

REGULACJA MOCY

GRZEGORZ BŁAJSZCZAK

PSE-Operator SA

ALTERNATYWNE SPOSOBY MAGAZYNOWANIA ENERGII

Praca systemu elektroenergetycznego jest związana z ciągłym równoważeniem zapotrzebowania i wytwarzania energii elektrycznej. Odbiorcy energii elektrycznej zmieniają wielkość pobieranej energii w zależności od swoich potrzeb. Wielkość energii wywarzanej musi być zawsze dostosowana do aktualnej konsumpcji. W zmianach zapotrzebowania można wyróżnić cyklicznie pojawiające się „szczyty” i „dolinki”. Na zmiany zapotrzebowania nakładają się dodatkowo zmiany energii wytwarzanej w generatorach zależnych od czynników pogodowych np. w elektrowniach wiatrowych. Nadażanie za zmianami realizuje się poprzez zmianę punktów pracy generatorów w elektrowniach wodnych i ciepłych. Praca bloku cieplnego poniżej mocy znamionowej oznacza na ogół mniej ekonomiczne wytwarzanie energii. Duże różnice między „szczytami” i „dolinami” zapotrzebowania mogą wymagać odstawienia i ponownego uruchamiania bloków, co wiąże się z jeszcze większymi stratami. Rozwiązaniem tego problemu jest gromadzenie energii w okresach minimalnego zapotrzebowania i oddawanie jej w okresach szczytowego zapotrzebowania. W celu dostosowania wytwarzania do konsumpcji prowadzi się regulację godzinową, minutową i sekundową. Wymienione typy regulacji wymagają przechowania energii na okres odpowiednio: kilku godzin, minut i sekund. Poniżej przedstawiono opis różnych sposobów przechowywania energii dla potrzeb regulacji.

ANALIZA MOŻLIWOŚCI I PRZEBIEGU PROCESÓW MAGAZYNOWANIA ENERGII

Proces magazynowania energii elektrycznej wymaga na ogół jej przetworzenia na inny rodzaj energii, bardziej dogodny do przechowywania, i następnie powrót do energii elektrycznej o określonych parametrach. W tabeli 1 zestawiono przykłady najbardziej rozpowszechnionych bezpośrednich przetworników energii.

Tabela 1

Możliwości wykorzystania nieelektrycznych magazynów energii – przetworniki

w postaci:	mechaniczna	elektryczna	cieplna	chemiczna	elektromagnetyczna	jądrowa
z postaci:						
mechaniczna		prądnicą				
elektryczna	silnik elektryczny		piec oporowy	wanna elektrolityczna	żarówka	
cieplna	turbina parowa	generator MHD				
chemiczna		ogniwo galwaniczne	kocioł parowy			
elektromagnetyczna (światlna)		ogniwo słoneczne	kolektor słoneczny			
jądrowa			reaktor jądrowy			

Do bezpośrednich sposobów przechowywania energii elektrycznej można zaliczyć magazynowanie energii w polu magnetycznym płynącego prądu i w polu elektrostatycznym.

Magazynowanie energii w innej postaci jest możliwe jeżeli proces przetwarzania jest odwracalny. Opłacalność takiego procesu jest uwarunkowana wysoką sprawnością przetwarzania i małymi stratami przy przechowywaniu energii w nowej postaci.

Na koszty magazynowania energii składają się koszty wynikające ze strat:

$$K_S = n [\eta_1 E_1 + \eta_m E_m + \eta_2 E_2] c,$$

gdzie:

- η_1 – sprawność przetwarzania energii elektrycznej na inny rodzaj energii
- E_1 – ilość energii wprowadzanej do „magazynu”
- η_m – sprawność (straty) magazynowania energii
- E_m – ilość energii przechowywanej w „magazynie” (w wielu układach nie można zejść poniżej minimalnego poziomu)
- η_2 – sprawność przetwarzania na energię elektryczną o określonych parametrach
- E_2 – ilość energii pobieranej z „magazynu”
- c – średnia cena energii elektrycznej
- n – liczba cykli magazynowania

oraz koszty samego „magazynu” energii:

$$K_M = K_Z + K_{Ob} + K_U,$$

gdzie:

- K_Z – koszt zakupu, instalacji i uruchomienia urządzeń
- K_{Ob} – kosztu bieżącej obsługi
- K_U – koszty utylizacji (rekultywacji) po wykorzystaniu wszystkich cykli gromadzenia energii danego „magazynu”

