

Optimization of the Selection of $P(U)$ and $Q(U)$ Characteristic Parameters of Solar Microinverters

Authors

Paweł Pijarski
Piotr Kacejko

Keywords

optimization, PV micro plants, inverter characteristics

Abstract

Currently, a dynamic increase can be observed in the number of photovoltaic plants connected to a low voltage grid. The phenomenon of power flow towards a transformer substation may cause the permissible voltage to be exceeded. There are several ways to eliminate the adverse voltage increases. In this article, the authors proposed a method for optimizing the selection of $P(U)$ and $Q(U)$ characteristics of solar plant inverters. The research shows that the use of inverters, for which both characteristics have been activated, allows to master the problem of voltage increase with a small reduction of the micro-plant output.

DOI: 10.12736/issn.2330-3022.2019201

Received by the editor: 29.04.2019

Received in revised form: 08.04.2019, 28.04.2019

Accepted: 29.04.2019

Available online: 30.10.2019

1. Introduction

A large number of micro-plants installed within one transformer substation or one series of low voltage lines contributes to the occurrence of adverse voltage conditions in the grid fragment in question. If the distributed sources' output power matched the power intake at their connection points, then the grid condition would correspond to the idle state, i.e. the power intake from the MV/LV transformer close to zero. However, the specificity of distributed sources and the technologies employed is that the correlation of their outputs with the demand is small. This means that the period of the consumers' peak demand for power does not coincide with the period of the maximum solar radiation. Therefore, in the period of its maximum generation the power in PV plants flows towards the MV/LV substation station, which causes a voltage surge and possible increase above the permissible value (440/253 V). The random nature of PV generation can cause a wide range of diurnal voltage fluctuations. This is particularly burdensome for recipients connected to this grid, as it significantly reduces the lifetime of many devices, in particular light sources.

The ways to reduce or eliminate the above threat include:

- matching the MV/LV transformer ratio with voltage changes, as a last resort – contrary to national standards – by using a transformer with an on-load tap changer and a voltage regulator
- using PV sources' reactive and active power regulation capacity

- switching off as many as needed micro-plants when the voltage increases
- using a special, dedicated, serial transformer, which increases the line reactance at a voltage rise, with simultaneous reactive power intake by the micro-plant (these systems are generally called LVR – line voltage regulators, for example a device trade-marked AEG – Thyrobox, and similar devices from ABB and Schneider Electric)
- upgrading the grid (replacing wires with larger ones and transformers with units of a higher rated power).

This article proposes the use of PV inverters' $P(U)$ and $Q(U)$ characteristics through the optimal selection of their characteristic points. These characteristics have been taken from available standards.

2. Selected documents related to micro-plant operation

Assessment of the quality of electricity parameters is one of the important tasks aimed at ensuring the power grid's proper operation. The following documents containing the requirements for these parameters:

- Polish Standard PN-EN 50160 *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych* [1], a translation of the CENELEC standard: EN-50160 *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*. This standard sets the voltage parameters and acceptable ranges of deviations

and deformations in low-voltage distribution grids under normal operating conditions.

- Document *Kryteria przyłączenia oraz wymagania techniczne dla mikroinstalacji i małych instalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia (Connection criteria and technical requirements for micro-plants and small plants connected to the low-voltage distribution network)* [2], adopted in 2014 or later by all distribution grid operators in Poland as a result of team work of PTPIREE Polish Power Transmission and Distribution Association. The document contains many notions specifying the permissible properties of micro-plant connected to low-voltage grids.
- Document *Network Code Requirements for Generators* [3] adopted as the EU Commission Regulation 2016/631 of 14.04.2016. It concerns the requirements for generating units' connecting to the grid. Generators, or rather generating systems (in the document called *generating modules*), are divided into types – A, B, C and D. Type A corresponds to micro-plants because their power is a wide range from 0.8 kW to 1 MW.
- German standard VDE-AR-N 4105 *Power generation systems connected to the low-voltage distribution network – technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low voltage distribution networks* [4], which comprehensively covers the subject of requirements related to the quality of voltage in LV grids, including generating units, electromagnetic compatibility and protection systems.
- Polish Standard PN-EN 50438 (replaced by PN-EN 50549-1:2019-02 [5]). *Wymagania dotyczące równoległego przyłączenia mikrogeneratorów do publicznych sieci rozdzielczych niskiego napięcia* (of May 2010), a translation of the European CENELEC standard EN 50438 of 2007 *Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage distribution networks*. This standard contains no detailed analytical requirements for determining the acceptable conditions for connecting micro-generation plants. Its

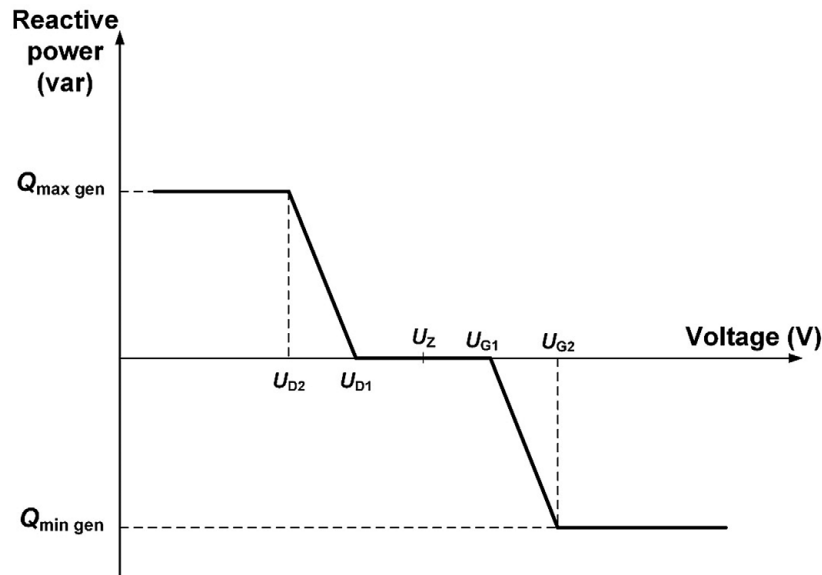


Fig. 1. $Q(U)$ characteristic of PV inverter

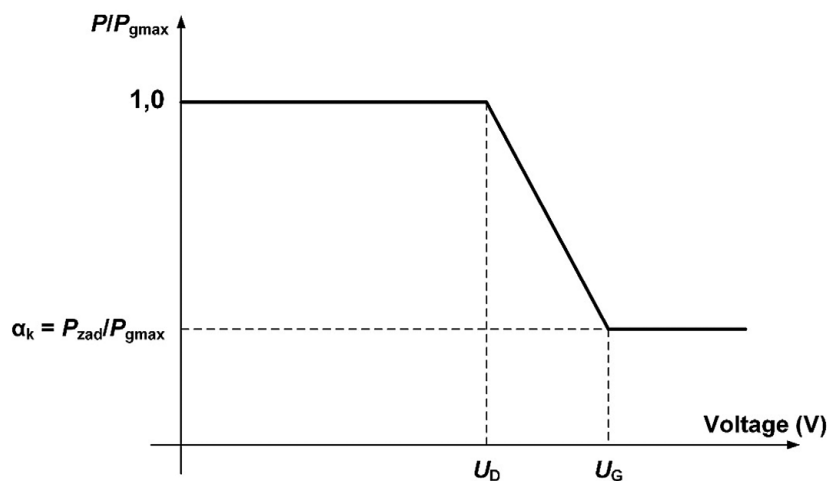


Fig. 2. $P(U)$ characteristic of PV inverter

subject are the technical requirements for connections. The standard contains requirements for three modes of reactive power control (including $Q(U)$ characteristics).

- New Zealand standard AS/NZS 4777.2. *Grid Connection of Energy Systems via Inverters, Part 2 – Inverter Requirements* [0]. The standard contains requirements for three modes of reactive power control (including $Q(U)$ characteristics). An operating mode implementing the $P_{max}(U)$ relationship is also required.

3. $P(U)$ and $Q(U)$ characteristics of micro-plant inverters

As mentioned earlier, the discussed $P(U)$ and $Q(U)$ characteristics were taken from the PN-EN 50438 and AS/NZS 4777.2 standards and are presented below.

Both characteristics require the establishment of certain characteristic points that determine their shape. The independent activation of each of them contributes to a smaller or larger voltage effect in the considered low voltage line sequence. Due to the low voltage grid parameters, $Q(U)$ characteristic is less effective than $P(U)$ but does not cause economic and legal

controversies regarding the effects of limiting the active power output. Therefore, the concurrent application of both characteristics seems to be a compromise between the technical effect and formal restrictions. While finding a point of work on one characteristic is a trivial task, reconciling both of them with each other with simultaneous consideration of the laws of electrical engineering implies the need to iteratively look for a solution. The chart below shows the concurrent activation of both characteristics.

The solution gets even more difficult when the micro-plant's available output limit is adopted as the objective function of the characteristics' parameter selection procedure. To minimize the function, the settings of both of them should be optimally selected.

