

Development of prosumer systems changes the operating conditions of distribution grids. Grid operators point to many technical problems in the grid and prosumer system interoperation, primarily related to grid operation security, excesses over lines' and devices' current carrying capacities, and maintaining grid node voltages within pre-set limits [5].

These problems may be solved using energy storage [3, 4]. The paper discusses a storage operation control strategy to increase the prosumer system energy efficiency at a constant power factor. The proposed strategy is also beneficial to the grid operator because it assures that no limit of the active power exchange with the supply grid is exceeded.

2. Prosumer system

No prosumer system's output may exceed 40 kW [14]. This provision restricts homeowners' privileges of uncontrolled connection of electricity sources.

Fig. 1 shows a diagram of a fragment of a distribution grid, to which a prosumer system is connected. The grid is a rural grid with two 1 km long overhead lines (AFL 4 x 50 mm²) powered by an overhead transformer substation. The grey colour indicates the portion of the grid that will not be discussed here. For this study, a 50 m YKY 5 x 16 mm² cable line was selected as the prosumer system's internal power supply line.

The most popular sources of electricity available for the prosumer implementation are wind turbines (WT) and photovoltaic panels (PV). Both sources are non-manageable, i.e. their outputs are unknown. There are output estimation methods based on meteorological forecasts, but they are unreliable. The both sources' regulation capabilities are also limited and in practice they are reduced to switching them off and on. The main difference in their energy outputs is timing. Wind farms can generate electricity a whole day, while photovoltaic panels only from dawn to dusk, depending on the sun exposure.

Their reactive power output depends only on the inverter used. There are device solutions that, in addition to active power output, enable reactive power generation. However, they are

more expensive than those typically used in prosumer systems. It was assumed for the purpose of this study that an inverter was used that generated active power at $\cos \varphi = 1$.

3. Operation of prosumer system with energy storage

A. Energy storage features

In addition to increasing the reliability of power supply, the main reason for the installation of prosumer power sources is to minimise the costs of energy purchase from the power grid. Prosumer system should therefore optimize the use of local output power. As the RES primary energy varies randomly, the daily generation and load curves cannot be matched. Turning the source off when its output exceeds the demand is inefficient and counter-productive in terms of return from the investment. Surplus electricity should in this case be supplied to the grid. Whereas in times of increased demand the energy needs to be drawn from the grid. From the prosumer point of view this means that the power grid is treated as an electricity storage with ca. 80% efficiency (including fixed cost of power supply). A better solution may be to limit the power exchange with the grid by using a local energy storage.

The solution proposed herein assumes the installation of an energy storage in the prosumer system. It seems at the present stage of the electricity storage technology development that the solution most useful for prosumer systems is a battery [6, 7]. Storage is connected to the system through a PWM inverter. Adjusting the inverter valves allows to control the storage's active and reactive power alike.

The use was assumed of energy storage [9, 16] for two basic tasks:

- to reduce the active power input from the grid and thus the electricity bills
- to compensate the reactive power in the prosumer system to the level that ensures the required power factor.

The storage's inverter shall generate such reactive power so that $\text{tg } \varphi$ factor remains at 0.4. The charges for excessive reactive power consumption will depend on the storage's efficiency.

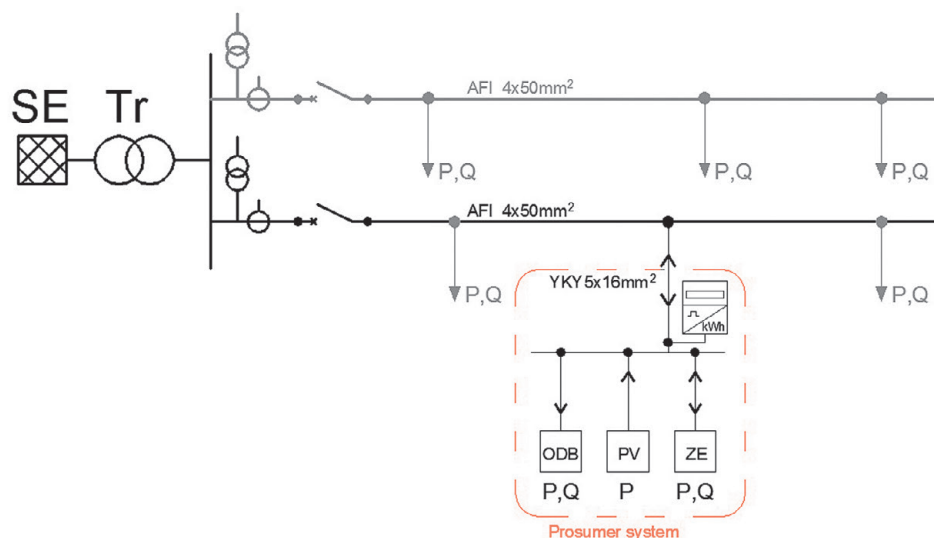


Fig. 1. Example diagram of a rural distribution grid

Diagram of a typical prosumer system with energy storage is shown in Fig. 1.

B. Energy storage control strategy

The following two operating modes of energy storage in prosumer system may be identified:

A) Storage discharge, when the following condition is met:

$$P_{odb} > P_{PV} \text{ and } E_{zas} > E_{min} \Rightarrow P_{zas} < 0 \tag{1}$$

where: P_{odb} – active power load, P_{PV} – active PV output power, E_{zas} – energy in storage, $E_{min} = 10\% E_n$, while E_n is rated storage capacity, P_{zas} – active storage power, minus sign indicates active power output.

In this case, the energy is collected from the storage by local loads, reducing the power intake from the distribution grid.

b) Storage charge, when:

$$P_{odb} < P_{PV} \text{ and } E_{zas} < E_{max} \Rightarrow P_{zas} > 0 \tag{2}$$

whereas: $E_{max} = 90\% E_n$

Surplus energy generated in the photovoltaic source is taken up by the storage that collects the electricity so generated. When the PV and load powers are equal, the storage power is 0.

Depending on the storage charge level, a restriction was imposed on the energy output from discharged storage, and on energy input to the storage when fully charged. In either operating mode, the reactive power consumed by the system’s loads is compensated by the storage inverter.

C. Electricity storage control algorithm

To fulfil the storage’s assumed functions its inverter is adjusted according to appropriate power pre-sets. The storage active power pre-set results from the power balance in the prosumer system. This power is determined from the following equation:

$$P_{zad} = P_{odb} + P_{PV} + P_{wym} \tag{3}$$

where: P_{zad} – pre-set active storage power, P_{wym} – determined active power intake from the grid.

In order to warrant the storage’s continuous operation and to exclude the conditions of its long-term complete charge or discharge it was assumed that the active power exchanged with the grid corresponds to the prosumer system’s average power determined from the following formulas:

$$P_{wym} = \frac{\int_0^t (P_{odb} + P_{PV}) dt}{t} \tag{4}$$

It follows from these formulas that, depending on the relationship between the powers of the PV source and the loads, the pre-set storage power can be positive (charging) or negative (discharging).

Similarly, the storage’s pre-set reactive is determined from the passive power balance in the prosumer system:

$$Q_{zad} = Q_{odb} + Q_{PV} + tg \varphi_{zad} P_{wym} \tag{5}$$

where: Q_{zad} – pre-set reactive storage power, Q_{odb} – reactive load power, Q_{PV} – reactive PV power, $tg \varphi_{zad}$ – pre-set (required) $tg \varphi$ in prosumer system.

The proposed control algorithm operates in an open control system and is implemented in the central controller to which the signals from the measuring modules of individual devices are fed. Implemented in the algorithm was control of the grid constraints relating to the upper limit of the active power intake from the distribution grid at power factor $tg \varphi$ 0.2–0.4.

4. Simulation model of the system

In order to analyse the operation of prosumer system with energy storage [1] controlled by the proposed algorithm, an exemplary system shown in Fig. 2 was considered, in which the prosumer is connected to low voltage grid supplied by MV/LV transformer.

This system was mapped using a simulator implemented in PSCAD®/EMTDC environment. In the simulator, the power system was replaced by a substitute AC voltage source with internal inductance resulting from the grid’s short circuit power (1 MVA). TOD 63/15 s 15/0.4 kV, 63 kVA, Dy5 transformer was modelled. The prosumer load was replaced by a model of 3-phase symmetrical resistive-inductive load in the form of star-connected impedances.

Each phase is represented by a parallel combination of resistance and inductance. The load power varied according to a pre-set schedule, with the maximum of 16.16 kVA. It was assumed that the load’s power factor is $tg = 0.4$ is and constant.

Photovoltaic panels were modelled as three single-phase current sources that generate active power at random, with the outputs ranging from 2 to 10 kW. The PV source’s equivalent circuit implemented in PSCAD program is shown in Fig. 3.

The storage was modelled in the simulation model as a DC voltage source and an interoperable PWM-controlled 3-phase

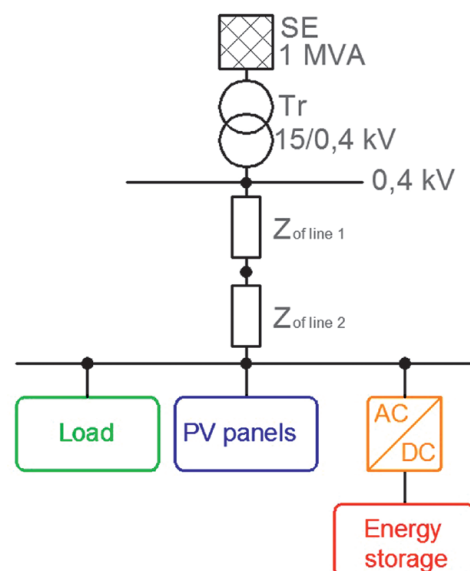


Fig. 2. Diagram of the prosumer system

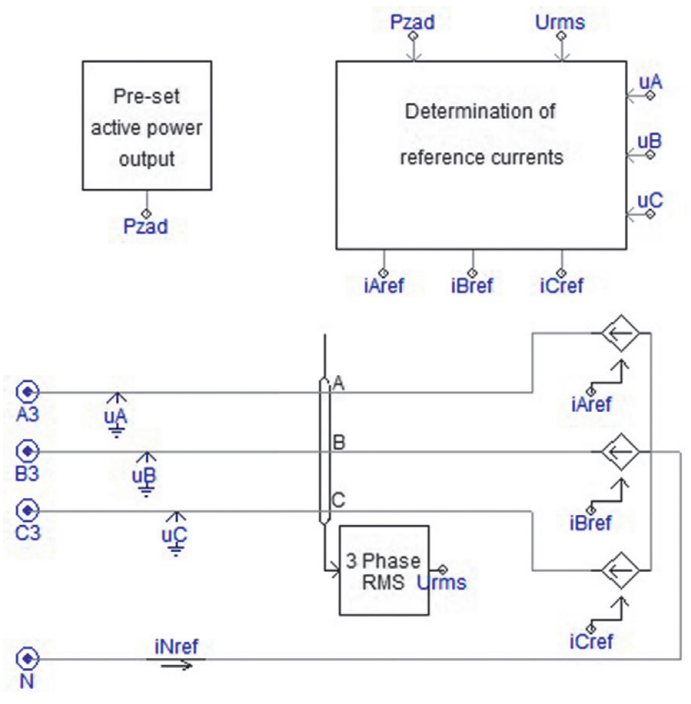


Fig. 3. Equivalent circuit of PV in PSCAD program

inverter. A capacitive filter and coupling inductance were used to eliminate interference and to smooth the current waveforms. Diagram of the model of the energy storage's main circuits in PSCAD program is shown in Fig. 4.

