

1. Piotr RZEPKA^{1,2}, 2. Mateusz SZABLICKI^{1,2}, 3. Adrian HALINKA¹

Politechnika Śląska, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów (1); PSE Innowacje sp. z o.o.(2)
ORCID: 1. 0000-0002-9365-0277; 2.0000-0002-2357-2250; 3. 0000-0001-9648-0130

doi:10.15199/48.2023.08.01

Technologia Power to Gas jako ważny elementem poprawy stabilność częstotliwościowej SEE w przyszłości

Streszczenie. W ramach niniejszego artykułu przedstawiono kluczowe zagadnienia z punktu widzenia wykorzystania technologii Power to Gas do świadczenia usług regulacji częstotliwości w systemie elektroenergetycznym. Dokonano przeglądu rozwiązań Power to Gas i aktualnego stanu rozwoju oraz scharakteryzowano zdolności techniczne tej technologii w zakresie regulacji poboru mocy czynnej. Umożliwiło to wykazanie, że rozwiązania Power to Gas mogą stanowić środek poprawy stabilności częstotliwościowej systemów elektroenergetycznych w przyszłości.

Abstract. This article presents key issues regarding the use of Power to Gas technology to provide frequency regulation services for the power system. The article contains selected information on technical solutions of Power to Gas, its current state of development, and the technical capabilities of this technology regarding the regulation of active power consumption. As shown in the article, these capabilities could be used to improve the frequency stability of future power systems. (Power to Gas as an important element of improving the frequency stability of the future power system).

Słowa kluczowe: technologia power to gas, elektroliza, regulacji mocy czynnej, stabilność częstotliwościowa.

Keywords: power to gas, electrolysis, active power control, frequency stability.

Wprowadzenie

Technologia Power to Gas (P2G) to ogólna nazwa rozwiązań umożliwiających – w uproszczeniu – przetworzenie energii elektrycznej w paliwa gazowe. W procesie realizowanym za pomocą P2G energia elektryczna jest wykorzystywana do wytworzenia gazu w postaci wodoru lub, w dodatkowym procesie technologicznym, w metanu lub amoniaku [1-4]. Technologia P2G z powodzeniem może być stosowana do wielkoskalowego magazynowania energii, gdyż produkty P2G cechują się wysoką gęstością energii i – co ważniejsze – pozwalają na stosunkowo długi okres ich przechowywania. Dzięki tym właściwościom technologia P2G traktowana jest jako jeden z fundamentalnych środków umożliwiających realizację celów Europejskiego Zielonego Ładu, obejmujących m.in. zbudowanie nowoczesnej, zasobooszczędnej i konkurencyjnej gospodarki, która w 2050 r. ma osiągnąć zerowy poziom emisji gazów cieplarnianych netto.

W zakresie systemu elektroenergetycznego (SEE) technologia P2G traktowana jest jako jeden z kluczowych elementów umożliwiających jego transformację. Istotną rolę może ona odegrać w dwóch obszarach. Pierwszy obszar jest ogólnie rozpoznany w literaturze i obejmuje możliwość magazynowania energii oraz zagospodarowania nadmiaru energii elektrycznej. Generalnie P2G daje możliwość przekształcenia nadmiaru energii elektrycznej wytwarzanej z mniej stabilnych odnawialnych źródeł energii (w okresach ich dostępności) w inne nośniki energii, które mogą być przechowywane i z powrotem zużyte m.in. do produkcji energii elektrycznej (np. w okresach zwiększonego zapotrzebowania). Natomiast drugi obszar potencjalnego zastosowania technologii P2G jest związany z wykorzystaniem tej technologii do poprawy stabilności pracy SEE. Choć obszar ten jest mniej rozpoznany, to wydaje się szczególnie interesujący dla SEE w przyszłości. Przewiduje się znaczące obniżenie stabilności pracy SEE

wraz z postępującym procesem jego transformacji [5]. Do spodziewanych efektów transformacji SEE zalicza się:

- wzrost różnorodności technologicznej jednostek wytwórczych i wycofywanie konwencjonalnych jednostek bazujących na generatorach synchronicznych;
- wzrost udziału obiektów z elementami energoelektronicznymi wrażliwymi na stany przejściowe;
- obniżenie inercji i – tym samym – zwiększenie dynamiki zmian częstotliwości;
- obniżenie mocy zwarciowej – powodujące m.in. głębsze zapady napięć, większą podatność na odkształcenia przebiegu napięcia;
- problemy z właściwą identyfikacją i eliminacją stanów zakłóceń, m.in. wskutek diametralnej zmiany charakteru i dynamiki stanów przejściowych występujących w SEE.

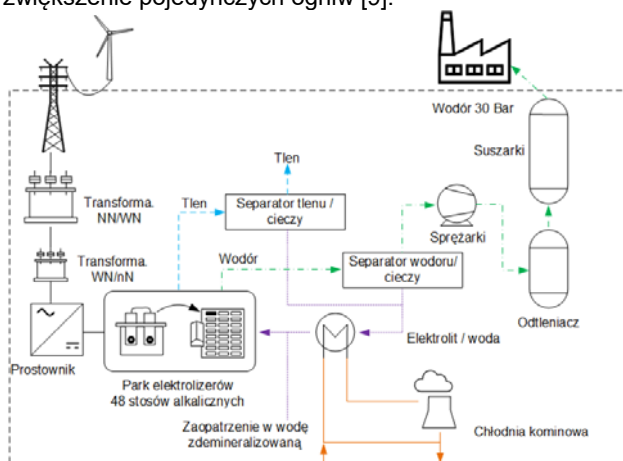
Uwzględniając powyższe oraz analizując plany rozwoju sektora wytwórczego [6], w których dominującą rolę przypisuje się niestabilnym jednostkom wytwórczym w postaci źródeł fotowoltaicznych i wiatrowych oraz źródłom rozproszonym (nieregulowalnym obecnie z poziomu operatora systemowego), przewiduje się wystąpienie istotnych problemów z utrzymaniem właściwego poziomu stabilności SEE. Dlatego kluczowym wyzwaniem operatorów sieci elektroenergetycznej jest identyfikacja i wykorzystanie środków poprawy stabilności SEE. Jednym z takich środków jest technologia P2G, która może mieć istotny wpływ na stabilność częstotliwościową SEE. Prognozy rozwoju tej technologii w Europie przewidują, że moc zainstalowana w P2G może osiągnąć poziom kilkudziesięciu GW [1-4] w okresie kilkunastu lat.

Stanowiło to przesłankę do przeprowadzenia pogłębionej analizy określającej zdolności techniczne P2G oraz identyfikacji możliwej roli tej technologii w zapewnieniu stabilności częstotliwościowej SEE w przyszłości. Podkreśla

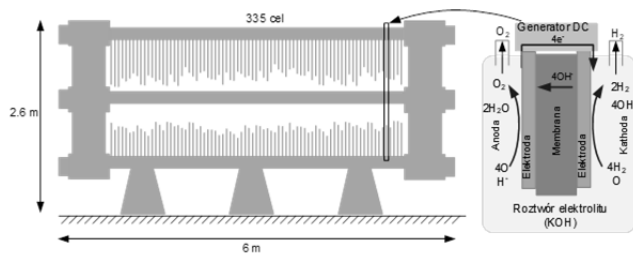
się, że zamieszczone w niniejszym artykule informacje źródłowe pochodzą zarówno z przeglądu publikacji [1-10], jak i z dialogów technicznych prowadzonych w ramach grup roboczych ENTSO-E, których członkami są autorzy (1, 2) artykułu.

