

**International Ukraine-Poland Seminar**

**Power quality in distribution networks with distributed generation**

**Kiev, July 4-5, 2019**

---

---

DOI: 10.32073/iepl.2019.12

**STEROWANIA MOCĄ CZYNNĄ W INSTALACJI PROSUMENCKIEJ  
ZA POMOCĄ ZASOBNIKA ENERGII ELEKTRYCZNEJ**

**Przemysław Urbanek, Irena Wasiak, Ryszard Pawełek**

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki

Abstract: The article concerns the analysis of the work of low-voltage (lv) prosumer installation consisting of receivers and sources of electricity. The tested system imitates the electrical installation of a hypothetical customer, working with a variable load and variable energy production. The main technical problems related to the operation of such an installation are presented. The use of an electric energy storage system in the installation, whose purpose is to manage the active power of a prosumer installation, has been considered. The basic criterion of the system operation is the reduction of costs incurred by the owner. The efficiency of the energy storage system was tested by means of a simulation model developed in the PSCAD/EMTDC program. Sample results of the simulation are presented.

## 1. WSTĘP

Rozwój technologii wytwórczych, wprowadzenie systemów subsydiowania odnawialnych źródeł energii (OZE), a także możliwość zwiększenia pewności zasilania, spowodowały wzrost zainteresowania odbiorców końcowych posiadaniem własnej elektrowni. Obserwuje się ciągły wzrost liczby instalacji domowych, w których zainstalowano odnawialne źródła energii, a w szczególności w instalacje fotowoltaiczne (PV) [1], wykorzystujące darmową energię słońca. Konsekwencją przyłączenia źródeł jest zmiana struktury i warunków pracy sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia.

Zmieniająca się losowo moc generowana przez panele PV wpływa na pogorszenie jakości energii elektrycznej w sieci, a w przypadku skumulowania się negatywnych wpływów wielu instalacji prosumenckich może prowadzić do zakłócenia normalnej pracy sieci. Duża

---

<sup>1</sup> Artykuł został opracowany przy wsparciu przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju na podstawie umowy nr POIR.04.01.02-00-0007/17.

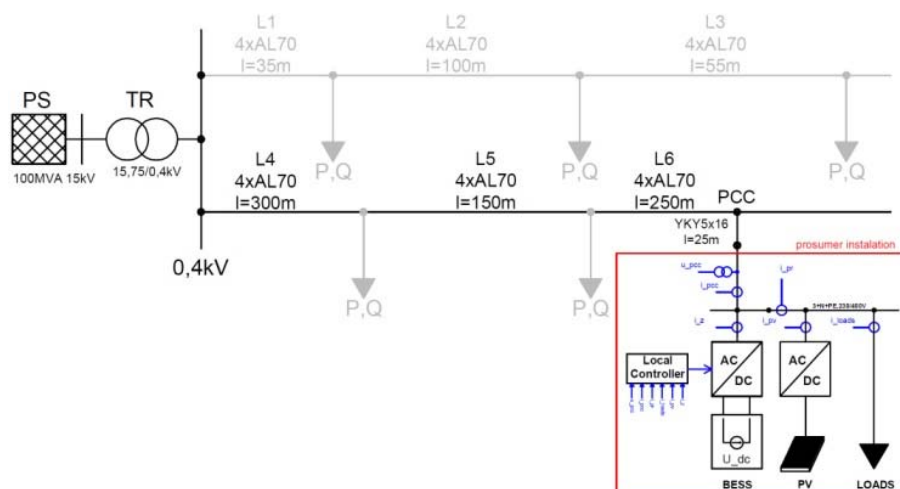
penetracja OZE w sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia, w szczególności źródeł 1-fazowych, może spowodować niedopuszczalne podwyższenie napięcia w węzłach sieci, asymetrię napięcia oraz niekontrolowane przepływy mocy. W takich warunkach i przy braku możliwości regulacyjnych, utrzymanie właściwej pracy sieci staje się problemem dla operatora, a konsekwencje złej jakości energii obciążają wszystkich odbiorców zasilanych z sieci.

W literaturze zaprezentowano różne sposoby przeciwdziałania negatywnym oddziaływaniom OZE na sieć zasilającą. W pracach [2], [3], [4], [5] opisano wykorzystanie zasobników energii elektrycznej znajdujących się w instalacjach prosumenckich do kompensowania negatywnego wpływu DER. Wykorzystanie istniejących oraz planowanych zasobników miałyby na celu kompensowanie parametrów jakości energii elektrycznej [6], [7], [8], [9] oraz zwiększenie niezawodności zasilania.

