

Grzegorz DĄBROWSKI

Krzysztof WOLIŃSKI

PGE Dystrybucja SA Oddział Białystok

Magazynowanie energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym

Abstract. *W artykule przedstawiona została analiza różnych sposobów magazynowania energii elektrycznej pod kątem możliwości wykorzystania w energetyce. Przedstawiono aktualną strukturę wytwarzania energii elektrycznej w kraju, charakterystykę systemu elektroenergetycznego oraz przykładowe pracujące instalacje magazynowania energii w różnych krajach.*

Keywords: system elektroenergetyczny, wytwarzanie energii, sposoby magazynowania energii elektrycznej

Podstawowym wyzwaniem stojącym przed gospodarką każdego kraju jest zapewnienie odpowiedniej ilości energii elektrycznej. Ze względu na wytyczne Unii Europejskiej (dyrektywy [7], oraz krajowe programy rozwoju „Polityka energetyczna Polski do 2030” [24]) każdy kraj jest zobowiązany do ograniczenia ilości szkodliwych substancji, które są ubocznym produktem w procesie wytwarzania energii elektrycznej. Stąd też coraz większym zainteresowaniem cieszą się różnego rodzaju odnawialne źródła energii. Odnawialne źródła energii mają zarówno wady jak i zalety. Podstawową zaletą źródeł, które wykorzystują energię wiatru lub promieniowania słonecznego, jest ich powszechna dostępność. Głównym problemem jest okresowa możliwość ich wykorzystania, przeważnie nie pokrywająca się z okresowością przebiegu zapotrzebowania na energię elektryczną. Powstaje więc problem jak zagospodarować nadwyżki energii elektrycznej wyprodukowanej przez odnawialne źródła energii, gdy nie ma na nią zapotrzebowania, a jednocześnie zapewniając możliwość jej wykorzystania w okresach deficytu. Zasobnik energii może stanowić interwencyjne źródło w czasie awarii lub nagłego wzrostu obciążenia, a także służyć jako źródło rozruchowe konwencjonalnych elektrowni ciepłych w okresie awarii typu blackout [26].

Z tego względu w układach z alternatywnymi źródłami energii jednym z najważniejszych zagadnień staje się problematyka dotycząca możliwości i sposobów magazynowania energii elektrycznej [30]. W grudniu 2011 roku Międzynarodowa Komisja Elektrotechniczna IEC opublikowała Białą Księgę dotyczącą systemów magazynowania energii elektrycznej (*Electrical Energy Storage – White Paper*). Jest to dokument porządkujący tematykę magazynowania energii ze szczególnym uwzględnieniem dostępnych systemów oraz najpopularniejszych trendów ich zastosowania [9].

Magazynowanie energii elektrycznej realizowane w zasobnikach instalowanych w KSE należy rozpatrywać z punktu widzenia ich wielkości. Można budować potężne zasobniki systemowe i przyłączać je do sieci przesyłowej, ale można planować budowę zasobników energii o mniejszych mocach przyłączonych do sieci rozdzielczej. Obecnie pojawiają się warunki do instalowania zasobników energii współpracujących z odnawialnymi źródłami energii przyłączonymi do sieci średniego i niskiego napięcia [1, 11, 16, 22, 23, 25]

W artykule przedstawiono analizę różnych sposobów magazynowania energii elektrycznej pod kątem możliwości ich wykorzystania w energetyce.

Wytwarzanie energii elektrycznej

Do produkcji energii elektrycznej stosuje się:

- spalanie węgla lub innych paliw,
- reakcję jądrową,
- gaz do bezpośredniego napędu turbin,
- spadek, przepływ, falowania wody oraz pływy,
- turbiny wiatrowe,
- instalacje heliotermiczne i fotowoltaiczne,
- inne źródła (generatory MHD, ogniwa paliwowe).

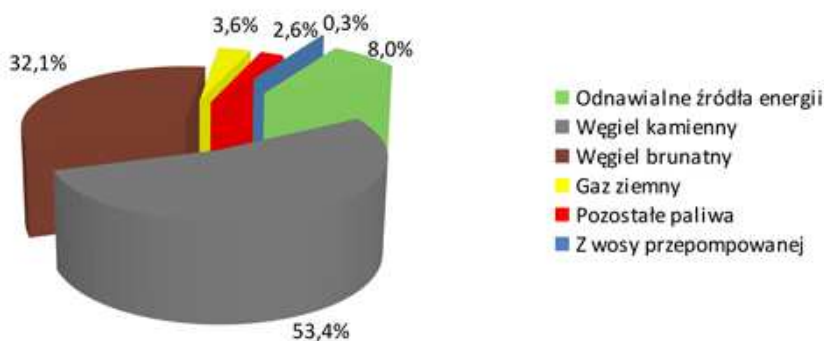
Obecnie trwają badania nad wykorzystaniem mikrosyntezy termojądrowej oraz innymi możliwościami wytwarzania energii elektrycznej. W różnych krajach struktura wykorzystania powyższych metod wytwarzania energii elektrycznej jest różna. W Polsce przeważają elektrownie konwencjonalne ciepłone, w Austrii i Norwegii – wodne, we Francji – energetyka jądrowa [26].

W Polsce na koniec 2011 roku procentowy udział poszczególnych rodzajów generacji w całkowitej mocy zainstalowanej wynoszącej 37 366 MW wynosił: elektrownie ciepłone konwencjonalne - 86,35 %, elektrownie wodne - 5,95 %, gazowe - 2,5 % oraz odnawialne źródła energii - 5,2 % [28]. Produkcję energii elektrycznej oraz moc zainstalowaną w poszczególnych źródłach przedstawia tabela 1.

Obecnie, wg danych na dzień 30.09.2013 r., w Polsce mamy 1885 instalacji OZE o mocy 5176,658 MW, w tym elektrownie wiatrowe – 795 instalacji o mocy 3 079, 596 MW. Strukturę odnawialnych źródeł energii w Polsce przedstawia tabela 2.

Strukturę nośników energii pierwotnej służących do wytwarzania energii elektrycznej (dane na koniec 2011 roku) przedstawia rysunek 1.

Udział odnawialnych źródeł w produkcji energii elektrycznej w najbliższych latach będzie wzrastał. Nie oznacza to jednak dominacji w procentowym pokryciu zapotrzebowania na energię elektryczną w kraju. Jest jednakże znaczącym argumentem uzasadniającym możliwość zastosowania w KSE zasobników energii elektrycznej.



Rys. 1. Struktura nośników energii pierwotnej służących do wytworzenia energii elektrycznej w 2011 roku [28].

