

Planning the Operation of a Hybrid Generation System in the Power System in a Multi-faceted Approach

Authors

Bartosz Ceran
Krzysztof Sroka

Keywords

multi-criteria analysis, hybrid generation systems, planning the operation of a hybrid system

Abstract

The paper presents the results of a multi-criteria analysis of the cooperation of a hybrid generation system (HGS) with the power system. The analysed system consists of wind turbines, photovoltaic panels and an energy storage cell – a PEM fuel cell. The paper defines and describes the decision criteria of cooperation, taking into account energy-related, economic and environmental aspects. Results of analyses carried out for two consumer energy profiles are included. The impact of the weight of adopted decision criteria on the final result of the multi-criteria analysis was analysed.

DOI: 10.12736/issn.2300-3022.2017101

Received: 30.01.2017

Accepted: 27.03.2017

Available online: 30.03.2017

1. Introduction

Many scientific publications in recent years discuss issues related to the subject of modelling and analysing the operation of hybrid generation systems consisting of wind turbines, solar panels and fuel cells [e.g. 1, 4, 6]. Publications that address these issues can be conventionally divided into two groups. The first group deals with looking for methods for designing and optimising components of hybrid generation systems. The authors define the objective function as minimisation of the size of devices making up the hybrid generation system, minimisation of the cost and reducing the excess of energy produced in relation to demand. The second group of publications deals with modelling the dynamics of operation of hybrid generation systems. In this group we can distinguish models presenting the work of a hybrid generation system in off-grid mode, where the key role is selection of energy storage methods, or cooperation of the hybrid generation system with the power system (on-grid). It should be noted that models of cooperation of a hybrid generation system based on renewable energy sources having a stochastic character of cooperation with the electricity grid (on-grid) focus on the use of the power system as an element balancing excess or shortage of electricity produced by wind farms or photovoltaic systems. These papers do not take into account the structure of the generation sector of the power system, which cooperates with the hybrid system. The authors of these models do not take into account the fact that the power system in order to balance the excess or shortage of energy must increase or decrease in production in systemic generating units, particularly in

conventional power plants. Increased failure of steam generators is associated not only with the exhaustion of the lifetime of their main modules and the manner of operation, but also changing their function in the power system saturated with sources with stochastic character of operation [3].

Accordingly, in the paper, the authors present a methodology for analysing load distribution between the hybrid generation system consisting of wind turbines, photovoltaic panels and a fuel-cell energy storage system, and the power system.

It is worth noting that the hybrid generation systems based on renewable sources (wind and PV sources), in comparison with conventional power plants, have a lower impact on the environment and higher unit costs of electricity generation. In addition, due to the necessity of the energy store, the efficiency of electricity generation by the hybrid system is lower than the efficiency of the steam generator.

It follows that, when planning the load distribution between the hybrid generation system and conventional sources, we must take into account energy aspects of the considered power generation technologies (e.g. efficiency of converting primary energy into electrical energy, unit fuel consumption), economic aspects (e.g. unit cost of electrical energy production, indicators of investment profitability) and environmental aspects (e.g. emissions to the environment).

2. Hybrid generation system

Diagram of the analysed hybrid power supply system is shown in Fig. 1. The surplus energy produced from renewable sources is

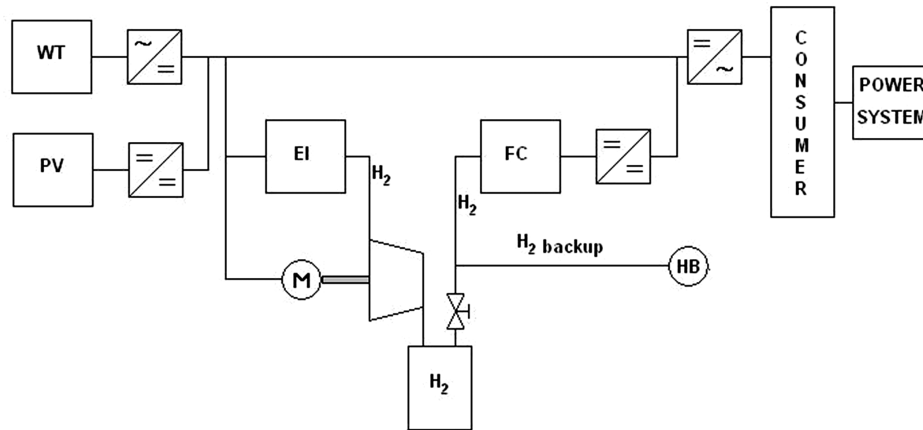


Fig. 1. Block diagram of a hybrid generation system: FC – fuel cell, PV – photovoltaic cell, WT – wind turbine, EI – electrolysis cell, H₂ – hydrogen tank, HB - hydrogen backup.

used in the process of electrolysis (decomposition of water into hydrogen and oxygen). Hydrogen is compressed and stored, and then used in a fuel cell to generate electricity at a time when it is required for the needs of the consumer.

Instantaneous power shortages associated with the stochastic character of energy generation by renewable sources is compensated by the operation of the fuel cell. Hydrogen is first supplied to the fuel cell from the electrolysis cell. In the case of exhaustion of hydrogen in the tank, the fuel cell is supplied with hydrogen from a backup. Purchase of additional hydrogen for backup is charged a small emissions associated with its production depending on the technology (steam reforming of hydrocarbons, coal gasification, gasification of biomass).

The balance of power in the system depends on the ratio of the power produced by wind turbines and photovoltaic systems to the needs of the consumer. If the demand is lower than the power generated (operation of the electrolysis cell), the balance equation takes the form of

$$P_{\text{Load}} = P_{\text{PV}} + P_{\text{WT}} - P_{\text{elec}} - P_{\text{comp}} + (P_{\text{sys}}) \quad (1)$$

where: P_{Load} – power consumed by the consumer, P_{PV} – power generated by the photovoltaic plant, P_{WT} – power generated by wind turbines, P_{elec} – power received through the electrolysis cell, P_{comp} – power consumed to in the compressor drive, P_{sys} – power drawn from the power system.

If the demand exceeds the power generated by the sources (fuel cell operation), the power received by the consumer is described by formula:

$$P_{\text{Load}} = P_{\text{PV}} + P_{\text{WT}} + P_{\text{FC}} + (P_{\text{sys}}) \quad (2)$$

where: P_{FC} – power generated by the fuel cell stack

3. Scenarios of operation and decision-making criteria

Two consumer profiles were adopted for the analysis as shown in Fig. 2 and 3 with the selected scenarios of load distribution between the hybrid generation system and the power system.

The base scenario S-I involves powering the consumer by the hybrid generation system in off-grid mode, without the power system. Further scenarios S-II, S-III, IV-S include covering a part of the load by the system according to the following sequence: 25%, 50% and 75% of the energy demand is covered by the power system.

The scenarios selected in this manner make it possible to compare the separate operation of a hybrid generation system with cases of its cooperation with the power system. To objectively evaluate scenarios in a multi-criteria analysis, decision criteria should be adopted, which represent divergent objectives [5]. When comparing variants of electricity production, decision criteria can be divided into three groups: energy-related criteria, economic criteria and environmental criteria.