Możliwość wykorzystania zasobników energii w instalacjach prosumenckich do kontrolowanego oddziaływania na sieć zasilającą w celu poprawy jakości zasilania zostały wykorzystane w projekcie NCBiR nr POIR.04.01.02-00-0007/17 pt. „Zarządzanie pracą sieci dystrybucyjnej niskiego napięcia z uwzględnieniem aktywnej roli prosumenta” (akronim „Aktywny prosument”) realizowanym w Politechnice Łódzkiej. Celem projektu jest opracowanie i wdrożenie systemu sterowania pracą sieci dystrybucyjnej z instalacjami prosumenckimi, który umożliwi utrzymanie wymaganych parametrów jakości napięcia zasilającego oraz niezawodności zasilania. Istotą sterowania pracą zasobników zlokalizowanych w instalacjach prosumenckich, będących własnością prosumenta, jest świadczenia usług sieciowych dla operatora systemu dystrybucyjnego (OSD). W projekcie założono, że podstawowym celem zasobnika będzie lokalne zarządzanie pracą instalacji prosumenckiej w sposób przynoszący korzyści właścicielowi instalacji.

## 2. BADANY UKŁAD

Problemy w pracy sieci dystrybucyjnej występują najczęściej w sieciach wiejskich i terenowych, z powodu mniejszej mocy zwarciowej takich sieci oraz częstszego występowania źródeł rozproszonych ze względu na możliwości lokalizacyjne. Na rysunku 1 przedstawiono schemat fragmentu takiej sieci, z przyłączoną w punkcie PCC instalacją prosumencką. Przyjęto, że instalacja zasilą odbiory o zmiennej mocy zapotrzebowanej, przy czym maksymalna moc odbiorów wynosi 7,5 kW, przy  $\cos\varphi = 0.4$ . W instalacji zainstalowane jest 3-fazowe źródło PV o mocy 11 kWp oraz bateryjny zasobnik energii (BESS) o mocy 7,5 kW i pojemności 40 kWh.



Rys.1. Schemat fragmentu sieci terenowej z instalacją prosumenta

### 3. STEROWANIA PRACĄ ZASOBNIKIA

Punktem wyjścia dla proponowanych strategii sterowania zasobnikiem energii w instalacji prosumenckiej jest podana w [10] definicja prosumenta oraz sposób jego rozliczania. Zgodnie z [10] prosument to odbiorca końcowy dokonujący zakupu energii elektrycznej na podstawie umowy kompleksowej, wytwarzający energię elektryczną wyłącznie z odnawialnych źródeł energii w mikroinstalacji, w celu jej zużycia na potrzeby własne, a generacja energii elektrycznej nie jest związana z wykonywaną działalnością gospodarczą. Prosument jest rozliczany za zużycie energii elektrycznej jak zwykły odbiorca, przy czym wytwarzanie energii z własnego źródła powoduje zmniejszenie poboru energii elektrycznej z sieci zasilającej. Energia, która nie może być zbilansowana lokalnie jest wprowadzana do sieci i rozliczana w formie opustów. Oznacza to, że za 1 kWh energii wprowadzonej do sieci prosument może pobrać z sieci pewną ilość energii za darmo, przy czym w przypadku gdy moc źródła przekracza 10 kWp, ilość ta wynosi 0,7 kWh. Jest zatem jasne, że z punktu widzenia prosumenta przesyłanie energii do sieci jest nieekonomiczne.

Poniżej przedstawiono 3 strategie sterowania zasobnikiem, których celem jest lepsze wykorzystanie energii wygenerowanej przez źródło zainstalowane w instalacji prosumenta na potrzeby lokalne, a tym samym zwiększenie oszczędności wynikających ze zmniejszenia poboru energii z sieci zasilającej przez instalację prosumencką. Realizacja strategii sprowadza się do zadania odpowiedniego harmonogramu ładowania oraz rozładowania zasobnika.

#### 3.1. Strategia 1

Strategia nr 1 jest dedykowana do wykorzystania przy taryfie dwustrefowej G12, w której cena energii jest różna w dwóch strefach czasowych [9], [10]. Celem sterowania pracą zasobnika jest ograniczenie do zera poboru mocy z sieci zasilającej w strefie wysokiej ceny energii elektrycznej. Przyjęto, że w strefie niskiej ceny energii zapotrzebowanie na energię elektryczną jest pokrywane przez generację PV oraz energię elektryczną pobraną z sieci, a zasobnik energii jest ładowany. W tym przypadku możliwy jest zarówno pobór energii jak i jej przesył do sieci zasilającej.

Wartość mocy ładowania zasobnika  $P_{ref}$  wynika z aktualnego stopnia naładowania ( $SOC$ ) i czasu trwania strefy taryfowej:

$$P_{ref} = \frac{E_{BESS}(100 - SOC)}{T} \quad (1)$$

gdzie:

- $E_{BESS}$  – znamionowa pojemność zasobnika,
- $SOC$  – początkowy stan naładowania zasobnika,
- $T$  – czas trwania strefy o niskiej cenie energii.

W czasie strefy z wysoką ceną zasobnik rozładowuje się z mocą wynikającą z bilansu mocy w instalacji prosumenckiej, przy założeniu, że moc wymiany z siecią jest równa zero, zgodnie z równaniem:

$$P_{ref} = P_{wym} + P_{odb} + P_{PV} \quad (2)$$

gdzie:

- $P_{wym} = 0$  – moc wymieniana z siecią zasilającą,
- $P_{odb}$  – moc pobierana przez odbiory,
- $P_{PV}$  – moc generowana przez źródło PV.