The storage is controlled by adjusting the inverter power. From (3), (4) and (5) the storage's active and passive power pre-sets were derived, for which reference currents were calculated. Based on the reference currents the ignition pulses were generated and

then fed to the inverter valves using a hysteresis controller. The control system consists of three units:

1. decision unit for pre-set power determination
2. reference current calculation unit
3. execution unit that generates ignition pulses to inverter valves.

The control algorithm included battery charge control. The calculation of the energy stored in the storage and the storage charge level is shown schematically in Fig. 5.

The coefficients in front of the integrators allow to consider the power losses in the energy storage.

5. Simulation tests results

A. Introduction

The model was used for simulations tests of the prosumer system. First the operation was tested of the system without energy storage. Fig. 6 shows changes in power factor $\text{tg } \varphi$ calculated for the receiving system with PV panels on the basis of the active and reactive energy measurements. The results confirm the basic problems of prosumer systems. A decrease in the active power intake from the supply grid due to the PV source's power output at unchanged reactive power consumption resulted in an increase in power factor $\text{tg } \varphi$ significantly in excess of the value required by the operator.

B. Active power balancing

One of the storage's main tasks is balancing the active power in the prosumer system at the level of a pre-set power exchange with the supply grid. Fig. 7 shows the active power balance in the system, accomplished when the power intake from the grid corresponded to the prosumer system's average power in the analysed period.

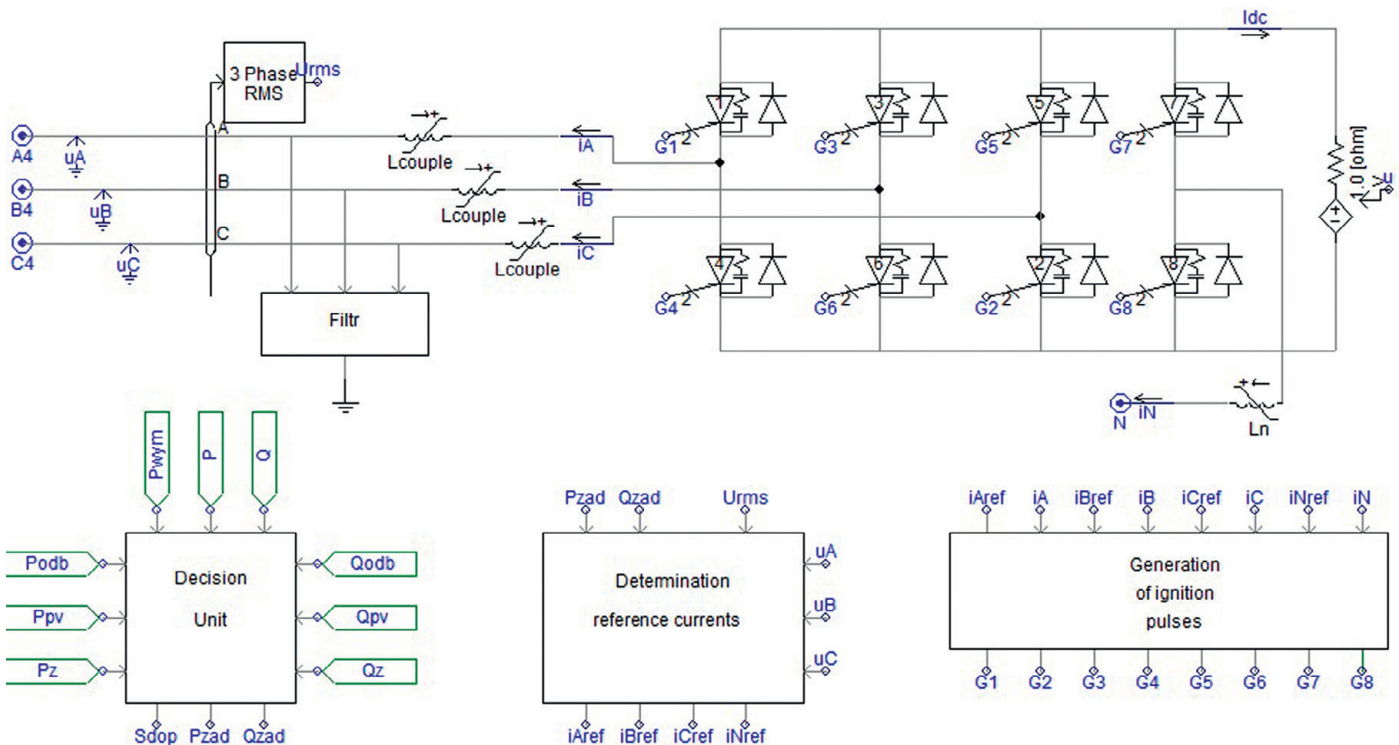


Fig. 4. Diagram of energy storage model in PSCAD program

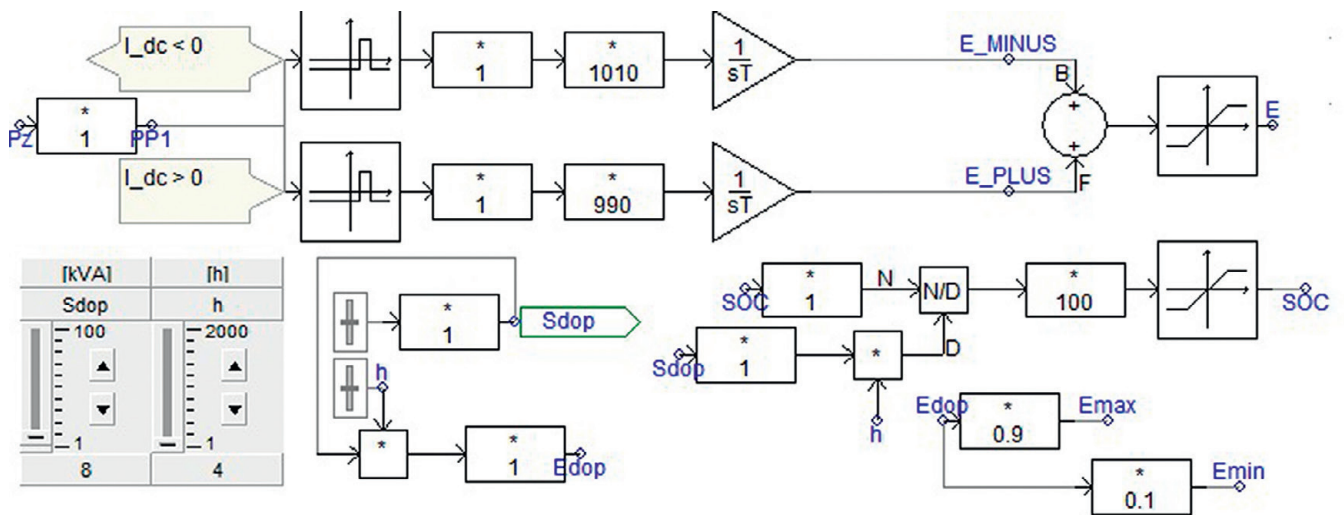


Fig. 5. Energy storage charge calculations system

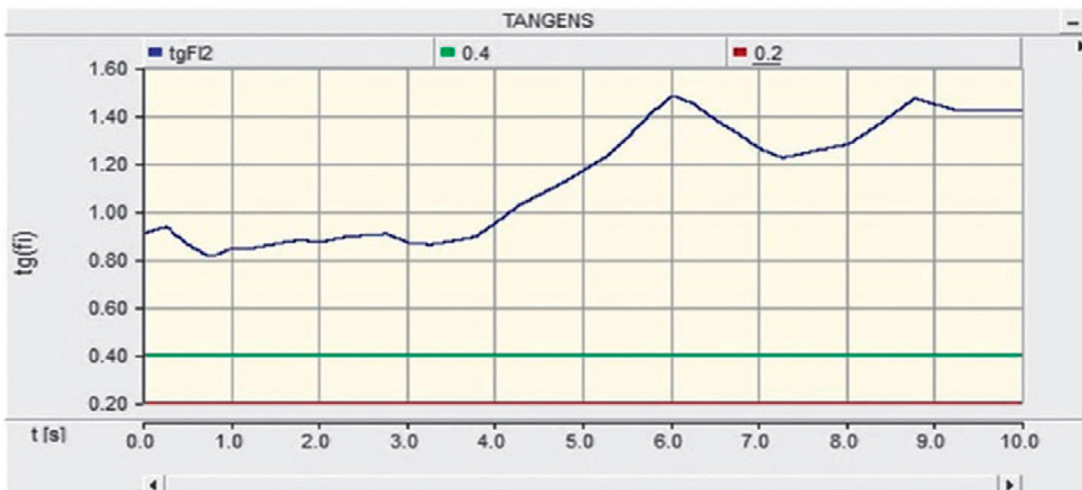


Fig. 6. Power factor in the system without electricity storage

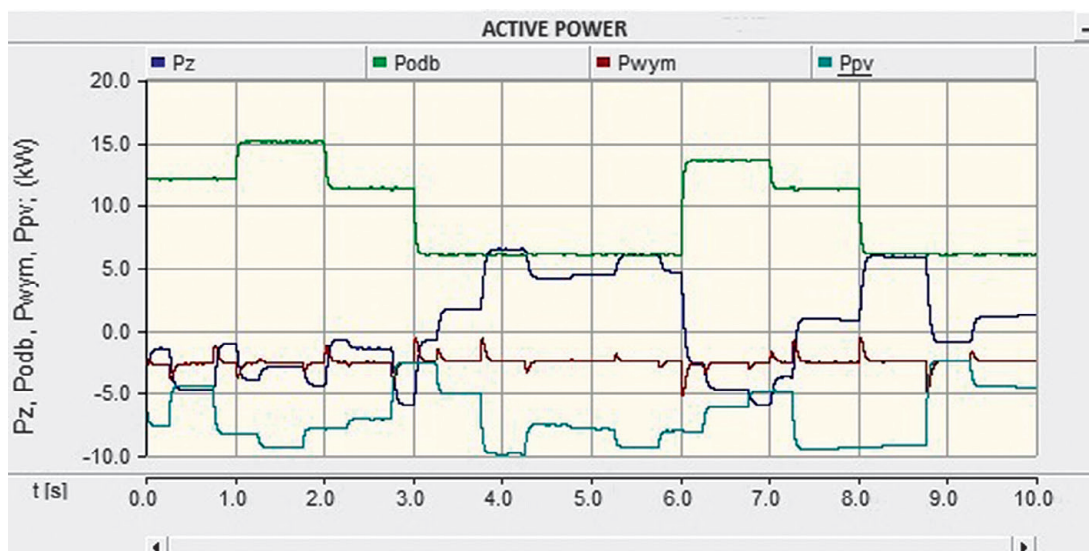


Fig. 7. Active power balance in prosumer system

The green colour in Fig. 7 highlights the active load power changes. It was assumed that during the simulation the load power changes six times in 6–15 kW the range. The PV panels' variable output is marked in blue. The dark blue line shows the storage power changes to maintain the power exchange with the grid (red curve) at a constant level.

