České vysoké učení technické

Fakulta strojní

Ústav energetiky Ú12115

Možnosti akumulace energií

Possibilities of energy storage

Bakalářská práce

Vedoucí práce: Ing. Pavel Skopec

Jakub Mertl

Praha 2017

ČESKÉ VYSOKÉ UČENÍ TECHNICKÉ V PRAZE

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Mertl** Jméno: **Jakub** Osobní číslo: **437090**

Fakulta/ústav: **Fakulta strojní**

Zadávající katedra/ústav: **Ústav energetiky**

Studijní program: **Teoretický základ strojního inženýrství**

Studijní obor: **bez oboru**

II. ÚDAJE K BAKALÁŘSKÉ PRÁCI

Název bakalářské práce:

Možnosti akumulace energií

Název bakalářské práce anglicky:

Possibilities of energy storage

Pokyny pro vypracování:

V dnešní době jsou velkým tématem obnovitelné zdroje energie. Jejich provoz je ovšem ovlivněn přírodními pochody a výroba elektřiny často neodpovídá aktuální spotřebě. Tento nesoulad je možné vyřešit akumulací energie. Cílem této práce je vytvořit rešerši problematiky akumulace elektrické energie. Student se bude zabývat rozdělením akumulace energií dle fyzikálních principů, velikostí akumulačních jednotek a jejich účinností.

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Pavel Skopec, ústav energetiky FS

Jméno a pracoviště druhé(ho) vedoucí(ho) nebo konzultanta(ky) bakalářské práce:

Datum zadání bakalářské práce: **18.04.2017** Termín odevzdání bakalářské práce: **02.06.2017**

Platnost zadání bakalářské práce: **31.12.2018**

Podpis vedoucí(ho) práce	Podpis vedoucí(ho) ústavu/katedry	Podpis děkana(ky)

III. PŘEVZETÍ ZADÁNÍ

Student bere na vědomí, že je povinen vypracovat bakalářskou práci samostatně, bez cizí pomoci, s výjimkou poskytnutých konzultací. Seznam použité literatury, jiných pramenů a jmen konzultantů je třeba uvést v bakalářské práci.

24.4.2017
Datum převzetí zadání

Podpis studenta

© ČVUT v Praze, Design: ČVUT v Praze, VIC

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem předloženou práci vypracoval samostatně a že jsem uvedl veškeré použité informační zdroje v souladu s Metodickým pokynem o dodržování etických principu při přípravě vysokoškolských závěrečných prací.

V Praze dne 2. 6. 2017 ……..

Jakub Mertl

Anotační list

Jméno autora:	Jakub Mertl
Název BP:	Možnosti akumulace energií
Anglický název:	Possibilities of energy storage
Akademický rok:	2016/2017
Ústav/Odbor:	Ústav energetiky
Vedoucí BP:	Ing. Pavel Skopec
Bibliografické údaje:	Počet stran: 43 Počet obrázků: 14 Počet tabulek: 3 Počet příloh: 0
Klíčová slova:	akumulace energie, obnovitelné zdroje energie, přečerpávací vodní elektrárna, CAES, setrvačníky, baterie, vodíkové hospodářství
Keywords:	energy storage, renewable energy sources, pumped-storage plant, CAES, flywheels, batteries, hydrogen economy
Anotace:	Práce se zabývá základním rozdělením technologií pro akumulaci elektrické energie. Podle typu přeměny energie jsou možnosti rozděleny na mechanickou, elektrochemickou, chemickou a elektromagnetickou akumulaci energie. Technologie jsou popsány z hlediska principu fungování, kladů a záporů a možného použití. V závěru práce jsou technologie srovnány. Součástí práce je i modelový příklad pro návrh přečerpávací vodní elektrárny.
Abstract:	This work describes different kinds of technologies used for electrical energy storage. Possibilities of energy accumulation are divided to mechanical, electrochemical, chemical and electromagnetic by the type of energy transformation. Individual technologies are described in terms of the principle of functioning, pros and cons and possible use. The end of the thesis is devoted to comparison. A model example for the design of the pumping hydroelectric power plant is also part of the work.

Poděkování

Rád bych poděkoval svému vedoucímu práce panu Ing. Pavlu Skopci za odborný dohled a cenné rady. Dále bych rád poděkoval Patriku Hanákovi za konzultaci na téma sekundárních článků. Závěrem bych rád poděkoval své rodině za podporu a zejména své mamince, která mi pomáhala s korekturou.

Obsah

1 Úvod 9
2 Mechanická akumulace energie 10
2.1 Přečerpávací vodní elektrárny 10
2.1.1 Princip 10
2.1.2 Účinnost 11
2.1.3 Provoz 11
2.1.4 Použití 11
2.1.5 Přečerpávací vodní elektrárny v ČR 12
2.2 Akumulace do stlačeného vzduchu 12
2.2.1 Princip 12
2.2.2 Druhy systémů a účinnost 13
2.2.3 Uložiště 15
2.2.4 Použití 15
2.3 Setrvačníky 16
2.3.1 Princip 16
2.3.2 Konstrukce setrvačníků 18
2.3.3 Použití 19
3 Elektrochemická akumulace energie 20
3.1 Sekundární články 20
3.1.1 Princip 20
3.1.2 Typy baterií 21
3.2 Průtokové baterie 23
3.2.1 Konstrukční princip 23
3.2.2 Výhody a nevýhody 24
3.2.3 Typy baterií 24
3.3 Použití baterií 25
4 Vodíkové hospodářství 27
4.1 Základní koncept 27
4.2 Získávání vodíku 27
4.2.1 „Klasické“ získávání z fosilních zdrojů 28
4.2.2 Elektrolýza vody 28
4.2.3 Vysokoteplotní elektrolýza 29

4.3 Skladování a logistika 30
4.3.1 Skladování v plynné formě 30
4.3.2 Skladování v kapalné formě 30
4.3.3 Skladování ve formě kovových hydridů 31
4.4 Energetické využití vodíku 31
4.4.1 Palivové články 31
4.4.2 Regulace obnovitelných zdrojů a akumulace energie 33
4.4.3 Výhody a nevýhody 33
5 Elektromagnetická akumulace energie 34
5.1 Superkondenzátory 34
5.1.1 Princip 34
5.1.2 Typy kondenzátorů 34
5.1.3 Vlastnosti a použití 35
5.2 Supravodivé cívky 35
5.2.1 Princip 35
5.2.2 Konstrukce a provedení 36
5.2.3 Vlastnosti a použití 36
6 Srovnání technologií 37
7 Návrh přečerpávací vodní elektrárny 38
8 Závěr 41
Seznam použitých zdrojů a literatury 42
Seznam obrázků 45
Seznam tabulek 45

Seznam použitých symbolů, indexů a zkratek

Zkratky

PVE/PHS – přečerpávací vodní elektrárna

CAES – akumulace energie do stlačeného vzduchu; tlakovzdušná elektrárna

OZE – obnovitelné zdroje energie

TES – akumulace tepelné energie

RFB – redoxní průtoková baterie

HFB – hybridní průtoková baterie

HTEL – vysokoteplotní elektrolýza

FC – palivový článek

EDLC – kondenzátor s elektrickou dvouvrstvou

SMES – akumulace energie do supravodivých cívek

Veličiny

m – hmotnost

h – výškový spád

t – čas

E – energie

P – výkon

P_G – výkon generátoru

$P_{Č}$ – výkon čerpadla

Q_Z – tepelné ztráty

η – účinnost

η_G – účinnost generátoru

$\eta_{Č}$ – účinnost čerpadla

η_C – celková účinnost

F – síla

I – moment setrvačnost

σ – napětí

ω – úhlová rychlost

Q – elektrický náboj

C – kapacita kondenzátoru

L – indukčnost cívky

V – objem

$\dot{V}$ – objemový průtok

$\dot{V}_G$ – objemový průtok turbínou

$V_{Č}$ – objemový průtok čerpadlem

ρ – hustota

g – tíhové zrychlení ($g = 9{,}81\ m/s^2$)

1 Úvod

Zásadním tématem posledních let v oblasti energetiky jsou obnovitelné zdroje. Zároveň je i velkým trendem stavba velkého množství fotovoltaických nebo větrných elektráren. Využívání energie z obnovitelných zdrojů je z ekologického hlediska velmi atraktivní a lze očekávat, že jejich podíl na celkové produkci energie bude v budoucnu vzrůstat, vzhledem k omezenému množství fosilních zdrojů energie. Obnovitelné zdroje energie však trpí zásadním nedostatkem, a to časovou nestabilitou. Máme-li v budoucnu využívat energie z obnovitelných zdrojů ve větším množství, je třeba vyřešit problematiku akumulace energie, jež by tento nedostatek dokázala odstranit.