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Tabela 1. Produkcja energii elektrycznej i moc zainstalowana w zależności od źródeł – stan na koniec roku 2011 [28]

	Moc zainstalowana [MW]	Produkcja energii [GWh]
Elektrownie ciepłe zawodowe	30 716 – 82,2%	149 189 - 91,25%
<i>w tym:</i>		
<i>na węglu kamiennym</i>	20 152 – 53,93%	90 563 - 55,40%
<i>na węglu brunatnym</i>	9 630 – 25,77%	53 617 - 32,79%
<i>na gazie</i>	934 - 2,5%	5 009 - 3,06%
Elektrownie zawodowe wodne	2 221 – 5,95%	2 761 - 1,69%
Elektrownie przemysłowe	2 486 - 6,65%	7 837 - 4,79%
Elektrownie niezależne OZE	1 943 - 5,2%	3 708 - 2,27%
Razem	37 366 - 100,00%	163 495 - 100,00%

Tabela 2. Odnawialne źródła energii w Polsce – stan na dzień 30.09.2013 [29]

Typ instalacji		Ilość instalacji	Moc[MW]
BG	elektrownie biogazowe	220	153.495
BM	elektrownie biomasowe	33	972.873
PV	wytwarzające z promieniowania słonecznego	14	1.750
WI	elektrownie wiatrowe	795	3079.596
WO	elektrownie wodne	782	968.944
WS	elektrownie realizujące technologię współspalania	41	0.000
RAZEM		1,885	5176.658

Źródło URE, data aktualizacji danych: 30.09.2013

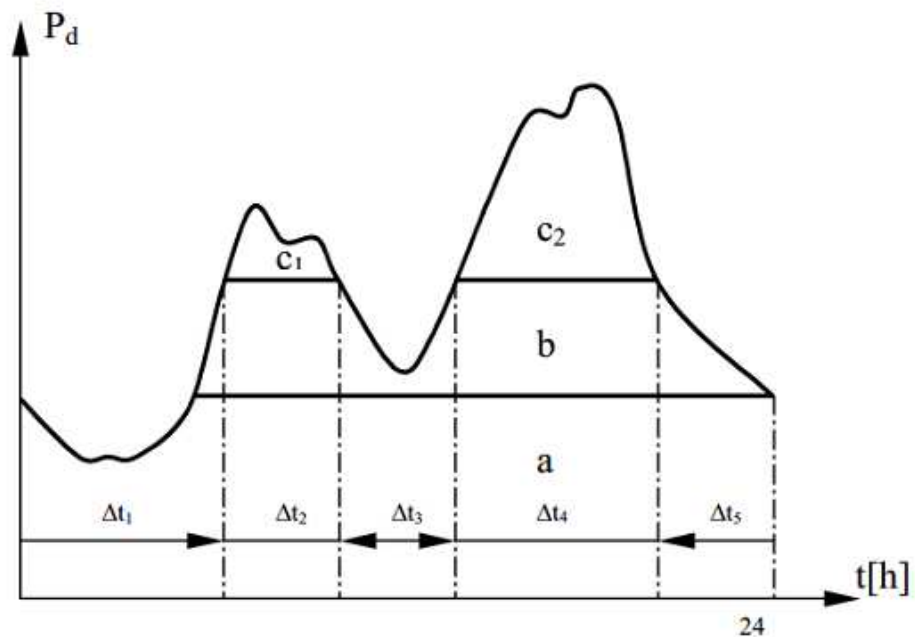
Charakterystyka systemu elektroenergetycznego

Obciążenie systemu elektroenergetycznego jest zmienne w czasie. W ciągu doby można wyróżnić następujące charakterystyczne okresy zapotrzebowania na energię elektryczną:

- w godzinach nocnych występuje dolina obciążenia ,

- w godzinach pracy przemysłu występuje codzienne obciążenie szczytowe,
- po zakończeniu pracy zakładów przemysłowych i przed włączeniem oświetlenia występuje obniżenie zapotrzebowania na energię elektryczną,
- w momencie włączenia oświetlenia oraz pracy zakładów zmianowych występuje wieczorny szczyt dobowego obciążenia.

Na rysunku 2 przedstawiono obciążenie dobowe systemu elektroenergetycznego oraz sposoby pokrywania tego obciążenia przez różne typy elektrowni (podstawowe, podszczytowe i szczytowe) [14].



Rys. 2. Pokrywanie obciążenia dobowego systemu elektroenergetycznego przez elektrownie [8]:

a - podstawowe, b - podszczytowe, c_1+c_2 - szczytowe; $\Delta t_1 + \Delta t_5$ - doliny nocnego obciążenia, Δt_2 - szczyt ranny, Δt_3 - dolina południowa, Δt_4 - szczyt wieczorny

Zmienne obciążenie, które występuje w systemie elektroenergetycznym jest zawsze problemem dla energetyki zawodowej ze względu na brak możliwości magazynowania wyprodukowanej energii elektrycznej.

W przypadku większości odnawialnych źródeł energii używanych do produkcji energii elektrycznej problemem jest niska przewidywalność poziomu generacji. Utrudnia ona planowanie i prowadzenie ruchu systemu oraz zwiększa jednostkowe koszty przyłączenia tych źródeł do sieci. Dla zapewnienia odpowiedniego poziomu bezpieczeństwa w bilansowaniu systemu elektroenergetycznego (zapewnienie odpowiedniej wielkości rezerwy operacyjnej oraz zdolności regulacyjnych) planowanie pracy poszczególnych jednostek wytwórczych musi odbywać się krocząco z kilkudniowym wyprzedzeniem, z uwzględnieniem parametrów ekonomicznych, ograniczeń technicznych tych jednostek oraz wymogów rynku energii elektrycznej. Gdy

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

udział mocy zainstalowanych źródeł odnawialnych w produkcji energii elektrycznej jest na poziomie kilku procent (np. w Polsce), sytuacja jest do opanowania. W innej sytuacji np. w Niemczech (25% mocy zainstalowanej stanowią siłownie wiatrowe, a 21 % mocy zainstalowanej jest w fotowoltaice – dane z 2011 roku) prowadzenie ruchu systemu elektroenergetycznego staje się trudne i kosztowne. W dłuższej perspektywie udział źródeł odnawialnych w produkcji energii elektrycznej będzie wzrastał (wytyczne UE), stąd też jednym ze sposobów pełnego ich wykorzystania jest zastosowanie zasobników energii elektrycznej , które będą stanowić bufor pomiędzy niestabilnymi źródłami a systemem elektroenergetycznym[25].

