

## Mikroelektrownia biogazowa ( $\mu$ EB) on-off grid z siecią terminali STD w systemie(WSE) przeznaczonym do testowania w sandboxie – studium przypadku

### Micro biogas power plant ( $\mu$ EB) on-off grid type with a network of STD terminals in the (WSE)system dedicated for testing in a sandbox – case study

Uzyskane wyniki bilansów dla przykładowej wiejskiej sieci nN w osłonie OK(WSE- $\mu$ EB) wskazują na duży potencjał technologii mikroelektrowni  $\mu$ EB. Przeprowadzona analiza pokazała możliwości techniczne budowy zbilansowanych energetycznie systemów(WSE). Uzyskane niezbilansowania nie są krytyczne z punktu widzenia dostępnych technologii. Dalsze iteracje bilansów (profilu niezbilansowania) na etapie inwestycji, a następnie w czasie normalnej eksploatacji, umożliwią pretendentom-innowatorom segmentu urządzeń oraz IT dopasowanie swoich produktów i wygenerowanie oferty zaspokajającej potrzeby podmiotów przyłączonych do systemów(WSE). Krytyczny z punktu widzenia infrastruktury technicznej jest terminal STD i jego certyfikowanie.

**Słowa kluczowe:** mikroelektrownia biogazowa, przekształtnik energoelektroniczny, elektroprosumeryzm, system(WSE), osłona kontrolna

The acquired balance results for an exemplary rural LV network in OK(WSE- $\mu$ BP) envelope show the great potential of  $\mu$ EB plants technology. The carried out analysis revealed technological possibilities to build energy balanced (WSE)systems. Achieved imbalances are not critical from the point of view of accessible technologies. Further balance iterations (imbalance profiles) at the investment stage and then during the time of regular operation will enable the pretenders-innovators, from equipment and IT segment, to properly match their products and generate an offer meeting the needs of entities connected to (WSE)systems. The critical, from the point of view of technical infrastructure, is the STD terminal and its certification.

**Keywords:** micro biogas power plant, electronic power converter, electroprosumerism, (WSE)system, balance envelope

Dążenie do wydzielania osłon kontrolnych spod regulacji częstotliwościowej Krajowego Systemu Elektroenergetycznego (KSE), czyli autonomizacja energetyczna osłon kontrolnych bez ich odłączania od sieci, jest drogą rozwoju rynku elektroprosumeryzmu w warstwie infrastruktury technicznej. Szczególnie, jeśli jest to osłona OK(WSE), czyli osłona wirtualna, w której infrastruktura techniczna, głównie źródła energii, będą dobierane „na wymiar” (oznaczenia osłon kontrolnych opisano w prezentacji [1] oraz w [2]). Autonomię osłon kontrolnych (prawie wszystkich) technicznie można już osiągnąć, przy czym im osłona obejmuje większą liczbę podmiotów, tym łatwiej jest wykorzystać efekt skalowalności do zbilansowania mocy czynnej, tak jak ma to miejsce w systemie KSE. Idąc w drugą stronę, czyli zawężając obszar obejmowany osłoną, koszt autonomizacji rośnie, ale tylko pozornie (z perspektywy ekonomii korporacyjnej energetyki WEK). Jeśli rozwiązania infrastruktury technicznej (źródła, magazyny, technologie IT) będą testowane w sandboxach, na modelu rynku wschodzącego 1 (ryнку RCR), to znajdują się pretendenci-innowatorzy wypracowujący mechanizmy ekonomiczne wykorzystujące potencjał nowych technologii nie podnosząc cen. Wykorzystany zostanie potencjał zasobów lokalnych (w szczególności pracy i gospodarki obiegu zamkniętego) do obniżenia kosztów eksploatacyjnych źródeł regulacyjno-bilansujących.

Technologią wpisującą się w model wykorzystania lokalnych zasobów oraz gospodarki obiegu zamkniętego jest mikroelektrownia biogazowa ( $\mu$ EB) w osłonie OK(KSER2), na terenie wsi zasilanej z jednej stacji transformatorowej SN/nN i wykorzystanie

naturalnych zasobów energetycznych w postaci m.in. odpadów rolno-hodowlanych oraz przetwórstwa rolno-spożywczego. W mikroelektrowni  $\mu$ EB do napędu generatora stosowany jest typowy silnik spalinowy wykorzystywany w maszynach rolniczych. Silnik taki jest łatwo adoptowalny do zasilania różnymi rodzajami paliw węglowodorowych (w tym biogazem o przeciętnej 50-procentowej zawartości metanu). Na bazie mikroelektrowni  $\mu$ EB można zbudować system(WSE) z siecią terminali STD umieszczony w sandboxie, a następnie testować rozwiązania z zakresu infrastruktury technicznej, prawa i ekonomii.

#### Uwarunkowania mikroekonomiczne technologii $\mu$ EB

Charakterystyka wsi podatnej na reelektryfikację OZE za pomocą mikroelektrowni  $\mu$ EB obejmuje strukturę sieci w tej wsi i dostęp do odpadów (substratów dla mikroelektrowni  $\mu$ EB) w odniesieniu do zapotrzebowania na energię. Podmiotami przyłączonymi do linii nN w analizowanej wsi są głównie niskotowarowe gospodarstwa rolne i gospodarstwa domowe (gospodarstwa rolne socjalne) z własnymi ogródkami oraz niewielkimi hodowlami przeznaczonymi na potrzeby własne. Struktura sieci powiązana jest zazwyczaj z infrastrukturą drogową, która obejmuje jedną lub kilka łączących się ulic. Zaletą takiej struktury są niewielkie odległości dostaw substratów realizowanych przez mieszkańców we własnym zakresie.

Cechą charakterystyczną osłony OK(WSE- $\mu$ EB) z mikroelektrownią  $\mu$ EB jest zbudowanie relacji pomiędzy uczestnikami lokalnego mikrorynku energii nie tylko za pomocą infrastruktury technicznej terminali STD i źródeł OZE, ale również dostawą „paliwa” dla źródła regulacyjno-bilansującego. Mianowicie, model funkcjonowania takiej osłony wykorzystuje relacje sąsiedzkie mieszkańców wsi. Relacje te związane są często z np. ekonomią korzystania z infrastruktury rolniczej (model współużytkowania maszyn rolniczych zaczął funkcjonować w sposób naturalny, bez ekonomicznych modeli naukowych). Dostarczanie substratów dla mikroelektrowni  $\mu$ EB uwzględnia głównie lokalną społeczność (mieszkańcy/rolnicy, przedsiębiorcy) redukując jednocześnie koszty utylizacji odpadów. W ten sposób tworzona jest więź formalna, mająca na celu zapewnienie dostaw energii po konkurencyjnej cenie.