Tabela 2

Opłacalność przemian i magazynowania energii

Forma magazynowanej energii	Koszty magazynowania, w czasie do 12 godzin	Sprawność uzyskana z energii elektrycznej	Sprawność zamiany na energię elektryczną
elektryczna	<i>duże</i>	<i>bez strat</i>	<i>bez strat</i>
mechaniczna	<i>małe</i>	<i>bardzo duża</i>	<i>bardzo duża</i>
cieplna	<i>bardzo duże</i>	<i>bez strat</i>	<i>mała (*)</i>
chemiczna	<i>małe</i>	<i>duża</i>	<i>duża</i>
światlna (elektromagnetyczna)	<i>nie stosuje się</i>	<i>mała</i>	<i>mała</i>
jądrowa	<i>małe</i>	<i>nie stosuje się</i>	<i>mała (*)</i>

* Przemiana dwustopniowa

Przy analizie różnych sposobów gromadzenia energii należy również brać pod uwagę możliwość realizacji poszczególnych rozwiązań jako instalacji o dużych mocach przydatnych w energetyce zawodowej i porównywalnych z mocą istniejących elektrowni szczytowych.

BEZPOŚREDNIE MAGAZYNY ENERGII ELEKTRYCZNEJ

Magazynowanie energii w polu elektrostatycznym kondensatorów i superkondensatorów

Kondensator naładowany do pewnego napięcia posiada zgromadzoną w polu elektrostatycznym energię proporcjonalną do jego pojemności i kwadratu tego napięcia. Tradycyjne kondensatory wykorzystywane są do magazynowania energii na krótkie (poniżej sekundy) okresy czasu - ze względu na duże straty rozładowywania przez rezystancję wewnętrzną. W objętości 1 m³, przy napięciu 500 V można zgromadzić około 0,5 MJ (0,14 kWh) energii. Kondensatory mogą być budowane na praktycznie dowolnie wysokie napięcia oraz łączone szeregowo i równolegle.

Superkondensatory, najnowsze osiągnięcie nauki, pozwalają na gromadzenie wielokrotnie większych ilości energii. Wielką pojemność osiąga się dzięki bardzo rozwiniętej powierzchni elektrody

dochodzącej do 1200 m² na jeden gram substancji oraz niezwykle małej odległości między elektrodami. Drugą z elektrod stanowi elektrolit, a warstwa izolacyjna powstaje dzięki wytworzeniu zjawiska powierzchniowego na styku elektrolitu i elektrody. Napięcie pracy pojedynczych kondensatorów nie przekracza obecnie 3 V, co wymusza potrzebę ich szeregowego łączenia. Przy napięciu 500 V, w 5 sekcjach po 200 kondensatorów każda, o łącznej objętości 1 m³ można zgromadzić energię 8,5 MJ (2,36 kWh). Kondensatory te charakteryzują się praktycznie nieograniczoną liczbą cykli ładowania i rozładowania. Superkondensatory znajdują się nadal na etapie eksperymentów naukowych, a ich zastosowanie w energetyce zawodowej w najbliższych latach jest mało prawdopodobne.

Magazynowanie energii w polu magnetycznym indukcyjności i indukcyjności z nadprzewodnictwem

Prąd stały płynący przez cewkę powoduje zgromadzenie w polu magnetycznym tej cewki energii proporcjonalnej do indukcyjności i kwadratu płynącego prądu. Odłączenie cewki (indukcyjności) od zasilania i zwarcie jej końców spowoduje krążenie prądu w samej indukcyjności i utrzymywanie energii w polu magnetycznym. Płynący prąd powoduje straty energii na rezystancji zwojów cewki, w wyniku czego obniża się ilość zmagazynowanej energii. Tego typu magazyny mogą być stosowane jedynie na krótkie okresy czasu (poniżej sekundy). Wykorzystanie zjawiska nadprzewodnictwa eliminuje w dużym stopniu rezystancje i straty w indukcyjności, co pozwala na wielogodzinne, a nawet kilkudniowe przechowywanie energii. W tabeli 3 przedstawiono przykłady praktycznych zastosowań cewek z nadprzewodnictwem (źródło: IEEE Power Engineering Review Vol. 20, No 5, 2000, str. 18).

