

ANALIZA DZIAŁANIA GENERATORA WODORU PRACUJĄCEGO W ŚRODOWISKU ALKALICZNYM

Autorzy: Janusz Kotowicz, Michał Jurczyk, Daniel Węcel

(„Rynek Energii” – 3/2019)

Słowa kluczowe: magazynowanie energii, wodór, generator wodoru, elektroliza wody

Streszczenie. W artykule przedstawiono analizę działania generatora wodoru pracującego w środowisku alkalicznym wyposażonego w dwa elektrolizery typu AEM. W ramach przeprowadzonych badań wyznaczono charakterystyki sprawności, energochłonności oraz współczynnika potrzeb własnych badanego generatora wodoru. Zaprezentowane w artykule charakterystyki zostały wykonane dla pełnego zakresu działania testowanego generatora. Zbadanie tego typu urządzenia w pełnym zakresie pracy jest niezbędne przy określeniu możliwości zasilania generatorów wodoru ze źródeł charakteryzujących się zmienną ilością wytwarzanej energii elektrycznej, a więc głównie pochodzącej z instalacji odnawialnych źródeł energii, w ramach współpracy z instalacjami typu Power to Gas czy też Power to Gas to Power.

1. WPROWADZENIE

Proces elektrolizy wody to podstawowe rozwiązanie technologiczne stosowane w przypadku wykorzystania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł energii (OZE) do wytwarzania wodoru. Proces ten nie wymaga użycia zasobów paliw nieodnawialnych, a energia elektryczna niezbędna do przebiegu reakcji może pochodzić z nadwyżek energii w sieci elektroenergetycznej lub bezpośrednio z instalacji odnawialnych źródeł energii [1].

Instalacje wykorzystujące jako nośnik energii wytworzony w procesie elektrolizy wodór, są obecnie często brane pod uwagę jako systemy umożliwiające magazynowanie energii pochodzącej z elektrowni wiatrowych i instalacji fotowoltaicznych, a także jako układy mogące stanowić alternatywę dla obecnie powszechnie stosowanych metod magazynowania energii. Potrzeba dalszego rozwoju technologii związanych z procesami magazynowania energii uwarunkowana jest ciągłym wzrostem udziału OZE w produkcji energii elektrycznej w ramach systemów energetycznych. Obecne zmiany mocy w krajowym systemie elektroenergetycznym (KSE) powstające w wyniku współpracy systemów energetycznych z instalacjami OZE, takimi jak farmy wiatrowe i elektrownie fotowoltaiczne charakteryzującymi się zmienną ilością wytwarzanej energii elektrycznej zależnej w dużej mierze od panujących warunków atmosferycznych oraz ze zmiennej aktywności odbiorców energii elektrycznej w ciągu doby, są kompensowane przez istniejące elementy sieci. Dalsze zwiększanie mocy zainstalowanej w instalacjach OZE może jednak niekorzystnie wpłynąć na stabilność systemów energetycznych, co w konsekwencji prowadzi do konieczności wykorzystania nowych układów magazynowania energii jak i wymusza potrzebę stosowania innowacyjnych rozwiązań technologicznych zapewniających lepszą elastyczność sieci elektroenergetycznej [2].

2. MAGAZYNOWANIE ENERGII

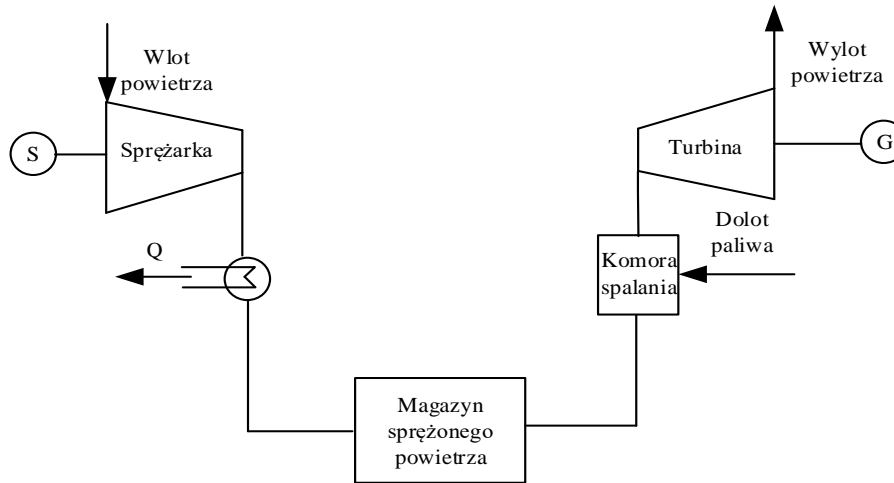
Podstawową rolą instalacji magazynowania energii jest gromadzenie i przechowywanie nadwyżek energii elektrycznej w czasie jej nadmiaru w systemach elektroenergetycznych. Zmagazynowana energia może zostać oddana do sieci, kiedy bieżące zużycie energii elektrycznej jest wyższe od jej produkcji. Przy odpowiednim wykorzystaniu możliwości instalacji zaprojektowanych do magazynowania nadwyżek energii, ilość energii elektrycznej generowanej przez źródła konwencjonalne nie musi być dostosowana do konkretnego zapotrzebowania. Umożliwia to efektywne wykorzystanie w ramach systemów elektroenergetycznych, zarówno elektrowni konwencjonalnych charakteryzujących się ograniczoną elastycznością regulacji, jak i instalacji odnawialnych źródeł energii. Pośród technologii magazynowania energii można wyróżnić m.in.:

- elektrownie szczytowo-pompowe,
- elektrownie CAES (*ang. Compressed Air Energy Storage*),
- układy wykorzystujące wodór jako nośnik energii,
- akumulatory,
- superkondensatory,
- koła zamachowe.