Zbudowanie relacji społeczno-ekonomicznych jest zadaniem operatora(WSE), którym najlepiej jeśli byłby właściciel mikroelektrowni  $\mu$ EB. Przy czym możliwe są też inne warianty, w których właściciel mikroelektrowni  $\mu$ EB „wynajmuje” operatora(WSE) lub też operator(WSE) „wynajmuje” mikroelektrownię  $\mu$ EB. Najważniejsze jest to, że pod względem infrastruktury technicznej osłony kontrolnej to podmiot posiadający mikroelektrownię  $\mu$ EB wraz z siecią terminali STD zarządzanych przez operatora(WSE) jest centralnym węzłem konsolidującym system(WSE) na etapie inwestycji oraz eksploatacji.

Należy zwrócić uwagę na nieproporcjonalny rozkład kosztów inwestycyjnych w osłonie OK(WSE- $\mu$ EB). Źródło biogazowe jest co najmniej kilkukrotnie droższe (ok. 20 tys. PLN/kW) od innych technologii prosumenckich, np. źródła PV (cena rynkowa wynosi ok. 4 tys. PLN/kW). Jednak absolutnie nie można porównywać kosztów inwestycyjnych, ponieważ charakterystyka tych źródeł jest zupełnie inna i inny jest ich stopień oraz charakter wykorzystania [3]. Dlatego model funkcjonowania systemu(WSE) mógłby być zbudowany na kosztach zmiennych (dostarczania substratów), a nie na kosztach inwestycyjnych. Model biznesowy prosumenta nie uwzględnia zysków ze sprzedaży energii elektrycznej. Uzysk finansowy prosumenta uwzględnia głównie redukcję kosztów zakupu energii elektrycznej względem kosztu inwestycji w prosumenckie źródło OZE (zarówno mikroelektrownia  $\mu$ EB jak i źródło PV zaliczane są do tej kategorii). Jednakże mikroelektrownia  $\mu$ EB pełni dwie funkcje:

- źródła prosumenckiego do zaspokajania własnych potrzeb energetycznych w osłonie OK(P5i),
- źródła regulacyjno-bilansującego do świadczenia usługi systemowej oraz zaspokajania potrzeb energetycznych uczestników systemu(WSE).

Z tego względu nie może być traktowana tylko jak źródło prosumenckie, ponieważ generacja energii do zasilania osłony OK(P5i) odbywa się równolegle z generacją energii oddawaną do sieci i sprzedawaną pozostałym podmiotom przyłączonym do systemu(WSE).

## Podstawowe cechy systemu(WSE) z mikroelektrownią $\mu$ EB on-off grid

Mikroelektrownia  $\mu$ EB zasilana biogazem z biogazowni utylizacyjnej lub rolniczych jest jedną z krytycznych technologii wytwórczych na trajektorii transformacji TETIP na obszarach wiejskich.

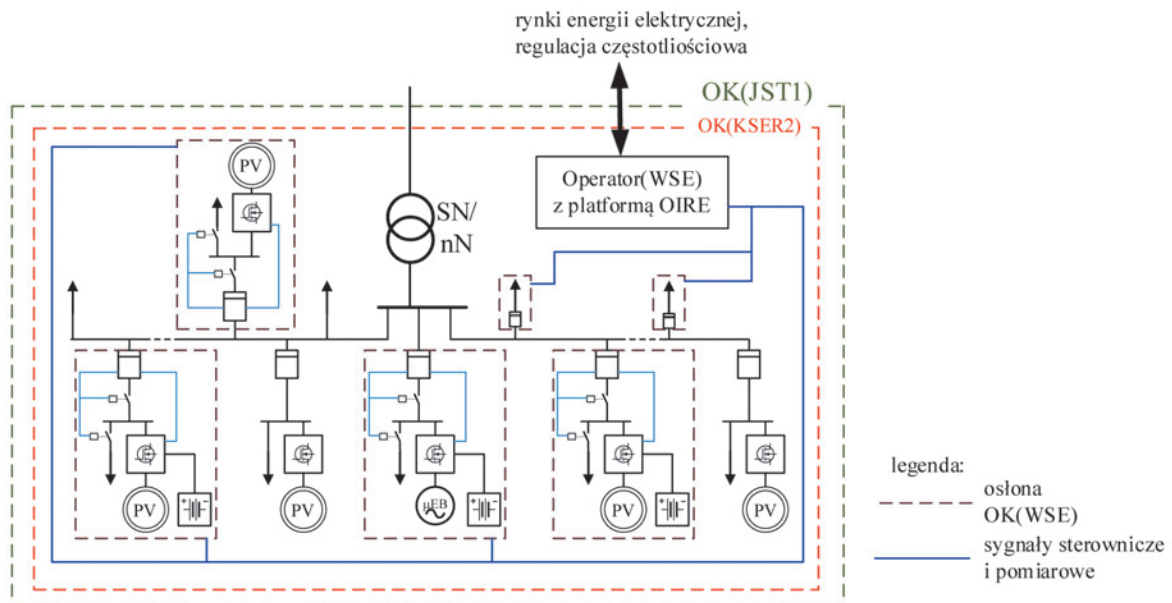
Decydują o tym trzy przyczyny:

- po pierwsze – w początkowej fazie procesu transformacyjnego przyczyną są/będą rosnące ceny usług utylizacji odpadów i jednocześnie ceny energii;
- po drugie – mikroelektrownia  $\mu$ EB jest technologią zapewniającą wzrost niezawodności dostaw energii elektrycznej na obszarach wiejskich (nękanych wzrastającą intensywnością rozległych awarii sieciowych, mających przyczynę w ekstremalnych, z punktu widzenia sieci napowietrznych, warunkach meteorologicznych);
- po trzecie – własności regulacyjne jednostki napędowej (silnika spalinowego) mikroelektrowni  $\mu$ EB są porównywalne z własnościami ciągników i maszyn rolniczych (są niewiele gorsze od własności samochodów); zatem nadaje się, jako źródło regulacyjno-bilansujące do współpracy ze źródłami OZE z generacją wymuszoną (przede wszystkim z mikroinstalacjami PV).

W pełni funkcjonalny system(WSE) z mikrobiogazownią  $\mu$ EB w warstwie infrastruktury technicznej powinien mieć zdolności regulacyjne mocy czynnej (zagadnienia te są rozważane w aspekcie dostaw energii elektrycznej, nie rozważa się tutaj zagadnień związanych z bilansem mocy bierniej, choć w dalszej części artykułu są poruszane kwestie rozkładu napięcia w liniach nN). Zdolności te muszą być kontrolowane przez operatora(WSE) na etapie inwestycyjnym w celu dopasowania inwestycji w źródła OZE z generacją wymuszoną do rzeczywistych potrzeb energetycznych, a w procesie eksploatacyjnym w celu maksymalnego wykorzystania potencjału infrastruktury sieciowej oraz źródeł i zasobników energii. Całkowite zbilansowanie energetyczne powoduje, że osłona OK(WSE- $\mu$ EB) jest niewidoczna dla regulacji pierwotnej (częstotliwościowej) w systemie KSE.

