Zeszyty Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk 1(111).
Zagadnienia surowców energetycznych i energii w gospodarce krajowej.
Zagrożenia dla bezpieczeństwa energetycznego Polski i UE
DOI: 10.33223/zn/2023/11, s. 131–142

Bartosz CERAN[1]
Robert WRÓBLEWSKI[2]

Wyznaczanie wartości czasu wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera zasilanego z farmy fotowoltaicznej

Wprowadzenie

„Polska Strategia Wodorowa do roku 2030 z perspektywą do 2040 r." określa cele i działania dotyczące rozwoju technologii wodorowych w sektorach energetyki, transportu oraz przemysłu (Gov 2023). Wdrażanie technologii wodorowych w sektorze energetyki ma związek z transformacją energetyczną, która ma na celu zwiększenie udziału źródeł OZE do produkcji tzw. zielonego wodoru (Bartosik 2016), wyprodukowanego w procesie elektrolizy wody przy zasilaniu elektrolizera energią elektryczną ze źródeł odnawialnych (Chmielniak 2022; Ceran 2020).

Obecnie pojawia się coraz więcej planów na tego typu inwestycje. Przykładowo ZE PAK planuje instalacje produkcji zielonego wodoru w procesie elektrolizy, przy czym do jego zasilania wykorzystywana będzie energia elektryczna wytworzona w jednostkach wytwórczych Elektrowni Konin pracujących w oparciu o kotły opalane biomasą. Moc elektrolizera ma wynosić 2,5 MW i docelowo, wg planów, zostać zwiększona do 5 MW (ZEPAK 2023).

Innym przykładem jest PKP Energetyka, która planuje budowę mikrosieci kolejowej zasilanej zielonym wodorem. Przy podstacji trakcyjnej Garbce, według założeń projektu, ma powstać system do magazynowania energii bazujący na wodorze, który będzie produkowany przez elektrolizery zasilane energią z farmy fotowoltaicznej. Uruchomienie instalacji zaplanowano na rok 2023 (PKP Energetyka 2023).

[1] Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Poznań;
ORCID iD:0000-0003-0207-3193; e-mail: bartosz.ceran@put.poznan.pl
[2] Politechnika Poznańska, Instytut Elektroenergetyki, Poznań;
ORCID iD: 0000-0003-3256-6028; e-mail: robert.wroblewski@put.poznan.pl

Istotną kwestią związaną z planowaniem rozwoju gospodarki wodorowej jest zapewnienie odpowiedniej wartości mocy w systemie elektroenergetycznym do zasilania elektrolizerów. Koszt energetyczny produkcji 1 kg zielonego wodoru wynosi około 60–70 kWh. Niezbędne jest zatem, w kontekście rozwoju sektora energetyki wodorowej, zwiększenie wartości mocy zainstalowanej w systemie elektroenergetycznym. Według autorów raportu „Zielony wodór z OZE w Polsce", w celu rocznego wytworzenia 100 TWh zielonego wodoru należy w systemie elektroenergetycznym zainstalować 20 GW w farmach fotowoltaicznych, 20 GW w farmach wiatrowych lądowych oraz 20 GW w farmach wiatrowych morskich (DISE, PSEW 2021).

Dodatkowym pozytywnym aspektem wynikającym z procesu produkcji wodoru zielonego przez zasilanie elektrolizerów ze źródeł odnawialnych jest, z punktu eksploatacji systemu elektroenergetycznego, zmniejszenie wpływu ich stochastycznego charakteru produkcji na stabilną pracę sieci elektroenergetycznych. Wykorzystanie źródeł energii elektrycznej o losowym charakterze produkcji w technologii Power to Gas P2G właściwie rozwiązuje problem stabilnej pracy systemu elektroenergetycznego (Ceran 2019).

Wykorzystanie energii elektrycznej ze źródeł PV do zasilania elektrolizera jest jednym z najczęściej analizowanych w literaturze naukowej wariantem produkcji wodoru w procesie elektrolizy (Kumar 2019; Widera 2020). Relacje między wartościami mocy nominalnej elektrolizera a mocy farmy PV, z której będzie on zasilany, przekładają się bezpośrednio na wartość czasu wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera. Z kolei jego wartość decyduje o opłacalności danej instalacji.

W rozdziale przedstawiono analizę energetyczną układu PV-elektrolizer do produkcji zielonego wodoru. Głównym celem analizy było wyznaczenie zależności między stosunkiem mocy farmy PV do elektrolizera (P_{PV}/P_{El}) a wartością czasu wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera (T_{EL}). Następnie zaproponowano metodologię doboru wartości mocy i pojemności baterii elektrochemicznej w celu wykorzystania nadwyżek energii z farmy fotowoltaicznej do produkcji wodoru w godzinach niesłonecznych.