### 3.2. Strategia 2

Celem strategii nr 2 jest wyeliminowanie przesyłu energii elektrycznej do sieci zasilającej. W związku z tym przyjęto, że:

$$0 \leq P_{wym} \leq P_{wym,max} \quad (3)$$

gdzie  $P_{wym,max}$  – maksymalna wartość mocy wymienianej z siecią zasilającą.

Praca zasobnika ma w tym przypadku charakter pracy interwencyjnej. Zasobnik ładuje się tylko wtedy, gdy moc generowana przez PV jest większa niż aktualna moc odbiorów. Aby zapewnić ciągłą gotowość zasobnika do pracy, konieczne jest utrzymywanie wartości  $SOC$  w zadanych granicach, przekroczenie których powoduje rozładowanie lub ładowanie zasobnika do zadanych wartości. Warunek opisujący powyższą funkcjonalność przedstawiono poniżej:

$$SOC_1 \leq SOC \leq SOC_2 \quad (4)$$

gdzie:

$SOC_1$  – dopuszczalna dolna granica naładowania zasobnika równa 25%  $SOC_{max}$ ,

$SOC_2$  – dopuszczalna górna granica naładowania zasobnika równa 70%  $SOC_{max}$ .

### 3.3. Strategia 3

Celem tej strategii sterowania pracą zasobnika utrzymanie stałej wartości mocy wymiany pomiędzy instalacją prosumencką i siecią zasilającą. W celu zagwarantowania ciągłej pracy zasobnika, z wykluczeniem długotrwałego występowania stanów całkowitego naładowania oraz rozładowania, założono, że wartość mocy wymiany odpowiada mocy średniej instalacji prosumenckiej, wyznaczonej z zależności [13]:

$$P_{wym,śr} = \frac{\int_0^t (P_{odb} + P_{PV}) dt}{t} \quad (5)$$

Moc średnią można wyznaczyć na podstawie archiwalnych danych pomiarowych lub prognoz dla danego okresu czasu (np. doba). Zadana moc czynna zasobnika wynika z bilansu mocy w instalacji, zgodnie z równaniem:

$$P_{ref} = P_{wym,śr} + P_{odb} + P_{PV} \quad (6)$$

W zależności od relacji pomiędzy mocą źródła PV i mocą odbioru, moc zadana zasobnika może być dodatnia (ładowanie) lub ujemna (rozładowanie).

## 4. BADANIA SYMULACYJNE

### 4.1. Założenia

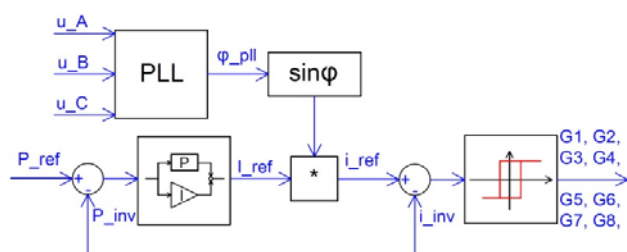
Układ z rysunku 1 odwzorowano za pomocą symulatora zrealizowanego w środowisku programu PSCAD®/EMTDC. W symulatorze system elektroenergetyczny zastąpiono zastępczym źródłem napięcia przemiennego z indukcyjnością wewnętrzną, wynikającą z mocy zwarciowej sieci (100 MVA). Zamodelowano transformator 15/0,4 kV o mocy 63 kVA i układzie połączeń uzwojeń Dy5. W modelu pominięto elementy sieci dystrybucyjnej, które na rysunku 1 zostały oznaczone kolorem szarym.

Obciążenie prosumenta zastąpiono modelami 3-fazowego symetrycznego odbioru rezystancyjno-indukcyjnego, w postaci połączonych w gwiazdę impedancji. Profil mocy zapotrzebowanej dla odbiorcy bytowego przyjęto na podstawie literatury [16].

Panele fotowoltaiczne zostały zamodelowane w postaci trzech jednofazowych źródeł prądowych, które generują moc czynną zgodnie z zadanym przebiegiem generacji (przebieg generacji został utworzony na podstawie rzeczywistej instalacji PV).

Zasobnik energii został zamodelowany jako źródło napięcia stałego połączone z siecią zasilającą przez współpracujący z nim 3-fazowy 4-gałęziowy inwertyr PWM. W celu eliminacji zakłóceń oraz wygładzenia przebiegów prądów zastosowano filtr pojemnościowy oraz indukcyjność sprzęgającą.

Do sterowania inwerterem zasobnika wykorzystano metodę histerezową [14], [15]. Na podstawie mocy ładowania (rozładowania) zasobnika wyznaczone są przebiegi prądów referencyjnych wprowadzanych do instalacji (rys. 2). W algorytmie sterowania uwzględniono kontrolę SOC. Sposób obliczenia energii zmagazynowanej w zasobniku oraz jego stopnia naładowania uwzględnia straty energii wynikające z magazynowania.