Charakterystyka i przegląd rozwiązań Power to Gas

Podstawowym procesem wykorzystywanym w technologii P2G jest konwersja energii elektrycznej na energię chemiczną. Konwersja ta zachodzi w procesie elektrolizy polegającej na rozdzieleniu cząsteczki wody na cząsteczki wodoru i tlenu za pomocą prądu elektrycznego. Strukturę instalacji P2G, obejmującą jej wszystkie podstawowe elementy, przedstawiono na rysunku 1. Kluczowym elementem tej instalacji jest elektrolizer, który składa się z dwóch elektrod (anody i katody) zwykle oddzielonych elektrolitem. W praktyce elektrolizer (rys. 2) składa się ze stosu elementarnych komórek/ogni, w których następuje rozszczepienie cząsteczek wody. Należy podkreślić, że obecnie instalacje wielkoskalowej produkcji wodoru uzyskuje się raczej poprzez zwiększenie liczby elektrolizerów i liczby stosów w elektrolizerze, a nie poprzez zwiększenie pojedynczych ogni [9].



Rys.1. Struktura instalacji P2G – na podstawie [1] i [2]



Rys.2. Elementy składowe elektrolizera AWE – na podstawie [1] i [2]

Elektrolizery stosowane w wielkoskalowym procesie P2G powinny cechować się: wysoką sprawnością, stosunkowo długim czasem życia, możliwością eksploatacji w szerokim zakresie zmian poboru mocy (ze względu na zmienną generację w odnawialnych źródłach energii), niską wartością dopuszczalnego minimalnego obciążenia, możliwością wytwarzania wodoru przy wysokim ciśnieniu (w celu zmniejszenia zapotrzebowania na energię i zminimalizowania kosztów inwestycyjnych układu sprężania wodoru).

Przewiduje się, że do realizacji procesu elektrolizy w wielkoskalowych instalacjach P2G wykorzystywane będą przede wszystkim trzy rozwiązania: elektroliza alkaliczna (AWE, ang. *Alkaline Water Electrolysis*), elektroliza

membranowa (PEM, ang. *Polymer Electrolyte Membrane*) lub elektroliza stałotlenkowa (SOEC, ang. *Solid Oxide Electrolyser Cell*). Do opisu rozwiązań elektrolizerów wykorzystano informacje zawarte m.in. w [1-3, 7-9].

Charakterystyka technologii AWE

Technologia AWE to najbardziej rozwinięte i znane rozwiązanie. Jest komercyjnie dostępne na rynku od dziesięcioleci. W elektrolizerach AWE metalowe elektrody, wykonane z perforowanej stali i pokryte katalizatorem (np. na bazie niklu, kobaltu lub żelaza), zawieszane są w wodnym roztworze elektrolitu o wysokiej przewodności elektrycznej i oddzielone membraną. Membrana ta oddziela tlen od wodoru i umożliwia selektywne odprowadzanie wytwarzanych gazów. Zapobiega to powstawaniu mieszaniny wybuchowej.

Elektroliza AWE może być prowadzona pod ciśnieniem zarówno atmosferycznym, jak i podwyższonym (np. 30 bar). Główną zaletą procesu ciśnieniowego jest mniejszy dodatkowy pobór energii związany z koniecznością sprężenia wodoru wprowadzanego do sieci. Zakres temperatur pracy przemysłowych elektrolizerów AWE to 70÷80°C dla procesu pod ciśnieniem atmosferycznym oraz 90÷100°C dla elektrolizerów ciśnieniowych [9].

Konstrukcja tego typu elektrolizera jest prosta i stosunkowo łatwa w produkcji, dzięki czemu są to rozwiązania wymagające najniższych nakładów inwestycyjnych. Dodatkowo, dzięki zastosowanym ulepszeniom m.in. w strukturze membrany, najnowsze rozwiązania osiągają sprawność 60÷70% [9], co jest sprawnością niewiele niższą od elektrolizerów PEM