As criterion k_1 , representing the group of energy-related criteria, we adopted specific consumption of additional hydrogen by the hybrid system, defined as:

$$k_1 = \frac{M_{\text{H}_2}}{E_{\text{Load}}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right] = \frac{V_{\text{H}_2}}{E_{\text{Load}}} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kWh}} \right] \quad (3)$$

where: M_{H_2} , V_{H_2} - additional hydrogen consumption by weight or volume for backup purposes, E_{Load} - the consumer's energy demand.

Specific consumption of additional hydrogen by the hybrid system has been determined on the basis of the energy analysis of the hybrid system [2]. The analysis was based on balance equations (1) and (2). The input data were the energy profile of the consumer and the annual distributions of sunlight and wind speed. The power curve as a function of wind speed $P_{\text{EW}} = f(v)$ given by the manufacturer was used in order to determine the amount of energy produced by wind turbines, and the power relationships as a function of solar radiation intensity $P_{\text{PV}} = f(E)$ developed on the basis of the family of external characteristics of photovoltaic modules $U = f(I)$ were used to determine the energy generated by these modules. On the basis of the energy analysis, a set of hybrid system devices was selected for each scenario (Tab. 1).

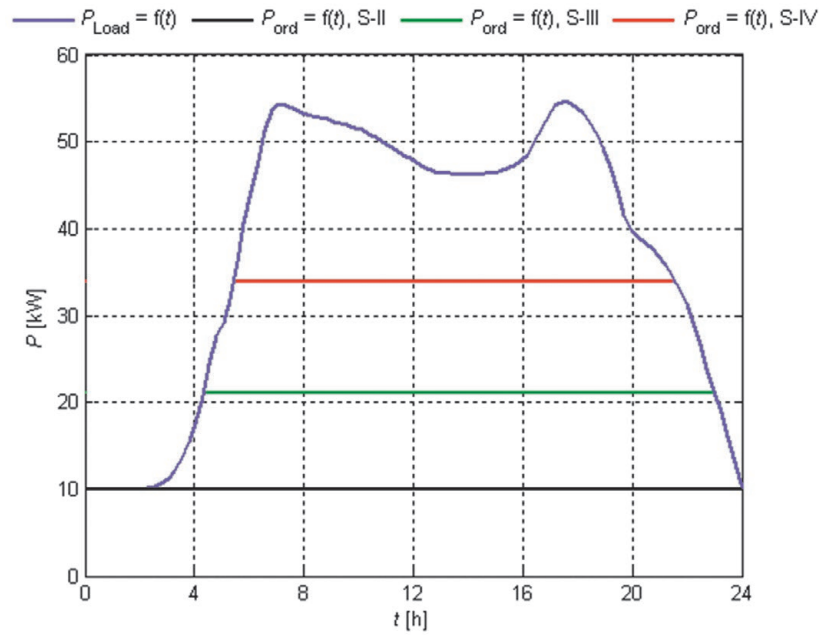


Fig. 2. Consumer energy profile 1 – scenarios of operation

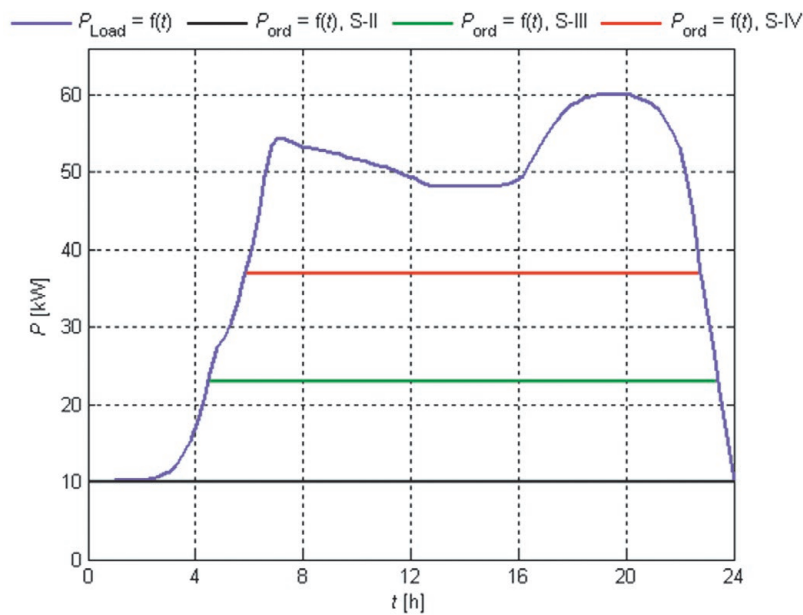


Fig. 3. Consumer energy profile 2 - scenarios of operation

As a criterion representing the group of economic criteria, specific cost of electricity generation by the hybrid system was adopted:

$$k_2 = \frac{K_e}{E_{HPGS}} \left[\frac{\text{PLN}}{\text{kWh}} \right] \quad (4)$$

where: K_e – maintenance costs of the hybrid system, E_{HPGS} – energy produced by the hybrid system.

Maintenance costs K_s are the sum of operating costs and costs of management of devices making up the hybrid system (O&M), costs of purchase and transport of additional hydrogen, depreciation costs and the cost of water for the electrolysis cell – fuel cell circuit.

$$K_e = K_{O\&M} + K_{H_2} + K_a + K_{H_2O} \quad (5)$$

Criterion k_3 – emission of carbon dioxide by the hybrid generation system and power system, represents the group of environmental criteria and describes the effects of the plant's operation on the environment.

$$k_3 = \frac{E_{sys} \cdot WE_{CO_2} + M_{H_2} \cdot CO_2/H_2}{E_{Load}} \left[\frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{kWh}} \right] \quad (6)$$

where: E_{sys} – energy taken from the power system, WE_{CO_2} – the rate of carbon dioxide emission in the power system,

	Load scenarios for the power system							
	Profile 1				Profile 2			
Devices in the hybrid system	S-I	S-II	S-III	S-IV	S-I	S-II	S-III	S-IV
Wind turbines [kW]	3x50	3x50	2x50	50	4x50	3x50	2x50	50
Panels PV-250 [W _p]	415x250	94x250	71x250	36x250	279x250	224x250	146x250	80x250
Fuel cell [kW]	50	50	40	20	50	50	40	20
Electrolysis cell [kW]	150	150	100	50	200	150	100	50

Tab. 1. Parameters of hybrid generation system devices

CO₂/H₂ – weight of carbon dioxide formed in the production of 1 kg of hydrogen in the process of steam reforming, partial oxidation or gasification of solid fuels.

Criterion k₄ – degree of utilization of contracted capacity from the power system, describes the benefits for the power system carried by the installation of the hybrid system by the consumer.

$$k_4 = \frac{E_{sys}}{P_{ord} \cdot t} \left[\frac{kWh}{kWh} \right] \quad (7)$$

where: P_{ord} – maximum power drawn from the power system by the consumer over time t.

4. Multi-criteria analysis of load distribution selected consumer profiles

Multi-criteria analysis is a mathematical method that makes it possible to select the best solution, so-called scenario, in the light of the criteria adopted. One of the methods of conducting a multi-criteria analysis is the compromise programming method, which ranks scenarios according to the distance from the so-called target point X' (ideal point).