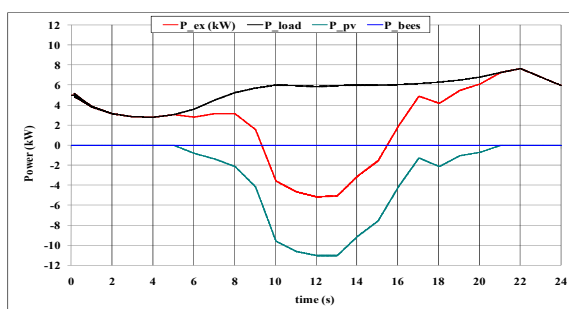
Rys. 2. Algorytm sterowania zasobnikiem

Dla każdej strategii sterowania zasobnikiem wykonano badania symulacyjne przyjmując omówione wyżej profile obciążenia i generacji w instalacji prosumenckiej. Założono wykorzystanie zasobnika (BESS) o mocy 7.5 kW oraz pojemności 40 kWh i początkowym stanie naładowania SOC = 25% (10 kWh). Ponadto, w celu zapewnienia poprawnej pracy zasobnika w kolejnych okresach

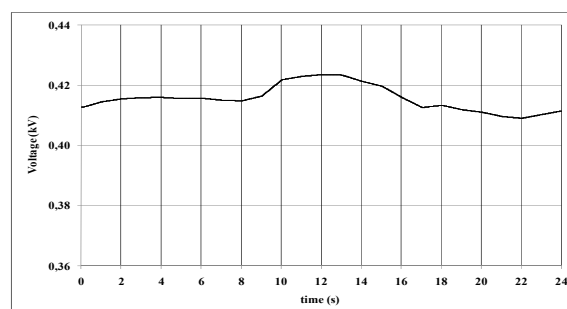
czasu (dobach), wymaga się, aby energia zmagazynowana w zasobniku na końcu analizowanego okresu wynosiła 10 kWh. Wyniki badań dla każdego przypadku zostały przedstawione w postaci wykresów prezentujących bilanse mocy czynnych w instalacji prosumenckiej oraz zmiany wartości skutecznej napięcia w PCC oraz zmian SOC. Wyniki badań symulacyjnych dla poszczególnych strategii porównano z przypadkiem referencyjnym, tj. instalacją bez zasobnika.

#### 4.2. Badania dla układu bez zasobnika

Na rysunku 3 pokazano bilans mocy czynnej w badanej instalacji prosumenckiej bez zasobnika wynikający ze zmian mocy obciążenia oraz mocy generowanej przez źródło PV. Ponieważ w tym przypadku elementem bilansującym moc czynną jest wyłącznie sieć dystrybucyjna, to występują okresy czasu, gdy moc jest pobierana z sieci oraz okresy gdy nadwyżki mocy są przesyłane do sieci. Zmiany mocy wymienianej z siecią powodują odpowiednie zmiany wartości napięcia w punkcie przyłączenia instalacji do sieci (PCC) co pokazano na rys. 4.



Rys. 3. Bilans mocy czynnej w instalacji prosumenckiej bez zasobnika



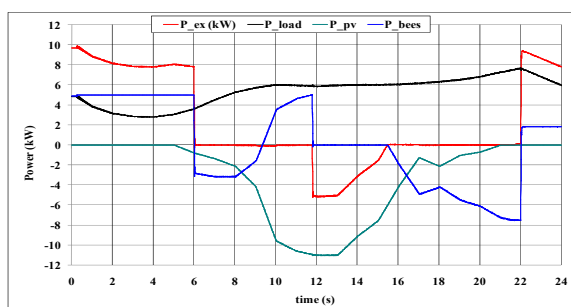
Rys. 4. Dobowe zmiany napięcia w PCC dla instalacji prosumenckiej bez zasobnika

## 4.2. Badania dla układu z zasobnikiem realizującym strategię 1

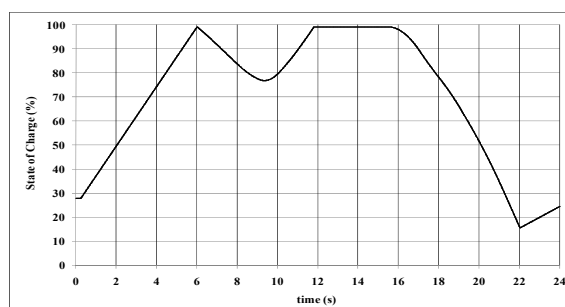
Na rys. 5 został przedstawiony bilans mocy czynnej w instalacji z zasobnikiem pracującym według strategii nr 1, a na rys. 6 odpowiadające temu bilansowi zmiany stopnia naładowania zasobnika.

W początkowym okresie (od godz. 0:00 do godz. 6:00 – strefa 1) zasobnik (BESS) jest ładowany ze stałą mocą wynikającą z równania (1) do stanu pełnego naładowania. Następnie w trakcie trwania strefy nr 2 (od godz. 6:00) następuje wyeliminowanie poboru mocy z sieci zasilającej. W tym okresie zapotrzebowanie na energię elektryczną jest pokrywane ze źródła PV oraz z BESS, co powoduje częściowe rozładowywanie zasobnika. Gdy wartość mocy generowanej przez źródło PV przewyższa moc odbiorów, nadwyżka energii jest akumulowana w zasobniku, w wyniku czego następuje pełne naładowanie zasobnika (o godz. 12:00), co powoduje że nadwyżka energii jest przesyłana do sieci.