Fig. 8 shows changes in the storage charge during the simulation period. At the outset of the simulation the battery was charged to ca. 50%.

A decrease in the charge level means discharging, and an increase – charging the storage. At power exchange with the grid at the level of the average power in the analysed period, the charge levels at the beginning and at the end of this period are similar. With the right battery capacity selection, this ensures the storage's continuous operation and elimination of the charge and discharge conditions [8].

The system's long operation with a power exchange with the grid a network other than the average power would lead to

the storage's complete discharge (when the exchange power is lower than the average power) or full charge (when the exchange power is higher than the average power).

C. Reactive power compensation

Fig. 9 shows the reactive power balance in prosumer system. The reactive load power (green curve) changes accordingly to changes in the active power while maintaining power factor $\text{tg } \varphi = 0.4$. The PV source's reactive power output, marked in blue, is practically zero. The storage inverter generates reactive power (dark blue line) according to the pre-set power calculated from formula (5), to compensate the passive load power and obtain the required power factor at the prosumer interconnection with the grid [15]. The effect of the control algorithm is shown in Fig. 10 as the changes in power factor $\text{tg } \varphi$ in the prosumer system with energy storage calculated based on the active and reactive energy measurements. As seen in this figure, the average power factor is close to pre-set value 0.4.

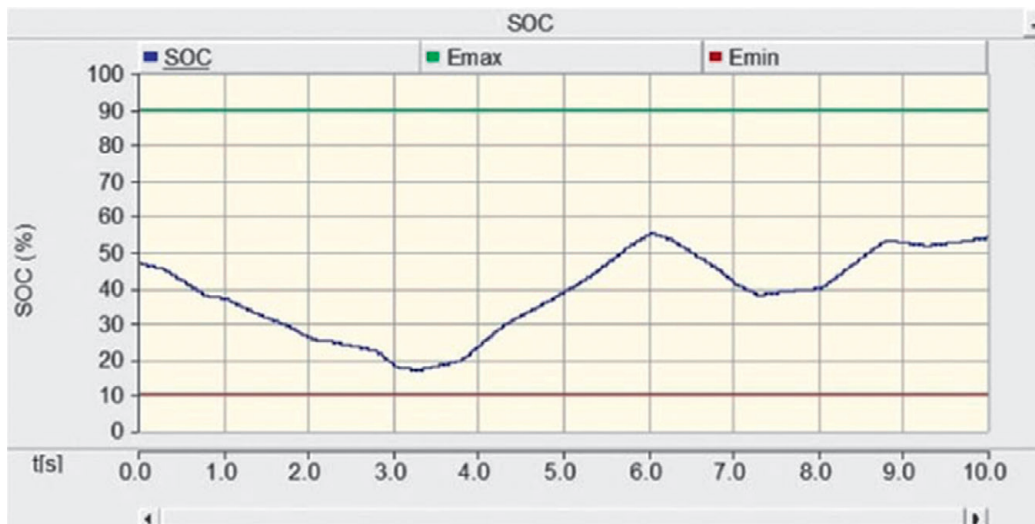


Fig. 8. Storage charge indicator

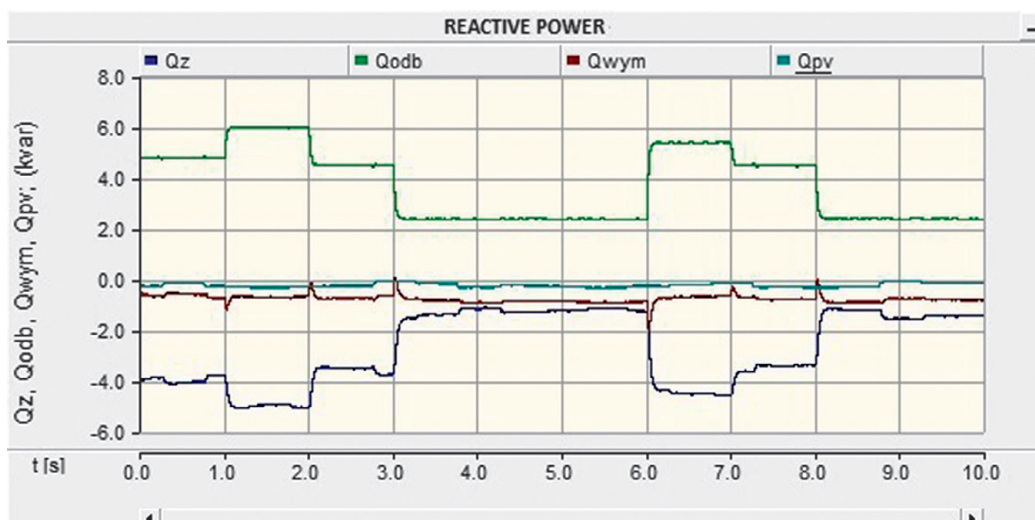


Fig. 9. Reactive power balance in prosumer system

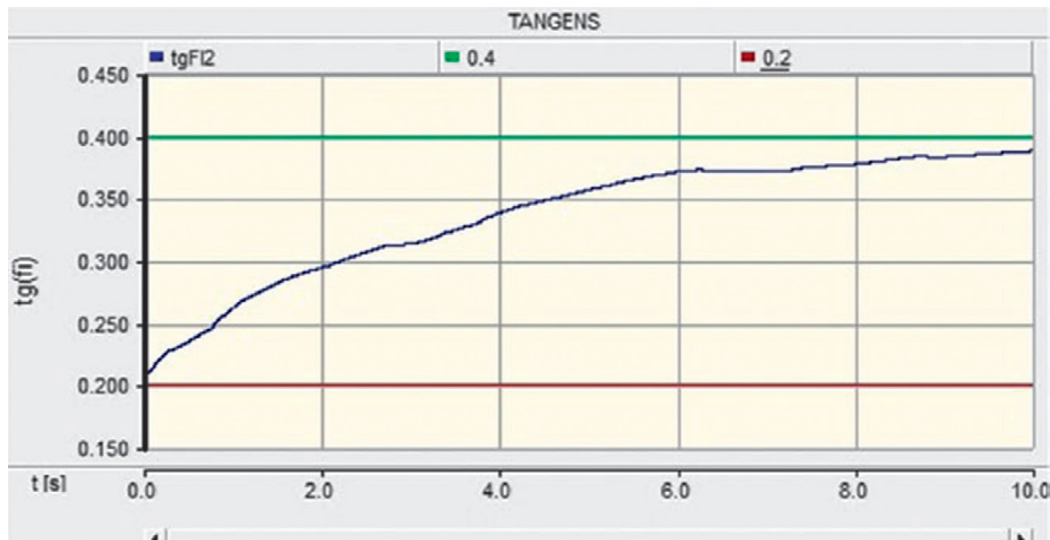


Fig. 10. Power factor $\text{tg } \varphi$ in the system with energy storage

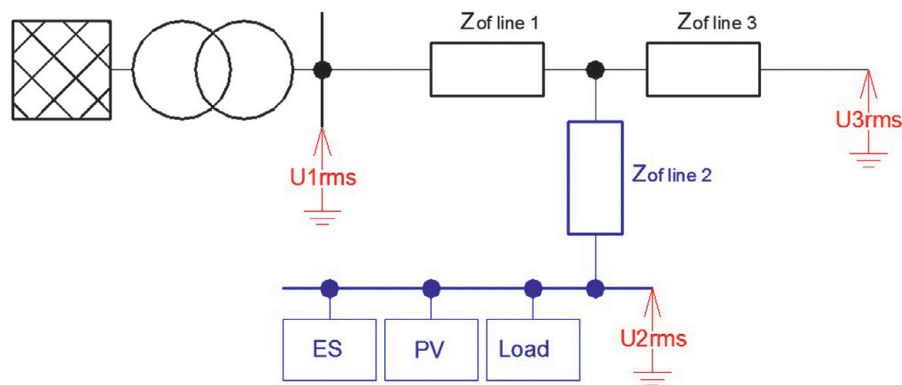


Fig. 11. Voltage measurement locations

D. Impact of prosumer system on distribution grid

The test of the impact of the prosumer system on the distribution grid was limited to the analysis of the voltages at the system's three nodes, i.e. transformer substation's buses, prosumer's interconnection with the grid, and distribution line's end (Fig. 11).

Two system operation modes were considered: without and with the storage. Fig. 12 shows the voltage measurement results in relative units, in selected grid nodes, for the system without energy storage, and Fig. 13 with the storage.

At the prosumer system operation without energy storage, there are voltage drops at active power inputs from the supply grid, and voltage increases when the prosumer outputs (sells) energy to the grid. These phenomena are shown in Fig. 12. The use of the storage had stabilised the active power intake from the grid at a constant level (Fig. 7), and thus the voltages at the tested grid locations, as shown in the test results shown in Fig. 13.

6. Conclusions

Installation of renewable sources at electricity consumers changes their status from the consumers to prosumers. At the same time, it may result in certain technical effects that are unfavourable to such prosumers. The active power generation by a local source decreases

the prosumer's active power intake, and thus deteriorates their power factor. This may result in additional charges for the excessive reactive power (energy) intake. Where prosumer's power output exceeds the demand of their loads, there may be increases in the voltage that depend on the active power output to the grid.

These problems can be avoided by installing at the prosumer an electricity storage with a proper system implemented for its operation control.

The paper proposes a control algorithm that uses active and passive power balances to determine power pre-sets for the energy storage at a specified power exchange with the supply grid. The algorithm assumes that the exchange power should be equal to the average power of the prosumer's receiving and generating devices.

