

Jarosław Tępiński<sup>a)\*</sup>

<sup>a)</sup> *Scientific and Research Centre for Fire Protection – National Research Institute / Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej im. Józefa Tuliszkowskiego – Państwowy Instytut Badawczy*

<sup>\*</sup> *Corresponding author / Autor korespondencyjny: jtepinski@cnbop.pl*

## Converter Compensation of Reactive Power Consumed by the Induction Generator

### Przekształtnikowa kompensacja mocy biernej pobieranej przez generator indukcyjny

#### ABSTRACT

**Purpose:** The purpose of the article is to present a reactive power compensation for small hydropower plants with an induction generator. The classic compensation with capacitors is discussed and its improvement is proposed. Instead of capacitors, a three level power electronic converter connected in parallel to the induction generator can be used to provide reactive power compensation. The purpose of the paper is to present the developed structure of an active compensator and its control method. The developed control method was verified on a laboratory stand.

**The project and the methods:** As part of research, an active compensator was built as a three-level power electronic converter in topology with Neutral Point Clamped. Laboratory tests of a converter compensator were carried out on a stand equipped with an induction generator with a power of 7.5 kW. Laboratory system measurements were made using a power analyzer and an oscilloscope.

**Results:** A control structure of an active compensator based on a voltage-oriented method was presented and discussed. The operation of the converter compensator has been verified on a laboratory stand equipped with a 7.5 kW induction generator. The compensator current reduces the reactive (inductive) component of the current consumed from a power grid to a value equal to zero. The reactive power compensator ensures that the  $\text{tg}\varphi$  power factor is maintained at a set value of zero, which corresponds to the total compensation of inductive reactive power consumed by an induction generator working in a hydropower plant. Operation of the active compensator did not cause a significant increase in the harmonic content in the current consumed from the power grid.

**Conclusions:** The paper presents the issues regarding reactive power compensation in hydropower plants with induction generators. Commonly used capacitor compensation has been covered and as a result, it is proposed to replace it with power electronics converter compensation of reactive power connected in parallel induction generators. Active compensator provides compensation for the entire reactive power consumed by the induction generator. The use of the converter compensator of reactive power significantly contributes to the reduction of costs for reactive power incurred by the owners of hydropower plants. The reactive power compensator also has a positive impact on the operation of the entire power grid, power losses from the reactive component of the current on the impedances of power grid components are limited.

**Keywords:** renewable source of electricity, reactive power, active compensator, induction generator

**Type of article:** original scientific article

---

Received: 13.05.2021; Reviewed: 27.06.2021; Accepted: 28.06.2021;

Authors' ORCID ID: J. Tępiński – 0000-0002-5005-2795;

Please cite as: SFT Vol. 57 Issue 1, 2021, pp. 64–79, <https://doi.org/10.12845/sft.57.1.2021.5>;

This is an open access article under the CC BY-SA 4.0 license (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

---

#### ABSTRAKT

**Cel:** Celem artykułu jest przedstawienie zagadnień kompensacji mocy biernej w małych elektrowniach wodnych wyposażonych w generatory indukcyjne. Omówiono pasywną kondensatorową kompensację mocy biernej i zaproponowano zastąpienie jej przekształtnikowym aktywnym układem kompensacji przyłączonym równolegle do generatora indukcyjnego. Opracowana struktura przekształtnikowego kompensatora oraz metoda jego sterowania zostały zweryfikowane na stanowisku laboratoryjnym.

**Projekt i metody:** Zbudowano aktywny kompensator mocy biernej, w skład którego wchodzi przekształtnik energoelektroniczny wykonany w topologii trójpoziomowej z diodami poziomującymi przyłączonymi z punktem neutralnym. Badania laboratoryjne aktywnego kompensatora przeprowadzono na generatorze indukcyjnym o mocy 7,5 kW. Pomiarów parametrów pracy przekształtnikowego kompensatora wykonano przy wykorzystaniu analizatora jakości energii i oscyloskopu.

**Wyniki:** Przedstawiono i omówiono układ sterowania aktywnego kompensatora bazujący na zmodyfikowanej metodzie zorientowanej napięciowo. Działanie kompensatora zostało zweryfikowane na stanowisku laboratoryjnym wyposażonym w generator indukcyjny o mocy 7,5 kW. Prąd kompensatora zmniejsza składową bierną (indukcyjną) prądu pobieranego z sieci do wartości bliskiej lub równej zero. Aktywny kompensator mocy biernej zapewnia utrzymanie współczynnika mocy  $\text{tg}\varphi$  na poziomie 0, co odpowiada całkowitej kompensacji mocy biernej indukcyjnej pobieranej przez generator elektrowni wodnej. Praca aktywnego kompensatora nie powoduje znacznego wzrostu zawartości harmoniczných w prądzie pobieranym z sieci elektroenergetycznej.

**Wnioski:** W artykule przedstawiono zagadnienia kompensacji mocy biernej w elektrowniach wodnych z generatorami indukcyjnymi. Zaproponowano zastąpienie tradycyjnych metod kompensacji kompensatorem aktywnym przyłączonym równolegle do generatora indukcyjnego. Przekształtnikowy kompensator zapewnia całkowitą kompensację mocy biernej pobieranej przez generator indukcyjny. Zastosowanie aktywnego kompensatora przyczyni się do redukcji kosztów ponoszonych za pobór mocy biernej przez właścicieli elektrowni wodnych i wiatrowych wyposażonych w generatory indukcyjne. Przekształtnikowy kompensator mocy biernej ma ponadto pozytywny wpływ na pracę całej sieci elektroenergetycznej, ograniczone są straty mocy od składowej biernej prądu na impedancjach podzespołów sieci elektroenergetycznej.

**Słowa kluczowe:** odnawialne źródła energii elektrycznej, moc bierna, aktywny kompensator, generator indukcyjny

**Typ artykułu:** oryginalny artykuł naukowy

**Przyjęty:** 13.05.2021; **Zrecenzowany:** 27.06.2021; **Zaakceptowany:** 28.06.2021;

Identyfikator ORCID autora: J. Tępiński – 0000-0002-5005-2795;

**Proszę cytować:** SFT Vol. 57 Issue 1, 2021, pp. 64–79, <https://doi.org/10.12845/sft.57.1.2021.5>;

Artykuł udostępniany na licencji CC BY-SA 4.0 (<https://creativecommons.org/licenses/by-sa/4.0/>).

## Introduction

Population increase, high economic growth and technological progress have all led to an increasing demand for electric energy. Currently used energy sources in the form of fossil fuels have significantly polluted the natural environment which results in climate change. Consequently, increasing the amount of energy produced from renewable sources is a must today. The issues of reducing greenhouse gas emission and increased share of renewable energy sources on the EU level have been regulated with the directive of the European Parliament and European Council 2018/2001 (RED II – promotion of energy from renewable sources) [1]. In compliance with the above mentioned act the share of renewable energy sources will have to increase by 32% by 2030. Renewable energy is the one obtained from natural processes, creating alternatives to traditional primary non-renewable energy carriers – fossil fuels. Using renewable source energy instead of the traditional one contributes to a lower negative impact of energy sector on environment, mainly thanks to lower emissions of harmful substances, especially greenhouse gas. The most popular and widespread sources of renewable energy are water, wind and solar radiation.

Most often, the simplest power generation systems with cage induction generators are used to produce electricity in small and medium-sized hydropower and wind farms [2–3]. The main reason for using induction generators, compared to synchronous ones, is easier synchronization with the power grid, greater resistance to interference from the power grid and turbines, simpler protection systems and lower prices [2]. The condition for the appearance of electromotive force at induction generator terminals is the generation of a magnetic field in the motor core, whose main source is inductive reactive power taken from the power grid. Water turbines have a relatively low rotation speed and for this reason a generator is driven by a gear box. In order to reduce the gear ratio, induction generators with low synchronous

## Wprowadzenie

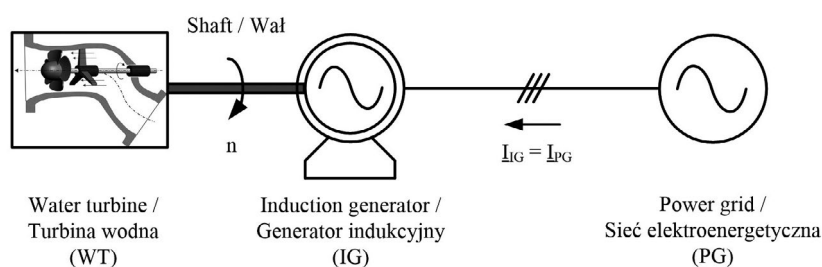
Wzrost liczby ludności, duże tempo rozwoju gospodarczego oraz postęp w zakresie tworzenia i wykorzystania nowych technologii powodują, że zapotrzebowanie na energię elektryczną cały czas rośnie. Obecnie stosowane źródła energii, w postaci paliw kopalnianych, wpływają na znaczne zanieczyszczenie środowiska, przyczyniając się do zmiany klimatu. Dlatego zwiększenie ilości energii produkowanej ze źródeł odnawialnych jest dzisiaj koniecznością. Zagadnienia ograniczenia emisji gazów cieplarnianych oraz zwiększenia udziału odnawialnych źródeł energii na poziomie Unii Europejskiej zostało uregulowane dyrektywą Parlamentu Europejskiego i Rady (UE) 2018/2001 (RED II – promowania stosowania energii ze źródeł odnawialnych) [1]. Zgodnie z zapisami powyższej dyrektywy do roku 2030 wkład odnawialnych źródeł energii w ogólnym bilansie energetycznym ma wynosić 32%. Energia odnawialna to energia uzyskiwana z naturalnych procesów przyrodniczych, stwarzająca alternatywę dla tradycyjnych pierwotnych nieodnawialnych nośników energii – paliw kopalnych. Wykorzystywanie źródeł odnawialnych w zastępstwie tradycyjnych kopalnianych źródeł energii przyczynia się do zmniejszenia szkodliwych oddziaływań energetyki na środowisko naturalne, głównie przez ograniczenie emisji szkodliwych substancji, zwłaszcza gazów cieplarnianych. Do najbardziej popularnych i – tym samym – najintensywniej wykorzystywanych odnawialnych źródeł energii należą te uzyskiwane z grawitacji wody, wiatru i promieniowania słonecznego.