The compromise programming method allows to give weight to individual decision criteria, i.e. the decision-maker can take the validity of some parameters especially important to the decision-maker into account in the calculation. For example, analysing the operation of a system generating electricity, the cost of generating electricity or the impact of the system's operation on the environment can be of particular importance to the decision-maker.

The mathematical notation of the measure of distance of the considered variant from the ideal point is described using the formula:

$$L_\alpha(S_n) = \sum_{m=1}^M w_m^\alpha (x'_m - x'_{nm})^\alpha \quad (8)$$

where: L_α – measure of divergence of the considered scenario S_n from the ideal point, w_m – weight coefficient of the m-th criterion, α – exponent measuring the deviation of the strategy from the ideal point, x'_m – m-th coordinate of the ideal point, x'_{nm} – normalised value of the evaluation criterion.

The most favourable scenario in the light of the criteria adopted satisfies the relationship:

$$S_j = S^* \Leftrightarrow L_\alpha(S_j) = \min L_\alpha(S_n), \text{ for } n = 1, 2, \dots, N; \alpha = 1, 2, \dots, \infty \quad (9)$$

where: S* – the selected scenario.

Comparison of the best scenario with other scenarios in the light of the criteria adopted is carried out using the acceptability threshold PA defined as:

$$PA = \frac{p}{100} \cdot \min L_\alpha(S_n) \quad (10)$$

where: p – the percentage value of the distance of the best scenario from the ideal point,

Acceptable scenarios meet the inequality:

$$L_\alpha(S_n) - \min L_\alpha(S_n) < PA \quad (11)$$

In the present case, the value of „p” is assumed to be 10%.

	Load scenarios for the power system							
	Profile 1				Profile 2			
Scenarios / Criteria	S-I	S-II	S-III	S-IV	S-I	S-II	S-III	S-IV
k ₁	0.236	0.222	0.121	0.005	0.272	0.203	0.109	0.004
k ₂	1.15	1.28	1.34	1.51	1.1	1.22	1.27	1.41
k ₃	0.29	0.49	0.57	0.63	0.33	0.45	0.54	0.62
k ₄	0	1	0.91	0.84	0	1	0.9	0.84

Tab. 2. Payoff matrix of the decision-making problem for scenarios S-I... S-IV

	Load scenarios for the power system							
	Profile 1				Profile 2			
Scenarios / Criteria	S-I	S-II	S-III	S-IV	S-I	S-II	S-III	S-IV
k ₁	0.00	0.06	0.50	1.00	0.00	0.26	0.61	1.00
k ₂	1.00	0.62	0.45	0.00	1.00	0.62	0.43	0.00
k ₃	1.00	0.41	0.19	0.00	1.00	0.60	0.27	0.00
k ₄	0.00	1.00	0.91	0.84	0.00	1.00	0.90	0.84

Tab. 3. Normalised payoff matrix for scenarios S-I... S-IV

Ratio of criteria weights	Consumer profile P1													
	$\alpha = 1$						$\alpha = 2$							
$w_1:w_2:w_3:w_4$														
1:1:1:1	S-II*	→	S-III*	→	S-I*	→	S-IV	S-III*	→	S-II	→	S-I	→	S-IV
2:1:1:1	S-IV*	→	S-III	→	S-II	→	S-I	S-III*	→	S-IV*	→	S-II	→	S-I
1:2:1:1	S-I*	→	S-II	→	S-III	→	S-IV	S-II*	→	S-I	→	S-III	→	S-IV
1:1:2:1	S-I*	→	S-II	→	S-III	→	S-IV	S-I*	→	S-II	→	S-III	→	S-IV
1:1:1:2	S-II*	→	S-III	→	S-IV	→	S-I	S-III*	→	S-II	→	S-IV	→	S-I
2:2:1:1	S-I*	↔	S-III*	→	S-IV	→	S-II	S-III*	→	S-II	→	S-I	→	S-IV
1:1:2:2	S-II*	→	S-III	→	S-I	→	S-IV	S-II*	→	S-III	→	S-I	→	S-IV
$w_1:w_2:w_3:w_4$	Consumer profile P2													
1:1:1:1	S-II*	→	S-III	→	S-I	→	S-IV	S-II*	→	S-III	→	S-I	→	S-IV
2:1:1:1	S-IV*	→	S-III*	→	S-II*	→	S-I	S-III*	→	S-IV	→	S-II	→	S-I
1:2:1:1	S-II*	→	S-I	→	S-III	→	S-IV	S-II*	→	S-I	↔	S-III	→	S-IV
1:1:2:1	S-II*	→	S-I*	→	S-III	→	S-IV	S-II*	→	S-I	→	S-III	→	S-IV
1:1:1:2	S-II*	→	S-III	→	S-IV	→	S-I	S-II*	→	S-III	→	S-IV	→	S-I
2:2:1:1	S-II*	→	S-III*	→	S-I	→	S-IV	S-III*	→	S-II	→	S-I	→	S-IV
1:1:2:2	S-II*	→	S-III	→	S-I	→	S-IV	S-II*	→	S-III	→	S-I	→	S-IV

Tab. 4. Results of the multi-criteria analysis

The mathematical notation of a multi-criteria decision problem consisting of four scenarios S(I-IV), concerned using four criteria k_{1-4} , forms a decision matrix called the payoff matrix (Tab. 2):

After applying the normalization, we obtain the values for all the criteria in a standardised scale with a range of $\langle 0; 1 \rangle$. A normalised payoff matrix is shown in Tab. 3.

5. Results of the multi-criteria analysis

The effect of the weight of decision criteria on the result of the multi-criteria analysis was analysed for the variant in which all the criteria are assigned the same weight value w_m . Then the effect of double weighting one of the criteria in relation to the rest on the results of multi-criteria analysis was studied. The calculations were performed for two values of the aggregation criterion α equal to 1 and 2. Scenarios are ranked in order from most to least favourable. Acceptable variants are indicated by the symbol *.

The results of multi-criteria analysis are presented in Tab. 4. The result is a multi-criteria analysis depends on the adopted criteria, the relationship between the criteria weights, the values of the adopted acceptability threshold and the value of the aggregating criterion α . It should be noted that the elements of the first line of the standardised payoff matrix are the result of energy analysis. The value of criterion K_1 is influenced by the relationship between the distribution of wind and sunlight, and the demand for power by the consumer, which specifies the annual consumption of additional hydrogen. Economic analysis determining the value of the economic criterion k_2 is derived from the energy analysis, because the value of the investment expenditure depends on the number and value of installed power of units forming the hybrid generation system. And the degree of utilization of the hybrid generation system for covering the load will determine the reduction of carbon dioxide emissions. Thus, the results of the energy analysis indirectly determine the payoff matrix and the standardised payoff matrix, and these in turn for the predetermined value of aggregating criterion α and the

percentage content of the acceptability threshold p determine the order of the scenarios.

Analysing the results of the impact of double weighting one criterion relative to the rest, we can conclude that in the case of profile P1, double weighting the given criterion determined the indication of the preferred scenario for this criterion as the most favourable variant. In the case of the consumer profile P2, the most frequently indicated variant is scenario S-II, wherein the system covers the base load, while the remaining demand is covered by the hybrid system.