Setting the exchange power at the level corresponding to the system's average power results in a reduction in the extent of the storage charge changes, thus reducing the risk of the storage's extreme operating conditions (full charge or complete discharge). With proper capacity selection, the storage may be operated without restriction, with similar charges at the beginning and end of the operating period.

Simulation tests have confirmed the correct operation of the proposed control algorithm, which ensures the stabilization of

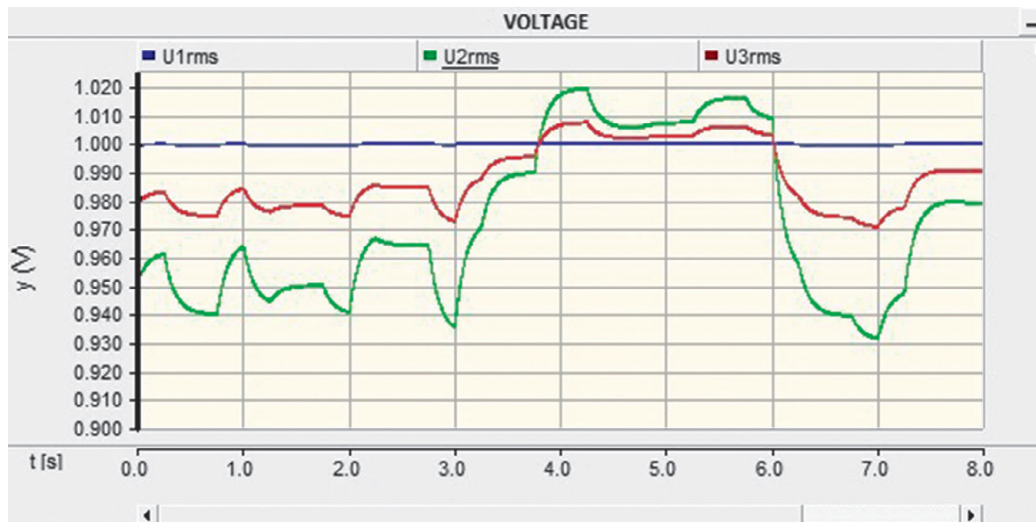


Fig. 12. Voltages for the system without electricity storage

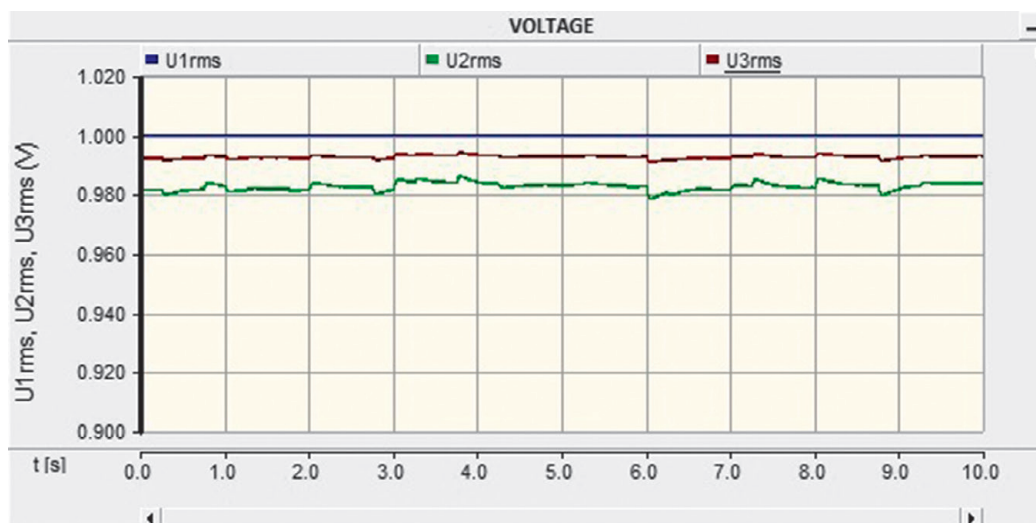


Fig. 13. Voltages for the system with electricity storage

active power exchange with the supply grid, maintenance of the power factor required for the prosumer system, and limits voltage variations in the grid.

REFERENCES

1. M.N.S. Ariyasinghe, K.T.M.U. Hemapala, "Microgrid Test-Beds and Its Control Strategies, Scientific Research", *Smart Grid and Renewable Energy*, No. 4, 2013, pp. 11–17.
2. S. Bielecki, T. Skoczowski, "Potrzeba zmian rozliczeń za moc bierną" [The need for reactive power billing changes], *Rynek Energii*, No. 4(119), 2015.
3. J.M. Guerrero et al., "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids – Part I: Decentralized Hierarchical Control", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, No. 4, 2013, pp. 1254–1262.
4. J.M. Guerrero et al., "Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids – Part I: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids", *IEEE Transactions on Industrial Electronics*, No. 4, 2013, pp. 1263–1270.
5. IRIESD, "Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej" [IRIESD Distribution GridCode], PGE Dystrybucja SA, 2013.
6. J. Malko, H. Wojciechowski, "Magazynowanie energii – nowe technologie" [Energy storage – new technologies], *Nowa Energia*, No. 2–3, 2015.
7. M. Milošević, "Hysteresis Current Control in Three-Phase Voltage Source Inverter" [online], <https://pdfs.semanticscholar.org/2f46/732154f55b00ea9514a979cb0e7f5775a06b.pdf> [access: 29.03.2017].
8. R. Pawełek, I. Wasiak, P. Kelm, "Autonomous Operation of Low Voltage Microgrids", *Acta Energetica*, No. 3 (19), 2014, pp. 156–163.
9. M.R. Sandgani, S. Sirouspour, "Coordinated Dispatch of Energy Storage in a Network of Optimal Grid-connected Microgrids", *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017.
10. Taryfa PGE dla energii elektrycznej na okres od 1 stycznia 2016 r. do 31 grudnia 2016 r. dla odbiorców grup taryfowych G,

- 17 grudnia 2015 [PGE tariff for electricity for the period from January 1, 2016 to December 31, 2016 for customers in tariff groups G, December 17, 2015], *Biuletyn Branżowy URE – Energia Elektryczna* nr DRE-4211-53(7)2015/2690/IX/JCz z 17 grudnia 2015 [URE Sectoral Bulletin – Electricity No. DRE-4211-53 (7) 2015/2690 / IX / JC of 17 December 2015].
11. Taryfa, Energa Operator, *Biuletyn branżowy URE – Energia elektryczna* [Tariff, Energa Operator, URE Sectoral Bulletin – Electricity], No. 178/2015 z 17 December 2015, Gdańsk 2016.
 12. Umowa Kompleksowa o Świadczenie Usług Dystrybucji i Sprzedaży Energii Elektrycznej [Comprehensive Agreement for the Provision of Electricity Distribution Services and Sale], URE Energy Regulatory Office, Warsaw, 25.06.2009.
 13. Umowa Świadczenia Usług Dystrybucji Energii Elektrycznej [Agreement for the Provision of Electricity Distribution Services], URE Energy Regulatory Office, Warsaw, 25.06.2009.
 14. Act of 20 February 2015 on renewable energy sources, *J. of L.* 2015, item 478.
 15. I. Wasiak, R. Pawełek, R. Miński, "Energy storage application in low voltage microgrids for energy management and power quality improvement", *IET Generation, Transmission & Distribution*, Vol. 8, Iss. 3, 2014, vpp. 463–472.
 16. I. Wasiak, R. Pawełek, R. Mieński, „Zasobniki energii w mikrosystemach elektroenergetycznych” [Energy storage devices in power microsystems], XV. International Scientific Conference „Current Problems in Power Engineering”, APE '11, Gdańsk – Jurata, 8–10 June 2011, Vol. II, pp. 159–166.

Przemysław Urbanek

Łódź University of Technology

e-mail: przemyslaw.urbanek@dokt.p.lodz.pl

Graduated from the Faculty of Electrical Engineering, Electronics, Computer Science, and Automation of Łódź University of Technology (2015). The area of his research activities includes issues of power quality and distributed generation.

Irena Wasiak

Łódź University of Technology

e-mail: irena.wasiak@p.lodz.pl

A graduate of Łódź University of Technology. From the beginning of his career, she has been working at the Institute of Electrical Power Engineering of her alma mater. She obtained her doctoral degree and habilitated doctorate in electrical engineering. In 2002–2008 she was deputy dean of the Faculty of Electrical Engineering, Electronics, Computer Science and Automation of the university. Currently she is the director of the Institute of Electrical Power Engineering and the head of the Department of Power Grids. Member of The Institution of Engineering and Technology and the Committee for Electricity Quality and Effective Utilisation of SEP Association of Polish Electrical Engineers, associated member of Power Systems Section of the Polish Academy of Sciences.

Ryszard Pawełek

Łódź University of Technology

e-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl

A graduate of the Electrical Engineering Department of Łódź University of Technology (1977). Currently he is employed at the Institute of Power Engineering of his alma mater as an assistant professor, where he is the deputy director of the institute. The area of his research interests includes: electric power quality, distributed generation, power microsystems. Member and vice-chairman for science of the Polish Committee for Electricity Quality and Effective Utilisation. Expert in electrical power quality of SEP Association of Polish Electrical Engineers.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 213–221. When referring to the article please refer to the original text.

PL

Strategia sterowania zasobnikiem energii w instalacji prosumenckiej i jej wpływ na pracę sieci dystrybucyjnej

Autorzy

Przemysław Urbanek
Irena Wasiak
Ryszard Pawełek

Słowa kluczowe

mikrosystem, instalacja prosumencka, prosument, zasobnik energii elektrycznej, sterowanie zasobnikiem energii, jakość energii elektrycznej

Streszczenie

Artykuł dotyczy analizy pracy instalacji prosumenckiej niskiego napięcia składającej się z odbiorników oraz źródeł energii elektrycznej. Badana instalacja odwzorowuje hipotetycznego odbiorcę ze zmiennym obciążeniem oraz zmienną produkcją energii. Przedstawiono główne problemy techniczne związane z pracą takiej instalacji. Rozważono zastosowanie w instalacji zasobnika energii elektrycznej, którego celem jest zarządzanie mocą czynną oraz realizacja usług pomocniczych istotnych z punktu widzenia właściciela instalacji. Podstawowym kryterium pracy układu jest maksymalizacja wykorzystania energii produkowanej przez prosumenta oraz utrzymanie współczynnika mocy na żądanym poziomie. Skuteczność pracy zasobnika zbadano za pomocą modelu symulacyjnego opracowanego w programie PSCAD/EMTDC. Zaprezentowano przykładowe wyniki symulacji

Data wpływu do redakcji: 14.02.2017

Data akceptacji artykułu: 07.03.2017

Data publikacji online: 30.06.2017

1. Wprowadzenie

Ciągły rozwój technologii wytwórczych energii elektrycznej, możliwość zwiększenia pewności zasilania oraz obniżenia kosztów energii elektrycznej spowodowały zainteresowanie obywateli posiadaniem własnej elektrowni. Odbiorcy rozpoczęli wyposażanie swoich instalacji domowych w rozproszone źródła energii elektrycznej, a w szczególności odnawialne źródła energii (OZE), wykorzystujące darmową energię słońca i wiatru. Można przewidywać, że przy zmniejszającej się cenie takich źródeł trend ten będzie się utrzymywał.