4. Effects of $P(U)$ and $Q(U)$ characteristics activation

In the actual grid loads and PV outputs (random insolation changes) constantly change. The issue of controlling voltage overruns, while maximizing PV sources output (or rather minimizing their limits), can therefore be treated as an optimization task with constraints.

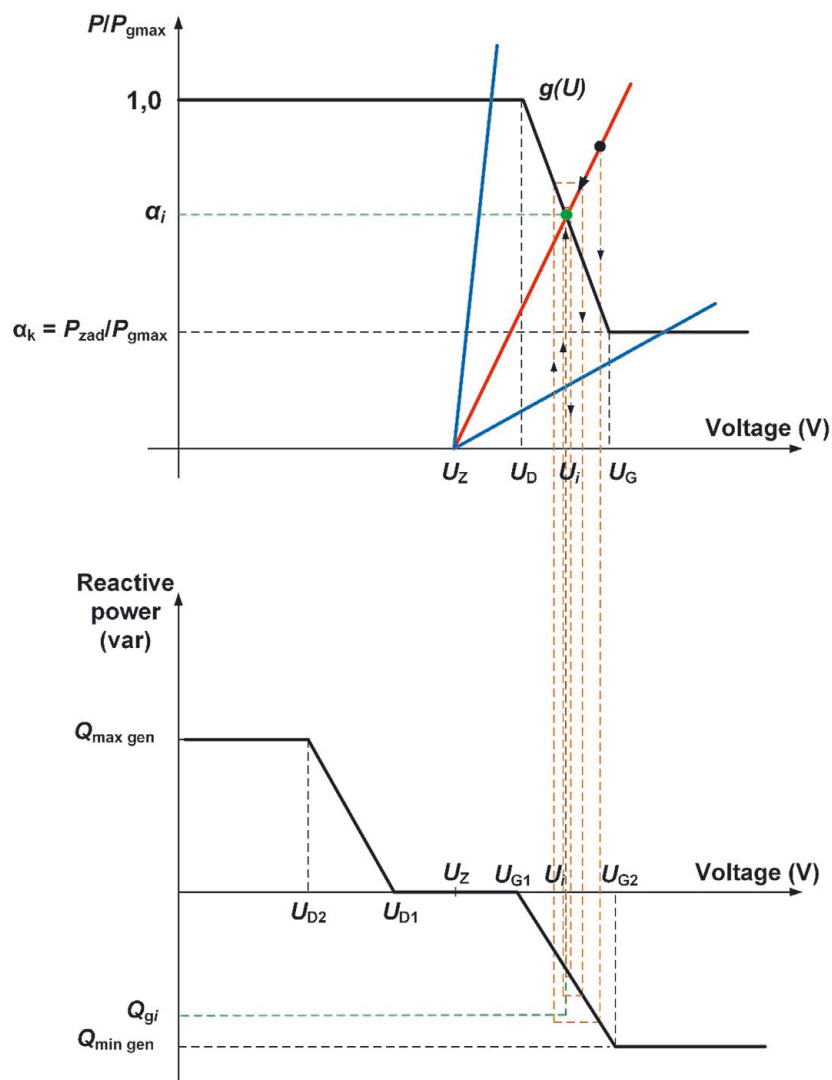


Fig. 3. Combination of $P(U)$ and $Q(U)$ characteristics of inverter

The operating point on $Q(U)$ characteristic is determined based on a non-linear equation for every i -th simulation period:

$$U_i = U_z + \frac{\alpha_i P_{gmax}}{U_n} R + \frac{Q_i(U_i)}{U_n} X \quad (1)$$

where:

α_i – generation factor for i -th period, U_z – voltage on LV busbars, U_n – rated voltage, R – resistance, X – reactance, $Q_i(U_i)$ – reactive power from $Q(U)$ inverter characteristic, P_{gmax} – maximum active power.

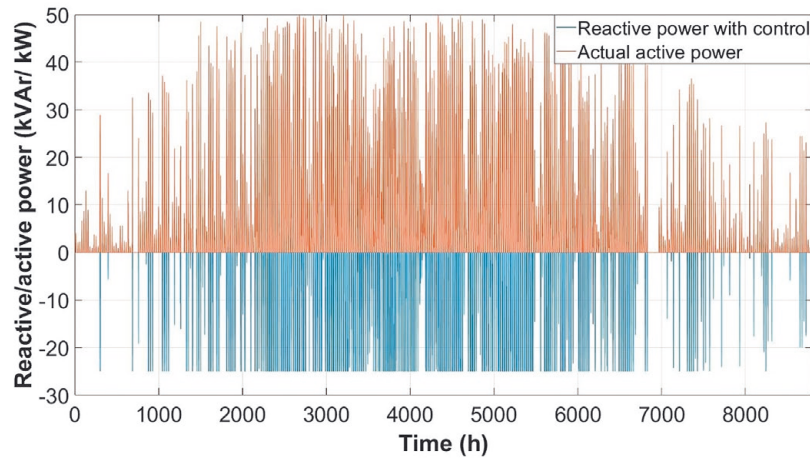


Fig. 4. Annual changes in PV plant output with $Q(U)$ characteristic activated

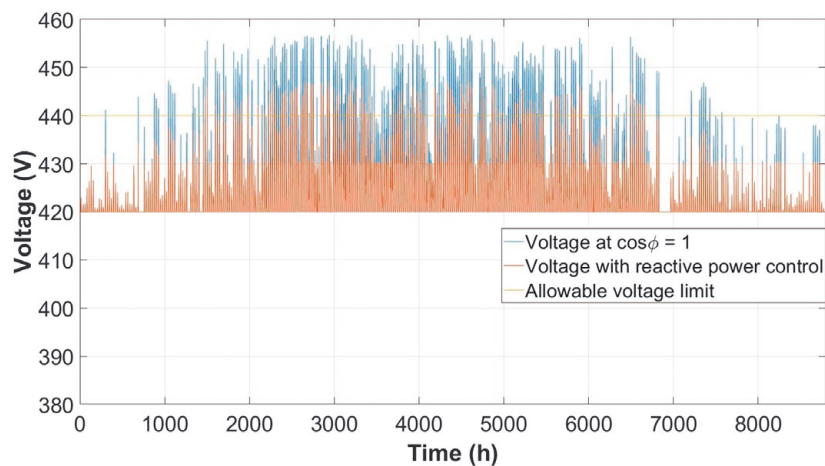


Fig. 5. Annual voltage changes at PV plant connection with $Q(U)$ characteristic activated

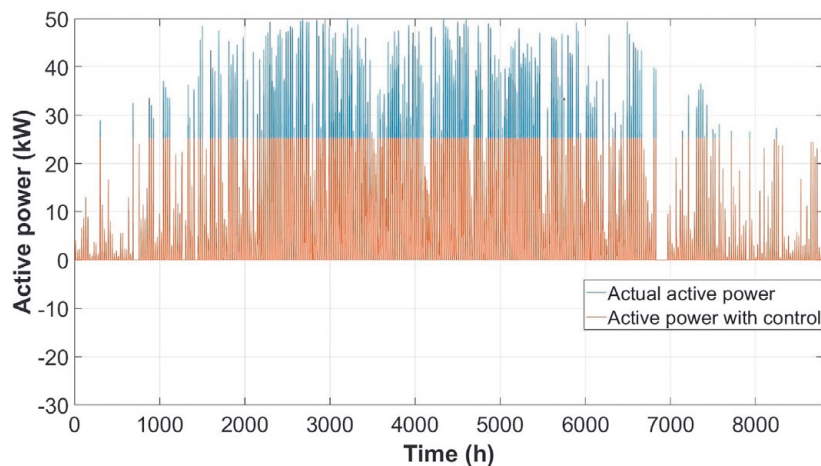


Fig. 6. Annual changes in PV plant output with $P(U)$ characteristic activated

On $P(U)$ characteristic, the operating point (U_i, α_i) is situated at the intersection of the straight line described by equation:

$$\alpha_i = \operatorname{tg} \gamma (U - U_z) \quad (2)$$

with the characteristics described as $\alpha = g(U)$ – Fig. 2, while

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{1}{\frac{P_{g\max}}{U_n} R (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \varphi_L)} \quad (3)$$

A circuit with the maximum output power of 50 kW was used for the calculation. The variability of the power available from the considered micro-plant and the effects of activating both characteristics separately and together are presented in the figures 4–9. It was assumed that the PV plant is located in the Lublin region. Insolation data from the entire 2016 were considered in the discussion. In the initial calculations, the following parameters of both characteristics were adopted arbitrarily:

- settings for $Q(U)$ characteristic: $U_{D2} = 400$ V, $U_{D1} = 410$ V, $U_z = 420$ V, $U_{G1} = 430$ V, $U_{G2} = 440$ V
- settings for $P(U)$ characteristic: $U_D = 430$ V, $U_G = 440$ V, $\alpha_k = 0,3$.