Zasobniki energii elektrycznej

Zastosowania zasobników energii można podzielić na dwie grupy. Pierwsza to wszelkiego typu aplikacje, gdzie podstawowe znaczenie ma wielkość energii, jaka może zostać zmagazynowana w takiej instalacji. Zaliczamy tutaj zasobniki o największej gęstości energii w przeliczeniu na jednostkę masy zasobnika (kWh/t) lub jego wielkość (kWh/m³). W drugiej grupie podstawowe znaczenie ma moc zainstalowanego zasobnika, a więc szybkość reakcji ładowania i rozładowania instalacji. Ten parametr jest określany jako gęstość mocy w przeliczeniu na jednostkę masy (MW/kg). Z punktu widzenia kosztów eksploatacji zasobników energii ważna jest sprawność cyklu rozładowania (%), który wskazuje na straty energii związane z jej dwukierunkową konwersją oraz czasem i warunkami przechowywania. W zależności od technologii i stanu pracy zasobnika sprawności mogą się wahać od 50 % do 99 %. Innym parametrem jest liczba cykli ładowania i rozładowania, które można wykonać przy założonej sprawności cyklu [25]. Tak więc do charakterystycznych wielkości zasobnika energii elektrycznej zaliczamy następujące parametry:

- ilość zgromadzonej energii, wydajność (energia/masa),
- moc maksymalna, moc ciągła, prąd maksymalny i ciągły, napięcie pracy, częstotliwość,
- szybkość magazynowania i czas przejścia z tego trybu na tryb oddawania energii,
- dyspozycyjność,
- łatwość realizacji w KSE,
- sprawność, okres eksploatacji i koszty.
-

Nie wszystkie możliwe sposoby gromadzenia energii nadają się do użycia w KSE [26].

Obecnie na rynku dostępnych jest szereg różnych technologii magazynowania energii elektrycznej, które mogą być wykorzystane do bilansowania OZE oraz stworzenia technicznych możliwości dostawy dodatkowych usług regulacji i rezerwy . Głównie kierunki zastosowań systemów magazynowania energii elektrycznej to [9]:

- energetyka odnawialna,
- sieci inteligentne,
- mikrosieci,
- inteligentne budynki,
- pojazdy elektryczne.

W zależności od form magazynowania energii wyróżniamy następujące systemy: mechaniczne, elektrochemiczne, chemiczne, elektryczne i cieplne. Na rysunku 3 przedstawiono klasyfikację systemów magazynowania energii elektrycznej.



Rys. 3. Klasyfikacja systemów magazynowania energii elektrycznej [13].

W energetyce zawodowej można rozpatrywać zastosowanie następujących zasobników energii elektrycznej:

- elektrownie szczytowo – pompowe (ang. PSH - Pump Storage Hydroelectric) - *wykorzystanie przemian elektromechanicznych,*
- zasobniki ze sprężonym powietrzem (ang. CAES – Compressed Air Energy Storage) - *układy ciśnieniowe wykorzystujące przemiany elektromechaniczne,*
- wirujące masy (ang. FES – Flywheel Energy Storage) - *wykorzystanie przemian elektromechanicznych (energia kinetyczna wirujących mas),*
- nadprzewodzące układy cewek (ang. SMES – Superconducting Magnetic Energy Storage) - *wykorzystanie pola magnetycznego,*
- kondensatory (ang. EDLC - Supercapacitors) - *wykorzystanie pola elektrycznego,*
- akumulatory chemiczne (ang. Metal Air) – *różne technologie wykorzystujące przemiany elektrochemiczne,*
- ogniwa paliwowe (ang. FC – Fuel Cells) – *różne technologie wykorzystujące przemiany elektrochemiczne.*

Porównanie parametrów technicznych dla różnych technologii zasobników energii elektrycznej przedstawia rysunek 4. Z danych przedstawionych na rysunku 4 wynika, że do budowy zasobników energii o największych mocach i pojemnościach są predysponowane dwie technologie: elektrownie pompowe (PSH) i pneumatyczne zasobniki energii (CAES). W następnej kolejności winny być użyte technologie bateryjne, które umożliwią budowanie zasobników energii o mocach do 50 MW. Zasobniki energii wykorzystujące technologię nadprzewodzące układy cewek (SMES) predysponowane są do aplikacji o dużych mocach i są obecnie na etapie badań i dopracowywania technologii [17].

Stan zaawansowania technicznego poszczególnych rodzajów technologii zasobników energii elektrycznej przedstawia rysunek 5.

W tabeli 3 podano zalety i wady technologii umożliwiających budowę zasobników energii elektrycznej dużej mocy i pojemności [17].

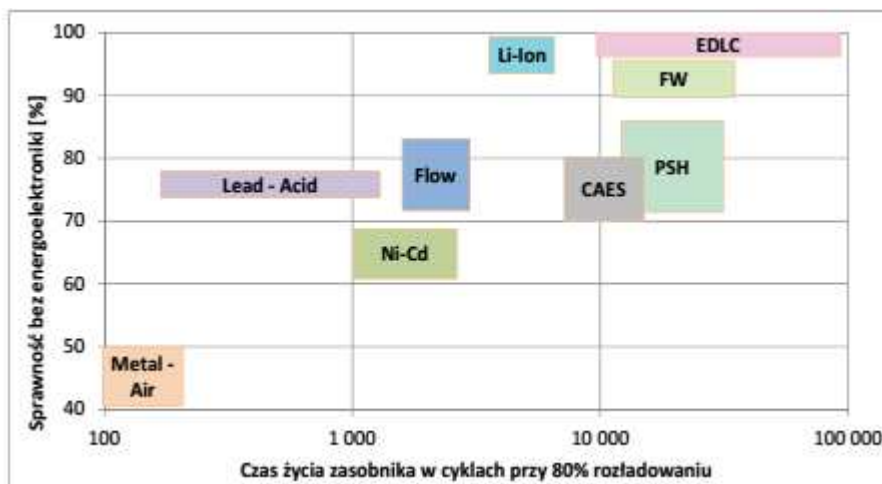
VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