Instalacje szczytowo-pompowe to powszechnie wykorzystywane rozwiązanie do magazynowania nadwyżek energii pojawiających się w sieci elektroenergetycznej. Podstawą działania tych układów jest wykorzystanie nadwyżek energii z sieci do przepompowania wody ze zbiornika dolnego do zbiornika górnego instalacji. Z kolei podczas występowania niedoboru energii elektrycznej w sieci woda przepływa ze zbiornika górnego do dolnego. Podczas tego zabiegu następuje proces wytwarzania energii elektrycznej. Elektrownie szczytowo-pompowe charakteryzują się sprawnością sięgającą 85% oraz żywotnością wynoszącą 40 lat [3-5].

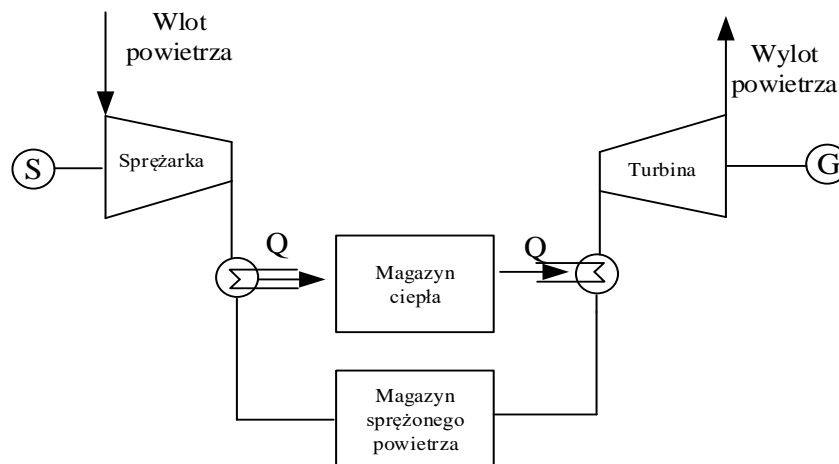
Obecnie liczne prowadzone badania naukowe dotyczą rozwoju technologii CAES. Technologia ta polega na akumulacji nadwyżek energii elektrycznej w postaci energii potencjalnej sprężonego powietrza. Energia elektryczna niezbędna do napędu sprężarek, odpowiedzialnych za proces kompresji powietrza atmosferycznego, może pochodzić z nocnych dolin zapotrzebowania na energię w sieci lub bezpośrednio z instalacji odnawialnych źródeł energii. W trakcie procesu sprężania następuje przemiana energii elektrycznej w energię potencjalną sprężonego powietrza. Odwrócenie kierunku przemiany uzyskuje się poprzez ekspansję zmagazynowanego gazu do ciśnienia otoczenia na turbinie [6]. Najbardziej popularne rozwiązania dotyczą diabatyčných oraz adiabatycznych elektrowni CAES [7,8]. Instalacje diabatyčné wykorzystują energię chemiczną dodatkowego paliwa (najczęściej gazu ziemnego). Paliwo spalane jest w komorze spalania w celu podgrzania powietrza dolotowego do ekspandera. Natomiast ciepło pobrane podczas kompresji gazu w instalacjach diabatyčných jest tracone do otoczenia. Z kolei układy adiabatyczne wykorzystują ciepło powstałe w trakcie procesu sprężania powietrza na etapie napełniania instalacji. Ciepło może zostać wykorzystane do podnie-

sienia temperatury gazu przed procesem ekspansji. Rozwiązanie to pozwala na uniknięcie potrzeby wykorzystania w obrębie instalacji dodatkowego paliwa dostarczanego do komory spalania. Schemat diabatyckiej elektrowni CAES przedstawiono na rysunku 1, natomiast schemat adiabatyckiej instalacji CAES zaprezentowano na rysunku 2.