1. Schemat analizowanego układu

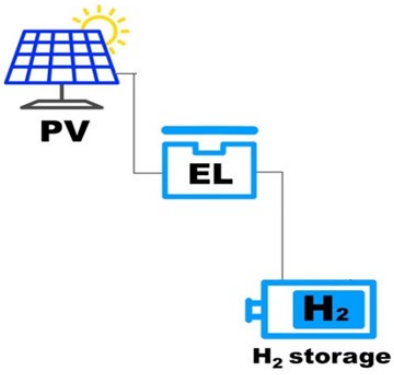
Schemat blokowy rozpatrywanego układu przedstawiono na rysunku 1 (Ceran 2022).

Roczny czas wykorzystania mocy zainstalowanej farmy fotowoltaicznej opisuje wzór:

$$T_{PV} = \frac{E_{PV}}{P_{N_PV}} \tag{1}$$

gdzie:

T_{PV} – roczny czas wykorzystania mocy zainstalowanej farmy fotowoltaicznej [h],
E_{PV} – roczna produkcja energii elektrycznej przez farmę PV [kWh],
P_{N_PV} – moc nominalna farmy fotowoltaicznej [kW].



Rys. 1. Schemat blokowy analizowanego układu: *PV* – farma fotowoltaiczna, *El* – elektrolizer, H_2 storage – zbiornik wodoru

Fig. 1. Block diagram of analyzed system: *PV* – solar farm, *El* – electrolyzer, H_2 storage – hydrogen tank

Produkcję energii elektrycznej z farmy PV opisuje wzór:

$$E_{PV} = \int P_{PV}(t)dt \approx \sum_{i=1}^{8760} P_{PV}(t)\Delta t \tag{2}$$

gdzie:

$P_{PV}(t)$ – chwilowa wartość mocy generowanej przez farmę *PV* [kW],
Δt – przedziały czasowe [h].

Chwilową wartość mocy generowanej można wyznaczyć na podstawie wzoru:

$$P_{PV} = S \cdot G(t) \cdot \eta_{PV} \cdot W_w \tag{3}$$

gdzie:

$G(t)$ – chwilowa wartość natężenia promieniowania słonecznego [kW/m^2],
S – powierzchnia czynna paneli *PV* [m^2],
η_{PV} – sprawność paneli *PV*,
W_w – współczynnik korekcyjny uwzględniający wpływ temperatury paneli *PV* na wydajność produkcji.

Czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera opisuje wzór:

$$T_{El} = \frac{E_{El}}{P_{N_El}} \tag{4}$$

gdzie:

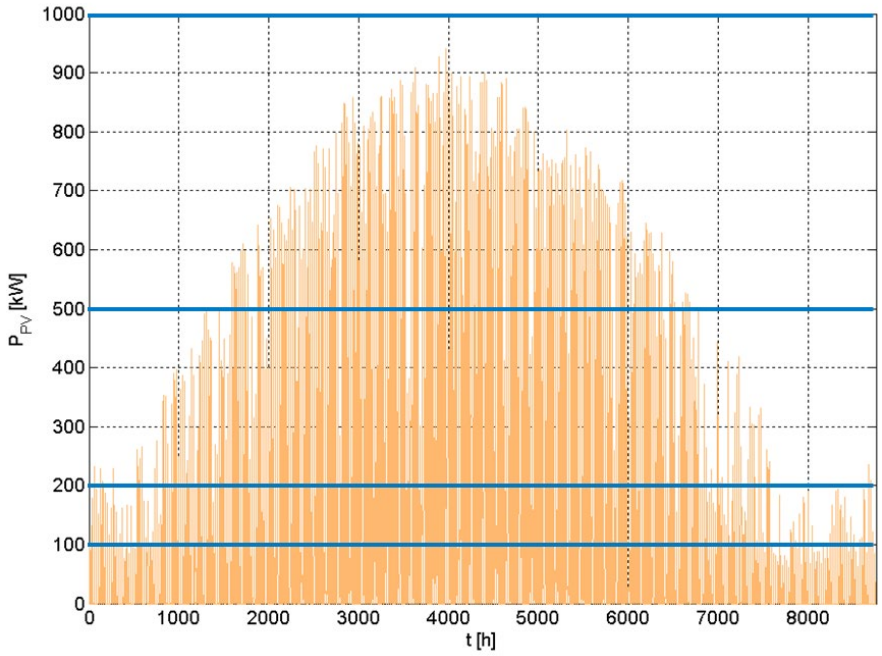
T_{El} – roczny czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera [h],
E_{El} – roczna wartość energii elektrycznej zużytej przez elektrolizer [kWh],
P_{N_El} – moc nominalna elektrolizera [kW].

2. Czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera zasilanego z farmy PV

Czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera zasilanego z farmy fotowoltaicznej zależy od relacji między wartością jego mocy nominalnej a wartością mocy farmy *PV*, zgodnie z zależnością:

$$T_{El} = f\left(\frac{P_{El}}{P_{PV}}\right) \tag{5}$$

Na rysunku 2 przedstawiono roczny profil produkcji energii elektrycznej farmy fotowoltaicznej o mocy nominalnej 1000 kW oraz przykładowe wartości mocy nominalnej zasilanego z niej elektrolizera.



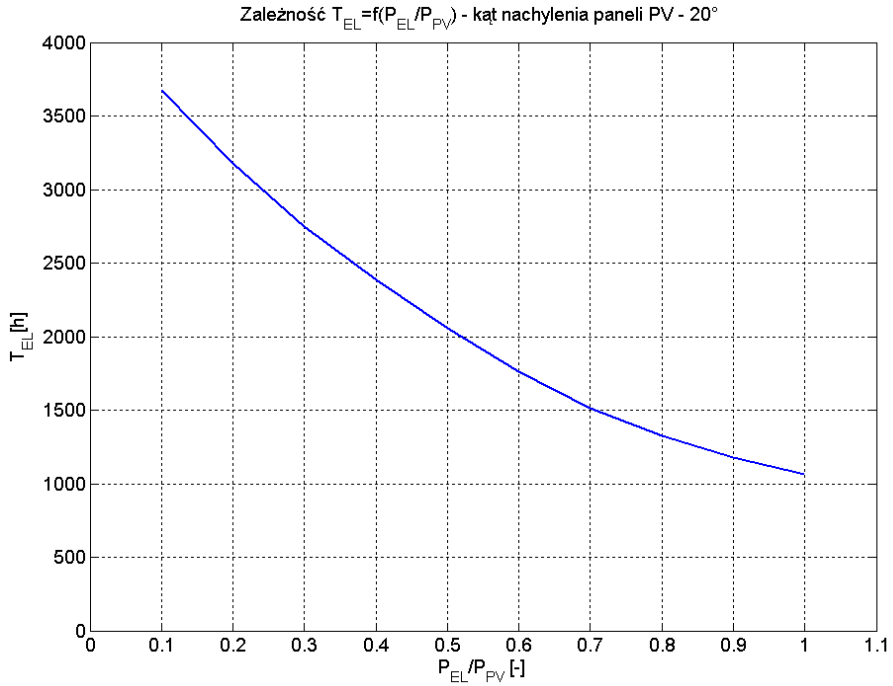
Rys. 2. Przykładowe wartości mocy elektrolizera zasilanego z farmy *PV* o mocy 1000 kW

Fig. 2. Examples of the power values of an electrolyser powered by a *PV* farm with a capacity of 1000 kW

W przypadku, gdy moc elektrolizera jest równa mocy nominalnej farmy *PV* czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera będzie równy, przy pominięciu strat energii na przesyle od farmy do elektrolizera, wartości czasu wykorzystania mocy zainstalowanej farmy *PV*. Im mniejsza będzie wartość mocy elektrolizera w stosunku do mocy farmy *PV*, z której jest on zasilany, tym większa będzie wartość czasu wykorzystania jego mocy zainstalowanej. Jest to związane z faktem, że elektrolizer o mniejszej wartości mocy względem farmy *PV* będzie przez nią każdej doby w roku dłużej zasilany.

3. Wyniki analizy energetycznej

Przedmiotem badań symulacyjnych jest farma *PV* o mocy 1000 kW, z której zasilany jest elektrolizer. Wartość mocy elektrolizera została zmieniana w przedziale od 100 kW do 1000 kW. Na rysunku 3 przedstawiono wykres funkcji opisanej wzorem 5. Symulacje przeprowadzono dla kąta nachylenia paneli *PV* równego 20°.