The application of the above methods of voltage reduction at the PV plant connection results in different rates of unused plant capacity:

- only $Q(U)$ characteristic activated, unused plant capacity rate $\Delta E/E_C = 0\%$; as can be seen from the graphs 4 and 5, this method is insufficient because there are times when the voltage exceeds 440 V (total overvoltage duration is 744 hrs)
- only $P(U)$ characteristic activated, settings as above, unused plant capacity rate $\Delta E/E_C = 16,9\%$
- both characteristics activated, unused plant capacity $\Delta E/E_C = 6,8\%$.

The concurrent activation of both characteristics allows reducing the unused plant capacity rate almost twice. However, this is not the minimum. To find the optimal parameters of the characteristics, the issue of their selection should be treated as an optimization task, which was presented in the next section of this study.

5. Optimal settings of $P(U)$ and $Q(U)$ characteristics

It seems that due to the iterative nature of the problem, classical methods are not appropriate here. That is why heuristic optimization was used. Heuristic methods are divided into single-vector

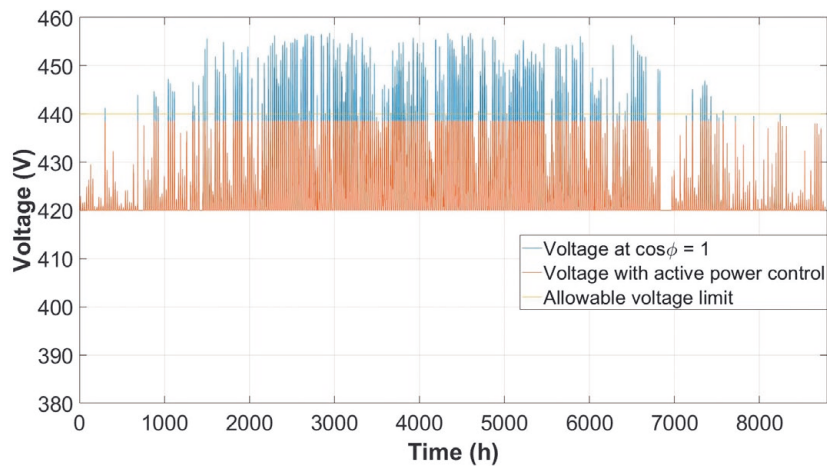


Fig. 7. Annual voltage changes at PV plant connection with $P(U)$ characteristic activated

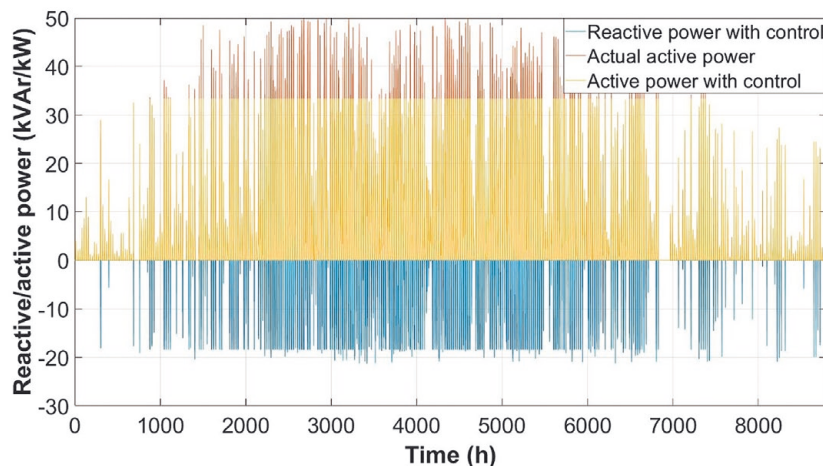


Fig. 8. Annual changes in PV plant output with $Q(U)$ and $P(U)$ characteristics activated

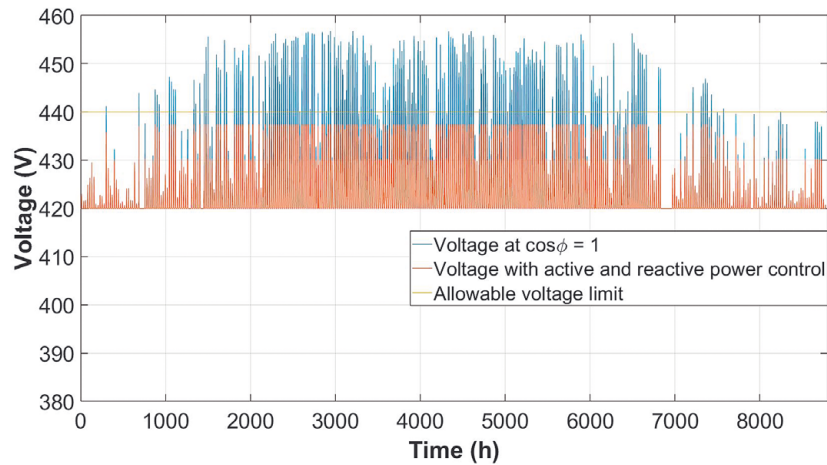


Fig. 9. Annual voltage changes at PV plant connection with $Q(U)$ and $P(U)$ characteristic activated

and swarm. This article compares the calculation results obtained with three swarm methods:

- Algorithm of the innovative gunner (AIG) described in [7, 8]
- Cuckoo search (CS) described in [9]
- Moth-flame optimization (MFO) described in [10].

These methods were selected for their high efficiency in solving optimization problems with constraints. Due to the existence of a population, they are characterized by large exploration of the search space. New solutions are varied, which results in highly efficient avoiding local optima.

The AIG algorithm is characterized by the fact that the components of the decision vector x_l are subject to “multiplicative” modifications:

$$x_l^{(i+1)} = x_l^{(i)} \cdot g_l(\xi) \tag{4}$$

as opposed to additive modifications:

$$x_l^{(i+1)} = x_l^{(i)} + \Delta x_l^{(i)} \tag{5}$$

just like in the CS and MFO, and many other methods.

Functions $g_l(\xi)$ and $\Delta x_l^{(i)}$ are a symbolic notation and a characteristic feature of the heuristic method applied.

The optimal selection of for both curves’ settings is intended to minimize the micro-plants’ output reduction. Thus, the objective function considered has the form:

$$F_c(x) = \frac{\Delta E(x)}{E_c} \cdot 100, \% \tag{6}$$

where:

$\mathbf{x} = [U_{D1}, U_{D2}, U_{G1}, U_{G2}, U_D, U_G, \alpha_k]$ – vector of threshold voltages and factor α on $Q(U)$ i $P(U)$ characteristics (decision variables vector), ΔE – PV plant output limit, E_c – PV plant capacity at assumed insolation.

The decision variables (vector x) constraints were chosen so that the settings do not overlap. The constraints are the following:

- for $Q(U)$ characteristic: $421 \text{ V} \leq U_{G1} \leq 430 \text{ V}$, $438 \text{ V} \leq U_{G2} \leq 445 \text{ V}$
- for $P(U)$ characteristic: $421 \text{ V} \leq U_D \leq 439 \text{ V}$, $440 \text{ V} \leq U_G \leq 450 \text{ V}$, $0,2 \leq \alpha_k \leq 0,35$.

The task is to minimize the objective function by searching for optimal parameter $U_{D1}, U_{D2}, U_{G1}, U_{G2}, U_D, U_G, \alpha_k$ and to maintain the circuit voltage below the allowable limit. Because the problem concerns the overvoltages above 440 V, voltages $U_{G1}, U_{G2}, U_D, U_G, \alpha_k$ are of key relevance. And these voltages were considered in the calculations, while U_{D1}, U_{D2} and U_Z were adopted as constant.

In the AIG algorithm, 10 shots were assumed in the calculations. The correction angles were drawn using the normal distribution. 10 cuckoos were assumed for the CS algorithm, while 10 moths were assumed for MFO and the maximum number of 100 iterations.

Optimal selection of both characteristics’ settings reduces the unused capacity rate to 2.02% (on an annual basis). This is the minimum obtainable under these conditions.

The table below presents results of the calculations for the three metaheuristic algorithms.

6. Summary

The problem of voltage overrun control in low-voltage grids with high saturation of micro-plants described in this article can be solved by way of heuristic optimization. The results obtained by the three metaheuristic methods are comparable and allow to minimize the unused capacity rate in PV plants. Therefore, they can be successfully used to solve optimization problems in the power industry.