Ważną cechą osłony OK(WSE- $\mu$ EB) jest możliwość odłączenia od sieci na poziomie transformatora SN/nN. Dlatego pojęcie off-grid w tym przypadku nie dotyczy wyodrębnionego gospodarstwa rolnego (ale może dotyczyć), lecz mikrosystemu elektroenergetycznego z mikroelektrownią  $\mu$ EB w osłonie OK(KSER2), obejmującej gospodarstwo (gospodarstwa) rolne/hodowlane oraz przyłączonych do tej samej sieci nN innych odbiorców/prosumentów. Praca off-grid systemu(WSE) jest przypadkiem szczególnym takiego systemu, możliwym do realizacji nie tylko ze względów technicznych, ale również wówczas, kiedy wszystkie podmioty w tej sieci są przyłączone do osłony OK(WSE- $\mu$ EB). Należy zaznaczyć, że włączenie wszystkich podmiotów do osłony OK(WSE- $\mu$ EB) w tej samej sieci nN nie jest warunkiem niezbędnym funkcjonowania systemu(WSE).

Na rysunku 1 pokazano przykładową sieć nN z oznaczeniem obiektów włączonych do osłony OK(WSE- $\mu$ EB) (brązowa linia przerywana). Osłona OK(WSE- $\mu$ EB) w rozpatrywanym przypadku znajduje się w całości wewnątrz osłony OK(KSER2) i OK(JST1) (nazewnictwo odnosi się do formalnych związków poszczególnych osłon kontrolnych i pełniących przez nie funkcji) i obejmuje podmioty przyłączone do linii nN przez terminale STD, przy czym terminal STD jest własnością osłony OK(P). Posiadanie terminala STD jest warunkiem koniecznym włączenia do osłony OK(WSE- $\mu$ EB). W pokazanej sieci nie wszyscy prosumenci i odbiorcy są objęci osłoną OK(WSE- $\mu$ EB).



Rys. 1. Przykład osłony OK(WSE) z mikrobiogazownią  $\mu$ EB i siecią terminali STD wraz z siecią sygnałów sterowniczych i pomiarowych

Operator(WSE), podmiot zarządzający, jest skomunikowany z terminalami STD oraz reprezentuje system(WSE) na zewnętrznych rynkach energii, łącznie z rynkiem schodzącym WEK i pełni funkcję operatora handlowo-technicznego. Infrastruktura sieciowa nie jest własnością operatora(WSE) i systemu(WSE), przy czym dostęp do niej jest możliwy przez terminal STD i jest wykorzystywana na zasadach współużytkowania zasobów sieciowych. Korzystną opcją może być przejęcie istniejącej sieci przez operatora(WSE), jednakże nie jest to sprawa krytyczna.

Funkcjonowanie systemu(WSE) oraz operatora(WSE) wymaga ustanowienia reguł, na podstawie których będą przygotowane umowy z podmiotami w osłonie OK(WSE- $\mu$ EB).

Poniżej zestawiono najważniejsze wybrane warunki i reguły formalne funkcjonowania systemu (WSE) – tzw. ogólne warunki umowy pomiędzy operatorem(WSE) i podmiotami w osłonie OK(WSE- $\mu$ EB).

1. Operator(WSE) powinien być właścicielem mikroelektrowni  $\mu$ EB. Osłona OK(P5i), w której znajduje się mikroelektrownia  $\mu$ EB, pełni funkcję podmiotu odpowiedzialnego za usługi regulacyjno-bilansujące w osłonie OK(WSE- $\mu$ EB). Nie jest to warunek krytyczny, ale uprości zarządzanie systemem(WSE), ponieważ nie będzie potrzeby powoływania dodatkowego podmiotu prawnego.
2. Podmiot w osłonie OK(P) może zostać przyłączony do osłony OK(WSE- $\mu$ EB), jeśli będzie posiadał certyfikowany terminal STD. Terminal STD zapewnia obserwowalność i realizowalność warunków umowy, w tym szczególnie wymogu kształtowania profilu na osłonie OK(P) w celu nieprzekraczania parametrów energetycznych nałożonych przez operatora(WSE) oraz parametrów elektrycznych nałożonych przez właściciela sieci nN (najczęściej operatora OSD).
3. Terminal STD jest elementem infrastruktury technicznej osłony kontrolnej OK(P). W skład terminalu STD wchodzi: układy pomiarowo-licznikowe, układy komunikacyjne i sterujące oraz łączniki i przekształtniki energoelektroniczne. Podmioty włączone do osłony OK(WSE- $\mu$ EB) muszą dosto-

sować i kontrolować parametry energetyczne na przyłączy do sieci nN wykorzystując infrastrukturę techniczną, np. za pomocą przekształtnika i akumulatora. Ograniczenia na przyłączy są nakładane przez operatora (WSE- $\mu$ EB) i operatora OSD, których niemożność spełnienia na etapie inwestycyjnym dyskwalifikuje podmiot z przyłączenia do systemu(WSE).

4. W przypadku przekroczenia umownych ograniczeń (umowa już została podpisana, a podmiot przyłączony) osłona OK(P) może zostać odłączona od sieci przez operatora(WSE).
5. Operator(WSE) reprezentuje system(WSE) na zasadach zapisanych w ogólnych warunkach umowy, na rynku wchodzącym i rynku schodzącym WEK. Reprezentacja ma na celu zawieranie i realizację kontraktów handlowych z rynkami zewnętrznymi oraz rozliczeń wewnątrz osłony OK(WSE- $\mu$ EB).
6. Operator(WSE) za pomocą terminali STD realizuje ochronę sieci operatorskiej systemu(WSE).
7. Operator(WSE) monitoruje realizację dostaw substratów dla mikroelektrowni  $\mu$ EB.
8. Zwymiarowanie źródła regulacyjno-bilansującego oraz źródeł OZE z generacją wymuszoną poprzedzone jest przygotowaniem bilansu zapotrzebowania energetycznego osłony OK(WSE- $\mu$ EB) i określeniem potencjału lokalnych zasobów dostarczania substratów dla mikroelektrowni  $\mu$ EB.

Struktura sieci nN pokazana na rysunku 1 nie jest przypadkowa. Uwzględnia ona sposób przyłączenia źródła o znacznie większej mocy od pozostałych przyłączy. Przy czym lokalizacja przyłącza z mikroelektrownią  $\mu$ EB będzie zawsze rozpatrywana w kontekście lokalnych warunków techniczno-ekonomicznych. Jeśli z transformatora wychodziłaby tylko jedna linia, to korzystnym mogłoby się okazać przyłączenie w środku tej linii (chodzi o zachowanie symetrii rozptyłów mocy). Należy też zwrócić uwagę na to, że nie wszystkie podmioty w osłonach OK(P) oraz nie wszyscy odbiorcy znajdują się w osłonie OK(WSE- $\mu$ EB). Taki stan pokazuje ideę wirtualizacji osłony OK(WSE).