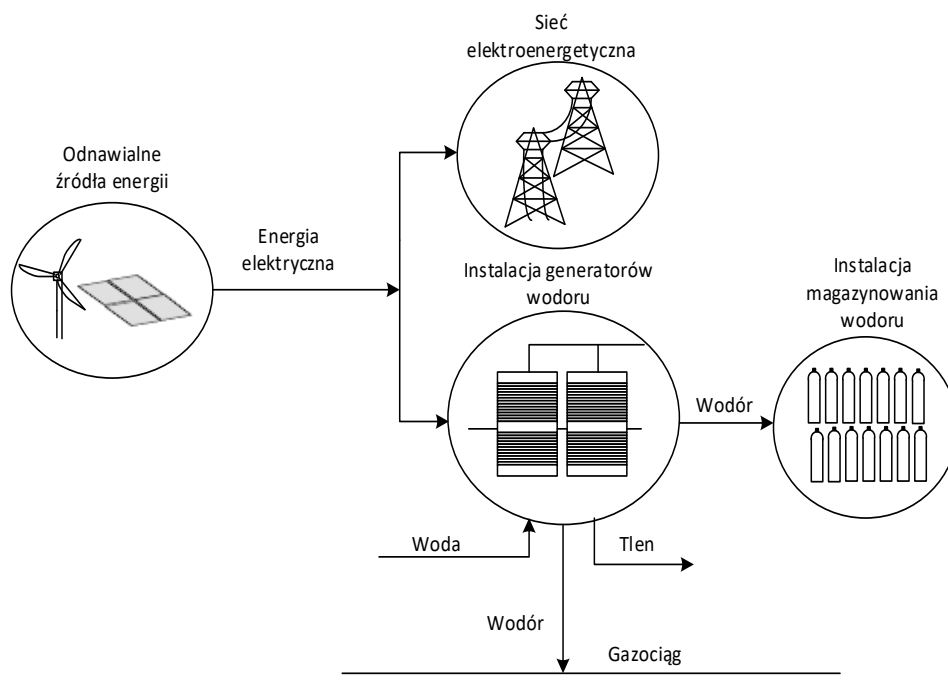


Rys.1. Schemat diabatyckiej instalacji CAES

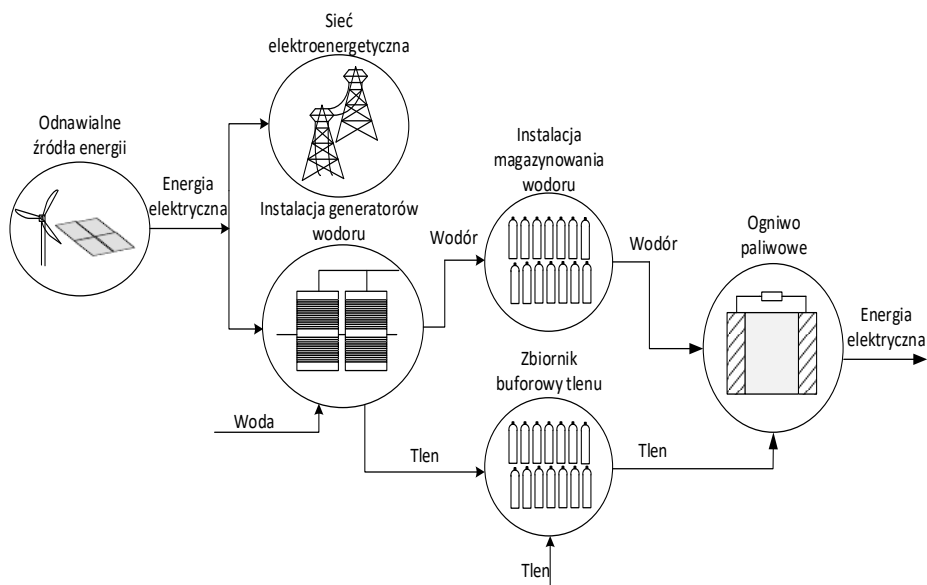
Kolejną technologią pozwalającą na magazynowanie znacznych ilości energii w systemach energetycznych jest wykorzystanie wodoru wytworzonego w procesie elektrolizy wody. Istnieje wiele rozwiązań umożliwiających wykorzystanie wodoru jako nośnika energii, do których można zaliczyć instalacje takie jak Power to Fuel (P2F), Power to Gas (P2G) oraz Power to Gas to Power (P2G2P). Pośród proponowanych rozwiązań instalacji Power to Fuel można wymienić m.in. technologię umożliwiającą syntezę metanolu z dwutlenku węgla, który pochodzi z instalacji wychwytu CO₂, a także wodoru, który może zostać wytworzony w procesie elektrolizy wody [9-12]. Takie rozwiązanie pozwala zarówno na ograniczenie emisji do atmosfery ziemskiej dwutlenku węgla, jak i odpowiednie zagospodarowanie w obrębie systemów energetycznych nadwyżek energii pochodzącej z odnawialnych źródeł.



Rys. 2. Schemat adiabatyckiej instalacji CAES



Rys. 3. Schemat instalacji Power to Gas



Rys. 4. Schemat instalacji Power to Gas to Power

Zadaniem instalacji typu P2G jest wykorzystanie energii elektrycznej w okresie jej nadmiaru w systemie elektroenergetycznym do wytwarzania wodoru w procesie elektrolizy [13]. Tlen powstały wskutek reakcji zachodzących na elektrodach elektrolizerów, może stanowić dodatkowy produkt handlowy poprawiający efektywność ekonomiczną instalacji P2G. Instalacje typu Power to Gas to Power (P2G2P) pozwalają na konwersję energii chemicznej, zawartej w H_2 ponownie w energię elektryczną. Do procesu wytwarzania energii elektrycznej

w większości układów tego typu wykorzystywane są ogniwa paliwowe typu PEM [14,15]. Obecnie instalacje P2G2P w porównaniu z innymi technologiami magazynowania dużych ilości energii, takimi jak instalacje szczytowo-pompowe, odznaczają się niższymi sprawnościami, które nie przekraczają zazwyczaj wartości 40% [16]. Schemat instalacji Power to Gas przedstawiono na rysunku 3, natomiast na rysunku 4 zaprezentowano schemat instalacji Power to Gas to Power.

3. WYTWARZANIE I MAGAZYNOWANIE WODORU

Wiodącymi rozwiązaniami do pozyskiwania wodoru są procesy wykorzystujące paliwa kopalne takie jak: węgiel kamienny, ropa naftowa lub gaz ziemny. W procesach konwersji paliw nieodnawialnych produkowane jest około 96% wodoru, z kolei w procesie elektrolizy wody pozyskuje się jedynie 4% tego gazu [17].

Wodór w procesie elektrolizy wody, która obecnie pokrywa jedynie niewielki procent zapotrzebowania na ten gaz, powstaje na skutek reakcji rozbicia cząsteczki wody. Elektroliza zachodzi w obrębie urządzeń nazywanych elektrolizerami, które są częścią generatorów wodoru. Elektrolizer składa się z dwóch elektrod: elektrody dodatniej – anody oraz elektrody ujemnej – katody. Na skutek reakcji mających miejsce na elektrodach cząstka wody zostaje rozbita na dwa podstawowe substraty - wodór oraz tlen. Sumaryczną reakcję procesu elektrolizy można zapisać jako:



Do głównych metod pozyskiwania H_2 można zaliczyć proces reformingu metanu parą wodną - SMR (*ang. Steam Methane Reforming*), w którym wytwarzane jest obecnie około 50% zapotrzebowania na wodór. Metan przed procesem reformingu podlega zabiegowi odsiarczenia. Temperatura w jakiej przebiega proces SMR wynosi od około 850°C do 900°C, przy ciśnieniu 3,5 MPa. Sprawność procesu reformingu metanu parą wodną określa się w przedziale od 74% do 85%. Zgazowanie węglowodorów również odgrywa istotną rolę wśród technologii pozwalających na wytworzenie wodoru. Sprawność termiczna procesu częściowego utleniania węglowodorów POX (*ang. Partial Oxidation*) wynosi od około 60% do 75%, a sam proces POX zachodzi w temperaturze wyższej niż proces reformingu metanu parą wodną, dochodzącej nawet do wartości 1315°C [18].