Rys. 3. Wykres funkcji $T_{El} = f(P_{El}/P_{PV})$ – kąt nachylenia paneli *PV* równy 20°

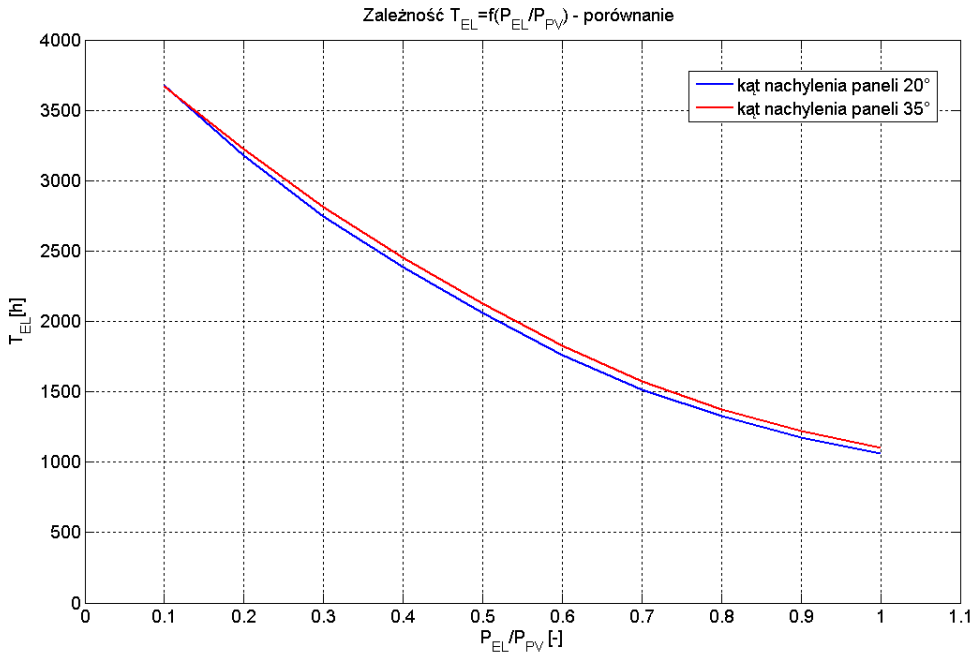
Fig. 3. Graph of the function $T_{El} = f(P_{El}/P_{PV})$ – inclination angle of *PV* panels equal 20°

Wyznaczona funkcja $T_{EL} = f(P_{EL}/P_{PV})$ pozwala na prowadzenie wstępnych analiz techniczno-ekonomicznych instalacji PV elektrolizer w uproszczony sposób, bez konieczności

prowadzenia czasochłonnych analiz energetycznych. Nieliniowość charakterystyki wynika z faktu, że wraz ze zwiększaniem mocy elektrolizera wartość energii do niego doprowadzonej także wzrasta nieliniowo. Jest to bezpośrednio związane z faktem, że instalacja *PV* osiąga lepsze wyniki produkcyjne w okresie letnim w stosunku do okresu zimowego.

Dla wariantu, w którym stosunek P_{El}/P_{PV} wynosi 1, czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera jest równy wartości czasu wykorzystania mocy zainstalowanej farmy *PV*. W przypadku wartości stosunku P_{El}/P_{PV} = 0,7 czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera wynosi 1500 h. Z kolei dla wartości współczynnika 0,2 czas wykorzystania mocy elektrolizera wynosi 3200 h. Wraz ze zmniejszaniem wartości stosunku P_{El}/P_{PV} rośnie wartość energii niewykorzystanej z farmy *PV* do produkcji wodoru.

W celu zbadania wpływu kąta nachylenia paneli *PV* na przebieg charakterystyki T_{EL} = $= f(P_{EL}/P_{PV})$. Przeprowadzono badania symulacyjne dla kąta nachylenia paneli *PV* 35°. Wyniki przedstawiono na rysunku 4 i w tabeli 1.



Rys. 4. Porównanie charakterystyki $T_{El} = f(P_{El}/P_{PV})$ dla różnych wartości kątów nachylenia paneli *PV*

Fig. 4. Comparison of the characteristics of $T_{El} = f(P_{El}/P_{PV})$ for different values of inclination angles of *PV* panels

Wartość kąta nachylenia paneli *PV* 20° i 35° w niewielkim stopniu wpływa na czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera zasilanego z farmy *PV*. Dla wartości współczynnika równego 1 różnica ta wynosi 40 h. W tabeli 1 przedstawiono różnice między wartościami czasu wykorzystania mocy zainstalowanej dla wybranych wartości stosunku $P_{EL}/P_{PV.}$ Dla wartości P_{EL}/P_{PV} = 0,1 czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera z farmy o ką-

cie nachylenia paneli 20° jest większy o około 8 godzin od wartości czasu dla elektrolizera zasilanego z farmy o kącie nachylenia paneli równym 35°. Wynika to z faktu, że instalacja fotowoltaiczna o kącie nachylenia paneli 20° charakteryzuje się większą produkcją w okresie zimowym w porównaniu z instalacją o kącie nachylenia paneli 35°.

