

Ocena efektywności generacji energii elektrycznej w instalacjach fotowoltaicznych odbiorców przemysłowych

Streszczenie. Wielu odbiorców przemysłowych rozważa inwestycję w instalacje fotowoltaiczne – sprzyjają temu rozległe przestrzenia dachów hal fabrycznych oraz istotne znaczenie wartości energii elektrycznej dla obniżenia kosztów produkcji. Właściwe wykorzystanie środków wspierających inwestycje w OZE oraz odpowiedni dobór mocy instalacji PV pozwala na maksymalizację efektów ekonomicznych zainwestowanych środków. W artykule przedstawiono metodę dopasowania mocy instalacji fotowoltaicznych do potrzeb zakładów przemysłowych na podstawie analizy rocznych przebiegów zmienności zapotrzebowania na energię elektryczną.

Abstract. Many industrial customers are considering investing in photovoltaic installations, which is facilitated by the large roof spaces of the factory halls and the importance of the value of electricity in production costs. Proper use of funds supporting investments in RES and appropriate selection of PV installation capacity allows to maximise the economic effects of invested funds. The paper presents a method of adjusting the power of photovoltaic installations to the needs of industrial plants on the basis of analysis of annual variations in electricity demand. (**Assessment of the efficiency of electricity generation in photovoltaic installations of industrial customers**).

Słowa kluczowe: instalacja fotowoltaiczna, zapotrzebowanie na moc, autokonsumpcja energii

Keywords: photovoltaic installation, power demand, auto consumption.

Wprowadzenie

Rozwój instalacji fotowoltaicznych następuje szybciej niż przypuszczano kilka lat temu – [9]. Niezależnie od mocy znamionowej instalacji (P_{PVn}) każdy inwestor rozważa ekonomikę tego przedsięwzięcia – [4],[5],[10]. Oczywiście dla farm PV o mocy zbliżonej do 1 MW (najbardziej rozpowszechniona moc dla dużych instalacji) metoda oceny efektywności ekonomicznej – [11], jest inna niż dla instalacji prosumenckiej o mocy kilku kilowatów. Dla farmy najważniejszą kwestią jest spełnienie zobowiązania zaciągniętego podczas postępowania aukcyjnego, czyli wyprodukowanie zadeklarowanej ilości energii oraz utrzymania kosztów odpowiadających zaplanowanej cenie jednej megawatogodziny – [3]. Dla prosumenta (osoby fizycznej, przedsiębiorcy, instytucji publicznej, spółdzielni mieszkaniowej, zespołu inwestorów) istotne jest jaka część wyprodukowanej energii E_{PV} zostanie przez niego skonsumowana (zużyta) na własne potrzeby, a jaka zostanie wprowadzona do sieci, wobec braku urządzeń do magazynowania – [6],[7],[8],[12]. Zużywanie jak największej części wyprodukowanej energii na potrzeby własne (autokonsumpcja) jest zdecydowanie najlepszym rozwiązaniem – [13]. Niezależnie od bardziej lub mniej korzystnych rozwiązań prawnych wspierających prosumentów - [1],[2] kwestia relacji energii zużytej na potrzeby własne (E_{PVa}) oraz jej nadwyżki (E_{PVe}), do energii całkowitej (E_{PV}), jest istotna dla oceny efektywności rozpatrywanej instalacji. W artykule przedstawiono próbę określenia zależności pomiędzy rocznym przebiegiem zmienności grupy odbiorców (przyłączonych do badanej stacji transformatorowej), mocą znamionową instalacji fotowoltaicznych użytkowanych przez tych odbiorców oraz relacją między energią zużyta, a wprowadzoną do sieci. Ponieważ badaniami objęto 19 stacji transformatorowych, analizie podlegał stosunkowo bogaty materiał statystyczny.

