

Krzysztof Rafał, Weronika Radziszewska,
Instytut Maszyn Przepływowych Polskiej Akademii Nauk

Paweł Król, Grzegorz Bazior,
Yonix Digital Systems sp. z o.o.

Paweł Grabowski,
Stay-On Energy Management sp. z o.o.

Model funkcjonowania energetyki rozproszonej w oparciu o blockchain i systemy zarządzania energią

Rozwój energetyki rozproszonej pozwala na tworzenie lokalnych mikrosieci energetycznych z dużym udziałem OZE oraz lokalnych rynków energii. Ich funkcjonowanie zdeteminowane jest z jednej strony przez systemy dedykowane do sterowania rozproszonymi zasobami energetycznymi i magazynami energii, z drugiej zaś strony przez mechanizmy umożliwiające obrót energią w sposób zdecentralizowany.

Poza infrastrukturą silnoprądową funkcjonowanie takich mikrosystemów wymaga istnienia w warstwie technicznej urządzeń i algorytmów do zarządzania energią, pomiaru i archiwizacji jej przepływów oraz metody rozliczania uczestników lokalnego rynku. Systemy ICT pozwolą również w pełni wykorzystać elastyczność oferowaną przez magazyny energii, usługi ładowania po-

jazdów elektrycznych, regulacji popytu i inne. Systemy te, dążąc do zaspokojenia potrzeb energetycznych w ramach mikrosieci, muszą wykonywać złożone operacje związane z prognozowaniem przepływów energii, planowaniem działania jednostek sterowalnych, zawieraniem kontraktów, przechowywaniem danych z urządzeń pomiarowych i ostatecznie prowadzeniem rozliczeń.

■ Sterowanie rozproszonych zasobów energetycznych

Wśród najważniejszych aktorów mikrosieci wymieniane są lokalne źródła, magazyny energii oraz odbiory sterowalne. Jednak tym, co definiuje mikrosieć, jest fakt, że są one sterowane w sposób skoordynowany na poziomie lokalnym.

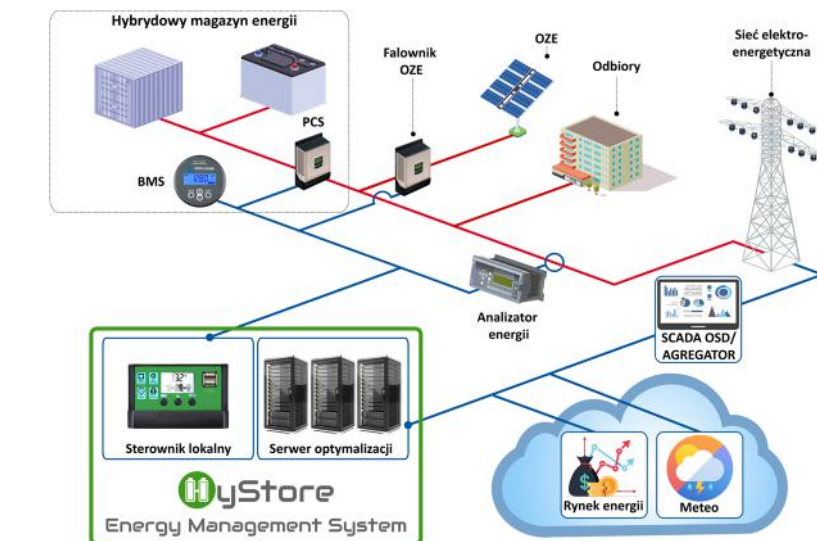
Istnieje zatem dedykowany system zarządzania mikrością lub bardziej ogólnie system zarządzania energią (ang. EMS - *Energy Management System*) realizujący zadania:

- prognostyczne - obliczanie potencjału produkcji z niesterowalnych OZE (fotowoltaika, turbiny wiatrowe) na podstawie danych meteorologicznych wykorzystując predykcję obciążenia z użyciem specjalistycznych algorytmów,
- optymalizacyjne - wyznaczenie harmonogramu pracy jednostek sterowalnych (agregatów, kogeneracji) oraz w szczególności magazynów energii (zarówno centralnych, rozproszonych w instalacjach prosumenckich, jak i samochodów elektrycznych z funkcją V2G),
- agregacji - przejęcie roli technicznego pośrednika pomiędzy indywidualnymi odbiorcami dysponującymi urządzeniami sterowanymi i prosumentami, a operatorem usług regulacji popytu, czy spółkami obrotu,
- monitoringu i archiwizacji danych, w celu późniejszej ich wizualizacji i analizy.