Tabela 3

Przykłady pracujących magazynów energii opartych o cewki z nadprzewodnictwem

Moc	Pojemność	Rok uruchomienia	Typ/producent	Miejsce pracy
500 kW	1 MJ (0,28 kWh)	1990	ASD support	USA
1 MW	3 MJ (0,83 kWh)	1993	PQDC TM	USA
1,4 MW	3 MJ (0,83 kWh)	1992	PQAC TM	USA
1,7 MW	3 MJ (0,83 kWh)	1997	PQVR TM	USA
2,5 MW	3 MJ (0,83 kWh)	2000	PQIVR TM	USA
2,5 MW	3 MJ (0,83 kWh)	2000	D-SMES TM	USA
1 MW	250 kJ (0,07 kWh)	2000	Forschungszentrum Karlsruhe	Niemcy
1 MW	4 MJ (1,11 kWh)	2000	ENEL	Włochy
1 MW	3,6 MJ (1 kWh)	2000	Kyushu Electric Power	Japonia
40 MW	480 MJ (133 kWh)	2000	ISTEC Toroidal	Japonia

MAGAZYNY ELEKTROCHEMICZNE

Baterie akumulatorów

Baterie akumulatorowe są obecnie najbardziej rozpowszechnionym sposobem przechowywania energii elektrycznej. W energetyce zawodowej stosuje się najczęściej baterie kwasowo-ołowiowe proste i z zaworami regulacyjnymi, szczelne i z odgazowywaniem, baterie niklowo-kadmowe oraz niklowo-hybrydowe. Większość typów baterii wymaga ciągłego monitorowania i okresowej obsługi. Ponieważ napięcie pojedynczego ogniwa wynosi około 2V, baterie łączone są szeregowo w celu osiągnięcia pożądanego napięcia. Magazyny bateryjne mogą być budowane na dowolną moc i pojemność, a ograniczenia wynikają jedynie z kosztów. W zastosowaniach praktycznych baterie dużej mocy nie służą do ciągłego lub cyklicznego zasilania, a jedynie stanowią rezerwę na wypadek awarii sieci. Większość typów baterii ulega całkowitemu zużyciu po 1000 cykli ładowania i rozładowania. Z tego względu, zastosowanie baterii do szybkiej regulacji mocy (pierwotnej lub wtórnej) lub kompensacji zapotrzebowania szczytowego w ciągu doby nie jest opłacalne. W PSE SA wykonano projekt magazynu bateryjnego (z układem falownikowym) dla potrzeb regulacji mocy, który mógłby dostarczać moc 10 MW w ciągu maksymalnie 15 minut przy napięciu przewodowym sieci 15 kV. Osiągnięcie pożądanego napięcia wymagało połączenia szeregowego 11 tysięcy ogniw. Obciążalność prądowa pojedynczego ogniwa była wystarczająca w tym zastosowaniu. Bateria taka, ustawiona w jed-

nym poziomie zajmuje około 400 m² i waży około 150 ton. Projekt nie został zrealizowany ponieważ korzyści z regulacji mocy nie zwróciłyby kosztów samych baterii w całym okresie ich żywotności.

Ogniwa paliwowe

Ogniwa paliwowe są innego typu magazynami energii, w odróżnieniu od baterii, które mogą być na przemian ładowane i rozładowywane. Ogniwo paliwowe jest generatorem, wytwarzającym energię elektryczną w wyniku reakcji chemicznej tak długo jak długo dostarczane jest paliwo (na ogół wodór). Podczas reakcji chemicznej powstaje również ciepło. Brak procesu spalania i emisji zanieczyszczeń oraz wytwarzanie energii poprzez syntezę wodoru i tlenu powoduje zaliczanie ogniw paliwowych do źródeł odnawialnych. Koszt 1 kW w ogniwie paliwowym wynosi obecnie, w zależności od typu, od 1500 do 3000 USD. Ocenia się, że w ciągu najbliższych 10 lat koszt ten powinien spaść poniżej 500 USD za 1 kW. Koszty te nie obejmują paliwa – wodoru. Ze względu na nowość tej technologii nie można wiarygodnie określić czasu ich eksploatacji.

Tabela 4

Parametry pojedynczych ogniw paliwowych

Typ	Nazwa	Sprawność	Sprawność z wykorzystaniem ciepła	Temperatura pracy [°C]	Moc instalacji użytkowych	Moc instalacji eksperymentalnych
PAFC	z kwasem fosforowym (ang.: <i>phosphoric acid</i>)	40 %	85 %	200	200 kW	1000 kW
PEM	z membraną wymiany protonów (ang.: <i>proton exchange membrane</i>)	40 %	60 %	80	50 kW	250 kW
MCFC	ze stopionym węglanem (ang.: <i>molten carbonate</i>)	60 %	85 %	650	10 kW	2000 kW
SOFC	z powłoką tlenkową (ang.: <i>solid oxide</i>)	60 %	85 %	1000	100 kW	220 kW
AI	zasadowy (ang.: <i>alkaline</i>)	70 %	–	200	0,3 kW	5 kW
DMFC	metanolowy (ang.: <i>direct methanol</i>)	40 %	–	100	–	1 kW

Na świecie pracuje już kilkadziesiąt dużych instalacji ogniw paliwowych. W tabeli 4 zestawiono parametry różnych typów ogniw paliwowych. Na zdjęciach na str. 31 przedstawiono największe pracujące zestawy – elektrownie ogniw paliwowych.