TABELA 1. Porównanie wartości T_{EL} dla różnych kątów nachylenia paneli *PV*

TABLE 1. Comparison of T_{EL} values for different inclination angles of *PV* panels

L.p.	P_{El}/P_{PV}	T_{EL} [h]
1	0,1	–8,3
2	0,2	46,8
3	0,3	61,7
4	0,4	65,4
5	0,5	68,1
6	0,6	66
7	0,7	59,6
8	0,8	52,4
9	0,9	46,7
10	1,0	40

4. Wykorzystanie nadmiaru energii elektrycznej z PV

Zwiększenie czasu wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera skutkuje zwiększeniem wartości energii z farmy *PV*, która nie zostaje wykorzystana do produkcji wodoru. W przypadkach, gdy $P_{EL} < P_{PV}$ nadwyżki energii można oddać do sieci elektroenergetycznej lub rozpatrzyć wykorzystanie baterii elektrochemicznej do przeniesienia nadwyżki produkcji na godziny niesłoneczne. Oczywiście instalowanie baterii będzie miało sens wtedy, gdy zysk związany ze sprzedażą dodatkowo wyprodukowanego wodoru przekroczy, w stopniu zadowalającym inwestora, koszty zakupu i instalacji baterii.

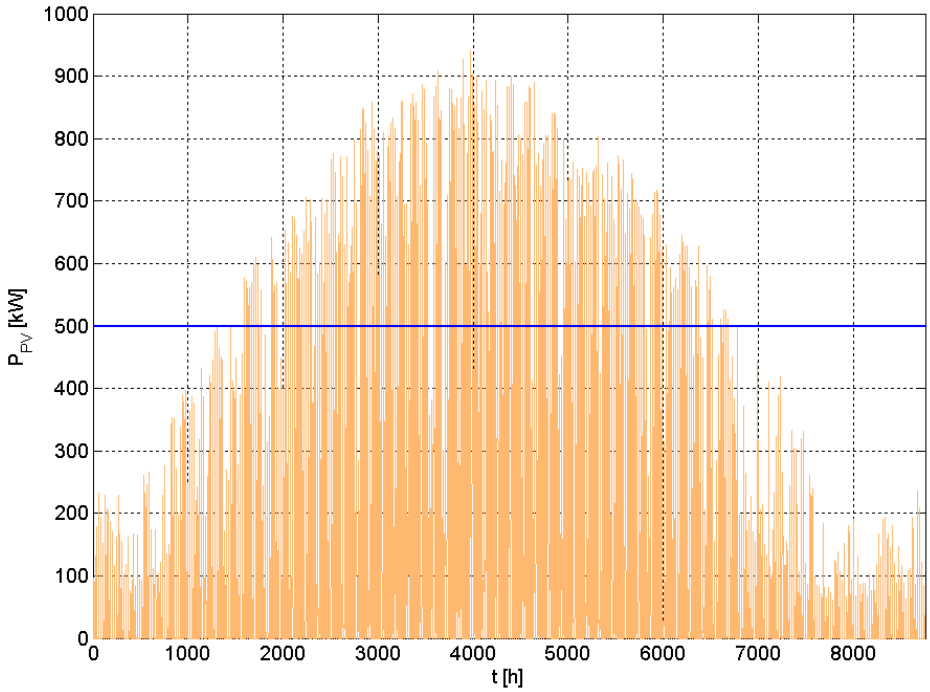
W celu wykorzystania nadwyżki energii zaproponowano algorytm doboru pojemności i mocy baterii elektrochemicznej w oparciu o następujące równania:

$$E_{PV_NIEWYKORZYSTANE} = \sum_{i=1}^{8760} P_{PV}(t)\Delta t, \quad \text{gdy} \quad P_{PV}(t) > P_{N_El} \tag{6}$$

$$E_{PV_El} = \sum_{i=1}^{8760} P_{PV}(t)\Delta t, \quad \text{gdy} \quad P_{PV}(t) \le P_{N_El} \tag{7}$$

$$E_{PV_NIEWYKORZYSTANE} = E_{P_BAT}, \quad \text{gdy} \quad P_{PV_NIEWYKORZYSTANE} \le P_{BAT} \tag{8}$$

$$E_{PV_NIEWYKORZYSTANE} = E_{PV_NIEZMAGAZYNOWANE}, \quad \text{gdy} \quad P_{PV_NIEWYKORZYSTANE} > P_{BAT} \tag{9}$$



Rys. 5. Zasilanie elektrolizera o mocy 500 kW przez farmę fotowoltaiczną o mocy 1000 kW

