ROLA OSŁON KONTROLNYCH JEDNOSTEK SAMORZĄDU TERYTORIALNEGO W ELEKTROPROSUMERYZACJI POLSKI

Krzysztof Bodzek
Politechnika Śląska, Katedra Energoelektroniki, Napędu Elektrycznego i Robotyki

Budowanie oddolne, czyli transformacja energetyczna w trybie innowacji przełomowej do elektroprosumeryzmu (TETIPE) wymaga integracji wielu obecnie odrębnych (silosowych) sektorów energetycznych. Są to sektory energii elektrycznej, ciepła, gazu, paliw ciekłych i stałych. Integracja realizowana w transformacji TETIPE doprowadzi do wygaszanie większości z nich, a to powoduje bardzo duży opór. W artykule proponuje się przeprowadzić transformację z wykorzystaniem osłon kontrolnych jednostek samorządu terytorialnego. Propozycja wynika z jednej strony, z dużego dopasowania infrastruktury sieciowej do obszarów funkcjonowania samorządu, a z drugiej strony na możliwości wykorzystania doświadczeń samorządów w realizacji działań integrujących różne obszary w tym mieszkańców, edukację, służbę zdrowia, ale również sektory energetyczne i przedsiębiorców.

W artykule przedstawiono elektroprosumeryzację Polski za pomocą rozproszonych osłon kontrolnych powiązanych z jednostkami JST, w tym sposób pokrycia zapotrzebowania za pomocą źródeł OZE, oraz przedstawiono koszty krańcowe i średnioroczne wytwarzania energii w osłonach OK(JST). Opisano uwarunkowania wpływu osłon na sieć zwłaszcza ze względu na rzeczywiste jej wykorzystanie przez rozproszone osłony elektroprosumenckie. Przedstawiono funkcjonalności wybranych rozwiązań technicznych przyłączanych na różnym poziomie napięć oraz zasygnalizowano kwestię wymiany danych i bezpieczeństwa. Opisano również przykłady oddolnych działań samorządów, weryfikujące koncepcję elektroprosumeryzmu.

Słowa kluczowe: osłony kontrolne JST, działania oddolne, rozwiązania hierarchiczne, funkcjonalności przekształtników i magazynów energii, wymiana i bezpieczeństwo danych.

1. Wprowadzenie

Od czasu tworzenia pierwszych krajowych sieci elektroenergetycznych, odbiorcy byli na samym końcu jednokierunkowego systemu elektroenergetycznego. Nawet po liberalizacji rynków energetycznych [1,2], kilkadziesiąt lat temu, gdy energia elektryczna stała się towarem w modelu popytowo-podażowym, odbiorcy nadal nie mieli kontroli ani wpływu na żaden aspekt systemu. W wielu przypadkach w dalszym ciągu konsumenci postrzegani są przez przedsiębiorstwa energetyczne i operatorów systemów – wielkoskalową energetykę paliw kopalnych (WEK-PK) – wyłącznie jako użytkownicy końcowi, nie mających nic do powiedzenia w żadnym aspekcie krajowego systemu elektroenergetycznego (KSE).

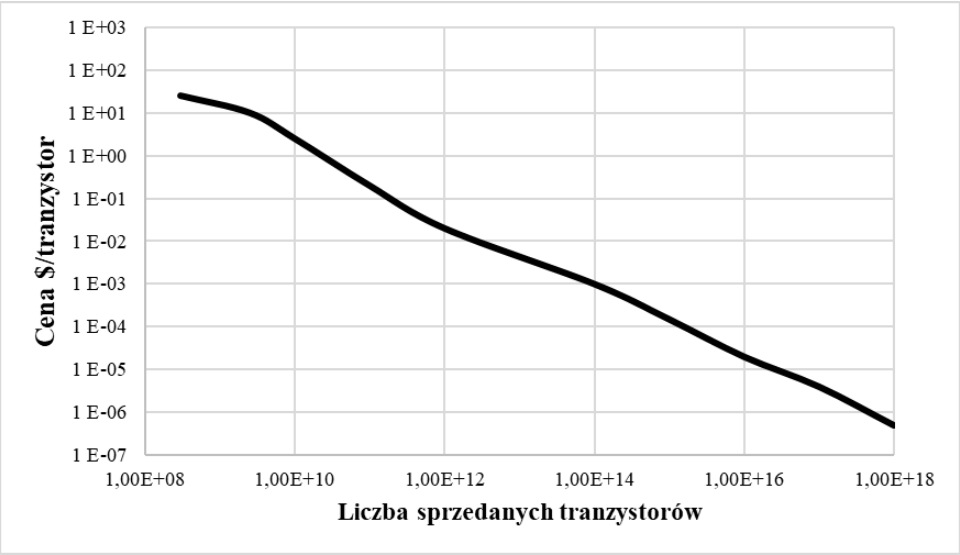
W klasycznych systemach sieciowych energetyki WEK-PK, energia jest produkowana w wielkoskalowych elektrowniach i przesyłana przez sieć przesyłową, a następnie sieć dystrybucyjną do odbiorców. Co ważne, bilansowanie jest zapewniane za pomocą jednostek wytwórczych centralnie dysponowanych (JWCD), a rzeczywisty udział konsumentów w odpowiedzi na dostępność energii ze źródeł odnawialnych, jest marginalny.

Było to spowodowane głównie brakiem możliwości produkowania energii w źródłach rozproszonych, a w okresie późniejszym ich wysoką ceną (początek XXI wieku). Z drugiej strony poprawa sprawności wiązała się z wykorzystaniem efektu skali, czyli budowy coraz większych jednostek wytwórczych. Dla przykładu elektrownie klasy 100 MW, charakteryzują się sprawnością netto wynoszącą około 31 %, klasy 360 MW to 38 %, a w nowoczesnych blokach klasy 1000 MW sprawność przekracza 45 %. Jest to graniczna wartość sprawności, bo

chociaż przez pewien czas trwały pracy nad podniesieniem jej powyżej 50 %, jednak zostały zarzucone, ze względu na brak perspektyw związanych z wykorzystaniem węgla do produkcji energii elektrycznej.

Warto dodać, że dla przykładu źródła PV charakteryzują się znacznie niższymi sprawnościami (rzędu 20 %), jednak w tym przypadku, nie ma to aż tak istotnego znaczenia, ponieważ technologia ta nie zużywa paliw kopalnych, a korzysta z darmowej energii promieniowania słonecznego.

W systemach rozproszonych, w których wykorzystuje się źródła odnawialne, efekt skali ma zdecydowanie mniejsze znacznie. Przyczyna tego związana jest z nieliniowo rosnącymi kosztami wytwarzania podzespołów, a zwłaszcza tranzystorów, które po przekroczeniu pewnego poziomu mocy (zależnego od technologii) szybko rosną. Należy również podkreślić, że duże instalacje źródeł PV zbudowane są z wielu przekształtników, połączonych modułowo w jedną instalację. Moc pojedynczych inwerterów, rzadko przekracza kilkaset kW. W takim przypadku efekt skali (zwiększenie mocy pojedynczych elementów), zastępowany jest przez efekt fabryczny (spadek ceny wraz z liczbą sprzedanych elementów). Bardzo dobrze efekt fabryczny można zaobserwować analizując koszty pojedynczych tranzystorów w systemach mikroprocesorowych [3] w zależności od wolumenu sprzedaży (rys. 1).



Rys. 1. Koszt pojedynczego tranzystora w systemach mikroprocesorowych w zależności od wolumenu sprzedaży – wizualizacja efektu fabrycznego

Należy podkreślić, że efekt fabryczny dla źródeł wielkoskalowych takich jak elektrownie węglowe, czy elektrownie jądrowe nigdy nie będzie miał miejsca, dlatego, że są to technologie, które każdorazowo wymagają odrębnego projektu i dopasowania do lokalnych uwarunkowań, ale przede wszystkim, nie będą budowane w milionach sztuk.

W artykule opisano możliwości integracji rozwiązań w osłonach kontrolnych, które pozwolą na budowanie odporności elektroprosumenckiej w modelu od dołu, od zasobów własnych, jeszcze bez wykorzystania sieci dystrybucyjnej, następnie sieć niskiego napięcia w sołectwach, aż po sieć dosyłową najwyższych napięć łączących planowane elektrownie offshore z aglomeracjami.

2. Rola elektroprosumeryzacji w integracji systemów energetycznych

Propozycja rozwoju w kierunku społeczeństwa wiedzy została zaproponowana przez Jana Popczyka [4], który proponował radykalną przebudowę pojęcia bezpieczeństwa, od jego rozumienia w sensie segmentowym do rozumienia społecznego i bezpieczeństwa indywidualnego człowieka. Profesor zaproponował syntezę energetyki, budownictwa, transportu i rolnictwa oraz środowiska rozpatrywana w powiązaną z rynkami kapitałowymi (tab. 1).