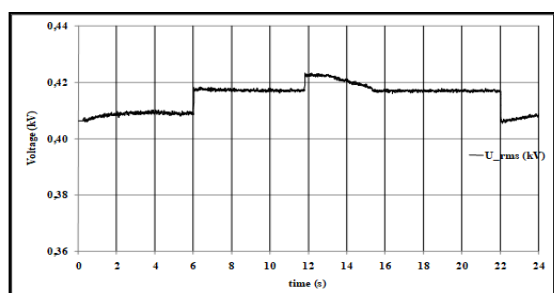
Od godziny 13:00 ponownie obowiązuje strefa nr 1, ale zasobnik w dalszym ciągu nie posiada zdolności akumulacyjnych i nadwyżka energii, która nie może zostać zmagazynowana w zasobniku zostaje przesłana do sieci. Stopniowe zmniejszanie się wartości mocy generowanej przez źródło PV powoduje konieczność wykorzystania energii z zasobnika w celu wyeliminowania poboru energii z sieci w strefie 2 (między godziną 15:00 i 22:00). Następuje rozładowywanie BESS do momentu wystąpienia strefy 1 (godz. 22:00) z niską ceną energii, w trakcie której zasobnika jest ładowany do wymaganej wartości końcowej SOC (tj. 25%).



Rys. 5. Dobowe zmiany mocy czynnej w instalacji prosumenckiej z zasobnikiem realizującym strategię 1



Rys. 6. Dobowe zmiany stanu naładowania zasobnika SOC w trakcie realizacji strategii 1 w instalacji prosumenckiej



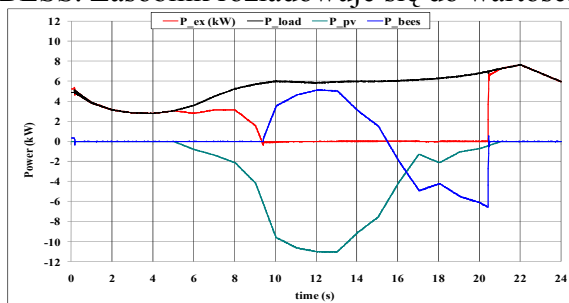
Rys. 7. Dobowe zmiany napięcia w instalacji prosumenckiej z zasobnikiem realizującym strategię 1

Zmiany wartości skutecznej napięcia w punkcie (PCC) odpowiadające zmianom wymiany mocy z siecią zasilającą pokazano na rys. 7. Obniżenie wartości napięcia w okresach obowiązywania strefy 1 wynika z dodatkowego obciążenia sieci ładowaniem zasobnika w celu uzyskania wymaganego stopnia naładowania SOC.

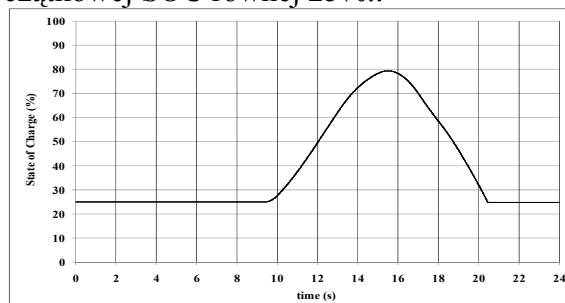
## 4.3. Badania dla układu z zasobnikiem realizującym strategię 2

W realizacji strategii nr 2 założono pełne wykorzystanie energii wytworzonej przez źródło PV na potrzeby prosumenta, tzn. całkowity brak przesyłu energii do sieci zasilającej.

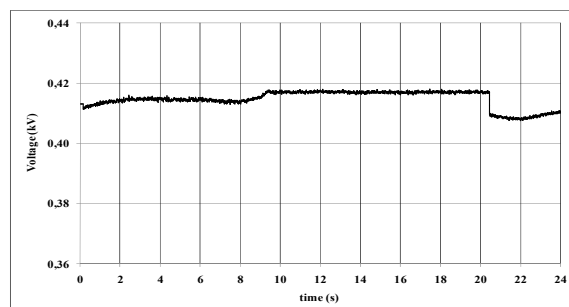
Na rys. 8 pokazano bilans mocy czynnej dla tego przypadku, a na rys. 9 zmiany stopnia naładowania zasobnika. W początkowym okresie aż do momentu wystąpienia nadwyżek energii elektrycznej wynikających z generacji PV, zasobnik nie pracuje. Od tego momentu BESS, realizując ograniczenie przesyłu energii do sieci, magazynuje nadwyżkę energii elektrycznej do chwili, gdy wartość mocy generowanej przez źródło PV jest mniejsza niż moc odbiorów. W dalszym okresie zapotrzebowanie na energię elektryczną pokrywane jest z PV i BESS. Zasobnik rozładowuje się do wartości początkowej SOC równej 25%..