Podstawowe założenia i zależności

Poniżej zdefiniowano następujące zależności opisujące relacje pomiędzy energią pobieraną z sieci, a energią produkowaną w instalacji PV:

- wartość energii pobranej z sieci przez rozpatrywaną stację transformatorową

$$(1) \quad E_L = \int_0^{8760} P_L(t) dt$$

- czas użytkowania mocy szczytowej

$$(2) \quad T_S = \frac{E_L}{P_{LS}}$$

gdzie: P_{LS} , – maksymalna wartość mocy pobranej przez rozpatrywaną stację transformatorową (moc szczytowa),

- roczna produkcja energii w instalacji fotowoltaicznej

$$(3) \quad E_{PV} = \int_0^{8760} P_{PV}(t) dt$$

- roczny czas wykorzystania mocy znamionowej instalacji fotowoltaicznych (w warunkach krajowych $T_{PVS} = 900 \div 1100$ h)

$$(4) \quad T_{PVS} = \frac{E_{PV}}{P_{PVn}}$$

gdzie: P_{PVn} – moc znamionowa (sumaryczna) instalacji fotowoltaicznych przyłączonych do rozpatrywanej stacji transformatorowej,

- wskaźnik autokonsumpcji odniesiony do całkowitej rocznej produkcji instalacji fotowoltaicznych, $w_a \leq 1$

$$(5) \quad w_a = \frac{E_{PVa}}{E_{PV}} \cdot 100\%$$

- wskaźnik eksportu odniesiony do całkowitej rocznej produkcji instalacji fotowoltaicznych, $w_e < 1$

$$(6) \quad w_e = \frac{E_{PVe}}{E_{PV}} \cdot 100\%$$

$$(7) \quad w_a + w_e = 100\%$$

$$(8) \quad E_{PV} = E_{PVa} + E_{PVe}$$

Jeżeli w danej chwili $P_{PV}(t) \leq P_L(t)$ to zachodzi autokonsumpcja energii produkowanej w instalacjach fotowoltaicznych, natomiast jeżeli $P_{PV}(t) > P_L(t)$ ma miejsce eksport energii z instalacji fotowoltaicznej do sieci elektroenergetycznej.

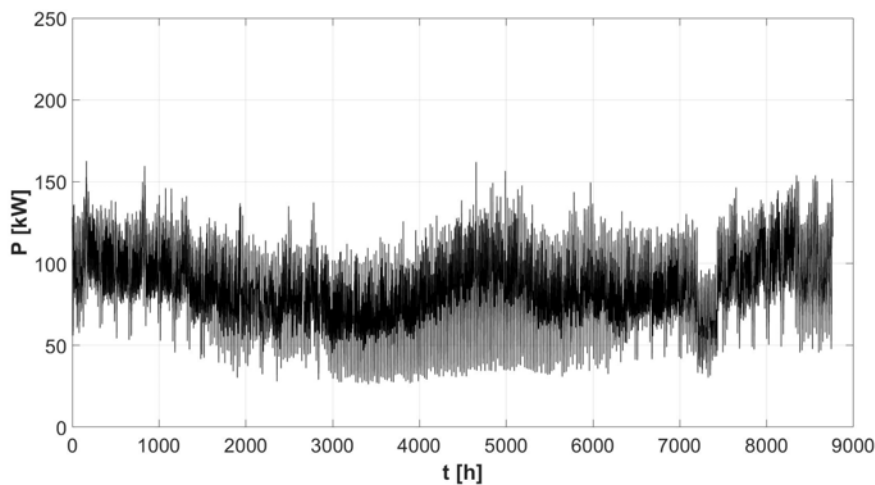
Jeżeli $w_a = 100\%$ wówczas całkowita energia produkowana przez instalacje fotowoltaiczne używana jest przez odbiorców przyłączonych do rozpatrywanej stacji transformatorowej. Warto zauważyć, że warunek $P_{PVmax} \leq P_{LS}$ nie zapewnia wartości wskaźnika $w_a = 100\%$.

Warunek $P_{PVmax} \leq P_{Ld}$ zapewnia wartość wskaźnika $w_a=100\%$ ale przy bardzo małych wartościach E_{PV} , podobnie jak $P_{PVmax} \ll P_{LS}$.
Zadanie badawcze opisane w artykule polega na określeniu takiej wartości mocy znamionowej instalacji PV (P_{PVn}), która dla rozpatrywanej stacji transformatorowej scharakteryzowanej za pomocą wielkości P_{LS} , T_S pozwala na osiągnięcie zadanego współczynnika autokonsumpcji, np. $w_a = 70\%$.