Tab. 1. Propozycja dla Polski: od reform sektorowych do wielkich syntez energetyki, rolnictwa i środowiska [4]

<table>
<tr><td rowspan="5">INTELIGENTNA ENERGETYKA (SMART GRID)</td><td colspan="2">SYNTEZA REFORM</td><td rowspan="5">BIO-TECHNOLOGIE</td></tr>
<tr><td colspan="2">EFEKTYWNOŚĆ ENERGETYCZNA</td></tr>
<tr><td colspan="2">ŚRODOWISKO
w tym: ochrona powietrza, utylizacja odpadów/pozostałości komunalnych, rolniczych, przemysłowych</td></tr>
<tr><td>ENERGETYKA WEK/OZE/URE</td><td>BUDOWNICTWO
w tym: dom zeroenergetyczny</td></tr>
<tr><td>ROLNICTWO
w tym: biogazownie, mikrobiogazownie, biorafinerie</td><td>TRANSPORT
w tym: samochód elektryczny</td></tr>
</table>

Integracja sektorów energetycznych, czyli sektorów energii elektrycznej, ciepła i chłodu, gazu, oraz paliw ciekłych i stałych, pojawia się później w dokumentach Unii Europejskiej (UE), jako sposób na efektywniejsze wykorzystanie zasobów. W proponowanym rozwiązaniu zakłada się, że optymalizacja wszystkich sektorów, przyczyni się efektywniejszego wykorzystania dostępnych zasobów, w porównaniu do optymalizacji każdego sektora z osobna.

Integracja sektorów energetycznych trafia na opór (zwłaszcza w Polsce), co jest zrozumiałe, ponieważ każda ingerencja w silosowość struktur spółek energetycznych może spowodować ograniczenie ich wpływów, zwłaszcza tych z sektorów węglowych.

Potrzebny jest podmiot, który ma doświadczenie w działaniach integrujących społeczności, ale jednocześnie nie kojarzy się jednoznacznie z korporacjami. Tego typu rolę potencjalnie mogą przejąć samorządy. Dlatego w artykule proponuje się integrację rozwiązań technicznych wokół jednostek samorządu terytorialnego (JST). W tym kontekście jest również ważne, że technicznie sieć w dużej części jest powiązana z obszarami miast i gmin. W naturalny sposób tworzą się nie tylko wirtualne osłony kontrolne, ale w znaczącej większości, osłony te będą odwzorowywać istniejącą infrastrukturę sieciową. Pozwoli to znacznie łatwiej bilansować osłony na każdym poziomie napięć.

Należy również podkreślić, że w dokumentach Komisji Europejskiej, poza technologiami OZE, uwzględnia się również technologie wychwytu CO_2, czy technologie atomowe, które są charakterystyczne dla systemów scentralizowanych i nie wpisują się one w elektroprosumeryzm, ze względu na ich gigantyczny wpływ na środowisko rozpatrywane w szerszym aspekcie niż tylko ślad węglowy.

3. Elektroprosumeryzacja Polski za pomocą osłon kontrolnych JST

Budowa odporności elektroprosumenckiej jednostek JST związana jest dążeniem do minimalizacji przepływu energii poza osłonę kontrolną jednostki. Na ile będzie to możliwe do zrealizowania, będzie silnie zależało od wielkości jednostki (im mniejsze tym łatwiej), ale również od dostępnych zasobów, np. w postaci substratów do elektrowni biogazowych.

Można również założyć, że ze względu na różne uwarunkowania, w każdym zbiorze osłon kontrolnych, będą takie, które w mniejszym lub większym zakresie muszą być wspierane. Charakterystyka osłon kontrolnych związanych z jednostkami JST zebrana w tabela 2. Tabela została opracowana w [6], ale zaktualizowana i uzupełniona o roczne potrzeby w elektroprosumeryzmie w przeliczeniu na jednego mieszkańca. Przedstawiona tabela 2, nie zawiera obszaru infrastruktury krytycznej (np. zapotrzebowania przez kolej) oraz przemysłu ciężkiego. Dla tych obszarów szacuje się, że potrzebne będzie około 25 % dostępnej w elektroprosumeryzmie energii. Przedstawione dane obejmują sektor mikro, małych i średnich przedsiębiorstw (MMSP), który jest bardzo trudno wyodrębnić z tkanki miejskiej, przy makroekonomicznym podejściu do analizy danych. Z drugiej strony sektor ten inwestuje we własne zasoby oraz stanowi cześć infrastruktury technicznej na obszarze miast, dlatego jego sztuczne wydzielenie, fałszowałoby rzeczywiste warunki techniczne.

Tab. 2. Charakterystyka osłon kontrolnych jednostek JST – OK(JST) [6]

Segment (elektro-prosumencki)	Napięcie autonomizacji (względem KSE)	Udział w ogólnej liczbie ludności	Udział w rynku energii elektrycznej w elektroprosumeryzmie	Roczne potrzeby w elektroprosu-meryzmie kWh/os	Horyzont neutralności klimatycznej
sołectwo do 1000 mieszkańców, (40 tys. sołectw) **OK(JST1)**	nN	22%	10%	2500	2035
gmina wiejska (1500) **OK(JST2)** i miejsko-wiejska (650) **OK(JST3)**	nN-SN	28%	16%	3100	2040
miasto do 50 tys. mieszkańców (1700) **OK(JST4)**	nN-SN	12%	9%	4300	2040
miasto 50 do 500 tys. mieszkańców (70) **OK(JST5)**	nN-SN-110 kV	18%	16%	4900	2045
aglomeracje powyżej 500 tys. mieszkańców (8 aglomeracji) **OK(JST6)**	nN-SN -110 kV-NN	20%	25%	6200	2050

Tabela 2 stanowi punkt wyjścia do budowania odporności elektroprosumenckiej, określając horyzont transformacji a także napięcie autonomizacji. Napięcie to jest związane z zapotrzebowaniem danej jednostki JST na energię (elektryczną w elektroprosumeryzmie), które wynika z liczby mieszkańców, liczby MMSP, liczby samochodów itd.. Wpływa na nie również możliwość wykorzystania technologii wytwórczych OZE, wynikających z dostępności miejsca pod instalacje OZE, surowców (np. odpadów dla elektrowni biogazowej), i wielu innych [7].

Z każdą jednostką JST powiązana jest więc osłona kontrolna, która w większości przypadków jest osłoną wirtualną, zwłaszcza na wczesnym etapie, gdyż budowa odporności elektroprosumenckiej rozpoczyna się od obiektów własnych. W tendencji integracja mieszkańców np. poprzez wspólnoty mieszkaniowe oraz przemysłu ma większy potencjał optymalizacji zasobów własnych. Wpływają na to m.in. inne profile zapotrzebowania, które mogą się uzupełniać, różny potencjał zarządzania energię i dopasowania własnego zużycia do profilu produkcji źródeł z produkcją wymuszoną, ale także korzystanie z tych samych zasobów technicznych (w tym sieciowych). Nie bez znaczenia są kompetencje techniczne przedsiębiorstw związanych z różnymi sektorami energetycznymi. Wszystko to powoduje, że tworzy się efekt synergii pomiędzy samorządem, mieszkańcami i przedsiębiorcami.