Najczęściej do produkcji energii elektrycznej w małych i średnich elektrowniach wodnych oraz wiatrowych wykorzystywane są najprostsze układy wytwarzania energii z generatorami indukcyjnymi klatkowymi [2–3]. Główną przyczyną stosowania generatorów indukcyjnych, w porównaniu z synchronicznymi, jest łatwiejsza synchronizacja z siecią elektroenergetyczną, większa odporność na zakłócenia pochodzące z sieci oraz turbin, prostsze układy zabezpieczeń i niższe ceny [2]. W wyniku wytwarzania

speed (a large number of poles) [4] are used for water turbines, which entails the need for a relatively high magnetizing current (reactive current), relative to the rated current. Inductive reactive power deficit in power grid implies that this power consumption by induction generators should be interpreted as a negative feature that does not occur in the case of synchronous generators working in overexcitation (producing inductive reactive power). Power grid operators require a power factor  $tg\varphi$ , as measured at hydropower plant terminals, less than or equal to 0.4. The power factor  $tg\varphi$  (1) is determined as the ratio of reactive power  $Q$  consumed to the active power  $P$  produced by the generator. The relationship (1) is true, disregarding voltage and current distortions.

$$tg\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{U \cdot I \cdot \sin\varphi}{U \cdot I \cdot \cos\varphi} \quad (1)$$

The paper also covers passive and active reactive power compensators scrutinising their use in hydropower plants with induction generators. Still, these compensators have much wider application possibilities, practically in every place where reactive power compensation is needed (e.g. in wind farms or industrial plants). Block diagram of a hydropower plant with an induction generator (IG) connected directly to the power grid (PG) is shown in Figure 1. Reactive power consumed from the power grid by induction generator depends on the moment supplied by the water turbine (WT). The reactive power of a generator connected to the power grid may change along with the torque delivered by the turbine in the boundary, most often up to a dozen or so percent.



**Figure 1.** Block diagram of a hydropower plant with induction generator connected to the power grid  
**Rycina 1.** Schemat blokowy elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym podłączonym do sieci elektroenergetycznej

**Source:** Own elaboration.  
**Źródło:** Opracowanie własne.

On further consideration, current orientation relative to the power grid voltage was adopted. Active component of the current is understood to be the component in phase with the power grid voltage. The reactive current component is the one shifted relative to the grid voltage by 90 electrical degrees. Determination

w rzeniu silnika indukcyjnego pola magnetycznego, którego głównym źródłem jest moc bierna indukcyjna pobierana z sieci elektroenergetycznej, na zaciskach generatora pojawia się siła elektromotoryczna. Turbiny wodne cechują się stosunkowo niską prędkością wirowania i dlatego generator jest napędzany przez przekładnię podwyższającą. W celu zmniejszenia wartości przełożenia stosuje się dla turbin wodnych generatory indukcyjne z niską prędkością synchroniczną (dużą liczbą biegunów) [4], co pociąga za sobą zapotrzebowanie na stosunkowo duży – w odniesieniu do prądu znamionowego – prąd magnesowania (prąd bierny). Deficyt mocy biernej indukcyjnej w sieci decyduje o tym, że pobór tej mocy przez generatory indukcyjne należy interpretować jako negatywną cechę, która nie występuje w przypadku generatorów synchronicznych pracujących przy przewzbudzeniu (wytwarzających moc bierną indukcyjną). Operatorzy sieci elektroenergetycznej wymagają zapewnienia współczynnika mocy  $tg\varphi$ , mierzonego na zaciskach elektrowni wodnej, mniejszego bądź równego 0,4. Współczynnik mocy  $tg\varphi$  (1) rozumiany jest jako stosunek mocy biernej  $Q$  pobieranej do mocy czynnej  $P$  oddawanej przez generator. Zależność (1) jest prawdziwa przy pominięciu odkształceń napięcia i prądu.

$$tg\varphi = \frac{Q}{P} = \frac{U \cdot I \cdot \sin\varphi}{U \cdot I \cdot \cos\varphi} \quad (1)$$

W artykule omówiono pasywne i aktywne kompensatory mocy biernej na przykładzie wykorzystania ich w elektrowniach wodnych z generatorami indukcyjnymi, ale kompensatory te mają znacznie szersze możliwości zastosowania – praktycznie wszędzie tam, gdzie kompensacja mocy biernej jest potrzebna (np. w elektrowniach wiatrowych lub zakładach przemysłowych). Na rycinie 1 przedstawiono schemat blokowy elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym (IG) podłączonej bezpośrednio do sieci elektroenergetycznej (PG). Moc bierna, pobierana z sieci elektroenergetycznej przez generator indukcyjny, zależna jest od momentu dostarczonego przez turbinę wodną (WT). Moc bierna generatora podłączonego do sieci elektroenergetycznej może się zmieniać wraz ze zmianą momentu dostarczanym przez turbinę, w granicy do ok. kilkunastu procent.

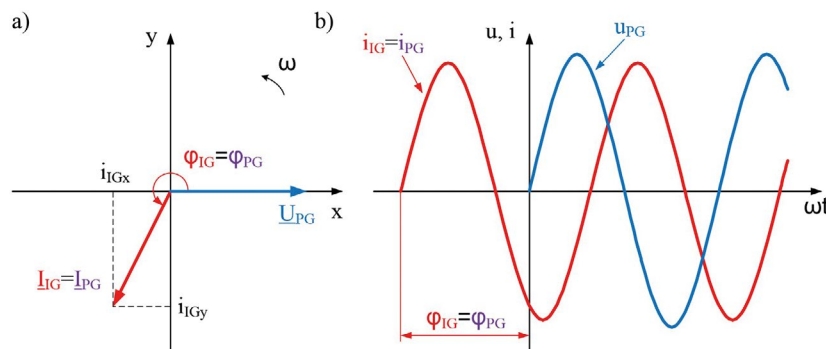
Do dalszych rozważań przyjęto orientację prądów względem napięcia sieci elektroenergetycznej. Jako składową czynną prądu należy rozumieć składową będącą w fazie z napięciem sieci. Składowa bierna prądu to składowa przesunięta względem napięcia sieci o 90 stopni elektrycznych. Wyznaczenie składowej

of the active and reactive component of current consists in the transformation of three-phase quantities into a rotating  $xy$  coordinate system (Clarke-Park transformation) [5].

Current vector  $I_{IG}$  of the generator at load state has the active component  $i_{IGx}$  supplied to the power grid and the inductive reactive component  $i_{IGy}$  taken from the power grid (see Figure 2). The increase in generator load torque makes the reactive component  $i_{IGy}$  of the stator current increase. Current vector  $I_{IG}$  of the loaded induction generator is shifted relative to the power grid voltage vector  $U_{PG}$  at an angle of  $\varphi_{IG}$ . The stator current  $I_{IG}$  of the induction machine is equal to the current vector  $I_{PG}$  of the power grid.

czynnej i biernej prądu polega na transformacji wielkości trójfazowych do wirującego układu współrzędnych  $xy$  (przekształcenie Clarke'a-Parka) [5].

Wektor przestrzenny prądu obciążonego generatora  $I_{IG}$  posiada składową czynną  $i_{IGx}$  oddawaną do sieci i indukcyjną składową bierną  $i_{IGy}$  pobieraną z sieci (zob. ryc. 2). Wzrost momentu obciążenia generatora powoduje powiększenie składowej biernej prądu stojana  $i_{IGy}$ . Wektor przestrzenny prądu obciążonego generatora  $I_{IG}$  przesunięty jest względem wektora przestrzennego napięcia sieci elektroenergetycznej  $U_{PG}$  o kąt  $\varphi_{IG}$ . Wektor przestrzenny prądu stojana maszyny indukcyjnej  $I_{IG}$  jest równy wektorowi przestrzennemu prądu sieci  $I_{PG}$ .



**Figure 2.** Currents and voltage of the loaded generator (IG): a) phasor diagram, b) time diagram:  $\varphi_{IG}$  – phase shift angle of the generator stator current relative to the grid voltage

**Rycina 2.** Prądy i napięcie obciążonego generatora (IG): a) wykres wektorowy, b) przebiegi czasowe:  $\varphi_{IG}$  – kąt przesunięcia fazowego prądu stojana generatora względem napięcia sieci

**Source:** Own elaboration.

**Źródło:** Opracowanie własne.

## Passive compensation of reactive power in hydropower plants with induction generator

Reactive power compensation consists of assembly and adjustment of reactive power consumption device appropriate for a system. In case of inductive reactive power compensation, this process involves the reduction of reactive power by increasing the production of capacitive reactive power with the same value but opposite sign. As a result, reactive power consumed and produced are balanced and the power factor  $\text{tg}\varphi$  drops to a value close to 0 (operating state at total reactive power compensation). Owners of hydropower plants with induction generators receive remuneration for active power supplied to the power grid, and pay for induction reactive power consumed. If the power factor  $\text{tg}\varphi$  on terminals of the hydropower plants is greater than required ( $\text{tg}\varphi = 0.4$ ) by power grid operators, power plant owners pay fines, which can in extreme cases lead to losses made by the power plant.