W szczególnych przypadkach zaniku napięcia lub braku dostępu do sieci publicznej mikrości mogą pracować w trybie autonomicznym (wyspowym). Wtedy rolą systemu EMS jest także utrzymywanie parametrów jakościowych energii na wymaganym poziomie oraz kontrola przejść pomiędzy współpracą z siecią, a pracą wyspową. Najczęściej EMS wyznacza w tym wypadku jednostkę nadrzędną (źródło wirujące lub magazyn energii), będącą wzorcem napięcia i częstotliwości.

Celem algorytmu optymalizującego pracę mikrości jest najczęściej minimalizacja kosztu energii (wykorzystywane są w tym celu dane i prognozy z rynków energii), jednak może to także być minimalizacja poziomu emisji, czy minimalizacja wymiany energii z siecią zewnętrzną.

Szczególnym zasobem są magazyny energii, które, bilansując energię z OZE, pozwalają na osiągnięcie wyso-



Rys. 1. Schemat mikrości z systemem zarządzania energią HyStore



Rys. 2. Infrastruktura CB KEZO

kiej samowystarczalności przy niskich poziomach emisji (marginalizacja źródeł bazujących na paliwach). Dobór i sposób sterowania baterii jest także czynnikiem w istotny sposób wpływającym na kształtowanie bilansu energii oraz profilu jej cen dla użytkowników mikrości. Szczególnym typem magazynu energii dopasowanym do specyfiki mikrości jest instalacja hybrydowa, złożona z dwóch lub więcej technologii magazynowania energii pracujących w sposób skoordynowany. Zazwyczaj jeden z nich

posiada dużą moc i odpowiada za stabilizację napięcia i krótkoterminowe bilansowanie sieci. Drugi - posiadając dużą pojemność - bilansuje energię w skali dobowej lub dłuższej. Jednocześnie taki system umożliwi osiągnięcie niższych kosztów jednostkowych energii w cyklu życia w porównaniu do magazynu zbudowanego w jednej technologii.

Sterowanie magazynów energii stawia szczególne wyzwania przed algorytmem zarządzania, który musi brać pod uwagę ograniczenia mocy i ener-

gii w czasie. Ponieważ najczęściej stosowanym typem magazynu są baterie elektrochemiczne, EMS powinien także stosować algorytmy, które minimalizują efekty związane z degradacją ogniw i spadkiem pojemności magazynu w czasie użytkowania.

Przykładem mikrosieci wyposażonej w system EMS jest infrastruktura Centrum Badawczego KEZO Polskiej Akademii Nauk w Jabłonie pod Warszawą. Źródła fotowoltaiczne i wiatrowe są tam bilansowane przez magazyn energii złożony z trzech technologii bateryjnych. Wśród nich pracuje pierwsza w Polsce wanadowa bateria przepływowa. Dzięki współpracy z duńską firmą DEIF oraz rodzimą Stay-On Energy Management został zaimplementowany w mikrosieci system EMS. Zespół badawczy KEZO implementuje w nim oparte na metodach sztucznej inteligencji algorytmy zarządzania optymalizujące pracę magazynu energii.

■ Rozproszona baza danych w energetyce

Blockchain (w tłumaczeniu: łańcuch bloków) charakteryzuje się tym, że każda transakcja zostaje do niego wpisana w bloku, każdy kolejny blok zawiera skrót (ang. *hash*) poprzedniego pliku-bloku, dzięki temu ewentualna manipulacja będzie łatwa w weryfikacji, jeżeli dostępny będzie blok poprzedzający. Kluczową funkcjonalnością jest fakt, że węzły uzgadniają ze sobą transakcje i synchronizują się ze sobą w sposób ciągły, dlatego każda z transakcji jest w sposób niezaprzeczalny zwielokrotniona wiele razy. W takiej sytuacji awaria jednego węzła nie usuwa zapisów. Ograniczone są również skutki ewentualnego ataku hakerskiego. Potencjał technologii blockchain przy zawieraniu transakcji i w rozliczeniach jest dobrze udokumentowany i uznany za obiecujący w energetyce. Rolę węzła w systemie blockchain pełni autonomiczny komputer, w którym zainstalowano odpowiednie oprogramowanie - bazę blockchain. Węzły komunikują się pomiędzy sobą w celu jej aktualizacji.