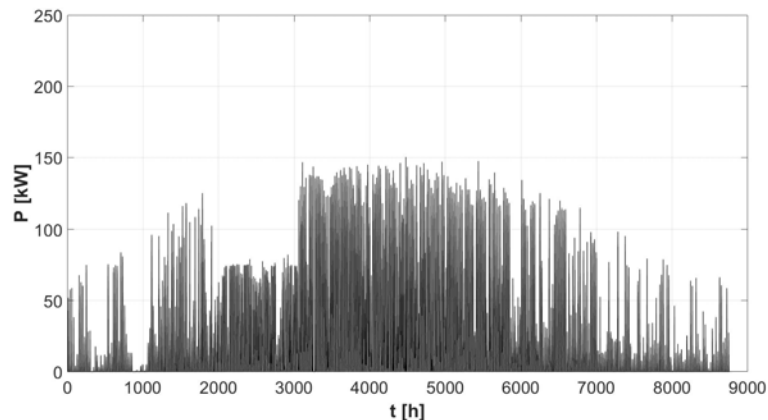
Rozwiązanie powyższego zadania oparto na analizie 19 stacji transformatorowych, których zapotrzebowanie rozpatrywano w postaci rzeczywistych, rocznych wartości zarejestrowanych mocy 15-minutowych. W stacjach tych analizowano przyłączenie hipotetycznej instalacji fotowoltaicznej, dla których roczny przebieg generowanej energii pochodzi z przeskalowywania współczynnikiem k_s mocy pochodzącej z badanej instalacji wzorcowej o mocy $P_{PVn} = 15$ kW. Tym samym $P_{PV}(t) = k_s P_{PVw}(t)$.

Tabela 1. Zestawienie badanych stacji transformatorowych i instalacji fotowoltaicznych zapewniających określoną wartość wskaźnika auto konsumpcji (90% lub 70%)

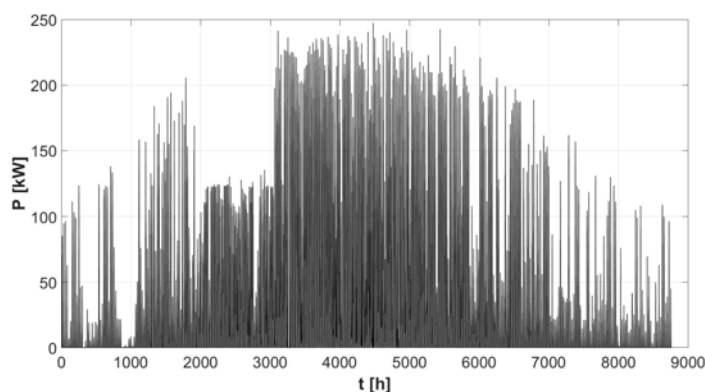
Nr stacji	S_{nT}	P_{LS}	P_{Ld}	E_L	T_S	$P_{PVn}(0,9)$	$E_{PV}(0,9)$	$P_{PVn}(0,7)$	$E_{PV}(0,7)$	$\frac{P_{PVn}(0,9)}{P_{LS}}$	$\frac{P_{PVn}(0,7)}{P_{LS}}$
-	kVA	kW	kW	kWh	h	kW	kWh	kW	kWh	kWh	kWh
1	250	162,6	26,3	751 196	4 619	165	161 966	276	270 924	1,04	1,70
2	400	149,2	6,4	296 697	1 989	75	73 621	142,5	139 879	0,50	0,96
3	250	52,7	0	151 057	2 867	38	37 547	67,5	66 259	0,73	1,28
4	250	105,6	9,8	325 519	3 083	70,5	69 203	123	120 738	0,67	1,16
5	250	108,1	1,2	290 615	2 689	60	58 897	102	100 124	0,56	0,94
6	63	27,8	0	50 131	1 806	8,5	8 393	16,3	16 049	0,30	0,59
7	100	68,5	0,1	193 383	2 823	39	38 283	70,5	69 203	0,57	1,03
8	63	32,6	0	85 874	2 633	14,4	14 135	25,5	25 031	0,45	0,78
9	40	44,7	0,3	109 438	2 314	16,5	16 197	31,5	30 921	0,37	0,70
10	63	6,5	0	10 246	1 575	1,65	1 620	3,15	3 052	0,25	0,48
11	63	50	0,1	84 374	1 687	10,65	10 454	19,8	19 436	0,22	0,40
12	40	25,4	0,1	48 506	1 910	8,85	8 687	15,75	15 460	0,35	0,62
13	63	63	0,1	103 337	1 639	18	17 669	33,75	33 129	0,29	0,54
14	40	13,7	0	22 132	1 613	3,6	3 354	7,2	7 068	0,26	0,54
15	40	16,5	0	23 705	1 435	2,9	2 798	6,0	5 890	0,17	0,36
16	40	24,8	0,1	45 175	1 820	6,75	6 626	13,8	13 546	0,28	0,56
17	30	38,5	0,2	64 369	1 673	9,0	3 834	16,9	16 638	0,23	0,44
18	40	12,8	0	9 191	718	1,7	1 620	3,2	3 092	0,13	0,25
19	63	46	0,1	87 349	1 898	11,2	11 043	22,5	22 086	0,24	0,49