W instalacjach typu Power to Gas oraz Power to Gas to Power wykorzystujących wodór jako nośnik energii, istotną rolę odrywa również proces magazynowania wytworzonego w procesie elektrolizy gazu, który jest problematycznym zagadnieniem. Ma to ścisły związek z właściwościami wodoru, który w odniesieniu do swojej masy posiada najwyższą wśród paliw wartość ciepła spalania oraz wartość opałową. Odnosząc jednak wartości HHV_{H_2} oraz LHV_{H_2} do objętości, są one zdecydowanie mniejsze dla wodoru niż dla pozostałych paliw. Wynika to z

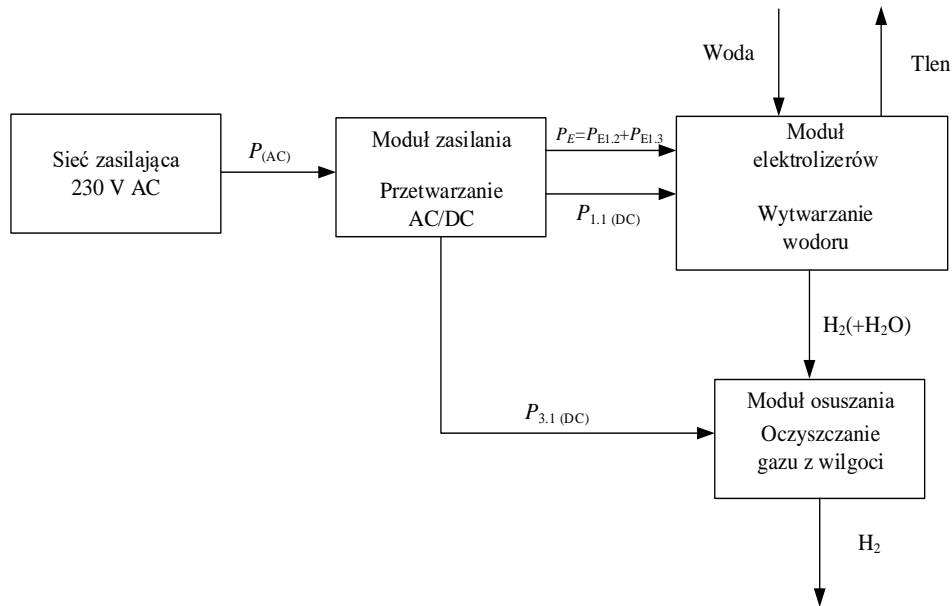
faktu, że H_2 charakteryzuje się bardzo niską gęstością (w warunkach normalnych wynosi ona około $0,0899 \text{ kg/m}^3$) [19,20]. Istnieje jednak kilka rozwiązań technologicznych umożliwiających magazynowanie tego gazu. Wśród najczęściej wykorzystywanych metod można wyróżnić zbiorniki ciśnieniowe, magazyny kriogeniczne, a także niskociśnieniowe zbiorniki z powłokami adsorbującymi [21].

4. OBIEKT BADAŃ

Obiekt badań stanowił generator wodoru o nominalnej wydajności wynoszącej $0,5 \text{ m}^3_n H_2/h$ oraz maksymalnym ciśnieniu gazu na wylocie z układu równym $3,5 \text{ MPa}$. Generator był wyposażony w dwa elektrolizery typu AEM (*ang. Anion Exchange Membrane*). Elektrolizery te pracowały w środowisku alkalicznym, gdzie roztworem roboczym był wodorotlenek potasu - KOH. Badany generator wodoru składał się z następujących modułów:

- modułu zasilania,
- modułu elektrolizerów AEM,
- moduł osuszania gazu.

Głównymi elementami modułu zasilania badanego generatora wodoru były trzy zasilacze: dwa posiadały moc 1500 W i były odpowiedzialne za zasilanie poszczególnych elektrolizerów typu AEM ($P_{1.2}$ oraz $P_{1.3}$) natomiast trzeci zasilacz o mniejszej mocy wynoszącej 1000 W ($P_{1.1}$) odpowiedzialny był za zasilanie urządzeń pomocniczych generatora. Moduł elektrolizerów składał się z dwóch niezależnie zasilanych z modułu zasilającego elektrolizerów typu AEM - $E_{1.2}$ i $E_{1.3}$, pracujących na wspólny kolektor wylotowy gazu. Wraz z elektrolizerami w skład modułu wchodziły następujące urządzenia: zbiornik elektrolitu, chłodnica z pompą obiegową roztworu roboczego, pompa uzupełniająca wodę oraz zestaw filtrów odpowiedzialnych za wstępne oczyszczanie wytworzonego gazu. Roztwór roboczy instalacji stanowił wodny roztwór wodorotlenku potasu. Woda demineralizowana używana w procesie elektrolizy przeprowadzanej przez elektrolizery typu AEM powinna charakteryzować się odpowiednią czystością, a przy tym posiadać konduktywność nie większą niż $10 \mu\text{S/cm}$. Maksymalne zużycie wody przez urządzenie w trakcie przeprowadzania procesu elektrolizy wynosiło $0,4 \text{ l/h}$. Poprzez zainstalowanie dodatkowego modułu osuszania wodoru, możliwe było uzyskanie wodoru o wysokiej czystości sięgającej $99,999\%$. Dzięki bardzo wysokiej klasie czystości wytworzony w procesie elektrolizy wodór może zostać użyty do wielu celów m.in. do zasilania ogniw paliwowych lub do magazynowania w zbiornikach niskociśnieniowych z powłokami adsorbującymi. Schemat konfiguracji połączeń poszczególnych modułów w badanym generatorze wodoru zaprezentowano na rysunku 5.