The main way of reactive power compensation in the hydropower plants is to use capacitor banks connected in parallel to the induction generator [2–3, 6]. The block diagram of a hydropower plant with an induction generator and passive capacitor compensation of reactive power is shown in Figure 3. The vector

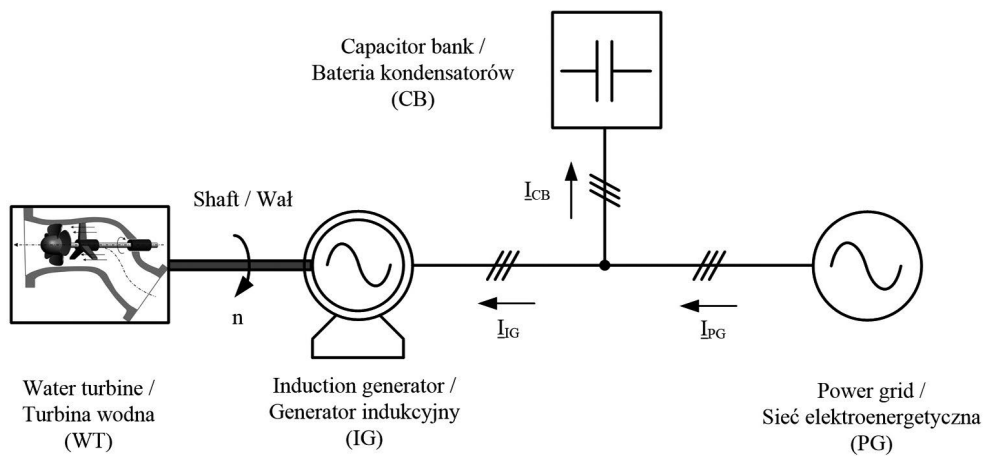
## Pasywna kompensacja mocy biernej w elektrowniach wodnych z generatorem indukcyjnym

Kompensacja mocy biernej polega na montażu i regulacji odpowiedniego do danego systemu urządzenia bilansującego pobór mocy biernej. W przypadku kompensacji mocy biernej indukcyjnej proces ten polega na redukcji mocy biernej przez zwiększenie produkcji mocy biernej pojemnościowej o takiej samej wartości, lecz przeciwnym znaku. W efekcie czego moc bierna pobrana i oddana bilansują się, a współczynnik mocy  $\text{tg}\varphi$  zmniejsza się do wartości bliskiej 0 (stan pracy przy całkowitej kompensacji mocy biernej). Właściciele elektrowni wodnych z generatorami indukcyjnymi otrzymują wynagrodzenie za dostarczaną do sieci moc czynną, a płacą za pobieraną moc bierną indukcyjną. W przypadku, gdy współczynnik mocy  $\text{tg}\varphi$  na zaciskach elektrowni wodnej jest większy niż wymagany ( $\text{tg}\varphi = 0.4$ ) przez operatorów sieci, właściciele elektrowni płacą kary pieniężne, co może w skrajnych przypadkach doprowadzić do nieopłacalności pracy elektrowni.

Najczęściej do kompensacji mocy biernej, w tym także w elektrowniach wodnych, wykorzystywane są baterie kondensatorów przyłączone równolegle do sieci elektroenergetycznej [2–3, 6]. Schemat blokowy elektrowni wodnej, z generatorem indukcyjnym

diagrams of voltages and currents of the power generation system in a hydropower plant with a capacitor bank are presented in Figure 4. The passive capacitor (CB) is the source of capacitive (leading) reactive power and receives from the power grid the current  $I_{CB}$  shifted relative to the voltage  $U_{PG}$  at an angle of  $90^\circ$  (see Figure 4). The capacitor battery current  $I_{CB}$  reduces the reactive (inductive) component of current  $i_{PGY}$  received from the power grid. The use of capacitor banks for reactive power compensation makes a change in phase shift between current  $I_{PG}$  and voltage  $U_{PG}$  from  $\varphi_{IG}$  to  $\varphi_{PG}$  (see Figure 4).

oraz pasywną kondensatorową kompensacją mocy biernej, przedstawiono na rycinie 3. Wykresy wektorowe napięć i prądów układu wytwarzania energii w elektrowni wodnej z baterią kondensatorów przedstawiono na rycinie 4. Pasywny kondensatorowy kompensator (CB) jest źródłem mocy biernej pojemnościowej i pobiera z sieci prąd  $I_{CB}$  przesunięty względem napięcia  $U_{PG}$  o kąt  $90^\circ$  (zob. ryc. 4). Prąd baterii kondensatorów  $I_{CB}$  zmniejsza składową bierną (indukcyjną) prądu pobieranego z sieci  $i_{PGY}$ . W wyniku zastosowania baterii kondensatorów, przesunięcie fazowe pomiędzy prądem  $I_{PG}$  i napięciem  $U_{PG}$  zmienia się z  $\varphi_{IG}$  do  $\varphi_{PG}$  (zob. ryc. 4).

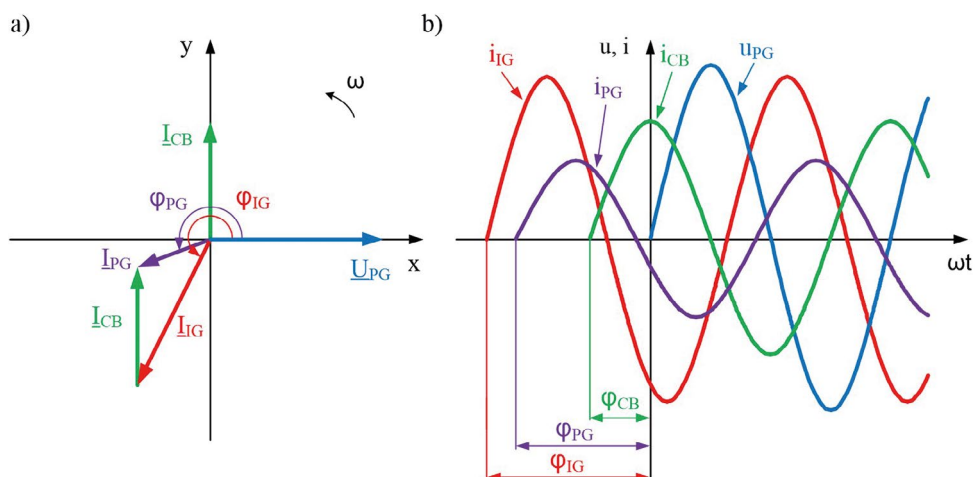


**Figure 3.** Block diagram of a hydropower plant with induction generator and passive power compensation: (CB) – capacitor bank,  $I_{CB}$  – current vector receive by the capacitor bank

**Rycina 3.** Schemat blokowy elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym oraz pasywną kompensacją mocy biernej: (CB) – bateria kondensatorów,  $I_{CB}$  – wektor przestrzenny prądu pobieranego przez baterię kondensatorów

**Source:** Own elaboration.

**Źródło:** Opracowanie własne.



**Figure 4.** Reactive power compensation using capacitor banks: a) phasor diagram, b) time diagram:  $\varphi_{CB}$  – the phase shift angle of the current consumed by the capacitor bank relative to the voltage,  $\varphi_{PG}$  – phase shift angle of the current consumed from the power grid relative to the power grid voltage

**Rycina 4.** Kompensacja mocy biernej za pomocą baterii kondensatorów: a) wykres wektorowy, b) przebiegi czasowe:  $\varphi_{CB}$  – kąt przesunięcia fazowego prądu pobieranego przez baterię kondensatorów względem napięcia,  $\varphi_{PG}$  – kąt przesunięcia fazowego prądu pobieranego z sieci względem napięcia sieci

**Source:** Own elaboration.

**Źródło:** Opracowanie własne.

When selecting capacitors for reactive power compensation, it should be remembered that they are the source of reactive power for the induction generator. Disconnection of the generator along with the capacitor battery from a power grid may cause the generator to self-excite, which is characterized by maintaining voltage at generator terminals despite its disconnection from the power grid. Capacitor banks are selected in such a way as to meet the requirement imposed by the operators of the power grid ( $tg\varphi \leq 0.4$ ), while preventing the generator from self-excitation for start-up and/or frequency protection in hydropower plants. It is a compromise that takes into account the specificity of the contactor method of switching passive compensation, the uncontrolled power of the capacitor bank and the impact on the system of transients. The use of capacitor banks is only a partial solution to the problem of reactive power compensation in hydropower plants as losses from the remaining uncompensated part of reactive power are considerable.

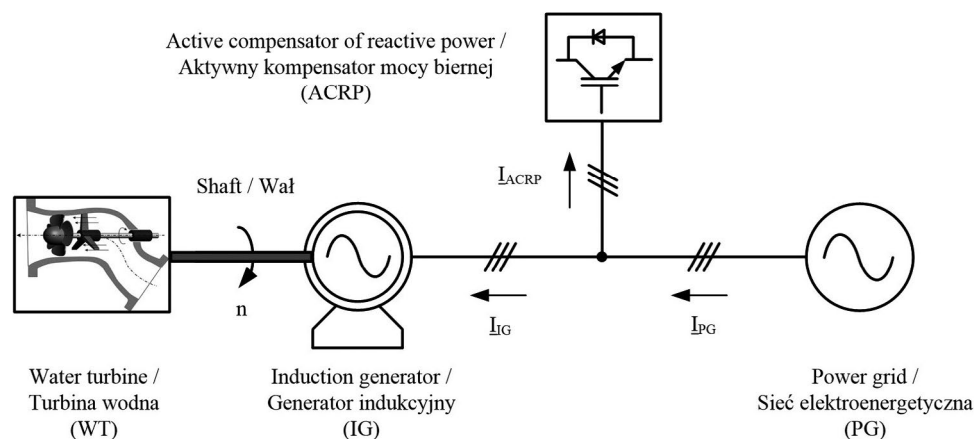
### Active compensation of reactive power in hydropower plants with induction generator

A converter compensator [2–4, 6–7] can be used to compensate for the reactive power consumed from the power grid by the induction generator. The main goal of the active compensator is to reduce the power factor  $tg\varphi$  (1) to a value close or equal to zero, which corresponds to the total reactive power compensation. Active compensator of reactive power was implemented in a parallel topology, in which the converter is connected in parallel to the induction generator and power grid (see Figure 5).