Ustalenia klimatyczne oraz polityka Unii Europejskiej wymogła na polskim ustawodawcy wprowadzenie definicji prosumenta. Zgodnie z ustawą o odnawialnych źródłach energii [14] prosument jest osobą fizyczną wytwarzającą energię elektryczną na własne potrzeby, co oznacza jednoczesną produkcję i konsumpcję energii. Energia wytwarzana w źródłach jest zużywana w odbiornikach, a jej nadwyżka sprzedawana jest do sieci elektroenergetycznej. W sytuacji przeciwnej, gdy produkcja z lokalnego źródła jest mniejsza niż zapotrzebowanie, brakująca ilość energii jest kupowana od przedsiębiorstwa energetycznego. W świetle obecnego prawa prosument jest więc odbiorcą energii elektrycznej, który ma przyporządkowaną odpowiednią taryfę i zgodnie z nią rozlicza się za pobraną/sprzedaną energię.

Ustawa [14] określa zasady sprzedaży energii elektrycznej w ten sposób, że prosument ma możliwość poboru z sieci darmowej energii w ilości 80% nadwyżek energii przesłanej przez niego do sieci. Prosument nie jest wytwórcą energii, a taki stan rzeczy obliuguje go do dotrzymania warunków umowy świadczenia usług dystrybucji energii elektrycznej [12,13] w zakresie mocy biernej.

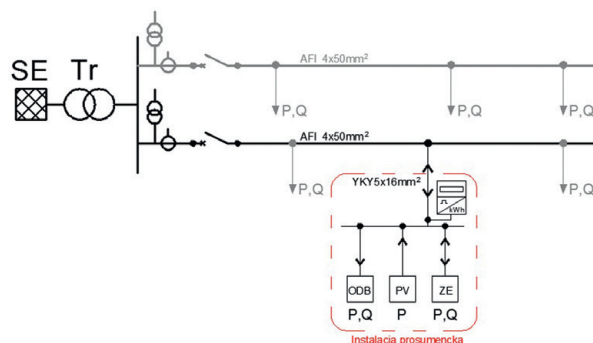
Zgodnie z tymi warunkami prosument ma prawo do poboru mocy biernej do wartości wynikającej z ustalonego współczynnika $\text{tg } \varphi$. Produkcja energii elektrycznej z własnego źródła powoduje zmniejszenie poboru mocy czynnej z sieci dystrybucyjnej. Jednocześnie pobór mocy biernej pozostaje bez zmian, ponieważ źródła energii pracują zwykle ze współczynnikiem mocy $\cos \varphi = 1$. Konsekwencją takiego stanu rzeczy jest wzrost wartości $\text{tg } \varphi$ w punkcie przyłączenia instalacji do sieci dystrybucyjnej. Przekroczenie wartości współczynnika $\text{tg } \varphi = 0,4$ wiąże się naliczaniem kar przez zakład energetyczny (ZE) [10, 11]. W konsekwencji zrealizowana przez prosumenta inwestycja w postaci np. turbiny wiatrowej nie przynosi oczekiwanej oszczędności, a w skrajnym przypadku może przynosić straty [2].

Rozwój instalacji prosumenckich zmienia warunki pracy sieci dystrybucyjnych. Operatorzy sieci wskazują na wiele

problemów technicznych współpracy sieci i instalacji, związanych przede wszystkim z zapewnieniem bezpieczeństwa pracy sieci, nieprzekraczaniem obciążalności linii i urządzeń, czy też utrzymaniem napięcia w węzłach sieci w zadanych granicach [5]. Rozwiązanie wskazanych powyżej problemów jest możliwe przy wykorzystaniu zasobnika energii [3, 4]. W artykule przedstawiono strategię sterowania pracą zasobnika zapewniającą zwiększenie efektywności energetycznej pracy instalacji prosumenckiej przy stałym współczynniku mocy. Proponowana strategia jest także korzystna dla operatora sieci, gdyż zapewnia nieprzekraczanie określonych wartości mocy czynnej wymienianej z siecią zasilającą.

2. Instalacja prosumencka

Infrastruktura wytwórcza prosumenta może mieć moc nieprzekraczającą 40 kW [14]. Zapis ten ogranicza przywileje niekontrolowanego przyłączania źródeł energii



Rys. 1. Schemat przykładowej wiejskiej sieci dystrybucyjnej

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 213–221. When referring to the article please refer to the original text.

PL

elektrycznej dla właścicieli budynków mieszkalnych.

Na rys. 1 pokazano schemat fragmentu sieci dystrybucyjnej, do której podłączona jest instalacja prosumencka. Prezentowana sieć jest siecią wiejską z dwiema liniami napowietrznymi (AFL 4 x 50 mm²) o długościach 1 km, zasilaną z napowietrznej stacji transformatorowej. Kolorem szarym zaznaczono część sieci, która nie będzie analizowana w artykule. Dla wybranego przypadku jako wewnętrzną linię zasilającą (WLZ) instalacji prosumenckiej przyjęto linię kablową YKY 5 x 16 mm² o długości 50 m.

Najpopularniejszymi źródłami energii elektrycznej do implementacji dla prosumenta są turbiny wiatrowe (TW) oraz panele fotowoltaiczne (PV). Oba źródła należą do grupy źródeł niesterowalnych, tzn. ilość produkowanej energii jest niezmienna. Istnieją metody szacowania produkcji energii na podstawie prognoz meteorologicznych, są to jednak sposoby zawodne. Możliwość regulacyjnej dla obu wymienionych źródeł również są ograniczone i sprowadzają się praktycznie do wyłączenia i włączenia urządzenia. Zasadniczą różnicą w produkcji energii obu źródeł jest czas produkcji. W przypadku TW może to być cała doba, podczas gdy PV mogą generować moc od świtu do zmierzchu, w zależności od stopnia nasłonecznienia.

Generacja mocy biernej w przypadku TW i PV zależy wyłącznie od zastosowanego inwertera. Istnieją rozwiązania urządzeń, które oprócz przetwarzania mocy czynnej umożliwiają produkcję mocy biernej. Są to jednak urządzenia droższe niż przeciętnie używane w instalacjach prosumenckich. Dla opisanych badań przyjęto wykorzystanie inwertera produkującego moc czynną przy współczynniku $\cos \varphi = 1$.

3. Praca instalacji prosumenckiej z zasobnikiem energii

A. Funkcje zasobnika

Głównym powodem instalacji źródeł energii elektrycznej przez odbiorców jest – obok zwiększenia niezawodności zasilania – minimalizowanie kosztów zakupu energii z sieci energetyki zawodowej. Instalacja prosumencka powinna więc optymalizować wykorzystanie energii elektrycznej produkowanej w lokalnych źródłach. Ze względu na losowy charakter zmienności energii pierwotnej OZE niemożliwe jest dopasowanie krzywej produkcji do krzywej obciążenia dobowego. Wyłączenie źródła przy nadmiarze produkcji w stosunku do zapotrzebowania jest nieefektywne i oddala w czasie zwrotu inwestycji. Nadwyżki energii elektrycznej powinny być w tym przypadku oddawane do sieci. Natomiast w okresach zwiększonego zapotrzebowania energia musi być pobierana z sieci. Z punktu widzenia prosumenta oznacza to traktowanie sieci elektroenergetycznej jako zasobnika energii elektrycznej ze sprawnością ok. 80% (dochodzą koszty stałe poboru mocy). Korzystniejszym rozwiązaniem może być ograniczenie wymiany mocy z siecią przez zastosowanie lokalnego zasobnika energii.

Proponowane w artykule rozwiązanie zakłada zainstalowanie zasobnika energii w instalacji prosumenckiej. Można

stwierdzić, że na obecnym etapie rozwoju technologii magazynowania energii elektrycznej najkorzystniejszym dla instalacji prosumenckich rodzajem zasobnika jest bateria akumulatorów [6, 7]. Zasobnik przyłączony jest do instalacji przez inwerter PWM. Sterowanie zaworami inwertera pozwala na kontrolę zarówno mocy czynnej, jak i biernej zasobnika.

Założono wykorzystanie zasobnika energii [9,16] do realizacji dwóch podstawowych zadań:

- zmniejszenie mocy czynnej pobieranej z sieci, a co za tym idzie obniżenie opłat za energię elektryczną
- kompensowanie mocy biernej w instalacji prosumenckiej do poziomu zapewniającego wymagany współczynnik mocy.

Inwerter zasobnika ma za zadanie generowanie takiej ilości mocy biernej, aby współczynnik $\text{tg } \varphi$ pozostał na poziomie 0,4. Od skuteczności działania zasobnika będzie zależała wysokość opłat za ponadnormatywny pobór mocy biernej. Schemat typowej instalacji prosumenckiej z zasobnikiem przedstawiono na rys. 1.

B. Strategia sterowania zasobnikiem

Dla instalacji prosumenckiej można określić dwa tryby pracy zasobnika opisane poniżej.

a) Rozładowanie zasobnika zachodzące, gdy spełniony jest warunek:

$$P_{odb} > P_{PV} \text{ oraz } E_{zas} > E_{min} \Rightarrow P_{zas} < 0 \quad (1)$$

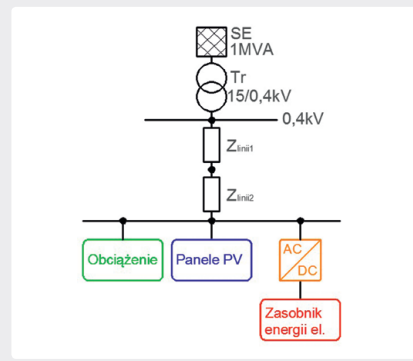
gdzie: P_{odb} – moc czynna odbioru, P_{PV} – moc czynna PV, E_{zas} – energia zmagazynowana w zasobniku, $E_{min} = 10\% E_n$, przy czym E_n oznacza znamionową pojemność zasobnika, P_{zas} – moc zasobnika, przy czym znak minus oznacza oddawanie mocy czynnej.