Rys. 8. Dobowe zmiany mocy czynnej w instalacji prosumenckiej z zasobnikiem realizującym strategię 2



Rys. 9. Dobowe zmiany stanu naładowania zasobnika SOC w trakcie realizacji strategii 2 w instalacji prosumenckiej

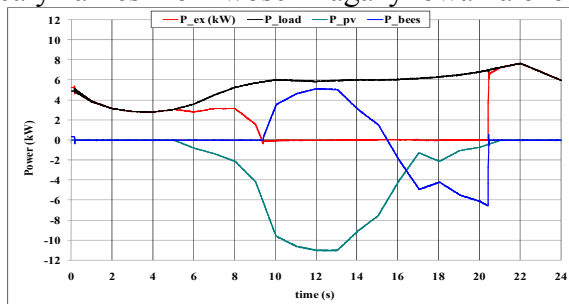


Rys. 10. Dobowe zmiany napięcia w instalacji prosumenckiej z zasobnikiem realizującym strategię 2

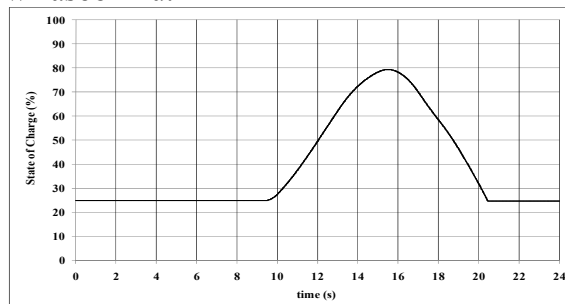
Na rys. 10 pokazano zmiany wartości skutecznej napięcia w punkcie (PCC) wynikające ze zmian poboru mocy z sieci zasilającej. Należy zauważyć, że występujące zmiany napięcia są znacznie mniejsze niż przy realizacji strategii nr 1. Obniżenie wartości napięcia w końcowym okresie symulacji wynika z wyłączenia zasobnika po uzyskaniu wymaganego stopnia naładowania.

#### 4.4. Badania dla układu z zasobnikiem realizującym strategię 3

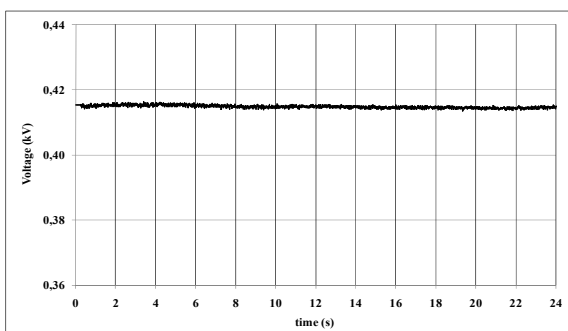
Na rys. 11 pokazano bilans mocy czynnej w instalacji prosumenta z zasobnikiem realizującym strategię nr 3 polegającą na utrzymaniu wartości mocy czynnej pobieranej z sieci na stałym poziomie odpowiadającym mocy średniej instalacji prosumenckiej określonej zgodnie z równaniem (6). Wynikające z tego sposobu pracy zmiany stopnia naładowania zasobnika pokazane zostały na rysunku 12. Jak widać w tym przypadku wykorzystany został cały zakres możliwości magazynowania energii w zasobniku.



Rys. 11. Dobowe zmiany mocy czynnej w instalacji prosumenckiej z zasobnikiem realizującym strategię 3



Rys. 12. Dobowe zmiany stanu naładowania zasobnika SOC w trakcie realizacji strategii 3 w instalacji prosumenckiej



Rys. 13. Dobowe zmiany napięcia w instalacji prosumenckiej z zasobnikiem realizującym strategię 2

Przy takim sposobie pracy zasobnika w całym analizowanym okresie ilości energii pobranej z sieci i przesłanej do sieci są sobie równe, co gwarantuje że wartość SOC na końcu okresu będzie równa wartości początkowej.

Na rys. 13 pokazano zmiany wartości skutecznej napięcia w punkcie (PCC) dla rozpatrywanej strategii. Zapewnienie stałej wartości mocy wymienianej z siecią skutkuje stabilizacją wartości napięcia w PCC.

#### 4.5. Podsumowanie wyników badań

Dla wszystkich scenariuszy przeprowadzono analizę dobowej wymiany energii elektrycznej pomiędzy instalacją prosumencką i siecią dystrybucyjną. Na podstawie wyników tej analizy dla każdej strategii określono koszty eksploatacyjne wynikające z rozliczenia za pobraną energię elektryczną. W rozliczeniach uwzględniono możliwość skorzystania przez prosumenta z dwóch taryf: G11 lub G12 obowiązujących w PGE Obrót S.A. (Oddział w Łodzi). Według taryfy G11 cena energii wynosi 0.2989 zł/kWh. Taryfa G12 dzieli dobę na dwie strefy czasowe o różnych cenach. W strefie 1 (obejmującej okresy od 0:00 do 6:00 oraz od 13:00 do 15:00 i od 22:00 do 24:00) energia kosztuje 0.2175 zł/kWh, natomiast w strefie 2 (w okresach od 6:00 do 13:00 oraz od 15:00 do 22) cena energii jest równa 0.3406 zł/kWh.

