

Cooperation of Hydroelectric Power Station and Wind Farm

Authors

Stanisław Gawron
Tadeusz Glinka

Keywords

hydroelectric power station, wind farm, synchronous machines, electromagnetic excitation, permanent magnet excitation

Abstract

Linking wind farm to hydroelectric power plant will raise financial income from sale of electrical energy. Hydroelectric power plant, which has been adapted to reversible operation, may act as energy storage facility for a wind farm. The idea of connecting these two renewable power sources is presented in the paper. It has been proven that synchronous machines with permanent magnet excitation are the most advantageous design for generators in wind power stations and motors/generators in reversible hydroelectric power plants.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2018202

Received: 6.06.2018

Accepted: 16.10.2018

Available online: 8.02.2019

1. Introduction

Wind and water have been used as sources of energy for many ages. Transformation of water and wind energy into electrical energy has progressed and developed in 20th century. This subject has been researched in Poland as well, this is proven by a series of papers written back in 1938 [4]. Subsequent energy crises and related increase of fuel and energy costs, environmental protection issues and EU directives on acquisition of renewable energy, have contributed to development of devices for hydro and wind power engineering. In Poland, investments in hydro and wind power engineering are still relatively low compared to other European Union countries. This is usually justified by low cost-effectiveness due to lowland character of the country, low average wind speed in Poland and prices of electrical energy obtained by coal burning.

The prices of electrical energy vary in accordance with demand. During so-called load peaks the electrical energy price is maximum. It is really an obvious statement that economic effects of hydroelectric and wind power stations should be best if energy produced by these stations were sold during load peaks. This principle has been applied for years by all pumped-storage power stations; in Poland there are several such power plants, the biggest ones are located in Żarnowiec (800 MW) and Żar Porąbka (500 MW). Energy is sold while it is produced. In wind power plants energy is produced when wind blows; therefore this principle of energy sale (during peak loads) cannot be

applied in wind farms, this wind energy cannot be and is not stored. Energy storage is present in hydroelectric power plants and pumped-storage power stations. Wind farms should be able to utilise these storage facilities. However, if such cooperation is to be executed, the hydroelectric power plant should be ready to reverse its operation, i.e. during generator operation it should produce electrical energy, while in pump mode it should pump water from the lower tank to the upper tank. In pump mode turbine generators operate as motors and are supplied from wind power station generators. In this paper we present different design variants for cooperation of wind farm with reversible hydroelectric power station.

2. Cooperation of wind farm with hydroelectric power station

Wind energy may be acquired when wind blows. However, it would be profitable to sell this energy at highest possible price. Such price could be negotiated (independently of subsidies for renewable energy), if energy might be supplied to the power grid during peak load demand. This would require storing of energy produced by wind power plants. Storage facilities might be provided by hydroelectric power stations. Two different variants of connecting wind power plant (or wind farm) to hydroelectric power plant and power grid are shown in Fig. 1 and 2. Energy storage is provided by upper reservoir of hydroelectric power plant.