Fig. 5. Power supply of the electrolyser with a capacity of 500 kW by a photovoltaic farm with a capacity of 1000 kW

$$E_{BAT} = E_{P_BAT}, \quad \text{gdy} \quad E_{P_BAT} \leq C_{BAT} \tag{10}$$

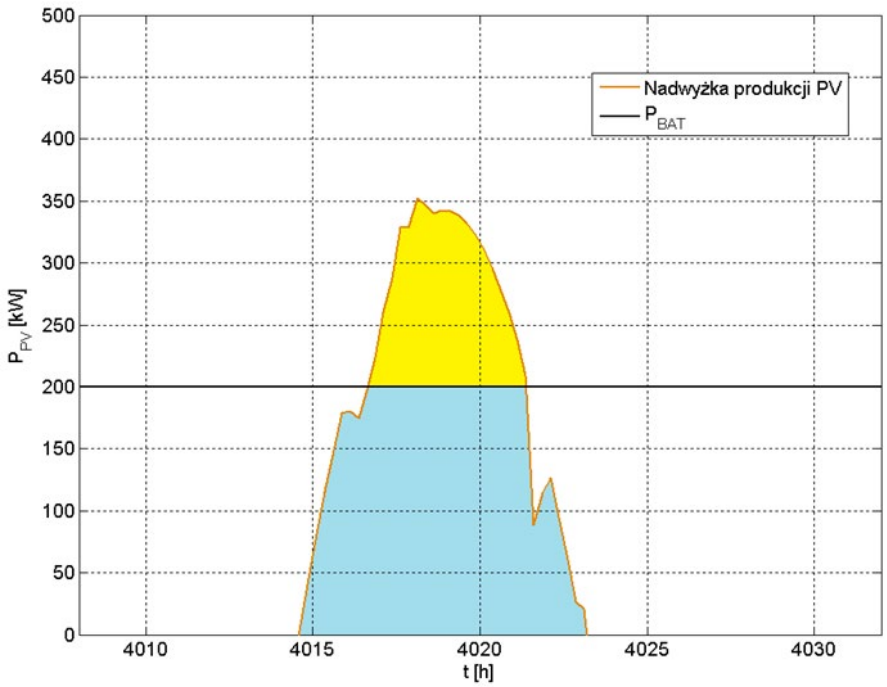
$$E_{BAT} = C_{BAT}, \quad \text{gdy} \quad E_{P_BAT} > C_{BAT} \tag{11}$$

$$E_{O_BAT} = E_{BAT} \cdot \eta_{BAT} \tag{12}$$

gdzie:

$E_{PV_NIEWYKORZYSTANE}$ – niewykorzystany potencjał produkcji z *PV* [kWh],
$E_{PV_ELEKTROLIZER}$ – energia elektryczna przeznaczona z *PV* na zasilanie elektrolizera [kWh],
E_{P_BAT} – energia z nadwyżki z *PV*, którą potencjalnie, w zależności od pojemności baterii można zmagazynować [kWh],
$E_{PV_NIEZMAGAZYNOWANE}$ – niezmagazynowana energia elektryczna [kWh],
E_{BAT} – energia elektryczna zmagazynowana w baterii [kWh],
C_{BAT} – pojemność baterii [kWh],
E_{O_BAT} – energia elektryczna odzyskana z baterii [kWh].

W celu zobrazowania działania algorytmu doboru parametrów baterii opartego o równania 6–12 posłużono się poniższym przykładem. Na rysunku 6 przedstawiono przykładowy dobowy niewykorzystany potencjał produkcji z farmy PV, który można zmagazynować. Zadana moc baterii dzieli pole niewykorzystanego potencjału produkcji z farmy *PV*, na energię niezmagazynowaną (pole żółte) oraz na energię, którą można zmagazynować (pole niebieskie). Jeśli $C_{BAT} \geq E_{P_BAT}$ wówczas cała energia, którą reprezentuje niebieskie pole, zostaje zmagazynowana.