SŁOWNICZEK - POJĘCIA BLOCKCHAIN

Blockchain - blockchain został opublikowany w 2008 r., aby służyć jako publiczny rejestr transakcji kryptowaluty bitcoin. Podstawowym zastosowaniem blockchain jest archiwizacja informacji w bazie rozproszonej. Jest to przyrostowa baza rekordów, zwanych blokami, które są ze sobą połączone za pomocą kryptografii. Każdy blok zawiera skrót poprzedniego bloku, znacznik czasu i dane transakcji. System zapewnia niezmiennosc danych historycznych.

Hyperledger Iroha - system blockchain ogólnego przeznaczenia, który jest utrzymywany przez firmę Soramitsu w ramach projektu Hyperledger, będącego pod patronatem The Linux Foundation. W systemie można tworzyć własne waluty (ang. *assets*) i agregować dane użytkowników i assetów w domenach o różnym poziomie uprawnień. W przeciwieństwie do kryptowalut blockchain ten jest prywatny. Dostęp do zasobów dostępny jest tylko uprawnionym węzłom.

Węzeł - sieć Iroha składa się z równorzędnych węzłów. Węzły przyjmują transakcje, sprawdzają ich poprawność oraz ustalają między sobą, czy dana transakcja jest zatwierdzana, czy odrzucona. Jeśli zatwierdzona to jest tworzony blok ją zawierający. Z definicji węzły swobodnie komunikują się między sobą.

Klient - Iroha umożliwia wysyłanie poleceń do węzłów, jak i ich odpytywanie. Klienta można napisać przy pomocy bibliotek programistycznych, obecnie wspierane są języki programowania Python, Java, NodeJS. Poza bibliotekami są też dostępne narzędzia umożliwiające komunikację z węzłami bez wiedzy programistycznej (takie jak iroha-cli, czy iroha-tui-client).

Konsensus - technika osiągania porozumienia pomiędzy węzłami sieci utrzymującej blockchain w kwestii akceptacji nowych transakcji wpisywanych do bloków. Iroha obecnie stosuje konsensus Yet Another Consensus (YAC) zapewniający, że nawet jeśli pewna część węzłów nie działa poprawnie to i tak, przy zastosowaniu większości działających węzłów, blockchain nadal będzie działać poprawnie - przyjmować transakcje i odpowiadać na zapytania.

Token - zasób cyfrowy przechowywany w skomputeryzowanej bazie rozproszonej, którym odbywają się transakcje między użytkownikami po podpisaniu.

Klucz publiczny i prywatny - klucz prywatny odblokowuje jego właścicielowi prawo do wydawania powiązanych z nim kryptowalut. Do każdego klucza prywatnego przypisuje się jeden klucz publiczny, którego celem jest umożliwienie kryptograficznego podpisu transakcji z zewnątrz.

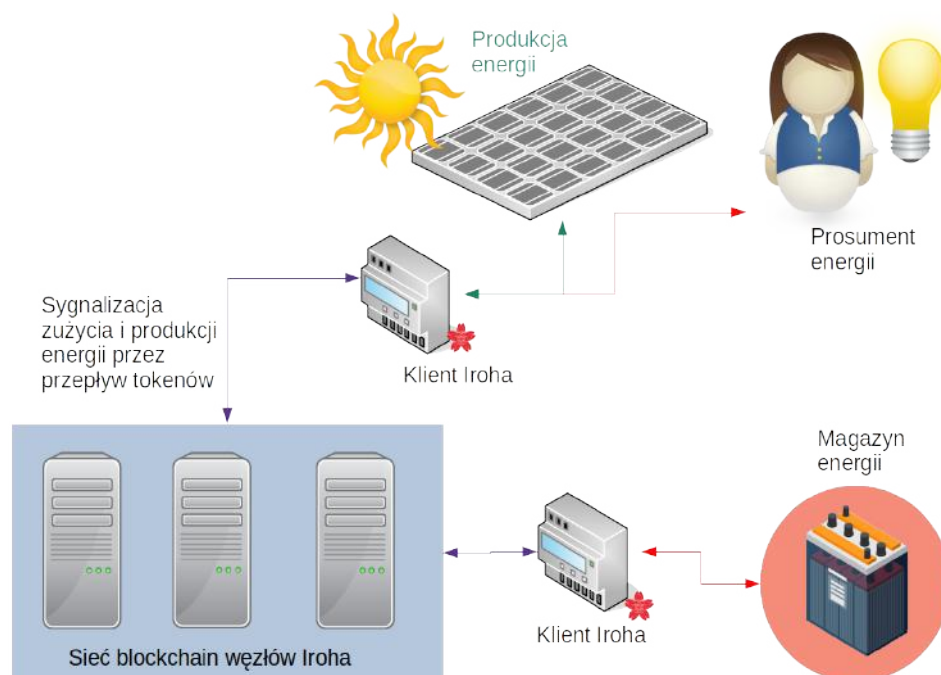
Multisignature - proces podpisu jednej lub wielu powiązanych transakcji wieloma kluczami. Mechanizm może być użyty do stworzenia powiązanych transakcji między różnymi użytkownikami przy pomocy wielu kluczy, posiadanych przez użytkowników. Tak utworzoną transakcję musi podpisać odpowiednia ilość osób, które mogą też ją odrzucić.