Rys.1. Roczny przebieg zmienności obciążenia badanej stacji transformatorowej nr 1



Rys.2. Roczny przebieg generacji w instalacji PV (dla stacji nr 1) dla mocy zapewniającej współczynnik autokonsumpcji 90%



Rys.3. Roczny przebieg generacji w instalacji PV (dla stacji nr 1) dla mocy zapewniającej współczynnik autokonsumpcji 70%

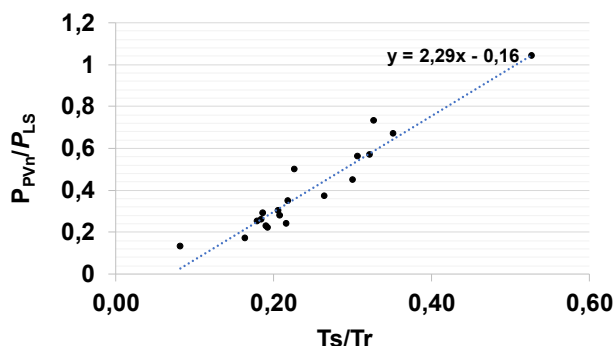
Wyniki uzyskanych analiz

W tabeli 1 przedstawiono wyniki analiz uzyskane dla badanych 19 stacji transformatorowych i zidentyfikowanych w nich hipotetycznych instalacji.

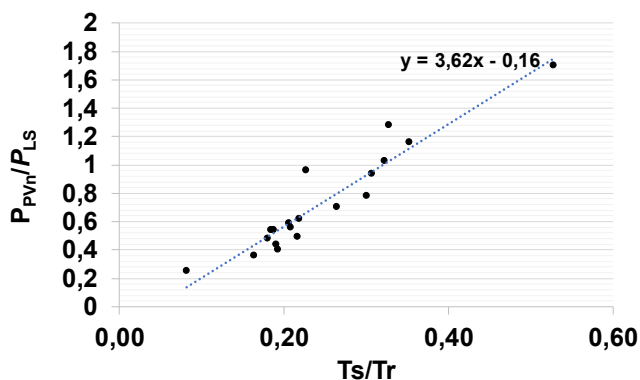
Na Rys.1 przedstawiono roczny przebieg zmienności obciążenia dla stacji nr 1, a na Rys.2 i Rys.3 przebieg generacji w instalacjach PV zapewniających współczynniki autokonsumpcji odpowiednio 90% i 70%.