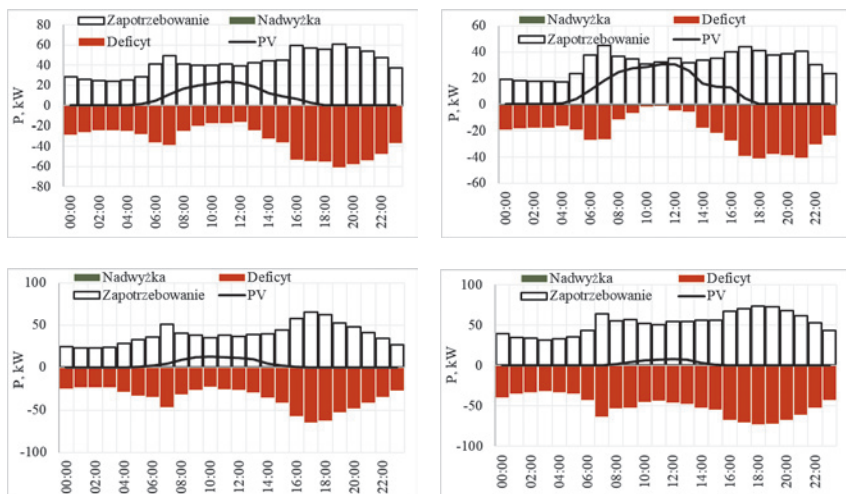
Mianowicie, podmioty powiązane są formalnie umowami i technicznie przez terminale STD (przez profile niezbilansowania na ostonie kontrolnej), a nie przez infrastrukturę sieciową. Pozostałe podmioty nieprzyłączone do ostoni OK(WSE- $\mu$ EB) funkcjonują na rynku wschodzącym 1.

## Studium inwestycyjne funkcjonowania sieci terminali STD

Zbilansowanie systemu(WSE) i jednocześnie niedopuszczenie do przewymiarowania źródeł OZE wymaga planu inwestycyjnego. Plan ten uwzględni przede wszystkim uwarunkowania techniczne, szczególnie dwie grupy parametrów:

- zapotrzebowanie energetyczne wraz z profilem zapotrzebowania w celu oceny mocy zainstalowanej źródeł oraz ograniczenia źródła regulacyjno-bilansującego,
- ograniczenia sieciowe w węzłach przyłączenia.

Zapotrzebowanie energetyczne systemu(WSE) wraz z profilem zapotrzebowania pozwala określić moc źródeł OZE z regulacją wymuszoną i regulacyjno-bilansujących oraz pojemność magazynów stosując model na miedzianej płycie. W celu przeprowadzenia takiej analizy przyjęto przykładową sieć nN z rysunku 1, do której przyłączone są gospodarstwa domowe oraz gospodarstwa rolne. Zapotrzebowanie energetyczne ostoni OK(WSE- $\mu$ EB) wynosi ok. 350 MWh, a moc szczytowa, dla mocy czynnej uśrednionej w okresach godzinowych, wynosi ok. 100 kW. Analizując sezonowe zmiany profilu zapotrzebowania, rozsądną mocą wszystkich źródeł PV jest 50 kW. Wartość ta nie przekracza mocy szczytowej profilu zapotrzebowania w ostonie OK(WSE- $\mu$ EB), co gwarantuje wykorzystanie energii ze źródeł PV wewnątrz systemu(WSE). Wartość ta wynika z pierwszej iteracji doboru mocy źródeł z generacją wymuszoną, czyli zestawienia sumarycznego profilu zapotrzebowania ostoni OK(WSE- $\mu$ EB) i profilu generacji źródeł PV w tej ostonie (rys. 2 – charakterystyczne profile dla różnych pór roku). Uwzględniając całkowite wykorzystanie energii ze źródeł PV w ostonie OK(WSE- $\mu$ EB) (50 MWh) deficyt wynosi 300 MWh.

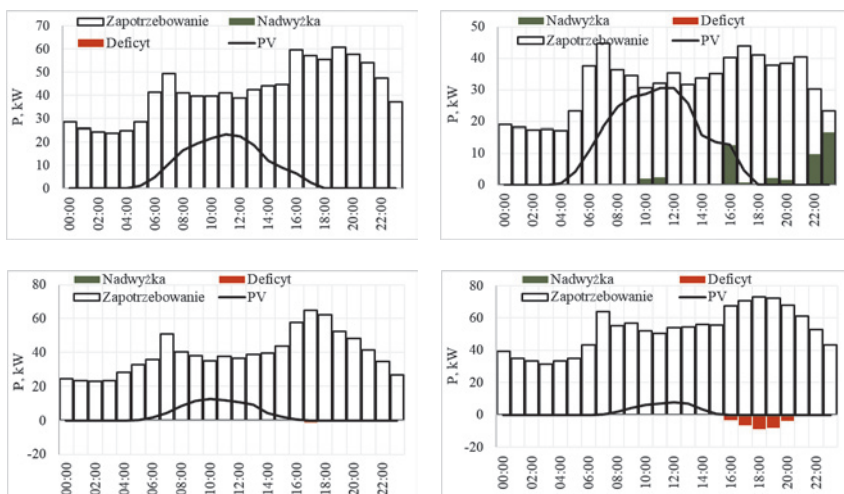


Rys. 2. Charakterystyczne profile średniej godzinowej mocy czynnej: zapotrzebowania ostoni OK(WSE- $\mu$ EB), generacji źródła PV i deficytu w analizowanym systemie(WSE), od lewej na górze profile dla kolejnych pór roku: wiosna, lato, jesień, zima

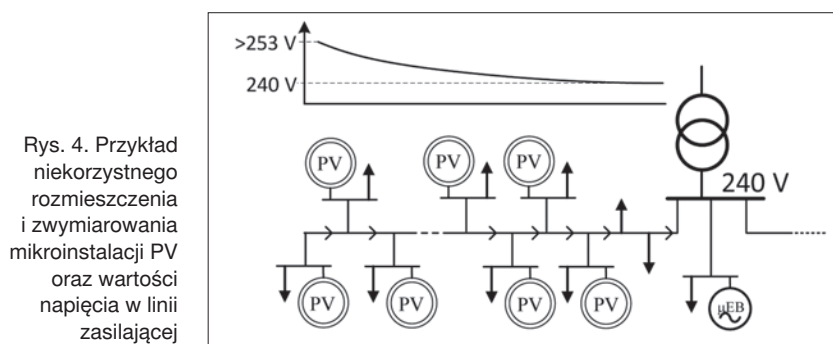
W drugiej iteracji należy wziąć pod uwagę ograniczenia źródła regulacyjno-bilansującego i ograniczenia sieciowe. Ograniczenia te są zaprogramowane w terminalu STD dla określonej lokalizacji przyłącza, przy czym ograniczenia sieciowe są definiowane i parametryzowane przez właściciela sieci nN (najczęściej opera-

tora OSD), a ograniczenia mikroelektrowni  $\mu$ EB – przez producenta urządzenia. Parametry ograniczeń związanych z chwilowym bilansem mocy są aktualizowane w czasie rzeczywistym na podstawie ciągłego monitorowania wskazań układów licznikowo-pomiarowych terminali STD. Zależnie od modelu funkcjonowania systemu(WSE) operator wysyła, za pośrednictwem terminala STD, sygnał (techniczny lub cenowy) wpływający na profil niezbilansowania w ostonach OK(P). W pierwszej kolejności brana jest pod uwagę ostoną OK(P5i), w której znajduje się źródło regulacyjno-bilansujące. Po wyczerpaniu zdolności regulacyjnych mikroelektrowni  $\mu$ EB sygnały sterujące mogą być wysyłane do pozostałych oston. W zależności od wyposażenia infrastruktury technicznej w ostonach OK(P) odpowiedź na ten sygnał może być realizowana po stronie odbiorników, magazynów lub źródła OZE. Taki mechanizm wpływa korzystnie na wykorzystanie źródła regulacyjno-bilansującego, ponieważ bilans (kształt profilu zapotrzebowania) całego systemu (WSE) jest w dużym zakresie podporządkowany mikroelektrowni  $\mu$ EB. Ponadto przyczynia się do poprawy autokonsumpcji (*self dispatching*) i wzmacnia pewność dostawy energii do odbiorcy/prosumenta.

