

Sławomir Cieślik

Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy w Bydgoszczy, Instytut Inżynierii Elektrycznej

Oddział Bydgoski Stowarzyszenia Elektryków Polskich

Projektowanie układów fotowoltaicznych w mikroinstalacjach prosumenckich¹⁾

Design of photovoltaic systems in prosumer microinstallations

W Polsce wprowadzono ustawowe ułatwienia rozwoju mikroinstalacji prosumenckich [1-3]. Ułatwienia mają charakter formalnoprawny i ekonomiczny. Aspekty techniczne eksploatacji elektroenergetycznych sieci dystrybucyjnych z generacją rozproszoną nie są praktycznie brane pod uwagę w decyzjach ustawodawcy. Lukę tę uzupełnia literatura branżowa [np. 4-9], w której aspekty techniczne są analizowane.

W [4] dokonano oceny korzyści i zagrożeń wynikających z istnienia mikroinstalacji prosumenckich w kontekście technicznego funkcjonowania sieci z tego typu generacją. Możliwość przyłączenia mikroinstalacji do sieci dystrybucyjnych nn, praktycznie bez uzgadniania z operatorem sieci (tylko zgłoszenie), może spowodować problemy z utrzymaniem wartości napięcia w dopuszczalnych granicach. Sieci dystrybucyjne nn nie są dostosowane do podobciążeniowej regulacji napięcia, zatem możliwość przyłączenia do tych sieci źródeł energii elektrycznej (generacja rozproszona) wymusza zmianę wyobrażenia o ich funkcjonowaniu.

W [5] rozpatrzono przykłady wpływu mikroinstalacji na pracę sieci dystrybucyjnej nn, głównie w aspekcie napięciowym. Zmiany wartości skutecznej napięcia w granicach dopuszczalnych przez umowy nie stanowią problemów formalnych.

Jednak w wielu przypadkach pojawia się obawa, że odbiorca, obok którego przyłączono mikroinstalację prosumencką poniesie zwiększone koszty za zużywaną energię elektryczną. W artykule [6] zagadnienie to zostało opisane na wybranych przykładach. Zwrócono uwagę na odbiorniki zawierające zasilacze oparte na energoelektronicznych przetwornicach napięcia i zaprezentowano

wyniki badań eksperymentalnych. W artykule [9] poddano analizie wpływ mikroinstalacji prosumenckich na straty energii w elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia.

Analiza stanu obecnego prowadzi do wniosku, że dwa pojęcia zrewolucjonizowały podejście do projektowania układów fotowoltaicznych w mikroinstalacjach prosumenckich [8, 9]. Pierwsze wywodzi się z definicji sformułowanej przez Alvina Tofflera (1980 r.) – prosument – producent i konsument – konsument zaangażowany we współtworzenie i promowanie produktów ulubionej marki czy jednoczesną produkcję oraz konsumpcję dóbr i usług. Szczególnie druga część definicji przyjęła się w kontekście zagadnień elektroenergetycznych.

Definicja prosumenta w sposób jednoznaczny podkreśla ideę wytwarzania energii elektrycznej dla zapewnienia własnych potrzeb.

W rozwiązaniach ustawowych [2, 3] nie mówi się o sprzedaży energii, ale o możliwości rekompensaty wprowadzonej do sieci nadwyżki energii, przez pobór energii z sieci w innym terminie w ustalonej ilości względem ilości energii wprowadzonej do sieci. Drugie pojęcie, to mikroinstalacja – instalacja odnawialnego źródła energii, o łącznej mocy zainstalowanej elektrycznej nie większej niż 40 kW, przyłączona do sieci elektroenergetycznej o napięciu znamionowym niższym niż 110 kV lub o łącznej mocy zainstalowanej cieplnej w skojarzeniu nie większej niż 120 kW.