Charakterystyka technologii PEM

W porównaniu z elektrolizerami AWE, elektrolizery z membraną polimerową (PEM) to stosunkowo nowa technologia [1-4]. Elektrolitem w tego typu elektrolizerach jest cienka membrana selektywnie przewodząca ładunki elektryczne (protony) między elektrodami, spełniająca zarazem rolę membrany separacyjnej. Membrana jest bezpośrednio połączona z elektrodami pokrytymi katalizatorem a woda dostarczana jest tylko do katody. Temperatura pracy, ze względu na trwałość materiału polimerowego, jest ograniczona do około 80°C. W tego typu rozwiązaniach wodór jest wytwarzany przy dużym ciśnieniu (do 100 bar) [9]. Zaawansowana konstrukcja membrany (zmniejszająca rezystywność przepływu ładunków elektrycznych) oraz zastosowanie wysokiego ciśnienia teoretycznie pozwala na uzyskanie wysokiej wydajności oraz większej sprawności procesu (niż w AWE). W elektrolizerach PEM możliwe jest osiągnięcie sprawności 65÷83% [9]. Sprawność ta jednak zależy od wielu parametrów, takich jak: ciśnienie robocze, temperatura i zakres mocy oraz wiek elektrolizera i liczba przepracowanych roboczogodzin. Ze względu na wysoki poziom korozji technologia ta wymaga zastosowania metali szlachetnych jako katalizatorów (np. irydu na anodę i platyny na katodę). Powoduje to, że nakłady inwestycyjne dla tej technologii są znacząco wyższe, niż w przypadku elektrolizerów AWE.

Charakterystyka technologii SOEC

Trzecie rozwiązanie to tzw. wysokotemperaturowa elektroliza parowa. Elektrolizery SOEC to najnowsze rozwiązanie, będące obecnie jeszcze na etapie badań pilotażowych. Temperatury pracy są bardzo wysokie, powyżej 500°C, niejednokrotnie 850÷1200°C [2]. Jako elektrolit wykorzystuje się membranę ceramiczną (stałą), zazwyczaj wykonaną z tlenku cyrkonu z domieszką tlenku itru. Technologia ta ma istotne zalety. Po pierwsze, elektrolizery SOEC mają możliwość pracy w trybie odwrótnym i mogą zostać wykorzystane m.in. do wytwarzania energii elektrycznej ze zmagazynowanego

wodoru. Po drugie, wysokie temperatury pracy zmniejszają zapotrzebowanie na energię elektryczną potrzebną do rozbitcia cząsteczki wody i zwiększają wydajność urządzenia. Urządzenia te cechują się również wysoką sprawnością systemu, która może przekraczać 80% [1,2]. Należy podkreślić, że SOEC nie jest jeszcze dojrzałą i gotową do wprowadzenia na rynek technologią. Kluczowymi wadami elektrolizerów SOEC są szybka degradacja materiału i jego ograniczona trwałość ze względu na wysokie temperatury pracy [9]. Ponadto na wyjściu z elektrolizera otrzymuje się mieszaninę wodoru oraz pary wodnej, co wymaga dodatkowego procesu filtracji, jednocześnie zwiększając koszty inwestycji. Dodatkowo z uwagi na wrażliwości materiałów ceramicznych oraz bardzo wysoką temperaturę pracy korzystna jest praca ciągła instalacji i niewskazane są operacje wyłączania i ponownego uruchamiania. Koszt elektrolizerów wysokotemperaturowych jest obecnie najwyższy spośród rozpatrywanych z uwagi na stosowane do ich budowy materiały i innowacyjność zastosowanej technologii.

Dokonując ogólnej charakterystyki i przeglądu rozwiązań P2G, należy również uwzględnić spodziewane koszty poszczególnych technologii oraz zakładany czas ich życia (tab. 1).