It should be noted that the criteria k_1 – specific consumption of additional hydrogen and k_2 – specific cost of electricity generation by the hybrid system directly represent the interest of the investor in the hybrid generation system. From the point of view of the investor, it is important for the maintenance costs to be as low as possible with the least consumption of additional hydrogen. In contrast, the pair of criteria k_3 – specific carbon dioxide emission and k_4 – degree of utilization of contracted capacity, represent the point of view of the power system. For the power system, the priority is to reduce carbon dioxide emissions, which results from the adopted European Union directives and to minimise load variability associated with maintaining the stability of its operation.

Accordingly, cases were also considered in which the pairs of criteria k_1 and k_2 as well as k_3 and k_4 were predominant.

In the case of overweighting the pair of criteria k_1 and k_2 , an acceptable scenario for the α 1 and 2 is scenario S-III. And in the case of overweighting criteria k_3 and k_4 in both cases variant S-II was considered as most favourable, wherein the power system covers the base load.

6. Summary

The results obtained from the multi-criteria analysis of load distribution between the hybrid generation system and the power system allows to draw the following conclusions:

It is currently not possible to completely replace the classical power system with renewable energy sources connected in hybrid generation systems. Among the variants analysed, extreme scenarios S-I and S-IV are usually indicated as the worst variant

Taking into account the energy-related, economic and environmental aspects we can, through the selection of weights of decision criteria, determine the load distribution between the hybrid generation system and the power system, so as to take account of both the needs of the generation sector of the power system and the hybrid system itself.

The proposed analysis model can be a starting point for optimising the operation of hybrid generation systems based on sources with a stochastic character of operation in the power system. It is possible to expand on this model, e.g. by adding new decision criteria.

REFERENCES

1. N.A. Ahmed, "On-Grid Hybrid Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System", IPEC, Conference on Power & Energy, 2012.
2. B. Ceran, K. Sroka, 2015 – "Performance Analysis of a Hybrid Generation System of Wind Turbines, Photovoltaic Modules, and a Fuel Cell", *Acta Energetica*, No. 2 (23), 2015, pp. 36–42.
3. T. Chmielniak, A. Rusin, H. Łukowicz, "Modernizacja i rewitalizacja istniejący bloków węglowych ważnym warunkiem stabilności sektora wytwarzania elektryczności" [*Upgrading and revitalization of existing coal generators as an important condition of stability of the generation sector*], *Polityka Energetyczna* [Energy Policy Journal], Vol. 19, book 4, 2016, pp. 49–60.
4. E. Mbarek, J. Belhadj, "Photovoltaic Wind hybrid system integrating a Permanent Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC)", Conference "Systems, Signals and Devices", 2009.
5. Z. Mucha, J. Mikosz, A. Generowicz, "Zastosowanie analizy wielokryterialnej do wyboru technologii w małych oczyszczalniach ścieków" [*The use of multi-criteria analysis for selecting technology for small waste treatment plants*], *Technical Transactions. Environment Engineering*, Vol. 4, 2012, pp. 145–155.
6. C. Wang, M.H. Nehrir, "Power Management of a Stand-Alone Wind/Photovoltaic/Fuel Cell Energy System", *Energy Conversion, IEEE Transactions on energy conversion*, Vol. 23, No. 3, September 2008.

Bartosz Ceran

Poznań University of Technology
 e-mail: bartosz.ceran@put.poznan.pl

Graduated in electrical/ power engineering from the Electrical Faculty of Poznań University of Technology. Since 2009 a research assistant in the Institute of Electrical Power Engineering at the Faculty of Electrical Engineering of Poznań University of Technology. His research interests include issues of distributed electricity and heat generation, with special emphasis on fuel cell technology.

Krzysztof Sroka

Poznań University of Technology
 e-mail: krzysztof.sroka@put.poznan.pl

Graduated from the Faculty of Electrical Engineering in Poznań University of Technology (1976). He received his PhD in engineering at the same faculty (1986). Now an assistant professor in the Institute of Electrical Power Engineering at the Faculty of Electrical Engineering of Poznań University of Technology. His research interests include issues related to power plant operation in power system, issues of defence and recovery of power plant's or co-generation plant's generating capability in the states of catastrophic failure, and combined generation of electricity and heat.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 4–9. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Planowanie pracy hybrydowego systemu wytwórczego w systemie elektroenergetycznym w ujęciu wieloaspektowym

Autorzy

Bartosz Ceran
Krzysztof Sroka

Słowa kluczowe

analiza wielokryterialna, hybrydowe systemy wytwórcze, planowanie pracy systemu hybrydowego

Streszczenie

W artykule zaprezentowano wyniki wielokryterialnej analizy współpracy hybrydowego systemu wytwórczego (HSW) z systemem elektroenergetycznym. Analizowany system składa się z turbin wiatrowych, paneli fotowoltaicznych oraz magazynu energii elektrolizer – ogniwo paliwowe typu PEM. Zdefiniowano i opisano kryteria decyzyjne współpracy z uwzględnieniem aspektów energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych. Zamieszczono wyniki analiz przeprowadzonych dla dwóch profili energetycznych odbiorcy. Przebadano wpływ wag przyjętych kryteriów decyzyjnych na wynik końcowy analizy wielokryterialnej.

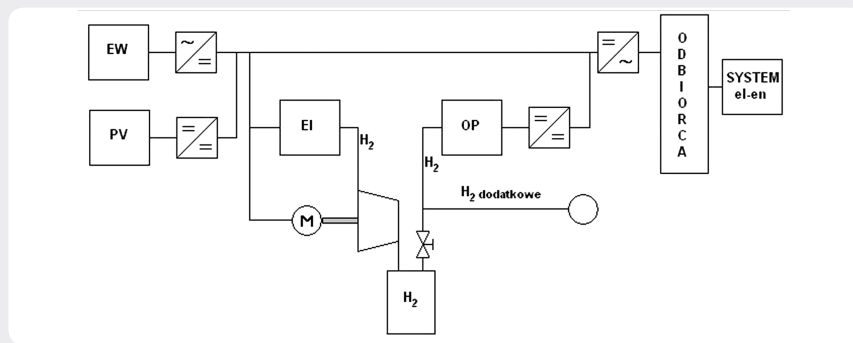
Data wpływu do redakcji: 30.01.2017

Data akceptacji artykułu: 27.03.2017

Data publikacji online: 30.03.2017

1. Wprowadzenie

Wiele publikacji naukowych z ostatnich lat porusza problemy tematyki modelowania i analizy pracy hybrydowych systemów wytwórczych składających się z elektrowni wiatrowych, paneli fotowoltaicznych i ogniw paliwowych [m.in. 1, 4, 6]. Publikacje poruszające te zagadnienia można umownie podzielić na dwie grupy. Pierwsza grupa traktuje o poszukiwaniu metod projektowania i optymalizacji komponentów hybrydowych systemów wytwórczych. Autorzy definiują funkcje celu, takie jak: minimalizacja rozmiarów urządzeń hybrydowego systemu wytwórczego, minimalizacja kosztów i ograniczenie nadmiaru produkowanej energii w stosunku do zapotrzebowania. Druga grupa publikacji dotyczy modelowania dynamiki pracy hybrydowego systemu wytwórczego. W grupie tej można wyróżnić modele prezentujące pracę hybrydowego systemu wytwórczego w trybie autonomicznym (*off-grid*), gdzie kluczową rolę stanowi dobór magazynu energii, lub współpracę hybrydowego systemu wytwórczego z systemem elektroenergetycznym (*on-grid*). Należy zauważyć, że modele współpracy hybrydowego systemu wytwórczego opartego na odnawialnych źródłach energii o stochastycznym charakterze pracy z siecią elektroenergetyczną (*on-grid*) skupiają się na wykorzystywaniu systemu elektroenergetycznego jako elementu bilansującego nadmiar lub niedobór wytwarzanej energii elektrycznej przez elektrownie wiatrowe lub instalacje fotowoltaiczne. W pracach tych nie uwzględnia się struktury sektora wytwórczego systemu elektroenergetycznego, który współpracuje z układem hybrydowym. Autorzy tych modeli nie biorą pod uwagę faktu, że aby system elektroenergetyczny mógł bilansować nadmiar lub niedobór energii, musi odpowiednio zwiększać lub zmniejszać produkcję w systemowych jednostkach wytwórczych, w szczególności w elektrowniach konwencjonalnych. Wzrost awaryjności bloków parowych jest związany nie