Akumulace elektrické energie může probíhat mnoha způsoby. Téměř vždy se jedná o přeměnu na jinou formu energie (mechanickou, elektrochemickou, chemickou, …). Jednotlivé druhy akumulací se pak od sebe liší energetickou kapacitou, účinností, dobou akumulace aj. a od toho se odvíjí možnosti jejich použití.

Rešeršní část této práce se zabývá rozdělením technologii pro akumulaci elektrické energie. Jednotlivé technologie jsou popsány z hlediska principu fungování, použití, kladů a záporů atp. Druhou částí práce je modelový příklad pro návrh přečerpávací vodní elektrárny ze zadaných parametrů.

2 Mechanická akumulace energie

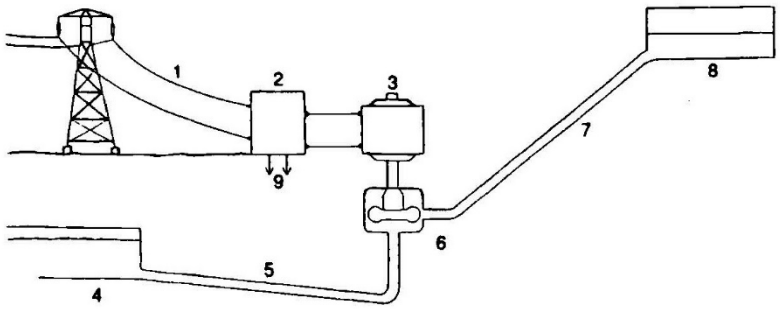
2.1 Přečerpávací vodní elektrárny

2.1.1 Princip

Přečerpávací vodní elektrárna (PVE) je modifikací klasické vodní elektrárny. Obecně elektrárny zahrnují dvě nádrže položené v různých výškách. Tyto mohou být buď přírodního charakteru, nebo postaveny uměle. [1]

Energie je uložena ve formě potenciální energie vody. Voda je přečerpána z nižší nádrže do vyšší, tato aktivita spotřebovává energii. Pokud je energii potřeba získat, je voda vypuštěna zpět do spodní nádrže přes turbínu, čímž se přeměňuje potenciální energie na elektrickou jako je tomu u klasické vodní elektrárny. [2] V mnoha případech je užito reverzní turbíny, kterou lze použít jako turbínu a při přečerpávání jako čerpadlo. [1]

Princip PVE je znázorněn na *Obr. 2.1-1*.



1 – přenos
2 – transformátor
3 – motorgenerátor[1]
4 – spodní nádrž
5 – odtok
6 – turbína a čerpadlo, popř. reverzní turbína
7 – přívodní kanál
8 – horní nádrž
9 – ztráty

Obr. 2.1-1: Schéma přečerpávací vodní elektrárny [3]

Energii uloženou v PVE lze popsat pomocí vztahu

$$E = m \cdot g \cdot h = \rho \cdot V \cdot g \cdot h,$$

kde ρ je hustota vody, V je přenesený objem (objem nádrže) a h je výškový rozdíl mezi nádržemi (spád).

Podobně lze popsat i výkon PVE

$$P = \dot{V} \cdot h \cdot \rho \cdot g \cdot \eta,$$

kde $\dot{V}$ je objemový průtok a η je celková účinnost.

[1] Motorgenerátor – synchronní stroj schopný pracovat jako motor při čerpadlovém provozu i jako generátor při turbínovém provozu [6]

Z obou vztahů je patrné, že jediné dvě veličiny, které lze měnit, jsou výškový rozdíl h a objem V, respektive objemový průtok $\dot{V}$; pro maximalizaci výkonu PVE je nutné stavět nádrže co největší a s co největším výškovým rozdílem.

2.1.2 Účinnost

Proces přečerpání vody a následné vypuštění bohužel není stoprocentně účinný. Část elektrické energie spotřebované k přečerpání vody se projeví jako ztráty. Těchto ztrát je celá řada – třecí ztráta při průchodu vody přívodním a odvodním kanálem, ztráty v generátoru a v turbíně, část energie si voda zanechá i po protečení a v neposlední řadě i ztráta vody odpařením a průsakem. S ohledem na všechny ztráty je účinnost PVE 70-80%, podle konkrétního provedení elektrárny. [2]

2.1.3 Provoz

Soustrojí PVE se může nacházet v následujících stavech:

- klidový stav
- turbínový provoz
- čerpadlový provoz
- kompenzační provoz

Přechod z klidového stavu do turbínového provozu většinou trvá do 1 minuty. Přechod mezi čerpadlovým a turbínovým provozem trvá běžně mezi 3 až 6 minutami. [4] Právě rychlé přechody z jednotlivých stavů jsou charakteristické pro PVE a jsou klíčové pro stabilizaci elektrické sítě.

2.1.4 Použití

K roku 2014 bylo 99% technologických provedení k akumulaci energie realizováno ve formě přečerpávací vodní elektrárny. [5] PVE jsou tedy nejrozšířenější technologií akumulace energie, nicméně jejich hlavní využití spočívá v kompenzaci výkyvů a stabilizaci elektrické sítě. Toto využití lze dále klasifikovat do dvou případů.

V prvním případě jde o elektrárny s velkým výkonem, především jaderné a tepelné. Jejich výkon během dne lze regulovat jen v omezené míře a je neekonomické, aby tyto elektrárny byly v provozu jen část dne. Proto se využívají PVE. V noci, kdy je elektřina levnější kvůli jejímu přebytku, se elektrická energie využije k tomu, aby se voda přečerpala do horní nádrže. Zde zůstane uložena a v případě nedostatku energie přes den je voda vypuštěna a přeměněna na elektrickou energii.

Druhý důvod je akumulace drahé energie vyprodukované z obnovitelných zdrojů energie – převážně větrné a sluneční. Jedním z hlavních problémů obnovitelných zdrojů je jejich časová nestálost. PVE pak tuto nestálost kompenzují – v době, kdy je produkováno velké množství elektrické energie, je tato energie uložena a je spotřebována později. [4; 6]

2.1.5 Přečerpávací vodní elektrárny v ČR

V České republice jsou v provozu tři přečerpávací vodní elektrárny: Dlouhé stráně, Dalešice a Štěchovice II.