Rys. 5. Schemat połączeń poszczególnych modułów w badanym generatorze wodoru

5. WYNIKI BADAŃ

Zależność na sprawność generatora wodoru przedstawiono równaniem

$$\eta_G = \frac{\dot{m}_{H_2} \cdot HHV_{H_2}}{P_{(AC)}} \quad (2)$$

gdzie:

η_G sprawność generatora wodoru, -,

\dot{m}_{H_2} strumień masowy wytworzonego w procesie elektrolizy wodoru, kg/s,

HHV_{H_2} ciepło spalania wodoru 142, MJ/kg,

$P_{(AC)}$ moc dostarczona do generatora wodoru, W.

Do pomiaru wartości natężenia przepływu wykorzystano przepływomierz Coliorisa, dlatego też w przeprowadzonych analizach posługiwano się wartościami masowego strumienia wytworzonego w procesie elektrolizy wodoru. Wartość mocy $P_{(AC)}$ to suma mocy dostarczonej do poszczególnych elektrolizerów, mocy urządzeń pomocniczych generatora wodoru P_w przy jednoczesnym uwzględnieniu sprawności przetwornic AC/DC zainstalowanych w module zasilającym urządzenia. Straty związane z przetwarzaniem prądu przemiennego na prąd stały wynikają z faktu, iż badany generator wodoru zasilany był z sieci 230 V AC. Wymuszało to potrzebę zastosowania odpowiednich przetwornic AC/DC, gdyż elektrolizery oraz inne elementy generatora wodoru wymagały zasilania prądem stałym. Wielkość $P_{(AC)}$ można zatem wyrazić równaniem

$$P_{(AC)} = P_E + P_W + \Delta P_{(AC/DC)} \quad (3)$$

gdzie:

$P_{(AC)}$ moc dostarczona do generatora wodoru, W,

P_E moc dostarczona do układu elektrolizerów, W,

P_W moc urządzeń pomocniczych generatora, W,

$\Delta P_{(AC/DC)}$ straty przetwarzania AC/DC wynikające ze sprawności zasilaczy, W.

Moc elektrolizerów AEM (P_E) obliczono jako sumę wartości iloczynów prądów zasilających i spadków napięć na poszczególnych elektrolizerach - $E_{1,2}$ i $E_{1,3}$. Moc pobieraną przez elektrolizery przedstawiono równaniem:

$$P_E = P_{E_{1,2}} + P_{E_{1,3}} = I_{1,2} \cdot U_{1,2} + I_{1,3} \cdot U_{1,3}. \quad (4)$$

gdzie:

$P_{E_{1,2}}$ moc dostarczona do elektrolizera $E_{1,2}$, W,

$P_{E_{1,3}}$ moc dostarczona do elektrolizera $E_{1,3}$, W,

$I_{1,2}$ natężenie prądu elektrolizera $E_{1,2}$, A,

$U_{1,2}$ spadek napięcia na elektrolizerze $E_{1,2}$, V,

$I_{1,3}$ natężenie prądu elektrolizera $E_{1,3}$, A,

$U_{1,3}$ spadek napięcia na elektrolizerze $E_{1,3}$, V.

Wartość strat $\Delta P_{(AC/DC)}$ zależy więc od rodzaju zastosowanych przetwornic. Sprawność tego typu urządzeń dla jednostek o dużej mocy osiąga maksymalnie wartość 95%, natomiast przy stanach niskiego obciążenia urządzenia ich sprawność może spaść do wartości około 70% [22]. W skład generatora wodoru wchodziły trzy zasilacze ($P_{1,1}$, $P_{1,2}$ oraz $P_{1,3}$), straty związane z procesem przetwarzania prądu przemiennego na prąd stały można więc zdefiniować zależnością:

$$\Delta P_{(AC/DC)} = \sum_n \Delta P_{(AC/DC)} = \Delta P_{1,1(AC/DC)} + \Delta P_{1,2(AC/DC)} + \Delta P_{1,3(AC/DC)} \quad (5)$$

gdzie:

$\Delta P_{(AC/DC)}$ -straty przetwarzania AC/DC, W,

$\Delta P_{P_{1,1}(AC/DC)}$ - straty przetwarzania $P_{1,1}$, W,

$\Delta P_{P_{1,2}(AC/DC)}$ - straty przetwarzania $P_{1,2}$, W,

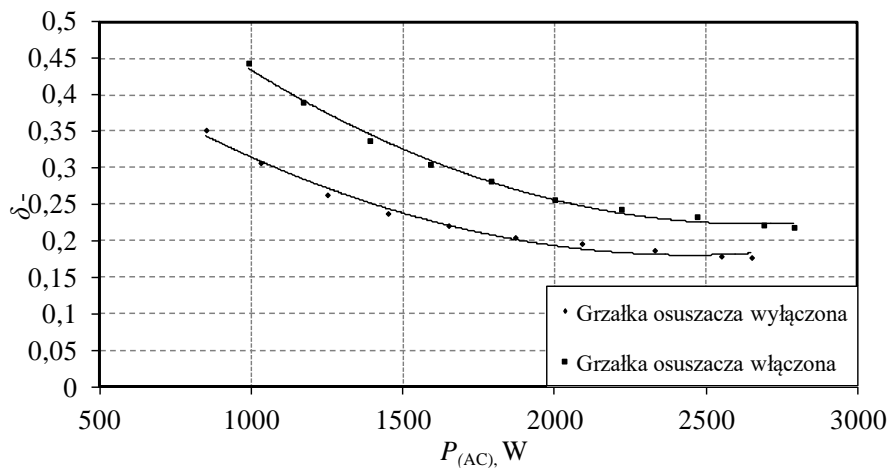
$\Delta P_{P_{1,3}(AC/DC)}$ - straty przetwarzania $P_{1,3}$, W.