Rys. 1. Schemat blokowy hybrydowego systemu wytwórczego: OP – ogniwo paliwowe, PV – ogniwo fotowoltaiczne, EW – elektrownia wiatrowa, EI – elektrolizer, H₂ – zbiornik wodoru

tylko z wyczerpywaniem się żywotności jego głównych modułów oraz sposobem eksploatacji, ale także ze zmianą ich funkcji w systemie elektroenergetycznym nasycanym źródłami o stochastycznym charakterze pracy [3].

W związku z powyższym autorzy przedstawiają w artykule metodykę analizy rozdziału obciążeń między hybrydowym systemem wytwórczym, składającym się z elektrowni wiatrowych, paneli fotowoltaicznych oraz magazynu energii elektrolizer – ogniwo paliwowe, a systemem elektroenergetycznym. Warto zaznaczyć, że hybrydowe systemy wytwórcze oparte na źródłach odnawialnych (elektrownie wiatrowe i fotowoltaiczne), w porównaniu z elektrowniami konwencjonalnymi, charakteryzują się mniejszym oddziaływaniem na środowisko oraz większymi kosztami jednostkowymi wytwarzania energii elektrycznej. Dodatkowo, ze względu na konieczność zastosowania magazynu energii, sprawność wytwarzania energii elektrycznej przez układ hybrydowy jest mniejsza od sprawności bloku parowego. Wynika z tego, że przy planowaniu rozdziału obciążeń między hybrydowym systemem wytwórczym a źródłami konwencjonalnymi należy uwzględniać aspekty energetyczne rozpatrywanych technologii wytwarzania

energii elektrycznej (np. sprawność procesu przetwarzania energii pierwotnej na elektryczną, jednostkowe zużycie paliwa), aspekty ekonomiczne (np. jednostkowe koszty wytwarzania energii elektrycznej, wskaźniki opłacalności inwestycji) oraz aspekty środowiskowe (np. emisja spalin do otoczenia).

2. Hybrydowy system wytwórczy

Schemat analizowanego hybrydowego układu zasilania odbiorcy przedstawiono na rys. 1. Nadwyżka energii wyprodukowanej w źródłach odnawialnych wykorzystywana jest w procesie elektrolizy (rozkładu wody na wodór i tlen). Wodór jest sprężany i magazynowany, a następnie wykorzystywany w ogniwie paliwowym do wytwarzania energii elektrycznej w okresie, gdy jest ona wymagana potrzebami odbiorcy. Chwilowe niedobory mocy związane ze stochastycznym charakterem generacji energii przez źródła odnawialne kompensuje praca ogniwa paliwowego. Wodór do ogniwa paliwowego dostarczany jest w pierwszej kolejności z elektrolizera. W przypadku wyczerpania wodoru w zbiorniku ogniwo paliwowe zasilane jest przez wodór ze źródła dodatkowego (ang. *backup*). Zakup dodatkowego wodoru w celach

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 4–9. When referring to the article please refer to the original text.

PL

backupu jest obciążony niewielką emisją zanieczyszczeń związaną z jego produkcją w zależności od technologii (reforming parowy węglowodorów, zgazowanie węgla, zgazowanie biomasy).

Bilans mocy w układzie zależy od stosunku mocy wytwarzanej przez turbiny wiatrowe i systemy fotowoltaiczne do zapotrzebowania odbiorcy. W przypadku, gdy zapotrzebowanie jest mniejsze od generowanej mocy (praca elektrolizera), równanie bilansowe przyjmuje postać.

$$P_{\text{Odb}} = P_{\text{PV}} + P_{\text{EW}} - P_{\text{elek}} - P_{\text{komp}} \quad (1)$$

gdzie: P_{Odb} – moc pobierana przez odbiorcę, P_{PV} – moc generowana przez instalację fotowoltaiczną, P_{EW} – moc generowana przez elektrownie wiatrowe, P_{elek} – moc obciążona przez elektrolizer, P_{komp} – moc zużyta na napęd kompresora, P_{sys} – moc pobrana z systemu elektroenergetycznego.

W przypadku, gdy zapotrzebowanie przewyższa moc produkowaną przez źródła (praca ogniwa paliwowego), moc pobieraną przez odbiorcę opisuje wzór:

$$P_{\text{Odb}} = P_{\text{PV}} + P_{\text{EW}} + P_{\text{OP}} \quad (2)$$

gdzie: P_{OP} – moc generowana przez stos ogniwa paliwowych

3. Scenariusze pracy i kryteria decyzyjne

Do analizy przyjęto dwa profile odbiorcy przedstawione na rys. 2 i 3 z zaznaczonymi scenariuszami rozdziału obciążeń między hybrydowym systemem wytwórczym a systemem elektroenergetycznym. Bazowy scenariusz S-I stanowi zasilanie odbiorcy przez hybrydowy system wytwórczy w trybie *off-grid*, bez udziału systemu elektroenergetycznego. Kolejne scenariusze S-II, S-III, S-IV uwzględniają pokrywanie części obciążenia przez system wg następującej kolejności: 25%, 50% i 75% zapotrzebowania na energię pokrywa system elektroenergetyczny.

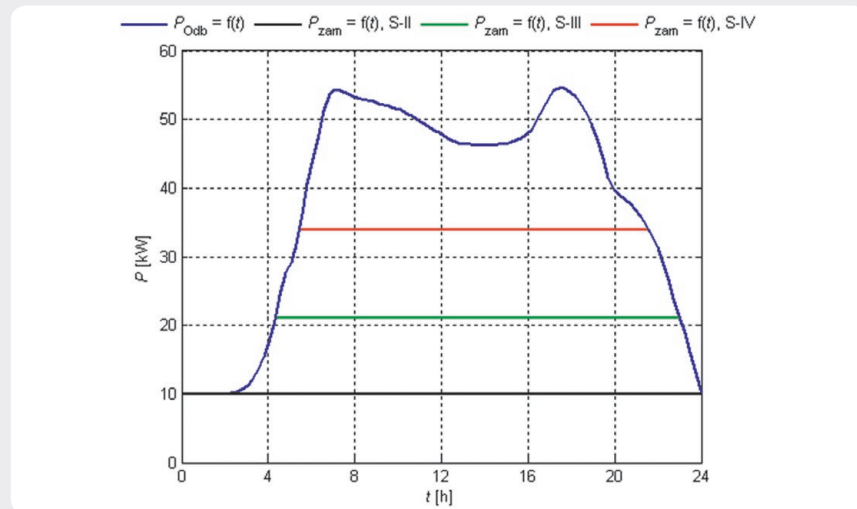
Tak dobrane scenariusze dają możliwość porównania pracy autonomicznego hybrydowego systemu wytwórczego z przypadkami jego współpracy z systemem elektroenergetycznym. Aby obiektywnie ocenić scenariusze w analizie wielokryterialnej, należy przyjąć kryteria decyzyjne, które reprezentują rozbieżne cele [5]. W przypadku porównywania wariantów wytwarzania energii elektrycznej kryteria decyzyjne można podzielić na trzy grupy: kryteria energetyczne, kryteria ekonomiczne oraz kryteria środowiskowe.