W tym przypadku energia jest pobierana z zasobnika przez lokalne odbiory, zmniejszając moc pobieraną z sieci dystrybucyjnej.

b) Ładowanie zasobnika, kiedy:

$$P_{odb} < P_{PV} \text{ oraz } E_{zas} < E_{max} \Rightarrow P_{zas} > 0 \quad (2)$$

przy czym: $E_{max} = 90\% E_n$



Rys. 2. Schemat badanej instalacji prosumenckiej

Nadwyżka energii produkowanej w źródle fotowoltaicznym jest pobierana przez zasobnik, który gromadzi wytworzoną w ten sposób energię elektryczną. W przypadku równości mocy PV i odbiorów moc zasobnika jest równa 0.

W zależności od stopnia naładowania zasobnika wprowadzono ograniczenie dla oddawania energii przy rozładowanym zasobniku oraz ograniczenie ładowania przy pełnym naładowaniu.

W obu trybach pracy moc bierna pobierana przez odbiory w instalacji jest kompensowana przez inwerter zasobnika.

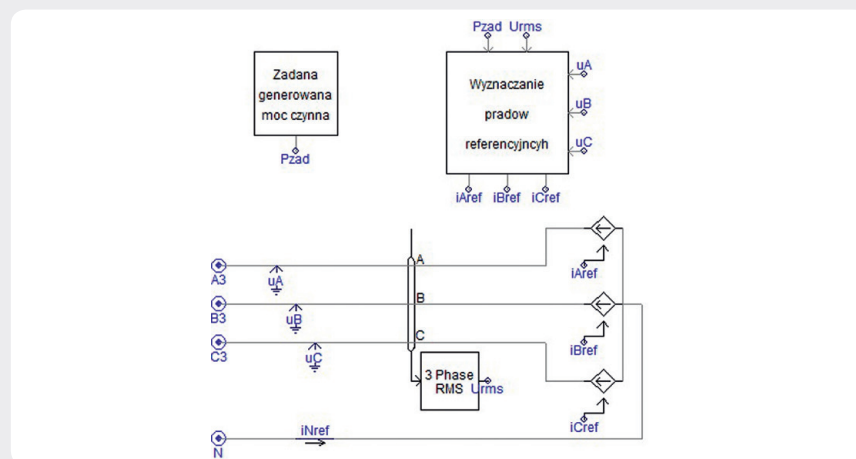
C. Algorytm sterowania zasobnikiem energii elektrycznej

Sterowanie inwerterem w celu spełnienia założonych funkcji zasobnika odbywa się poprzez wyznaczenie odpowiednich zadanych wartości mocy. Zadana moc czynna zasobnika wynika z bilansu mocy w instalacji prosumenckiej. Moc ta wyznaczana jest zgodnie z równaniem:

$$P_{zad} = P_{odb} + P_{PV} + P_{wym} \quad (3)$$

gdzie: P_{zad} – zadana moc czynna zasobnika, P_{wym} – ustalona wartość mocy czynnej pobieranej z sieci.

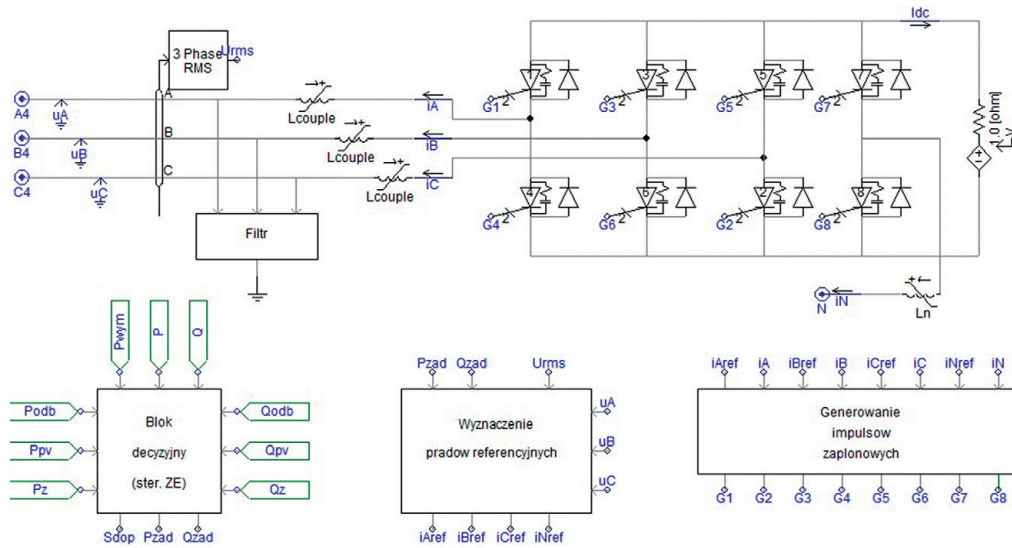
W celu zagwarantowania ciągłej pracy zasobnika, z wykluczeniem długotrwałego występowania stanów całkowitego naładowania oraz rozładowania, założono, że wartość mocy czynnej wymienianej



Rys. 3. Schemat zastępczy źródła PV w programie PSCAD

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 213–221. When referring to the article please refer to the original text.

PL



Rys. 4. Schemat modelu zasobnika energii w programie PSCAD

z siecią odpowiada mocy średniej instalacji prosumenckiej, wyznaczonej z zależności:

$$P_{wym} = \frac{\int_0^t (P_{odb} + P_{pv}) dt}{t} \quad (4)$$

Z powyższych wzorów wynika, że w zależności od relacji pomiędzy mocą źródła PV i mocą odbioru moc zadana zasobnika może być dodatnia (ładowanie) lub ujemna (rozładowanie).

Analogicznie wartość zadana mocy biernej zasobnika wyznaczana jest z bilansu mocy biernej w instalacji prosumenta:

$$Q_{zad} = Q_{odb} + Q_{pv} + tg \varphi_{zad} P_{wym} \quad (5)$$

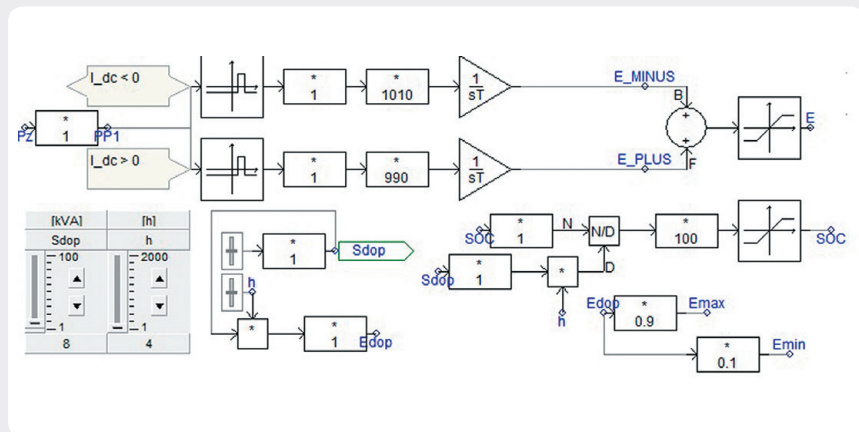
gdzie: Q_{zad} – zadana moc bierna zasobnika, Q_{odb} – moc bierna odbioru, Q_{pv} – moc bierna PV, $tg \varphi_{zad}$ – zadana (wymagana) wartość $tg \varphi$ dla instalacji prosumenckiej.

Zaproponowany algorytm sterowania działa w otwartym układzie regulacji i jest realizowany w centralnym sterowniku, do którego są doprowadzone sygnały z modułów pomiarowych poszczególnych urządzeń. W algorytmie zaimplementowano kontrolę ograniczeń sieciowych dotyczących górnej granicy mocy czynnej pobieranej z sieci dystrybucyjnej przy wartości współczynnika mocy $tg \varphi$ w zakresie 0,2–0,4.

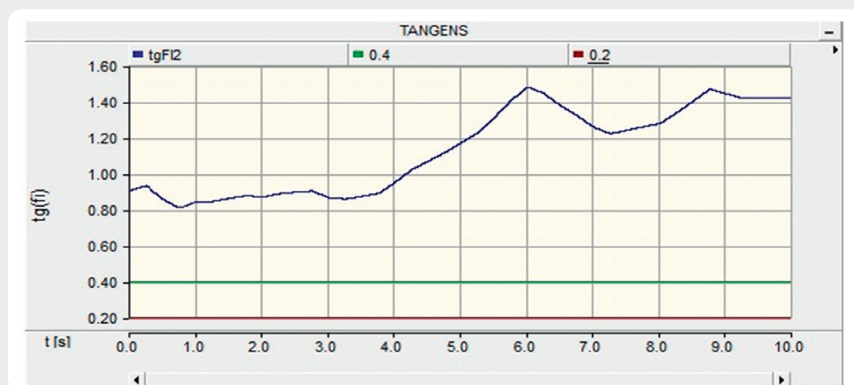
4. Model symulacyjny badanego układu

W celu przeprowadzenia analizy pracy instalacji prosumenckiej z zasobnikiem [1], sterowanym według proponowanego algorytmu, rozważono przykładowy układ pokazany na rys. 2, w którym prosument przyłączony jest do sieci niskiego napięcia zasilanej przez transformator SN/nn.