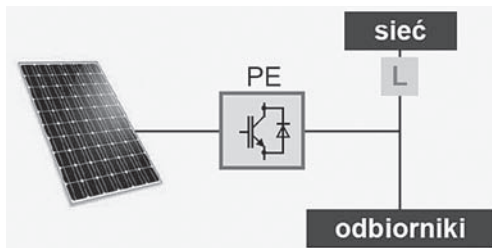
Moc zainstalowana układu fotowoltaicznego

Jeszcze do niedawna, głównie ze względu na propozycje możliwości sprzedaży nadwyżki energii elektrycznej z mikroinstalacji prosumenckiej, dobór mocy zainstalowanej układu fotowoltaicznego był determinowany dostępnością powierzchni na zainstalowanie modułów PV. Z punktu widzenia idei prosumenta

¹⁾ Artykuł powstał na podstawie referatu wygłoszonego podczas XX Sympozjum „Współczesna urządzenia oraz usługi elektroenergetyczne, telekomunikacyjne i informatyczne”, zorganizowanego w Poznaniu w dniach 22-23 listopada 2018 r. przez Oddział Poznański SEP.

takie podejście do określania mocy układu fotowoltaicznego nie może być stosowane. Moc zainstalowana układu fotowoltaicznego musi wynikać z analizy profilu mocy przedmiotowego gospodarstwa domowego (prosumenta).

Na rysunku 1 przedstawiono schemat ideowy mikroinstalacji prosumenckiej z układem fotowoltaicznym.

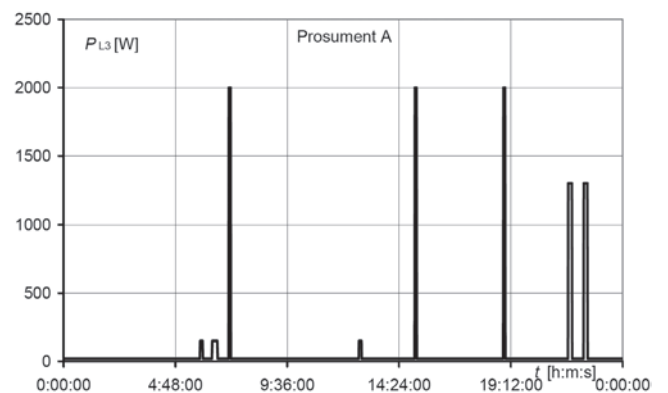
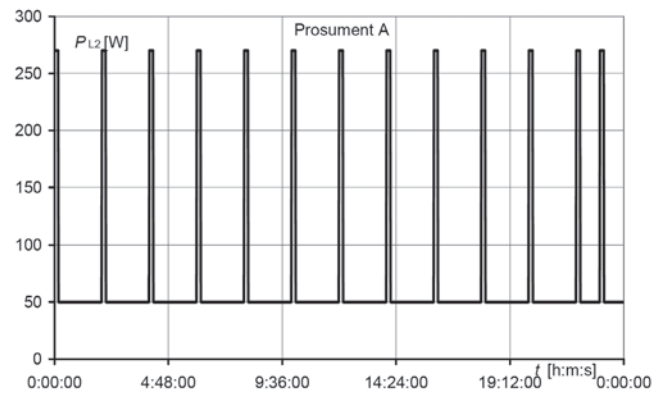
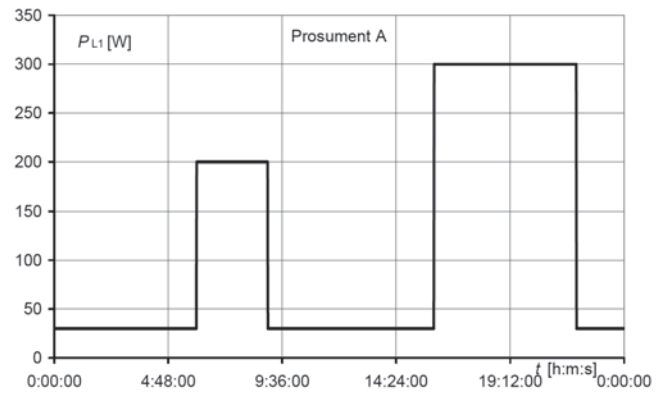