Bateria kondensatorów jest źródłem mocy biernej, która może spowodować wystąpienie tzw. zjawiska samowzbudzenia generatora indukcyjnego. Ze zjawiskiem samowzbudzenia mamy do czynienia, gdy na zaciskach generatora utrzymuje się napięcie, pomimo odłączenia generatora wraz z baterią kondensatorów od sieci elektroenergetycznej. Baterie kondensatorów dobiera się w taki sposób, by spełnić warunek narzucony przez operatorów sieci ( $tg\varphi \leq 0,4$ ), nie dopuszczając przy tym do możliwości samowzbudzenia generatora dla stosowanych w elektrowniach wodnych zabezpieczeń rozbiegowych i/lub częstotliwościowych. Jest to kompromis uwzględniający specyfikę stycznikowej metody załączania pasywnej kompensacji, niestworzoną moc baterii kondensatorów oraz oddziaływanie na układ stanów przejściowych. Stosowanie baterii kondensatorów stanowi tylko częściowe rozwiązanie problemu kompensacji mocy biernej pobieranej przez generatory indukcyjne, gdyż straty od pozostałej nieskompensowanej części mocy biernej są wydatne.

### Aktywny przekształtnikowy kompensator mocy biernej w elektrowniach wodnych z generatorem indukcyjnym

Do kompensacji mocy biernej można wykorzystać aktywny kompensator przekształtnikowy przyłączony równolegle do sieci elektroenergetycznej [2–4, 6–7]. Dzięki zastosowaniu kompensatora przekształtnikowego uzyskuje się zmniejszenie współczynnika mocy  $tg\varphi$  (1) do wartości zero, co odpowiada całkowitej kompensacji mocy biernej. Schemat blokowy układu wytwarzania energii elektrycznej elektrowni wodnej, z generatorem indukcyjnym oraz aktywnym kompensatorem, przedstawiono na rycinie 5.



**Figure 5.** Block diagram of a hydropower plant with an induction generator and active compensator of reactive power: (ACRP) – active (converter) compensator of reactive power

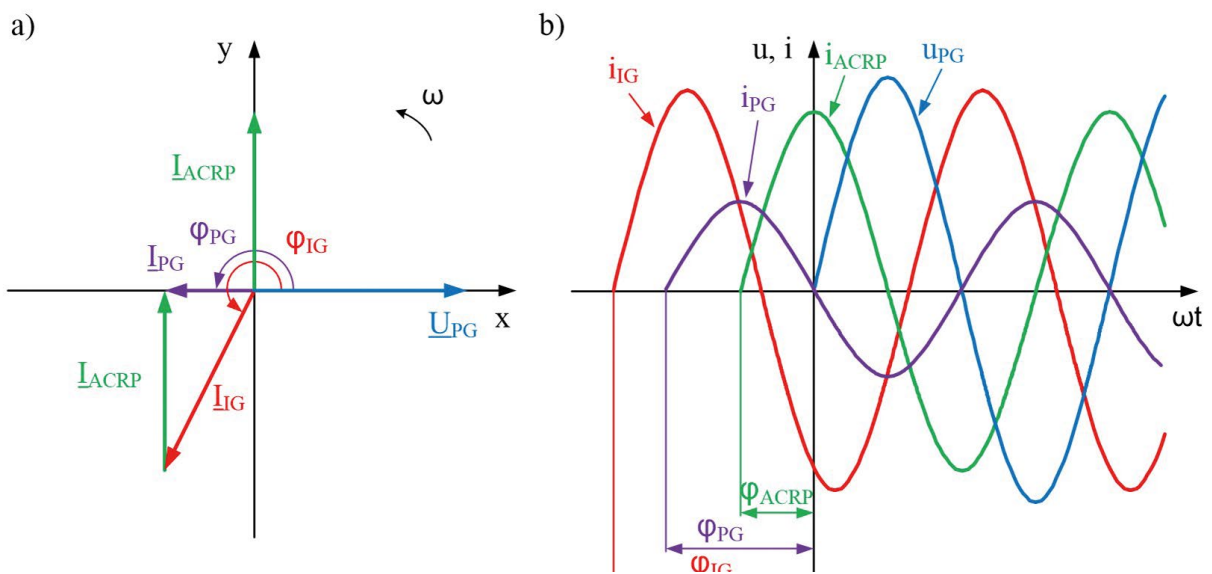
**Rycina 5.** Schemat blokowy elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym oraz aktywnym kompensatorem przekształtnikowym mocy biernej: (ACRP) – aktywny kompensator mocy biernej

**Source:** Own elaboration.

**Źródło:** Opracowanie własne.

The active compensator is designed to create and regulate power so that it is capacitive reactive power. Vector and time diagram for a hydropower plant with an induction generator and active compensation of reactive power is shown in Figure 6. The compensator current  $I_{ACRP}$  reduces the reactive (inductive) component of the current  $i_{PG}$  consumed from the power grid to a value close to or equal to zero. The use of active compensation reduces the phase shift of the current  $I_{PG}$  relative to the voltage  $U_{PG}$  from  $\varphi_{IG}$  to  $\varphi_{PG}$  equal to  $180^\circ$ . The power grid current  $I_{PG}$  has only an active component returned to the power grid, which corresponds to the total reactive power compensation. Moreover, thanks to the use of a converter compensator, the level of transients in the system can be limited [7].

Przełącznikowy kompensator wytwarza i reguluje moc bierną pojemnościową. Na rycinie 6 przedstawiono wykres wektorowy i czasowy dla elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym i aktywną kompensacją mocy biernej. Zastosowanie kompensatora przełącznikowego zapewnia całkowitą kompensację mocy biernej. Prąd kompensatora  $I_{ACRP}$  zmniejsza składową bierną (indukcyjną) prądu pobieranego z sieci  $i_{PG}$  do wartości bliskiej lub równej zero. Przesunięcie fazowe prądu  $I_{PG}$  względem napięcia  $U_{PG}$  zmniejsza się z wartości  $\varphi_{IG}$  do  $\varphi_{PG}$  równej  $180^\circ$ . Ponadto dzięki stosowaniu przełącznikowego kompensatora można ograniczyć poziom stanów przejściowych w układzie [7].



**Figure 6.** Reactive power compensation using a parallel active compensator: a) phasor diagram, b) time diagram:  $I_{ACRP}$  – current vector consumed by the active compensator,  $\varphi_{ACRP}$  – phase shift angle of the current consumed by the active compensator relative to the grid voltage

**Rycina 6.** Kompensacja mocy biernej za pomocą równoległego kompensatora aktywnego: a) wykres wektorowy, b) przebiegi czasowe:

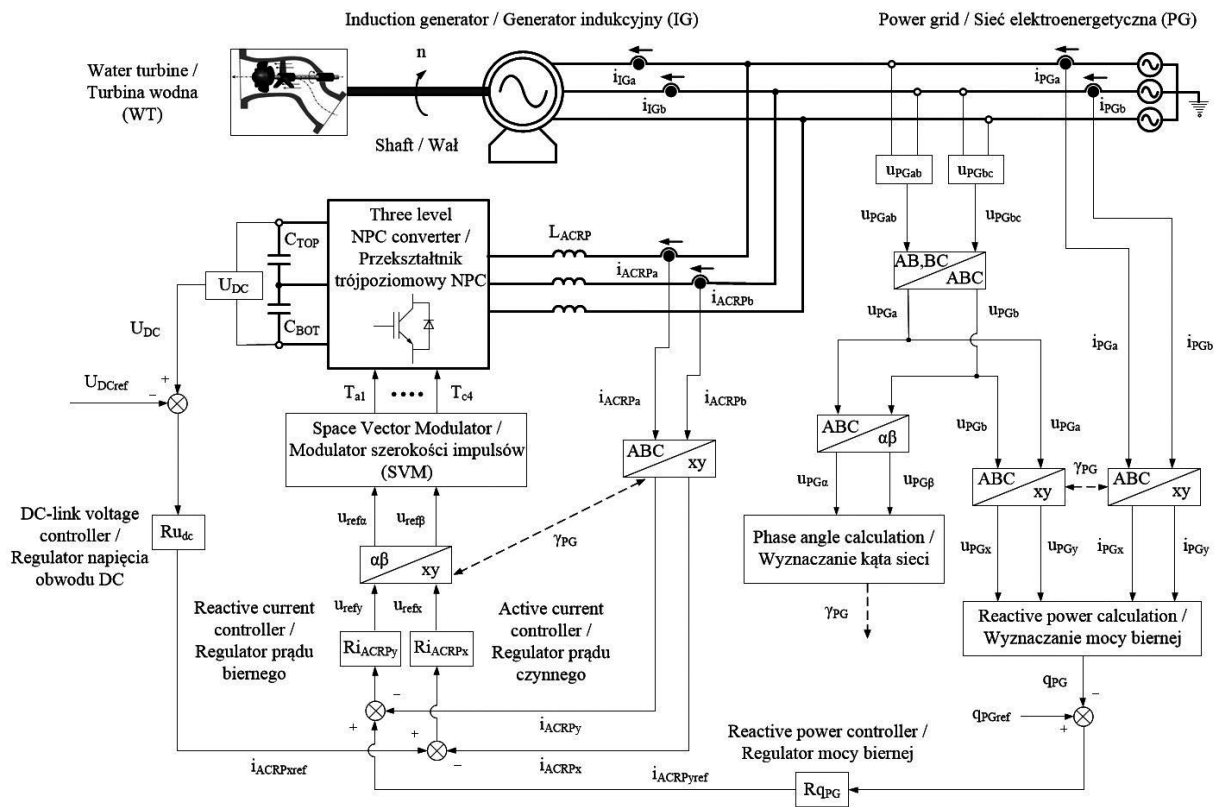
$I_{ACRP}$  – wektor przestrzenny prądu pobieranego przez aktywny kompensator,  $\varphi_{ACRP}$  – kąt przesunięcia fazowego prądu pobieranego przez aktywny kompensator względem napięcia sieci

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

In order to reduce the harmonic distortion in the compensator current, and thus the harmonics introduced into the power grid, active compensator was built as a three-level power electronic converter made in topology with Neutral Point Clamped (NPC) [8–12]. Active compensator control based on a modified voltage-oriented method (VOC) [3–4, 6, 11, 13–14] is shown in Figure 7. To transform the  $ab / xy$  and  $xy / ab$  coordinate systems in active compensator control (see Figure 7), the position angle  $\gamma_{PG}$  of the voltage vector  $U_{PG}$  is used, which is determined in accordance with the relationship (2).