Układ ten odwzorowano za pomocą symulatora zrealizowanego w środowisku programu PSCAD®/EMTDC. W symulatorze system elektroenergetyczny zastąpiono zastępczym źródłem napięcia przemiennego z indukcyjnością wewnętrzną, wynikającą z mocy



Rys. 5. Układ obliczający stopień naładowania zasobnika



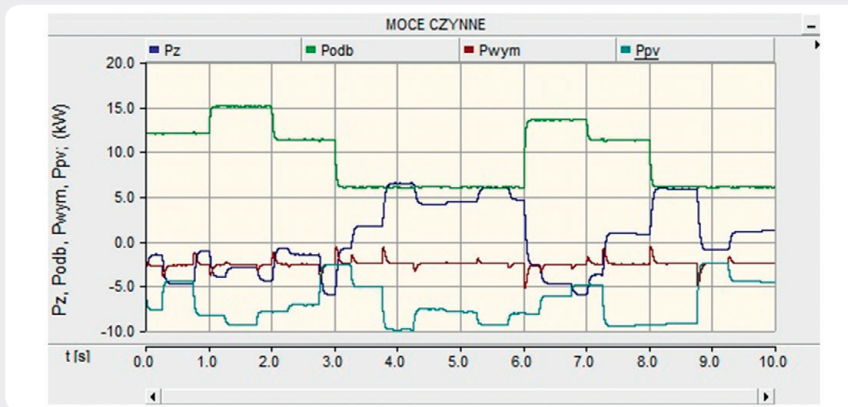
Rys. 6. Wartość współczynnika mocy dla układu bez zasobnika energii elektrycznej

zwracającej sieci (1 MVA). Zamodelowano transformator typu TOd 63/15s o przekładni 15/0,4 kV, mocy 63 kVA i układzie połączeń uzwojeń Dy5. Obciążenie prosumenta zastąpiono modelem 3-fazowego symetrycznego odbioru rezystancyjno-indukcyjnego,

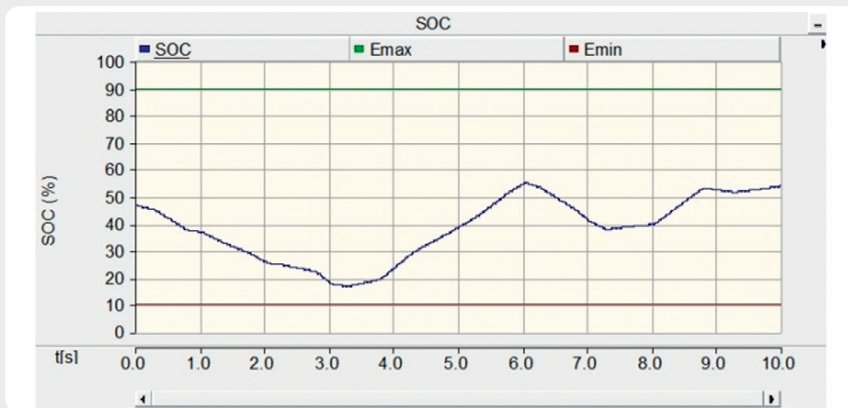
w postaci połączonych w gwiazdę impedancji. Każda faza jest reprezentowana przez równoległe połączenie rezystancji i indukcyjności. Moc odbioru jest zmienna według założonego harmonogramu, przy czym wartość maksymalna wynosi 16,16 kVA.

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 213–221. When referring to the article please refer to the original text.

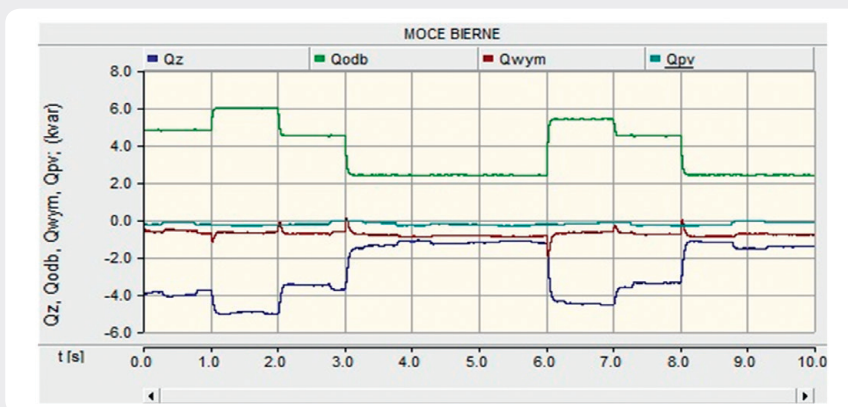
PL



Rys. 7. Bilans mocy czynnych w instalacji prosumenta



Rys. 8. Wskaźnik stopnia naładowania zasobnika



Rys. 9. Bilans mocy biernych w instalacji prosumenta

Przyjęto, że współczynnik mocy odbioru jest stały i wynosi $\text{tg } \varphi = 0,4$. Panele fotowoltaiczne zostały zamodelowane w postaci trzech 1-fazowych źródeł prądowych, które generują moc czynną w sposób losowy, przy czym wartości produkowanej mocy zawierają się w zakresie 2–10 kW. Schemat zastępczy źródła PV zrealizowany w programie PSCAD przedstawiono na rys. 3.

W modelu symulacyjnym zasobnik został zamodelowany jako źródło napięcia stałego oraz współpracujący z nim 3-fazowy

inwerter sterowany techniką PWM. W celu eliminacji zakłóceń oraz wygładzenia przebiegów prądów zastosowano filtr pojemnościowy oraz indukcyjność sprzęgającą. Schemat modelu obwodów głównych zasobnika w programie PSCAD zaprezentowano na rys. 4.

Sterowanie zasobnikiem odbywa się przez sterowanie mocą inwertera. Z zależności (3), (4) i (5) wyznaczane są wartości zadane mocy czynnej i biernej zasobnika, dla których obliczane są prądy referencyjne. Prądy referencyjne są podstawą generowania impulsów

zapłonowych podawanych na zawory inwertera przy wykorzystaniu regulatora histerezy. Układ sterowania składa się z trzech bloków:

1. blok decyzyjny wyznaczania mocy zadanych
2. blok obliczania prądów referencyjnych
3. blok wykonawczy generowania impulsów zapłonowych na zawory inwertera.

W algorytmie sterowania uwzględniono kontrolę stopnia naładowania baterii. Sposób obliczenia energii zmagazynowanej w zasobniku oraz jego stopnia naładowania pokazano schematycznie na rys. 5. Wartości współczynników przed elementami całkowitymi pozwalają na uwzględnienie strat mocy wynikających z magazynowania energii.

5. Wyniki badań symulacyjnych

A. Wprowadzenie

Za pomocą opracowanego modelu przeprowadzono badania symulacyjne pracy badanej instalacji prosumenckiej. W pierwszej kolejności zbadano pracę układu bez zasobnika. Na rys. 6 pokazano zmiany wartości współczynnika mocy $\text{tg } \varphi$ dla instalacji odbiorczej z panelami PV, obliczone na podstawie pomiaru energii czynnej i biernej. Przedstawione wyniki potwierdzają zasadnicze problemy instalacji prosumenckich. Zmniejszenie mocy czynnej pobieranej z sieci zasilającej, na skutek generacji mocy przez źródło PV, przy niezmiennym poborze mocy biernej odbiorców, skutkuje wzrostem wartości współczynnika mocy $\text{tg } \varphi$, którego wartość znacznie przekracza wartość wymaganą przez operatora.

B. Bilansowanie mocy czynnej

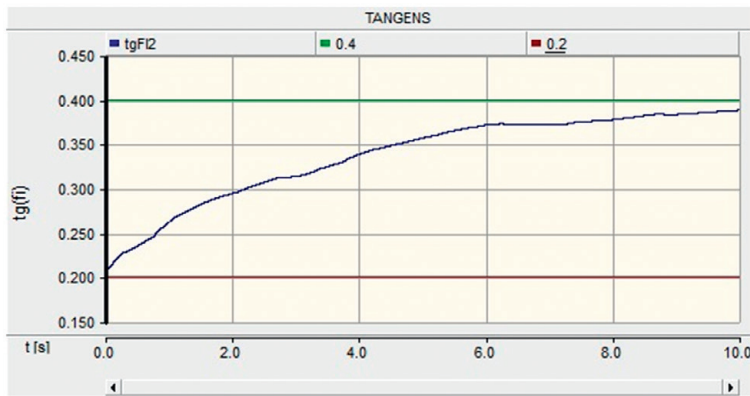
Jednym z głównych zadań zasobnika jest bilansowanie mocy czynnej w instalacji prosumenckiej na poziomie określonej wartości mocy wymiany z siecią zasilającą. Na rys. 7 zaprezentowano bilans mocy czynnych w badanej instalacji, zrealizowany w warunkach, gdy moc pobierana z sieci odpowiada wartości średniej mocy instalacji prosumenta w analizowanym okresie czasu.

Na rys. 7 kolorem zielonym wyróżniono zmiany mocy czynnej obciążenia. Założono, że podczas symulacji moc odbiorów zmienia swoją wartość sześć razy w zakresie 6–15 kW. Zmienne wytwarzanie mocy przez panele PV oznaczono kolorem niebieskim. Linia granatowa pokazuje zmiany mocy zasobnika w celu utrzymania wartości mocy wymiany z siecią (krzywa czerwona) na stałym ustalonym poziomie. Na rys. 8 pokazano zmiany stopnia naładowania (SOC) zasobnika energii elektrycznej w okresie symulacji. Na początku symulacji akumulator był naładowany na poziomie ok. 50%.

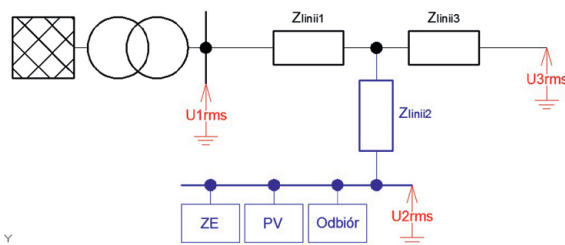
Zmniejszanie się wartości wskaźnika SOC oznacza rozładowywanie, natomiast jego wzrost – ładowanie zasobnika. Przy mocy wymiany z siecią na poziomie mocy średniej w analizowanym okresie czasu wartości wskaźnika SOC na początku i na końcu tego okresu są zbliżone. Wraz z doбором odpowiedniej pojemności baterii akumulatorów gwarantuje to ciągłą pracę zasobnika, wykluczając stany pełnego naładowania oraz rozładowania [8].

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 213–221. When referring to the article please refer to the original text.

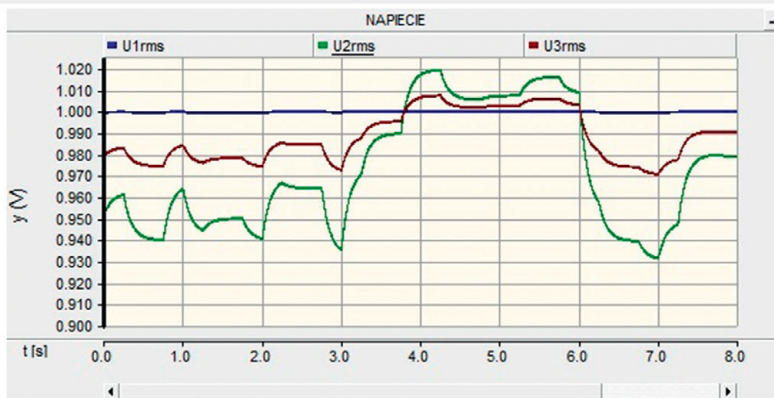
PL



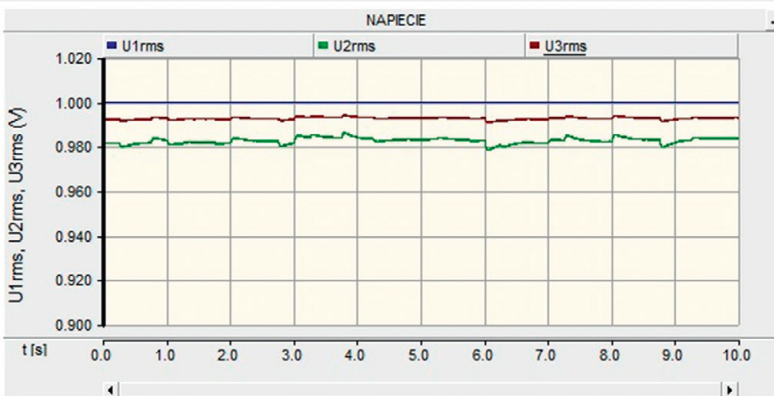
Rys. 10. Wartość współczynnika $\text{tg } \varphi$ dla układu z zasobnikiem energii elektrycznej



Rys. 11. Miejsca pomiaru napięcia



Rys. 12. Wartości napięć dla układu bez zasobnika energii elektrycznej



Rys. 13. Wartości napięć dla układu z zasobnikiem energii elektrycznej

Długa praca układu przy mocy wymiany z siecią na poziomie innym niż moc średnia prowadziłaby do całkowitego rozładowania (gdy moc wymiany jest mniejsza od mocy średniej) lub pełnego naładowania zasobnika (gdy moc wymiany jest większa od mocy średniej).