Rys. 1. Schemat ideowy mikroinstalacji prosumenckiej z układem fotowoltaicznym

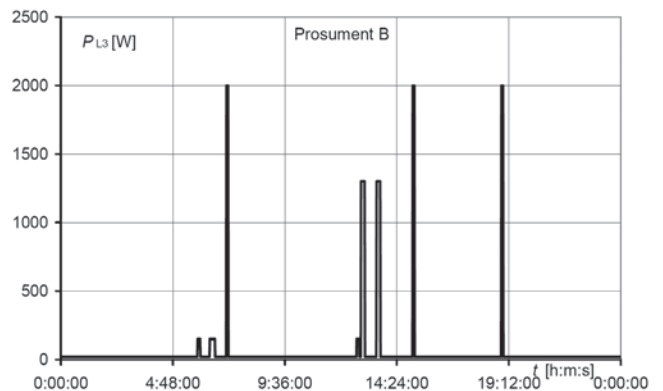
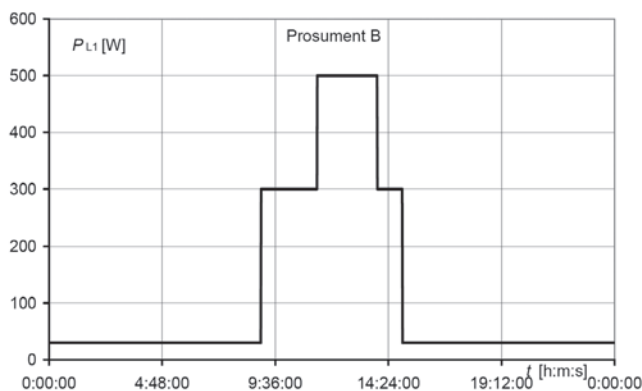
Instalacja elektryczna, której zadaniem jest dostarczanie energii elektrycznej do odbiorników, połączona jest z siecią elektroenergetyczną. Do tej instalacji dołączony jest układ wytwórczy energii elektrycznej w postaci modułów fotowoltaicznych z przetwornikiem energoelektronicznym (PE). Na potrzeby rozliczania poboru lub wprowadzania energii elektrycznej, w relacji odbiorca (prosument) – dostawca energii, zainstalowany jest licznik energii elektrycznej (L).

Weźmy, dla przykładu, dwóch prosumentów o dwóch różnych profilach mocy przy określonym zapotrzebowaniu na energię elektryczną. Dla uproszczenia, analizę ograniczymy tylko do jednej doby. Charakterystyczne jest to, że w obu przypadkach dobowe zapotrzebowanie na energię elektryczną jest takie samo. Jeżeli nie będzie żadnych jednostek wytwórczych w instalacji, to licznik energii elektrycznej naliczy taką samą wartość w ciągu doby dla obu prosumentów.

Na rysunku 2 przedstawiono dobowe profile mocy (odbiorniki) w poszczególnych fazach prosumenta A. Szczególnie widoczne jest cykliczne załączanie się urządzenia podłączonego do fazy L2 (może to być np. urządzenie chłodnicze) oraz okresowe załączanie odbiorników o znacząco wyższych mocach w fazie L3 (może to być np. czajnik elektryczny lub zmywarka do naczyń). Charakterystyczne jest to, że prosument A w godzinach okołopołudniowych nie załącza zbyt wielu odbiorników.



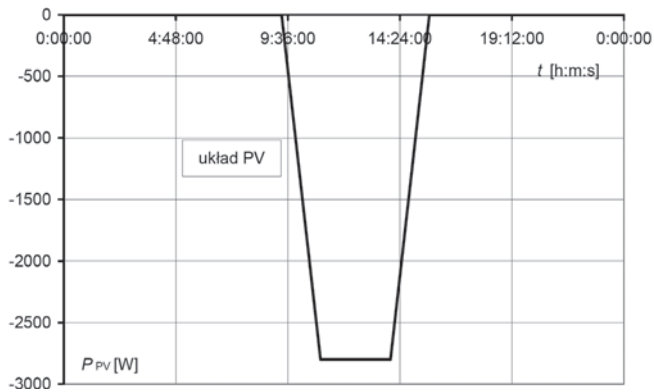
Rys. 2. Dobowe profile mocy w poszczególnych fazach prosumenta A (zapotrzebowanie odbiorników)