2.1.5.1 Dlouhé stráně

Elektrárna se nachází v okrese Šumperk, do provozu byla uvedena v roce 1996. Jedná se o největší vodní elektrárnu v ČR s instalovaným výkonem 650 MW a zároveň s největším spádem v ČR – 510,7 m. Disponuje dvěma reverzními Francisovými turbínami o výkonu 325 MW. [7]

2.1.5.2 Vodní dílo Dalešice

Vodní dílo Dalešice se nachází na řece Jihlavě v okrese Třebíč. Vodní dílo Dalešice bylo vybudováno v souvislosti s výstavbou blízké Jaderné elektrárny Dukovany. Uvedena do provozu byla v roce 1978. Součástí vodního díla jsou nádrž v Dalešicích, vyrovnávací nádrž Mohelno, přečerpávací elektrárna Dalešice a průtočná vodní elektrárna Mohelno. Disponuje čtyřmi reverzními Francisovými turbínami a dohromady je její instalovaný výkon 480 MW. [8]

2.1.5.3 Štěchovice II

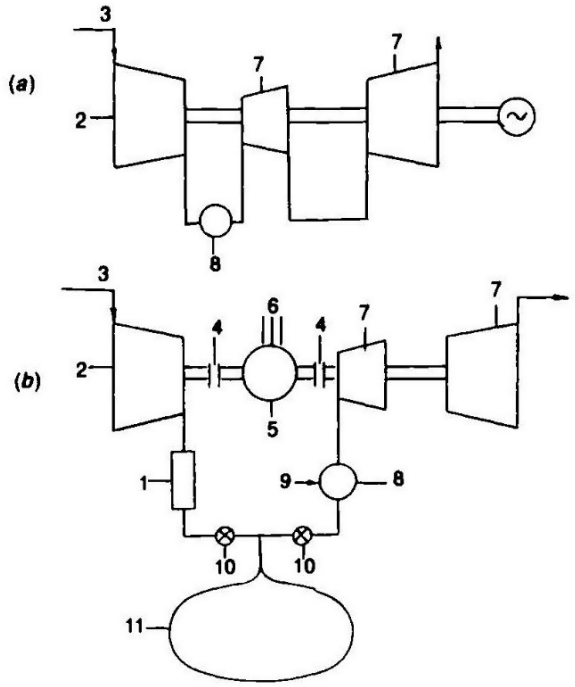
Vodní elektrárna Štěchovice se nachází na řece Vltavě v okrese Praha-západ. Do provozu byla uvedena v roce 1947. Je vybavena jednou reverzní Francisovou turbínou o výkonu 45 MW. [9]

2.2 Akumulace do stlačeného vzduchu

2.2.1 Princip

Akumulace do stlačeného vzduchu, zkr. CAES (z angl. Compressed air energy storage), je technologie akumulace elektrické energie využívající stlačitelnost vzduchu. Pro představu fungování této technologie uvažujme princip tryskového motoru, resp. plynové turbíny. Ta se skládá ze čtyř základních částí – kompresoru, spalovací komory, turbíny a generátoru; viz obrázek *2.2-1(a)*. Kompresor stlačuje vzduch z atmosféry a vhání jej do spalovací komory. Do komory je následně vstříknuto palivo a dochází k zažehnutí. Horké spaliny ze spalovací komory roztáčí turbíny a posléze odchází do okolí. Přibližně dvě třetiny mechanické energie generované

turbínou jsou použity k pohonu kompresoru, jenž se nachází na stejné hřídeli jako turbína. Zbývající třetina je přeměna v generátoru na elektřinu. [3]



1 – chladič
2 – kompresor
3 – přívod vzduchu
4 – spojky
5 – motorgenerátor
6 – přívod el. energie ze sítě
7 – turbína
8 – spalovač
9 – přívod paliva
10 – tlakové ventily
11 – úložiště vzduchu

Obr. 2.2-1: Schéma principu CAES [3]

V systému CAES je uspořádání podobné, jen jsou přidány nové části – spojky, tlakové ventily a úložiště stlačeného vzduchu; celé uspořádání je vyobrazeno na obrázku *2.2-1(b)*. Spojky jsou instalovány, aby kompresor a turbína mohly být připojeny k motorgenerátoru odděleně. Tímto způsobem může ke kompresi a expanzi média (vzduchu) docházet v různých časových okamžicích. [3]

Stejně jako u PVE je činnost rozdělena na dva režimy. První je komprese vzduchu na cca 70 MPa [10] a jeho ukládání, k té dochází v době, kdy je elektřiny nadbytek – v noci nebo v období, kdy je produkováno velké množství energie z OZE. Druhý režim je expanze, stlačený vzduch je použit ke spalování a k pohonu turbíny a tím i generátoru. Nastává v době, kdy je třeba vykompenzovat nedostatek elektrické energie.

2.2.2 Druhy systémů a účinnost

Kompresí vzduchu vzniká teplo, vzduch má po kompresi vyšší teplotu a je nutné jeho teplotu před uložením snížit. Při expanzi naopak teplota vzduchu klesá. Pokud není vzduchu předáno teplo z vnějšku, teplota vzduchu bude po expanzi nižší než před jeho kompresí. Způsob, jakým se naloží s teplem, jež vzniká při kompresi vzduchu, značně ovlivňuje účinnost celého děje.

Podle tohoto způsobu lze CAES systémy rozdělit do tří kategorií – diabatický, adiabatický a izotermický. [11]

a) diabatický

Při diabatickém procesu je vzduch po kompresi pomocí chladičů ochlazen a teplo je vypuštěno do okolí jako odpad. Takto je energie (často se jedná o drahou energii z OZE) potřebná ke kompresi ztracena. Později je třeba vzduch před expanzí opět ohřát. A protože expanze se provádí v době nedostatku elektrické energie, je třeba ohřev provádět za pomocí fosilních paliv (nejčastěji zemní plyn), což snižuje účinnost a zvyšuje náklady. Tento systém je nejjednodušší a také je jediný, který byl doposud v technologii CAES použit. [11] Účinnost tohoto cyklu dosahuje cca 40%. Účinnost lze zvýšit až na 55%, pokud jsou spaliny z turbíny použity k ohřevu stlačeného vzduchu. [10]

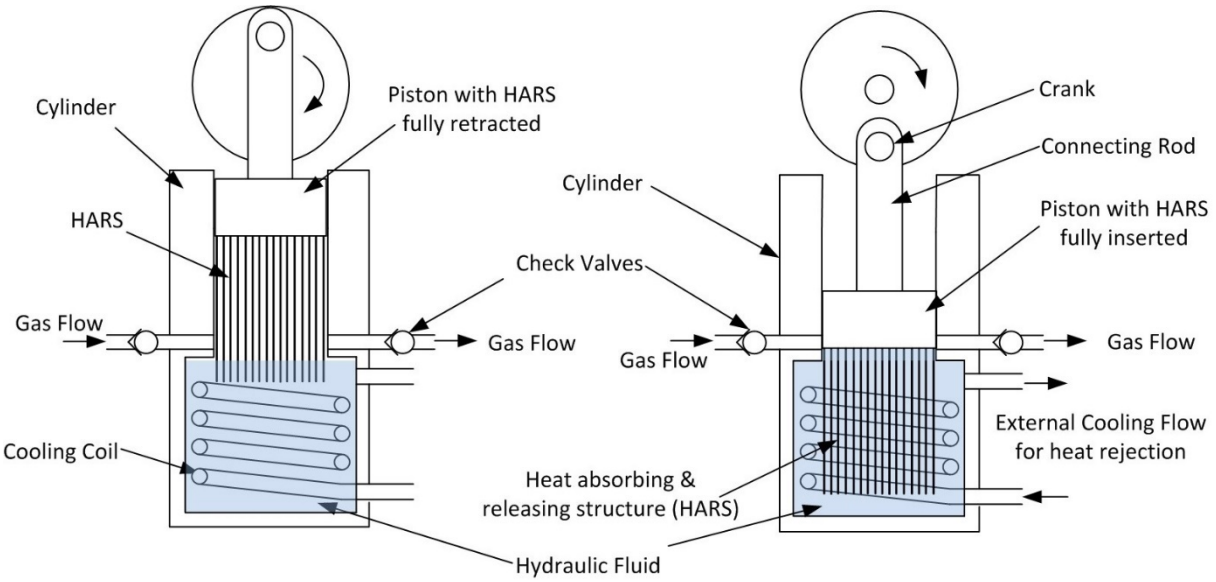
b) adiabatický

Adiabatický proces může dosahovat vyšší účinnosti (až 70%). Teplo vzniklé při kompresi vzduchu je uloženo a později využito zpětně k ohřevu vzduchu před vstupem do spalovací komory, čímž se snižuje potřeba předehřevu pomocí fosilních paliv. [10] Teplo může být uloženo do kapalin jako oleje nebo roztoků roztavených solí. [11]