Jednym z największych projektów jest powstająca już elektrownia, w Little Barford w Wielkiej Brytanii. Planuje się tam instalacje ogniw typu Regenesys firmy Innogy Technology Ventures Ltd. o mocy 15 MW mogących dostarczać w szczycie 120 MWh energii. Koszt budowy szacuje się na około 21 milionów dolarów.

Ogniwa paliwowe projektowane i rozwijane są szczególnie do zasilania pojazdów. Ich zastosowanie w energetyce zawodowej dla potrzeb systemu energetycznego ma charakter eksperymentalny, a wynik tych eksperymentów jest nadal niepewny.

UKŁADY SPRZĘGAJĄCE

Opisane powyżej magazyny energii (kondensatory, cewki, baterie i ogniwa paliwowe) pobierają i oddają energię przy napięciu i prądzie stałym. Istnieje konieczność zamiany trójfazowego prądu (napięcia) przemiennego na prąd (napięcie) stałe przy ładowaniu magazynu, a następnie zamiany prądu (napięcia) stałego na trójfazowy prąd (napięcie) przemienny przy oddawaniu energii z magazynu do sieci. Funkcje tę spełnia energoelektroniczny układ pośredniczący pracujący jako prostownik i falownik. Wytworzenie sinusoidalnego kształtu prądu (napięcia) o akceptowalnie małych odkształceniach pociąga za sobą kilkuprocentowe straty mocy i wymaga rozwiniętej konfiguracji układu. Koszt układu pośredniczącego zależy od mocy i poziomu napięcia, i może nawet przewyższyć koszt samego magazynu energii.



Generator firmy Balard Power System o mocy 250 kW (PEM, instalacja eksperymentalna w laboratorium firmy)



Generator firmy Balard Power System o mocy 250 kW (instalacja użytkowa w Cinergy USA)



Generator firmy Balard Power System o mocy 250 kW (instalacja użytkowa w Bewag Niemcy)



Pięć zestawów wytwórczych z ogniwami paliwowymi firmy Fuel Cells o mocy 200 kW każdy, zasilających urząd pocztowy w Anchorage na Alasce (PAFC).



Widok projektowanej elektrowni w Little Barford w Wielkiej Brytanii 15 MW / 120 MWh



Wygląd zewnętrzny modułów ogniw Regensys firmy Innogy Technology Ventures Ltd.

MAGAZYNY ENERGII MECHANICZNEJ

Wirujące masy

Magazynowanie energii polega na rozpedzeniu do określonej prędkości koła o dużej masie. Dzięki dobremu ułożyskowaniu i odizolowaniu od zewnątrz, koło wiruje ze stałą prędkością i przechowuje energię w postaci energii kinetycznej masy. Zaletą tej metody jest prosta konstrukcja. Masa wirująca jest połączona wspólnym wałem z maszyną elektryczną, która może skokowo przechodzić od pracy silnikowej (gromadzenie energii) do pracy prądnicowej (oddawanie energii). Przy założeniu, że maszyna elektryczna pokrywa straty prędkości związane z tarciem, czas przechowywania energii jest praktycznie nieograniczony. Moc wymieniana z magazynem może osiągać bardzo duże wielkości i jest ograniczona jedynie mocą maszyny elektrycznej. Natomiast ilość gromadzonej energii nie jest na ogół zbyt duża. Największe instalacje tego typu to 8 MW (pojemność 0,5 MWh) w Stanach Zjednoczonych, 4 MW (pojemność 0,1 MWh) w Wielkiej Brytanii i 1 MW (pojemność 0,1 kWh) w Chinach.