Klient blockchain jest zintegrowany bezpośrednio z licznikami energii elektrycznej uczestników lokalnego rynku energii.

W podstawowej koncepcji można wykorzystać sieć blockchain do archiwizowania wymiany energii elektrycznej pomiędzy uczestnikami sieci wewnątrz mikrosieci. Takie rozwiązanie wpisuje

w bazie blockchain kolejne odczyty całkowitego zużycia energii z możliwością uwzględnienia innych parametrów jakości energii (np. moc bierna).

Bardzo perspektywicznym zastosowaniem blockchain w energetyce jest rejestracja cyfrowego zapisu umów. W ten sposób rejestrowane zdarzenia moż-



Rys. 3. Zasada działania systemu blockchain w rozliczaniu zużycia energii

na gromadzić w sposób niepodważalny oraz rozproszony. Możliwe rozwiązania to rejestrowanie umów na zakup-sprzedaż z wyprzedzeniem, zachowanie danych o pochodzeniu energii (certyfikaty pochodzenia elektryczności), itp. Wszystkie transakcje są przechowywane w łańcuchu bloków blockchain w sposób chronologiczny i niepodważalny.

Tak zaprezentowana powyżej transakcja kupna/sprzedaży energii elektrycznej jest zgodna z obecnymi regulacjami prawnymi. Podpis transakcji kluczem prywatnym w sieci blockchain, unikalnie przyporządkowanym podpisującemu, umożliwia ustalenie jego tożsamości. Spełnia zatem warunki zaawansowanego podpisu elektronicznego w Rozporządzeniu eIDAS. Dodatkowo możliwe jest dołączenie do sieci centralnego administratora, którym może być np. administrator klastra. Istnieje również możliwość rozszerzenia danych o kolejne instytucje (np. operatora systemu dystrybucyjnego). Szczególnie warto podkreślić możliwość nadania uprawnień pozyskania danych z blockchain przez systemy informatyczne planowanego

centralnego systemu informacji rynku energii (CSIRE).

■ Działanie systemu planowania i rozliczeń

W pilotażowym projekcie w CB KE-ZO zaproponowano działający w mikro-sieci system, który pozwala na optymalizację działania zasobów energetycznych oraz na zawieranie umów i dokonywanie rozliczeń pomiędzy uczestnikami lokalnego rynku energii. Zastosowano w nim EMS oraz bazę blockchain w technologii Iroha, która jest jednym z projektów pod parasolem Hyperledger i jest obsługiwana przez Linux Foundation i udostępniona, na zasadach open source.

Omawiana implementacja obejmuje zastosowanie blockchain dla lokalnych rynków energetycznych funkcjonujących na zasadach podobnych do rynku dnia następnego. Horyzont czasowy pracy takiego systemu może jednak być różny, typowo będzie wahał się od kilku godzin do kilku dni. W każdym okresie rozliczeniowym będą następowały po sobie kolejne etapy opisane poniżej.

□ Etap 1 - planowanie i negocjacja kontraktów

Pierwszym krokiem jest oszacowanie przez EMS przyszłych bilansów energii w mikro-sieci na podstawie prognoz oraz bieżącego stanu systemu. Posiadając dane o dostępnych magazynach energii, EMS określa potencjalną elastyczność systemu. W kolejnych krokach system dąży do wewnętrznego zbilansowania mikro-sieci. Może się to odbywać na zasadach rynkowych w systemie aukcyjnym, bądź na zasadzie centralnej optymalizacji systemu przez algorytm zaimplementowany w EMS.

W pierwszym przypadku EMS pełni rolę administratora, który dokonuje oszacowania zapotrzebowania na energię w kolejnym okresie rozliczeniowym i otwiera składanie ofert na dostarczenie lub pobranie energii w danym okresie. Algorytm wyboru ofert i wyznaczania cen oraz kar za niedotrzymanie kontraktu musi zostać uprzednio spisany w formie regulaminu wiążącego wszystkie strony lokalnego rynku.