Někdy se rovněž používá zkratka AA-CAES (z angl. Advanced adiabatic compressed air energy accumulation). Zatím nebylo postaveno žádné zařízení, jež by této technologie využívalo, několik jich však je ve fázi projektu. Například projekt ADELE, veden společenstvím firem, v čele s německou firmou RWE, má za cíl zkombinovat CAES s technologií ukládání tepelné energie (TES) a vytvořit tak zařízení schopné ukládat energii s účinností okolo 70%. [10; 12]

c) izotermický

Spíš než o izotermický proces se jedná o adiabatický, jehož cílem je blížit se izotermickému. Princip je obdobný jako u adiabatického. Při kompresi se vzniklé teplo musí rychle přenést do média, ve kterém se pak uskladní. Uskladněné teplo se následně převede zpět do vzduchu před jeho expanzí. Největším problémem je přenos tepla v krátkém čase, je zapotřebí užití tělesa s co největší teplosměnnou plochou. Možností by bylo použití rozptýlených vodních kapek nebo tělesa zvaného HARS (z angl. Heat absorbing and releasing structure), které se skládá z rovnoběžně uspořádaných tenkých kovových plátků, podobně jako u chladiče, aby bylo dosaženo největší možné teplosměnné plochy. Odhadovaná účinnost cyklu by mohla dosahovat až 95%. [11; 10]



Obr. 2.2-2: Kompresor pro izotermickou kompresi [11]

2.2.3 Uložiště

Základní rys technologie CAES spočívá ve stlačení vzduchu a jeho uložení. Otázkou ovšem je, kam onen stlačený vzduch uložit. Zásobník musí být dostatečně velký vzhledem k relativně nízké hustotě stlačeného vzduchu. Možností je několik. První, a tou nejzjevnější, by bylo uložení do uměle vytvořených nádrží a tanků. Tato možnost je však ekonomicky velmi nákladná. Nicméně i tato možnost se při určitých aplikacích realizuje.

Další, a také tou nejcharakterističtější možností pro CAES, je uložení do podzemních dutin a kaveren. Typicky se jedná o solné jeskyně, vytěžená ložiska zemního plynu nebo zvodně[2]. Tato úložiště musí být zajištěna proti úniku vzduchu a zkontrolována na látky, popř. mikroorganismy, jež by mohli se vzduchem reagovat a vést k jeho úbytku. [10]

Zajímavá možnost je i využití tlaku vody v jezerech nebo oceánech. Stlačený vzduch by se uložil do obrovských vaků, jež by byly uchyceny na dně oceánu, resp. jezera, a pod tlakem by je udržovala pouze hmotnost vody. [11]

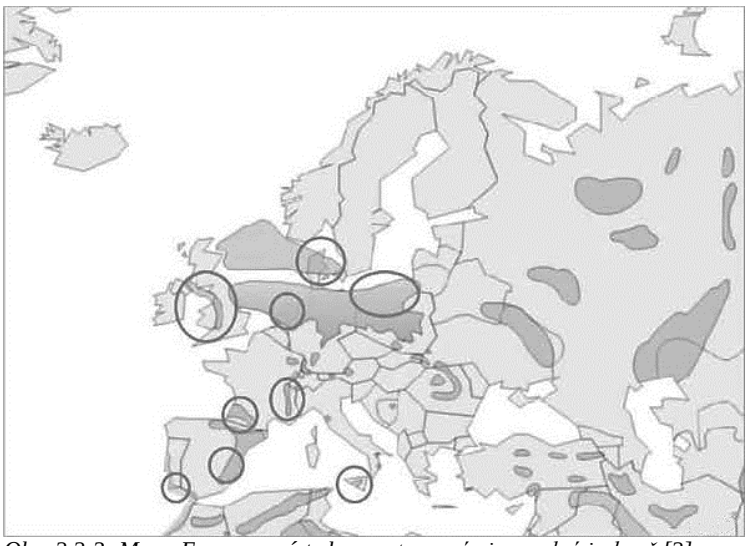
2.2.4 Použití

Kromě klasického použití pro akumulaci elektrické energie a s tím spojené aplikace – stabilizace elektrické sítě, integrace obnovitelné energie a možnosti startu ze tmy (dodání potřebné energie pro nastartování bloku elektrárny při výpadku) – je možno tuto technologii použít v malém měřítku v hybridních motorech nebo motorech na stlačený vzduch. Další

[2] Zvodeň – hydraulicky jednotná a souvislá akumulace gravitačních podzemních vod v hornině, příklad zvodně je tzv. artézská studna [29]

možnost je užití stlačeného vzduchu pro generaci energie při výpadku pro dodání energie, než dojde ke spuštění záložní generátoru. [11]

Technologii CAES by se mohla dobře uplatnit ve spojení se získáváním elektrické energie z větru. Solné jeskyně se totiž v hojném množství vyskytují v oblastech vhodných pro stavbu větrných elektráren. Na obrázku *2.2-3* jsou vyznačena místa s vysokým výskytem solných jeskyní. Zakroužkovaná místa jsou potenciálně vhodná místa pro výstavbu tlakovzdušných akumulačních elektráren.



Obr. 2.2-3: Mapa Evropy s místy koncentrovanými na solné jeskyně [2]

2.3 Setrvačníky

2.3.1 Princip

Uložení energie do setrvačníku spočívá ve přeměně elektrické energie na rotační kinetickou energii roztočením setrvačníku, resp. rotoru. Rotační kinetickou energii lze popsat následujícím vztahem:

$$E_k = \frac{1}{2} \cdot I \cdot \omega^2,$$

kde ω je úhlová rychlost a I je moment setrvačnosti. Moment setrvačnosti vyjadřuje míru setrvačnosti tělesa při otáčivém pohybu. Jeho velikost závisí na rozložení hmoty v tělese vzhledem k ose otáčení. Momenty setrvačnosti pro různé tvary jsou uvedeny v tabulce *2.3-1*. Obecně platí, že moment setrvačnosti je větší u těles, jež mají nejvíce hmoty umístěné co nejdál od osy otáčení. [1; 3]

Ze vztahu pro kinetickou energii je patrné, že velikost energie je přímo úměrná momentu setrvačnosti a kvadrátu úhlové rychlosti.