Tabela 1. Koszty i efektywność instalacji P2G - na podstawie [2,4]

Parametr	AWE	PEM	SOEC
CAPEX w €/kWe – stan obecny	437÷1500 (700)*	613÷2000 (1160)*	2520÷5040 (3083)*
CAPEX w €/kWe – perspektywa 2030 r.	357÷800 (621)*	350÷1350 (663)*	715÷2501% (1706)*
OPEX jako % CAPEX	2%	2÷3%	1÷2.5%
Efektywność – stan obecny	63÷70%	61÷70%	74÷81%
Efektywność – perspektywa 2030 r.	65÷71%	63÷75%	77÷88%
Czas życia, w tys. godz. – stan obecny	60÷75	50÷80	10÷20
Czas życia, w tys. godz. – perspektywa 2030 r.	90÷100	60÷90	40÷60

* Typowe wartości podawane przez DNV-GL/GIE

Z punktu widzenia stosowania poszczególnych technologii, zwykle w instalacjach P2G jest wykorzystywana technologia AWE – ok. 70% instalacji. W pozostałych przypadkach stosuje się technologię PEM, przy czym elektrolizery PEM są stosowane zwykle w niższym zakresie mocy w porównaniu z jednostkami AWE i dopiero pracuje się nad ich wykorzystaniem w instalacjach o większych mocach. Natomiast pierwsze próby zastosowania technologii SOEC dotyczą przede wszystkim projektów pilotażowych realizowanych w krajach Europy Zachodniej.

Koszty inwestycyjne elektrolizerów AWE są niższe niż w przypadku elektrolizerów PEM, a te z kolei są niższe od elektrolizerów SOEC. Przewiduje się, że koszty wszystkich trzech technologii spadną do 2030 r. Szczegółowe zestawienie kosztów tych instalacji przedstawiono w tabeli 1. Koszty operacyjne jako odsetek kosztów instalacji są zasadniczo podobne we wszystkich technologiach i nie przewiduje się, aby zmieniły się istotnie w najbliższym czasie. W tabeli 1 przedstawiono również efektywność (dla znamionowego obciążenia) oraz projektowy czas życia. Obie te wielkości odniesiono do stanu obecnego i perspektyw, jakie się zakłada dla poszczególnych technologii w 2030 r. [2] Generalnie przewiduje się, że w perspektywie długoterminowej żywotność wszystkich technologii wzrośnie.

Dokonując analizy danych zestawionych w tabeli 1, trudno jednoznacznie wskazać lidera. W szczególności

rozwiązania AWE i PEM mają bardzo zbliżone do siebie parametry. Jednak uwzględniając dojrzałość technologii i czas życia, na lidera wyłania się technologia AWE. Ostatecznie kwestią decydującą o rozwoju poszczególnych technologii może okazać się kwestia minimalizacji problemów eksploatacyjnych. Dzisiaj występują one jeszcze we wszystkich technologiach. Przykładowo, w czasie eksploatacji elektrolizerów AWE po 5 latach pracy zauważono m.in. degradację elektrod i membrany separacyjnej, zmniejszenie wydajności, zagrożenia spowodowane użytkowaniem alkalicznego roztworu elektrolitu, problemy z zasilaniem ze źródeł energii powodujących pracę w sposób przerywany i zmienny, takie jak opóźniona reakcja, oraz trudności w ponownym uruchomieniu układu po wyłączeniu. Zmierzona sprawność instalacji była o 20% niższa niż deklarowana przez producenta [9]. Dlatego z uwagi na wysoką korozyjność stosowanych elektrolitów, co 7÷12 lat konieczny jest ogólny przegląd instalacji.

Zdolności techniczne P2G istotne dla stabilności częstotliwościowej

Zdolności techniczne P2G istotne dla stabilności częstotliwościowej SEE to przede wszystkim wypadkowa wielkość mocy znamionowej instalacji (określająca potencjał oddziaływania), dopuszczalny zakres zmienności obciążenia, czas rozruchu, czas wyłączenia oraz dynamika zmiany obciążenia w górę i w dół. Szczegółowe informacje w tym zakresie dla poszczególnych typów elektrolizerów przedstawiono w tabelach 2 i 3.