Algorithm	Optimal variables					Objective function
	U_D, V	U_G, V	α_k	U_{G1}, V	U_{G2}, V	$F_c, \%$
AIG	439	443	0.21	427	438	2.02
CS	438	445	0.23	426	439	2.015
MFO	438	444	0.25	421	438	2.13

Tab. 1. Comparison of calculation results with other algorithms

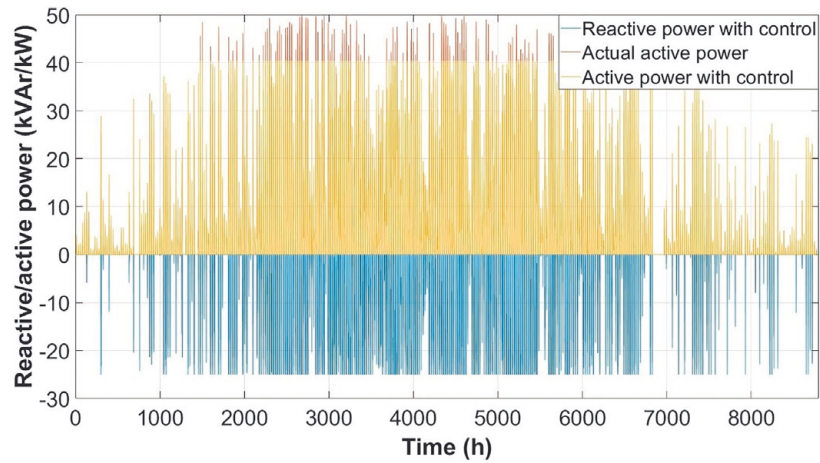


Fig. 10. Annual changes in PV plant output with $Q(U)$ and $P(U)$ characteristics activated and optimum settings selected

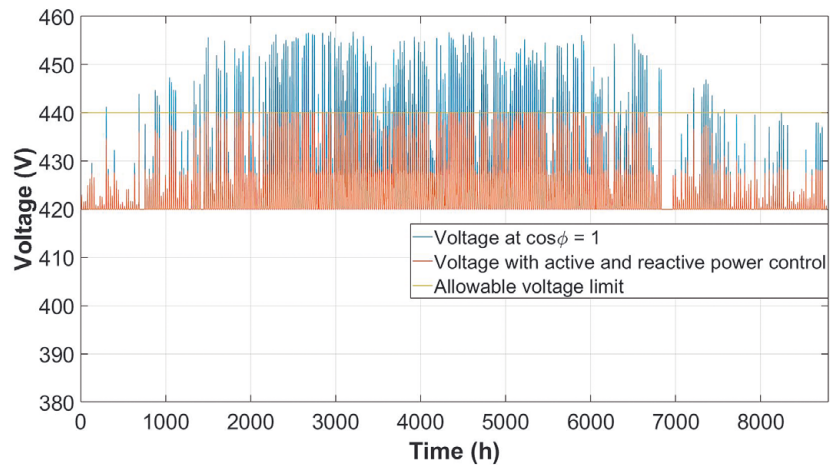


Fig. 11. Annual voltage changes at PV plant connection with $Q(U)$ and $P(U)$ characteristic activated and optimum settings selected

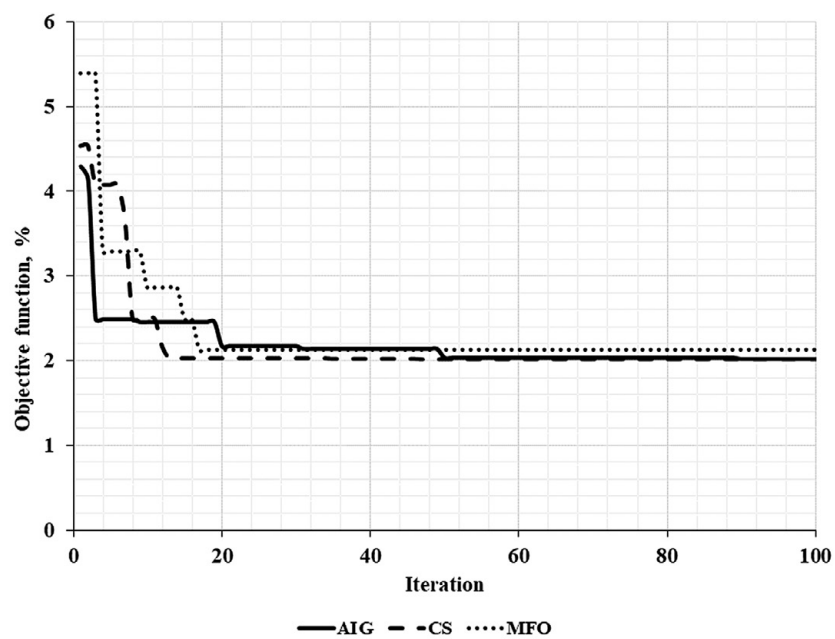


Fig. 12. Example variability of the best objective function values in the iterative process

Grid operators should focus on developing standards for inverter suppliers to the domestic market, so that the $P(U)$ and $Q(U)$ characteristics are available to installers who should set them in accordance with the DSO's recommendations after each micro-plant completion.

The DSO services responsible for connecting micro-plants should use appropriate IT tools to select the characteristics parameters, which should then be forwarded to installers as guidelines for the connection implementation (even when it is an on request connection procedure).

The system used for the calculations, containing a random generation in micro-plants, justifies the need for heuristic optimization methods. Connecting a growing number of unpredictable renewable energy sources to the low-voltage grid will in future require the use of increasingly advanced algorithms that optimize the grid's operation and authorize its qualification as smart.

REFERENCES

1. PN-EN 6043950160:2010 Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych [Supply voltage parameters of public distribution grids].
2. Kryteria przyłączenia oraz wymagania techniczne dla mikroinstalacji i małych instalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia [Connection criteria and technical requirements for micro-plants and small plants connected to the low-voltage distribution network] [PTPIREE study adopted uniformly by distribution companies], September 2014.
3. Network Code Requirements for Generators, EU Commission Regulation 2016/631, 14.04.2016.
4. VDE-AR-N 4105:2011-08. Power generation systems connected to the low-voltage distribution network – technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low voltage distribution networks [German standard, English version].
5. PN-EN 50549-1:2019-02 Wymagania dla instalacji generacyjnych przeznaczonych do równoległego przyłączenia do publicznych sieci dystrybucyjnych – Część 1: Przyłączenie do sieci dystrybucyjnej nN – Instalacje generacyjne aż do typu B i włącznie z nim [Requirements for generating plants to be connected in parallel with distribution networks – Part 1: Connection to a LV distribution network – Generating plants up to and including Type B].
6. Standard AS/NZS 4777.2:2015 – Grid Connection of Energy Systems via Inverters, Part 2 – Inverter Requirements [New Zealand].
7. Pijarski P., Optymalizacja heurystyczna w ocenie warunków pracy i planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego [Heuristic optimization in the assessment of operating conditions and development planning of the power system], Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2019.
8. Pijarski P., Kacejko P., A new metaheuristic optimization method: the algorithm of the innovative gunner (AIG), Engineering Optimization, 22.01.2019, doi: 10.1080/0305215X.2019.1565282.
9. Yang X.S., Deb S., Cuckoo search via Lévy flights, World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009), IEEE Publications, pp. 210–214.
10. Mirjalili S., Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm, *Knowledge-Based Systems*, Vol. 89, 2015, pp. 228–249.

Paweł Pijarski

Lublin University of Technology

e-mail: p.pijarski@pollub.pl

Graduated from the Faculty of Electrical Engineering and Information Technology of Lublin University of Technology (2004). Received his PhD in 2012. Received his post-doctoral degree in 2019. Since 2005, he has been an employee of his alma mater. His research interests are currently related to power system operation analysis, as well as metaheuristic optimization methods. A co-author of several dozen articles and studies on this subject.

Piotr Kacejko

Lublin University of Technology

e-mail: p.kacejko@pollub.pl

Graduated from the Faculty of Electrical Engineering of Lublin University of Technology, employed there since 1979. He was granted his post-doctoral degree at the Faculty of Electrical Engineering of Warsaw University of Technology in 1999, and the title of professor in 2006. Conducts research on power system analysis. Author of several dozen scientific research papers in the field. At present, he studies issues related to the impact of distributed generation sources on the power network.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–13. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Optimalizacja doboru parametrów charakterystyk $P(U)$ i $Q(U)$ falowników mikroinstalacji fotowoltaicznych

Autorzy

Paweł Pijarski
Piotr Kacejko

Słowa kluczowe

optimalizacja, mikroinstalacje PV, charakterystyki falowników

Streszczenie

Obecnie można zaobserwować dynamiczny wzrost liczby instalacji fotowoltaicznych przyłączonych do sieci niskiego napięcia. Zjawisko przepływu mocy w kierunku stacji transformatorowej może spowodować przekroczenie dopuszczalnej wartości napięcia. Wyróżnić można kilka sposobów wyeliminowania niekorzystnych wzrostów napięcia. W artykule autorzy zaproponowali metodę optymalizacji doboru charakterystyk $P(U)$ i $Q(U)$ falowników instalacji fotowoltaicznych. Przeprowadzone badania wskazują, że zastosowanie falowników, dla których uaktywniono obydwie charakterystyki, pozwala na opanowanie problemu wzrostu napięć przy niewielkim ograniczeniu energii produkowanej w mikroinstalacjach.