Tabulka 2.3-1: Momenty setrvačnosti pro různé tvary [13]

Tvar setrvačníku	Moment setrvačnosti I
Tenká obruč/trubice	$I = m \cdot r^2$
Plný válec	$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot r^2$
Tlustostěnná obruč/trubice	$I = \frac{1}{2} \cdot m \cdot (R^2 - r^2)$

Na rotující tělesa nicméně působí odstředivá síla, která v tělese vyvolává radiální (odstředivé) napětí. Odstředivá síla a napětí jsou popsány následujícími vztahy:

$$F_C = m \cdot r \cdot \omega^2,$$

$$\sigma_r = m \cdot r^2 \cdot \omega^2.$$

Ze vztahu pro napětí je zjevné, že napětí roste s druhou mocninou poloměru r (vzdálenosti od středu osy otáčení) a úhlovou rychlostí ω. Součin momentu setrvačnosti a úhlové rychlosti je tedy omezen maximálním napětím, které snese materiál, z něhož je setrvačník vyroben. [3]

Při konstrukci setrvačníku, je nutné brát zřetel na materiál setrvačníku a přizpůsobit mu jeho tvar, rozměry a rychlost otáčení tak, aby bylo možné do setrvačníku uložit největší možné množství energie. Pro setrvačník z homogenního izotropního[3] materiálu platí vztah:

$$\frac{E}{I} = K_m \frac{\sigma_{max}}{\rho},$$

kde:

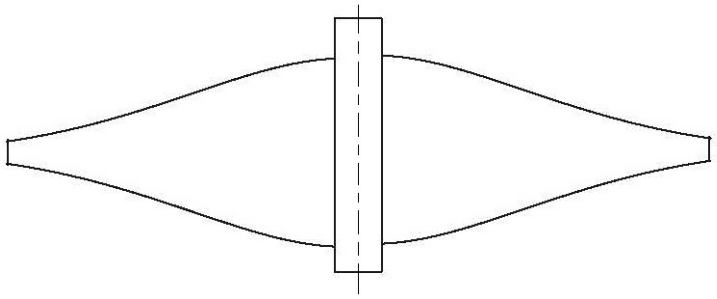
- E – kinetická energie,
- I – moment setrvačnosti,
- K_m – koeficient tvaru setrvačníku – hodnoty pro různé tvary setrvačníků jsou uvedeny v tabulce *2.3-2*,
- σ_{max} – maximální napětí v tahu,
- ρ – hustota materiálu. [1]

Tabulka 2.3-2: Koeficienty tvaru setrvačníku [1]

Tvar setrvačníku	Koeficient tvaru K_m
Kotouč o konstantním napětí	1
Kotouč s konstantní tloušťkou	0,606
Tenká obruč/trubice	0,5

[3] Izotropní materiál – materiál, jehož fyzikální vlastnosti jsou nezávislé na směru

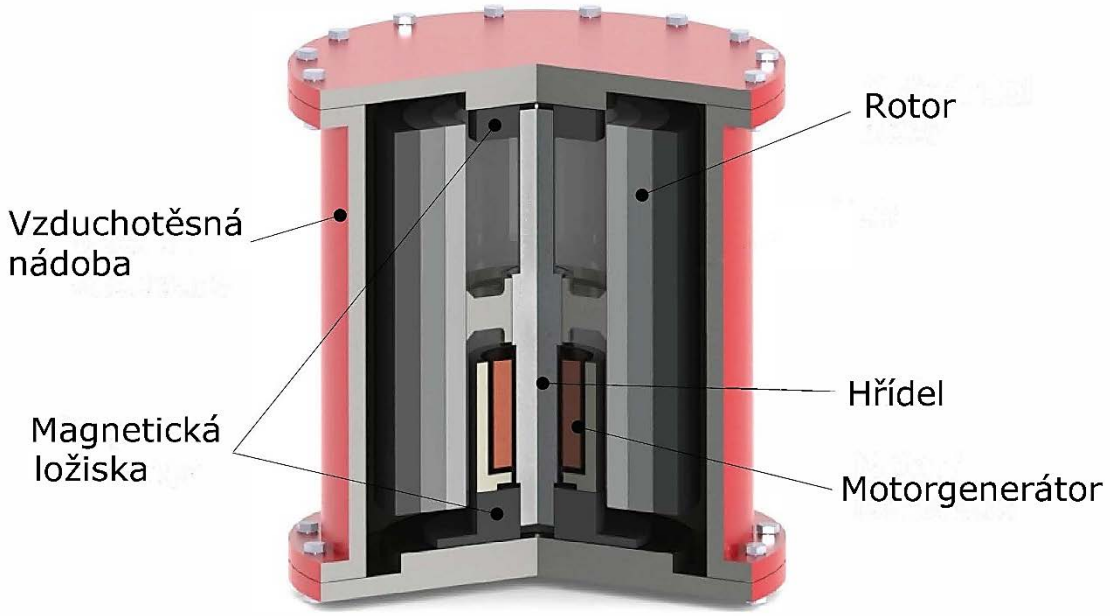
Koeficient tvaru K_m je veličina, jež udává, s jakou účinností dokáže geometrie setrvačníku využít pevnost materiálu. Maximální hodnoty K_m = 1 lze dosáhnout pouze s tzv. kotoučem konstantního napětí, jehož tloušťka se mění tak, aby v každé vzdálenosti od osy bylo stejné radiální napětí. [3]



Obr. 2.3-1: Tvar setrvačníku s konstantním napětím [1]

2.3.2 Konstrukce setrvačníků

Typický setrvačník pro akumulaci energie se skládá z rotoru zavěšeného na ložiscích, motorgenerátoru a nádoby. [13]



Obr. 2.3-2: Příklad provedení setrvačníku [13]

Pro dosažení co největší energetické kapacity setrvačníku musí být rotor vyroben z materiálu, jenž má vysokou pevnost, aby vydržel vysoké otáčky. Materiálů pro výrobu rotorů je mnoho a často se materiál odvíjí od účelu setrvačníku. Běžné materiály jsou ocelové, hliníkové a hořčíkové slitiny. Pro výrobu kvalitnějších a výkonnějších setrvačníků se může

použít beryllium, ale nejčastěji se používá keramika nebo kompozitní materiály s kevlarovými nebo uhlíkovými vlákny. [1; 3]

Je důležité říct, že setrvačníky mohou představovat nebezpečí, pokud by došlo k jejich roztržení nebo ztrátě stability. Proto jsou uloženy v robustních ocelových nádobách a větší setrvačníky mohou být uloženy pod zemí. [1]

Pro minimalizaci ztrát se z nádob odsává vzduch, aby byl eliminován odpor vzduchu. Další způsob, jak zvýšit účinnost je nahrazení klasických mechanických ložisek magnetickými ložisky. Setrvačník s klasickými mechanickými ložisky může během dvou hodin ztratit 20-50% své energie. [14]

2.3.3 Použití

Setrvačníky jsou charakteristické vysokou rychlostí náběhu, možností dodávat vysoké výkony během krátkých časových intervalů a také svou kompaktností. Další typická vlastnost je jejich relativně vysoká účinnost. Při použití magnetických ložisek a vakuových nádob až 85%. Část energie je vždy ztracena vlivem plastické deformace rotoru, gravitací a rotací Země.

Těchto vlastností se používá v zařízeních vybavených záložním napájecím zařízením, kde je bezpodmínečně nutné zajistit okamžitý náběh záložního systému při výpadku elektrické energie. Nejčastěji tedy slouží pouze jako doplněk, než naběhne například dieselagregát, a to v nemocnicích nebo například v datových centrech.

Další využití setrvačníky nalézají ve vozidlech, zvláště kolejových, kde se při brzdění akumuluje energie – tzv. regenerativní brzdění.