W celu ograniczenia zawartości harmoniczných w prądzie kompensatora i – co za tym idzie – harmoniczných wprowadzanych do sieci elektroenergetycznej, do budowy aktywnego kompensatora wykorzystano przełącznik energoelektroniczny wykonany w topologii trójpoziomowej z diodami poziomującymi połączonymi z punktem neutralnym (NPC) [8–12]. Sterowanie aktywnym kompensatorem bazujące na zmodyfikowanej metodzie zorientowanej napięciowo (VOC) [3–4, 6, 11, 13–14] przedstawiono na rycinie 7. Do przekształcenia układów współrzędnych  $ab / xy$  i  $xy / ab$  w sterowaniu kompensatorem aktywnym (zob. ryc. 7) wykorzystywany jest kąt położenia  $\gamma_{PG}$  wektora napięcia sieci  $U_{PG}$ , który wyznacza się zgodnie z zależnością (2).



**Figure 7.** Control scheme of the active compensator of reactive power

**Rycina 7.** Układ sterowania aktywnym kompensatorem mocy biernej

**Source:** Own elaboration.

**Źródło:** Opracowanie własne.

$$\gamma_{PG} = \tan^{-1} \frac{U_{PG\beta}}{U_{PG\alpha}} \quad (2)$$

$$\gamma_{PG} = \tan^{-1} \frac{U_{PG\beta}}{U_{PG\alpha}} \quad (2)$$

The task of the first control path associated with the  $x$  axis is to adjust the compensator active power (see Figure 7). The  $x$  axis current controller ( $Ri_{ACRPx}$ ) is designed to maintain the active current  $i_{ACRPx}$  of the compensator. The current  $i_{ACRPx}$  value is maintained by the DC-link master voltage controller ( $Ru_{dc}$ ). The voltage controller  $Ru_{dc}$  in the  $x$ -axis path maintains the sum of voltages ( $U_{TOP}$ ,  $U_{BOT}$ ) on two capacitors ( $C_{TOP}$ ,  $C_{BOT}$ ) at the set  $U_{DCref}$  level [4]. The role of the second control path associated with the  $y$  axis is to regulate the reactive capacitive (leading) power generated by the converter (see Figure 7). The  $y$  axis current controller  $Ri_{ACRPy}$  maintains the reactive current  $i_{ACRPy}$  of the compensator at the output value of the master reactive power controller ( $Rq_{PG}$ ). The power controller  $Rq_{PG}$  in the  $y$  axis path is designed to maintain reactive power taken from the power grid by the power generation system at zero [4]. Reactive power is determined according to the relationship (3).

$$q_{PG} = -u_{PGx} \cdot i_{PGy} + u_{PGy} \cdot i_{PGx} \quad (3)$$

Rolą pierwszego toru regulacji związanego z osią  $x$  jest regulacja mocy czynnej kompensatora (zob. ryc. 7). Regulator ( $Ri_{ACRPx}$ ) prądu w osi  $x$  ma za zadanie utrzymać prąd czynny kompensatora  $i_{ACRPx}$ . Wartość prądu  $i_{ACRPx}$  jest zadawana przez nadrzędny regulator ( $Ru_{dc}$ ) napięcia stałego obwodu pośredniczącego. Regulator  $Ru_{dc}$  napięcia w torze osi  $x$  utrzymuje sumę napięć ( $U_{TOP}$ ,  $U_{BOT}$ ) na dwóch kondensatorach ( $C_{TOP}$ ,  $C_{BOT}$ ) na zadanym poziomie  $U_{DCref}$  [4]. Rolą drugiego toru regulacji związanego z osią  $y$  jest regulacja mocy biernej pojemnościowej wytwarzanej przez przekształtnik (zob. ryc. 7). Regulator ( $Ri_{ACRPy}$ ) prądu w osi  $y$  utrzymuje prąd bierny kompensatora  $i_{ACRPy}$  na poziomie wartości wyjściowej nadrzędnego regulatora ( $Rq_{PG}$ ) mocy. Regulator mocy w torze osi  $y$  ma za zadanie utrzymanie mocy biernej pobieranej z sieci elektroenergetycznej przez układ wytwarzania energii na poziomie zera [4]. Moc bierna wyznaczana jest zgodnie z zależnością (3).

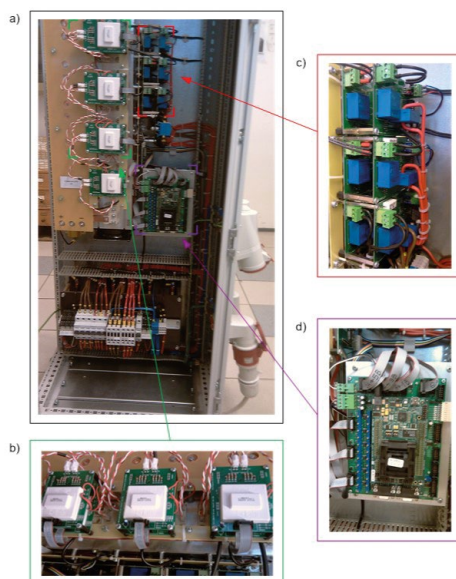
$$q_{PG} = -u_{PGx} \cdot i_{PGy} + u_{PGy} \cdot i_{PGx} \quad (3)$$



The control system of the reactive power compensator uses proportional-integral (PI) controllers. Proportional-integral controllers work with set and measured signals represented in the  $xy$  coordinate system, which rotates synchronously with angular velocity  $\omega$  of the power grid voltage. Waveforms of sinusoidal voltages and currents in the  $xy$  coordinate system are constant components. PI controllers ensure high control accuracy, because by working with fixed-value signals they eliminate control deviations in steady-state. The controllers, after comparing the reference with the measured values, generate vector components that reduce the error. The components of the voltage vector  $U_{refx}$   $U_{refy}$  after transformation into the  $\alpha\beta$  stationary coordinate system are used by the Space Vector Modulator (SVM) [10, 13–16] to calculate the switching times of the three-level converter (NPC) [8–12].

### Laboratory studies of active compensator of reactive power

The test stand with a converter reactive power compensator made in NPC three-level topology is shown in Figure 8. The list of basic components included in the test stand is given in Table 1. The structures of the power generation system and the control system proposed in publications [2–4, 6] have been modified and improved, and the research results extended, among others, to measurements of harmonic content in voltages and currents. Two cage induction motors were used for the laboratory tests. The role of water turbine is played by an induction motor SZJe-44b designed for 3x400V voltage fed from a frequency converter Twerd MFC 710, while the induction motor S1-132M designed for 3x220V voltage acts as a generator. Laboratory system measurements were made using a power analyzer Fluke 434 and an oscilloscope Tektronix TDS 3034B.



**Figure 8.** Active compensator of reactive power: a) front view, b) transistor drivers, c) LEM measuring sensors, d) microprocessor with base plate

**Rycina 8.** Przekształtnikowy kompensator mocy biernej: a) widok z przodu, b) sterowniki tranzystorów, c) czujniki pomiarowe, d) mikroprocesor wraz z płytką bazową

Source: Own elaboration.  
Źródło: Opracowanie własne.

W układzie sterowania przekształtnikowego kompensatora mocy biernej wykorzystano regulatory proporcjonalno-całkujące w układzie wirującym synchronicznie. Regulatory proporcjonalno-całkujące pracują z sygnałami zadanymi i mierzonymi reprezentowanymi w układzie współrzędnych  $xy$ , który wiruje synchronicznie z prędkością kątową  $\omega$  napięcia sieci elektroenergetycznej. Przebiegi sinusoidalnych napięć i prądów w układzie współrzędnych  $xy$  mają charakter składowych stałych. Regulatory PI po porównaniu chwilowych wartości zadanego z wartości mierzonymi generują składowe wektora, który redukuje uchyb. Składowe wektora napięcia  $U_{refx}$   $U_{refy}$  po transformacji do układu współrzędnych nieruchomych  $\alpha\beta$  wykorzystywane są przez modulator wektorów przestrzennych (SVM) [10, 13–16] do wyliczenia czasów załączeń tranzystorów trójpoziomowego przekształtnika (NPC) [8–12]. Regulatory proporcjonalno-całkujące zapewniają wysoką dokładność regulacji, gdyż pracując z sygnałami stałowartościowymi eliminują uchyb regulacji w stanach ustalonych.