Jako kryterium k_1 reprezentujące grupę kryteriów energetycznych przyjęto jednostkowe zużycie wodoru dodatkowego przez system hybrydowy zdefiniowane jako:

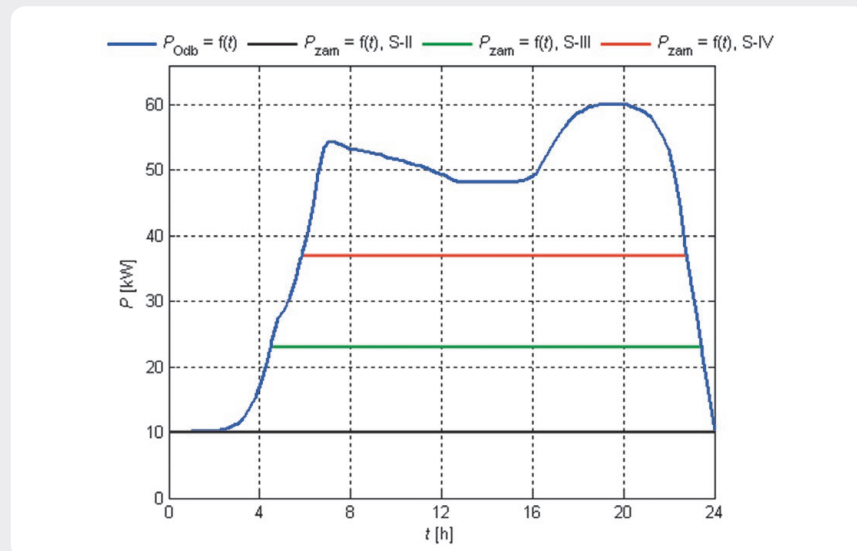
$$k_1 = \frac{M_{\text{H}_2}}{E_{\text{Odb}}} \left[\frac{\text{kg}}{\text{kWh}} \right] = \frac{V_{\text{H}_2}}{E_{\text{Odb}}} \left[\frac{\text{Nm}^3}{\text{kWh}} \right] \quad (3)$$

gdzie: V_{H_2} , M_{H_2} – masowe lub objętościowe zużycie wodoru dodatkowego do celów *backupu*, E_{Odb} – zapotrzebowanie na energię przez odbiorcę.

Jednostkowe zużycie wodoru dodatkowego przez system hybrydowy zostało wyznaczone na podstawie analizy energetycznej



Rys. 2. Profil energetyczny odbiorcy 1 – scenariusze pracy



Rys. 3. Profil energetyczny odbiorcy 2 – scenariusze pracy

	Scenariusze obciążeń systemu elektroenergetycznego							
	Profil 1				Profil 2			
Urządzenia w układzie hybrydowym	S-I	S-II	S-III	S-IV	S-I	S-II	S-III	S-IV
Elektrownie wiatrowe [kW]	3x50	3x50	2x50	50	4x50	3x50	2x50	50
Panele PV-250 [W _p]	415x250	94x250	71x250	36x250	279x250	224x250	146x250	80x250
Ogniwo paliwowe [kW]	50	50	40	20	50	50	40	20
Elektrolizer [kW]	150	150	100	50	200	150	100	50

Tab. 1. Parametry urządzeń hybrydowego układu wytwórczego

układu hybrydowego [2]. Analizę przeprowadzono w oparciu o równania bilansowe (1) i (2). Dane wejściowe stanowiły profil energetyczny odbiorcy oraz roczne rozkłady nasłonecznienia i prędkości wiatru. W celu określenia ilości energii wytworzonej przez

elektrownie wiatrowe posłużono się charakterystyką mocy w funkcji prędkości wiatru $P_{\text{EW}} = f(v)$ podaną przez producenta, natomiast do określenia energii wytworzonej przez moduły fotowoltaiczne wykorzystano zależności mocy w funkcji natężenia

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 4-9. When referring to the article please refer to the original text.

PL

promieniowania słonecznego $P_{PV} = f(E)$ opracowane na podstawie rodziny charakterystyk zewnętrznych tych modułów $U = f(I)$. Na podstawie analizy energetycznej dobrano dla każdego scenariusza zestaw urządzeń systemu hybrydowego (tab. 1).

Jako kryterium reprezentujące grupę kryteriów ekonomicznych przyjęto jednostkowy koszt wytwarzania energii elektrycznej przez system hybrydowy:

$$k_2 = \frac{K_e}{E_{HSW}} \left[\frac{\text{PLN}}{\text{kWh}} \right] \quad (4)$$

gdzie: K_e – koszty eksploatacyjne układu hybrydowego, E_{HSW} – energia wytworzona przez układ hybrydowy.

Koszty eksploatacyjne K_e są sumą kosztów operacyjnych i zarządzania urządzeniami tworzącymi system hybrydowy (O&M), kosztów zakupu i transportu wodoru dodatkowego oraz kosztów amortyzacji i kosztów wody do uzupełnienia obiegu elektrolizer – ogniwo paliwowe.

$$K_e = K_{O\&M} + K_{paliwa} + K_a + K_{H_2O} \quad (5)$$

Kryterium k_3 – wskaźnik emisji dwutlenku węgla przez hybrydowy system wytwórczy i system elektroenergetyczny, reprezentuje grupę kryteriów środowiskowych i opisuje wpływ pracy instalacji na środowisko naturalne.

$$k_3 = \frac{E_{sys} \cdot WE_{CO_2} + M_{H_2} \cdot CO_2/H_2}{E_{odb}} \left[\frac{\text{kg}_{CO_2}}{\text{kWh}} \right] \quad (6)$$

gdzie: E_{sys} – energia pobrana z systemu elektroenergetycznego, WE_{CO_2} – wskaźnik emisji dwutlenku węgla w systemie elektroenergetycznym, CO_2/H_2 – masa dwutlenku węgla powstała przy produkcji 1 kg wodoru w procesie reformingu parowego, częściowego utleniania lub zgazowania paliw stałych.

Kryterium k_4 – stopień wykorzystania mocy zamówionej z systemu elektroenergetycznego, opisuje korzyści dla systemu elektroenergetycznego, jakie niesie zainstalowanie układu hybrydowego przy odbiorcy.

$$k_4 = \frac{E_{sys}}{P_{zam} \cdot t} \left[\frac{\text{kWh}}{\text{kWh}} \right] \quad (7)$$

gdzie: P_{zam} – maksymalna moc pobierana z systemu elektroenergetycznego przez odbiorcę w czasie t .