V neposlední řadě se setrvačníky používají ve výzkumných fyzikálních laboratořích pro zařízení, která potřebují dodat velké množství energie v krátké době. Typicky se jedná o tokamaky[4] a urychlovače částic. [14; 15]

[4] Tokamak – zařízení vytvářející magnetické pole pro udržování vysokoteplotního plazmatu

3 Elektrochemická akumulace energie

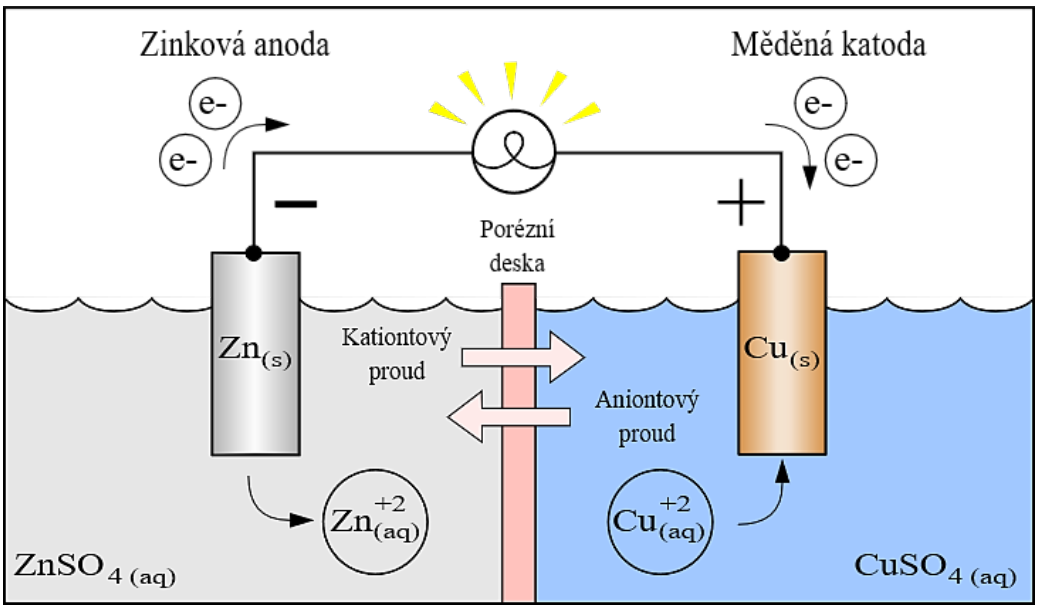
3.1 Sekundární články

3.1.1 Princip

Sekundární článek neboli akumulátor je typ galvanického článku, jenž, na rozdíl od primárního galvanického článku, je možno nabíjet a používat opakovaně. Každý galvanický článek, ať primární či sekundární, obsahuje elektrody a elektrolyt[5]. Anoda je negativní elektroda, z které se vylučují elektrony. Katoda je pozitivní elektroda, která elektrony přijímá. Elektrody jsou ponořeny v elektrolytu. Elektrolyt může být pro obě elektrody společný nebo může mít každá elektroda svůj vlastní. V druhém případě pak musí být oba elektrolyty vodivě spojeny, nejčastěji tzv. solným můstkem, popř. jsou elektrolyty odděleny porézní deskou, jež umožňuje průchod iontů.

Při propojení elektrod vodičem začne na anodě probíhat oxidační reakce – do elektrolytu se začnou vylučovat kationty a zbylé elektrony putují přes vodivé spojení do katody, v níž způsobí redukci kationtů v elektrolytu a na povrchu katody se vylučuje kov. Vlivem těchto chemických reakcí mezi elektrodami a elektrolytem vzniká na elektrodách rozdíl potenciálů, jež vede ke vzniku elektrického napětí.

Podle požadovaného napětí můžeme galvanické články spojovat sériově nebo paralelně. Spojením několika článků vzniká baterie. [3]



Obr. 3.1-1: Schéma galvanického článku [16]

[5] Elektrolyt – kapaliny, jež vedou elektrický proud – roztoky nebo taveniny kyselin, zásad a solí

3.1.2 Typy baterií

Podle materiálů elektrod a složení elektrolytu se rozlišuje mnoho typů baterií. Výše popsaný princip platí pouze pro jednodušší baterie. Ve složitějších dochází dále k sekundárním reakcím, nicméně princip oxidačně redukčních reakcí mezi elektrodami a elektrolytem zůstává.

3.1.2.1 Olověný

Olověný akumulátor je nejstarší typ elektrochemického akumulátoru, první olověný akumulátor byl zkonstruován v roce 1859. Od té doby má tento typ akumulátoru stále silné zastoupení mezi ostatními typy. [3]

Anoda je z čistého olova *Pb*, katoda je z oxidu olovičitého PbO_2 a elektrolytem je roztok kyseliny sírové H_2SO_4 o koncentraci cca 37%. Během vybíjení se na obou elektrodách vytváří síran olovnatý $PbSO_4$. Celková rovnice vybíjení vypadá následovně:

$$Pb + 2H_2SO_4 + PbO_2 \rightarrow 2PbO_4 + 2H_2O$$

Při nabíjení probíhá stejný chemický proces opačně. [2]

Jeho výhody spočívají v nízké ceně a ve schopnosti dodávat velké proudy v nízkém čase. Nevýhodou je naopak nízká energetická hustota[6], dlouhá doba nabíjení a nutnost údržby. Další problémem je tzv. sulfatace, ke které dochází při ponechání akumulátoru v nenabitém stavu po delší dobu. Spočívá v krystalizaci síranu olovnatého na elektrodách. Životnost olověného akumulátoru se pohybuje od 200 do 700 cyklů. [2; 3]

Tradiční a dlouholeté uplatnění mají olověné akumulátory jako autobaterie, ale mohou být použity i jako záložní zdroj energie nebo pro pohon menších elektromotorů.

3.1.2.2 Nikl-kadmiový (NiCd)

První nikl-kadmiová baterie byla zkonstruována v roce 1899 a od poloviny 20. století se stali nejrozšířenějším typem baterií pro menší elektrická zařízení, než byly nahrazeny NiMH a Li-Ion bateriemi.

Katoda je vyrobena z oxid-hydroxidu niklitého *NiO(OH)* a anoda je tvořena kadmiem *Cd*; elektrolyt je nejčastěji hydroxid draselný *KOH*. Proces vybíjení je popsán následující rovnicí:

$$Cd + 2NiO(OH) + 2H_2O \rightarrow Cd(OH)_2 + 2Ni(OH)_2$$

[6] Energetická hustota – poměr energetické kapacity a objemu popř. hmotnosti

Největším výhodou byla vyšší energetická hustota oproti olověnému akumulátoru a dobrá životnost. Nevýhodou naopak vyšší samovybíjení, ale hlavně toxicita kadmia. Obsah kadmia komplikoval recyklaci baterií a v dnešní době je jejich použití velmi omezeno. [17; 15]

3.1.2.3 Nikl-metal hydridový (NiMH)

Nikl-metal hydridový akumulátor vychází z nikl-kadmiového. Veřejně dostupný se stal od roku 1989 a nabídl tak lepší alternativu NiCd. Katoda i elektrolyt jsou stejné, ale toxické kadmium bylo nahrazenou slitinou kovů, jež absorbuje vodík a vytváří hydridy. Kovová slitina je nejčastěji tvořena ze dvou složek, první tvoří nikl, kobalt, mangan nebo hliník a druhá je směs vzácných kovů – lanthan, cer, neodym, praseodym. Celková rovnice vybíjení je následující:

$$MH + NiO(OH) \rightarrow M + Ni(OH)_2$$

Oproti NiCd bateriím má NiMH větší energetickou hustotu a životnost, vyšší hodnota samovybíjení však zůstala. V dnešní době NiMH akumulátory nahradily NiCd a spolu s Li-Ion akumulátory patří k nejrozšířenějším akumulátorům dostupným široké veřejnosti. [17; 15]