Data wpływu do redakcji: 29.04.2019

Data wystawienia recenzji: 08.04.2019, 28.04.2019

Data akceptacji artykułu: 29.04.2019

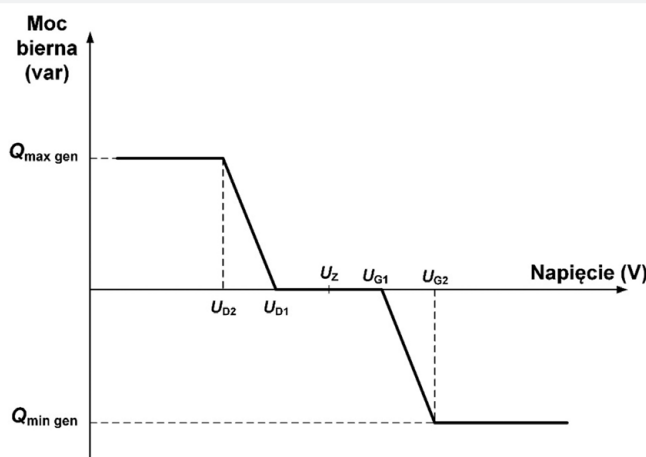
Data publikacji online: 30.10.2019

1. Wstęp

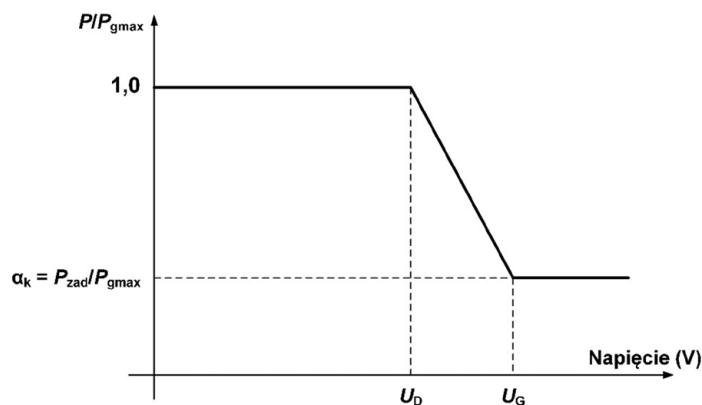
Duża liczba mikroinstalacji zainstalowanych w obrębie jednej stacji transformatorowej lub jednego ciągu linii niskiego napięcia przyczynia się do występowania niekorzystnych warunków napięciowych rozpatrywanego fragmentu sieci. Gdyby moc produkowana w źródłach rozproszonych odpowiadała mocy odbieranej w miejscach ich przyłączenia, wtedy stan sieci odpowiadałby stanowi jałowemu, czyli poborowi mocy z transformatora SN/nn bliskiemu zeru. Specyfika źródeł rozproszonych i zastosowanych technologii polega jednak na tym, że korelacja mocy w nich wytwarzanej z mocą zapotrzebowaną jest niewielka. Oznacza to, że okres, w którym występuje szczytowe zapotrzebowanie na moc odbiorców, nie pokrywa się z okresem maksymalnego poziomu promieniowania słonecznego. W związku z tym w okresie maksymalnej generacji w instalacjach PV moc przepływa w kierunku stacji SN/nn, co powoduje podskok napięcia i możliwy jego wzrost ponad wartość dopuszczalną (440/253 V). Losowy charakter generacji PV może powodować dobowe fluktuacje napięć w szerokim zakresie. Jest to szczególnie uciążliwe dla odbiorców przyłączonych do tej sieci, gdyż istotnie skraca czas życia wielu urządzeń, w szczególności źródeł światła.

Do sposobów pozwalających ograniczyć lub zlikwidować powyższe zagrożenie można zaliczyć:

- dopasowanie przekładni transformatora SN/nn do zmian napięcia, w ostateczności – wbrew standardom krajowym – poprzez zastosowanie transformatora z przekładnią regulowaną pod obciążeniem i regulatora napięcia
- wykorzystanie możliwości regulacji mocy biernej i czynnej źródeł PV
- wyłączanie niezbędnej liczby mikroinstalacji w warunkach wzrostu napięcia



Rys. 1. Charakterystyka $Q(U)$ falownika PV



Rys. 2. Charakterystyka $P(U)$ falownika PV

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–13. When referring to the article please refer to the original text.

PL

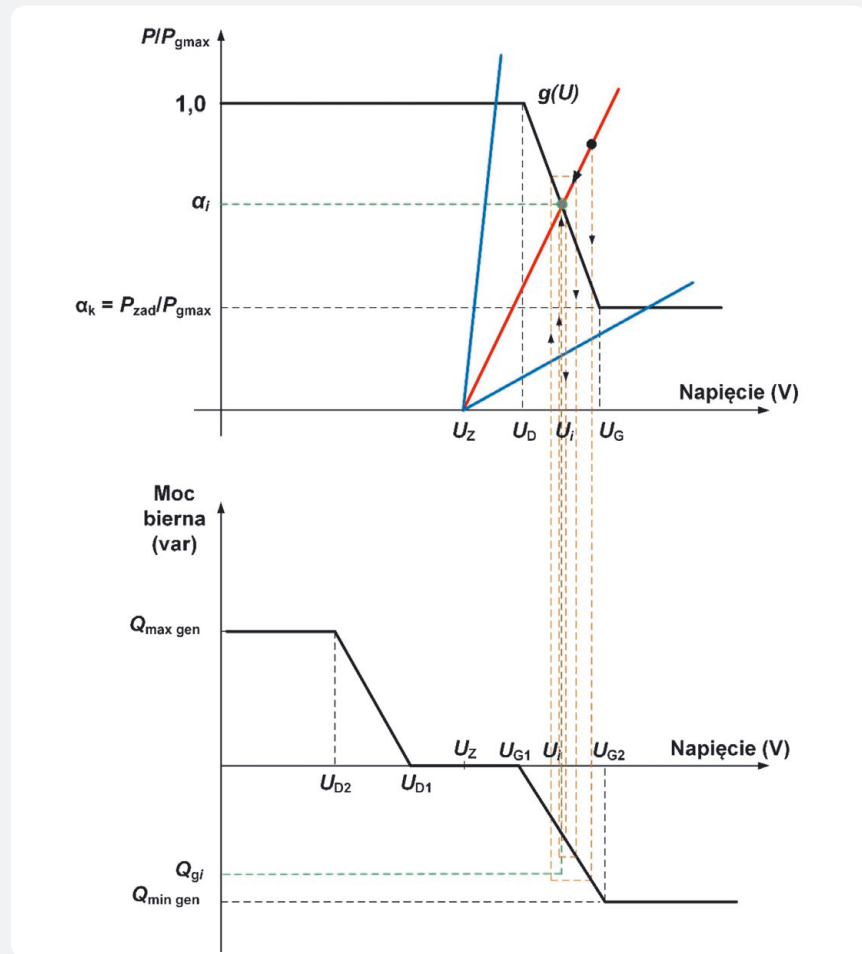
- zastosowanie dedykowanego, szeregowego transformatora specjalnego, zwiększającego reaktancję linii w warunkach narastania napięcia, przy równoczesnym poborze mocy biernej przez mikroinstalacje (układy te noszą generalnie nazwę LVR – Line Voltage Regulator, na przykład urządzenie o nazwie firmowej AEG – Thyrobox, podobnie urządzenia firmy ABB oraz Schneider Electric)
- drogą modernizację sieci (wymiana przewodów o większym przekroju poprzecznym żył roboczych i transformatora o większej mocy znamionowej).

W niniejszym artykule zaproponowano wykorzystanie charakterystyk $P(U)$ i $Q(U)$ falowników PV poprzez optymalny dobór ich charakterystycznych punktów. Charakterystyki te zostały zaczerpnięte z dostępnych norm.

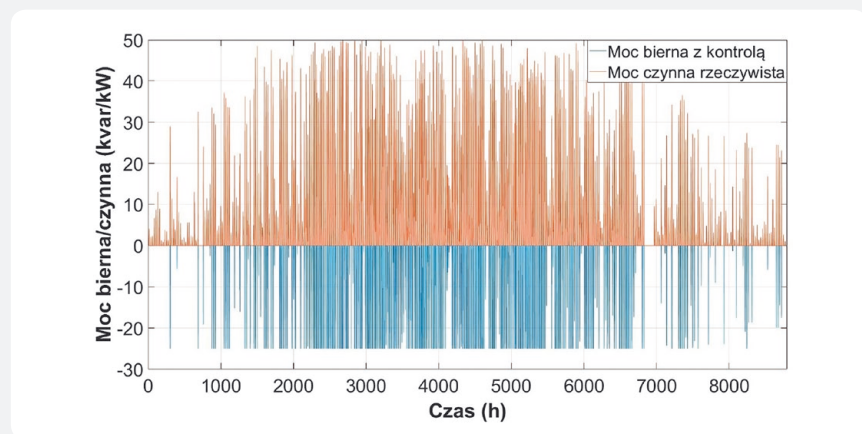
2. Wybrane dokumenty związane z pracą mikroinstalacji

Ocena jakości parametrów energii elektrycznej jest jednym z istotnych działań mających na celu zapewnienie poprawnej pracy sieci elektroenergetycznej. Wyróżnić można następujące dokumenty zawierające wymagania dotyczące tych parametrów:

- Norma PN-EN 50160. *Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych* [1], będąca tłumaczeniem normy CENELEC: EN-50160 *Voltage characteristics of electricity supplied by public distribution systems*. Norma ta określa m.in. parametry i dopuszczalne zakresy odchylenia i deformacji napięcia w sieciach rozdzielczych niskiego napięcia w warunkach pracy normalnej.
- Dokument *Kryteria przyłączania oraz wymagania techniczne dla mikroinstalacji i małych instalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia* [2], przyjęty w 2014 roku lub później przez wszystkich operatorów sieci dystrybucyjnych w Polsce jako wynik pracy zespołu PTPiREE. Dokument zawiera wiele sformułowań określających dopuszczalne właściwości mikroinstalacji przyłączanych do sieci niskiego napięcia.
- Dokument *Network Code Requirements for Generators* [3], który został przyjęty w formie rozporządzenia Komisji UE 2016/631 z dnia 14.04.2016 r. Dotyczy on wymogów w zakresie przyłączenia jednostek wytwórczych do sieci. Generatory, a właściwie układy wytwórcze (w dokumencie zwane *generating modules*), podzielone są na typy – A, B, C i D. Typ A odpowiada mikroinstalacjom, bowiem ich moc to szeroki zakres od 0,8 kW do 1 MW.
- Norma VDE-AR-N 4105. *Power generation systems connected to the low-voltage distribution network – technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low voltage distribution networks* [4], która obejmuje kompleksowo tematykę wymagań związaną z jakością napięcia w sieciach nN z jednostkami wytwórczymi, kompatybilnością elektromagnetyczną oraz układami zabezpieczeń.
- Norma PN-EN 50438 (zastąpiona normą PN-EN 50549-1:2019-02 [5]). *Wymagania dotyczące równoległego przyłączania*



Rys. 3. Połączenie charakterystyk $P(U)$ i $Q(U)$ falownika



Rys. 4. Roczne zmiany mocy generowanej w instalacji fotowoltaicznej przy uaktywnionej charakterystyce $Q(U)$

mikrogeneratorów do publicznych sieci rozdzielczych niskiego napięcia (z maja 2010), będąca tłumaczeniem normy europejskiej CENELEC EN 50438 z 2007 r., zatytułowanej *Requirements for the connection of micro-generators in parallel with public low-voltage distribution networks*. Norma ta nie zawiera szczegółowych wymagań analitycznych w zakresie określania dopuszczalnych

warunków przyłączania mikroinstalacji wytwórczych. Jej przedmiotem są wymagania techniczne dotyczące przyłączeń. Norma zawiera wymagania odnośnie trzech trybów sterowania mocą bierną (w tym charakterystykę $Q(U)$).

- Norma Nowej Zelandii AS/NZS 4777.2. *Grid Connection of Energy Systems via Inverters, Part 2 – Inverter Requirements* [6]. Norma zawiera wymagania w zakresie

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–13. When referring to the article please refer to the original text.

PL

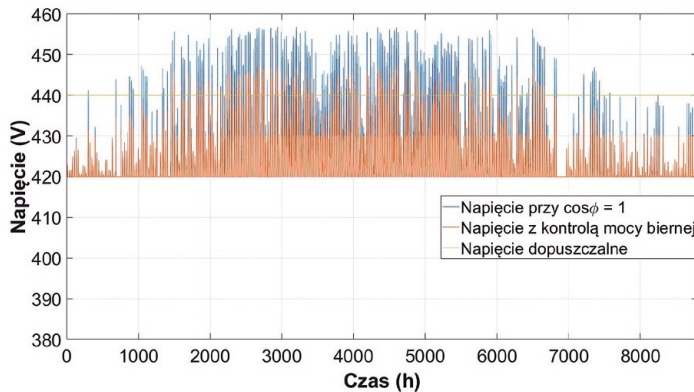
trzech dostępnych trybów generacji mocy biernej (w tym charakterystykę $Q(U)$). Wymagany jest także tryb pracy realizujący zależność $P_{\max}(U)$.

3. Charakterystyki $P(U)$ i $Q(U)$ falowników mikroinstalacji

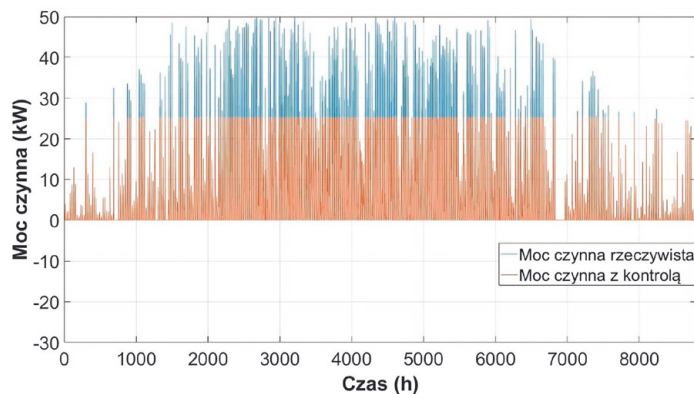
Jak wspomniano wcześniej, rozpatrywane charakterystyki $P(U)$ i $Q(U)$ zaczerpnięto z norm PN-EN 50438 i AS/NZS 4777.2 i przedstawiono je poniżej.

Obydwie charakterystyki wymagają ustalenia pewnych charakterystycznych punktów, które decydują o ich kształcie. Niezależna aktywacja każdej z nich przyczynia się do mniejszego lub większego efektu napięciowego w rozpatrywanym ciągu liniowym niskiego napięcia. Ze względu na parametry sieci niskiego napięcia charakterystyka $Q(U)$ jest mniej efektywna niż $P(U)$, ale nie powoduje kontrowersji ekonomicznych i prawnych,

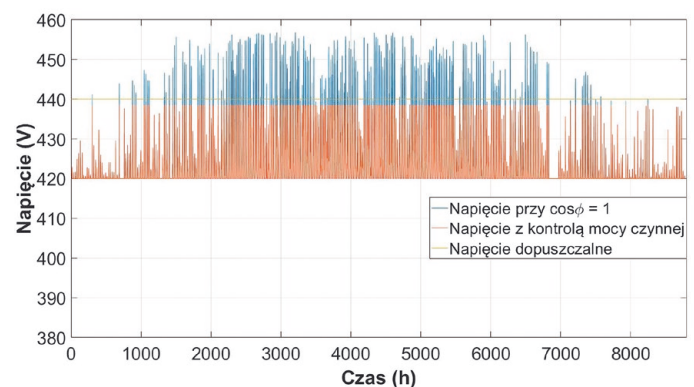
dotyczących skutków ograniczania generowanej mocy czynnej. Dlatego jednoczesne zastosowanie obydwu charakterystyk wydaje się kompromisem pomiędzy efektem technicznym a ograniczeniami formalnymi. O ile znalezienie punktu pracy na jednej charakterystyce jest zadaniem trywialnym, o tyle pogodzenie ze sobą obydwu z nich i jednocześnie uwzględnienie praw elektrotechniki wiąże się z koniecznością iteracyjnego sposobu poszukiwania rozwiązania. Na poniższym wykresie przedstawiono sytuację uaktywnienia dwóch charakterystyk jednocześnie. Trudność rozwiązania wzrasta, gdy za funkcję celu procedury doboru parametrów charakterystyk zostanie przyjęta wartość ograniczenia możliwej do wyprodukowania energii w mikroinstalacji. Chcąc ją zminimalizować, należy optymalnie dobierać nastawy obydwu z nich.



Rys. 5. Roczne zmiany napięcia w miejscu przyłączenia instalacji PV przy uaktywnionej charakterystyce $Q(U)$



Rys. 6. Roczne zmiany mocy generowanej w instalacji fotowoltaicznej przy uaktywnionej charakterystyce $P(U)$



Rys. 7. Roczne zmiany napięcia w miejscu przyłączenia instalacji PV przy uaktywnionej charakterystyce $P(U)$

4. Efekty aktywacji charakterystyk $P(U)$ i $Q(U)$

W rzeczywistej sieci nieustannie zachodzą zmiany obciążenia odbiorców i generacji PV (losowa zmiana nasłonecznienia). Zagadnienie opanowania przekroczeń napięciowych, a jednocześnie maksymalizacji energii ze źródeł fotowoltaicznych (lub raczej minimalizacja ograniczeń jej generacji) można potraktować zatem jako zadanie optymalizacyjne z ograniczeniami.

Na charakterystyce $Q(U)$ punkt pracy wyznacza się na podstawie równania nieliniowego dla każdego i -tego okresu symulacji:

$$U_i = U_Z + \frac{\alpha_i P_{g\max}}{U_n} R + \frac{Q_i(U_i)}{U_n} X \quad (1)$$

gdzie:

α_i – współczynnik generacji dla i -tego okresu, U_Z – napięcie na szynach LV, U_n – napięcie znamionowe, R – rezystancja, X – reaktancja, $Q_i(U_i)$ – moc bierna z charakterystyki $Q(U)$ inwertera, $P_{g\max}$ – moc czynna maksymalna.