Mikroelektrownia  $\mu$ EB o mocy znamionowej prądnicy (i takiej samej wydajności strumienia biogazu) 50 kW może wyprodukować rocznie 400 MWh (przyjmując przeciętny czas wykorzystania mocy znamionowej 8000 godz./rok). Z analizy wynika, że energia niezbędna do zbilansowania ostoni OK(WSE- $\mu$ EB) wynosi 300 MWh, czyli czas wykorzystania mocy znamionowej wyniesie 6000 godzin. Zaletą mikroelektrowni  $\mu$ EB jest możliwość przeciążania prądnicy względem mocy znamionowej. Przyjęto, że prądnica może być przeciążana do 65 kW. Aby zapewnić przeciążalność źródła  $\mu$ EB niezbędne jest wyposażenie mikrobiogazowni w zasobnik biogazu. Problem doboru pojemności zasobnika nie będzie tutaj analizowany. Należy jednak wyjaśnić, że dobór pojemności zasobnika biogazu jest związany nie tylko z bilansem energetycznym ostoni kontrolnej, ale również z możliwością wpływania na proces produkcji biogazu. Sterowanie wydajnością procesu fermentacji można porównać do regulacji godzinowej w systemie KSE, ponieważ czasy reakcji chemicznych mają bezwładność kilku godzin. Najważniejsze jest jednak sterowanie procesem w taki sposób, aby zapewnić ciągłość pracy mikroelektrowni  $\mu$ EB.



Rys. 3. Charakterystyczne profile średniej godzinowej mocy czynnej: zapotrzebowania ostony OK(WSE- $\mu$ EB), generacji źródła PV i profilu niezbilansowania (deficytu i nadwyżki) w analizowanym systemie(WSE) z mikroelektrownią  $\mu$ EB o mocy 50 kW, od lewej na górze profile dla kolejnych pór roku: wiosna, lato, jesień, zima



Rys. 4. Przykład niekorzystnego rozmieszczenia i zwiarowania mikroinstalacji PV oraz wartości napięcia w linii zasilającej

Przeprowadzone symulacje dla przyjętej sieci ze źródłami PV oraz mikroelektrownią  $\mu$ EB o mocy 50 kW wykazały (rys. 3), że największe niezbilansowania występują w lecie (nadwyżki) i zime (deficyty). Letnie nadwyżki wynikają z ograniczenia minimalnej mocy mikroelektrowni  $\mu$ EB wynoszącej 10% mocy znamionowej (5 kW) i jednocześnie generacji źródeł PV, a także z napełnienia zasobnika biogazu i konieczności utrzymania generacji energii elektrycznej z mocą zabezpieczającą przed przepiętniem zbiornika. Roczna nadwyżka energii w ostonie OK(WSE- $\mu$ EB) wynosi ok. 4 MWh, a roczny deficyt nie przekracza 10 MWh. Obliczenia wykonano dla profili mocy czynnej uśrednionej w okresie godziny. W rzeczywistości wystąpią większe chwilowe wartości mocy niezbilansowania niż pokazane na rysunku 3. Jest to jednak zagadnienie na pograniczu studium inwestycyjnego i eksploatacyjnego (operatorskiego) funkcjonowania sieci terminali STD.

Problem niezbilansowania będzie widoczny szczególnie w przypadku systemu (WSE) off-grid, ponieważ z powodu przekraczania ograniczeń źródła regulacyjno-bilansującego niezbędne będą reakcje po stronie odbiorców/prosumentów, wynikające z zapewnienia parametrów jakościowych energii elektrycznej w całym systemie(WSE). Ujemne niezbilansowanie ostony OK(WSE- $\mu$ EB) spowoduje obniżenie napięcia w sieci (częstotliwość jest regulowana przez przekształtnik mikroelektrowni  $\mu$ EB). Stan taki nie jest traktowany negatywnie, lecz wpłynie w sposób naturalny na wyposażanie oston OK(P) w zasobniki do krótkookresowej regulacji mocy.

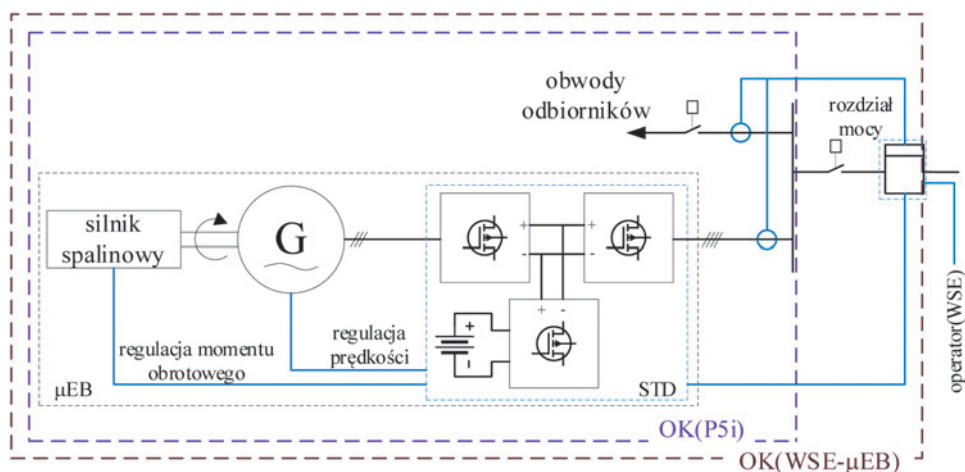
Zdefiniowanie i sparametryzowanie ograniczeń sieciowych jest obowiązkiem właściciela sieci nN (najczęściej operatora OSD). Poprawnie zdefiniowane ograniczenia sieciowe mają na celu zmaksymalizować wykorzystanie sieci (i nie dopuścić do przeciążenia oraz utrzymać wartość napięcia na przyłączach w dopuszczalnych granicach). Wartość napięcia na szynie nN w stacji transformatorowej SN/nN jest

tak dobierana, aby na całej długości linii 230/400V nie przekroczyła wartości dopuszczalnej (maksymalnej 253 V i minimalnej 207 V dla napięcia fazowego). Operatorzy OSD konfigurują sieci i transformatory SN/nN w taki sposób, aby na końcach linii napięcie nie było niższe od dopuszczalnego (zasada dotychczas obowiązująca i wynikająca z braku lub niewielkiego nasycenia źródłami OZE). Upowszechnianie się mikroinstalacji fotowoltaicznych bardzo szybko pokazało, że mogą występować problemy z utrzymaniem parametrów jakościowych – wartości napięcia [6].