Dla symulacji referencyjnej (bez zasobnika) dobowy koszt zakupu energii według taryfy G11 wynosi 17.49 PLN, a zgodnie z taryfą G12 16.51 PLN. Taryfa dwustrefowa jest bardziej korzystna ponieważ w trakcie trwania wysokich cen energii występuje generacja z instalacji PV, która powoduje zmniejszenie poboru „droższej” energii z sieci.

W tabeli 1 podano dla poszczególnych strategii zestawienie wyników obliczeń dotyczących wymiany energii elektrycznej w podziale na energię pobraną z sieci (import) i oddaną do sieci (eksport). Podano także względne koszty zakupu energii (eksploatacyjne) według taryf G11 i G12 odniesione do symulacji referencyjnej.

Tabela 1. Wymiana energii i koszty eksploatacyjne

	Bez zasobnika	Strategia 1	Strategia 2	Strategia 3
$E_{imp}^{(1)}$ (kWh)	73,95	64,66	52,78	53,35
$E_{exp}^{(1)}$ (kWh)	22,06	12,69	0,09	0,00
$K_o^{(1)}$ (p.u)	<b>1,00</b>	<b>0,95</b>	<b>0,90</b>	<b>0,91</b>
$E_{imp}^{(2)}$ (kWh)	32,60	64,63	32,65	21,37
$E_{exp}^{(2)}$ (kWh)	6,89	6,88	0,00	0,00
$E_{imp}^{(2h)}$ (kWh)	41,35	0,03	20,13	31,48
$E_{exp}^{(2h)}$ (kWh)	15,17	5,62	0,09	0,00
$K_o^{(2)}$ (p.u)	<b>1,00</b>	<b>0,72</b>	<b>0,80</b>	<b>0,89</b>
$E_{imp}^{(1)}$ – energia elektryczna pobrana z sieci przy taryfie G11, $E_{exp}^{(1)}$ – energia elektryczna oddana do sieci przy taryfie G11, $K_e^{(1)}$ – koszt zakupu energii przy taryfie G11, $E_{imp}^{(2)}$ – energia elektryczna pobrana z sieci w strefie 1 taryfie G12, $E_{exp}^{(2)}$ – energia elektryczna oddana do sieci w strefie 1 taryfie G12, $E_{imp}^{(2h)}$ – energia elektryczna pobrana z sieci w strefie 2 taryfie G12, $E_{exp}^{(2h)}$ – energia elektryczna oddana do sieci w strefie 2 taryfie G12, $K_o^{(2)}$ – koszt zakupu energii przy taryfie G12.				



## 5. WNIOSKI

Na podstawie przeprowadzonych badań można stwierdzić, że zastosowanie zasobników w instalacjach prosumenckich pozwala ograniczyć koszty eksploatacyjne związane z zakupem energii elektrycznej. Dla przykładowej instalacji uzyskano zmniejszenie tych kosztów w zakresie od 5% do 28% w zależności od przyjętej strategii sterowania i sposobu rozliczeń (taryfy) za energię elektryczną. Największy efekt uzyskano dla strategii sterowania nr 1 polegającej na ograniczeniu poboru mocy z sieci zasilającej w strefach wysokiej ceny energii.

Uzyskane oszczędności z tytułu opłat za pobraną energię elektryczną nie są duże i w obecnych warunkach rynkowych nie są wystarczającą zachętą do instalowania zasobników przez prosumentów. Sytuacja to może ulec zmianie w związku ze spodziewanym wzrostem cen energii i malejącymi kosztami urządzeń zasobnikowych.

W zależności od sposobu sterowania występuje różny zakres wykorzystania zdolności magazynowania energii w zasobniku. Przykładowo, przy strategii nr 2 oszczędności są mniejsze (20%), ale pojemność zasobnika wykorzystana jest tylko w 80% (rys. 9). Oznacza to możliwość zastosowania zasobnika o mniejszej pojemności, tzn. mniejsze koszty inwestycyjne.

Zastosowaniem zasobników w instalacjach prosumenckich powinni być zainteresowani operatorzy sieci dystrybucyjnych. Z porównania wykresów ilustrujących zmiany napięcia w PCC (rys. 4, 7, 10 i 13) wynika, że sposób pracy zasobnika ma istotny wpływ na zmiany napięcia. Przy sterowaniu zasobnikiem zgodnie ze strategią nr 3 (stała moc wymiany) uzyskano efekt stabilizacji napięcia w PCC (rys. 13). Należy także zauważyć, że zmiana rozplywu mocy będąca efektem pracy zasobnika, wpływa na straty mocy i energii w sieci. W tabeli II przedstawiono Wyniki obliczeń dobowych strat energii, wyrażone w odniesieniu do przypadku referencyjnego.