Na charakterystyce $P(U)$ punkt pracy (U_i, α_i) znajduje się w miejscu przecięcia prostej o równaniu:

$$\alpha_i = \operatorname{tg} \gamma (U - U_Z) \quad (2)$$

z charakterystyką opisaną jako $\alpha = g(U)$ – rys. 2, przy czym

$$\operatorname{tg} \gamma = \frac{1}{\frac{P_{g\max}}{U_n} R (1 + \operatorname{tg} \varphi \operatorname{tg} \varphi_l)} \quad (3)$$

Do obliczeń wzięto obwód z maksymalną mocą generowaną, równą 50 kW. Zmienność mocy możliwej do uzyskania w rozpatrywanej mikroinstalacji oraz efekty uaktywnienia obydwu charakterystyk osobno i razem przedstawiono na rys. 4–9. Założono, że instalacja PV jest zlokalizowana na Lubelszczyźnie. Do rozważań wzięto dane nasłonecznienia z całego 2016 roku. W obliczeniach wstępnych przyjęto arbitralnie następujące wartości parametrów obu charakterystyk:

- charakterystyka $Q(U)$ nastawienia: $U_{D2} = 400$ V, $U_{D1} = 410$ V, $U_Z = 420$ V, $U_{G1} = 430$ V, $U_{G2} = 440$ V

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–13. When referring to the article please refer to the original text.

PL

- charakterystyka $P(U)$ nastawienia: $U_D = 430 \text{ V}$, $U_G = 440 \text{ V}$, $\alpha_k = 0,3$. Zastosowanie powyższych sposobów obniżenia napięcia w miejscu przyłączenia mikroinstalacji skutkuje różnym wskaźnikiem niewykorzystanej energii z instalacji o wartości:
- uaktywniona jest tylko charakterystyka $Q(U)$, wskaźnik niewykorzystanej energii z instalacji wynosi $\Delta E/E_C = 0\%$; jak widać z wykresów na rys. 4 i 5, ten sposób jest niewystarczający, ponieważ istnieją okresy czasu, w których napięcie przekracza wartość 440 V (łączna liczba

godzin przekroczeń napięciowych wynosi 744)

- uaktywniona charakterystyka $P(U)$, nastawienia wskazane jak wyżej, wskaźnik niewykorzystanej energii z instalacji wynosi $\Delta E/E_C = 16,9\%$
- uaktywnione obydwie charakterystyki, wskaźnik niewykorzystanej energii z instalacji wynosi $\Delta E/E_C = 6,8\%$.

Zastosowanie obydwu charakterystyk jednocześnie pozwala niemal dwukrotnie obniżyć wartość wskaźnika niewykorzystanej energii. Jednak nie jest to wartość minimalna. Chcąc znaleźć optymalne parametry rozpatrywanych charakterystyk, należy potraktować zagadnienie ich doboru jako zadanie optymalizacyjne, co zostało przedstawione w kolejnym punkcie pracy.

5. Optymalne nastawy charakterystyk $P(U)$ i $Q(U)$

Wydaje się, że ze względu na iteracyjny charakter problemu metody klasyczne nie są tutaj odpowiednie. Dlatego zastosowano optymalizację heurystyczną. Metody heurystyczne dzielą się na jednowektorowe i rojowe. W niniejszym artykule porównano wyniki obliczeń uzyskane za pomocą trzech metod rojowych:

- autorskiego algorytmu innowacyjnego artylerzysty (ang. *Algorithm of the Innovative Gunner* – AIG), opisanego w pracach [7, 8]
- przeszukiwania kukułczanego (CS), opisanego w pracy [9]
- optymalizacji śmy (MFO), opisanego w pracy [10].

Wybór powyższych metod uzasadniony jest ich wysoką skutecznością w rozwiązywaniu zadań optymalizacji z ograniczeniami. Ze względu na istnienie populacji cechuje je duża eksploracja przestrzeni poszukiwań. Nowe rozwiązania są zróżnicowane, co daje wysoką skuteczność w unikaniu lokalnych optimów.

Algorytm AIG charakteryzuje się tym, że składowe wektora decyzyjnego x_l podlegają modyfikacjom o charakterze „multiplikatywnym”:

$$x_l^{(i+1)} = x_l^{(i)} \cdot g_l(\xi) \quad (4)$$

w przeciwieństwie do modyfikacji addytywnych:

$$x_l^{(i+1)} = x_l^{(i)} + \Delta x_l^{(i)} \quad (5)$$

tak jak ma to miejsce w metodach CS i MFO oraz wielu innych.

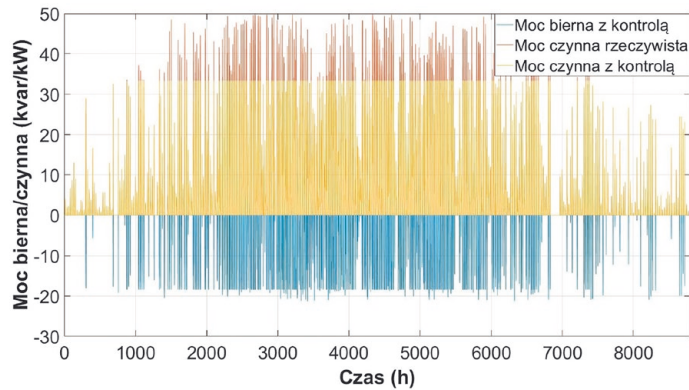
Funkcje $g_l(\xi)$ i $\Delta x_l^{(i)}$ są symbolicznym zapisem i cechą charakterystyczną zastosowanej metody heurystycznej.

Optymalny dobór nastaw obydwu krzywych ma za zadanie minimalną redukcję możliwej do wyprodukowania energii w mikroinstalacjach. Zatem rozpatrywana funkcja celu ma postać:

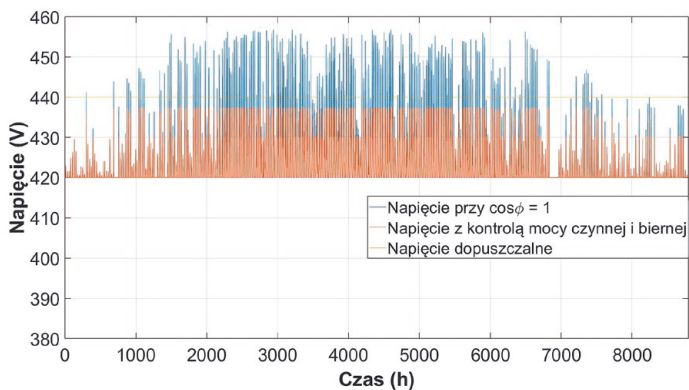
$$F_c(x) = \frac{\Delta E(x)}{E_C} \cdot 100, \% \quad (6)$$

gdzie:

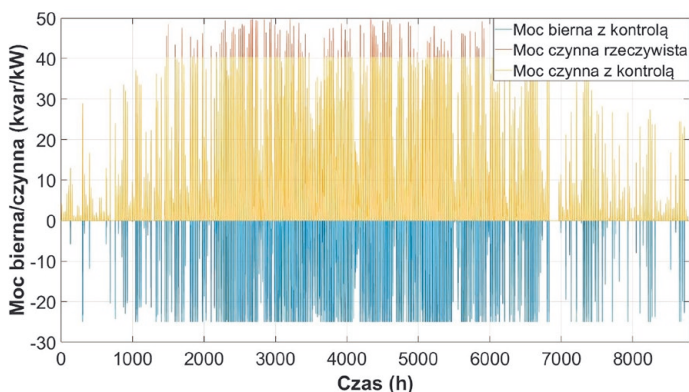
$\mathbf{x} = [U_{D1}, U_{D2}, U_{G1}, U_{G2}, U_D, U_G, \alpha_k]$ – wektor wartości progowych napięć i współczynnika α na charakterystykach $Q(U)$ i $P(U)$ (wektor zmiennych decyzyjnych),



Rys. 8. Roczne zmiany mocy generowanej w instalacji fotowoltaicznej przy uaktywnionych charakterystykach $Q(U)$ i $P(U)$



Rys. 9. Roczne zmiany napięcia w miejscu przyłączenia instalacji PV przy uaktywnionych charakterystykach $Q(U)$ i $P(U)$



Rys. 10. Roczne zmiany mocy generowanej w instalacji fotowoltaicznej przy uaktywnionych charakterystykach $Q(U)$ i $P(U)$, przy optymalnie dobranych nastawach

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–13. When referring to the article please refer to the original text.