Tabela 2. Moc poszczególnych elektrolizerów i instalacji P2G – na podstawie [1-4]

Parametr	AWE	PEM	SOEC
Typowa moc elektrolizera – stan obecny	1 MW	1 MW	5 kW
Typowa moc elektrolizera – perspektywa 2030 r.**	10 MW	10 MW	200 kW
Moc instalacji P2G do 2025 r.	200 MW	200 MW	100 MW
Moc instalacji P2G do 2030 r.	1000 MW	1000 MW	---

Tabela 3. Elastyczność instalacji P2G w zakresie regulacji obciążenia - na podstawie [1,2]

Parametr	AWE	PEM	SOEC
Zakres obciążenia* – stan obecny	10÷110%	0÷160%	20÷125%
Zakres obciążenia perspektywa 2050r	5÷300**%	5÷300**%	0÷200**%
Czas rozruchu	1÷10 min	1 s + 5 min	< 60 min
Czas wyłączenia	1÷10 min	1 s + 5 min	< 60 min
Dynamika zmiany obciążenia w górę i w dół	0,2 + 20% / s	0,2 + 20% / s	Kilkusekundowy czas reakcji

* Zakres obciążenia odniesiony do obciążenia znamionowego.

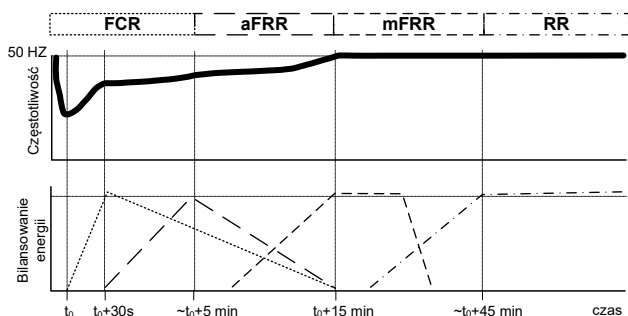
** Stan przeciążenia może być utrzymywany przez ograniczony czas - wymaga zastosowania przewymiarowanego sprzętu.

Dokonując analizy danych zawartych w tabeli 2 oraz w literaturze [1-4], stwierdza się, że moce pojedynczych elektrolizerów AWE i PEM są podobne. Przewiduje się, że w najbliższym czasie rozmiary pojedynczych elektrolizerów wzrosną oraz gwałtownie wzrośnie liczba elektrolizerów integrowanych w ramach jednej wielkoskalowej instalacji P2G. W przypadku obydwu wymienionych technologii, do 2025 r. spodziewane są instalacje wielkoskalowe sięgające

poziomu 200 MW a do 2030 r. mogą pojawić się instalacje P2G sięgające lub nawet przekraczające moc 1 GW.

Natomiast uwzględniając dane zawarte w tabeli 3 i odnosząc je do parametrów typowych usług częstotliwościowych przedstawionych na rysunku 3, można stwierdzić, że technologia P2G wykazuje bardzo dobre własności z punktu widzenia zdolności regulacyjnych dla potrzeb utrzymania stabilnej częstotliwości. Pobór energii przez P2G może być regulowany w bardzo szerokim zakresie z dużą dynamiką, która jest odpowiednia dla świadczenia praktycznie wszystkich systemowych usług częstotliwościowych. Wyjątkiem w tym zakresie są elektrolizery SOEC, które pomimo ogromnej zalety, jaką jest ich dwukierunkowość, cechują się pewnymi ograniczonymi zdolnościami technicznymi w tym zakresie. Zalicza się do nich ograniczone możliwości pracy przy obciążeniu poniżej 20% wartości nominalnej, stosunkowo długi (około godziny) czas włączania i wyłączania oraz brak możliwości częstych włączeń i wyłączeń tej instalacji, co przy uwzględnieniu niestabilności generacji w odnawialnych źródłach energii (źródła fotowoltaiczne i źródła wiatrowe) w pewnych rozwiązaniach może być istotną wadą.

