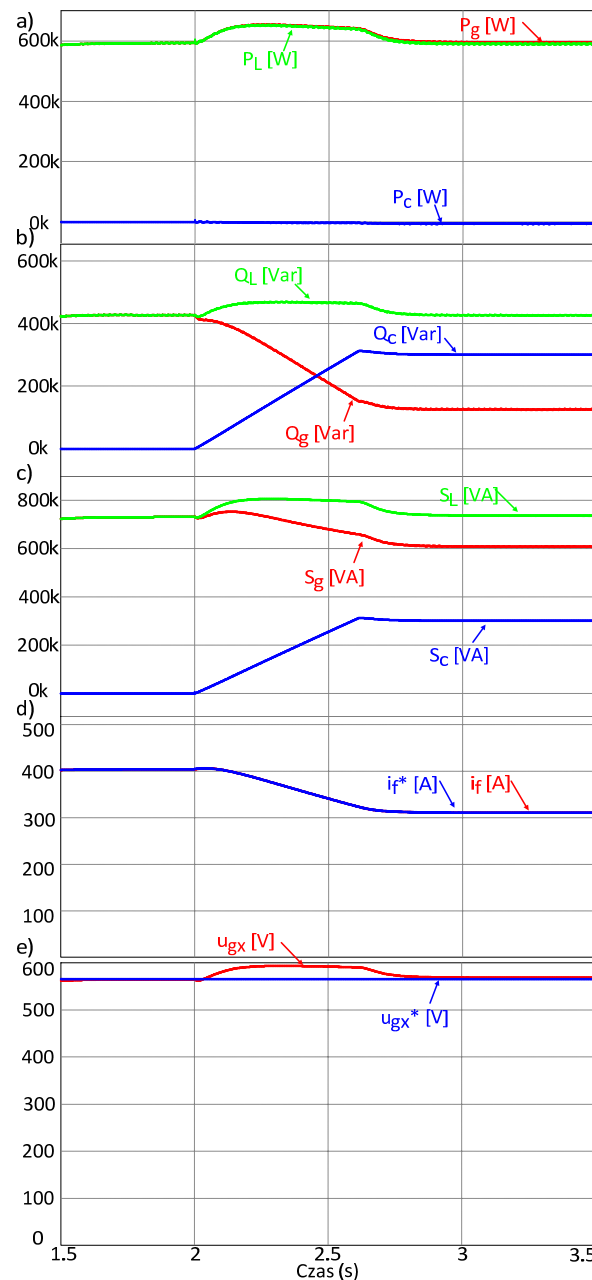
Przypadek pracy zmodyfikowanego układu wytwarzania energii elektrycznej z przekształtnikiem energoelektronicznym o mocy mniejszej od znamionowej mocy bierniej generatora synchronicznego jest pokazany na rysunku 8.



Rys. 7. Stan przejściowy powiększenia mocy czynnej generatora synchronicznego od wartości znamionowej do wartości odpowiadającej zachowaniu prądu znamionowego przy mocy bierniej  $Q_g = 0$  a) moce czynne generatora  $P_g$ , przekształtnika  $P_c$  i obciążenia  $P_L$ , b) moce biernie generatora  $Q_g$ , przekształtnika  $Q_c$  i obciążenia  $Q_L$ , c) moce pozorne generatora  $S_g$ , przekształtnika  $S_c$  i obciążenia  $S_L$ , d) prąd wzбудzenia generatora synchronicznego: prąd zadany  $i_f^*$  oraz prąd mierzony  $i_f$ , e) moduł wyjściowego napięcia układu wytwarzania energii elektrycznej: moduł zadany  $u_{gx}^*$  oraz moduł mierzony  $u_{gx}$

Moc znamionowa przekształtnika ograniczona jest na poziomie  $Q_{cmax} = 300kVA$ . W czasie  $t < 2s$  załączony jest generator synchroniczny z obciążeniem znamionowym, czyli  $S_{gN} = 720kVA$ ,  $P_g = 576kW$ ,  $Q_g = 432kVar$ . W chwili  $t = 2s$  załączony jest przekształtnik energoelektroniczny który dostarcza moc bierną  $Q_c = 300kVar$ . Układ regulacji przekształtnika zwiększa w sposób ciągły prąd bierny

przekształtnika tak aby generator synchroniczny nie generował mocy bierniej. W chwili  $t = 2,6s$  przekształtnik osiąga wartość mocy bierniej równą  $Q_p = 300kVar$ . Po osiągnięciu stanu ustalonego układu generator synchroniczny generuje moc bierną równą  $Q_g = 132kVar$ . Moc bierna obciążenia  $Q_L = 432kVar$  jest sumą mocy bierniej przekształtnika i mocy bierniej generatora.



Rys. 8. Przejęcie generacji mocy bierniej przez przekształtnik przy ograniczonej wartości mocy znamionowej przekształtnika do wartości  $Q_{cmax} = 300kVar$ . a) moce czynne generatora  $P_g$ , przekształtnika  $P_c$  i obciążenia  $P_L$ , b) moce biernie generatora  $Q_g$ , przekształtnika  $Q_c$  i obciążenia  $Q_L$ , c) moce pozorne generatora  $S_g$ , przekształtnika  $S_c$  i obciążenia  $S_L$ , d) prąd wzбудzenia generatora synchronicznego: prąd zadany  $i_f^*$  oraz prąd mierzony  $i_f$ , e) moduł wyjściowego napięcia układu wytwarzania energii elektrycznej: moduł zadany  $u_{gx}^*$  oraz moduł mierzony  $u_{gx}$

W czasie  $t < 2s$  moc pozorna obciążenia jest równa  $S_L = 720kVA$ . Po włączeniu przekształtnika w stanie ustalonym  $t > 3s$  moc pozorna obciążenia jest również równa  $S_L = 720kVA$ . Zmniejszyła się jednak wartość mocy pozornej generatora synchronicznego do wartości  $S_g = 600kVA$ .