4. Wielokryterialna analiza rozdziału obciążeń dla wybranych profili odbiorcy
Analiza wielokryterialna jest metodą matematyczną, która pozwala na wybranie najkorzystniejszego rozwiązania, tzw. scenariusza, w świetle przyjętych kryteriów. Jedną z metod przeprowadzenia analizy wielokryterialnej jest metoda programowania kompromisowego, która szereguje rozpatrywane scenariusze wg odległości od tzw. punktu docelowego X' (punktu idealnego).

Scenariusze obciążeń systemu elektroenergetycznego								
scenariusze / kryteria	Profil 1				Profil 2			
	S-I	S-II	S-III	S-IV	S-I	S-II	S-III	S-IV
k_1	0,236	0,222	0,121	0,005	0,272	0,203	0,109	0,004
k_2	1,15	1,28	1,34	1,51	1,1	1,22	1,27	1,41
k_3	0,29	0,49	0,57	0,63	0,33	0,45	0,54	0,62
k_4	0	1	0,91	0,84	0	1	0,9	0,84

Tab. 2. Macierz wypłat problemu decyzyjnego dla scenariuszy S-I... S-IV

Scenariusze obciążeń systemu elektroenergetycznego								
scenariusze / kryteria	Profil 1				Profil 2			
	S-I	S-II	S-III	S-IV	S-I	S-II	S-III	S-IV
k_1	0,00	0,06	0,50	1,00	0,00	0,26	0,61	1,00
k_2	1,00	0,62	0,45	0,00	1,00	0,62	0,43	0,00
k_3	1,00	0,41	0,19	0,00	1,00	0,60	0,27	0,00
k_4	0,00	1,00	0,91	0,84	0,00	1,00	0,90	0,84

Tab. 3. Znormalizowana macierz wypłat dla scenariuszy S-I... S-IV

Stosunek wag kryteriów	Profil odbiorcy P1							
	$\alpha = 1$				$\alpha = 2$			
$w_1:w_2:w_3:w_4$	$\alpha = 1$				$\alpha = 2$			
1:1:1:1	S-II*	→	S-III*	→	S-I*	→	S-IV	S-III* → S-II → S-I → S-IV
2:1:1:1	S-IV*	→	S-III	→	S-II	→	S-I	S-III* → S-IV* → S-II → S-I
1:2:1:1	S-I*	→	S-II	→	S-III	→	S-IV	S-II* → S-I → S-III → S-IV
1:1:2:1	S-I*	→	S-II	→	S-III	→	S-IV	S-I* → S-II → S-III → S-IV
1:1:1:2	S-II*	→	S-III	→	S-IV	→	S-I	S-III* → S-II → S-IV → S-I
2:2:1:1	S-I*	↔	S-III*	→	S-IV	→	S-II	S-III* → S-II → S-I → S-IV
1:1:2:2	S-II*	→	S-III	→	S-I	→	S-IV	S-II* → S-III → S-I → S-IV
$w_1:w_2:w_3:w_4$	Profil odbiorcy P2							
1:1:1:1	S-II*	→	S-III	→	S-I	→	S-IV	S-II* → S-III → S-I → S-IV
2:1:1:1	S-IV*	→	S-III*	→	S-II*	→	S-I	S-III* → S-IV → S-II → S-I
1:2:1:1	S-II*	→	S-I	→	S-III	→	S-IV	S-II* → S-I ↔ S-III → S-IV
1:1:2:1	S-II*	→	S-I*	→	S-III	→	S-IV	S-II* → S-I → S-III → S-IV
1:1:1:2	S-II*	→	S-III	→	S-IV	→	S-I	S-II* → S-III → S-IV → S-I
2:2:1:1	S-II*	→	S-III*	→	S-I	→	S-IV	S-III* → S-II → S-I → S-IV
1:1:2:2	S-II*	→	S-III	→	S-I	→	S-IV	S-II* → S-III → S-I → S-IV

Tab. 4. Wyniki analizy wielokryterialnej

Metoda programowania kompromisowego pozwala nadawać wagi poszczególnym kryteriom decyzyjnym, tzn. decydując ma możliwość uwzględnienia w obliczeniach ważności niektórych, szczególnie dla niego ważnych parametrów. Przykładowo analizując pracę układu wytwarzającego energię elektryczną, dla decydenta szczególnie znaczenie może mieć koszt wytwarzania energii elektrycznej lub wpływ pracy układu na środowisko. Zapis matematyczny miary odległości rozpatrywanego wariantu od punktu idealnego

opisuje wzór:

$$L_\alpha(S_n) = \sum_{m=1}^M w_m^\alpha (x'_m - x'_{nm})^\alpha \quad (8)$$

gdzie: L_α – miara rozbieżności rozpatrywanego scenariusza S_n od punktu idealnego, w_m – współczynnik wagi m -tego kryterium, α – wykładnik potęgowy mierzący odchylenie strategii od punktu idealnego, x'_m – m -ta współrzędna idealnego punktu, x'_{nm} – znormalizowana wartość kryterium ocenianego.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 4–9. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Najkorzystniejszy scenariusz w świetle przyjętych kryteriów spełnia zależność:

$$S_j = S^* \Leftrightarrow L_\alpha(S_j) = \min L_\alpha(S_n),$$

$$\text{dla } n = 1, 2, \dots, N; \alpha = 1, 2, \dots, \infty \quad (9)$$

gdzie: S^* – wybrany scenariusz.

Porównanie najlepszego scenariusza w świetle przyjętych kryteriów z pozostałymi scenariuszami realizuje się poprzez próg akceptowalności PA zdefiniowany jako:

$$PA = \frac{p}{100} \cdot \min L_\alpha(S_n) \quad (10)$$

gdzie: p – procentowa wartość odległości najlepszego scenariusza od punktu idealnego,

Akceptowalne scenariusze spełniają nierówność:

$$L_\alpha(S_n) - \min L_\alpha(S_n) < PA \quad (11)$$

W rozpatrywanym przypadku wartość „ p ” przyjęto na poziomie 10%.

Matematyczny zapis wielokryterialnego problemu decyzyjnego składającego się z czterech scenariuszy S(I–IV), rozpatrywanych za pomocą czterech kryteriów k_{1-4} , stanowi macierz decyzyjna zwana macierzą wypłat (tab. 2):

Po zastosowaniu normalizacji uzyskuje się wartości wszystkich kryteriów w ujednoliconej skali o zakresie $\langle 0; 1 \rangle$. Znormalizowaną macierz wypłat przedstawiono w tab. 3.

5. Wyniki analizy wielokryterialnej

Badanie wpływu wag kryteriów decyzyjnych na wynik analizy wielokryterialnej przeprowadzono dla wariantu, w którym wszystkim kryteriom przypisano taką samą wartość wagi w_m . Następnie badano wpływ dwukrotnego przeważenia jednego kryterium w stosunku do pozostałych na wyniki analizy wielokryterialnej. Obliczenia przeprowadzono dla dwóch wartości kryterium agregującego α równego 1 i 2. Scenariusze uszeregowano w kolejności od najbardziej do najmniej korzystnego. Akceptowalne warianty oznaczono symbolem *.