Poszukiwanie postaci modelu ogólnego

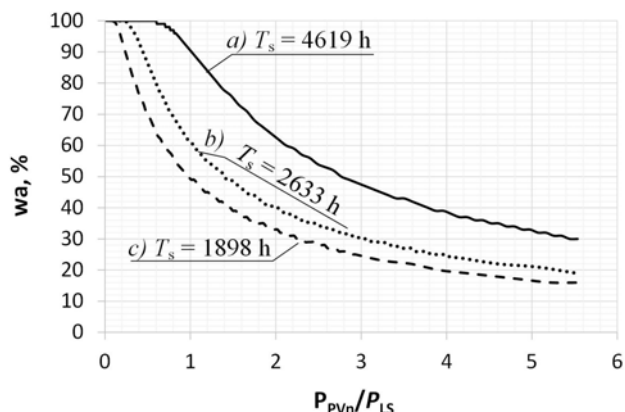
Intuicja inżynierska podpowiada, że tam gdzie roczny przebieg zmienności obciążenia jest mocno „wypełniony” (duża wartość czasu T_s) możliwości wysokiej autokonsumpcji są duże. Potwierdzają to uzyskane wyniki, pokazane na rysunkach 4, 5 i 6.



Rys.4. Zależność pomiędzy czasem użytkowania mocy szczytowej a mocą zainstalowaną instalacji PV (odniesioną do mocy szczytowej zapotrzebowania P_{PV}/P_{LS}), dla współczynnika autokonsumpcji 90%.



Rys.5. Zależność pomiędzy czasem użytkowania mocy szczytowej a mocą zainstalowaną instalacji PV (odniesioną do mocy szczytowej zapotrzebowania P_{PV}/P_{LS}), dla współczynnika autokonsumpcji 70%.



Rys.6. Zależność pomiędzy mocą zainstalowaną instalacji PV (odniesioną do mocy szczytowej zapotrzebowania P_{PV}/P_{LS}) a współczynnikiem autokonsumpcji.

Na podstawie uzyskanych wyników można stwierdzić, że na podstawie znajomości czasu użytkowania mocy szczytowej T_s obciążenia stacji transformatorowej, można w prosty sposób oszacować stopień autokonsumpcji (zużycia na własne potrzeby) energii wyprodukowanej w instalacji fotowoltaicznej przyłączonej do tej stacji. Wielkość ta zależy głównie od tego jaka jest wartość mocy znamionowej tej instalacji w stosunku do obciążenia szczytowego. Analizy prowadzone dla badanych stacji wskazały, że dla zadanych wartości współczynnika autokonsumpcji (90% i 70%) poszukiwana wartość stosunku P_{PVn}/P_{LS} jest powiązana z czasem $T_s/8760$ zależnością liniową pokazaną na rysunkach 4 oraz 5.

Jeśli zatem rozpatruje się stację dla której obciążenie szczytowe wynosi 100 kW, a czas użytkowania mocy szczytowej ma typową i często spotykaną wartość $T_s=2000$ h, to autokonsumpcja na poziomie 90% (bardzo wysoka) zostanie osiągnięta jeśli moc znamionowa instalacji PV nie przekroczy 36 kW, a autokonsumpcja 70% (dość wysoka) zostanie osiągnięta o ile moc tej instalacji nie przekroczy 66 kW.

Jeżeli rozpatruje się zmienność stosunku P_{PVn}/P_{LS} w szerokich granicach (od wartości ułamkowych po krotności rzędu 5-6) to zmiany wartości współczynnika autokonsumpcji ulegają zmianie zgodnie z zależnością pokazaną na Rys. 6. Od wartości maksymalnej wynoszącej 100% współczynnik ten maleje, przy czym stopniowo dynamika spadku jego wartości ulega zmniejszeniu. Także w tym przypadku wielkością charakterystyczną dla odróżnienia poszczególnych przebiegów jest czas T_s .

Analiza otrzymanych krzywych (uzyskano je dla 3 badanych stacji) prowadzi do przybliżonej zależności aproksymującej procentową wartość współczynnika autokonsumpcji:

$$(9) w_a = 0,021 \cdot T_s \cdot \sqrt{\left(\frac{P_{PVn}}{P_{LS}}\right)^{-1}} \text{ oraz } w_a \leq 100$$

W tabeli 2 pokazano wartości współczynnika W_a uzyskane na podstawie zależności (9) dla czasów użytkowania mocy szczytowej wynoszących 4000 h, 3000 h i 2000 h oraz wartościami stosunku P_{PVn}/P_{LS} wynoszących odpowiednio 1, 2 oraz 3.

Tabela 2. Oszacowanie procentowej wartości współczynnika W_a zgodnie z zależnością aproksymującą (9) dla różnych czasów T_s oraz mocy instalacji PV odniesionej do mocy szczytowej.