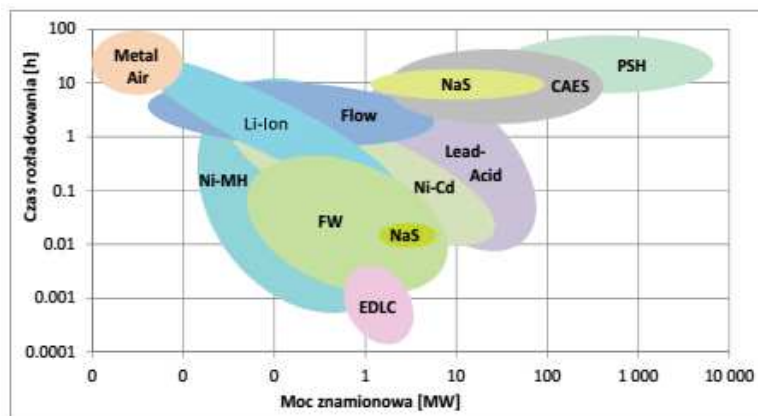
Elektrownie wodne pompowe

Do 1970 roku wodne elektrownie pompowe były jedyną znaną technologią pozwalającą magazynować olbrzymie ilości energii elektrycznej. Ze wszystkich znanych metod magazynowania dużych ilości energii, elektrownie pompowe są najbardziej efektywne. Sprawność instalacji elektrowni szczytowo-pompowej ocenia się na 70 – 85 % [1]. Są one dyspozycyjnymi źródłami energii o niemal płynnym przejściu z trybu magazynowania w tryb oddawania. Są jednak bardzo drogie. Możliwości budowy zbiorników szczytowo-pompowych są uzależnione od ukształtowania terenu i od lokalnych warunków hydrologicznych, które często wymuszają budowę w miejscach oddalonych (np. góry). To powoduje, że budowa jest skomplikowana i dodatkowo brakuje w pobliżu infrastruktury energetycznej.

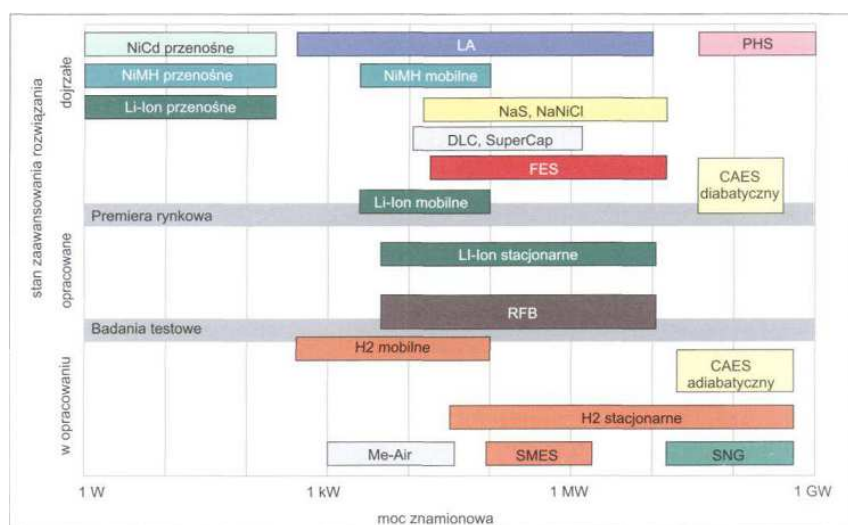
Elektrownie szczytowo-pompowe w skali świata stanowią około 3 % mocy zainstalowanej (około 125 GW). Elektrowni o mocy ponad 1 GW jest około 40. Największą instalacją jest Lewiston Niagara (USA) o mocy 2,88 GW i wysokości spiętrzania 33 m. Rekord wysokości spiętrzania należy do elektrowni włoskiej Piastra Edolo (moc 1,02 GW), który wynosi 1260 m [1].

W Polsce w elektrowniach szczytowo-pompowych zainstalowana jest moc 1767,6 MW, co stanowi 4,73 % mocy zainstalowanej w tym: Żarnowiec – 716 MW, Porąbka – Żar – 500 MW, Zespół Elektrowni Wodnych Solina – Myczkowce – 200 MW, Żydowo – 167 MW, Czorsztyn-Nidzica – Sromowce Wyżne – 94,6 MW, Dychów – 90 MW [12, 13, 15, 17, 26].





Rys. 4. Porównanie parametrów technicznych dla różnych technologii zasobników energii elektrycznej (FW – koło zamachowe, PSH – elektrownia szczytowo-pompowa, CAES – system sprężonego powietrza, Metal Air, Zinc Air, NaS, Li-Ion, Ni-Cd, Ni-MH, Lead-Acid – baterie chemiczne w różnych technologiach, Flow – baterie przepływowo, EDLC – superkondensatory) [25].



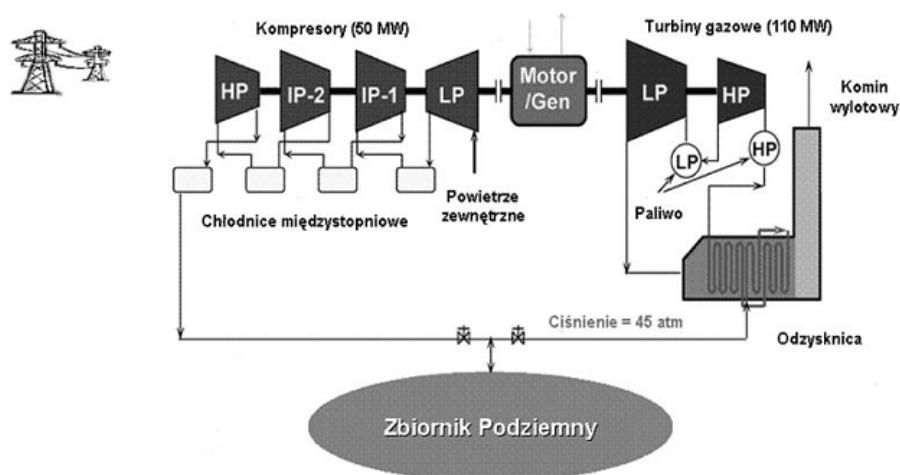
Rys. 5. Stan zaawansowania technicznego dostępności poszczególnych technologii zasobników energii [9]

Pneumatyczne zasobniki energii CAES

W zasobnikach ze sprężonym powietrzem wykorzystuje się naturalne zbiorniki podziemne (wyrobiska po kopalniach soli, groty skalne, jaskinie). Sprężone powietrze znajduje się pod ciśnieniem w granicach od 70 do 100 atm. Przykładowo zbiornik o

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

pojemności 300 tys. m³ uruchomiony w 1978 roku w Huntorf (Niemcy) pozwala na pracę turbiny o mocy 290 MW w czasie do 3 godzin. Robocze ciśnienie zmienia się w tym czasie z 70 atm do 20 atm. Zbiornik o objętości 5,32 mln m³ (Mc Intosh, Alabama, USA, uruchomienie w 1991 roku) pozwala na pracę turbiny o mocy 110 MW w czasie do 26 godzin. Czas trwania uruchomienia turbiny wynosi około 9 minut. Schemat działania instalacji przedstawia rysunek 7. Sprawność zasobników CAES dochodzi do 85 %. Dużym problemem technicznym tych instalacji jest znaczący wzrost temperatury podczas sprężania powietrza. Wzrostowi ciśnienia od 1 atm do 100 atm towarzyszy przyrost temperatury wynoszący 800 °C. Przy rozprężaniu powietrze musi być ogrzewane, do czego używany jest gaz. Największym zasobnikiem CAES (ok. 10 mln m³) będzie instalacja w Norton (Ohio USA), gdzie przewidziana jest praca 9 turbin o mocy 300 MW każda [1, 10, 13, 14, 21, 26].