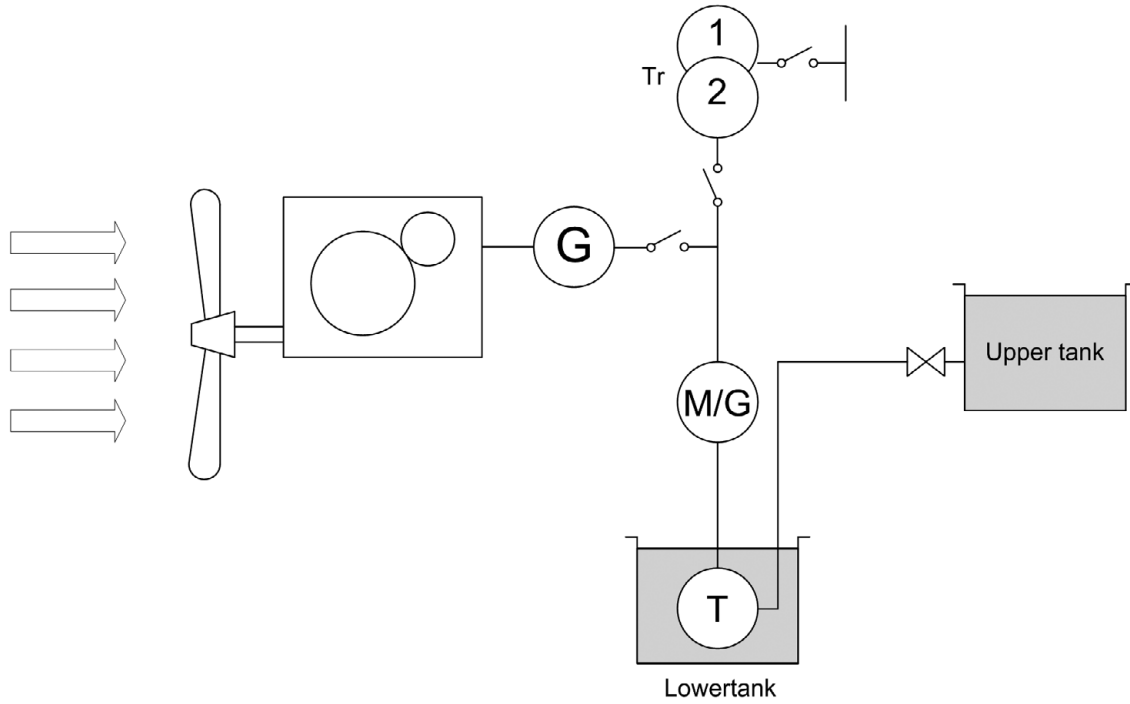


Fig. 1. Simple scheme for pumping water up from lower tank to upper tank

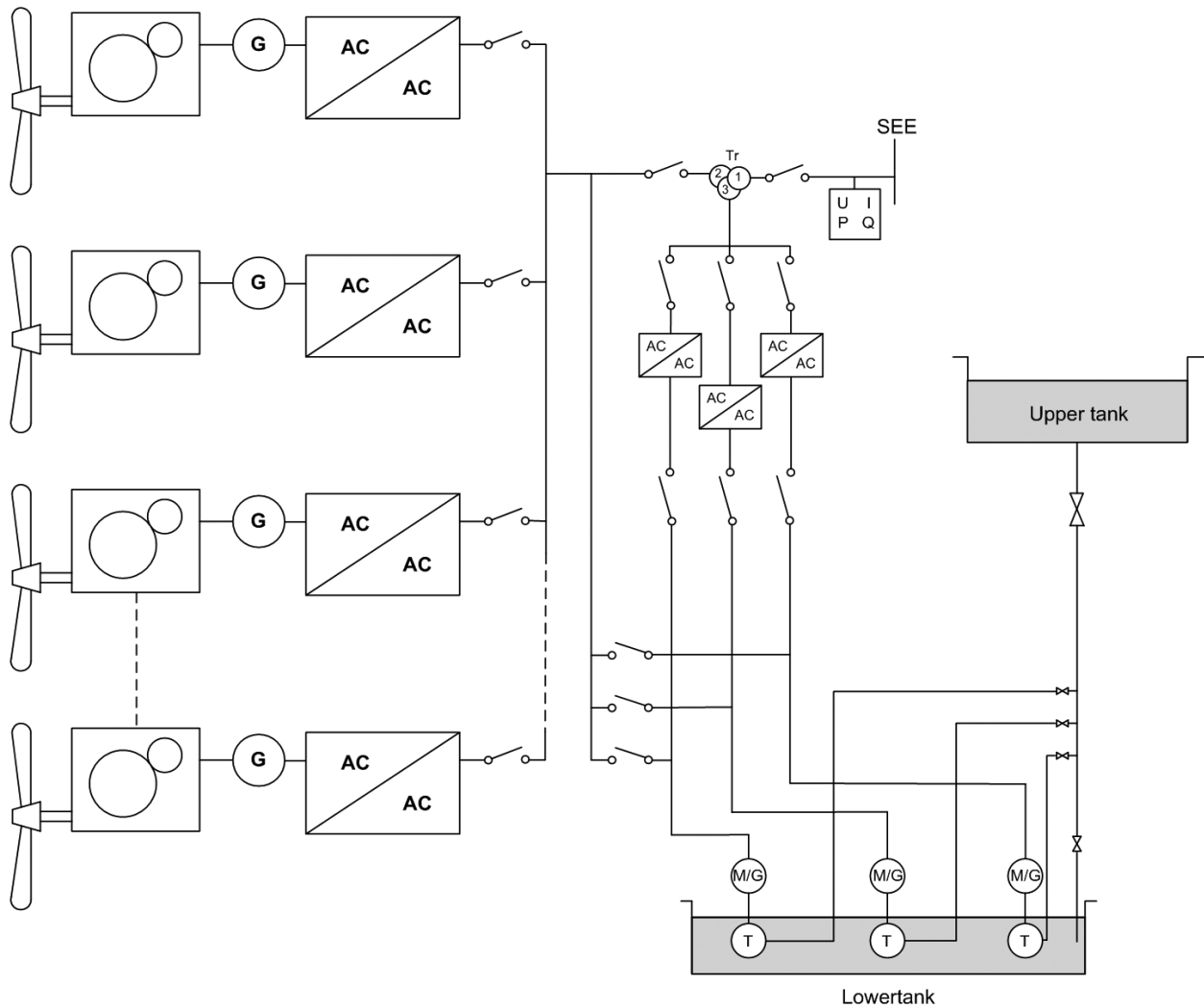


Fig. 2. Wind farm supplying a system of pumps/water turbines – connection to power grid

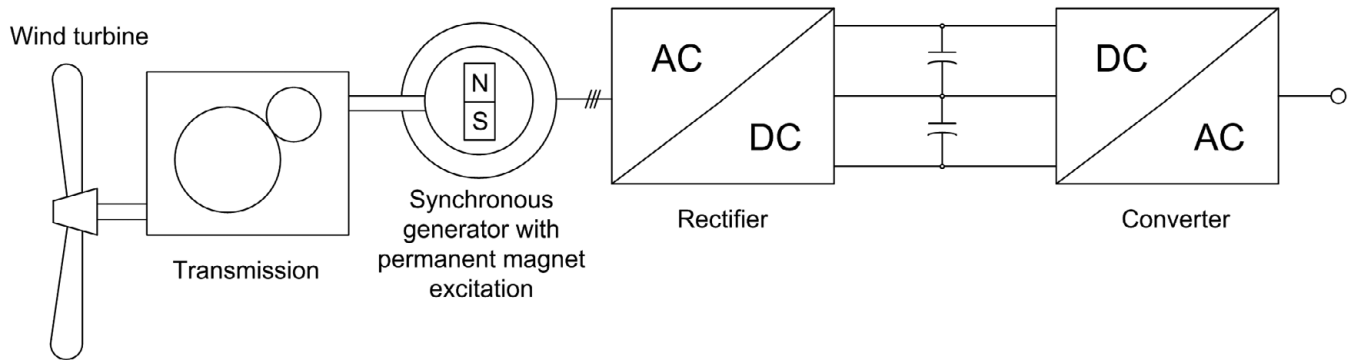


Fig. 3. Synchronous generator excited with permanent magnets and connected directly to the power grid

Scheme of simple system for pumping water between lower and upper tank is shown in Fig. 1. In this system, wind generator G supplies directly electrical machine M/G, which operates as motor driving water turbine T. Turbine T pumps water from lower to upper tank. During peak demand for electricity, hydroelectric power plant is switched over to generator operation. Turbine T changes its rotation and drives electrical machine M/G, which changes over to generator mode of operation. Then, wind power station generators G and generators of hydroelectric power station M/G must be synchronised with the power grid SEE. Depending on the power of G and M/G generators and SEE voltage, connection may be direct or via a link transformer Tr. In this circuit, wind electric power station and hydroelectric power station output power to SEE grid.