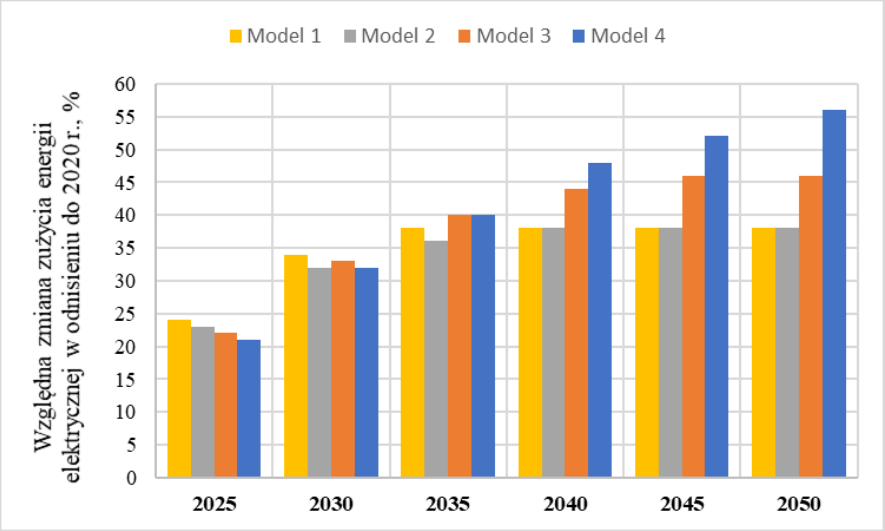
Dla każdej osłony kontrolnej przypisano model pokrycia potrzeb energetycznych w elektroprosumeryzmie zgodnie z lokalnymi uwarunkowania, w tym dostępną powierzchnią, gęstością energii itd.. Z modelami związany jest bezpośrednio struktura bilansowa (miks) źródeł OZE. Struktura ta obejmuje:

- **model 1** – sołectwo (wieś) do 1000 mieszkańców zasilane ze stacji transformatorowej SN/nN, OK(JST1), oraz gmina wiejska, OK(JST2); horyzont pełnej transformacji 2035,
- **model 2** – gmina (miejsko-wiejska), OK(JST3); horyzont pełnej transformacji 2040
- **model 3** – miasto 20-100 tys. mieszkańców OK(JST4), oraz miasto 100-500 tys. mieszkańców, OK(JST5); horyzont pełnej transformacji 2045;
- **model 4** – aglomeracje OK(JST6); horyzont pełnej transformacji 2050;

Dla każdego obszaru analizuje się jedną, referencyjną osłonę kontrolną, którą w kolejnych krokach należy dostosować do lokalnych uwarunkowań.

Uwzględniając założenia z [7] opracowano heurystykę zmian zapotrzebowania na energię elektryczną (rys. 2), która obejmuje zmianę zużycia energii elektrycznej uwzględniającą efektywność energetyczną, ale także wzrost wynikający z przejmowania rynków ciepła (elektryfikacja ciepłownictwa) oraz paliw transportowych (elektryfikacja transportu). Podkreśla się, że osiągnięcie elektroprosumeryzmu w modelu 1 możliwe jest już w roku 2035, natomiast w modelu 4 w horyzoncie 2050.

Wybrane do analizy cztery modele charakteryzują się różnym czasem wykorzystania mocy szczytowej mianowicie: 1° – 2500 h; 2°– 3000 h; 3° – 3500 h; 4° – 6500 h. Czasy te wyznaczono na podstawie rzeczywistych profili wybranych obszarów i mogą się one różnić w określonych przypadkach, w szczególności, jeżeli na obszarach wiejskich istnieje zdecydowanie inna struktura odbiorców (np. duża produkcja rolna, zakłady przetwórstwa rolnego, ...). Takie przypadki należy potraktować indywidualnie, wykorzystując rzeczywiste profile, na podstawie których możliwy będzie dobór struktury miksu wytwórczego.



Rys. 2. Względna zmiana zużycia energii elektrycznej, w odniesieniu do roku 2020, pokrywająca wszystkie potrzeby energetyczne (energii elektrycznej, ciepła, paliw transportowych)

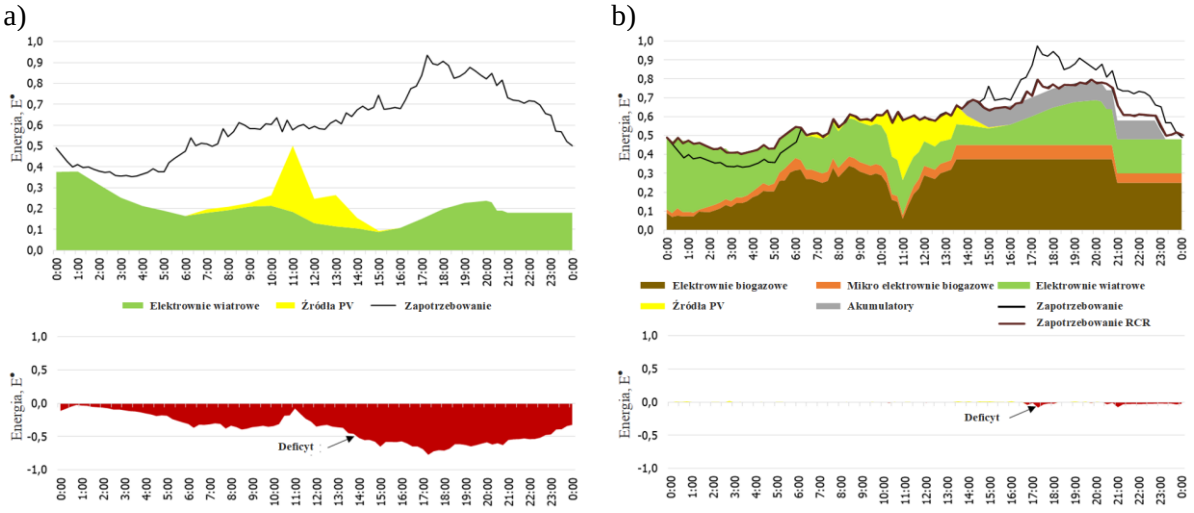
Bazując na referencyjnych trajektoriach zmiany zapotrzebowania, można oblicz miks energetyczny, potrzeby do pokrycia zapotrzebowania na energię elektryczną za pomocą źródeł OZE. Analiza wykorzystywała rzeczywiste profile zapotrzebowania charakterystyczne dla osłon OK(JST) oraz bilansowanie przy założeniu, że roczny deficyt nie przekraczał 1 %. Referencyjna struktura technologii wytwórczych została przedstawiona w tabeli 3.

Tab. 3. Referencyjna struktura technologii wytwórczych

Technologia	Model 1	Model 2	Model 3	Model 4
PV, %	40	40	32	25
µEW, %	5	5	0	2
EWL, %	0	25	38	20
µEB, %	55	10	5	0
EB, %	0	20	25	5
GOZ, %	0	0	0	5
EWM, %	0	0	0	40

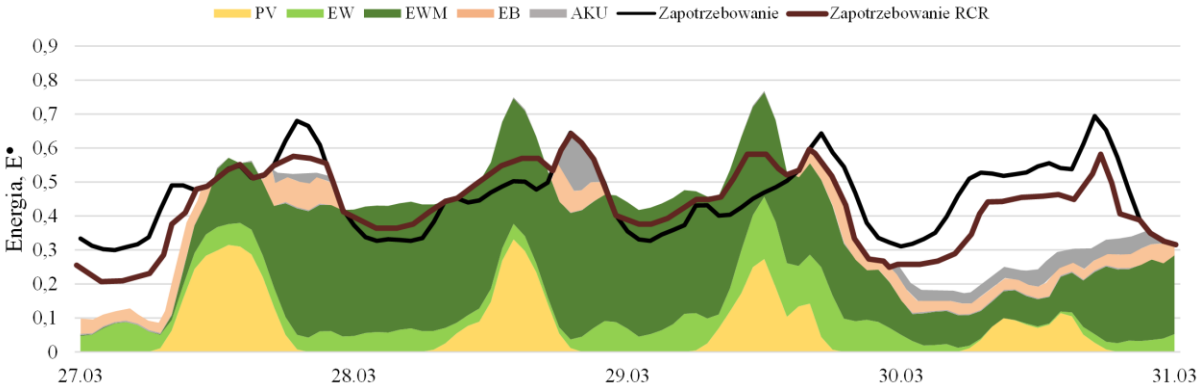
Analiza z wykorzystaniem profili oraz mechanizmów kształtowania profilu (Rynek Czasu Rzeczywistego) pozwala na zbilansowanie każdego z modeli. Co należy podkreślić, bilansowanie to wykorzystuje aktywność elektroprosumentów i reakcję na sygnał cenowy. Ceny w osłonach jedynie ze źródłami OZE będzie wysoka w przypadku deficytów energii, ale rynki pozwolą na samoistne (pod wpływem sygnałów cenowych) ograniczanie deficytu. W prezentowanych analizach dla osłon OK(JST) zakłada się podatność wynoszącą 15 %. Przykładowy bilans energii w dniu z niską produkcją w źródłach z produkcją wymuszoną (18.01) pokazano na rysunku 3. Oczywiste jest, że nie można zbilansować osłony jedynie za pomocą źródeł z produkcją wymuszoną (rys. 3a), ale wykorzystując referencyjny miks

energetyczny (tab. 3) oraz mechanizm kształtowania profili, profil niezbilansowania (deficyt) jest znacznie mniejszy (rys. 3b). Jednak istnieje, ponieważ dopuszczono 1 % niezbilansowanie i dlatego na przedstawiony na rysunku 3 profilu pojawiają się chwile niezbilansowania.