Rys. 3. Dobowe profile mocy w fazach L1 i L3 prosumenta B (zapotrzebowanie odbiorników)

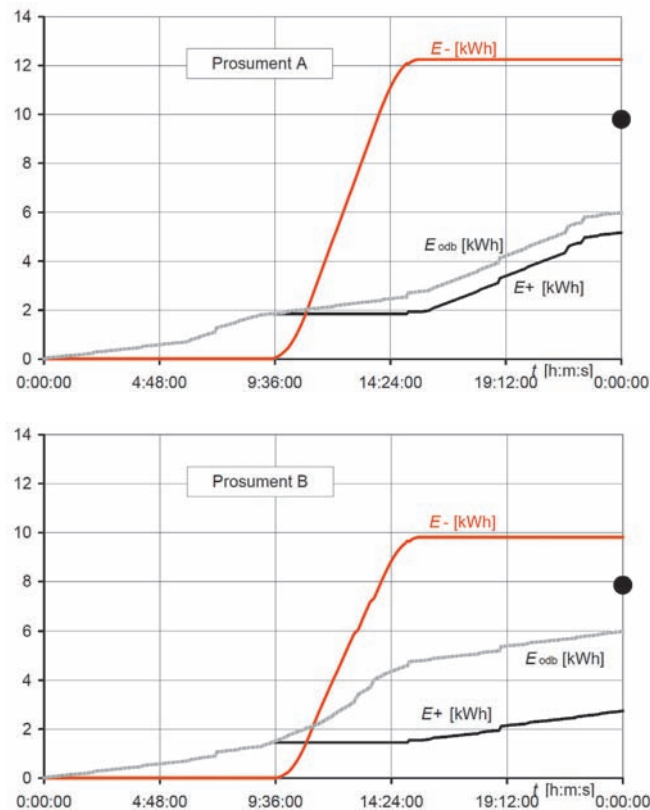
Prosument B ma w fazie L2 identyczny profil jak prosument A. Różnią się tylko dobowe profile w fazach L1 i L3 (rys. 3). Charakterystyczne jest to, że prosument B w godzinach okołopołudniowych załącza więcej odbiorników oraz to, że „przeniósł” załączenie jednego z odbiorników o znaczącej mocy (np. zmywarkę do naczyń) z godzin późnowieczornych (prosument A) na godziny okołopołudniowe.

Na rysunku 4 przedstawiono idealizowany dobowy profil mocy układu fotowoltaicznego o mocy znamionowej (zainstalowanej) 2800 W.



Rys. 4. Dobowy profil mocy układu fotowoltaicznego

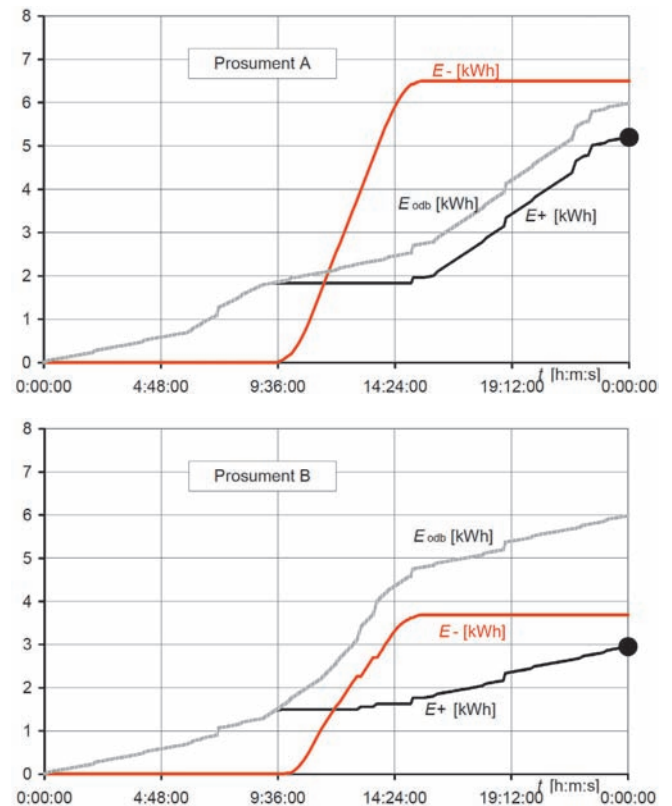
Wykonano teoretyczną analizę symulacyjną pracy przedstawionych mikroinstalacji prosumenckich, która ma na celu ocenę doboru właściwej mocy zainstalowanej układu fotowoltaicznego.