The second variant is shown in Fig. 2. An important element of this design is a three-winding transformer Tr. Power grid SEE is connected to transformer's winding "1". Wind farm generators (G) are connected to winding "2" via AC/AC inverters. Winding "3" of Tr transformer is connected to M/G machines of hydroelectric power plant. Measurement circuit for: voltage U , current I , active power P and power factor $\cos\varphi$ is located at the output terminals of transformer's primary winding. Depending on the power demand in the power grid SEE, wind farm energy acquired by generators G may be transferred to power grid SEE or directed to M/G motors driving water turbines T, which in turn pump water to the upper tank.

3. Electrical machines recommended for hydro and wind power plants

Hydropower set (M/G + T) of hydroelectric power plant must be capable of reversible operation, i.e. it should be able to work as a generator or a pump. The changeover of operation mode is usually achieved by reversing turbine rotation. In generator mode, water turbine T drives electrical machine M/G operating as generator and producing electrical energy. In pump mode, M/G electrical machine operates as a motor, driving turbine T, which pumps water from lower tank to upper tank. Different types of electrical machines may be applied to operation as M/G components of the set. At present either induction machines (cage squirrel or slip-ring) or synchronous machines (with electromagnetic or PM excitation) are used. Electrical machines

installed in hydroelectric power plant or wind plant must fulfil two conditions: they must be capable of reversible operation (opposite direction of rotation) and must be fitted with excitation. The first condition is easy to fulfil in any kind of electrical machine, since it is determined by ventilation system, and – more precisely – type of fan used. Excitation of machines poses a greater problem. In induction machines excitation is achieved by reactive power. When machine cooperates with power grid, this grid provides reactive power. During standalone operation machine must be excited with a capacitor bank. In synchronous machines excitation may be either electromagnetic (standard) or provided by permanent magnets (PM). On this account our discussion will focus on use of synchronous machines (generators G in wind power plants and motors/generators M/G in hydroelectric power plants). Efficiency of synchronous machines is higher by several percent than that of induction machines. We shall consider four machine variants:

- Synchronous machine excited with permanent magnets (Fig. 3)
- Synchronous machine excited with permanent magnets and connected to the power grid via AC/AC inverter (Fig. 4)
- Synchronous machine with electromagnetic excitation connected directly to the power grid (Fig. 5)
- Synchronous machine with electromagnetic excitation connected to the power grid via AC/AC inverter (Fig. 6).

Selection of the design variant determines the profitability of the project, i.e. construction of hybrid wind-hydroelectric power plant.

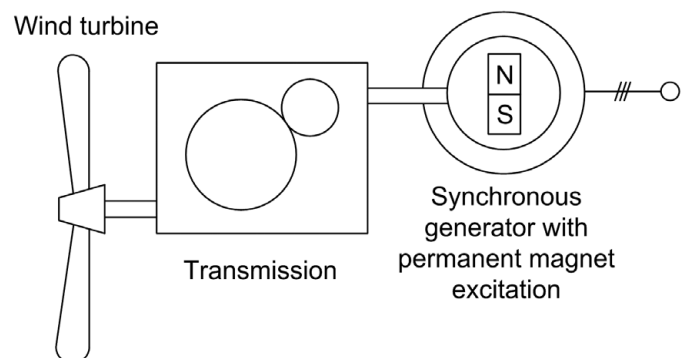


Fig. 4. Synchronous generator excited with permanent magnets and connected to the power grid via AC/AC converter

Synchronous generator with electromagnetic excitation (Fig. 5) is a standard in thermal power stations and high power pumped-storage power stations. It is not recommended in case of wind generators, since it does not allow for maximum usage of turbine energy. Maximum utilisation of turbine energy, when wind speed is variable, requires rotational speed control. Adaptation of generator output frequency to power grid frequency calls for application of AC/AC inverter (Fig. 6). This is a one-way inverter and its nominal power should be about 50% higher than generator’s nominal power. Synchronous generator with electromagnetic excitation is characterized by excitation system (composed of winding together with brushes and rings. The latter elements require overhauling and periodical replacement). That is why in small power wind and hydroelectric stations PM synchronous generators are preferred [5] (cf. Fig. 3 and 4). They are distinguished by significant advantages in relation to generators with electromagnetic excitation: excitation circuit is absent, there are no brushes and rings, machine size is less (for identical nominal power) and efficiency is higher. AC/AC inverter is identical to the one shown in Fig.6. Another alternative is a generator with hybrid excitation [6, 7], i.e. permanent magnets and additional winding, similar to that present in generators with electromagnetic excitation. This generator design is an intermediate solution between generator with electromagnetic excitation and generator with permanent magnet excitation.

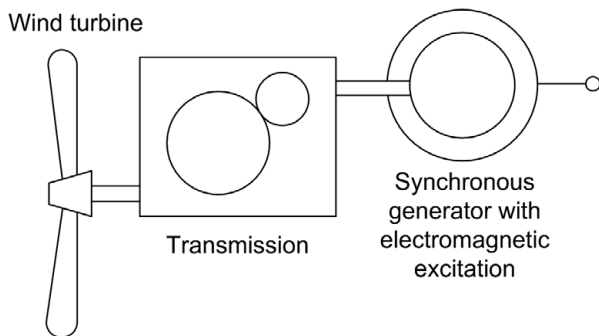


Fig. 5. Synchronous generator with electromagnetic excitation connected directly to the power grid