Rys. 3. Bilans energii w dniu niskiej produkcji źródeł wymuszonych (18.01) dla modelu 3 przy wykorzystaniu: a) jedynie źródeł z produkcją wymuszoną (PV, EW); b) referencyjnej struktury technologii wytwórczych oraz akumulatorów i kształtowania profili (RCR)

Złożona podatność wynoszącą 15 %, powoduje, że okresy niezbilansowania istnieją również dla innych osłok OK(JST). Dla przykładu w profilu dla modelu 4 przedstawionego na rysunku 4 pojawiają się chwile niezbilansowania, pomimo wykorzystania kształtowania profilu. Należy podkreślić, że jest to okres największego deficytu, który nie przekracza dodatkowo 15 % zapotrzebowania. Sposób bilansowania dla pozostałych modeli (osłon kontrolnych) jest analogiczny, ale zmienia się struktura źródeł i profili.



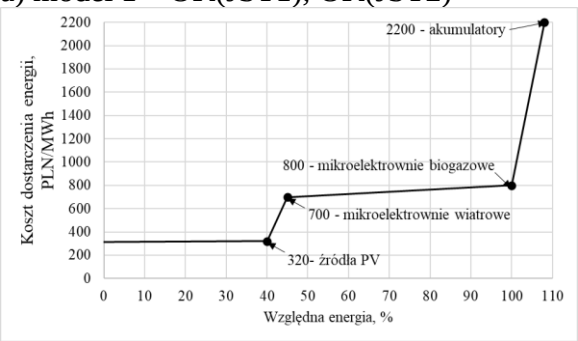
Rys. 4. Pokrycie zapotrzebowania w modelu 4 dla okresu z dniem największego deficytu (30.03)

Dla każdej osłony kontrolnej, oprócz struktury miksu wytwórczego, obliczono koszty krańcowe dostarczania energii elektrycznej oraz średnioroczny koszt energii. Kryzys energetyczny spowodował, że jest to zrozumiała sytuacja, jednak przewiduje się, że koszty ostatecznie znacząco spadną w perspektywie 2025 r (np. nawet dwukrotnie dla energetyki wiatrowej na lądzie). Koszty krańcowe pokrycia potrzeb energetycznych w osłonach

kontrolnych przedstawiono na rysunku 5. Należy podkreślić, że obliczone koszty uwzględniają wdrożenie mechanizmów kształtowania profilu (RCR) i w pilotażowych osłonach ceny mogą być wyższe, ale już, w obecnej sytuacji wygrywają one konkurencję z alternatywą w postaci dostaw z rynku schodzącego.

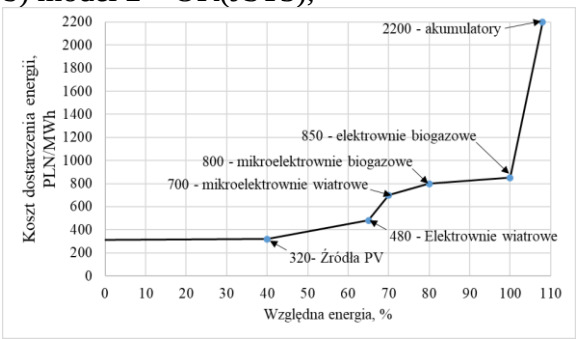
Wykorzystanie różnych technologii potęguje efekt synergii, dlatego osłony kontrolne w których do wytwarzania energii stosuje się wiele technologii charakteryzują się niższymi kosztami.

a) model 1 – OK(JST1), OK(JST2)



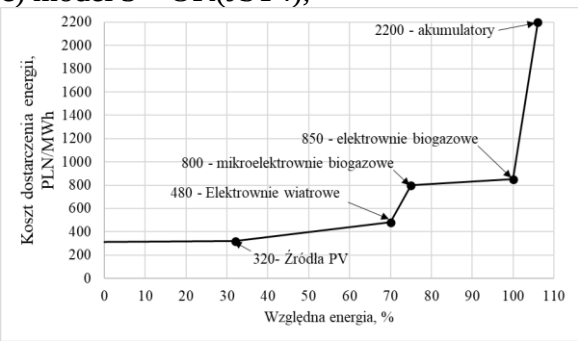
koszt średnioroczny: 780 PLN/MWh

b) model 2 – OK(JST3),



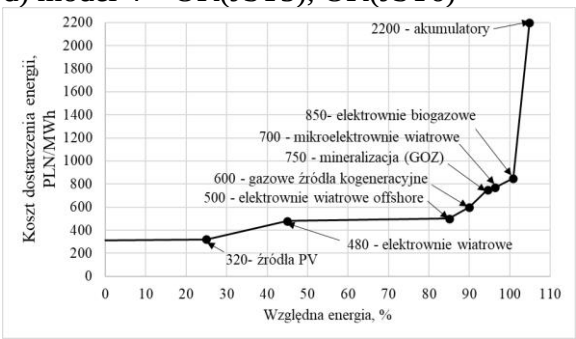
koszt średnioroczny: 710 PLN/MWh

c) model 3 – OK(JST4),



koszt średnioroczny: 670 PLN/MWh

d) model 4 – OK(JST5), OK(JST6)



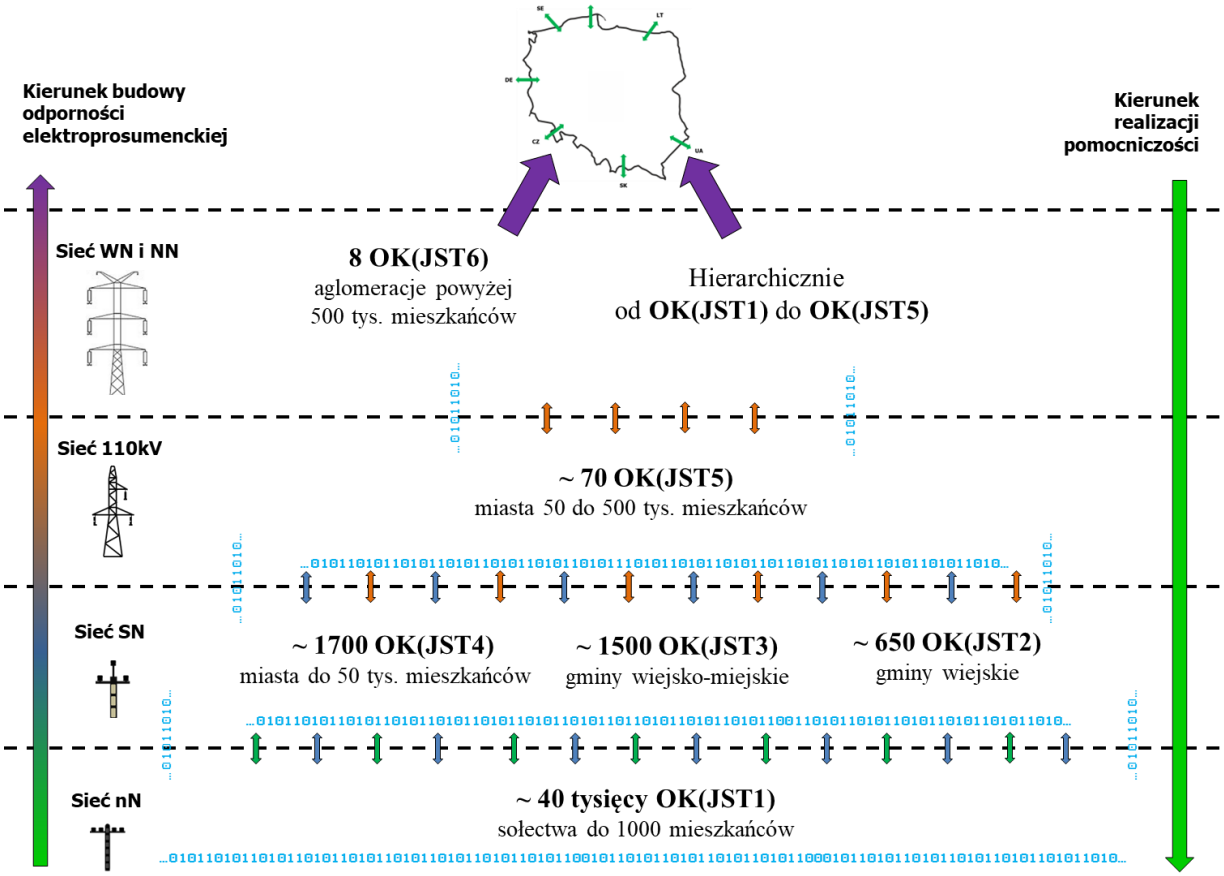
koszt średnioroczny: 580 PLN/MWh

Rys. 5. Aktualne (kwiecień 2023) koszty krańcowe oraz średnioroczny koszt dostaw energii dla osłon kontrolnych OK(JST)

Inicjatywa oddolnej budowy odporności elektroprosumenckiej burzy obecnie pojmowanie systemu elektroenergetycznego. Ponieważ w przypadku własnych inwestycji i bilansowanie energii na niskich poziomach napięć, z sieci jednokierunkowej, zarządzanej centralnie, tworzy się wiele lokalnych osłon kontrolnych (w tym przypadku powiązanych z samorządami) dążących do ograniczania przepływu na zewnątrz osłony. Inaczej, tworzy się sieć hiperzamknięta w miejsce otwartych sieci obecnie. Powoduje to, że podejście do systemu musi się zmienić, bo taki system będzie się charakteryzował zupełnie innymi właściwościami.