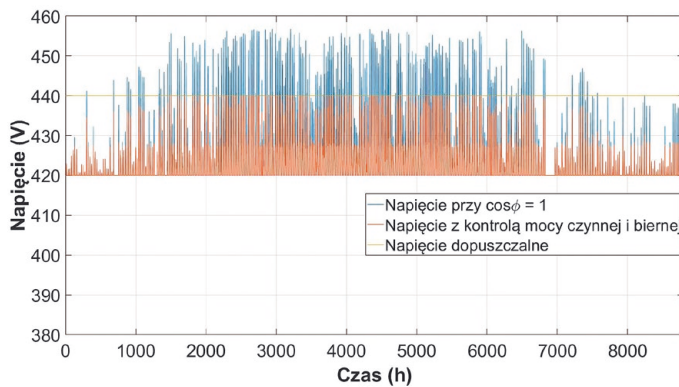
PL

ΔE – ograniczenie produkcji energii w rozpatrywanej instalacji PV, E_C – energia możliwa do wyprodukowania w rozpatrywanej mikroinstalacji przy założonych warunkach nasłonecznienia. Ograniczenia zmiennych decyzyjnych (wektora x) dobierano w ten sposób, aby nastawy nie zachodziły na siebie. Ograniczenia te stanowią:

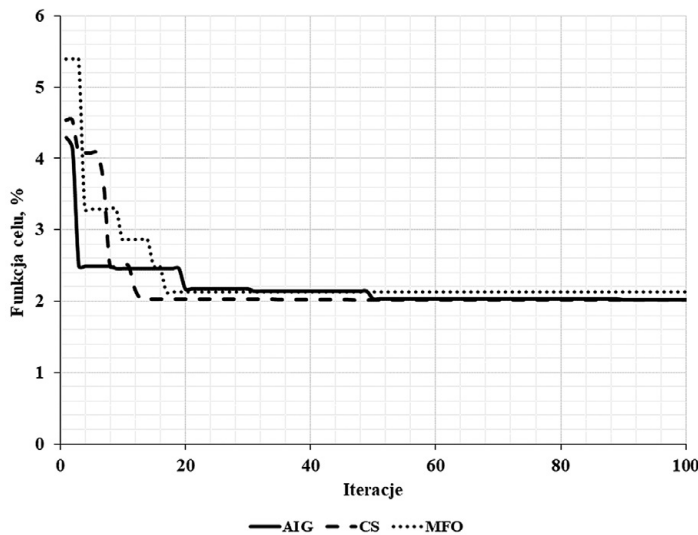
- dla charakterystyki $Q(U)$: $421 \text{ V} \leq U_{G1} \leq 430 \text{ V}$, $438 \text{ V} \leq U_{G2} \leq 445 \text{ V}$
- dla charakterystyki $P(U)$: $421 \text{ V} \leq U_D \leq 439 \text{ V}$, $440 \text{ V} \leq U_G \leq 450 \text{ V}$, $0,2 \leq \alpha_k \leq 0,35$.

Zadanie polega na minimalizacji funkcji celu poprzez poszukiwanie optymalnych wartości parametrów U_{D1} , U_{D2} , U_{G1} , U_{G2} , U_D , U_G , α_k i utrzymaniu napięcia w obwodzie poniżej wartości dopuszczalnej. Ponieważ problem dotyczy przekroczeń napięciowych powyżej 440 V, toteż kluczowe znaczenie mają wielkości U_{G1} , U_{G2} , U_D , U_G , α_k . I te wielkości brano pod uwagę podczas obliczeń, natomiast parametry U_{D1} , U_{D2} i U_Z przyjmowano jako stałe. W algorytmie AIG w obliczeniach założono 10 strzałów. Losowanie kątów korekcyjnych

odbywało się z wykorzystaniem rozkładu normalnego. Dla algorytmu CS założono 10 kukulek, natomiast dla MFO – 10 cieni (MFO) oraz maksymalną liczbę iteracji równą 100. Optymalnie dobrane nastawy obydwu charakterystyk pozwalają ograniczyć wskaźnik niewykorzystanej energii do wartości wynoszącej 2,02% (w skali roku). Jest to wartość minimalna, możliwa do uzyskania w danych warunkach. W tabeli poniżej przedstawiono wyniki obliczeń dla trzech algorytmów metaheurystycznych.



Rys. 11. Roczne zmiany napięcia w miejscu przyłączenia instalacji PV przy uaktywnionych charakterystykach $Q(U)$ i $P(U)$, przy optymalnie dobranych nastawach



Rys. 12. Przykładowy przebieg zmienności najlepszych wartości funkcji celu w procesie iteracyjnym

Algorytm	Optymalne wartości zmiennych					Wartość funkcji celu
	U_D, V	U_G, V	α_k	U_{G1}, V	U_{G2}, V	
AIG	439	443	0,21	427	438	2,02
CS	438	445	0,23	426	439	2,015
MFO	438	444	0,25	421	438	2,13

Tab. 1. Porównanie wyników obliczeń z innymi algorytmami

6. Podsumowanie

Opisany w artykule problem opanowywania przekroczeń napięciowych w sieciach niskiego napięcia o dużym nasyceniu mikroinstalacjami można rozwiązać poprzez zastosowanie optymalizacji heurystycznej. Wyniki uzyskane za pomocą trzech metod metaheurystycznych są porównywalne i pozwalają do minimum ograniczyć wskaźnik niewykorzystanej energii w instalacjach PV. Mogą być zatem z powodzeniem stosowane do rozwiązywania zagadnień optymalizacyjnych w elektroenergetyce.

Uwaga operatorów sieci powinna być ukierunkowana na wypracowanie standardów obowiązujących dostawców falowników na rynek krajowy, tak by charakterystyki $P(U)$ i $Q(U)$ były dostępne dla instalatorów, którzy powinni ustawiać je zgodnie z zaleceniami OSD po zakończonej budowie każdej mikroinstalacji.

Służby OSD odpowiedzialne za przyłączenia mikroinstalacji powinny wykorzystywać odpowiednie narzędzia informatyczne do doboru parametrów charakterystyk, które następnie powinny być przekazywane instalatorom jako wytyczne do realizacji przyłączeń (nawet gdy jest to procedura przyłączenia na zgłoszenie).

Układ wykorzystany do obliczeń, zawierający losową generację w mikroinstalacjach, uzasadnia konieczność sięgania po heurystyczne metody optymalizacji. Przyłączenie do sieci niskiego napięcia coraz większej liczby nieprzewidywalnych źródeł OZE będzie w przyszłości wymagało korzystania z coraz bardziej zaawansowanych algorytmów optymalizujących pracę sieci i upoważniających do opisywania jej przymiotnikiem *smart*.

Bibliografia

- PN-EN 50160:2010. Parametry napięcia zasilającego w publicznych sieciach rozdzielczych.
- Kryteria przyłączenia oraz wymagania techniczne dla mikroinstalacji i małych instalacji przyłączanych do sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia [materiał PTPiREE przyjęty jednolicie przez spółki dystrybucyjne], wrzesień 2014.
- Network Code Requirements for Generators, Rozporządzenie Komisji UE 2016/631, 14.04.2016.
- VDE-AR-N 4105:2011-08. Power generation systems connected to the low-voltage distribution network – technical minimum requirements for the connection to and parallel operation with low

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 6–13. When referring to the article please refer to the original text.

PL

- voltage distribution networks [norma niemiecka, wersja angielska].
5. PN-EN 50549-1:2019-02 Wymagania dla instalacji generacyjnych przeznaczonych do równoległego przyłączenia do publicznych sieci dystrybucyjnych – Część 1: Przyłączanie do sieci dystrybucyjnej nN – Instalacje generacyjne aż do typu B i włącznie z nim.
 6. Norma AS/NZS 4777.2:2015 – Grid Connection of Energy Systems via Inverters, Part 2 – Inverter Requirements [Nowa Zelandia].
 7. Pijarski P., Optymalizacja heurystyczna w ocenie warunków pracy i planowaniu rozwoju systemu elektroenergetycznego, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, Lublin 2019.
 8. Pijarski P., Kacejko P., A new metaheuristic optimization method: the algorithm of the innovative gunner (AIG), Engineering Optimization, 22.01.2019, doi: 10.1080/0305215X.2019.1565282.
 9. Yang X.S., Deb S., Cuckoo search via Lévy flights, World Congress on Nature & Biologically Inspired Computing (NaBIC 2009), IEEE Publications, s. 210–214.
 10. Mirjalili S., Moth-flame optimization algorithm: A novel nature-inspired heuristic paradigm, *Knowledge-Based Systems* 2015, Vol. 89, s. 228–249.

Paweł Pijarski

dr hab. inż.

Politechnika Lubelska

e-mail: p.pijarski@pollub.pl

Ukończył studia na Wydziale Elektrotechniki i Informatyki Politechniki Lubelskiej (2004). Pracę doktorską obronił w 2012 roku. Habilitację uzyskał w 2019 roku. Od 2005 roku jest pracownikiem swojej macierzystej uczelni. Jego zainteresowania naukowe są obecnie związane z analizą pracy systemu elektroenergetycznego, a także z metaheurystycznymi metodami optymalizacji. Jest współautorem kilkudziesięciu artykułów i prac poświęconych tej tematyce.

Piotr Kacejko

prof. dr hab. inż.

Politechnika Lubelska

e-mail: p.kacejko@pollub.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Lubelskiej i pracownik macierzystej uczelni od 1979 roku. Habilitację uzyskał na Wydziale Elektrycznym Politechniki Warszawskiej w 1999 roku, a tytuł profesora w 2006 roku. Prowadzi badania z zakresu analiz systemu elektroenergetycznego. Jest autorem kilkudziesięciu prac naukowo-badawczych oraz publikacji z tej dziedziny. Aktualnie zajmuje się problematyką oddziaływania rozproszonych źródeł wytwórczych na sieć elektroenergetyczną.