Wyniki analizy wielokryterialnej przedstawiono w tab. 4.

Wynik analizy wielokryterialnej jest uzależniony od przyjętych kryteriów, relacji wag między kryteriami, wartości przyjętego progu akceptowalności oraz od wartości kryterium agregującego α . Należy zwrócić uwagę, że elementy pierwszego wiersza znormalizowanej macierzy wypłat są wynikiem analizy energetycznej. Na wartości kryterium k_1 ma wpływ relacja między rozkładem wietrzności i nasłonecznienia a zapotrzebowaniem na moc przez odbiorcę, która określa roczne zużycie wodoru dodatkowego. Analiza ekonomiczna określająca wartości kryterium ekonomicznego k_2 jest pochodną analizy energetycznej, ponieważ wartość nakładu inwestycyjnego zależy od liczby i wartości mocy zainstalowanej jednostek tworzących hybrydowy system wytwórczy. Natomiast stopień wykorzystania hybrydowego systemu wytwórczego do pokrywania obciążenia będzie determinował ograniczenie emisji dwutlenku węgla. Zatem wyniki analizy energetycznej pośrednio determinują macierz wypłat

i znormalizowaną macierz wypłat, a te z kolei dla zadanych wartości kryterium agregującego α i procentowej zawartości progu akceptowalności p wyznaczają uszeregowanie scenariuszy.

Analizując wyniki wpływu przeważenia jednego kryterium względem pozostałych, można stwierdzić, że w przypadku profilu P1 dwukrotne przeważenie danego kryterium determinowało wskazanie preferowanego przez to kryterium scenariusza jako wariantu najkorzystniejszego. W przypadku profilu odbiorcy P2 najczęściej wskazywanym wariantem jest scenariusz S-II, w którym system pokrywa podstawę obciążenia, natomiast pozostałe zapotrzebowanie pokrywa układ hybrydowy.

Należy zauważyć, że kryteria k_1 – jednostkowe zużycie wodoru dodatkowego oraz k_2 – jednostkowy koszt wytworzenia energii elektrycznej przez układ hybrydowy reprezentują bezpośrednio interes inwestora w hybrydowy system wytwórczy. Z punktu widzenia inwestora ważne jest, aby koszty eksploatacyjne były jak najmniejsze przy możliwie najmniejszym zużyciu wodoru dodatkowego. Z kolei para kryteriów k_3 – jednostkowa emisja dwutlenku węgla i k_4 – stopień wykorzystania mocy zamówionej reprezentują punkt widzenia systemu elektroenergetycznego. Dla systemu elektroenergetycznego priorytetem jest ograniczenie emisji dwutlenku węgla, co wynika z przyjętych dyrektyw Unii Europejskiej, oraz minimalizacja zmienności obciążenia związana z utrzymaniem stabilności jego pracy.

W związku z powyższym rozpatrzono także przypadki, w których przeważały pary kryteriów k_1 i k_2 oraz k_3 i k_4 .

W przypadku przeważenia pary kryteriów k_1 i k_2 akceptowalnym scenariuszem dla α 1 i 2 jest scenariusz S-III. Z kolei przy przeważeniu kryteriów k_3 i k_4 w obydwu rozpatrywanych przypadkach jako wariant najkorzystniejszy wskazany został S-II, w którym system elektroenergetyczny pracuje w podstawie obciążenia.

6. Wnioski

Wyniki otrzymane na podstawie przeprowadzonych wielokryterialnych analiz rozdziału obciążeń między hybrydowym systemem wytwórczym a systemem elektroenergetycznym pozwalają na sformułowanie następujących wniosków:

- nie jest obecnie możliwe całkowite zastąpienie klasycznego systemu elektroenergetycznego odnawialnymi źródłami energii połączonymi w hybrydowe systemy wytwórcze. Z rozpatrywanych wariantów scenariusze skrajne S-I i S-IV są najczęściej wskazywane jako wariant najgorszy
- przy uwzględnieniu aspektów energetycznych, ekonomicznych i środowiskowych można, poprzez dobór wartości wag kryteriów decyzyjnych, ustalić rozdział obciążeń między hybrydowym systemem wytwórczym a systemem elektroenergetycznym, tak aby uwzględnione zostały zarówno potrzeby sektora wytwórczego systemu elektroenergetycznego, jak i samego układu hybrydowego.

Zaproponowany model analizy może stanowić punkt wyjścia do optymalizowania pracy hybrydowych systemów wytwórczych opartych na źródłach o stochastycznym charakterze pracy w systemie elektroenergetycznym. Możliwe jest rozbudowywanie tego modelu, np. przez rozbudowywanie o nowe kryteria decyzyjne.

Bibliografia

1. Ahmed N.A., On-Grid Hybrid Wind/ Photovoltaic/Fuel Cell Energy System, IPEC, Conference on Power & Energy, 2012.
2. Ceran B., Sroka K., 2015 – Performance Analysis of a Hybrid Generation System of Wind Turbines, Photovoltaic Modules, and a Fuel Cell, *Acta Energetica* 2015, No. 2/23, s. 36–42.
3. Chmielniak T., Rusin A., Łukowicz H., Modernizacja i rewitalizacja istniejących bloków węglowych ważnym warunkiem stabilności sektora wytwarzania elektryczności, *Polityka Energetyczna* 2016, t. 19, z. 4, s. 49–60.
4. Mbarek E., Belhadj J., Photovoltaic Wind hybrid system integrating a Permanent Exchange Membrane Fuel Cell (PEMFC), Conference “Systems, Signals and Devices”, 2009.
5. Mucha Z., Mikosz J., Generowicz A., Zastosowanie analizy wielokryterialnej do wyboru technologii w małych oczyszczalniach ścieków, *Czasopismo Techniczne. Środowisko* 2012, z. 4, s. 145–155.
6. Wang C., Nehrir M.H., Power Management of a Stand-Alone Wind/ Photovoltaic/Fuel Cell Energy System, Energy Conversion, IEEE Transactions on energy conversion, Vol. 23, No. 3, September 2008.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 4–9. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Bartosz Ceran

mgr inż.

Politechnika Poznańska

e-mail: bartosz.ceran@put.poznan.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej na kierunku elektrotechnika, specjalność elektroenergetyka. Od 2009 roku pracuje w Instytucie Elektroenergetyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej na stanowisku asystenta. Jego zainteresowania naukowe dotyczą zagadnień rozproszonego wytwarzania energii elektrycznej i ciepła ze szczególnym uwzględnieniem technologii ogniw paliwowych.

Krzysztof Sroka

dr inż.

Politechnika Poznańska

e-mail: krzysztof.sroka@put.poznan.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrycznym Politechniki Poznańskiej (1976). Stopień naukowy doktora nauk technicznych uzyskał na swoim macierzystym wydziale (1986). Obecnie pracuje w Instytucie Elektroenergetyki Wydziału Elektrycznego Politechniki Poznańskiej na stanowisku adiunkta. Jego zainteresowania naukowe obejmują: zagadnienia związane z pracą elektrowni w systemie elektroenergetycznym, problematyką obrony i odbudowy zdolności wytwórczych elektrowni oraz elektrociepłowni w stanach awarii katastrofalnych, skojarzonym wytwarzaniem energii elektrycznej i ciepła.