Efektom wzrostu napięcia ponad wartość dopuszczalną jest wyłączenie się falowników PV. Źródła rozproszone wpływają na kierunek przepływu energii i węzły spływu. Efektom zmiany kierunku przepływu energii elektrycznej jest również zmiana kierunku spadków napięcia, jak pokazano na rysunku 4.

Poprawnie zdefiniowane i sparametryzowane przez operatora OSD ograniczenia sieciowe w każdym węźle przyłączeniowym pozwolą na zaplanowanie rozmieszczenia źródeł PV oraz ich wielkość (moc). Rolą terminala STD jest kontrolowanie tych ograniczeń, a w przypadku przekroczenia nastąpi odłączenie podmiotu od sieci zasilającej. Mając do dyspozycji terminal STD ograniczenia sieciowe mogą być zdefiniowane jako dobowy profil z dopuszczalnym pasmem mocy czynnej i biernej w węźle przyłączeniowym.

W przypadku systemu(WSE) off-grid nadwyżki energii spowodują wzrost napięcia w sieci (wszystkie źródła są wyposażone w przekształtniki energoelektroniczne). Stosowane falowniki dla źródeł PV mają zaimplementowane zabezpieczenia w przypadku zmian napięcia w sieci. Przyczyną różnic konfiguracji są różne konfiguracje falowników, dlatego reakcja na wzrost napięcia może być trudna do kontrolowania. Krytyczną sytuacją będzie cykliczne wyłączenie i załączanie falowników PV, co mogłoby doprowadzić również do wyłączenia mikroelektrowni  $\mu$ EB z powodu dużego deficytu mocy. Pojawiają się już na rynku rozwiązania falowników umożliwiających sterowanie mocą wyjściową, z pominięciem algorytmu MPPT (ang. maximum power point tracking – poszukiwanie punktu mocy maksymalnej). Wówczas możliwe będzie doprowadzenie, przez terminal STD, sygnału sterującego falownikami PV w celu redukcji mocy. Jednak lepszym rozwiązaniem będzie wyposażenie ostony OK(P) w akumulator bilansują-



Rys. 5. Schemat blokowy osłony kontrolnej OK(P5i) z mikroelektrownią  $\mu$ EB włączoną do osłony OK(WSE- $\mu$ EB) jako źródło regulacyjno-bilansujące

cy, wówczas redukcja mocy nastąpi tylko na przyłączy, a źródło PV nie będzie ograniczane. Kolejną zaletą mikroelektrowni  $\mu$ EB z terminalem STD wyposażonym w falownik jest możliwość zmiany częstotliwości napięcia w sieci osłony OK(WSE- $\mu$ EB) off-grid do wartości, przy której falowniki źródeł PV muszą zredukować moc lub się wyłączyć.

### Studium eksploatacyjne (operatorskie) funkcjonowania sieci terminali STD – struktura techniczna terminala STD dla mikroelektrowni $\mu$ EB

Cechą charakterystyczną dla analizowanej osłony OK(WSE- $\mu$ EB), pokazanej na rysunku 1, jest wyposażenie terminala STD w przekształtnik energoelektroniczny w każdej osłonie OK(P) (osłonie prosumenckiej). Terminal STD jest warunkiem koniecznym przyłączenia do osłony OK(WSE- $\mu$ EB), a jego wyposażenie zależeć będzie od stosowanych w osłonie technologii. Wyposażenie źródła fotowoltaicznego w przekształtnik (falownik) jest wymagane koniecznością dopasowania parametrów elektrycznych źródła DC do sieci prądu przemiennego. Wyposażenie osłony OK(P) w przekształtnik akumulatorowy (zintegrowany z falownikiem fotowoltaicznym lub niezależny) jest domeną rynku energii bez wsparcia dla źródeł OZE i instalacji off-grid, a także wszędzie tam, gdzie zachodzi konieczność kształtowania profilu generacji źródła OZE. Na rynku wschodzącym 1 akumulator jest naturalnym uzupełnieniem dla źródła OZE z generacją wymuszoną, przy czym w tym wypadku źródło fotowoltaiczne zyskuje funkcjonalność kształtowania profilu niezbilansowania na osłonie OK(P) (funkcjonalność bilansowania w osłonie prosumenckiej).

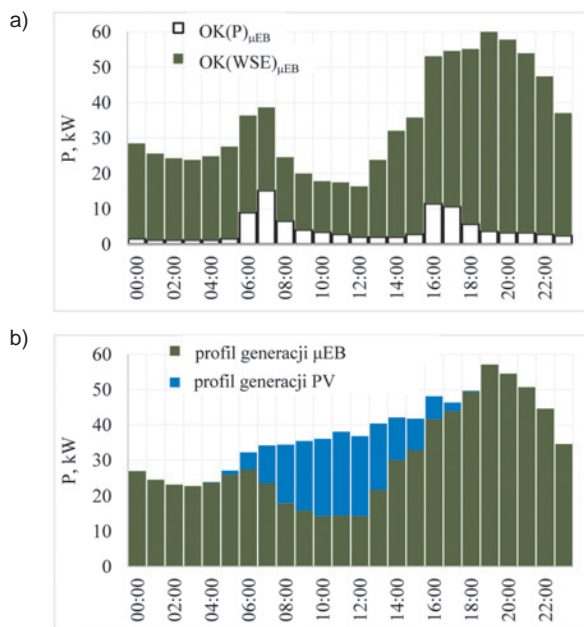
Wyposażenie mikroelektrowni  $\mu$ EB w przekształtnik energoelektroniczny pozwala na pełne wykorzystanie własności tego źródła w trybie regulacyjno-bilansującym (rys. 5). Typowym rozwiązaniem dla mikroelektrowni  $\mu$ EB jest zastosowanie taniej prądnicy indukcyjnej, wymagającej do wzbudzenia źródła mocy biernej, najczęściej sieci zasilającej. Wyposażając prądnicę indukcyjną w przekształtnik energoelektroniczny i akumulator uzyskuje się źródło z regulacją mocy czynnej i biernej oraz możliwością pracy w trybie off-grid.

Zaznaczona na rysunku 5 osłona OK(P5i) odcina infrastrukturę techniczną na szynach zbiorczych rozdzielni głównej, aby uwydatnić pełnione funkcje mikroelektrowni  $\mu$ EB:

- źródło prosumenckie do bilansowania zapotrzebowania wewnątrz osłony OK(P5i),
- źródło regulacyjno-bilansujące dla osłony OK(WSE- $\mu$ EB).

Dualność osłony OK(P5i) wymaga zastosowania mechanizmu rozliczeniowego uwzględniającego podział profilu generacji mikroelektrowni  $\mu$ EB na profil wewnątrz osłony OK(P5i) i profil dla osłony OK(WSE- $\mu$ EB).