W drugim przypadku, system EMS dokonuje arbitralnie optymalizacji sys-

temu i wyznaczenia profili dla jednostek sterowalnych. Może też generować dodatkowe zachęty do oszczędzania energii w okresach niedoboru. Kontrakty zawierane są w imieniu uczestników rynku automatycznie według algorytmów minimalizujących całkowitą cenę energii w mikro sieci. W tym przypadku nie występują indywidualne kary za niedotrzymanie kontraktu, ewentualne niezbilansowanie rozkłada się w cenie energii na wszystkich użytkowników.

□ Etap 2 - zawarcie kontraktu

Blockchain Hyperledger Iroha posiada funkcjonalność zawierania transakcji podpisywanych przez wiele osób (ang. *multisignature transaction*). Podpisanie umowy odbywa się następująco:

Jedna strona tworzy kilka transakcji w ramach grupy (ang. *batch*), m. in. utworzenie specjalnego konta, które będzie zawierało treść umowy. Tak przygotowane transakcje są wysyłane do sieci blockchain.

Transakcje wysłane przez jedną stronę są widoczne przez drugą stronę jako tzw. transakcja oczekująca. Druga strona taką transakcję może podpisać lub odrzucić.

Uzgodnioną transakcję musi podpisać podmiot z uprawnieniami do tworzenia kont. Jest to już formalność, po podpisaniu której - kontrakt jest wpisany do blockchaina.

Aby zmodyfikować powyższy kontrakt będzie konieczny podpis obydwu stron.

Przy użyciu tego mechanizmu można nie tylko podpisywać umowy na dostawę energii, ale również zawierać np. umowy przyłączeniowe, dystrybucyjne i sprzedażowe, czy zatwierdzać operacje związane np. z wymianą licznika.

□ Etap 3 - rozliczenie kontraktu

Po zamknięciu transakcji następuje okres poboru i dostaw energii. Dane z liczników energii gromadzone są w bazie blockchain. Następuje weryfikacja wypełnienia warunków zawartych w kontraktach, a następnie dokonuje się przepływ tokenów pomiędzy kontami

uczestników rynku. Tokeny mogą posiadać ekwiwalent pieniężny i być wymienne.

■ Wnioski

Opisany schemat systemu bilansowania i rozliczeń w mikro sieci implementowany jest w projekcie prowadzonym w Centrum Badawczym Konwersja Energii i Źródła Odnawialne w Jabłonie.

mentom energii system pozwala lepiej wykorzystywać swoje zasoby poprzez negocjację kontraktów na otwartym rynku. Magazyny energii mogą lepiej wykorzystać swoje zasoby pod kątem bilansowania zmienności dostępnej energii, wykorzystując lokalne różnice cen energii. Jako całość mikrosystem zapewnia także elastyczność, dzięki której można świadczyć dodatkowe usługi regulacji popytu dla podmiotów zewnętrznych.



Rys. 4. Zawarcie kontraktu z podpisem multisignature

nie pod Warszawą wspólnie ze spółkami Yonix Digital Systems oraz Stay-On Energy Management. Pilotaż ten jest wizją funkcjonowania w najbliższej przyszłości mikro sieci opartych na OZE, w których systemy zarządzania energią EMS umożliwiają w sposób automatyczny bilansowanie energii z wykorzystaniem algorytmów predykcyjnych i optymalizacyjnych. Wykorzystanie blockchain do gromadzenia danych oraz tokenizacji energii daje możliwość dokonywania transakcji pomiędzy węzłami, czyli obrót energią symbolizowany wymianą wirtualnych tokenów.

Opisany scenariusz budowy systemu z wykorzystaniem systemu zarządzania energią oraz implementacji Iroha blockchain jest mechanizmem umożliwiającym administratorowi automatyczne kontraktowanie cen na swoim obszarze. Producentom, konsumentom i prosu-

Rozwiązania techniczne umożliwiające realizację tej wizji, funkcjonujące zarówno w strefie wytwarzania i przetwarzania energii, jak i sterowania i prowadzenia rozliczeń, są już dostępne. Kwestią czasu jest spadek cen poszczególnych technologii, który zapewni możliwość zapewnienia lokalnych dostaw energii w cenach konkurencyjnych do energetyki zawodowej, a podobne do opisanego systemu będą zapewniały funkcjonowanie klastrów energii i spółdzielni energetycznych. □

Projekt „System Zarządzania Hybrydowym Magazynem Energii” finansowany przez Narodowe Centrum Badań i Rozwoju w ramach programu Lider X edycja
www.hystore.kezo.pl