### Badania laboratoryjne przekształtnikowego kompensatora mocy biernej

Przekształtnikowy kompensator mocy biernej, zbudowany do celów realizacji badań laboratoryjnych, przedstawiono na rycinie 8. Najistotniejsze parametry układu laboratoryjnego zamieszczono w tabeli 1. Struktury układu wytwarzania energii i układu sterowania, zaproponowane w publikacjach [2–4, 6], zostały zmodyfikowane i udoskonalone, a wyniki badań rozszerzone m.in. o pomiary zawartości harmonicznnych w napięciach i prądach. W trakcie badań wykorzystano zespół wirujący, w skład którego wchodziły dwie maszyny indukcyjne klatkowe. Maszyna indukcyjna SZJe-44b zaprojektowana na napięcie 3x400V, zasilana z przemiennika częstotliwości Twerd MFC 710, pełniła rolę turbiny wodnej. Rolę generatora pełniła maszyna indukcyjna S1-132M zaprojektowana na napięcie 3x220V. Wyniki badań układu laboratoryjnego zarejestrowane zostały z wykorzystaniem oscyloskopu Tektronix TDS 3034B i analizatora mocy Fluke 434.

**Table 1.** Basic parameters of the laboratory system**Tabela 1.** Podstawowe parametry układu laboratoryjnego

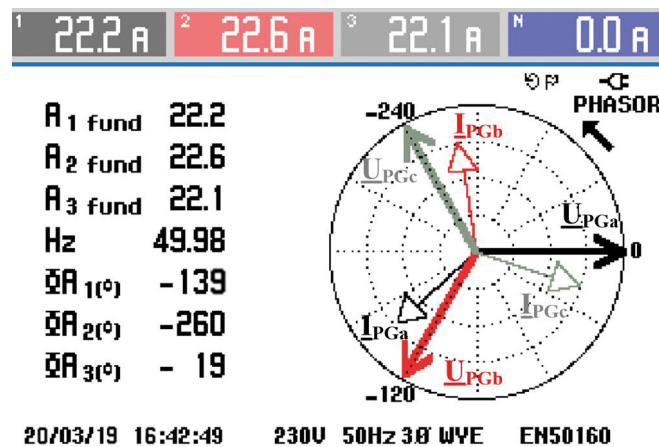
Symbol / Symbol	Value / Wartość	Name / Opis
$f_{ACRP}$	10kHz	Frequency of transistors connecting / Częstotliwość łączeń tranzystorów
$T_s$	10 <sup>-4</sup> s	Period of signal sampling and regulators calculations / Okres próbkowania sygnałów i obliczeń regulatorów
$U_{PGW}$	3x185V	Voltage wire power grid / Napięcie przewodowe sieci elektroenergetycznej
$f_{PG}$	50Hz	Frequency of the power grid / Częstotliwość sieci elektroenergetycznej
$L_{ACRP}$	2,5mH	Inductance of each of the output chokes / Indukcyjności dławików obwodu wyjściowego
$C_{TOP}, C_{BOT}$	1800μF	Capacity of each DC-link capacitor / Pojemności kondensatorów obwodu pośredniczącego

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

Using the power analyzer, laboratory system measurements were made for the case of operation without reactive power compensation (see Figure 9 and 10). The operation of the converter compensator is limited only to the initial charging of the DC-link voltage by diodes. The induction generator with apparent power 7.35kVA working in a steady state of operation produced active power at the level of 5.52 kW and consumed 4.86kVar reactive power, power factor  $tg\varphi$  was 0.88 ( $\cos\varphi = 0.75$ ). Phase shift between voltage vector  $\underline{U}_{PGa}$  and current vector  $\underline{I}_{PGa}$  is about 221 degrees (see Figure 9).

Na rycinach 9 i 10 przedstawiono wyniki pomiarów laboratoryjnego układu wytwarzania energii bez kompensacji mocy biernej. Praca aktywnego kompensatora ogranicza się jedynie do ładowania napięcia obwodu pośredniczącego przez diody zwrotne. Generator indukcyjny o mocy pozornej 7,35kVA, pracujący w stanie ustalonym, produkował moc czynną na poziomie 5,52 kW i pobierał 4,86kVar mocy biernej, współczynnik mocy  $tg\varphi$  wynosił 0,88 ( $\cos\varphi = 0,75$ ). Kąt przesunięcia fazowego pomiędzy wektorem napięcia  $\underline{U}_{PGa}$  a wektorem prądu  $\underline{I}_{PGa}$  wynosi 221 stopni (zob. ryc. 9).



**Figure 9.** Laboratory vector diagram of power grid voltages  $\underline{U}_{PG}$  and power grid currents  $\underline{I}_{PG}$  – the generation system without compensation  
**Rycina 9.** Badania laboratoryjne wektorów napięcia  $\underline{U}_{PG}$  i prądów  $\underline{I}_{PG}$  sieci – układ bez kompensacji

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

FUND		0:00:02		
	L1	L2	L3	Total
kW	- 1.80	- 1.89	- 1.83	- 5.52
kVA	2.45	2.47	2.42	7.35
kVAR	1.67	1.59	1.59	4.86
PF	-0.73	-0.76	-0.75	-0.75
Cosφ	-0.73	-0.76	-0.75	-0.75
A rms	22.5	22.8	22.3	
		L1	L2	L3
$U_{rms}$	109.2	108.5	108.9	
20/03/19 16:42:15		230V 50Hz 3Ø WYE		EN50160

Figure 10. Laboratory study of power – the generation system without compensation  
 Rycina 10. Badania laboratoryjne mocy – układ bez kompensacji

Source: Own elaboration.  
 Źródło: Opracowanie własne.

Figure 11 shows the voltage waveforms of the power grid voltage  $u_{PGa}$ , power grid current  $i_{PGa}$  and DC-link voltage  $U_{DC}$  for the case of generator operation on the power grid without reactive power compensation ( $i_{ACRPa} = 0$ ).

Na rycinie 11 przedstawiono przebiegi napięcia sieci  $u_{PGa}$ , prądu sieci  $i_{PGa}$  i napięcia  $U_{DC}$  obwodu pośredniczącego dla przypadku pracy generatora na sieć bez kompensacji mocy biernej ( $i_{ACRPa} = 0$ ).

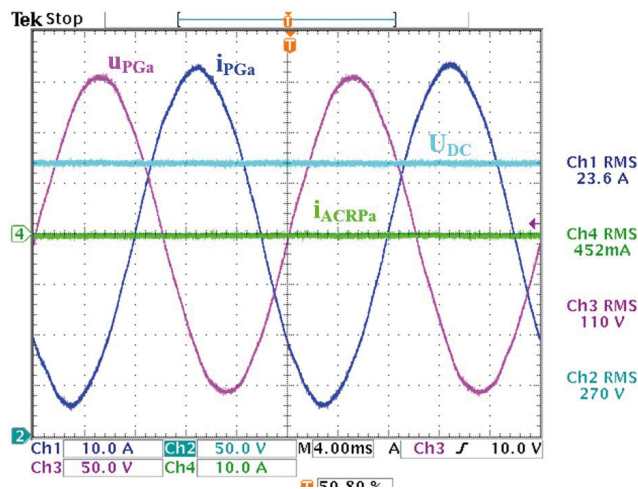


Figure 11. Laboratory study: waveforms of power grid voltage  $u_{PGa}$ , power grid current  $i_{PGa}$ , active compensator current  $i_{ACRPa}$ , DC-link voltage  $U_{DC}$  – the generation system without compensation

Rycina 11. Badania laboratoryjne:  $u_{PGa}$  – napięcie sieci,  $i_{PGa}$  – prąd pobierany z sieci,  $i_{ACRPa}$  – prąd kompensatora,  $U_{DC}$  – napięcie obwodu pośredniczącego – układ z wyłączoną aktywną kompensacją mocy

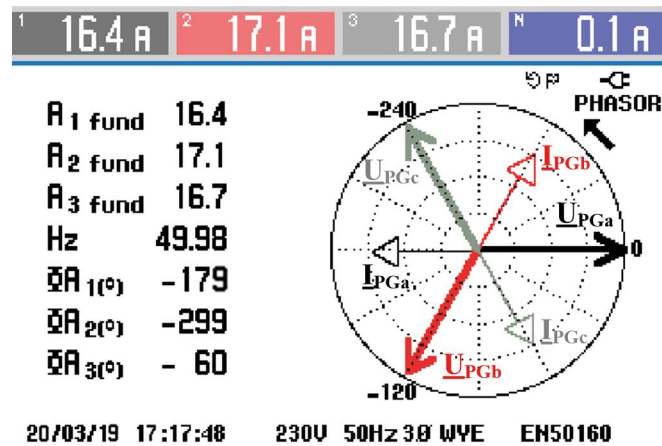
Source: Own elaboration.  
 Źródło: Opracowanie własne.

Using the power analyzer, the harmonic distortion of the power grid voltage  $u_{PGa}$  was measured. The mains voltage  $u_{PGa}$  determined by the THD analyzer amounted to 1.6% while the harmonic distortion in the current  $i_{PGa}$  of the power grid was 1.8%.

Za pomocą analizatora jakości energii dokonano pomiaru zawartości harmonicznnych w napięciu sieci  $u_{PGa}$ . Wyznaczone przez analizator THD napięcia  $u_{PGa}$  sieci wynosiło 1,6%, natomiast zawartość harmonicznnych w prądzie sieci  $i_{PGa}$  była równa 1,8%.

Figure 12 and 13 show the results of measurements (made with the power analyzer) of the laboratory system with the reactive power compensator switched on.

Na rycinach 12 i 13 przedstawiono wyniki pomiarów (wykonanych analizatorem jakości energii) układu laboratoryjnego z włączonym przekształtnikowym kompensatorem mocy biernej.