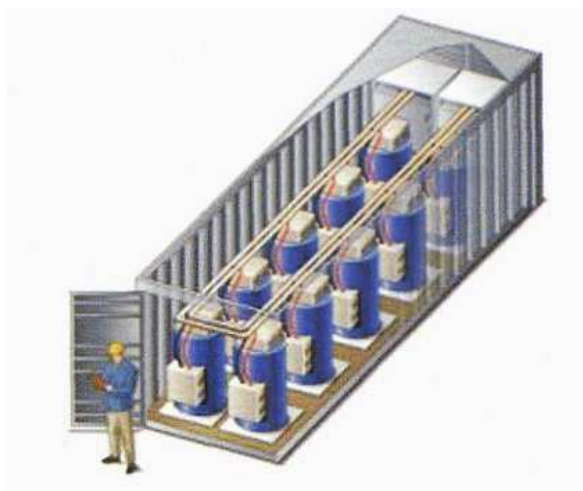


Rys. 6. Schemat działania instalacji magazynowania energii w postaci sprężonego powietrza o mocy 110 MW (projekt Mc Intosh) [21].

Energia kinetyczna wirujących mas

Jedną z najstarszych technik gromadzenia energii jest koło zamachowe, które gromadzi energię w postaci kinetycznej, z silnikiem elektrycznym przyspieszającym obroty oraz tym samym silnikiem działającym jako generator w czasie jej rozładowywania. Koła zamachowe są projektowane na maksimum oddawanej mocy lub na maksimum gromadzenia energii. Systemy wolnoobrotowe są wykonywane z wirnikami stalowymi i są przeznaczone do oddawania dużej mocy, a systemy szybkoobrotowe z wirnikami kompozytowymi mogą zarówno oddawać dużą moc, jak i gromadzić dużą energię. Zaletą nowoczesnych kół zamachowych jest ich trwałość – mogą one wykonać ponad 100 tysięcy pełnych cykli ładowania i rozładowania. W Stanach Zjednoczonych koła zamachowe służą do stabilizacji częstotliwości sieci. Firma Beacon Power Corp dostarczyła do elektrowni Stephentown ponad 160 magnetycznie lewitujących kół zamachowych, każde o masie 1150 kg. Urządzenia te pracują w sposób ciągły; przyspieszając i zwalnając utrzymują pracę sieci miejskiej Nowego Jorku przy

stałej częstotliwości 60 Hz. Moc znamionowa koła zamachowego wynosi 8 MW. Przełączanie z pełnej mocy oddawanej na pełną moc pobieraną odbywa się w ciągu kilku sekund. Na rysunku 7 przedstawiono zestaw kontenerowy zasobników Smart Energy Matrix (jednostki 250 kW/4 min , 20 tys. o/min) [1, 2, 3, 10, 26].



Rys. 7. Kontenerowy zestaw zasobników z kołami wirującymi [1]

Nadprzewodzące układy cewek

W zasobnikach typu SMES energia jest gromadzona w polu magnetycznym indukowanym w cewce nadprzewodzącej zasilanej prądem stałym. Cewka uzyskuje właściwości nadprzewodnika po schłodzeniu jej do temperatury nadprzewodnika za pomocą ciekłego helu (-269°C) lub ciekłego azotu (-200°C). Instalacja kriogeniczna ma duży udział w kosztach całego systemu. Zastosowanie materiałów nadprzewodzących, które nie będą traciły swych właściwości w wysokich temperaturach znacznie ograniczyłoby koszty całkowite instalacji.



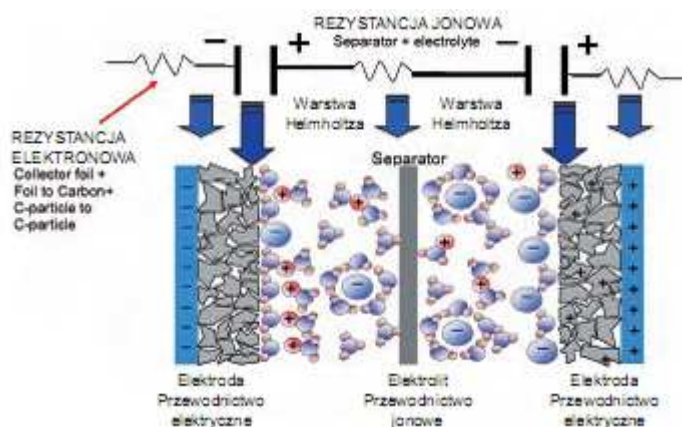
Rys.8. Kontenerowy zasobnik D-SMES magazynujący energię 3 MJ [1]

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Technologia SMES jest bardzo droga. Dotychczasowe badania dowodzą, że użycie w przyszłości tej technologii do budowy zasobników o pojemnościach w granicach 100 MWh do zastosowania w sektorze przesyłu i dystrybucji może być uzasadnione z ekonomicznego punktu widzenia. Zasobniki SMES są stosowane w Japonii, Europie oraz USA. W Stanach Zjednoczonych są instalowane tzw. D-SMES (Distributed-SMES), które służą do eliminowania zaników napięcia w sieciach energetycznych (138 kV, 69 kV i 12 kV) oraz PQ-SMES lub Micro-SMES dedykowane indywidualnym odbiorcom [1, 10, 17, 26]. Kontenerowy zasobnik D-SMES zainstalowany na przyczepie samochodowej przedstawia rysunek 8.

Kondensatory

Kondensatory dużych pojemności, dzięki zastosowaniu odpowiedniego elektrolitu oraz elektrod z materiałów o bardzo dużej powierzchni przy małej masie, osiągają ogromne pojemności przekraczające 1000 F. Dzięki ogromnej powierzchni elektrod węglowych wykonanych w postaci włókien węglowych osiągnięto powierzchnię od 1000 do 3000 m²/g masy elektrod. Pierwsze kondensatory z porowatymi elektrodami o dużej powierzchni zostały skonstruowane i opatentowane w 1957 roku przez firmę General Electric. W budowie superkondensatora można wyróżnić: dwie niereaktywne porowate elektrody, elektrolit oraz separator. Podstawowym związkiem budowy elektrod w superkondensatorze jest zwinięty grafen wykonany z nanorurek węglowych. Do zalet superkondensatorów należy zaliczyć szybkość ładowania i rozładowania oraz bardzo dużą liczbę cykli pracy, wysoką sprawność i gęstość mocy przy stosunkowo małej impedancji wewnętrznej, bezobsługowości, małą masę i znikomą szkodliwość dla środowiska. Do wad zaliczamy: małe napięcie dopuszczalne pojedynczego ogniwa, upływność, spadek napięcia wraz z rozładowaniem, stosunkowo małą gęstość energii.