Rys. 5. Przebiegi energii pobranej z sieci (E_+) oraz wprowadzonej do sieci (E_-) w ciągu doby dla mocy zainstalowanej układu PV równej 2800 W

Na rysunku 5 przedstawiono przebiegi energii elektrycznej zarejestrowanej przez liczniki (L) w dwóch rozpatrywanych mikroinstalacjach prosumenckich (A i B) oraz energii elektrycznej zużytej przez wszystkie odbiorniki w danej instalacji E_{odb} . Energia oznaczona jako E_- jest to energia wprowadzona do sieci, natomiast E_+ jest to energia pobrana z sieci w analizowanym okresie czasu (tutaj jedna doba).

Przyjmując ustalone zasady, że prosument może wykorzystać (pobrać z sieci) w rozliczeniu bilansowym (bez przepływów finansowych) do 80% energii elektrycznej wprowadzonej do tej sieci, zakładając dla uproszczenia, że okresem bilansowania jest doba, zaznaczono na rysunku 5 czarnymi kropkami wartość do wykorzystania przez prosumenta w kolejnym okresie. Z przedstawionych wyników widać, że przy tak przyjętych założeniach, przy powtarzaniu się profili (odbiorów i wytwarzania) prosument nie będzie w stanie wykorzystać „przysługującej” mu energii elektrycznej (pobrać z sieci). Teoretyczny stan dopasowania dla obu prosumentów został zilustrowany na rysunku 6. Dla prosumenta A uzyskuje się przy mocy zainstalowanej układu fotowoltaicznego równej 1560 W, dla prosumenta B dla mocy 1440 W.



Rys. 6. Przebiegi energii pobranej z sieci (E_+) oraz wprowadzonej do sieci (E_-) w ciągu doby dla mocy zainstalowanej układu PV dopasowanej do 80% wykorzystania

W tabeli 1 zestawiono wybrane wskaźniki energetyczne dla analizowanych mikroinstalacji prosumenckich, które ułatwiają ocenę doboru właściwej mocy zainstalowanej układu fotowoltaicznego.

Biorąc pod uwagę stosunek energii bezpośrednio zużytej przez odbiorniki w analizowanej instalacji do energii pozyskanej z układu fotowoltaicznego, to przy mocy zainstalowanej układu fotowoltaicznego 2800 W, w przypadku prosumenta A mamy tylko

6%, w przypadku prosumenta B – 25%. Ale, aż 94% (dla prosumenta A) i 75% (dla prosumenta B) energii pozyskanej z układu fotowoltaicznego jest wprowadzana do sieci. Dodatkowo warunkiem krytycznym jest to, że przy przyjętych założeniach energii wprowadzonej do sieci nie będzie można w przysługującym stopniu wykorzystać (nie otrzyma się żadnej zapłaty za tę energię).

Przy optymalnym doborze mocy układu fotowoltaicznego, bez zmiany profili mocy odbiorników, dla prosumenta A jest to 1560 W, dla prosumenta B jest to 1440 W, w przyjętym okresie analizy uzyskuje się pełne bilansowanie energii elektrycznej. Wytworzoną energią elektryczną zużywa się w 11% (prosument A) i 45% (prosument B) bezpośrednio – zależy to od profilu mocy odbiorów. Ale wprowadzając do sieci odpowiednio 89% i 55% energii pozyskanej z układu PV w pełni wykorzystamy 80% energii całkowitej w kolejnym okresie rozliczeniowym. W bilansie nie będą generowane opłaty za pobór energii z sieci.