W sposób schematyczny elektroprosumeryzacja Polski (trajektoria budowania odporności elektroprosumenckiej) została przedstawiona na rys. 6. Nadanie odbiorcom roli elektroprosumentów i umożliwienie świadomego wykorzystania zasobów własnych powoduje, że bilansowanie przenosi się na poziom niskich napięć. Oznacza to, że przepływ energii na każdej osłonie kontrolnej będzie minimalizowany. Będzie miał miejsce tylko wtedy, jeżeli nie uda się pokryć potrzeb zasobami własnymi. Tworzy się więc na każdej osłonie OK(JST1) profil

niezbilansowania, który może stanowić podstawę do wystawienia i zawierania ofert kupna i sprzedaży, związanych z nadwyżkami i deficytami energii. W przypadku nadwyżek, jeżeli nie energii nie można sprzedać, będzie to impuls to tworzenia zasobów magazynowych, ale w ogólnym przypadku nie stanowią one problemu technicznego (można ograniczyć moc źródeł). W koncepcji należy skupić się na deficytach. Jeżeli wystąpią, to energię można pobrać z osłon wyższego rzędu (z napięć wyższego poziomu) zgodnie z zasadą pomocniczości, czyli przyznanie autonomii np. sołectwom, ale w sytuacji, gdy sołectwo potrzebuje pomocy wspomóc je w zakresie, które nie może zrealizować samodzielnie. W sensie technicznym, problem niezbilansowania się OK(JST1), może przejąć w pewnym zakresie OK(JST2), udostępniając własne zasoby. Należy podkreślić, że takie podejście wymaga zmiany prawa.

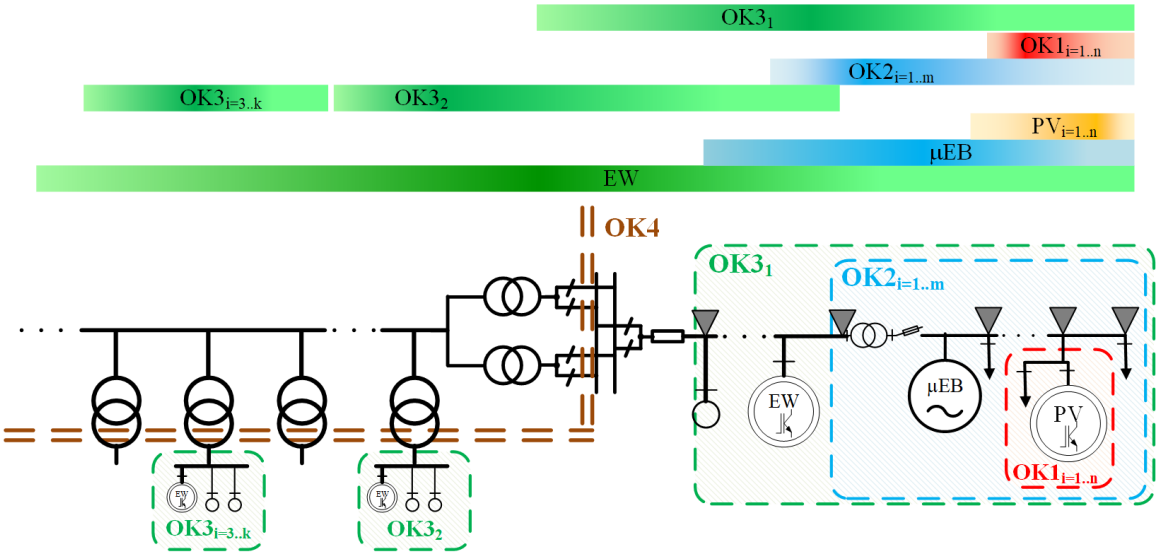


Rys. 6. Schematyczne przedstawienie koncepcji budowania odporności elektroprosumenckiej jednostek JST, z zaznaczeniem napięcia autonomizacji oraz wymiany informacji

Wzajemne oddziaływanie osłon OK(JST) będzie realizowane poprzez handel na osłonach kontrolnych sterowany za pomocą sieciowych terminali dostępowych (STD) [7], na rynkach wschodzących elektroprosumeryzmu [9]. Należy jednak podkreślić, że dąży się do minimalizacji tych przepływów i maksymalizacji wykorzystania zasobów własnych. Jednak rzeczywiste wolumeny handlu będą wynikały z lokalnych uwarunkowań i potrzeb, ale będą również uzależnione od cen na rynku czasu rzeczywistego (RCR). Tego typu handel jest cechą immanentną systemów rozproszonych z lokalnym bilansowaniem energii.

W tym kontekście rozpatrzmy rzeczywiste oddziaływanie rozproszonych źródeł na sieć. Każde źródło oddziałuje na pewien obszar sieci. Obszar ten nazwijmy otoczeniem sieciowym. Rozmiar tego otoczenia zależny jest od dopasowania profili podaży i popytu, przy czym

zmienia się on dynamicznie i wynika ze wzajemnych interakcji ze sobą źródeł, ale również odbiorców. Zakładając, że źródła powinny być tak dobrane, aby ograniczać oddziaływanie na osłonę kontrolną wyższego rzędu, interakcje te można ograniczyć do sieci o poziomie napięcia do której jest przyłączone źródło i niższym. Dla przykładu otoczenie sieciowe elektrowni wiatrowej jest powiązane ze średnim napięciem SN oraz niskim nN, ale źródło PV nie wpływa na sieć SN (rys. 7). W szczególnych przypadkach jest możliwe oddziaływanie źródeł na napięcie na wyższym poziomie, zwłaszcza w przypadku przewymiarowania źródeł. W sposób symboliczny zostało zaznaczone na rysunku dla mikroelektrowni biogazowej, które może oddziaływać również na sieć SN, jak również pojedyncza elektrownia wiatrowa przyłączona do sieci SN w osłonie $OK3_1$, może oddziaływać na inne osłony kontrolne poprzez sieć 110 kV, ale tylko na te, które znajdują się w bezpośrednim sąsiedztwie.



Rys. 7. Wzajemna interakcja otoczenia sieciowego źródeł w osłonie OK3 i niższej

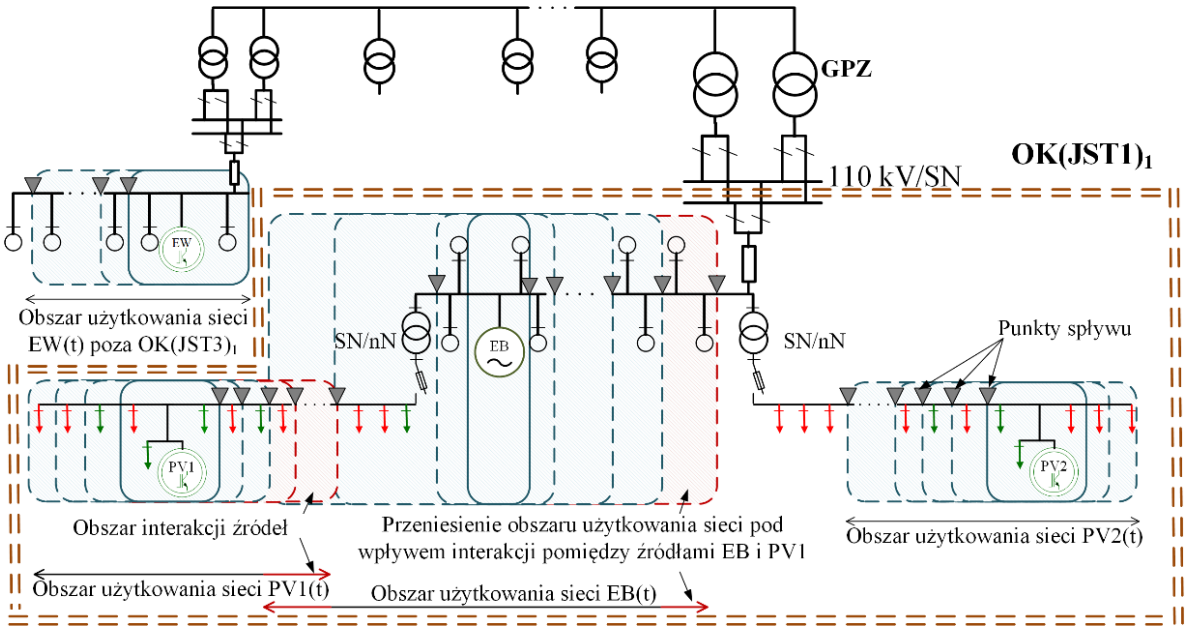
Dla osłony OK2 otoczeniem sieciowym (rys. 7) jest sieć nN i technologie charakterystyczne dla tej sieci tj. źródła PV i µEB. Źródła te, aby ograniczyć potrzebną sieć powinny być dobrane w taki sposób, żeby ograniczyć przepływ energii do sieci SN. Podobna sytuacja występuje dla osłony OK3, z której energia jest przekazywana do osłon o niższym poziomie (OK2, OK1). Produkcja w źródłach, ale również zarządzanie zasobami własnymi elektroprosumentów, a ogólniej przepływy na osłonach kontrolnych, w tendencji będą dążyły do jak największego zbilansowania.