Skupiając się jednak na ocenie dostępnych komercyjnie technologii, elektrolizery PEM wykazują lepszą płynność uruchomienia oraz szerszy zakres operacyjny (od 0 do 100% mocy znamionowej) niż elektrolizery AWE. Wynika to m.in. z struktury instalacji PEM, która cechuje się potrzebą zastosowania prostszych elementów wyposażenia pomocniczego niż w AWE, gdyż w elektrolizerze PEM nie stosuje się obiegu ciekłego elektrolitu, co ma również wpływ na wysoką czystość wytwarzanego wodoru. Zaletą elektrolizerów PEM jest również bezpieczny elektrolit, który w razie wycieku nie stwarza zagrożenia dla środowiska naturalnego. Inne problemy techniczne związane z eksploatacją elektrolizerów typu PEM dotyczą zamarzania membrany w zimie oraz stosunkowo szybko postępujących procesów starzeniowych.



Rys.3. Kluczowe parametry czasowe usług częstotliwościowych dla SEE w zakresie odbudowy częstotliwości: rezerwa utrzymania częstotliwości (FCR, ang. *frequency containment reserve*), automatyczna rezerwa odbudowy częstotliwości (aFRR, ang. *frequency restoration reserves with automatic activation*), ręcznie aktywowana rezerwa odbudowy częstotliwości (mFRR, ang. *frequency restoration reserves with manual activation*), rezerwa zastępcza (RR, ang. *replacement reserves*) [10]

Należy podkreślić, że przedstawione zdolności techniczne technologii P2G są oparte na aktualnej wiedzy i doświadczeniach eksploatacyjnych. Uwzględniając szeroko zakrojone prace badawczo-rozwojowe w zakresie P2G, które w ostatnim okresie zostały bardzo mocno zintensyfikowane przez światowych liderów technologii elektroenergetycznych, należy spodziewać się dalszej poprawy wydajności i niezawodności tych instalacji.

Podsumowanie i wnioski

W niniejszym artykule wskazano rolę, jaką mogą odgrywać elektrolizery, nie tylko jako elementy procesu magazynowania energii elektrycznej, ale także w zapewnieniu większej elastyczności i stabilności pracy SEE. Postępująca transformacja SEE stawia wyjątkowe wyzwania w tym zakresie i wymaga istotnych zmian w zasadach zarządzania jego pracą, co determinuje potrzebę dynamicznego rozwoju środków poprawy stabilności, tym stabilności częstotliwościowej.

Środki te powinny obejmować również dotychczas niewykorzystywane obszary, do których należy m.in. dynamiczne zarządzanie popytem, np. przez odpowiednieysterowanie poboru mocy przez P2G. Przykładowo, w sytuacji wystąpienia zaburzenia powodującego dynamiczne zmiany częstotliwości, szybkie ograniczenie lub wzrost poboru mocy w wielkoskalowych instalacjach P2G, będzie mieć podobne oddziaływanie jak regulacja pierwotna w dużych jednostkach wytwórczych.

Uzyskane wyniki analizy zdolności technicznych P2G w zakresie sterowania poborem mocy czynnej jednoznacznie wskazują, że instalacje P2G są wdzięcznymi technologiami pod względem zakresu i dynamiki regulacji mocy w SEE. Od strony technicznej technologia ta jest w stanie dostarczać szeroką gamę usług systemowych związanych ze wsparciem stabilności częstotliwościowej oraz z zarządzaniem ograniczeniami sieciowymi. Dlatego rekomenduje się uwzględnienie rozwiązań P2G jako środka regulacyjnego w działaniach utrzymania stabilności częstotliwościowej SEE. W praktyce można to zrealizować dwoma drogami: na drodze realizacji określonych usług systemowych związanych z regulacją częstotliwości oraz na drodze legislacyjnej poprzez wprowadzenie wymagań określających zdolności techniczne regulacji poboru mocy czynnej, jakimi powinny się cechować technologie P2G. Należy podkreślić, że wprowadzenie tego typu wymagań nie powinno wygenerować wzrostu nakładów inwestycyjnych, gdyż nie identyfikuje się istotnych zmian w procesie technologicznym i zarazem w strukturze instalacji P2G.