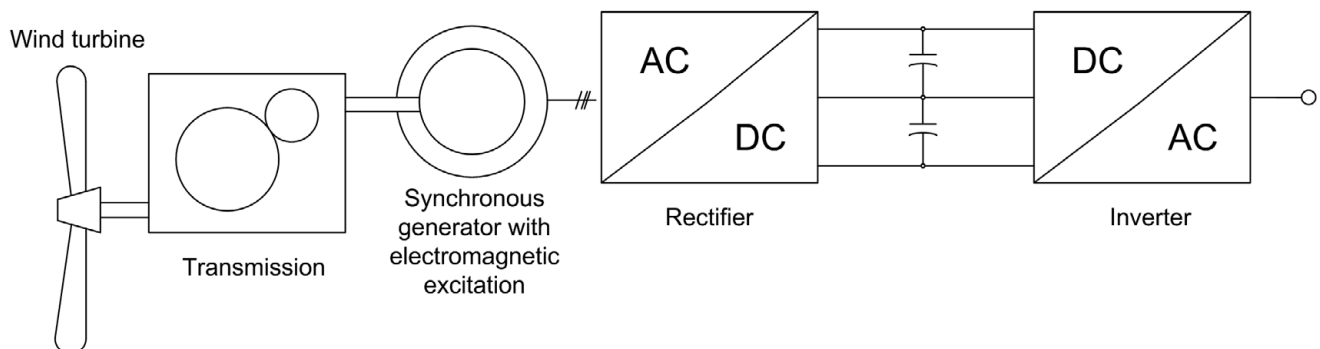


Fig. 6. Synchronous generator with electromagnetic excitation connected to the power grid via AC/AC inverter

Scheme as in Fig.	Investment cost	Energy obtained	Service and maintenance	Reliability	Total points
3	1	3	1	1	6
4	3	1	3	2	9
5	2	4	2	3	11
6	4	2	4	4	14

Tab. 1. Comparison of power generating systems with synchronous machines, as shown in Fig. 3 to Fig. 6

Systems shown in Fig. 3–6 may be ranged by taking their pros and cons into account. The main advantage is amount of energy obtained (and transmitted to the power grid) during one year, the other factors are investment cost, maintenance cost and reliability. Different systems are displayed in Tab. 1; each feature is marked with points: from 1 point (marking maximum positive value) to 4 points (corresponding to least positive value). This classification shows that design presented in Fig. 3 is the leader, second place is awarded to design shown in Fig. 4 follows. Last place is occupied by design shown in Fig. 6, i.e. system configuration most common nowadays in wind and hydro power engineering. Selection of power transformation circuit should of course be determined by income and cost criteria; however, this depends to a large extent on location of wind power station and related water and wind conditions. Balance of costs is possible, if income from sold electrical energy, investment and service costs are correctly calculated. These costs may be verified by processing data from existing and operating hydroelectric power plants and wind power plants. Mostly, these are service costs (maintenance, repair) and costs of energy unsold due to failures. The cost analysis obtained from several installations might be averaged and then profitability of each design might be evaluated.

4. Conclusions

This paper should be treated as our voice in the debate on possibilities of cooperation between wind farms and hydroelectric power plants and construction of small hybrid power plants. Wind farm should be located closed to hydroelectric power plant, e.g. at the edge of upper water reservoir.

Profitable design of wind power plants, taking into account criteria of reliability, noise level, power efficiency and service costs, will be obtained if single-reduction mechanical gear is used, and synchronous generator G is excited with permanent magnets and cooperates with inverter (see Fig. 4).

In case of hydroelectric power plant it is advantageous to use M/G synchronous machine with permanent magnets. In motor mode, M/G machine may be directly connected to generator G. In generator mode, machines M/G and G may be either directly connected to the power grid or inverters plus transformer may be used.

REFERENCES

1. Gajer M., "Analiza możliwości współpracy elektrowni wiatrowej z elektrownią szczytowo-pompową", *Wiadomości Elektrotechniczne*, No. 8/2010.
2. Glinka T., Glinka M., "Warianty rozwiązania elektrowni wiatrowej", *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 1b/2012, pp. 239–244.
3. Glinka T., Budzyński Z., "Generatory w elektrowniach wiatrowych Europy", *Wiadomości Elektrotechniczne*, No. 4/2002.
4. Jaros P., "Silniki wietrzne oraz ich zastosowanie do wytwarzania energii elektrycznej", series of articles, *Wiadomości Elektrotechniczne*, No. 1, 3, 4–5, 8–9, 11–12/1938.
5. Gawron S., "Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania", *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, No. 1/2016 (109), pp. 1–10.
6. Gawron S., "Metody stabilizacji napięcia wyjściowego w prądnicach z magnesami trwałymi", *Przegląd Elektrotechniczny*, No. 12/2014, pp. 299–304.
7. Gawron S., Bernatt J., Dukalski P., "Modelowanie 3D prądnicy ze wz-budzeniem hybrydowym", *Maszyny Elektryczne – Zeszyty Problemowe*, No. 3/2011 (91).

Stanisław Gawron

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

e-mail: s.gawron@komel.katowice.pl

He graduated from the Silesian University of Technology in Gliwice, Faculty of Electrical Engineering. In 2013 he graduated from Silesian University of Technology in Gliwice with PhD degree in Electrical Engineering. He has worked at the Research And Development Centre of Electric Machines KOMEL (Poland) since 2004, occupying the position of the constructor, and since 2006 position of the Manager of AC Machines Design Department. In research works he deals for permanent magnets machines and special construction of electric motors. Author or co-author of over 55 scientific publications and author or co-author of over 10 patents.

Tadeusz Glinka

Instytut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

e-mail: Tadeusz.Glinka@polsl.pl

He graduated from the Silesian University of Technology in Gliwice, Faculty of Electrical Engineering in 1961. Since 1961 he has been working at the Silesian University of Technology in Gliwice where he is currently a Professor. Since 1996 he has been working at the Research and Development Centre of Electric Machines KOMEL where he is the Chairman of Scientific Board since 1994. Currently his research works is focused on rotating electric machines and electric traction. Author or co-author of over 350 scientific publications and author or co-author of over 50 patents.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 22-26. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Współpraca elektrowni wodnej z farmą wiatrową

Autorzy

Stanisław Gawron
Tadeusz Glinka

Słowa kluczowe

elektrownia wodna, farma wiatrowa, maszyny synchroniczne, wzbudzenie elektromagnetyczne, wzbudzenie magnesami trwałymi

Streszczenie

Połączenie farmy elektrowni wiatrowych z elektrownią wodną podwyższy efekty finansowe uzyskane ze sprzedaży energii elektrycznej. Elektrownia wodna, przystosowana do pracy odwracalnej, może spełniać funkcję magazynu energii dla farmy elektrowni wiatrowych. W referacie przedstawiono koncepcję takiego połączenia tych dwóch odnawialnych źródeł energii elektrycznej. Wykazano, że maszyny synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi stanowią najkorzystniejsze rozwiązanie jako prądnice w elektrowniach wiatrowych, a także jako silniki/prądnice w elektrowniach wodnych odwracalnych.