Tabela 2. Straty energii w sieci zasilającej

Straty energii	Bez zasobnika	Strategia 1	Strategia 2	Strategia 3
$\Delta E$ (pu)	1,00	1,31	0,69	0,45

Prezentowane wyniki wskazują na sprzeczne interesy prosumentów i operatorów odnośnie do wyboru strategii sterowania. Praca zasobnika według strategii nr 1, korzystna dla prosumenta, powoduje zwiększenie strat energii w sieci i duże zmiany napięcia w PCC. Z kolei strategia nr 3, znacznie mniej korzystna dla prosumenta, pozwala na stabilizację napięcia w sieci i ograniczenie do połowy strat energii w sieci.

Wykorzystanie zasobników w instalacjach prosumenckich na potrzeby operatora sieci musi być poprzedzone wprowadzeniem odpowiedniego systemu rozliczeń dla prosumentów udostępniających własną infrastrukturę do celów regulacyjnych, na zasadzie usługi sieciowej.

## 6. LITERATURA

1. Farhangi H.: The Path of the Smart Grid, IEEE Power and Energy Magazine, 2010, vol. 8, no 1, pp. 18 - 28
2. Catarina S., Kelis H., Paredes M., View S.: Synergistic Operation between Battery Energy Storage and Photovoltaic Generator Systems to Assist Management of Microgrids, IET Generation, Transmission & Distribution, 2018, vol. 12, no. 12, pp. 2944 – 2951

3. Pompodakis E.E., Drougakis I.A., Lelis I.S.: Photovoltaic systems in low-voltage networks and overvoltage correction with reactive power control, IET Renewable Power Generation, 2016, vol. 10, no. 3, pp. 410–417
4. Bignucolo F., Caldon R., Pesavento N., Savio A.: House to Grid (H2G) Ancillary Services supplied by Next Generation AC/DC Household Systems, AEIT International Annual Conference, 20-22 September 2017, Cagliari, Italy, pp. 1–6
5. Fice M., Debowski K.: Energy management in a semi off-grid prosumer micro system, 13th Selected Issues of Electrical Engineering and Electronics (WZEE), 4-8 May 2016, Rzeszów, Poland, pp. 1–6
6. Vatu R., Ceaki O., Mancasi M., Seritan G.: Analysis of Ancillary Services within Smart Grid Framework, Modern Electric Power Systems (MEPS), 6-9 July 2015, Wrocław, Poland, pp. 1–5
7. Mostafa H.A., Phase Balancing of a 3-phase Distribution System with a Considerable Penetration of Single Phase Solar Generators, IEEE PES T&D Conference and Exposition, 14-17 April 2014, Chicago, IL, USA, pp. 1–5
8. Guerrero J.M., Chandorkar M., Lee T.L., Loh P.C.: Advanced Control Architectures for Intelligent Microgrids; Part I: Decentralized and Hierarchical Control, IEEE Transactions on Industrial Electronics, 2013, vol 60, no. 4, pp. 1254–1262
9. Tafti H.D., Maswood A.I., Konstantinou G., Pou J., Lim Z., Ooi G.H.P.: Low-voltage ride-through capability of clamped inverters with active/reactive power injection, IET Renewable Power Generation, 2017, vol. 11, no. 8, pp. 1182 - 1190
10. Ustawa z dnia 20 lutego 2015 r. o odnawialnych źródłach energii, Dz. U. z 2015 r. poz. 478 z późniejszymi zmianami
11. Taryfa dla energii elektrycznej, PGE Obrót S.A., Lublin, 2016
12. Wyciąg z taryfy dla usług dystrybucji energii elektrycznej, PGE Dystrybucja S.A., Lublin, 2019
13. Urbanek P., Wasiak I., Pawełek R.: Energy Storage Control Strategy in a Prosumer System and its Impact on the Distribution Grid, Acta Energetica, 2017, vol. 31, no. 2, pp. 213–221
14. Thankachen P. Thomas D.A.: Hysteresis controller based fault current interruption using DVR, Annual International Conference on Emerging Research Areas: Magnetics, Machines and Drives (AICERA/iCMMD), 24-26 July 2014, Kottayam, India, pp. 1–4
15. Jena S., Babu B.C., Naik A.K., Mishra G.: Performance improvement of single-phase grid - Connected PWM inverter using PI with hysteresis current controller, International Conference on Energy, Automation and Signal (ICEAS), 28-30 December 2011, Bhubaneswar, Odisha, India, pp. 1–5
16. Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej”, PGE Dystrybucja S.A., Lublin, 2019

**mgr inż. Przemysław Urbanek**

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki  
 ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź  
 przemyslaw.urbanek@edu.p.lodz.pl

**prof. dr hab. inż. Irena Wasiak**

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki  
 ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź  
 hubert.bialas@p.lodz.pl

**dr inż. Ryszard Pawełek**

Politechnika Łódzka, Instytut Elektroenergetyki  
 ul. Stefanowskiego 18/22, 90-924 Łódź  
 ryszard.pawelek@p.lodz.pl