Tabela 1

Wskaźniki energetyczne

| | Prosument A | | Prosument B | |
|--------------------|-------------|------|-------------|------|
| P_{PV}, W | 2800 | 1560 | 2800 | 1440 |
| E_{wds}/E_{pzPV} | 94% | 89% | 75% | 55% |
| E_{znm}/E_{pzPV} | 6% | 11% | 25% | 45% |
| E_{pzs}/E_{odb} | 86% | 87% | 46% | 49% |

Oznaczenia parametrów zestawionych w tabeli 1 są następujące:

- P_{PV} – moc zainstalowana układu fotowoltaicznego,
- E_{wds} – energia wprowadzona do sieci,
- E_{pzPV} – energia pozyskana z układu fotowoltaicznego,
- E_{znm} – część energii zużytej na miejscu z pozyskanej z układu fotowoltaicznego,
- E_{pzs} – energia pobrana z sieci,
- E_{odb} – energia zużyta przez wszystkie odbiorniki

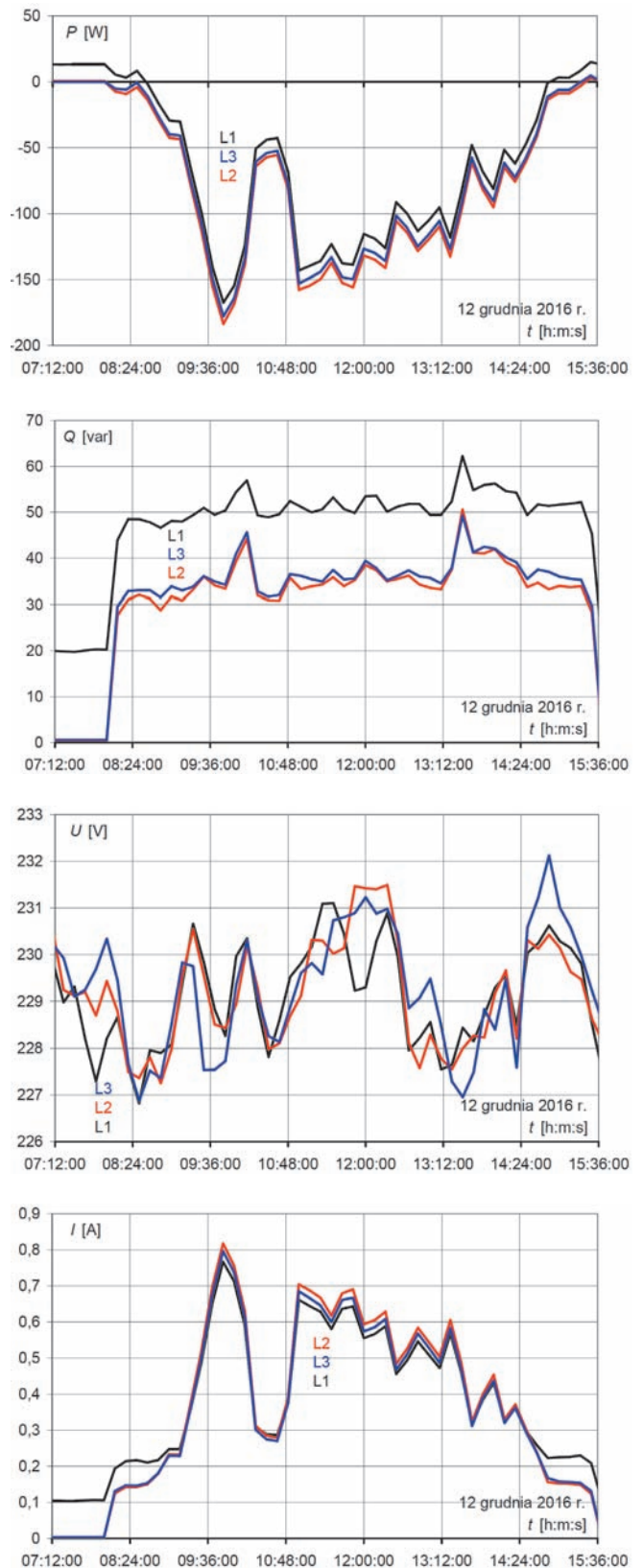
Przekształtnik energoelektroniczny – jedno- czy trójfazowy?