Data wpływu do redakcji: 6.06.2018

Data akceptacji artykułu: 16.10.2018

Data publikacji online: 8.02.2019

1. Wstęp

Energia wody i energia wiatru od wieków były pozyskiwane i wykorzystywane przez ludzi. Przetwarzanie energii wody i energii wiatru na energię elektryczną rozwinęło się w wieku XX. Tematem tym zajmowano się także w Polsce, co potwierdza cykl artykułów z 1938 roku [4]. Kolejne kryzysy energetyczne i związane z nimi: wzrost ceny paliw i energii, ochrona środowiska i dyrektywy Unii Europejskiej dotyczące pozyskiwania energii odnawialnej przyczyniły się do rozwoju urządzeń służących pozyskiwaniu energii wodnej i wiatrowej oraz przetwarzaniu jej na energię elektryczną. W Polsce inwestycje w energetyce wodnej i wiatrowej są ciągle niewielkie w porównaniu z inwestycjami w innych krajach Unii Europejskiej, co jest uzasadniane małą opłacalnością wynikającą z nizinnego położenia i małej średniej prędkości wiatru na obszarze Polski oraz cen energii elektrycznej pozyskiwanej ze spalania węgla.

Ceny energii elektrycznej kształtują się zależnie od zapotrzebowania. W tak zwanych szczytach obciążenia cena energii elektrycznej jest największa. Truizmem jest zatem stwierdzenie, że efekty ekonomiczne eksploatacji elektrowni wodnych i wiatrowych będą najwyższe, gdy energia wytwarzana przez te elektrownie będzie sprzedawana w szczytach obciążenia. Tę zasadę od lat wykorzystują wszystkie elektrownie szczytowo-pompowe, których w Polsce jest kilka, a największe z nich to elektrownie: Żarnowiec (800 MW) i Żar Porąbka (500 MW). Energię sprzedaje się w czasie jej wytwarzania. W elektrowniach wiatrowych energię wytwarza się, gdy wieje wiatr, zatem tej zasady sprzedaży energii w szczytach obciążenia nie można wykorzystać na farmach wiatrowych, gdyż elektrownie wiatrowe produkują energię czerpaną z wiatru i jej nie magazynują. Magazynami energii dysponują elektrownie wodne i szczytowo-pompowe. Z tych magazynów powinny korzystać farmy wiatrowe. Aby ten wariant współpracy realizować, elektrownia

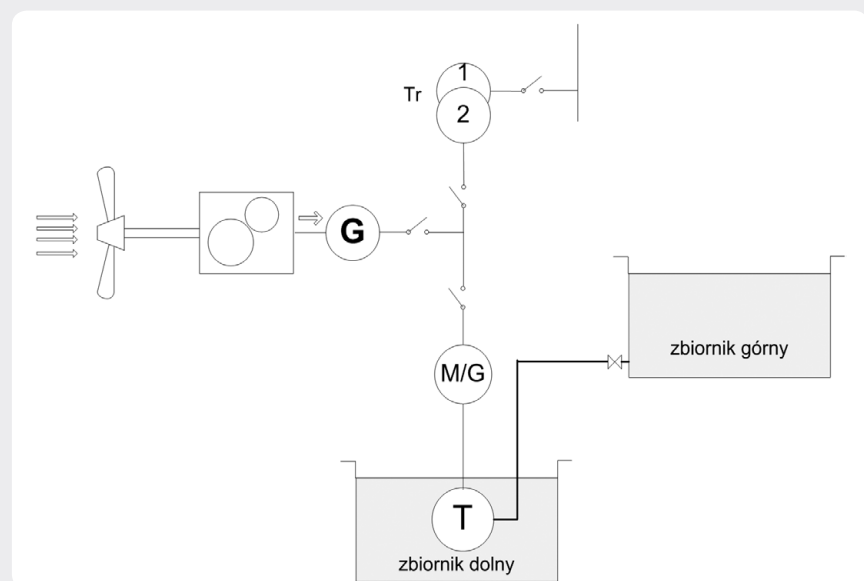
wodna powinna być przygotowana do pracy w trybie odwracalnym, to znaczy w trybie pracy generatorowej wytwarzać energię elektryczną, a w trybie pracy pompowej tłoczyć wodę z dolnego zbiornika do zbiornika górnego. W trybie pracy pompowej generatory turbinowe pracują jako silniki i są zasilane z generatorów elektrowni wiatrowych. W artykule przedstawiono warianty rozwiązania współpracy farmy wiatrowej z elektrownią wodną odwracalną.

2. Współpraca farmy wiatrowej z elektrownią wodną

Energię wiatru pozyskuje się, gdy wieje wiatr, korzystniej byłoby sprzedawać tę energię w momencie, gdy cena za nią jest najwyższa. Wydaje się, że cenę taką można wynegocjować (niezależnie od dopłat za energię odnawialną), gdy energia ta będzie

dostarczana do systemu elektroenergetycznego w okresie zapotrzebowania szczytowego. Wymaga to magazynowania energii wytwarzanej przez elektrownie wiatrowe. Magazynem energii dla farm wiatrowych mogą być elektrownie wodne. Na rys. 1 i 2 przedstawiono dwa wariantowe rozwiązania połączenia elektrowni wiatrowej bądź farmy wiatrowej z elektrownią wodną i z siecią elektroenergetyczną. Magazynem energii jest zbiornik górny elektrowni wodnej.