Rzeczywiste wykorzystanie sieci w osłonach kontrolnych OK(JST), wymaga komentarza. W przypadku sołectw – OK(JST1) – wykorzystanie sieci jest ściśle związane z osłoną kontrolną OK2. Dla gminy miejsko-wiejskiej – OK(JST3) – dla której obszar autonomizacji obejmuje sieć nN i SN, struktura rzeczywistego wykorzystania sieci będzie silnie zależała od obecnego sposobu jej zasilania, który można traktować jako punkt startowy w elektroprosumeryzacji. Przykładowa infrastruktura sieciowa, dla OK(JST3), zasilanego obecnie z pojedynczego głównego punktu zasilania (GPZ), pokazano na rysunku 8. Kolorem niebieskim zaznaczono obszar wykorzystania sieci przez źródła oraz punkty spływu, których miejsce zmienia się w czasie i zależy od bilansu profilu zapotrzebowania i produkcji energii. Źródła należące do

OK(JST3) w ogólnym przypadku mogą obejmować swoim otoczeniem sieciowym również odbiorców spoza osłony, zwłaszcza gdy z jednego GPZ-ta zasilane jest kilka osłon.

Kolorem czerwonym zaznaczono obszary interakcji źródeł, mianowicie zasięg oddziaływania źródła PV1 w sieci nN może spowodować przesunięcie punktu spływu źródła EB w sieci SN. Otoczenie sieciowe odnosi się do rzeczywistej sieci nN-SN i fizycznych rozpływów sieciowych energii elektrycznej (u podstaw których są podstawowe prawa elektrotechniki, Ohma i Kirchhoffa).

W aspekcie podmiotowym sieć jest współużytkowana w otoczeniu sieciowym przez wszystkich elektroprosumentów. Samorządy pełnią w tym przypadku funkcje podmiotów odpowiedzialnych za integrację obszarów i zarządzających budowaniem odporności elektroprosumenckiej, zwłaszcza optymalizują wykorzystanie zasobów własnych i możliwości lokalnego bilansowania.



Rys. 8. Wzajemna interakcja otoczenia sieciowego źródeł w osłonie OK3 i niższych

Na podstawie przeprowadzonej wstępnej analizy można postawić hipotezę, że lokalne bilansowanie może być tańsze, zwłaszcza gdy dąży się do racjonalnego doboru źródeł, ale wymaga stworzenia mechanizmów pozwalających na aktywne korzystanie z cenotwórstwa, czyli mechanizmów aktywizujących wszystkich elektroprosumentów, wszystkie jednostki JST.

4. Porównanie funkcjonalności rozwiązań technicznych o różnej wielkości

Tworzenie systemów rozproszonych stało się możliwe, gdy zwiększył się dostęp do tanich źródeł energii, w szczególności źródeł PV. Wymagały one tanich przekształtników pozwalających na konwersję prądu stałego (z modułów PV), na prąd przemienny (sieć). Badania nad tymi technologiami doprowadziły do tego, że obydwa warunki zostały spełnione a energetyka rozproszona moce obecnie nie tylko konkurować, ale już w wielu aspektach przewyższać energetykę oparta na paliwach kopalnych. Wraz z rozwojem podstawowej funkcjonalności przekształtników, zaczęły rozwijać się również funkcjonalności dodatkowe,

które wprowadzają wartość dodaną do instalacji elektroprosumenckich wykorzystujących źródła OZE. W sposób syntetyczny dodatkowe funkcjonalności przekształtników [10] można ująć w ramy następujących funkcji:

- kontrola przepływu,
- kompensacja mocy biernej,
- filtracja wyższych harmonicznych,
- kontrola napięcia w sieciach,
- kontrola częstotliwości,
- łączenie (sprzęganie) sieci.

Warto podkreślić, że wielkość przekształtnika nie ma wpływu na możliwość realizacji funkcjonalności, chociaż jego efektywność będzie ograniczona mocą. Dodatkowo w rozwiązaniach z przekształtnikami istnieje trend preferujący rozwiązania modularne, pozwalające na łączenie wielu przekształtników w sposób umożliwiający ich współpracę a przez to zwiększanie mocy sumarycznej. Trend ten jest doskonale widoczny w rozwiązaniach przekształtników solarnych.

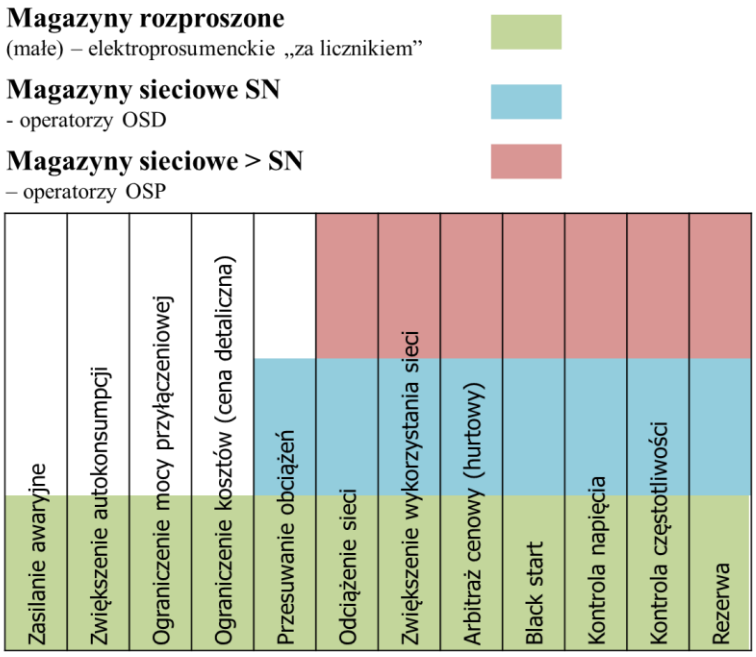
Magazyny energii są kolejnym rozwiązaniem technicznym pozwalającym na zwiększenie odporności elektroprosumenckiej. Instalowane wraz ze źródłami PV pozwalają w skrajnym przypadku na zbudowanie instalacji off grid. Obecnie magazyny energii są jeszcze rozwiązaniami drogimi, ale bardzo szybko się rozwijają. Również magazyny energii wyposażone w przekształtniki pozwalają na realizację tych samych funkcjonalności co w przypadku przekształtników solarnych, ale dodatkowo ze względu na dostępność zmagazynowanej energii mogę również świadczyć dodatkowe funkcjonalności. Do najważniejszych można zaliczyć:

- zasilanie awaryjne,
- zwiększenie współczynnika autokonsumpcji źródeł OZE,
- ograniczenie mocy przyłączeniowej,
- ograniczenie kosztów poprzez arbitraż cenowy,
- realizację przesuwania obciążeń,
- odciążanie sieci,
- zwiększanie wykorzystania sieci,
- kontrolować napięcie i częstotliwość,
- oraz świadczyć usługi Black Startu i rezerwy.

Magazyny energii mogą być przyłączone do sieci na różnym poziomie napięć, z czego dla elektroprosumentów najistotniejsze jest przyłączenie do własnej instalacji „za licznikiem”. W tym przypadku, żeby zrealizować przedstawione funkcjonalności wymagany jest terminal STD, który pozwoli na pełne wykorzystanie potencjału rozproszonych magazynów energii.