Zmniejszenie mocy biernej generatora synchronicznego powoduje zmniejszenie prądu wzbudzenia z wartości  $i_f = 404\text{A}$  na prąd wzbudzenia o wartości  $i_f = 311\text{A}$ . Napięcie wyjściowe generatora w stanie ustalonym jest równe zadanemu napięciu generatora  $u_{gx} = u_{gx}^*$ .

Stanom przejściowym pokazanym na rysunkach 6, 7, 8 towarzyszy niewielkie przeregulowanie oraz wzrost napięcia generatora. Oznacza to, że narastanie prądu przekształtnika było, w stosunku do zmian prądu wzbudzenia, zbyt szybkie. Zatem wskazane jest rozszerzenie i kontynuacja badań stanów przejściowych.

#### Podsumowanie

- W artykule przedstawiono zmodyfikowany układ wytwarzania energii elektrycznej z generatorem synchronicznym oraz z zintegrowanym równoległym przekształtnikiem energoelektronicznym cechującym się pracą w czterech ćwiartkach układu współrzędnych mocy czynnej i biernej.
- W zmodyfikowanym układzie generator pełni rolę źródła mocy czynnej a przekształtnik dostarcza moc bierną.
- Opracowany zintegrowany układ wytwarzania energii elektrycznej jest sterowany metodą orientacji względem wektora napięcia generatora.
- Wyniki badań dowodzą tezę, w której dołączenie równoległego układu przekształtnikowego powiększa znamionową moc czynną generatora
- Uwolnienie generatora synchronicznego od wytwarzania mocy biernej, przy zachowaniu prądu znamionowego, pozwala na zwiększenie mocy czynnej generatora oraz na uzyskanie mocy pozornej większej o 25% w stosunku do mocy generatora synchronicznego pracującego samodzielnie.
- Przekształtnik energoelektroniczny charakteryzuje się bardzo szybkim działaniem, natomiast regulacja generatora synchronicznego poprzez prąd wzbudzenia jest powolna. Zbyt szybkie narastanie prądu przekształtnika może doprowadzić do przewzbudzenia generatora i do niekontrolowanego wzrostu napięcia.

Tabela 1. Parametry generatora synchronicznego

$S_N$	720kVA
$U_N$	400/230V
$I_N$	1140A
$X_S$	14m $\Omega$
$R_S$	2,5m $\Omega$
$L_f$	1,5mH
$R_f$	2,3m $\Omega$
$\cos\phi_{gN}$	0,8
$I_{fN}$	404A

#### LITERATURA

- [1] Weilin Li, Xiaobin Zhang, Huimin Li, "A Novel Digital Automatic Voltage Regulator for Synchronous Generator", *Power System Technology (POWERCON), 2010 International Conference*, 24-28 Oct. 2010, Hangzhou, ISBN: 978-1-4244-5938-4, 1 - 6
- [2] Ahmed A. Mohamed, Mohamed Elshaer, Osama A. Mohammed, "Reactive Power Compensation Control for Stand-Alone Synchronous Generator-Based Wind Energy Conversion System", *IECON 2010 - 36th Annual Conference on IEEE Industrial Electronics Society*, 7-10 Nov. 2010, Glendale, ISBN: 978-1-4244-5225-5, 3222 - 3227
- [3] Mona F. Moussa, Yasser G. Dessouky, Barry W. Williams, "Control strategy of a 6 MVA series connected synchronous generator for wind power", *Renewable Power Generation (RPG 2011), IET Conference*, 6-8 Sept. 2011, Edinburgh, 1 - 6
- [4] Sharma, P. ; Bhatti, T.S. ; Ramakrishna, K.S.S. " Control of reactive power of autonomous wind-diesel hybrid power systems" *Power Electronics, Drives and Energy Systems (PEDES) & 2010 Power India, 2010 Joint International Conference*, 20-23 Dec. 2010, New Delhi, ISBN: 978-1-4244-7782-1, 1 - 6
- [5] Pawan Sharma, Bjarte Hoff, Ramkesh Meena, "ANN based reactive power control of an autonomous wind-diesel hybrid power plant using PMIG and SG" *Power and Energy Systems Conference: Towards Sustainable Energy, 2014*, 13-15 March 2014, Bangalore, ISBN: 978-1-4799-3420-1, 1 - 6
- [6] Karlsson, P. ; Bjornstedt, J. ; Strom, M. "Stability of voltage and frequency control in distributed generation based on parallel-connected converters feeding constant power loads", *Power Electronics and Applications, 2005 European Conference*, 11 - 14 Sep 2005, Dresden, ISBN: 90-75815-09-3, P.1 - P.10
- [7] Dong-Hee Lee, Tae-Hyoung Kim, Jin-Woo Ahn "Control of digital AVR in stand alone generator for improved dynamic characteristics", *Power Electronics Specialists Conference, 2008. PESC 2008*, 15-19 June 2008, Rhodes, ISBN: 978-1-4244-1667-7, 1978 - 1982

**Autorzy:** prof. dr hab. inż. Włodzimierz Koczara, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: wlodzimierz.koczara@ee.pw.edu.pl; mgr inż. Piotr Szulawski, Politechnika Warszawska, Instytut Sterowania i Elektroniki Przemysłowej, ul. Koszykowa 75, 00-662 Warszawa, E-mail: piotr.szulawski@ee.pw.edu.pl.