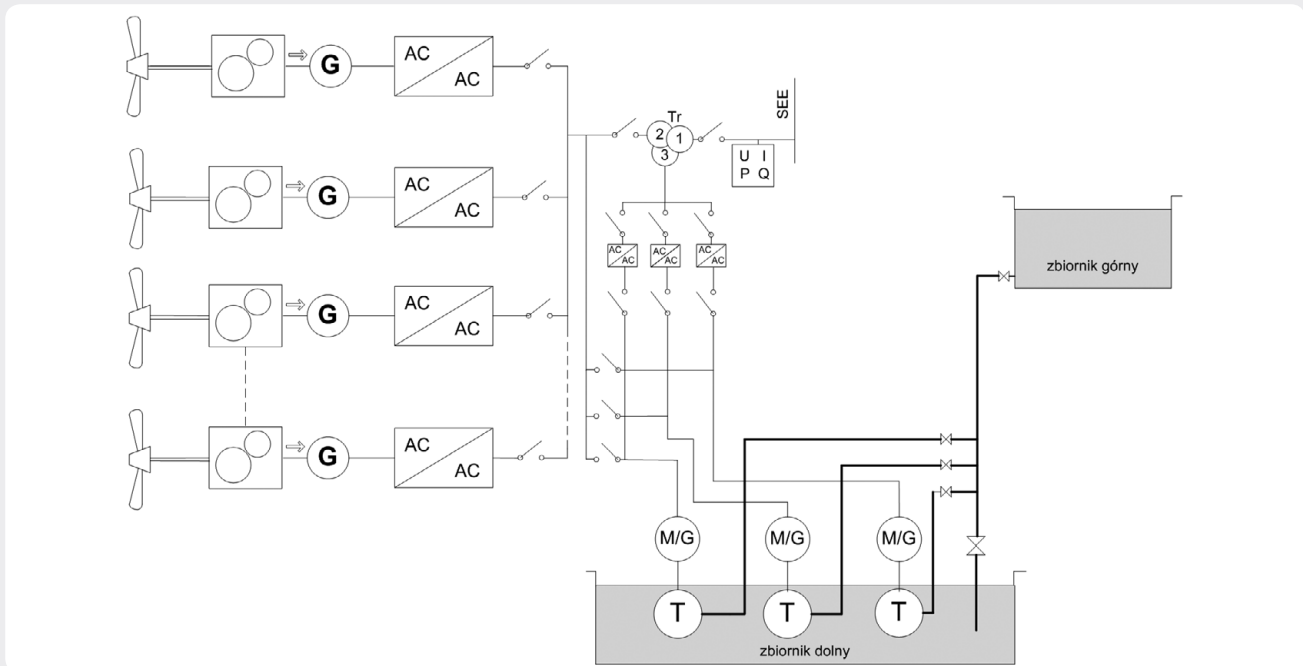
Na rys. 1 przedstawiono schemat prostego układu przepompowywania wody między zbiornikami dolnym i górnym. W układzie tym prądnica wiatrowa G bezpośrednio zasila maszynę elektryczną M/G, która pracuje jako silnik i napędza turbinę T. Turbina T tłoczy wodę ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego. W czasie zapotrzebowania szczytowego na energię elektryczną



Rys. 1. Schemat prostego układu przepompowywania wody ze zbiornika dolnego do górnego

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 22-26. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 2. Farma wiatrowa zasila układ pomp/turbin wodnych w połączeniu z siecią elektroenergetyczną

przełącza się elektrownię wodną do pracy generatorowej. Turbina T zmienia kierunek wirowania i napędza maszynę elektryczną M/G, która przechodzi do pracy prądnicowej. Następnie synchronizuje się prądnice elektrowni wiatrowej G i prądnice elektrowni wodnej M/G z siecią elektroenergetyczną SEE. W zależności od mocy prądnic G i MG oraz napięcia sieci SEE połączenie może być bezpośrednie bądź poprzez transformator Tr. W tym układzie połączenia elektrownia wiatrowa i wodna pracują na sieć elektroenergetyczną SEE.

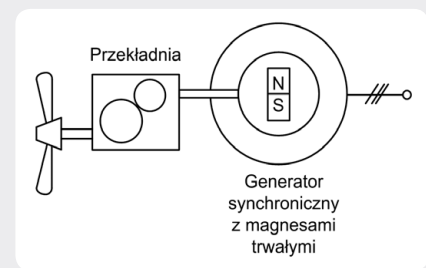
Drugie wariantowe rozwiązanie jest przedstawione na rys. 2. Istotnym elementem tego rozwiązania jest transformator Tr 3-uzwojeniowy. Sieć elektroenergetyczna SEE jest połączona z uzwojeniem „1” transformatora Tr. Z uzwojeniem „2” transformatora Tr są połączone, poprzez falowniki AC/AC, generatory G farmy wiatrowej. Uzwojenie „3” transformatora Tr jest połączone z maszynami M/G elektrowni wodnej. Wzrost napięcia na wyjściu uzwojenia pierwotnego transformatora Tr. W zależności od zapotrzebowania na moc w systemie elektroenergetycznym SEE, energia farmy wiatrowej, pozyskiwana przez prądnice G, może być przekazywana do sieci SEE bądź kierowana na silniki M/G, które napędzają turbiny T tłoczące wodę do zbiornika górnego.

3. Maszyny elektryczne preferowane do elektrowni wodnych i wiatrowych
Hydrozespół (M/G + T) elektrowni wodnej musi pracować w systemie odwracalnym, czyli jako generator i jako pompa. Realizuje się to najczęściej poprzez zmianę kierunku wirowania turbiny. Przy pracy generatorowej turbina T wodna napędza maszynę elektryczną M/G pracującą jako prądnica, która wytwarza energię elektryczną. Przy pracy pompowej maszyna elektryczna M/G