Urządzenia pomocnicze wchodzące w skład generatora wodoru, takie jak wentylatory, pompy lub grzałki regeneracyjne do funkcjonowania potrzebują zasilania energią elektryczną. Zasilanie urządzeń pomocniczych powoduje zmniejszenie wartości sprawności generatora wodoru w odniesieniu do wartości sprawności samych elektrolizerów AEM. W ramach przeprowa-

dzonych badań do opisu potrzeb własnych badanego generatora oraz strat związanych z procesem przetwarzania AC/DC wykorzystano wskaźniki potrzeb własnych urządzenia – δ i zdefiniowano go zgodnie z zależnością:

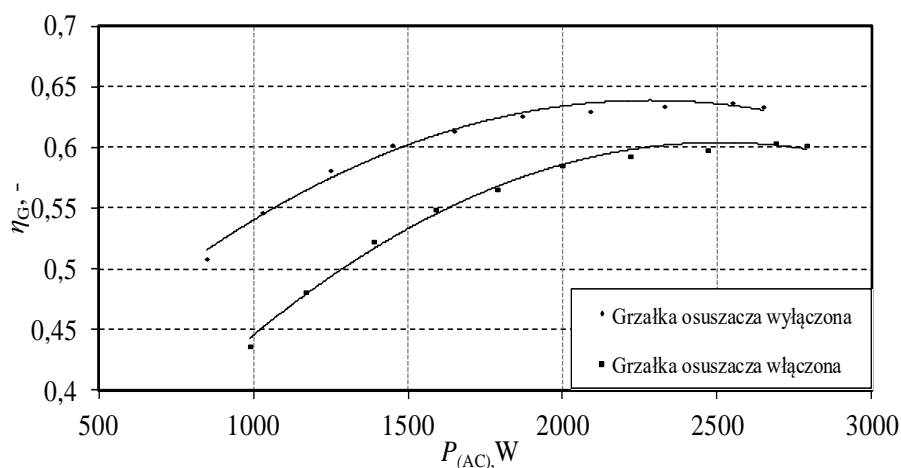
$$\delta = \frac{\Delta P_{(AC/DC)} + P_W}{P_{(AC)}} \quad (6)$$

Na rysunku 6 przedstawiono wartość wskaźnika potrzeb własnych w funkcji mocy $P_{(AC)}$ dostarczonej do generatora wodoru. Wyodrębniono dwa stany pracy generatora – z włączoną oraz wyłączoną grzałką osuszacza. Energia elektryczna potrzebna do zasilania grzałki regeneracyjnej układu osuszania wodoru, która działa w sposób cykliczny, ma widoczny wpływ zarówno na wartość współczynnika potrzeb własnych jak i sprawności oraz energochłonności badanego generatora.



Rys. 6. Wartość wskaźnika potrzeb własnych w funkcji mocy $P_{(AC)}$

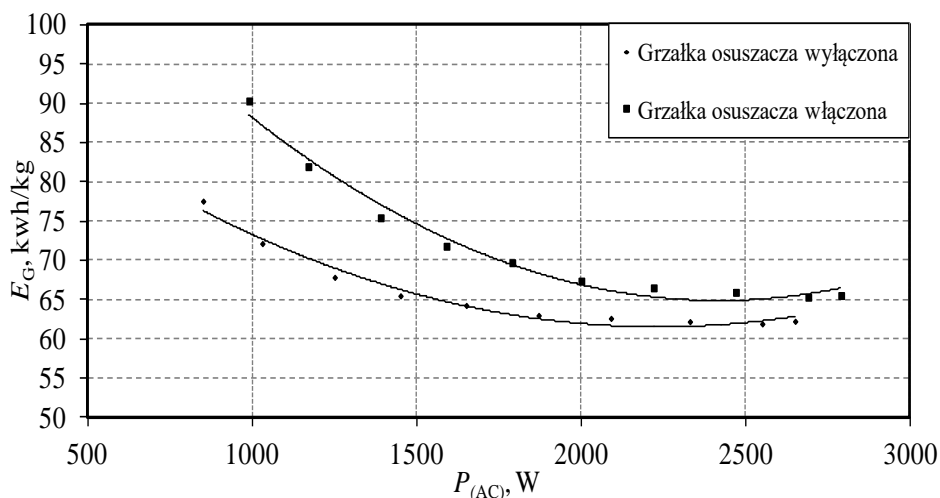
Wartość wskaźnika potrzeb własnych maleje wraz ze wzrostem mocy dostarczonej do zasilania badanego generatora wodoru. Dla charakterystyki przedstawiającej pracę generatora wodoru bez włączonej grzałki regeneracyjnej osuszacza wartości wskaźnika potrzeb własnych zmieniają się w zakresie od 0,18 do 0,35, natomiast w przypadku pracy układu z włączoną grzałką otrzymano wartości δ w przedziale od 0,22 do 0,44. Moc potrzeb własnych urządzeń pomocniczych generatora wodoru (P_W) w całym zakresie wykonanych badań utrzymuje się na stałym poziomie. Zaobserwowany wzrost wartości współczynnika potrzeb własnych δ wraz ze spadkiem mocy dostarczanej do generatora wodoru ma związek głównie ze spadkiem wartości sprawności przetwornic zastosowanych w układzie przy ich niższych obciążeniach, co przekłada się na wyższe wartości strat związanych z przetwarzaniem prądu przemiennego na prąd stały - $\Delta P_{(AC/DC)}$. Przebieg charakterystyk sprawności badanego generatora wodoru (wyznaczonej na podstawie równania (2)) w funkcji mocy $P_{(AC)}$ przedstawiono na rysunku 7.