Na rysunku 6 pokazano przykładowe profile generacji mikroelektrowni  $\mu$ EB z uwzględnieniem podziału na profil osłony OK(P5i) i osłony OK(WSE- $\mu$ EB).



Rys. 6. Profile skumulowane zapotrzebowania i generacji energii w osłonie OK(P5i) oraz OK(WSE- $\mu$ EB); a) podzielony profil mocy generowanej przez mikroelektrownię  $\mu$ EB, b) profil mocy mikroelektrowni  $\mu$ EB w osłonie OK(WSE- $\mu$ EB) oraz profil generacji netto źródeł PV

Pokazano również profil netto generacji wszystkich źródeł PV. Profil netto oznacza, że jest to suma profili widocznych na osłonach OK(P) energii wprowadzonej do sieci.

Największą trudnością w doborze infrastruktury technicznej sieci terminali STD w systemie(WSE) off-grid jest zbilansowanie mocy z czasem regulacji na poziomie regulacji pierwotnej (sekundowej). Dla analizowanego systemu(WSE) źródłem regulacyjno-bilansującym i jednocześnie układem stabilizacji częstotliwości i napięcia jest mikroelektrownia  $\mu$ EB z terminalem STD wyposażonym w układ przekształtnikowy. Zastosowanie przekształtnika pozwala na wykorzystanie taniej prądnicy asynchronicznej oraz uzyskanie szybkiej regulacji częstotliwości i napięcia. Standardowe układy UGZ stosowane przez operatorów OSD do zasilania linii nN w okresach awarii i napraw wyposażone są w prądnice synchroniczne. Wymagania jakościowe dla energii elektrycznej sieci zasilanych z agregatów prądowców zależą od klasy zasilanych odbiorników [8]. Stosowane powszechnie agregaty są przystosowane do zasilania odbiorników klasy 1 i 2, dla których zmiana częstotliwości przy nagłym zmniejszeniu lub zwiększeniu mocy może sięgać 10% ( $\pm 5$  Hz), a czas odbudowy częstotliwości nie powinien być dłuższy niż 5-10 s. Typowe odbiorniki AGD, napędy i oświetlenie zazwyczaj będą funkcjonować poprawnie. W przypadku falowników źródeł PV takie wartości są niedopuszczalne i falownik wyłączy się.

W analizowanym układzie za częstotliwość generowanego napięcia w trybie off-grid odpowiada falownik sieciowy, a za prędkość obrotową układu silnik-prądnica odpowiada falownik silnikowy (rys. 5). Podstawowy bilans mocy czynnej  $P_{OK}$  w osłonie kontrolnej można opisać równaniem:

$$P_{OK} = \sum_{i=0}^k P_{G_i} - P_{WW} - \sum_{i=0}^j P_{O_i} - \sum_{i=0}^l P_{Z_i} = 0 \quad (1)$$

gdzie:

- $P_{G_i}$  – moc i-go źródła wewnątrz osłony kontrolnej,
- $P_{WW}$  – moc węzła wymiany – dla analizowanej osłony OK(WSE) jest to jeden węzeł w punkcie styku z siecią WEK,
- $P_{O_i}$  – moc i-go odbiornika,
- $P_{Z_i}$  – moc i-go zasobnika energii.

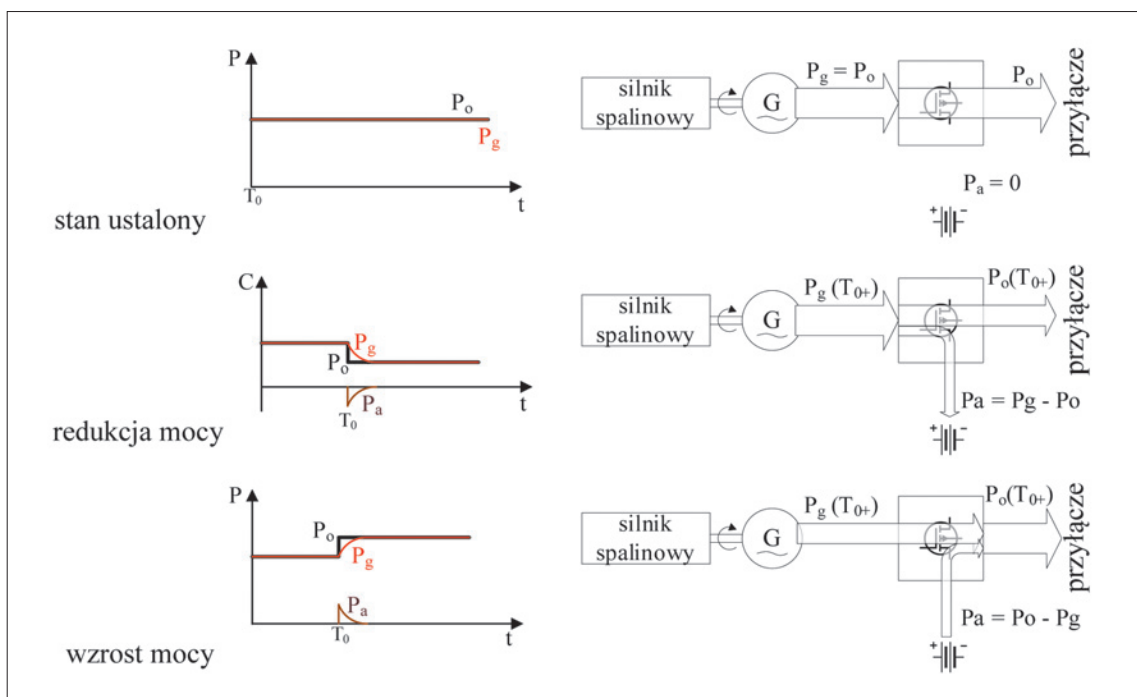
Jak w każdym systemie elektroenergetycznym, w systemie(WSE) off-grid podaż mocy czynnej musi równoważyć popyt. Jest to podstawowe kryterium regulacji mocy czynnej w osłonie kontrolnej. Mianowicie, jest to dążenie do zbilansowania mocy bez przepływu energii elektrycznej przez węzeł wymiany (dla systemu(WSE) off-grid  $P_{WW} = 0$ ):

$$\sum_{i=0}^k P_{G_i} - \sum_{i=0}^j P_{O_i} - \sum_{i=0}^l P_{Z_i} = 0 \quad (2)$$