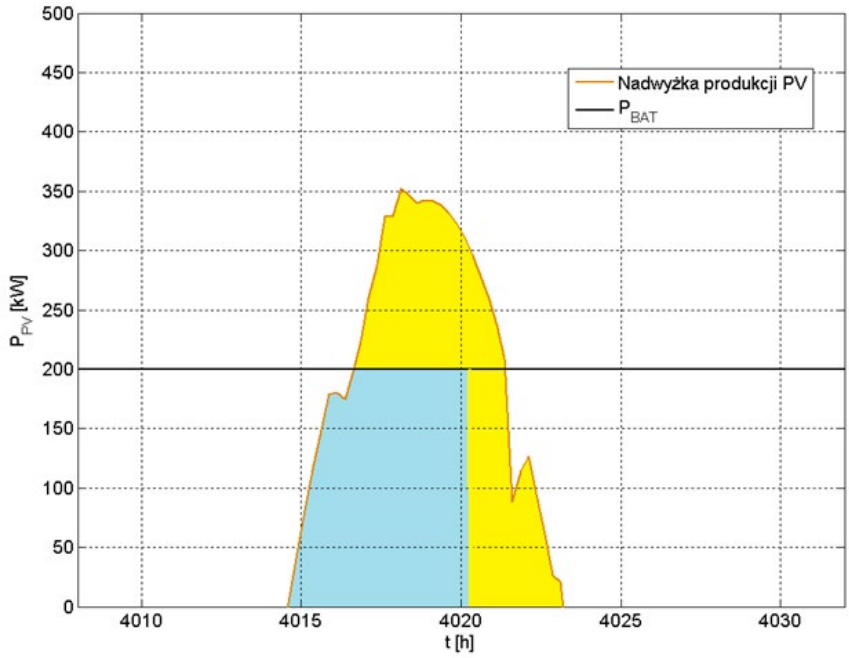
Rys. 6. Dobór parametrów baterii – $C_{BAT} \geq E_{P_BAT}$

Fig. 6. Selection of battery parameters – $C_{BAT} \geq E_{P_BAT}$

Jeśli natomiast $C_{BAT} < E_{P_BAT}$, wówczas zostaje zmagazynowana energia odpowiadająca pojemności baterii. Pozostała wartość E_{P_BAT} jest energią niezmagazynowaną (rys. 7).

Podsumowanie

Transformacja energetyczna ma na celu odejście od paliw węglowych, rozbudowanie energetyki jądrowej, zwiększenie wykorzystania energii ze źródeł odnawialnych, zwiększenie wykorzystania wodoru jako paliwa oraz jako nośnika energii.



Rys. 7. Dobór parametrów baterii – $C_{BAT} < E_{P_BAT}$

Fig. 7. Selection of battery parameters – $C_{BAT} < E_{P_BAT}$

Optymalizacja procesu produkcji wodoru zielonego, czyli wytworzonego w procesie elektrolizy przy zasilaniu elektrolizerów ze źródeł OZE, wymaga prowadzenia analiz techniczno-ekonomicznych oraz budowania modeli matematycznych, które pozwolą na minimalizowanie kosztów jego produkcji.

O opłacalności użytkowania elektrolizera, w procesie produkcji wodoru zielonego, decyduje w dużej mierze czas wykorzystania mocy zainstalowanej. Wykorzystując proponowaną charakterystykę $T_{EL} = f(P_{EL}/P_{PV})$, inwestor może w prosty i szybki sposób określić produkcję wodoru w zależności od wartości mocy elektrolizera w stosunku do mocy farmy fotowoltaicznej. Ze względu na stosunkowo małą zmienność rocznego rozkładu profilu nasłonecznienia, w warunkach polskich, zaprezentowaną charakterystykę można wykorzystać do wstępnych szacunków energetycznych dla inwestycji planowanych na terenie naszego kraju, niezależnie od lokalizacji.

Przy mniejszej wartości mocy elektrolizera, nadwyżki energii można wykorzystać do produkcji wodoru w godzinach niesłonecznych poprzez zainstalowanie baterii elektrochemicznych lub sprzedać je do sieci elektroenergetycznej. O zagospodarowaniu niewykorzystanych nadwyżek energii elektrycznej z farmy fotowoltaicznej będą decydować wskaźniki ekonomiczne.

Literatura

Bartosik M. i in. 2016 – Bartosik, M., Kamrat, W., Kaźmierkowski, M., Lewandowski, W., Pawlik, A., Peryt, T., Skoczkowski, T., Strupczewski, A. i Szeląg, A. 2016 – Magazynowanie energii elektrycznej i gospodarka wodorowa. *Przegląd Elektrotechniczny* 92/12, s. 332–340, DOI: 10.15199/48.2016.12.78.

Ceran, B. 2019 – The concept of use of PV/WT/FC hybrid power generation system for smoothing the energy profile of the consumer. *Energy* 167, s. 853–865, DOI: 10.1016/j.energy.2018.11.028.

Ceran, B. 2020 – Multi-Criteria comparative analysis of clean hydrogen production scenarios. *Energies* 13(16), DOI: 10.3390/en13164180.