W Instytucie Inżynierii Elektrycznej na Wydziale Telekomunikacji, Informatyki i Elektrotechniki (Uniwersytet Technologiczno-Przyrodniczy) w Bydgoszczy powstała praca [10], w której dokonano analizy działania istniejącego układu fotowoltaicznego (badania eksperymentalne). Na rysunku 7 przedstawiono przebiegi uśrednionych wartości mocy czynnej, biernej oraz napięcia i prądu na wyjściu trójfazowego przekształtnika energoelektronicznego, który pracuje w układzie fotowoltaicznym, w mikroinstalacji prosumenckiej.

Wyraźnie widać, że przekształtnik tak pracuje, żeby w poszczególnych fazach występowała symetria. Jest to szczególnie widoczne na przebiegach mocy i prądu. Niewielkie różnice w fazie L1 wynikają z tego, że z tej fazy zasilane są wewnętrzne układy przekształtnika. Zróznicowanie wartości napięć wynika głównie z niesymetrii napięć w sieci oraz z niesymetrycznego obciążenia wewnątrz instalacji. Biorąc pod uwagę wyniki analiz publikowane m.in. w [5, 6] można wnioskować, że przy generacji energii elektrycznej następuje w miarę równomierny wzrost wartości napięć w poszczególnych fazach przy zastosowaniu trójfazowych przekształtników energoelektronicznych.

Zastosowanie przekształtnika jednofazowego będzie powodowało zwiększenie wartości napięcia tylko w jednej fazie. W przypadku zainstalowania kilku jednofazowych przekształtników energoelektronicznych (jednofazowych układów fotowol-

taicznych) w tej samej fazie linii elektroenergetycznej niskiego napięcia może prowadzić do przekroczenia w tej fazie dopuszczalnej wartości napięcia.



Rys. 7. Przebiegi uśrednionych wartości mocy czynnej, biernej oraz napięcia i prądu na wyjściu trójfazowego przekształtnika energoelektronicznego w instalacji fotowoltaicznej

Kolejną kwestią jest to, który przekształtnik, jedno- czy trójfazowy zapewni lepsze wykorzystanie bezpośrednio energii elektrycznej pozyskiwanej z układu fotowoltaicznego. Teoretycznie można się zastanawiać czy zajmować się grupowaniem odbiorników elektrycznych włączanych w godzinach okołopołudniowych tak, aby były one zasilane z tej fazy, do której jest przyłączony jednofazowy układ fotowoltaiczny. Jednak z praktycznego punktu widzenia ma to mniejsze znaczenie w ujęciu ogólnym, ponieważ rozliczanie energii elektrycznej w trójfazowym przyłączy realizowane jest na podstawie sumarycznej energii elektrycznej ze wszystkich trzech faz. Oczywiście tego typu rozważania (grupowania odbiorników) mają znaczenie w zakresie lepszego wykorzystania pozyskanej energii elektrycznej bezpośrednio przez odbiorniki.

Podsumowanie

W artykule zajmowano się dwiema kwestiami dotyczącymi projektowania mikroinstalacji prosumenckich z układami fotowoltaicznymi.

Pierwsza dotyczyła doboru wartości mocy zainstalowanej układu fotowoltaicznego. Na dość prostym (tylko jedna doba) przykładzie wykazano, że w celu prawidłowego doboru wartości mocy zainstalowanej układu fotowoltaicznego niezbędna jest analiza profilu mocy odbiorników w instalacji elektrycznej w dostatecznie długim okresie. Okres ten musi uwzględniać m.in. dni robocze i dni wolne od pracy oraz zmiany profili spowodowane porami roku. Do analizy potrzebne są również informacje o nasłonecznieniu w danym miejscu, również w dostatecznie długim okresie.