W przeciwieństwie do przekształtników powiązanych ze źródłami, funkcjonalności mogą zależą od poziomu napięć przyłączonych magazynów. Oczywiście, jeżeli porównuje się obecne uwarunkowania, w których magazyny przyłączane do sieci SN są zarządzane przez operatorów OSD, a nie są części osłony kontrolnej. Dla przykładu instalacja magazynu energii w sieci SN, nie pozwoli na ograniczenie mocy przyłącza odbiorcy, a magazyny zarządzane przez

operatorów OSP, nie pozwolą na przesuwanie obciążeń. Funkcjonalności instalacji z magazynami energii w zależności od poziomu napięć zostały przedstawione na rys. 9.



Rys. 9. Funkcjonalności instalacji z magazynami energii dla różnych poziomów napięcia

W kontekście rozważania miejsca przyłączenia zarówno źródła PV (z przekształtnikiem), ale również magazynów energii (również z przekształtnikiem), rozpatrzmy koszty tego typu instalacji. W jednym i drugim przypadku mniejszymi kosztami jednostkowymi będą charakteryzowały się instalacje o większej mocy, jednak wpływ na to mają przede wszystkim koszty związane z podatkami, kosztem usług montażowych oraz wyższą marżą przy zakupie mniejszej liczby urządzeń. Koszt modułów i przekształtników jest na zbliżonym poziomie, chociaż instalacje małe (3kW), charakteryzują się wysokim kosztem przekształtnika w porównaniu do pozostałych elementów. Z raportu NREL [11], można wyczytać, że jednostkowy koszt instalacji wielkoskalowej na gruncie (moc 100 MW), koszt instalacji na gruncie dla firmy MSP (200 kW) oraz dla instalacji elektroprosumenckiej na dachu (8 kW) charakteryzuje się stosunkiem 1:2:3 odpowiednio. Przy czym w instalacjach koszt związany z montażem i podatkami wynosi blisko 50 % kosztów instalacji, a dla wielkoskalowych, zaledwie 20 %. Dla warunków polskich stosunek ten jest mniejszy i wynosi 1:1,5:2 odpowiednio, ale w dalszym ciągu instalacje elektroprosumenckie na dachu są droższe.

Sytuacja wygląda jednak zupełnie inaczej, jeżeli spojrzy się na instalację źródła PV, jako inwestycję we własny kapitał (zwiększenie wartości domu) a także, że po poniesieniu kosztów inwestycyjnych energia z własnej instalacji będzie darmowa.

5. Wymiana danych i bezpieczeństwo cyfrowe

Realizacja osłon kontrolnych wymaga oprócz rozwiązań technicznych związanych z produkcją i magazynowaniem energii również systemów zarządzania energią. Systemy te, dla których elementami wykonawczymi mogą być terminale STD, muszą umożliwiać wymianę informacji w czasie rzeczywistym. Przy czym wraz ze zwiększaniem się autonomii osłon kontrolnych

wymagania stawiane systemom informatycznym, zwłaszcza w kontekście redukcji opóźnień w przesyłaniu informacji będą rosły. W tym kontekście tworzeni scentralizowanych systemów informacyjnych takich jak Operator Informacji Rynku Energii (OIRE), nie ma żadnego uzasadnienia w przypadku budowania odporności elektroprosumenckiej od dołu w trybie innowacji przełomowej (TETIP [12]). Jak zaznaczono na rysunku 6 w sposób symboliczny konieczność wymiany informacji jest bardzo istotna na poziomie napięć na którym tworzona jest osłona kontrolna oraz w niewielkim stopniu, ale już jako zagregowane dane, jedynie o profilu niezbilansowania ewentualnie o prognozach profilu.

Do rozliczeń energii w osłonach kontrolnych pomiędzy jej uczestnikami można wykorzystać np. platformę-handlowo techniczną [13], ale dedykowaną dla osłony. Przekazywanie wszystkich informacji centralnemu systemowi rozliczeniowemu, niczemu nie służy, a tylko przyczynia się do zwiększenia entropii informacyjnej, ponieważ wymaga to ogromnych mocy obliczeniowych, pojemności dysków na dane. Systemy dedykowane są pod tym względem znacznie bardziej wydajne, dlatego, że na etapie tworzenia założeń do systemu rozliczeniowego można dopasować zarówno ilość danych oraz czas ich przechowywania w sposób dynamiczny, zależny od lokalnych potrzeb. W tym kontekście warto przytoczyć, że obecnie szacuje się, że na świecie znajdowało się w 2022 roku ponad 94 zeta bajty danych (10^{21}), z czego danych unikalnych było tylko 10 %, reszta to kopie [14].

Odrębną sprawą jest bezpieczeństwo danych. Jako infrastruktura krytyczna, osłony kontrolne wymagają kompleksowych rozwiązań w zakresie bezpieczeństwa cyfrowego. Potrzebna jest kompleksowa architektura komunikacyjna z wbudowanymi systemami bezpieczeństwa, obejmująca tradycyjne schematy takie jak zaufane elementy obliczeniowe czy mechanizmy uwierzytelniania oparte na standardach przemysłowych. Zabezpieczenie infrastruktury komunikacyjnej będzie wymagać zastosowania, najnowocześniejszych protokołów bezpieczeństwa. Podstawowym z nich jest potrzeba spójnego zdefiniowania zestawu wymagań i standardów, ponieważ mogą być one wykorzystywane przez wiele lat.

Poziom zabezpieczeń wielkich centrów danych jest znacznie wyższy od zabezpieczenia lokalnej osłony kontrolnej, jednak potencjalne skutki włamania są diametralnie różne. Warto podkreślić, że w ogromnej większej przypadków zawodzą ludzie, a nie systemy techniczne, co doskonale widać po zorganizowanych akcjach wyłudzania danych, a tylko nielicznych zakończonych sukcesem włamaniach technicznych. Dlatego paradoksalnie ogromna liczba systemów rozproszonych, pomimo słabszych zabezpieczeń zapewnia lepsze bezpieczeństwo, ze względu na możliwe skutki.

6. Weryfikacja możliwości elektroprosumeryzacji jednostek JST

Przedstawione w artykule propozycje elektroprosumeryzacji Polski za pomocą osłon kontrolnych związanych z jednostkami JST są następstwem wieloletniej współpracy autora pod opieką merytoryczną Profesora Jana Popczyka z samorządami. W szczególności realizacją analiz bilansowych pokrycia zapotrzebowania w koncepcji monizmu elektrycznego, a następnie elektroprosumeryzmu. Do najważniejszych należą:

a) Analiza bilansu popytowo-podażowego Klastra ORE (Ostrowski Rynek Energii), wraz z koncepcją jego rozszerzenia na Wielkopolskę Południową; Ostrów Wielkopolski, 2018

b) Współpraca z PWiK (Przedsiębiorstwem Wodociągów i Kanalizacji) w celu określenia możliwości rozwoju źródeł OZE oraz rolą PWiK w klastrze energii ZEK (Zielona Energia Konin) oraz mieście Konin; Konin, 2020
c) Społeczny Terytorialny Plan Sprawiedliwej Transformacji Subregionu Wałbrzyskiego, w którym koncepcja elektroprosumeryzmu jest przedstawiona jako sposób na osiągnięcie neutralności klimatycznej. Na podstawie planu powstał Terytorialny Plan Sprawiedliwej Transformacji, zatwierdzony przez Marszałka Województwa Dolnośląskiego; Wałbrzych, Wrocław, 2021
d) Projekt badawczy nt.: Model energetyczny dla m. st. Warszawy w perspektywie roku 2050 uwzględniający warunki elektroprosumeryzmu (koncepcja modelu – J. Popczyk; wykonawca – Energopomiar wraz z konsorcjalnymi Partnerami, w tym autorem artykułu; dyskusje wyników projektu – XVII Forum Operatorów Systemów i Odbiorców Energii i Paliw; Warszawa – 30 listopada 2022 r.
e) Przedsięwzięcie edukacyjne/szkoleniowe pt.: Przygotowanie specjalistów ds. odporności elektroprosumenckiej JST. Realizowane przez Śląski Związek Gmin i Powiatów oraz Stowarzyszenie Założycielskie Elektroprosumeryzmu (we współpracy z krajowym interdyscyplinarnym środowiskiem profesorskim, przedsiębiorcami MSP oraz NGO-sami). Październik 2021 – marzec 2023.

W tym kontekście warto również przytoczyć autorskie pilotażowe przedsięwzięcie dydaktyczno-naukowe rozpoczęte (kwiecień 2023) przez studentów Politechniki Śląskiej (pod opieką merytoryczną autora) oraz gminami Pawłowice, Gorzyce oraz Miasto Tychy. Inicjatywa dotyczy możliwości osiągnięcia odporności elektroprosumenckiej gmin, weryfikacji dotychczasowych inwestycji ze względu na efektywność energetyczną, a także opracowaniem rozwiązań dopasowanych do lokalnych potrzeb samorządów.