Ceran, B. 2022 – Analiza energetyczna pracy układu instalacja fotowoltaiczne – elektrolizer przeznaczonego do produkcji wodoru. *Zeszyty Naukowe Instytutu gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 1(110), s. 119–128, DOI: 10.24425/140531.

Chmielniak T. i in. 2022 – Chmielniak, T., Skorek-Osikowska, A. i Bartela, Ł. 2022 – Potencjał zastosowania wodoru w polskim systemie energetycznym. *Zeszyty Naukowe Instytutu gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią PAN* 1(110), s 7–22, DOI: 10.24425/140521.

DISE, PSEW 2021 – Zielony wodór z OZE w Polsce, Raport 2021. Wykorzystanie energetyki wiatrowej i PV do produkcji zielonego wodoru jako szansa na realizację założeń Polityki Klimatyczno-Energetycznej UE w Polsce, Dolnośląski Instytut Studiów Energetycznych, Polskie Stowarzyszenie Energetyki Wiatrowej.

Kumar, S.S. i Himabindu, V. 2019 – Hydrogen production by PEM water electrolysis – A review. *Materials Science for Energy Technologies* 2(3), s. 442–454, DOI: 10.1016/j.mset.2019.03.002.

Widera, B. 2020 – Renewable hydrogen implementations for combined energy storage, transportation and stationary applications. *Thermal Science and Engineering Progress* 16, DOI: 10.1016/j.tsep.2019.100460.

Gov 2023 – [Online] Dostępne w: https://www.gov.pl/web/klimat/polska-strategia-wodorowa-do-roku-2030-z-perspektywa-do-roku-2040-opublikowana-w-monitorze-polskim [Dostęp: 28.11.2022].

PKP ENERGETYKA 2023 – [Online] https://www.pkpenergetyka.pl/Aktualnosci/2022/PKP-Energetyka-z-nowatorskim-systemem-magazynowania-energii-opartym-o-zielony-wodor [Dostęp: 28.11.2022].

ZEPAK 2023 – [Online] https://www.zepak.com.pl/pl/program-czysta-polska/produkcja-wodoru-w-ze-pak-sa.html [Dostęp: 28.11.2022].

Wyznaczanie wartości czasu wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera zasilanego z farmy fotowoltaicznej

Słowa kluczowe: wodór, elektrolizer PEM, analiza energetyczna, bateria elektrochemiczna

Streszczenie: W rozdziale przedstawiono przykłady inwestycji w technologie wodorowe w Polsce. Przedstawiono wyniki analizy energetycznej układu farma fotowoltaiczna–elektrolizer do produkcji czystego, zielonego wodoru. Zdefiniowano wzór na czas wykorzystania mocy zainstalowanej elektrolizera zasilanego z farmy *PV* oraz wyznaczono jego wartość. Przedstawiono profil produkcji energii elektrycznej przez farmę *PV*. Obliczenia wykonano na podstawie danych nasłonecznienia dla lokalizacji miasta Poznania. Przytoczono wzór na wartość mocy generowanej przez farmę *PV* oraz wzory pozwalające określić roczną wartość masy wyprodukowanego wodoru. Przebadano wpływ wartości stosunku mocy elektrolizera do mocy farmy fotowoltaicznej (P_{EL}/P_{PV}) na wartość czasu wykorzystania jego mocy zainstalowanej. Wyniki analizy przedstawiono w formie graficznej za pomocą charakterystyki $P_{EL}/P_{PV} = f(T_{EL})$. Zaproponowano metodologię doboru mocy i pojemności baterii elektrochemicznej w celu zwiększenia produkcji wodoru.

Determination of the value of the time of using the installed power of the electrolyser supplied from the photovoltaic farm

Keywords: hydrogen, PEM electrolyser, energy analysis, electrochemical battery

Abstract: The chapter presents examples of investments in hydrogen technologies in Poland. The results of the energy analysis of the photovoltaic farm-electrolyser system for the production of pure, green hydrogen are presented. The formula for the use of the installed power of the electrolyser supplied from a *PV* farm was defined and its value was determined. The profile of electricity production by a *PV* farm was presented. The calculations were made on the basis of insolation data for the city of Poznań. The formula for the value of the power generated by the *PV* farm and the formulas allowing to determine the annual value of the mass of produced hydrogen were presented. The influence of the ratio of the electrolyser power to the power of a photovoltaic farm (P_{EL}/P_{PV}) on the value of the utilization time of its installed power was investigated. The results of the analysis are presented graphically by means of the $PE_L/PP_V = f(T_{EL})$ characteristic. A methodology for selecting the power and capacity of an electrochemical battery was proposed to increase hydrogen production.