C. Kompensacja mocy biernej

Na rys. 9 pokazano bilans mocy biernej w instalacji prosumenta. Moc bierne odbiorów (krzywa zielona) zmienia się odpowiednio do zmian mocy czynnej przy zachowaniu wartości współczynnika mocy $\text{tg } \varphi = 0,4$. Moc bierne wytwarzana przez źródło PV, oznaczona kolorem niebieskim, jest praktycznie równa zero. Inwertor zasobnika wytwarza moc bierną (linia granatowa) zgodnie z wartością mocy zadanej obliczonej ze wzoru (5), w celu skompensowania mocy biernej odbioru i uzyskania wymaganego współczynnika mocy w punkcie przyłączenia prosumenta do sieci zasilającej [15]. Efekt działania opracowanego algorytmu sterowania widoczny jest na rys. 10, na którym pokazano zmiany wartości współczynnika mocy $\text{tg } \varphi$ dla instalacji prosumenta z zasobnikiem energii obliczonych na podstawie pomiaru energii czynnej i biernej. Jak widać na tym rysunku, uśredniona wartość współczynnika mocy bliska jest wartości zadanej równej 0,4.

D. Wpływ instalacji prosumenckiej na sieć dystrybucyjną

Badanie wpływu instalacji prosumenckiej na pracę sieci dystrybucyjnej ograniczono do analizy napięć w trzech węzłach badanego układu, tj. na szynach stacji transformatorowej, w węźle przyłączenia prosumenta oraz na końcu linii dystrybucyjnej (rys. 11).

Rozważono dwa przypadki pracy instalacji: bez zasobnika i z zasobnikiem. Na rys. 12 pokazano wyniki pomiarów napięcia, wyrażone w jednostkach względnych, w wybranych węzłach sieci dla układu bez zasobnika energii, a na rys. 13 przy załączonym zasobniku.

Podczas pracy instalacji prosumenckiej bez zasobnika energii występują spadki napięcia przy poborze mocy czynnej sieci zasilającej oraz wzrosty napięcia, gdy prosument oddaje (sprzedaje) energię do sieci. Zjawiska te widoczne są na rys. 12. Zastosowanie zasobnika ustabilizowało pobór mocy czynnej z sieci na stałym poziomie (rys. 7), a tym samym wartości napięcia w badanych miejscach sieci, co prezentują wyniki badań pokazane na rys. 13.

6. Wnioski

Instalowanie odnawialnych źródeł u odbiorców energii elektrycznej powoduje zmianę ich statusu z odbiorców na prosumentów. Jednocześnie może to powodować określone skutki techniczne niekorzystne z punktu widzenia odbiorcy. Generacja mocy czynnej przez lokalne źródło energii powoduje zmniejszenie poboru mocy czynnej przez prosumenta, a tym samym pogorszenie współczynnika mocy. Może to spowodować naliczenie dodatkowych opłat za ponadnormatywny pobór mocy (energii) biernej. W przypadku, gdy wartość wytwarzanej mocy przekracza zapotrzebowanie

This is a supporting translation of the original text published in this issue of "Acta Energetica" on pages 213–221. When referring to the article please refer to the original text.

PL

zainstalowanych u prosumenta odbiorów, mogą wystąpić wzrosty napięcia o wartościach zależnych od wartości mocy czynnej oddawanej do sieci.

Wymienionych wyżej problemów można uniknąć, instalując u prosumentów zasobniki energii elektrycznej z zaimplementowanym odpowiednim systemem sterowania ich pracą.

W artykule zaproponowano algorytm sterowania wykorzystujący bilanse mocy czynnych i biernych do wyznaczania wartości zadanych mocy dla zasobnika energii, przy określonej wartości mocy wymienianej z siecią zasilającą. W algorytmie przyjęto, że moc wymiany powinna być równa wartości średniej mocy urządzeń odbiorczych i wytwórczych zainstalowanych u prosumenta.

Ustalenie mocy wymiany na poziomie odpowiadającym mocy średniej instalacji powoduje zmniejszenie zakresu zmian stopnia naładowania zasobnika, a więc zmniejsza ryzyko osiągnięcia granicznych warunków pracy (pełnego naładowania lub całkowitego rozładowania) zasobnika. Przy właściwym doborze pojemności można uzyskać pracę zasobnika bez ograniczeń, przy czym stan naładowania na początku i na końcu okresu pracy jest zbliżony.

Badania symulacyjne potwierdziły poprawność działania opracowanego algorytmu sterowania, który zapewnia stabilizację wymiany mocy czynnej z siecią zasilającą, utrzymanie wymaganej wartości współczynnika mocy dla instalacji prosumenta i ogranicza zmiany napięcia w sieci.

Bibliografia

1. Ariyasinghe M.N.S., Hemapala K.T.M.U., Microgrid Test-Beds and Its Control Strategies, Scientific Research, *Smart Grid and Renewable Energy* 2013, nr 4, s. 11–17.
2. Bielecki S., Skoczkowski T., Potrzeba zmian rozliczeń za moc bierną, *Rynek Energii* 2015, nr 4(119).
3. Guerrero J.M. i in., Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids – Part I: Decentralized Hierarchical Control, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2013, nr 4, s. 1254–1262.
4. Guerrero J.M. i in., Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids – Part II: Power Quality, Energy Storage, and AC/DC Microgrids, *IEEE Transactions on Industrial Electronics* 2013, nr 4, s. 1263–1270.
5. IRiESD, Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej [IRiESD Distribution GridCode], PGE Dystrybucja SA, 2013.
6. Malko J., Wojciechowski H., Magazynowanie energii – nowe technologie, *Nowa Energia* 2015, nr 2–3.
7. Milošević M., Hysteresis Current Control in Three-Phase Voltage Source Inverter [online], <https://pdfs.semanticscholar.org/2f46/732154f55b00ea9514a979c-b0e7f5775a06b.pdf> [dostęp: 29.03.2017].
8. Pawełek R., Wasiak I., Kelm P., Autonomous Operation of Low Voltage Microgrids, *Acta Energetica* 2014, No. 3/19, s. 156–163.
9. Sandgani M.R., Sirouspour S., Coordinated Dispatch of Energy Storage in a Network of Optimal Grid-connected Microgrids, *IEEE Transactions on Sustainable Energy*, 2017.
10. Taryfa PGE dla energii elektrycznej na okres od 1 stycznia 2016 r. do 31 grudnia 2016 r. dla odbiorców z grup taryfowych G, 17 grudnia 2015, Biuletyn Branżowy URE – Energia Elektryczna nr DRE-4211-53(7)2015/2690/IX/JCz z 17 grudnia 2015.
11. Taryfa, Energa Operator, Biuletyn branżowy URE – Energia elektryczna, nr 178/2015 z 17 grudnia 2015, Gdańsk 2016.
12. Umowa Kompleksowa o Świadczenie Usług Dystrybucji i Sprzedaży Energii Elektrycznej, Urząd Regulacji Energii, Warszawa, 25.06.2009.
13. Umowa Świadczenia Usług Dystrybucji Energii Elektrycznej, Urząd Regulacji Energii, Warszawa, 25.06.2009.
14. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz.U. 2015, poz. 478.
15. Wasiak I., Pawełek R., Miński R., Energy storage application in low voltage microgrids for energy management and power quality improvement, *IET Generation, Transmission & Distribution* 2014, Vol. 8, Iss. 3, s. 463–472.
16. Wasiak I., Pawełek R., Miński R., Zasobniki energii w mikrosystemach elektroenergetycznych, XV Międzynarodowa Konferencja Naukowa „Aktualne problemy w elektroenergetyce”, Jurata, czerwiec 2011, t. II, s. 159–166.

Przemysław Urbanek

mgr inż.

Politechnika Łódzka

e-mail: przemyslaw.urbanek@dokt.p.lodz.pl

Absolwent Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki Politechniki Łódzkiej (2015). Obszar jego działalności naukowej obejmuje zagadnienia jakości zasilania oraz generację rozproszoną.

Irena Wasiak

dr hab. inż., prof. nadzw.

Politechnika Łódzka

e-mail: irena.wasiak@p.lodz.pl

Absolwentka Politechniki Łódzkiej. Od początku kariery zawodowej pracuje w Instytucie Elektroenergetyki macierzystej uczelni. Uzyskała stopnie naukowe doktora i doktora habilitowanego z dziedziny elektroenergetyki. W latach 2002–2008 była prodziekanem Wydziału Elektrotechniki, Elektroniki, Informatyki i Automatyki PŁ. Obecnie pełni funkcję dyrektora Instytutu Elektroenergetyki oraz kierownika Zakładu Sieci Elektroenergetycznych. Członkini The Institution of Engineering and Technology oraz Komitetu ds. Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej SEP, członek stowarzyszony Sekcji Systemów Elektroenergetycznych PAN.

Ryszard Pawełek

dr inż.

Politechnika Łódzka

e-mail: ryszard.pawelek@p.lodz.pl

Absolwent Wydziału Elektrycznego Politechniki Łódzkiej (1977). Obecnie jest zatrudniony w Instytucie Elektroenergetyki swojej macierzystej uczelni na stanowisku adiunkta, gdzie pełni funkcję zastępcy dyrektora instytutu. Obszar jego zainteresowań naukowych obejmuje: jakość energii elektrycznej, generację rozproszoną, mikrosystemy elektroenergetyczne. Jest członkiem Polskiego Komitetu Jakości i Efektywnego Użytkowania Energii Elektrycznej, w którym pełni funkcję wiceprzewodniczącego ds. nauki. Rzeczoznawca SEP w dziedzinie jakości energii elektrycznej.