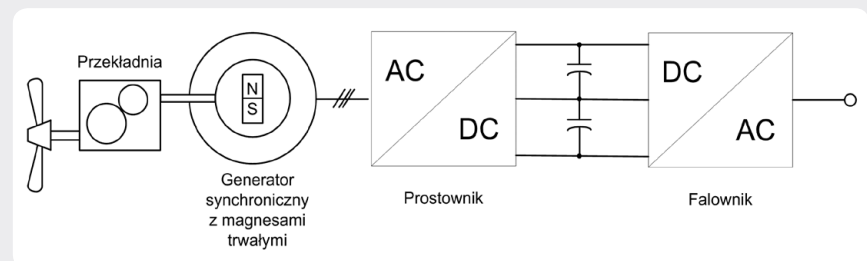
pracuje jako silnik i napędza turbinę T, która tłoczy wodę ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego. Jako maszyny elektryczne M/G można zastosować różne rodzaje maszyn. Obecnie stosowane są maszyny indukcyjne (klatkowe lub pierścieniowe) bądź maszyny synchroniczne (wzbudzone elektromagnetyczne bądź magnesami trwałymi). Maszyny elektryczne instalowane w elektrowni wodnej i wiatrowej muszą spełniać dwa warunki: mieć możliwość pracy w dwóch kierunkach wirowania i być wzbudzone. Pierwszy warunek jest łatwy do spełnienia w każdym rodzaju maszyny elektrycznej, gdyż determinuje go układ wentylacyjny, a ściślej rodzaj wentylatora. W maszynach indukcyjnych wzbudzenie jest realizowane poprzez moc bierną. Przy pracy maszyny na SEE moc bierna jest dostarczana z SEE. Przy pracy indywidualnej maszynę należy wzbudzać baterią kondensatorów. W maszynach synchronicznych wzbudzenie jest standardowe elektromagnetyczne bądź magnesami trwałymi. Z tego też względu skupimy się na wykorzystaniu maszyn synchronicznych i to zarówno jako prądnice G w elektrowniach wiatrowych, jak i silników/prądnice

M/G w elektrowniach wodnych. Maszyny synchroniczne mają także o kilka procent wyższą sprawność od maszyn indukcyjnych. Rozpatrzmy cztery warianty maszyn:

- maszyna synchroniczna wzbudzana magnesami trwałymi – rys. 3
- maszyna synchroniczna wzbudzana magnesami trwałymi połączona z SEE poprzez falownik AC/AC – rys. 4
- maszyna synchroniczna ze wzbudzeniem elektromagnetycznym połączona bezpośrednio z siecią elektroenergetyczną – rys. 5



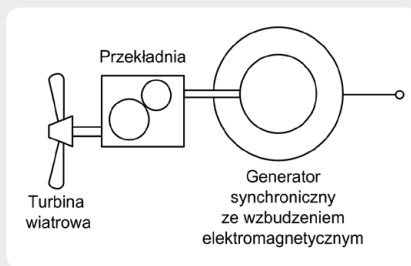
Rys. 3. Prądnica synchroniczna wzbudzana magnesami trwałymi połączona bezpośrednio z SEE



Rys. 4. Prądnica synchroniczna wzbudzana magnesami trwałymi połączona z SEE poprzez falownik AC/AC

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 22-26. When referring to the article please refer to the original text.

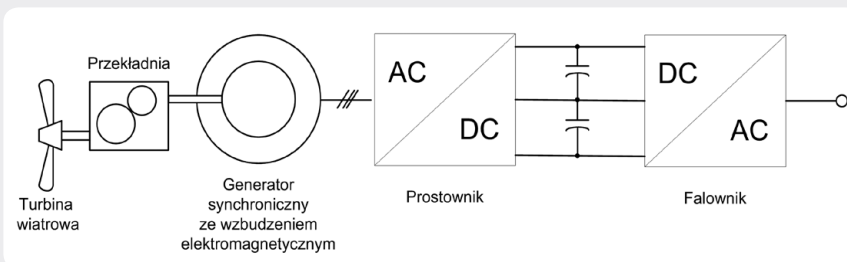
PL



Rys. 5. Prądnica synchroniczna wzbudzana elektromagnetycznie połączona bezpośrednio z SEE

pierścienie i szczotki, które wymagają przeglądu i wymiany. Dlatego w elektrowniach wodnych i wiatrowych małej mocy preferowane są prądnice synchroniczne wzbudzone magnesami trwałymi [5], jak na rys. 3 i 4. W stosunku do prądnic synchronicznych wzbudzanych elektromagnetycznie jest to rozwiązanie korzystne: nie ma układu wzbudzenia, nie ma szczotek i pierścieni, ponadto ma mniejszy gabaryt (przy tej samej mocy) i większą sprawność. Falownik AC/AC na rys. 4 jest identyczny jak w układzie na rys. 6. Alternatywą mogą być również prądnice ze wzbudzeniem hybry-

i wiatrowych. Bilans kosztów jest możliwy do zrobienia, należy jednak poprawnie wyliczyć przychody ze sprzedanej energii elektrycznej, koszty inwestycyjne i koszty obsługi. Koszty te można zweryfikować na przykładzie już pracujących elektrowni wodnych i elektrowni wiatrowych. Chodzi głównie o koszty obsługi (konserwacja i naprawy) i straty spowodowane awariami. Uśredniona z kilku obiektów analiza kosztów pozwoliłaby ocenić ekonomiczność każdego z tych układów.



Rys. 6. Prądnica synchroniczna wzbudzana elektromagnetycznie połączona z SEE poprzez falownik AC/AC

- maszyna synchroniczna ze wzbudzeniem elektromagnetycznym połączona z siecią elektroenergetyczną poprzez falownik AC/AC – rys. 6.

Wybór wariantu rozwiązania decyduje o ekonomiczności przedsięwzięcia, jakim jest budowa elektrowni hybrydowej wiatrowo-wodnej.

Prądnica synchroniczna ze wzbudzeniem elektromagnetycznym (rys. 5) jest standardowo stosowana w elektrowniach ciepłych i elektrowniach szczytowo-pompowych dużej mocy. W przypadku prądnic wiatrowych raczej nie jest zalecana, gdyż nie umożliwi maksymalnego wykorzystania energii turbiny. Maksymalne wykorzystanie mocy turbiny przy zmiennej prędkości wiatru wymaga regulacji prędkości obrotowej. Dopasowanie częstotliwości napięcia prądnicy do częstotliwości SEE wymaga w tym rozwiązaniu stosowania falowników AC/AC – rys. 6. Falownik jest jednokierunkowy, a jego moc znamionowa powinna być o około 50% większa od mocy znamionowej prądnicy. Prądnica synchroniczna ze wzbudzeniem elektromagnetycznym ma układ wzbudzenia oraz

dowym [6, 7], tj. z magnesami trwałymi oraz uzwojeniem dodatkowym, jak w przypadku prądnic ze wzbudzeniem elektromagnetycznym. Taka konstrukcja prądnicy jest rozwiązaniem pośrednim pomiędzy prądnicą ze wzbudzeniem elektromagnetycznym a prądnicą z magnesami trwałymi.