3.1.2.4 Lithium-iontový (Li-Ion)

První lithium-iontová baterie byla představena v roce 1991 a v dnešní době představují nejrozšířenější technologii akumulátoru. Název lithium-iontový nepopisuje jeden typ používaného materiálu, ale širokou řadu materiálů pro elektrody a elektrolyt. Pro všechny materiály je však charakteristický přenos iontů lithia mezi elektrodami. Li-Ion články neobsahují lithium v podobě čistého kovu, jeho ionty jsou navázány v oxidech kovů ($LiCoO_2$, $LiMn_2O_4$) nebo fosforečnanech ($LiFePO_4$) v případě katody a lithium titanát ($Li_4Ti_5O_{12}$) v případě anody. Častěji však bývá anoda z uhlíku (typicky ve formě grafitu). Elektrolytem je lithiová sůl v organickém rozpouštědle. [18; 19]

Li-Ion technologie je několik a každá má svá specifika, nejčastějším typem jsou LCO a LMO. Dalšími typy jsou NMC, LFP, LTO a NCA. Obecně je pro Li-Ion baterie charakteristické: vysoká energetická hustota, nízká hodnota samovybíjení a dlouhá životnost (500-1200 cyklů). [15; 19]

Díky své energetické hustotě a tomu, že je lze vyrábět takřka v jakémkoliv tvaru, se Li-Ion akumulátory užívají v drtivé většině spotřební elektroniky a menších přenosných zařízeních. Lze je však použít i ve větším měřítku v transportní technice – elektromobily a hybridní automobily. [15]

3.1.2.5 Lithium-polymerový (LiPo)

Pojem lithium-polymerového akumulátoru označuje typ Li-Ion technologie, kde jsou elektrody odděleny porézním polymerem, do kterého je napuštěn elektrolyt. Z chemického hlediska se nijak neliší od klasické lithium-iontové baterie. [18]

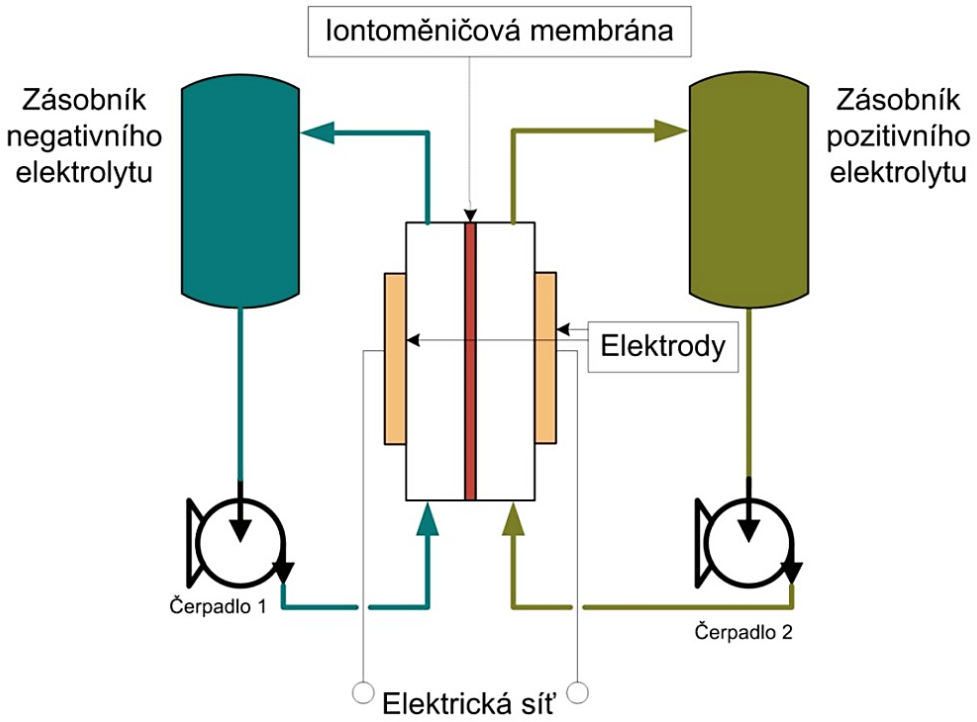
Oproti klasickým Li-Ion bateriím disponují větší energetickou hustotou a vyšší životností. Nicméně je jejich výroba technologicky i materiálově složitější, a proto je jejich cena vyšší.

3.2 Průtokové baterie

3.2.1 Konstrukční princip

Průtoková (regenerativní) baterie je principiálně podobná konvenčním bateriím. Skládá se také z kladné a záporné elektrody a elektrolytu. Právě zásadní změna se odehrává u elektrolytu. Průtokové baterie mají negativní a pozitivní elektrolyt a ten je skladován ve dvou velkých vnějších nádržích. Energie je tedy uložena v elektrolytu, nikoliv v elektrodách jako je tomu u klasických baterií.

Každá nádrž má svoje čerpadlo a vhání elektrolyty do reaktoru, kde přes iontoměničovou membránu probíhá chemická reakce. Slabou konstrukční jednotkou je právě zmíněná membrána, která má životnost kolem 15 000 cyklů. Ale její výměna by neměla znamenat větší technický zásah do systému ani dlouhé odstavení. [20]



Obr. 3.2-1: Schéma průtokové baterie [20]

Velikost reaktoru určuje, kolik energie se může najednou uvolnit a jak velkým výkonem bude disponovat. Zatímco velikost zásobovacích nádrží určuje, jaký celkový výkon je možno uskladnit, což znamená, jaká bude akumulační kapacita.

3.2.2 Výhody a nevýhody

Rozdělení elektrolytu přináší určité výhody. Zaprvé elektrolyt nemá degradační procesy, je tedy možné baterii provozovat téměř po neomezený počet cyklů nabití a vybití. Baterie se může ponechat ve vybitém stavu delší dobu, aniž by byla způsobena jakákoliv škoda na životnosti baterie. Dalším výhodou je, že baterie může být nabita prakticky okamžitě přečerpáním použitého elektrolytu. [20; 21]

Nevýhodou průtokových baterií je, že celková hustota energie je poměrně nízká, v rozsahu 15 až 25 kWh/m^3 (Li-ion má hustotu energie zhruba 300 kWh/m^3). Jednou z dalších nevýhod je složitost skladování a čerpacích mechanismů. Ze složitosti celého systému pak plyne vysoká pořizovací cena. Další položkou je již zmiňovaná iontoměničová membrána. [20]

3.2.3 Typy baterií

Průtočné baterie se dělí do dvou základních kategorií.

3.2.3.1 Redoxní průtoková baterie (RFB)

Redoxní baterie jsou nejrozšířenější průtokové baterie a často bývají redoxní a průtokové baterie považovány za synonymum. Jejich princip odpovídá již výše popsanému konstrukčnímu principu. Dva elektrolyty obsahující kovové ionty jsou rozděleny do dvou nádrží na opačných stranách elektrolytického článku. Elektrolyty se v tomto případě označují jako anolyt a katolyt. Při nabíjení a vybíjení zůstávají kovové ionty rozpuštěny v elektrolytu v tekutém skupenství, k žádné fázové přeměně nedochází.

Z chemického složení se RFB dělí na několik dalších typů, jako například *Fe-Ti* nebo *Fe-Cr*, ale nejvýznamnější je typ vanadiový (VRFB). VRFB využívá při reakcích na obou stranách pouze ionty vanadu. Díky tomu při přechodu iontů dochází jen ke ztrátám energie, a ne k nevratné degradaci elektrolytů, jako je tomu u ostatních průtokových baterií. [14]

3.2.3.2 Hybridní průtoková baterie (HFB)

Hybridní průtoková baterie je kombinací klasických sekundárních článků a RFB. Jedna aktivní složka je uložena v elektrochemického článku ve formě pevné vrstvy a druhá je v podobě elektrolytu uložena v externím zásobníku.