Rys. 9. Schematyczne przedstawienie superkondensatora z warstwą podwójną ECDL [20]

Schematyczne przedstawienie struktury superkondensatora z warstwą podwójną przedstawia rysunek 9. Powstały dwie konstrukcje superkondensatorów: zwijane i składane. Superkondensatory składane mają mniejszą gęstość energii niż zwijane, ale

znacznie większą moc (możliwość pracy z dużymi prądami oraz niskimi stratami). Ich napięcie pracy może wynosić - od 14 do 700 V. Z porównania typowych cykli pracy akumulatorów i kondensatorów wynika że, ze względu na liniowy spadek napięcia wraz z rozładowaniem kondensatora, zastąpienie akumulatorów superkondensatorami wymaga dodatkowych środków technicznych stabilizujących napięcie w celu pełnego wykorzystania zgromadzonej w kondensatorze energii [20]. Zastosowanie superkondensatorowych zasobników energii w urządzeniach umożliwi zwiększenie stabilności pracy systemu, tłumienie oscylacyjnych stanów przejściowych i innych zaburzeń systemu. Zastosowanie superkondensatorów jako dodatkowego źródła napięcia w układach kondycjonowania energii dużej mocy umożliwi praktyczną realizację dopasowania jakości dostaw energii do potrzeb odbiorców. Superkondensatorowe zasobniki energii o mocy rzędu 100 – 1000 MW, wyposażone w odpowiednią energoelektronikę umożliwią sprawniejszą regulację mocy czynnej i częstotliwości w systemie elektroenergetycznym [1, 5, 10, 13, 15, 17, 26].

Akumulatory chemiczne

Systemy z bateriami akumulatorów charakteryzują się bardzo dużą ilością typów stosowanych ogniw oraz bardzo szerokim zakresem mocy realizowanych instalacji. Bateryjne zasobniki energii, które bazują na akumulatorach ołowiowo-kwasowych mogą być projektowane jako duże magazyny energii lub jako okresowe magazyny energii. Układy zbudowane z tych akumulatorów są najtańszą opcją dla większości aplikacji elektroenergetycznych. Technologia akumulatorów kwasowo-ołowiowych jest w pełni wykorzystywana, a jej rozwój dobiega końca. Nowe technologie to : baterie nikielowe, sodowo-siarkowe, litowo-jonowe, ogniwa z depolaryzacją powietrzną (baterie aluminiowo-powietrzne, magnezowo-powietrzne, cynkowo-powietrzne), cynkowo-bromowe. Zalety i wady akumulatorów chemicznych przedstawione są w tabeli 3. O właściwościach technicznych zasobnika baterijnego, jego dynamice decyduje zastosowany przetwornik energoelektroniczny, a nie technologia akumulatorowa.

Tabela 3. Zalety i wady technologii umożliwiających budowę zasobników energii elektrycznej dużej mocy i pojemności [17]

Technologia	Zalety	Wady
Elektrownie wodne pompowe	Dojrzała technologia. Duża gęstość energii i mocy	Ograniczenia geograficzne i geologiczne budowy instalacji. Duże koszty inwestycyjne. Długi okres budowy. Przeznaczenie – duże instalacje
Zasobniki CAES	Dojrzała technologia. Duża gęstość energii i mocy	Ograniczenia geograficzne i geologiczne budowy instalacji. Paliwo. Duże koszty inwestycyjne. Długi okres budowy. Przeznaczenie – duże instalacje.
Zasobniki SMES	Duża gęstość mocy	Mała gęstość energii. Znaczna moc potrzeb własnych. Droga technologia.

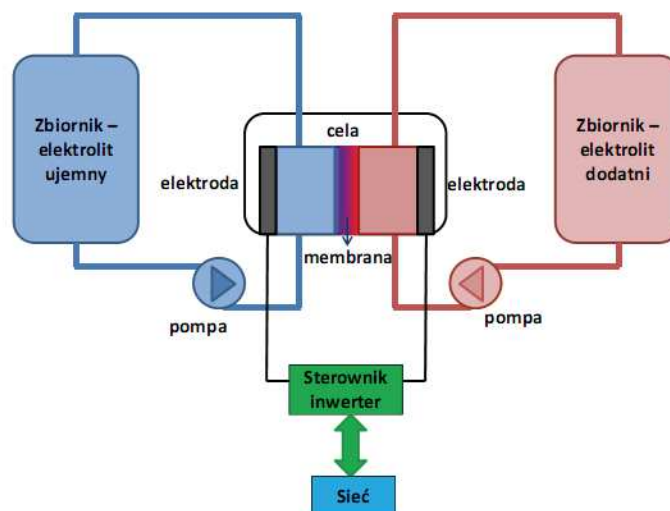
VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

Technologie akumulatorowe	Kwasowo- ołowiowe	Dojrzała technologia. Ogólnodostępna. Stosunkowo długi okres eksploatacji.	Wymaga obsługi i nadzoru technicznego. Mała gęstość mocy i energii. Wpływ temperatury otoczenia na pojemność baterii. Wysokie napięcie głębokiego rozładowania.
	Sodowo-siarkowe (NaS)	Dojrzała technologia. Duża gęstość mocy i energii. Duża sprawność.	Droga technologia. Wysoka temperatura pracy
	Wanadowe (VRB)	Duża gęstość mocy i energii. Przeznaczone do dużych instalacji.	Technologia na etapie rozwoju. Droga technologia. Trudna standaryzacja.
	Cynkowo- bromkowe (Zn-Br)	Duża gęstość mocy i energii. Przeznaczone do dużych instalacji.	Technologia na etapie rozwoju. Duże koszty utrzymania w ruchu. Zawiera materiały łatwo korodujące i toksyczne.
	Litowo-jonowa (Li-ion)	Duża gęstość mocy i energii. Duża sprawność.	Technologia na etapie rozwoju. Droga technologia. Trudna w eksploatacji.
	Niklowo- kadmowa (Ni-Cd)	Dojrzała technologia. Duża gęstość energii. Długi okres eksploatacji. Duża odporność mechaniczna	Droga technologia. Zawiera materiały toksyczne.
	Niklowo- metalowo- wodorkowe (NiMH)	Dojrzała technologia. Duża gęstość energii. Długi okres eksploatacji. Duża odporność mechaniczna. Mniejsza liczba związków toksycznych w porównaniu z bateriami Ni-Cd	Droga technologia.