T_s [h]	$P_{PVn}/P_{LS}=1$	$P_{PVn}/P_{LS}=2$	$P_{PVn}/P_{LS}=3$
4000	83%	59%	48%
3000	62%	44%	36%
2000	42%	29%	24%

Podsumowanie

Istotny z punktu widzenia oceny efektywności ekonomicznej współczynnik autokonsumpcji energii pochodzącej z instalacji fotowoltaicznej może zostać w prosty sposób oszacowany na podstawie znajomości mocy szczytowej odbiorcy oraz czasu użytkowania mocy szczytowej. Pokazane w artykule modele i zależności uproszczone mogą podlegać dalszej analizie, przy uwzględnieniu większej liczby stacji oraz instalacji wzorcowych. Wykorzystane metody - regresja liniowa i aproksymacja potęgowa mogą zostać rozbudowane o metody wykorzystujące sztuczne sieci neuronowe oraz analizę sygnałów. Umożliwi to uwzględnienie specyficznych cech przebiegu obciążeń stacji wynikających z rodzaju przyłączonych odbiorów i ich właściwości.

Autorzy: prof. dr hab. inż. Piotr Kacejko, Politechnika Lubelska, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: p.kacejko@pollub.pl; dr hab. inż. Paweł Pijarski, Politechnika Lubelska, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: p.pijarski@pollub.pl; mgr inż. Karolina Gałązka, Politechnika Lubelska, Katedra Sieci Elektrycznych i Zabezpieczeń, ul. Nadbystrzycka 38A, 20-618 Lublin, E-mail: k.galazka@pollub.pl.

LITERATURA

- [1] Projekt Ustawy o odnawialnych źródłach energii z dnia 4 czerwca 2019
- [2] Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz. U. z 2018 r. poz. 2389 i 2245 oraz z 2019 r. poz. 42, 60 i 730
- [3] Raczkiewicz M., Minimalna cena sprzedaży energii elektrycznej oferowana na aukcji przez instalacje fotowoltaiczne do 1 MW w warunkach Polskich, *Agencja Rynku Energii S.A.*, (2019)
- [4] Dąbrowski J., Hutnik E., Włóka A., Zieliński M.: Analiza wykorzystania instalacji fotowoltaicznej typu on-grid do produkcji energii elektrycznej w budynku mieszkalnym, *Rynek Energii*, 110 (2014) nr.1, 53-59
- [5] Dąbrowski J., Hutnik E.: Analiza opłacalności produkcji energii z mikroinstalacji OZE w budynku mieszkalnym, *Rynek Energii*, 118 (2015) nr.3, 102-108
- [6] Kacejko P., Pijarski P., Gałązka K.: Prosument – przyjaciel, wróg czy tylko hobbysta?, *Rynek Energii*, 114 (2014) nr.5, 83-89
- [7] Kacejko P., Pijarski P., Gałązka K.: Prosument – krajobraz po bitwie, *Rynek Energii*, 117, (2015) nr. 2, 40-44
- [8] Kacejko P., Pijarski P., Zarządzanie mikroinstalacjami OZE - realne wyzwanie techniczne, czy tylko impuls marketingowy?, *Rynek Energii*, 122 (2016) nr. 1, 41-45
- [9] Krajowy Plan Rozwoju Mikroinstalacji OZE do 2020 r. Instytut Energetyki Odnawialnej, Warszawa 2013 r.
- [10] Ligus M., Efektywność inwestycji w odnawialne źródła energii – Analiza kosztów i korzyści, CeDeWu, Warszawa, (2012) 181 – 182
- [11] Paska J.: *Ekonomika w elektroenergetyce*, OWPW, Warszawa (2007), 93 -95.
- [12] Popczyk J.: *Prosumenctwo – innowacja przełomowa*, *Energetyka Ciepła i Zawodowa*, Nr 2/2014.
- [13] Zapałowicz Z., Szyszka D.: Stopień wykorzystania energii elektrycznej wytwarzanej przez instalacje fotowoltaiczne, *Rynek Energii*, 91 (2010) nr.6, 77- 82