Sprężone powietrze

Gromadzenie energii polega na sprężaniu powietrza w zbiornikach za pomocą kompresorów. Sprężone powietrze ze zbiorników kierowane jest do turbiny, która wprawia w ruch generator. Ponieważ wymagane są zbiorniki o dużej pojemności, w niektórych instalacjach wykorzystuje się do tego celu stare kopalnie. W Stanach Zjednoczonych zbudowano prototypową instalację, która pozwala na dostarczanie mocy 30 MW przez 6 godzin dziennie. Układ pracuje poprawnie od 15 lat, jednak zyski z magazynowania energii pokrywają jedynie bieżące koszty obsługi (głównie uszczelniania zbiorników – wyrobisk kopalni).

Zbiorniki wodne

Gromadzenie energii polega na nadaniu wodzie energii potencjalnej poprzez przepompowanie

jej do wyżej położonego zbiornika. Moc wymieniana z magazynem zależy jedynie od mocy maszyn elektrycznych, a ilość przechowywanej energii od wielkości zbiornika. Energia może być przechowywana praktycznie przez dowolnie długi okres.

PODSUMOWANIE

Pracujące obecnie magazyny energii można podzielić na instalacje użytkowe i eksperymentalne. Celem instalacji użytkowej jest odniesienie korzyści ekonomicznych. Celem instalacji eksperymentalnej jest sprawdzenie możliwości budowy i funkcjonowania, a koszt eksperymentu jest nieistotny. W niektórych instalacjach użytkowych najważniejszym jest dostarczenie energii w określonym miejscu (np. w kosmosie) i koszty wcześniejszego przygotowania są również mało istotne. „Magazyn” energii budowany na potrzeby krajowego systemu elektroenergetycznego jest przedsięwzięciem ukierunkowanym na zysk, a ponadto musi spełniać określone wymagania techniczne (głównie moc i pojemność). W tabeli 5 porównano dostępne obecnie technologie gromadzenia energii.

Tabela 5

Porównanie sposobów gromadzenia energii

	Możliwość przechowywania energii przez ponad 12 godzin przy umiarkowanych stratach	Możliwość wymiany mocy ponad 10 MW przy umiarkowanych kosztach budowy	Czas pracy powyżej 10 lat przy jednym cyklu ładowania i rozładowania dziennie
Kondensatory	nie	tak	tak
Superkondensatory	nie	nie	nie
Cewki	nie	tak	tak
Cewki z nadprzewodnictwem	nie	tak	tak
Baterie akumulatorów	tak	tak	nie
Ogniwa paliwowe	tak	nie	nie
Masy wirujące	nie	tak	tak
Sprężone powietrze	nie	tak	tak
Zbiorniki wodne	tak	tak	tak

Magazyny energii przeznaczone dla energetyki zawodowej powinny charakteryzować się możliwością przechowywania energii przy niskich kosztach przez co najmniej kilka godzin w celu umożliwienia wyrównywania zmieniającego się w ciągu doby zapotrzebowania. W typowym zastosowaniu magazyny energii będą ładowane i rozładowywane przynajmniej raz w ciągu doby. Większość z magazynów energii ma ograniczoną liczbę cykli ładowania i rozładowywania, co istotnie wpływa na zakres (typ regulacji) i czas ich wykorzystania. Niektóre z magazynów energii wykazują wysoką sprawność jako pojedyncze elementy, natomiast łączone szeregowo i równoległe w celu uzyskania dużych mocy, przydatnych w energetyce, wymagają dodatkowych układów wyrównawczych, znacząco obniżających ich sprawność. Magazyny takie jak: kondensatory i superkondensatory, cewki i cewki z nadprzewodnictwem, masy wirujące oraz sprężone powietrze charakteryzują się wysokimi kosztami przechowywania energii. Muszą one być ciągle doładowywane w celu pokrycia bieżących strat (w przypadku nadprzewodników – chłodzone). Wady tej nie mają natomiast magazyny wodne – przecieki i odparowywanie nie mają praktycznie wpływu na sprawność. Również baterie akumulatorowe i ogniwa paliwowe mogą z zadowalającą sprawnością przechowywać energię. Jednak w ich przypadku nie jest możliwe osiągnięcie wielu cykli ładowania i rozładowywania, co powodowałoby konieczność ich wymiany już po 2 – 3 latach. Tego typu magazyny mogą być przydatne jako rezerwa odtworzeniowa, na wypadek awarii systemowych. Na obecnym rozwoju techniki jedynym opłacalnym sposobem gromadzenia energii na potrzeby systemu elektroenergetycznego jest pompowanie wody do wyżej położonych zbiorników. Fakt ten potwierdza nie tylko analiza naukowo-techniczna, ale również światowa ekonomia w postaci dużej liczby pracujących i projektowanych elektrowni szczytowo-pompowych.