W tabeli 4 zestawiono przykładowe największe zasobniki energii elektrycznej z technologiami bateryjnym wykorzystywanymi do regulacji napięcia w systemie elektroenergetycznym [1, 5, 13, 15, 17, 18, 19, 26].

Tabela 4. Duże systemy bateryjne używane do regulacji napięcia i częstotliwości w systemie elektroenergetycznym [18]

Aplikacja: firma, miasto, kraj	Moc [MW]	Energia [MWh]	Konfiguracja baterii
Golden Valley Electric Association (GVEA), Fairbanks, USA	40	6,5	13 760 ogniw, 4 łańcuchy po 3440 ogniw
Puerto Rico Electric Power Authority Battery System, Sabana Llana, Puerto Rico	20	14	6000 x 1600 Ah, 6 łańcuchów równoległych po 1000 ogniw
Berliner Kraft und Ligt (BEWAGO, Berlin , Niemcy	17	14	7080 x 1000 Ah, 12 łańcuchów po 590 ogniw
Southern Kalifornia Edison, Chino, Kalifornia, USA	10	40	8256 x 2600 Ah, 8 równoległych łańcuchów po 1032 ogniwa
Futumata, Prefektura Aomori, Japonia	34	238	Brak danych
Sumitomo Densetsu Office, Osaka, Japonia	3	0,8	60 modułów po 50 kW
Brockway Standard lithography Plant, Homerville , Georgia, USA	2	0,055	2000 ogniw, 8 modułów po 250 kW



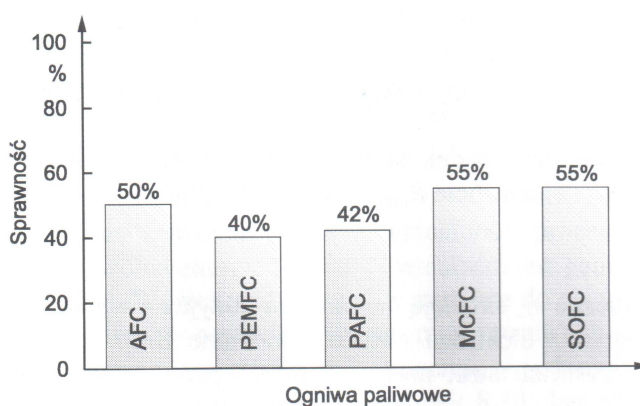
Rys. 10. Schemat baterii przepływowej vanadium redox [25]

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

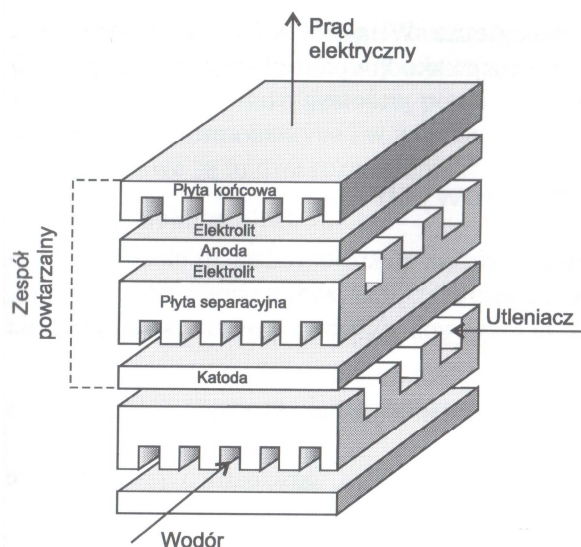
Innym rodzajem źródła energii elektrycznej wykorzystującym reakcję chemiczną jest technologia baterii przepływowych Vanadium Redox. Chemicy z Instytutu Fraunhofer największy potencjał widzą w mieszkankach wanadu, rozpuszczonych w wodzie i kwasie siarkowym. Wanad jest odpadem uzyskiwanym przy rafinowaniu ropy oraz przy produkcji tytanu. Bateria ta działa w oparciu o wymianę elektronów pomiędzy dwoma roztworami wanadu o różnym stopniu utlenienia poprzez specjalną membranę (rysunek 10) Akumulator wytrzymuje przynajmniej 10 000 cykli ładowanie – rozładowanie. [4, 25].

Ogniwa paliwowe

Ogniwo paliwowe składa się z elektrody (anoda) zasilanej wodorem oraz elektrody (katody), do której doprowadza się powietrze lub tlen. Pomiedzy elektrodami znajduje się elektrolit o przewodzeniu jonowym. Elektrody są połączone obwodem zewnętrznym. Zarówno wodór, jak i tlen reagują z elektrolitem, a w wyniku przewodności jonowej elektrolitu w obwodzie zewnętrznym płynie prąd. Proces łączenia wodoru i tlenu zachodzi izotermicznie i bez płomienia, a jego sprawności osiąga nawet 75 %. Uzyskiwane na ogniwie napięcie ma wartość 0,8 V, przy gęstości prądu 250 mA/cm². Firma National Power zbudowała pierwszą przemysłową instalację gromadzenia energii elektrycznej z wykorzystaniem ogniwi paliwowych w Didcot (Oxford). Docelowa zdolność gromadzenia energii w tej instalacji wynosi 120 MWh. Czas rozruchu elektrowni z modułami wypełnionymi elektrolitem wynosi 2 minuty, a przejście z jednego stanu do drugiego wynosi 0,02 s. W Barford (Wielka Brytania) działa elektrownia szczytowa z rewersyjnymi ogniwami paliwowymi, siłownia o mocy 15 MW i zdolności magazynowania energii 120 MWh. Do zalet ogniwi paliwowych zaliczamy: małe zużycie wody, stosunkowa duża sprawność, cicha praca, możliwość skojarzonego wytwarzania prądu i ciepła, długa żywotność, niezawodność pracy, bark emisji szkodliwych gazów i pyłu. Ogniwo paliwowe jest jeszcze stosunkowo drogie. Rysunek 11 przedstawia maksymalną sprawność ogniwi paliwowych, a rysunek 12 widok ogniwa paliwowego [5, 6, 13, 15].



Rys. 11. Maksymalna sprawność ogniwi paliwowych: AFC – ogniwo alkaliczne, PEMFC – ogniwo polimerowe, PAFC – ogniwo kwasowe, MCFC – ogniwo węglowe, SOFC – ogniwo tlenkowo-ceramiczne [15]



Rys. 12. Widok ogniwa paliwowego [15]

Wnioski

Wykorzystanie nowych technologii do budowy zasobników energii elektrycznej charakteryzujących się bardzo dużą pojemnością i mocą, pozwalającą realizować usługi systemowe w ujęciu obszarowym, musi być poprzedzane za każdym razem analizami uwzględniającymi krajowe realia rynkowe.