**Figure 12.** Laboratory vector diagram of power grid voltages  $U_{PG}$  and power grid currents  $I_{PG}$  – the system with active compensation  
**Rycina 12.** Badania laboratoryjne wektorów napięcia  $U_{PG}$  i prądów  $I_{PG}$  sieci – układ z włączoną aktywną kompensacją mocy

Source: Own elaboration.

Źródło: Opracowanie własne.

	FUND		0:00:01		
	L1	L2	L3	Total	
kW	- 1.81	- 1.85	- 1.84	- 5.50	
kVA	1.81	1.85	1.84	5.50	
kVAR	0.02	0.00	0.01	0.02	
PF	-1.00	-1.00	-1.00	-1.00	
cos $\varphi$	-1.00	-1.00	-1.00		
$A_{rms}$	16.3	16.9	16.6		
	L1	L2	L3		
$U_{rms}$	111.7	111.1	111.4		

20/03/19 17:17:12      230V 50Hz 3Ø WYE      EN50160

**Figure 13.** Laboratory study of power – the system with compensation

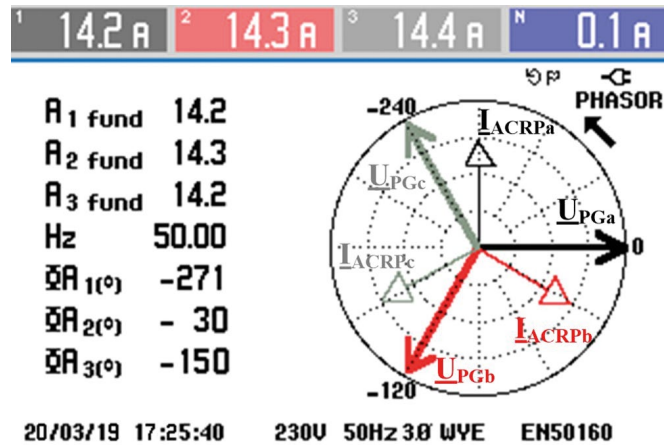
**Rycina 13.** Badania laboratoryjne mocy – układ z włączoną aktywną kompensacją mocy

Source: Own elaboration.

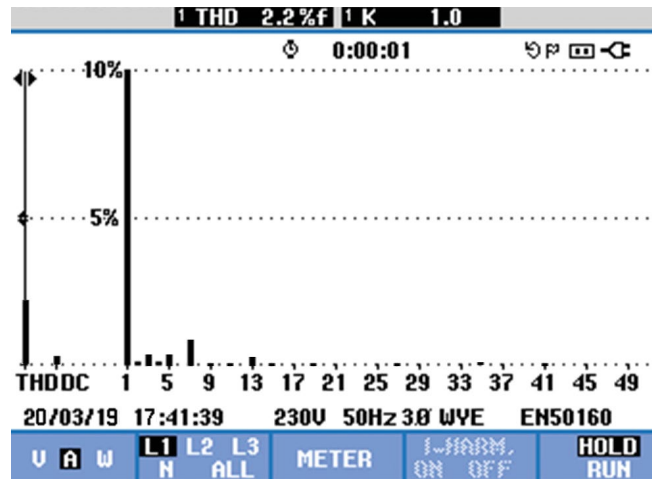
Źródło: Opracowanie własne.

The system with an active compensator turned on produced active power equal to 5.50 kW. Reactive power was compensated and amounted to 0.02 kVar of an inductive nature (see Figure 13), the power factor  $tg\varphi$  was 0 ( $\cos\varphi = 1.0$ ). The active power loss brought by the power electronic converter was 0.02 kW. Power grid voltages vector and compensator currents for the system with active power compensation on are shown in Figure 14. The converter compensator current  $i_{ACRP}$  subjected to the harmonic distortion analysis is shown in Figure 15 and 16. The harmonic distortion of the active compensator current  $i_{ACRP}$  was 2.2%. Figure 17 shows the waveforms of a power grid voltage and phase currents of the power grid and the active compensator when reactive power compensation is set on operation.

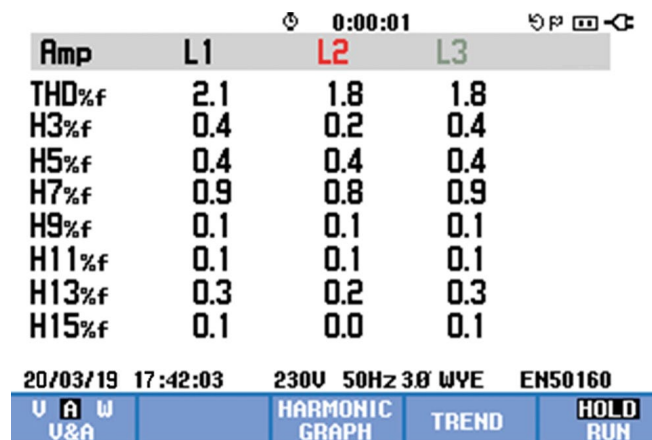
Układ wytwarzania energii z włączonym kompensatorem energoelektronicznym oddawał do sieci moc czynną równą 5,50 kW. Moc bierna została skompensowana i wynosiła 0,02 kVar o charakterze indukcyjnym (zob. ryc. 13), współczynnik mocy  $tg\varphi$  wynosił 0 ( $\cos\varphi = 1,0$ ). Strata mocy czynnej wnoszona przez przekształtnik energoelektroniczny wyniosła 0,02 kW. Wektorowe napięcia sieci i prądy kompensatora dla układu z włączoną aktywną kompensacją mocy przedstawiono na rycinie 14. Prąd przekształtnikowego kompensatora  $i_{ACRP}$  poddany analizie zawartości harmonicznnych pokazano na rycinach 15 i 16. Zawartość harmonicznnych w prądzie kompensatora aktywnego  $i_{ACRP}$  wyniosła 2,2%. Pomiar napięcia i prądów układu wytwarzania energii, z włączoną aktywną kompensacją mocy, przedstawiono na rycinie 17.



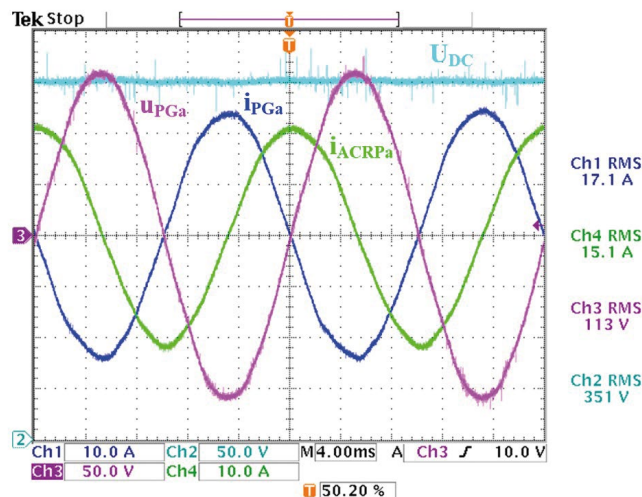
**Figure 14.** Laboratory vector diagram of power grid voltages  $U_{PG}$  and active compensator currents  $I_{ACRP}$  – the system with active compensation  
**Rycina 14.** Badania laboratoryjne wektorów napięcia  $U_{PG}$  sieci i prądów  $I_{ACRP}$  kompensatora aktywnego – układ z włączoną aktywną kompensacją mocy  
**Source:** Own elaboration.  
**Źródło:** Opracowanie własne.



**Figure 15.** Harmonic distortion in the active compensator current  $i_{ACRPa}$   
**Rycina 15.** Zawartość harmoniczných w prądzie kompensatora aktywnego  $i_{ACRPa}$   
**Source:** Own elaboration.  
**Źródło:** Opracowanie własne.



**Figure 16.** Harmonic distortion in three phases of the active compensator current ( $i_{ACRPa}$ ,  $i_{ACRPb}$ ,  $i_{ACRPc}$ )  
**Rycina 16.** Zawartość harmoniczných w trzech fazach prądu kompensatora aktywnego ( $i_{ACRPa}$ ,  $i_{ACRPb}$ ,  $i_{ACRPc}$ )  
**Source:** Own elaboration.  
**Źródło:** Opracowanie własne.



**Figure 17.** Laboratory testing: waveforms of power grid voltage  $u_{PGa}$ , power grid current  $i_{PGa}$ , active compensator current  $i_{ACRPa}$ , DC-link voltage  $U_{DC}$  – the system with compensation

**Rycina 17.** Badania laboratoryjne:  $u_{PGa}$  – napięcie sieci,  $i_{PGa}$  – prąd pobierany z sieci,  $i_{ACRPa}$  – prąd kompensatora,  $U_{DC}$  – napięcie obwodu pośredniczącego – układ z włączoną kompensacją mocy biernej

**Source:** Own elaboration.

**Źródło:** Opracowanie własne.

In case of work without compensation, the phase shift between the power grid current vector  $I_{PGa}$  and the power grid voltage vector  $U_{PGa}$  was  $221^\circ$  (see Figure 9). However, with the active compensator switched on, the phase shift between the power grid current vector  $I_{PGa}$  and the power grid voltage vector  $U_{PGa}$  decreased to  $181^\circ$  (see Figure 12). It means that the entire reactive power has been compensated by an active compensator. The harmonic distortion of the current  $i_{PGa}$  consumed from the power grid by the power generation system determined by the analyzer was 2.2%. Turning on the active compensator caused a slight increase in harmonic distortion in the power grid current  $i_{PGa}$  from 1.8% to 2.2%.

For the analyzed case, the loss of active power, contributed mainly by the power electronic converter, amounted to 20W (see Figure 10 and 13). The power losses of the capacitors for reactive power compensation are lower, around 1W / kVar. After starting the converter compensator, the power factor  $tg\phi$  decreased from 0.88 to 0, the reactive power was completely compensated. The commonly used reactive power compensation with a passive compensator (capacitor bank) to the level of  $tg\phi = 0.4$  causes that for the analyzed case the uncompensated inductive reactive power would be 2.2 kVar.