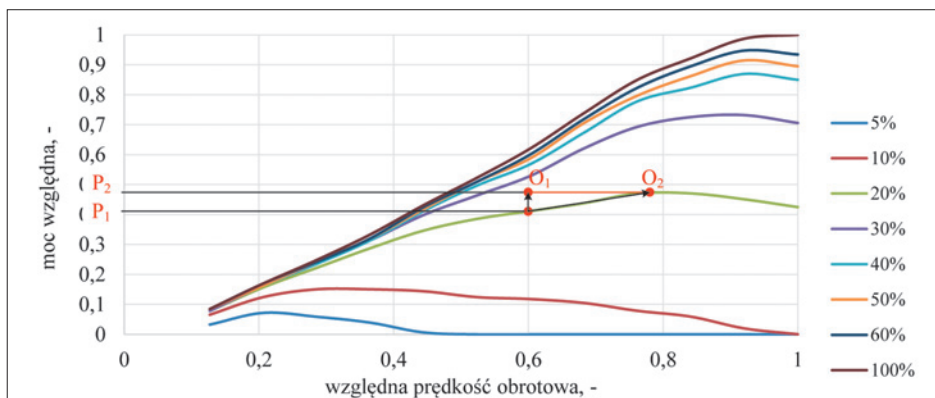
Aby możliwe było szybkie bilansowanie mocy czynnej z wykorzystaniem mikroelektrowni  $\mu$ EB układ przekształtnikowy został wyposażony w bufor energii – akumulator. W stanach dynamicznych (nieustalonych) dodatkowa energia pobierana jest z akumulatora lub oddawana do akumulatora. W celu regulacji mocy zespołu silnik-prądnica sterownik terminala STD ma do dyspozycji możliwość zmiany prędkości obrotowej prądnicy (co jednocześnie przekłada się na zmianę mocy) i zmianę nastawy dawki paliwa (zmiana położenia przepustnicy wpływa na zmianę momentu obrotowego).

Na rysunku 7 pokazano charakterystyczne stany pracy mikroelektrowni  $\mu$ EB oraz przebiegi mocy czynnej:

- 1) stan ustalony,
- 2) stan obniżania mocy,
- 3) stan zwiększania mocy.



Rys. 7. Stany pracy mikroelektrowni  $\mu$ EB, wykresy mocy (po lewej), schematy przepływu mocy (po prawej)



Rys. 8. Charakterystyki częściowe mocy silnika spalinowego w funkcji prędkości obrotowej dla zmiennego otwarcia przepustnicy

Przedstawione na schematach, dla stanów nieustalonych, symboliczne wartości mocy występują w czasie  $T_{0+}$ , czyli tuż po zmianie wartości mocy obciążenia.

Czas reakcji regulacji mocy zależy od:

- dostępnej mocy akumulatora (a ta zależy od pojemności),
- czasu reakcji napędu przepustnicy.

Zmianę mocy napędowej silnika spalinowego można wykonać na dwa sposoby, przez:

- 1) zmianę ilości doprowadzanej mieszanki paliwowo-powietrznej,
- 2) zmianę prędkości obrotowej.

Możliwe (i pożądane) jest stosowanie obu metod jednocześnie w celu uzyskania możliwie dużej dynamiki układu.

Na rysunku 8 pokazano przykładowe charakterystyki mocy silnika spalinowego dla zmiennego otwarcia przepustnicy. Zmiana mocy z wartości  $P_1$  do  $P_2$  możliwa jest na trajektorii zmian prędkości obrotowej pomiędzy punktami  $O_1$  i  $O_2$  (czerwona linia) i adekwatnego otwarcia przepustnicy.

Może wydawać się, że takie sterowanie mocą jest nadmierne skomplikowane, a taki sam efekt można uzyskać przez sterowanie tylko otwarciem przepustnicy. Jednakże takie rozwiązanie jest ograniczone charakterystyką zewnętrzną (przy maksymalnym otwarciu przepustnicy). Dodatkowo sterując prędkością obrotową można ustalać punkty pracy przy najmniejszym zużyciu paliwa oraz pozostawiać zapas momentu obrotowego (punkty pracy na płaskiej charakterystyce momentu obrotowego) potrzebnego do uzyskania dużej dynamiki regulacji.

## Zakończenie

Poruszone w artykule zagadnienia wygenerowały wiele kolejnych w aspektach regulacji prawnych sandboxu, szczególnie w sferze ogólnych warunków umowy dla uczestników systemu (WSE). Natomiast uzyskane wyniki bilansów dla przykładowej wiejskiej sieci nN w ostonie OK(WSE- $\mu$ EB) wskazują na duży potencjał technologii mikroelektrowni  $\mu$ EB. Przeprowadzona analiza pokazała możliwości techniczne budowy zbilansowanych energetycznie systemów(WSE). Uzyskane niezbilansowania nie są krytyczne z punktu widzenia dostępnych technologii. Dalsze iteracje bilansów (profilu niezbilansowania) na etapie inwestycji, a następnie w czasie normalnej eksploatacji, umożliwią prezydentom-innowatorom segmentu urządzeń oraz IT dopasowanie

swoich produktów i wygenerowanie oferty zaspokajającej potrzeby podmiotów przyłączonych do systemów(WSE).

Krytycznym z punktu widzenia infrastruktury technicznej jest terminal STD (w tym przypadku sieć terminali STD) i jego certyfikowanie. Formalne związki podmiotów na rynku energii elektrycznej wymagają wykorzystania infrastruktury technicznej certyfikowanej pod względem bezpieczeństwa użytkownika oraz metrologicznej. Zagadnienia związane z bezpieczeństwem użytkownika urządzeń i kompatybilności elektromagnetycznej mają odzwierciedlenie w normach krajowych i międzynarodowych. Natomiast w przypadku prowadzenia rozliczeń są to nowe zagadnienia, które należy testować i rozwiązywać w potrzebnych sandboxach.

## PIŚMIENNICTWO

- [1] Popczyk J., *Potencjał unifikacji i skalowalności elektroprosumeryzmu w perspektywie trzech fal jego stawania się*. www.ppte2050.pl, Bazowe Konwersatorium IE, Gliwice, 23.06.2020.
- [2] Popczyk J., *Trzy fale elektroprosumeryzmu*. „Energetyka” 2020, nr 7, Biuletyn PPTe2050 nr 2/2020.
- [3] Bodzek K., *Od analizy profili na ostionach kontrolnych systemu WSE do wskazówek projektowania struktury miksu energetycznego – studium przypadków*. „Energetyka” 2020, nr 7, Biuletyn PPTe2050 nr 2/2020.
- [4] Wereszczyński D., Jurkiewicz A., Fice M., *Mikrobiogazownie rolnicze KMR-mikroelektrownia biogazowa (20-50 kW) on-off grid*. www.ppte2050.pl, zakładka Pretendenci-Innowatorzy, Opole 2020.
- [5] Popczyk J., Bodzek K., Fice M., Wereszczyński D., *Prosumencki model mikrosystemu elektroenergetycznego z mikroelektrownią  $\mu$ EB na rynku wschodzącym 1 energii elektrycznej*. www.cire.pl, www.ppte2050.pl, Gliwice 2018.
- [6] Topolski Ł., *Wpływ fotowoltaiki na sieć dystrybucyjną na przykładzie pomiarów wykonanych na terenie gminy Ochotnica Dolna*. www.ppte2050.pl, Bazowe Konwersatorium IE, Gliwice, grudzień 2019.
- [7] Instrukcja Ruchu i Eksploatacji Sieci Dystrybucyjnej, *Tauron Dystrybucja*
- [8] PN – ISO 8528-5 Zespoły prądowórcze. Zespoły prądowórcze zasilane silnikiem tłokowym.