Przedstawione na rys. 3–6 układy można uszeregować pod względem ich zalet i wad. Zaletą jest ilość pozyskanej energii w ciągu roku oddawanej do SEE, a pozostałe cechy to cena inwestycyjna, koszt konserwacji i niezawodna praca. W tab. 1 układy z rys. 3–6 zostały uszeregowane według miejsc dla każdej z tych cech, od najkorzystniejszego „1” do najmniej korzystnego „4”. Z tej klasyfikacji widać, że pierwsze miejsce ma układ z rys. 3, a następnym układ z rys. 4. Ostatnie miejsce zajmuje układ z rys. 6, a więc ten, który obecnie jest najczęściej stosowany w energetyce wodnej i wiatrowej. Oczywiście o wyborze rozwiązania układu przetwarzania mocy powinno decydować kryterium przychodów i kosztów, lecz to w dużym stopniu zależy od miejsca usytuowania elektrowni wiatrowej w terenie i z tym związanych warunków wodnych

4. Wnioski

Referat jest głosem w dyskusji na temat połączenia współpracy farmy wiatrowej z elektrownią wodną i budowy małej elektrowni hybrydowej. Farma wiatrowa powinna być lokalizowana w pobliżu elektrowni wodnej, np. na obrzeżach górnego zbiornika wodnego.

Korzystne rozwiązanie elektrowni wiatrowych, z uwzględnieniem kryteriów: niezawodnej pracy, głośności, sprawności energetycznej i kosztów obsługi, uzyska się, jeśli: przekładnia mechaniczna jest 1-stopniowa, a prądnica synchroniczna G jest wzbudzana magnesami trwałymi i połączona z SEE poprzez falownik, jak na rys. 4.

Dla elektrowni wodnej korzystnym rozwiązaniem jest zastosowanie maszyny synchronicznej M/G z magnesami trwałymi. Maszyna M/G przy pracy silnikowej może być połączona z prądnicą G bezpośrednio. Przy pracy prądnicowej maszyny M/G i G mogą być połączone z SEE bezpośrednio lub poprzez falowniki i transformator.

Bibliografia

1. Gajer M., Analiza możliwości współpracy elektrowni wiatrowej z elektrownią szczytowo-pompową, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2010, nr 8.
2. Glinka T., Glinka M., Warianty rozwiązania elektrowni wiatrowej, *Przegląd Elektrotechniczny PL* 2012, nr 1b, s. 239–244.
3. Glinka T., Budzyński Z., Generatory w elektrowniach wiatrowych Europy, *Wiadomości Elektrotechniczne* 2002, nr 4.
4. Jaros P., Silniki wietrzne oraz ich zastosowanie do wytwarzania energii elektrycznej [seria artykułów], *Wiadomości Elektrotechniczne* 1938, nr 1, 3, 4, 5, 8, 9, 11, 12.
5. Gawron S., Wybrane, innowacyjne projekty maszyn elektrycznych z magnesami trwałymi i ich praktyczne zastosowania, *Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe* 2016, nr 1 (109), s. 1–10.
6. Gawron S., Metody stabilizacji napięcia wyjściowego w prądnicach z magnesami trwałymi, *Przegląd Elektrotechniczny* 2014, nr 12, s. 299–304.
7. Gawron S., Bernatt J., Dukalski P., Modelowanie 3D prądnicy ze wzbudzeniem hybrydowym, *Maszyny Elektryczne. Zeszyty Problemowe* 2011, nr 91 (3).

Układ jak na rys.	Cena inwestycyjna	Uzysk energii	Obsługa i konserwacja	Niezawodna praca	Suma miejsc
3	1	3	1	1	6
4	3	1	3	2	9
5	2	4	2	3	11
6	4	2	4	4	14

Tab. 1. Układy uszeregowane według miejsc dla każdej z cech, „1” – najkorzystniejsza

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 22-26. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Stanisław Gawron

dr inż.

Institut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

e-mail: s.gawron@komel.katowice.pl

Ukończył Politechnikę Śląską na Wydziale Elektrycznym, specjalność: maszyny i urządzenia elektryczne (2002). Z Instytutem Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL jest związany od 2004 roku, zajmuje stanowisko kierownika Pracowni Maszyn Elektrycznych (od 2006). Członek Rady Naukowej KOMEL, specjalista badawczo-techniczny. Zajmuje się rozwojem maszyn elektrycznych specjalnego zastosowania, w tym z magnesami trwałymi, oraz badaniami nad wpływem stałego pola magnetycznego na organizmy. Autor lub współautor ponad 60 publikacji naukowych oraz ponad 10 patentów.

Tadeusz Glinka

prof. dr hab. inż.

Institut Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL

e-mail: Tadeusz.Glinka@polsl.pl

W 1961 roku ukończył Politechnikę Śląską na Wydziale Elektrycznym, po czym rozpoczął pracę na macierzystej uczelni. Od 1996 roku jest związany z Instytutem Napędów i Maszyn Elektrycznych KOMEL, gdzie zajmuje stanowisko profesora. Wieloletni przewodniczący Rady Naukowej KOMEL. Zajmuje się opracowywaniem nowych konstrukcji maszyn elektrycznych specjalnych, w tym z magnesami trwałymi, silnikami trakcyjnymi, silnikami i prądnicami z magnesami trwałymi oraz transformatorami. Autor lub współautor ponad 350 publikacji naukowych oraz ponad 50 patentów. Autor kilku książek naukowych.