Niewłaściwie dobrana moc układu fotowoltaicznego może prowadzić do zwiększenia kosztów inwestycyjnych (więcej modułów PV, przekształtnik energoelektroniczny na większą moc) i uniemożliwienia optymalnego wykorzystania pozyskanej energii elektrycznej. W mikroinstalacjach prosumenckich nie ma możliwości uzyskiwania zapłaty za wprowadzoną energię elektryczną do sieci. Definicja prosumenta w sposób jednoznaczny podkreśla ideę wytwarzania energii elektrycznej dla zapewnienia własnych potrzeb. Nie mówi się o sprzedaży energii, ale o możliwości rekompensaty wprowadzonej do sieci nadwyżki energii, przez pobór energii z sieci w innym terminie w ustalonej ilości względem ilości energii wprowadzonej do sieci.

Druga kwestia dotyczyła stosowania jedno- czy trójfazowego przekształtnika energoelektronicznego w układzie fotowoltaicznym. Dla prosumenta w ogólnym ujęciu (rozliczanie energii elektrycznej sumarycznej) nie ma to większego znaczenia. Ale biorąc pod uwagę optymalne wykorzystanie pozyskanej energii elektrycznej, żeby jak najwięcej energii zużywać bezpośrednio w danej instalacji, to ma to znaczenie. Jednak w każdym przypadku (jedno- i trójfazowego przekształtnika) prowadzi do dodatkowych działań mających na celu odpowiednie grupowanie odbiorników przyłączanych do poszczególnych faz.

Stosowanie jednofazowych układów fotowoltaicznych (z jednofazowym przekształtnikiem) będzie powodowało zwiększenie wartości napięcia tylko w jednej fazie. Będzie to miało znaczenie dla operatora elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia, ponieważ w przypadku zainstalowania zbyt dużej liczby jednofazowych przekształtników energoelektronicznych (operator nie wydaje warunków przyłączenia) w tej samej fazie linii elektroenergetycznej może prowadzić do przekroczenia w tej fazie dopuszczalnej wartości napięcia.

PIŚMIENNICTWO

- [1] Kacejko P., Pijarski P., Gałązka K., *Prosument – krajobraz po bitwie*. „Rynek Energii” 2015, nr 2, s. 40-44.
- [2] Ustawa *O odnawialnych źródłach energii* z dnia 20 lutego 2015 r., Dz.U. 2015, poz. 478 z późn. zm.
- [3] Ustawa *Prawo Energetyczne* z dnia 10 kwietnia 1997 r., Dz.U. 1997 nr 54, poz. 348 z późn. zm.
- [4] Cieślak S., *Mikroinstalacje prosumenckie w Polsce – korzyści i zagrożenia*. „Zeszyty Naukowe Wydziału Elektrotechniki i Automatyki Politechniki Gdańskiej” 2015, nr 45, s. 29-34.
- [5] Cieślak S., *Regulacja napięcia w sieciach dystrybucyjnych nn z mikroinstalacjami*. Materiały XVII Sympozjum „Współczesne urządzenia oraz usługi elektroenergetyczne, telekomunikacyjne i informatyczne”, Poznań 2014, s. 24-27.
- [6] Cieślak S., *Wpływ zmiany napięcia w sieciach dystrybucyjnych niskiego napięcia na zużycie energii elektrycznej*. Materiały XVIII Sympozjum „Współczesne urządzenia oraz usługi elektroenergetyczne, telekomunikacyjne i informatyczne”, Poznań 2015, s. 26-29.
- [7] Sikorski T., Rezmer J., Kosińska P., *Wpływ mikroinstalacji na parametry jakości energii elektrycznej w punkcie przyłączenia*. „Elektro Info” 2015, nr 12, s. 23-29.
- [8] Sobierajski M., Rojewski W., *Kryteria przyłączania OZE do sieci nN*. Materiały VI Konferencji „Przyłączanie i współpraca OZE z systemem elektroenergetycznym”, Warszawa 2014, s. 73-94.
- [9] Cieślak S., *Straty energii w elektroenergetycznej sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia z mikroinstalacjami prosumenckimi*. „Rynek Energii” 2017, nr 3, s. 37-44.
- [10] Świerki G., *Badanie eksperymentalne układu fotowoltaicznego przyłączonego do instalacji domku jednorodzinnej*. Praca dyplomowa inżynierska, pod kierunkiem S. Cieślaka, WTIIE, UTP w Bydgoszczy, 2017.