Rys. 7. Sprawność generatora wodoru w funkcji mocy $P_{(AC)}$

Najwyższą wartość sprawności badanego generatora wodoru, wynoszącą około 60% - 63,5% uzyskano dla najwyższych osiągniętych mocy urządzenia. Wraz ze spadkiem wartości mocy $P_{(AC)}$ dostarczanej do zasilania urządzenia maleje wartość sprawności generatora wodoru, osiągając dla najmniejszych mocy układu wartości w przedziale od 44% (włączona grzałka regeneracyjna osuszacza) do około 51% (wyłączona grzałka regeneracyjna osuszacza). Ilość energii elektrycznej pobranej przez generator wodoru w stosunku do ilości wytworzonego przez urządzenie gazu określono mianem energochłonności i obliczono zgodnie z równaniem (7), natomiast charakterystykę zmiany energochłonności w funkcji mocy $P_{(AC)}$ dostarczonej do generatora wodoru przedstawiono na rysunku 8.

$$E_G = \frac{P_{(AC)}}{\dot{m}_{H_2}} \quad (7)$$



Rys. 8. Energochłonność badanego generatora wodoru w funkcji mocy $P_{(AC)}$

Największą wartość energochłonności w przedziale od około 77 kWh/kg - przy wyłączonej grzałce regeneracyjnej osuszacza do około 90 kWh/kg - przy włączonej grzałce regeneracyjnej osuszacza uzyskano przy najmniejszej mocy urządzenia (najmniejszej przebadanej wydajności generatora wodoru). Najmniejszą wartość energochłonności wynoszącą 62 kWh/kg (wyłączona grzałka regeneracyjna osuszacza) oraz 65 kWh/kg (włączona grzałka regeneracyjna osuszacza) otrzymano dla mocy zbliżonych do wartości maksymalnych uzyskiwanych przez badane urządzenie, a więc i dla maksymalnych wydajności generatora wodoru.

6. PODSUMOWANIE

Podstawowym zadaniem instalacji magazynowania energii jest stabilizacja działania systemów elektroenergetycznych. Rozwój nowych rozwiązań technologicznych instalacji magazynowania energii umożliwi wykorzystanie całego potencjału energetycznego OZE oraz zapewni równocześnie efektywne działanie scentralizowanych jednostek energetyki konwencjonalnej, co ostatecznie przyczyni się do stabilnej pracy systemów elektroenergetycznych.

Instalacje takie jak Power to Gas (P2G) czy też Power to Gas to Power (P2G2P), wykorzystujące wodór jako nośnik energii, mogą w przyszłości stanowić interesującą alternatywę lub uzupełnienie dla obecnie powszechnie stosowanych instalacji magazynowania energii takich jak elektrownie szczytowo-pompowe lub dynamicznie rozwijające się elektrownie CAES. W instalacjach takiego typu wodór wytwarzany jest w procesie elektrolizy wody. Za proces elektrolizy odpowiedzialne są elektrolizery, które stanowią część generatorów wodoru.

W ramach przeprowadzonych badań wyznaczono charakterystyki współczynnika potrzeb własnych, sprawności oraz energochłonności badanego generatora wodoru. Zaprezentowane charakterystyki zostały wykonane dla pełnego zakresu działania testowanego generatora wodoru. Zbadanie tego typu urządzenia w całym zakresie jego pracy jest niezbędne do określenia możliwości zasilania generatorów wodoru ze źródeł charakteryzujących się zmienną ilością wytwarzanej energii elektrycznej, a więc głównie energii pochodzącej z instalacji OZE, w ramach współpracy z instalacjami typu Power to Gas czy też Power to Gas to Power.

Do opisu potrzeb własnych generatora wodoru oraz strat na przetwarzaniu AC/DC wykorzystano wskaźnik potrzeb własnych - δ . Wartość wyznaczonego dla generatora wodoru wskaźnika potrzeb własnych maleje wraz ze wzrostem mocy dostarczanej do badanego urządzenia. Najwyższą sprawność badanego generatora wodoru, wynoszącą około 60% - 63,5% uzyskano dla najwyższych osiągniętych mocy urządzenia, co jest równoznaczne z tym, iż badane urządzenie charakteryzowało się także najmniejszą energochłonnością (62-65 kWh/kg) dla najwyższych osiągniętych mocy (maksymalnych wydajności).

Praca naukowa zrealizowana w ramach badań statutowych.