W dobie rozwoju wytwarzania energii elektrycznej w oparciu o źródła odnawialne oraz uwzględniając krzywą dobowego obciążenia KSE zastosowanie zasobników energii może przynieść znaczące korzyści przedsiębiorstwom wytwarzającym energię elektryczną, spółkom przesyłowym i dystrybucyjnym oraz odbiorcom. Zastosowanie zasobników energii elektrycznej pozwoli na złagodzenie krzywej dobowego obciążenia, zmaleją straty przesyłowe, zwiększy się niezawodność dostaw energii elektrycznej. W stanach awaryjnych odpowiednio dobrane zasobniki energii elektrycznej mogą spełniać rolę źródeł interwencyjnych o odpowiednim czasie pracy przyczyniając się do poprawy bezpieczeństwa zasilania. O ostatecznym doborze rodzajów magazynów, ich liczby, stopnia rozproszenia, miejsca zainstalowania powinna decydować odpowiednia analiza techniczno-ekonomiczna.

Literatura:

- [1] Baranecki A.: Zasobniki energii. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 7 – 8 (s.25-29), 2004
- [2] Bobrowski W. (opracował): Koła zamachowe stabilizujące częstotliwość sieci w USA. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 3 (s.67), 2012
- [3] Bobrowski W. (opracował): Nowe potrzeby w zakresie gromadzenia energii. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 3 (s.50 – 51), 2009
- [4] Brzozowski M. (opracował): Akumulatory przepływowe. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 3 (s.57 – 58), 2010
- [5] Czerwiński A.: Akumulatory baterie ogniwa. Wydawnictwa Komunikacji i Łączności, Warszawa, 2005
- [6] Dmowski A., Dzik T.: Odnawialne źródła energii współpracujące z ogniwami paliwowymi jako nowoczesnymi zasobnikami energii używane do produkcji energii elektrycznej. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 7 – 8 (s.21 – 24), 2004

VIII Konferencja Naukowo-Techniczna – i-MITEL 2014

- [7] Dyrektywa 2009/28/WE z dnia 23 kwietnia 2009
- [8] Gładys H., Matla R.: Praca elektrowni w systemie elektroenergetycznym. Wrocław – Warszawa, WNT, 1999
- [9] Hajdrowski K.: Magazynowanie energii elektrycznej. *Energia Elektryczna*, nr 11, 2012.
- [10] Herlender K.: Magazynowanie energii elektrycznej w systemach generacji rozproszonej. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 9 (s.6 – 8), 2012
- [11] Hoppel W., Olejnik B.: Elektroenergetyczna automatyka zabezpieczeniowa dla sieci średniego napięcia z elektrowniami lokalnymi (cz. I, cz. II). *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 6 (s.12-16), nr 9 (s.70-73), 2013.
- [12] <http://pl.wikipedia.org/w/index.php?oldid=38321155>
- [13] Iwanicki M.: Sposoby magazynowania energii elektrycznej. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 5 (s.32 – 34), 2013
- [14] Jankowski D.: CAES – akumulator energii współpracujący z OZE, - jako system racjonalnego zarządzania energią. www.innowrota.pl/node/240
- [15] Jastrzębska G.: Odnawialne źródła energii i pojazdy proekologiczne. Wydawnictwa Naukowo-Techniczne, Warszawa, 2007
- [16] Kacejko P.: Generacja rozproszona w systemie elektroenergetycznym. Lublin, Wydawnictwo Politechniki Lubelskiej, 2004.
- [17] Kłos M., Paska J., Rosłaniec Ł., Marchel P., Michalski Ł.: Magazyny energii elektrycznej dużej mocy. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 9 (s.3 – 7), 2013
- [18] Kłos M., Paska J., Rosłaniec Ł., Michalski Ł., Marchel P.: Baterie akumulatorów jako magazyn energii elektrycznej w systemach elektroenergetycznych. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 8 (s.46 – 49), 2013
- [19] Kopczyk M., Osińska-Broniarz M.: Akumulator – ekologiczna alternatywa źródła energii dla napędu w systemie transportu. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 6 (s.7 – 9), 2013
- [20] Koseda H., Głowacki F.: Możliwości zastosowania superkondensatorów do poprawy jakości energii elektrycznej w inteligentnych sieciach elektroenergetycznych smart grid. *Wiadomości Elektrotechniczne*, nr 1(s.29 – 32), 2013
- [21] Kwiatkowski M.: Wykorzystanie technologii magazynowania energii elektrycznej w postaci sprężonego powietrza w ramach integracji farm wiatrowych z systemem elektroenergetycznym. Zeszyt Naukowe Instytutu Gospodarki Surowcami Mineralnymi i Energią Polskiej Akademii Nauk, nr 78 (s.115 – 126), 2010
- [22] Lisowski A., Siudek I.: Rozproszone magazynowanie energii elektrycznej źródłami odnawialnymi. *Elektro Energetyka*, nr 1 (s.64 – 74), 2011.
- [23] Lubośny Z.: Farmy wiatrowe w systemie elektroenergetycznym. Wydawnictwa Naukowo – Techniczne, Warszawa, 2009.
- [24] Ministerstwo Gospodarki: Polityka Energetyczna Polski do 2030. URM 2009 nr 202
- [25] Siewierski T., Szyrowski M.: Zasobniki energii elektrycznej i bilansowanie odnawialnych źródeł energii. *Elektro Energetyka*, nr 3-4 (s. 65 – 75), 2012.
- [26] Sikora R., Zeńczak M.: Magazynowanie energii elektrycznej w systemie elektroenergetycznym. *Napędy i Sterowanie*, nr 2 (s.61 - 66), 2011.
- [27] www.pse-operator.pl
- [28] www.ptpiree.pl/index.php?d=5&s=liczen_2011
- [29] www.ure.gov.pl/uremapoze/mapa.html
- [30] Zarębski T.: Problemy magazynowania energii elektrycznej z odnawialnych źródeł. V Konferencja Naukowo-Techniczna MITEL – 2008 „Materiały i Technologie w Elektrotechnice”. Gorzów Wlkp., 9-11 kwietnia 2008, s.288 – 291.

Autorzy: mgr inż. Grzegorz Dąbrowski, dr inż. Krzysztof Woliński; PGE Dystrybucja SA Oddział Białystok, ul. Elektryczna 13, 15-950 Białystok; e-mail: grzegorz.dabrowski@pgedystrybucja.pl; krzysztof.wolinski@pgedystrybucja.pl