Opisane działania pokazały, że samorządy są zainteresowane elektroprosumeryzacją, a wyniki przedsięwzięć nie pozostawiają wątpliwości, że elektroprosumeryzm jest odpowiedzią na wiele problemów, z którymi się zmagają, a zwłaszcza wysokimi cenami za energię i ograniczonymi możliwościami współpracy z energetyką WEK(PKiEJ), wynikającą z konfliktu interesów.

7. Podsumowanie i wnioski

Do tej pory rola odbiorcy w systemie energetycznym sprowadzała go do użytkownika końcowego, z marginalnym wpływem na system. Jednak rozwój technologii źródeł OZE, magazynów energii oraz systemów teleinformatycznych pozwala na zmianę podejścia do budowania polskiej energetyki. Elektroprosument, z każdego segmentu, nie tylko w rozszerzając definicję obecnie rozumianego prosumenta, ale również sektor MMSP czy samorządy mogą w racjonalnym zakresie ograniczyć wykorzystanie sieci, Tworzy się wiec sytuacja, w której zamiast gigantycznych nakładów na rozbudowę sieci i utrzymanie jednokierunkowego (od wytwórcy do odbiorcy) systemu scentralizowanego, można wykorzystać lokalne zasoby, bilansowanie na każdym poziomie napięć i aktywne uczestnictwo w rynku energii. Zamiast efektu skali, efekt fabryczny.

Efektywne wykorzystanie zasobów wymaga integracji wielu dziedzin i całego obecnego systemu energetycznego, który w wielu aspektach zostanie wygaszony. Proponuje się, że integracja może być prowadzona w osłonach kontrolnych powiązanych z jednostkami samorządu terytorialnego OK(JST) od sołectwa OK(JST1), do Warszawy OK(JST6).

Ponadto powoduje, że możliwa jest obecnie produkcja energii w sposób konkurencyjny w osłonach kontrolnych OK(JST), a co najważniejsze z perspektywą znacznych spadków kosztów inwestycyjnych.

Koncepcja elektroprosumeryzmu, obejmująca dziedzinowe rynki elektroprosumeryzmu, została wielokrotnie zweryfikowana za pomocą analizy modeli pokrycia potrzeb energetycznych, opracowanych w szczególności dla samorządów. Ranking priorytetów pozwalający na skuteczną i efektywną elektroprosumeryzacją Polski w trybie innowacji przełomowej do elektroprosumeryzmu przedstawił Profesor Jan Popczyk w publikacji ELEKTROPROSUMERYZM – czyli więcej niż neutralność klimatyczna, i energetyka [15]. W koncepcji duże znaczenie przypisuje się trajektoriom bilansu w osłonie krajowej OK(PL), które pozwalają na redukcję błędów poznawczych energetyki, a zwłaszcza tego związanego z bezrefleksyjnym podejście do konieczności rozbudowy sieci. Opisane projekty, a zwłaszcza konflikt interesów operatorów OSD oraz jednostek JST, pokazuje, że potrzebne są metody intensyfikacji wykorzystania sieci, poprzez korzystanie z zasobów KSE w środowisku konkurencji na dynamicznej (topologiczno-czasowej) osłonie kontrolnej, uwzględniającej wzajemne interakcje wszystkich elektroprosumenckich technologii wytwórczych, magazynów energii i odbiorników (rys. 8). Konkurencja istnieje pomiędzy rynkiem schodzącym i rynkami wschodzącymi, i przyczynia się do maksymalizacji efektywności wykorzystania sieci. Dlatego, rozbudowę sieci można rozważyć dopiero, gdy intensyfikacja wykorzystania zasobów sieciowych nie pozwala na uzyskanie pożądanego efektu. Rozbudowa taka zawsze powinna być poprzedzona analizą ekonomiczną.

Istnieje potrzeba integracji wielu rozwiązań i wykorzystania mechanizmów zgodnych z przemysłem 4.0, np. tych proponowanych w [16], które pozwolą na efektywne zarządzanie ograniczeniami sieciowymi, za pomocą Sieciowych Terminali Dostępowych uwzględniając dynamiczne ograniczenie wynikające z rzeczywistego wykorzystani sieci (rys. 8). Należy podkreślić, że sieciowy terminal dostępowy jest właściwy dla systemów zarządzania energią elektryczną, ale analogiczne funkcjonalności wystąpią w systemach wykorzystujących źródła odnawialne zasilające węzeł ciepłowniczy z elektrotechnologiami takimi jak pompa ciepła czy kocioł indukcyjny.

Tworzy to nowe obszary związane z użytkowanie energii i elektrotechnologiami, których przykłady zostały również w [16] opisane.

Bibliografia

[1] The Public Utility Regulatory Policies Act (PURPA, Pub. L. 95–617, 92 Stat. 3117, enacted November 9, 1978)

[2] Directive 1996/92 - *Common rules for the internal market in electricity*,, https://www.eumonitor.eu/9353000/1/j9vvik7m1c3gyxp/vitgbghzcayo

[3] R. K. Cavin, P. Lugli and V. V. Zhirnov, "Science and Engineering Beyond Moore's Law," in *Proceedings of the IEEE*, vol. 100, no. Special Centennial Issue, pp. 1720-1749, 13 May 2012, doi: 10.1109/JPROC.2012.2190155.,

[4] Popczyk J.: Energetyka Rozproszona, od dominacji energetyki w gospodarce do zrównoważonego rozwoju, od paliw kopalnych do energii odnawialnej i efektywności energetycznej. Polski Klub Ekologiczny Okręg Mazowiecki, Warszawa 2011.
[5] Komisja Europejska: EU strategy on energy system integration; https://energy.ec.europa.eu/topics/energy-systems-integration/eu-strategy-energy-system-integration_en
[6] Popczyk J., Oddolna budowa odporności elektroprosumenckiej JST w miejsce bezpieczeństwa energetycznego w schodzącej rządowej polityce energetycznej. „Energetyka" 2022, nr 1, Biuletyn PPTE2050 nr 1(5)/2022.
[7] Bodzek K., Modelowanie trajektorii transformacyjnych energetyki do elektroprosumeryzmu w wybranych osłonach kontrolnych. „Energetyka" 2020, nr 7, Biuletyn Rynki Elektroprosumeryzmu Nr 1/2020
[8] Fice M.: *Sieciowy terminal dostępowy – struktura funkcjonalno-technologiczna*, Energetyka" 2022, nr 11, Biuletyn Rynki Elektroprosumeryzmu Nr 1/2020
[9] Popczyk J., Cztery rynki elektroprosumeryzmu – odpowiedź na strukturalny kryzys 2020 (ścianę rodzącą energetyczny przełom), wyzwanie i szansa 2050. „Energetyka" 2020, nr 11, Biuletyn Rynki Elektroprosumeryzmu Nr 1/2020
[10] Bodzek K.: *Funkcjonalności rynku technicznego systemu(WSE) zapewniające dostęp elektroprosumencki do sieci SN/nN operatora sieciowego OSD*, Biuletyn PPTE2050 nr 2(3)/2021, Energetyka nr 7 (805)/2021
[11] The National Renewable Energy Laboratory (NREL): *U.S. Solar Photovoltaic System and Energy Storage Cost Benchmarks, With Minimum Sustainable Price Analysis: Q1 2022 details installed costs for PV and storage systems as of the first quarter (Q1) of 2022,* https://www.nrel.gov/docs/fy22osti/83586.pdf
[12] Popczyk J., *Polski triplet realizacyjny TETIP do elektroprosumeryzmu w perspektywie 2022/2023 na trajektorii do nowego porządku świata*. „Energetyka" 2022, nr 8, Biuletyn PPTE2050 nr 2(6)/2022
[13] Tomasik G., Modliborska J.: Platforma techniczno-handlowa wirtualnego rynku energii elektrycznej – komunikat. „Energetyka" 2022, nr 8, Biuletyn PPTE2050 Nr 2(6)/2022
[14] Portal statista.com: https://www.statista.com/
[15] Popczyk J.: *Elektroprosumeryzm – czyli więcej niż neutralność klimatyczna, i energetyka*. Biuletyn PPTE2050 nr 1(7)/2023, Energetyka nr 4/2023
[16] Konopka K., Konopka Z.: *Elektrotechnologie, Przemysł 4.0 i Elektrociepłownictwo w aspekcie Transformacji Energetycznej w Trybie Innowacji Przełomowej do Elektroprosumeryzmu*. Biuletyn PPTE2050 nr 1(7)/2023, Energetyka nr 4/2023

Materiały na etapie prac redakcyjnych do opublikowania w Biuletynie PPTE2050 nr 1(7)/2023, Energetyka 4/2023