LITERATURA

- [1] Kotowicz J., Jurczyk M., Ogulewicz W., Węcel D.: *Charakterystyki dynamiczne przebiegu procesu elektrolizy*. Rynek Energii, 2017, nr 1 (128), str. 50-55.
- [2] Węcel D, Ogulewicz W., Kotowicz J., Jurczyk M.: *Dynamika pracy elektrolizerów produkujących wodór*. Rynek Energii 2016, nr 1 (122), str. 59-65.
- [3] Koceman A. S., Modi V.: *Value of pumped hydro storage in a hybrid energy generation allocation system*. Applied Energy, listopad 2017, Vol. 205, str. 1202-1215.
- [4] Luo X., Wang J., Dooner M., Clarke J.: *Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation*. Applied Energy, styczeń 2015 Vol. 137, str. 511-536.
- [5] Stenzel P., Linssen J.: *Concept and potential of pumped hydro storage in federal waterways*. Applied Energy, styczeń 2016, Vol. 162, str. 486-493.
- [6] Badyda K., Milewski J.: *Elektrownie CAES - możliwości akumulacji energii oraz współpracy ze źródłami odnawialnymi*. Instal - 2/2010.
- [7] Milewski J., Badyda K., Szablowski Ł.: *Compressed Air Energy Storage Systems*. Journal of Power Technologies 2016, 96 (4), str. 245 - 260.
- [8] Kotowicz J., Jurczyk M.: *Wyznaczanie sprawności diabatyicznych instalacji CAES*. Rynek Energii 2015, nr 4(119), str. 49-56.
- [9] Atsonio K., Panopoulos K., Kakaras E.: *Investigation of technical and economic aspects for methanol production through CO₂ hydrogenation*. International Journal of Hydrogen Energy, styczeń 2016, Vol 41 (4), str. 2202-2214.
- [10] Jadhav S., Vaidya P., Bhanage B., Joshi J.: *Catalytic carbon dioxide hydrogenation to methanol: A review of recent studies*. Chemical Engineering Research and Design, listopad 2014, Vol. 92 (11), str. 2557-2567.
- [11] Nieskens D., Ferrari D., Liu Y., Kolonko Jr R.: *The conversion of carbon dioxide and hydrogen into methanol and higher alcohols*. Catalysis Communications październik 2011, 14 (1), str. 111-113.
- [12] Varone A., Ferrari M.: *Power to liquid and power to gas: an option for the German Energiewende*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, maj 2015, Vol. 45, str. 207-218.

- [13] Kotowicz J., Bartela Ł., Węcel D., Dubiel K.: *Hydrogen generator characteristic for storage of renewably-generated energy*. Energy 2017, Vol. 118, , str.156-171.
- [14] Kotowicz J., Węcel D., Bartela Ł., Jurczyk M., Dubiel K.: *Badanie generatora wodoru i ogniwa paliwowego współpracujących z instalacją power-to-gas-to-power*. Współczesne Problemy Termodynamiki. Praca zbiorowa. Pod red. Tomasza Burego i Andrzeja Szłęka. Gliwice : Wydaw. Instytutu Techniki Ciepłej, 2017, str. 1219-1229.
- [15] Ogulewicz W., Węcel D., Wiciak G., Łukowicz H.: *Koncepcja stanowiska badawczego:ogniwo fotowoltaiczne - generator wodoru - ogniwo paliwowe*. Rynek Energii 2010, nr 2 (87), str. 108-112.
- [16] *Kotowicz J., Węcel D., Jurczyk M.: Analysis of component operation in Power to Gas to Power operation*. Applied Energy 2018, Vol. 216, str. 45-59.
- [17] Kothari R., Buddhi D., Sawhney R.: *Comparison of environmental and economic aspects of various hydrogen production methods*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2008, 12, str. 553-563.
- [18] Nikolaidis P., Poullikkas A.: *A comprehensive overview of hydrogen production process*. Renewable and Sustainable Energy Reviews, 2017, Vol. 67, str. 597-611.
- [19] Abbasi T., Abbasi S.A.: *'Renewable' hydrogen: Prospects and challenges*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2011, Vol. 15, str. 3034-3040.
- [20] Mazloomi K., Gomes C.: *Hydrogen as an energy carrier: Prospects and challenges*. Renewable and Sustainable Energy Reviews 2012, Vol. 16, str. 3024-3033.
- [21] Kotowicz J., Jurczyk M., Węcel D.: *Problems of hydrogen storage*. Materiały konferencji: Topical Issues Of Rational Use Of Natural Resources; St. Petersburg, Rosja; 19-21 kwietnia 2017, str. 87-89 (Tom II).
- [22] Godula - Jopek A.: *Hydrogen production by electrolysis with a Foreword by Detlef Stolten*, Wiley-VCH, Verlag GmbH & Co. KGaA, 2015. Edited by Godula - Jopek A. and Polish Academy of Science.

ANALYSIS OF HYDROGEN GENERATOR WORKING IN AN ALKALINE ENVIRONMENT

Key words: energy storage, hydrogen, hydrogen generator, water electrolysis process

Summary. The article presents an analysis of the hydrogen generator working in an alkaline environment equipped with two AEM electrolyzers. The characteristics of efficiency, energy consumption and the own needs ratio of a tested hydrogen generator were determined. The characteristics presented in the paper have been made for the full range of work of the tested hydrogen generator. Measurements of this type device in the whole range of its operation and in various operational states may be helpful in determining the possibility of powering hydrogen generators from sources characterized by variable amount of electricity produced in time, especially from renewable energy sources installations, as part of cooperation with Power installations to Gas or Power to Gas to Power.

Janusz Kotowicz: prof. dr hab. inż., Prorektor do spraw Współpracy z Otoczeniem Społeczno - Gospodarczym w Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Zainteresowania naukowe skupia głównie na czystych technologiach energetycznych, energetyce wodorowej, a także na układach zintegrowanych ze zgazowaniem węgla.
e-mail: janusz.kotowicz@polsl.pl.

Michał Jurczyk, dr inż., asystent naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Miernictwa i Automatyki Procesów Energetycznych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych w Politechnice Śląskiej w Gliwicach. Zainteresowania naukowe skupia głównie na magazynowaniu energii, wytwarzaniu wodoru w procesie elektrolizy wody, energetyce wodorowej jak i czystych technologiach energetycznych. e-mail: michal.jurczyk@polsl.pl.

Daniel Węcel, dr inż., adiunkt naukowo-dydaktyczny w Zakładzie Miernictwa i Automatyki Procesów Energetycznych w Instytucie Maszyn i Urządzeń Energetycznych Politechniki Śląskiej w Gliwicach. Obszar zainteresowań naukowych: ogniwa fotowoltaiczne, wykorzystanie wodoru do celów energetycznych. e-mail: daniel.wecel@polsl.pl.