## Conclusion

The article presents the issues of reactive power compensation in hydropower plants with induction generators. Capacitor compensation is discussed and it is proposed to replace it with active compensation of reactive power controlled by a modified voltage-oriented method. The developed method of controlling the active compensator was verified by means of laboratory tests. Active compensator provides regulation, as a result of which the power generation system works with a given power factor  $tg\phi$  equal to zero. Inductive reactive power consumed by

W przypadku pracy bez kompensacji przesunięcie fazowe pomiędzy wektorem prądu sieci  $I_{PGa}$  i wektorem napięcia sieci  $U_{PGa}$  wynosiło  $221^\circ$  (zob. ryc. 9). Po włączeniu kompensatora aktywnego, przesunięcie fazowe pomiędzy wektorem prądu sieci  $I_{PGa}$  a wektorem napięcia sieci  $U_{PGa}$  zmalało do  $181^\circ$  (zob. ryc. 12), co oznacza, że cała moc bierna została skompensowana. Wyznaczona przez analizator zawartość harmonicznego prądu pobieranego z sieci  $i_{PGa}$  przez układ wytwarzania energii wynosiła 2,2%. Włączenie aktywnego kompensatora spowodowało niewielki wzrost zawartości harmonicznego prądu  $i_{PGa}$  sieci z 1,8% do 2,2%.

Dla analizowanego przypadku strata mocy czynnej, wnoszonej głównie przez przekształtnik energoelektroniczny, wyniosła 20W (zob. ryc. 10 i 13). Straty mocy kondensatorów do kompensacji mocy biernej są niższe, na poziomie ok. 1W / kVar. Po uruchomieniu kompensatora przekształtnikowego współczynnik mocy  $tg\phi$  zmalał z 0,88 do 0, moc bierna została całkowicie skompensowana. Powszechnie stosowana kompensacja mocy biernej przy pomocy kompensatora pasywnego (baterii kondensatorów) do poziomu  $tg\phi = 0,4$  powoduje, że dla analizowanego przypadku nieskompensowana moc bierna indukcyjna wyniosłaby 2,2 kVar.

## Podsumowanie

W artykule zaproponowano zastąpienie tradycyjnej pasywnej kondensatorowej metody kompensacji mocy biernej metodą kompensacji aktywnej, wykorzystującej przekształtnik energoelektroniczny sterowany zmodyfikowaną metodą zorientowaną napięciowo. Przeprowadzone badania laboratoryjne posłużyły zweryfikowaniu opracowanych metod sterowania. Aktywny przekształtnikowy kompensator mocy biernej zapewnia nadążną regulację, w rezultacie czego układ wytwarzania energii pracuje z zadany współczynnikiem mocy  $tg\phi$  równym zero. Moc bierna

the induction generator has been completely compensated. The use of an active compensator of reactive power is associated with a greater loss of active power contributed by the power electronic converter than in the case of using a capacitor bank for this purpose. The use of a converter reactive power compensator (ACRP) significantly contributed to the reduction of costs for reactive power incurred by the owners of hydropower plants. Active compensator is used not only in hydropower plants but also wherever there is a need for reactive power compensation (e.g. industrial facilities). The reactive power compensator also has a positive impact on the operation of the entire power grid, power losses from the reactive component of the current on the impedances of power grid components, such as transmission lines, transformers, etc. are limited. The use of an active compensator of reactive power is a particularly advantageous solution in case of loads that change to a large extent the nature and level of reactive power.

indukcyjna pobierana przez generator indukcyjny została całkowicie skompensowana. Zastosowanie aktywnej kompensacji mocy biernej wiąże się z większą stratą mocy czynnej, wnoszonej przez przekształtnik energoelektroniczny, niż w przypadku zastosowania do tego celu baterii kondensatorów. Przekształtnikowy kompensator mocy biernej znacząco przyczynia się do redukcji kosztów za moc bierną, jaką ponoszą właściciele elektrowni wodnych. Aktywny kompensator znajduje zastosowanie nie tylko w elektrowniach wodnych, ale także wszędzie tam, gdzie istnieje potrzeba kompensacji mocy biernej (np. w obiektach przemysłowych). Kompensator mocy biernej ma ponadto pozytywny wpływ na pracę całej sieci elektroenergetycznej, ograniczone są straty mocy od składowej biernej prądu na impedancjach podzespołów sieci elektroenergetycznej, takich jak linie przesyłowe, transformatory, itp. Stosowanie aktywnej kompensacji mocy biernej jest rozwiązaniem korzystnym szczególnie w przypadku odbiorników zmieniających w szerokim zakresie charakter i poziom mocy biernej.

## Literature / Literatura

- [1] Directive (EU) 2018/2001 of the European Parliament and of the Council of 11 December 2018 on the promotion of the use of Energy from renewable sources, Official Journal of the European Union, L328/82, 21.12.2018.
- [2] Wiśniewski J., Górski D. A., Tępiński J., Koczara W., *Power quality improvement of small hydro station*, 15th International Power Electronics and Motion Control Conference (EPE/PEMC), Serbia 2012, <https://doi.org/10.1109/EPEPEMC.2012.6397313>.
- [3] Tępiński J., Wiśniewski J., Koczara W., *Reactive Power Compensator of Hydro Induction Generator*, 7th International Conference & Exhibition on Ecological Vehicles and Renewable Energies – EVER 2012, Monaco 2012.
- [4] Tępiński J., Wiśniewski J., Koczara W., *Kompensator mocy biernej dla elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym*, „Przegląd Elektrotechniczny” 2012, 4b, 259–264.
- [5] Neacsu D. O., *Power – switching converters. Medium and high power*, Taylor & Francis, London 2006.
- [6] Tępiński J., *Aktywny kompensator mocy biernej dla elektrowni wodnej z generatorem indukcyjnym*, „Maszyny elektryczne – zeszyty problemowe” 2017, 1(113), 135–140.
- [7] Gorski D. A., Balkowiec T., Koczara W., *Grid connection of a converter controlled squirrel-cage induction generator*, 7th International Conference on Renewable Energy Research and Applications (ICRERA), 2018, 348–353, <http://dx.doi.org/10.1109/ICRERA.2018.8566730>.
- [8] Kołomyjski W., Malinowski M., Kazmierkowski M. P., *Adaptive space vector modulator for three-level NPC PWM inverter-fed induction motor*, 9th IEEE International Workshop on Advanced Motion Control, 2006, 523–528, <https://doi.org/10.1109/AMC.2006.1631714>.
- [9] Strzelecki R., Benysek G., *Power electronics in smart electrical energy networks*, Springer, London 2008.
- [10] Bose B., *Power electronics and motor drives*, Academic Press, London 2020, <https://doi.org/10.1016/B978-0-12-821360-5.01001-0>.
- [11] Rashid M. H., *Power electronics handbook*, Butterworth-Heinemann, Oxford, Cambridge, Massachusetts 2017.
- [12] Sajitha M., Ramchand R., *Space vector PWM scheme for three phase three level T-type NPC inverter*, 2nd International Conference on Intelligent Computing, Instrumentation and Control Technologies (ICICT), 2019, 523–528, <https://doi.org/10.1109/ICICT46008.2019.8993215>.
- [13] Kazmierkowski M. P., Blaabjerg F., Krishnan R., *Control in power electronics, selected problem*, Elsevier Science, Amsterdam, Boston 2002.
- [14] Malinowski M., Kazmierkowski M. P., Trzynadlowski A. M., *A Comparative study of control techniques for PWM rectifiers in AC adjustable speed drivers*, "IEEE Transactions on Power Electronics", vol. 18, 2003, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2003.818871>.
- [15] Hari M., Verma A., Halakurki R., Ravela R., Kumar P., *A dynamic analysis of SVM based three-level NPC for 3-phase induction motor*, 2018 International Conference on Power Energy, Environment and Intelligent Control (PEEIC), India 2018, <https://doi.org/10.1109/PEEIC.2018.8665611>.
- [16] Jiang W., Wang W., Ma M., Zhai F, Wang J., *Improved virtual space vector modulation for three-level neutral-point-clamped converter with feedback of neutral-point voltage*, "IEEE Transactions on Power Electronics" 2019, 4, 3996–3996, <https://doi.org/10.1109/TPEL.2017.2737030>.

**JAROSŁAW TĘPIŃSKI, PH.D. ENG.** – in 2008 graduated from the Faculty of Electrical Engineering of the Warsaw University of Technology with a specialization in Automation and Computer Engineering. In 2016, at the same faculty, he obtained a doctoral degree in technical sciences. Currently, he is an assistant professor at Centrum Naukowo-Badawcze Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowy Instytut Badawczy (CNBOP-PIB) in Józefów and a head of a research and scientific project entitled “A program for assessing the risk of accidents in industrial facilities posing a threat outside their premises”. Specialty – electrical engineering, automation and technical fire protection systems.

**DR INŻ. JAROSŁAW TĘPIŃSKI** – w 2008 r. ukończył studia o specjalności Automatyka i Inżynieria Komputerowa na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej. Na tym samym wydziale w 2016 r. uzyskał stopień naukowy doktora nauk technicznych. Obecnie jest adiunktem w Centrum Naukowo-Badawczym Ochrony Przeciwpożarowej – Państwowym Instytucie Badawczym w Józefowie oraz kierownikiem projektu badawczo-naukowego pt. „Program do oceny ryzyka wystąpienia awarii w obiektach przemysłowych stwarzających zagrożenie poza swoim terenem”. Specjalność – elektrotechnika, automatyka oraz techniczne systemy zabezpieczeń przeciwpożarowych.