Sformułowane wnioski mają szczególne znaczenie w obliczu prognoz dotyczących kierunków transformacji SEE, gdzie coraz ważniejsza staje się kwestia elastycznego zarządzania popytem na energię elektryczną. Jest to determinowane m.in. coraz większą dynamiką zmian generacji energii elektrycznej (podyktowaną rosnącym udziałem niestabilnych i – niejednokrotnie niesterowalnych – źródeł w sektorze wytwórczym), przy ciągle niewielkich możliwościach wielkoskalowego magazynowania energii elektrycznej. Wskazuje się, że potrzeba dynamicznego zarządzania popytem (także podażą) na energię elektryczną m.in. dla celów poprawy stabilności SEE staje się coraz bardziej istotna z uwagi na rosnące społeczne i gospodarcze „uzależnienie” od energii elektrycznej. Jednym z rozwiązań technicznych umożliwiających wsparcie tego procesu dynamicznego zarządzania może być technologia P2G.

Autorzy: dr. inż. Piotr Rzepka, dr inż. Mateusz Szabliski, prof. dr hab. inż. Adrian Halinka, Politechnika Śląska, Wydział Elektryczny, Katedra Elektroenergetyki i Sterowania Układów, ul. Bolesława Krzywoustego 2, 44-100 Gliwice, E-mail: piotr.rzepka@polsl.pl.

LITERATURA

- [1] Raport: Hydrohub Innovation Program pt. A One-GigaWatt Green-Hydrogen Plant. Dostęp on-line: <https://ispt.eu/media/Public-report-gigawatt-advanced-green-electrolyser-design.pdf>
- [2] Raport ENTSO-E pt. Potential of P2H₂ technologies to provide system services. Dostęp on-line: <https://www.entsoe.eu/>

- 2022/06/28/entso-e-publishes-a-study-on-flexibility-from-power-to-hydrogen-p2h2/
- [3] Raport IEA pt. The future of hydrogen. Dostęp on-line: https://iea.blob.core.windows.net/assets/9e3a3493-b9a6-4b7d-b499-7ca48e357561/The_Future_of_Hydrogen.pdf
- [4] Raport DNV pt.: Study on the Import of Liquid Renewable Energy Technology Cost Assessment. Dostęp on-line: https://www.gie.eu/wp-content/uploads/filr/2598/DNV-GL_Study-GLE-Technologies-and-costs-analysis-on-imports-of-liquid-renewable-energy.pdf
- [5] Szablicki M., Rzepka P., Halinka A., Sowa P., Diagnosis of challenges for power system protection – selected aspects of transformation of power systems, *Modern Electric Power Systems 2019 (MEPS)*, 1-5
- [6] Raport pt. The Ten-Year Network Development Plan – Analiza potrzeb systemu europejskiego. Dostęp on-line: www.entsoe.eu/publications/tyndp (08.05.2023 r.)
- [7] Matute G., Yusta J. M., Correas L.C.: Techno-economic modelling of water electrolyzers in the range of several MW to provide grid services while generating hydrogen for different applications: A case study in Spain applied to mobility with FCEVs. Elsevier ScienceDirect Dostęp on-line: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S0360319919319482>
- [8] Alshehri F., Soares V., Rueda J., Perilla A., Meijden M.: Modelling and evaluation of PEM hydrogen technologies for frequency ancillary services in future multi-energy sustainable power system. Elsevier Helion Dostęp on-line: <https://www.sciencedirect.com/science/article/pii/S2405844018367471>
- [9] Piskowska-Wasiak J. Doświadczenia i perspektywy procesu Power to Gas. Instytut Nafty i Gazu – *Państwowy Instytut Badawczy*, ROK LXXIII, Nr 8 / 2017 DOI: 10.18668/NG.2017.08.07
- [10] Raport ENTSO-E pt. European Electricity Balancing Guideline. Dostęp on-line: <https://docstore.entsoe.eu>