Typickými zástupci jsou *Zn-Ce* a *Zn-Br* baterie. V obou případech se anolyt skládá z roztoku kyseliny obsahující ionty Zn^{2+}. Při nabíjení se na elektrodě vylučuje zinek a při vybíjení přechází Zn^{2+} zpět do elektrolytu. [14]

3.3 Použití baterií

Každý zná sekundární články ve formě tzv. tužkových článků, jež v různých velikostech mohou sloužit jako zdroj napětí pro různé domácí spotřebiče. Sekundární články lze však samozřejmě využít i pro akumulaci elektrické energie ve větším měřítku.

V posledních letech stále viditelnější společnost Tesla v roce 2015 přišla se dvěma zařízeními pro akumulaci elektřiny. Nesou název Powerwall a Powerpack.

Powerwall je cílen jako akumulační zařízení pro domácnosti. Jedná se o lithium-iontovou baterii, jejíž první generace měla kapacitu 7 kWh a druhá 13,5 kWh. Hodnota pracovního výkonu je 5 kW a špičkového 7 kW. Takovýto akumulátor může spolupracovat s fotovoltaickými panely instalovanými na střeše domu a ukládat solární energii k pozdějšímu použití nebo může sloužit k řízení odběru elektřiny, kdy se baterie nabíjí při přebytku elektrické energie a vybíjí naopak ve špičce. Podobný produkt dnes již nabízí více společností, například Nissan a jejich baterie xStorage nebo i česká společnost NetPro systems s baterií EnergyCloud. [22; 23]

Obr. 3.3-2: Tesla Powerwall 1. gen. [22]

Obr. 3.3-1: Tesla Powerwall 2. gen. [23]

Na druhou stranu produkt Powerpack je síťová baterie pro akumulaci energie z větrných nebo solárních elektráren. Jeden blok Powerpack první generace disponuje kapacitou 100 kWh a druhé generace dokonce 200 kWh. Tyto bloky je pak možné skládat do celků až do desítek nebo stovek megawatthodin. [22; 24]

Za zmínku stojí zpráva z Havajského ostrova Kauai, kde Tesla nainstalovala 272 Powerpacků o celkové kapacitě 52 MWh. Ostrov se tak oprostil od nutnosti draze dovážet velké množství fosilních paliv. Podobná situace je na jihu Austrálie. V březnu tohoto roku se visionář a ředitel společnosti Tesla Inc. nechal slyšet, že do sta dní od podepsání kontraktu je schopen dodat do Austrálie 100 – 300 MWh úložné kapacity. [25]

4 Vodíkové hospodářství

4.1 Základní koncept

Termín vodíkového hospodářství popisuje soubor komplexních technologických operací a činností, v němž hlavní roli hraje vodík. Tyto činnosti zahrnují získávání vodíku, jeho skladování, dopravu a následné získání energie. Cílem vodíkového hospodářství je obecně uspokojení energetických potřeb, ať už se jedná o jeho spalování v motorech vozidel nebo jeho akumulaci pro stabilizaci elektrické sítě.

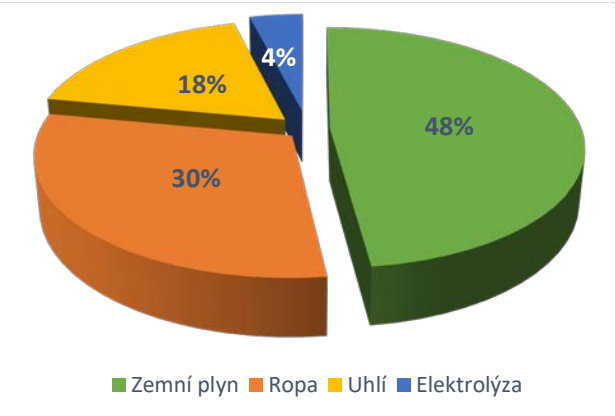
Nespornou výhodou vodíku je jeho čistota. Při jeho zpětném využitím, ať už se jedná o spalování v motoru nebo reakce v palivovém článku, je výchozím produktem pouze voda, tudíž nedochází k žádnému znečišťování.

Vodík se však v čisté formě na Zemi nenachází, proto musí být získáván z jiných sloučenin jako zemní plyn, biomasa nebo voda. Ve všech případech je pro získání čistého vodíku třeba vynaložit energii. O vodíku se tak dá mluvit jako o nosiči energie spíše než jako o palivu nebo zdroji energie. Vodík lze tedy využít k akumulaci energie z obnovitelných zdrojů. V době nadbytku energie by se přebytečná energie využila k výrobě vodíku a následně by byl opět zpracován při nedostatku energie.

Ve své flexibilitě a již zmíněné čistotě spočívají hlavní výhody vodíkového hospodářství a jeho potenciál. Ve finále by vodíkové hospodářství mohlo vést k lepší integraci obnovitelných zdrojů a zmírnění závislosti na fosilních palivech. [1; 26]

4.2 Získávání vodíku

Vodík lze vyrábět mnoha metodami. Celosvětově nejrozšířenější je výroba z fosilních paliv; drtivá většina vyprodukovaného vodíku je vyrobena právě touto metodou, resp. metodami. Jednou z atribut vodíkového hospodářství je však oproštění od fosilních zdrojů. Proto je třeba využívat metody, které nevyžadují fosilní paliva, ale využívají naopak energii získanou z obnovitelných zdrojů. Typicky se jedná o různé druhy elektrolýzy vody. [26]



Obr. 4.2-1: Rozložení zdrojů pro produkci vodíku [26]

4.2.1 „Klasické“ získávání z fosilních zdrojů

Jak již bylo zmíněno, výroba vodíku z fosilních paliv, resp. zemního plynu, ropy a uhlí, je v současné době nejrozšířenější a zároveň nejlevnější metodou získávání vodíku. Podle druhu vstupní suroviny se technologie liší a dělí se na tři základní formy.

4.2.1.1 Parní reformování

Při parním reformování (steam reformingu) jsou vstupními surovinami zemní plyn nebo lehké ropné frakce. Tyto látky jsou rozkládány při teplotách okolo 800 °C a tlacích do 4 MPa vodní parou za použití vhodných katalyzátorů. Vedlejším produktem této metody je však i oxid uhelnatý a oxid uhličitý.

4.2.1.2 Parciální oxidace

Vstupní látkou pro parciální oxidaci je tzv. těžký ropný olej. Rozklad probíhá obdobně jako u parního reformování, jen za vyšších teplot (cca 1200 až 1500 °C) a bez použití katalyzátorů. Vedlejším produktem při parciální oxidaci jsou saze.

4.2.1.3 Zplyňování uhlí

Při zplyňování uhlí je uhlí částečně oxidováno vzduchem a vodní parou při vysokých teplotách – cca 1200 °C. Pro dosažení této teploty se musí část uhlí nejdříve spálit; téměř 30 až 40% uhlí je využito k dosažení a udržování požadované teploty. Tato metoda je tedy oproti předchozím dvěma méně hospodárná, a proto i méně využívána.

Společným aspektem těchto metod a zároveň jejich nevýhodou jsou vedlejší produkty, které při nich vznikají. Jedná se nejčastěji o oxid uhličitý, oxid uhelnatý a metan. Abychom získali skutečně čistý vodík musí být všechny tyto složky vyseparovány. Je tedy nutné provádět další technologické procesy, jež zvyšují složitost a tím i náklady těchto metod. [26]

4.2.2 Elektrolýza vody

Elektrolýza vody je proces elektrochemického rozkladu vody působením stejnosměrného napětí na elektrodách elektrolyzéru. Průchodem elektrického proudu elektrolytem – vodou – dochází k pohybu kladných iontů k záporné elektrodě a záporných iontů ke kladné elektrodě. Na katodě vzniká vodík a na anodě kyslík.

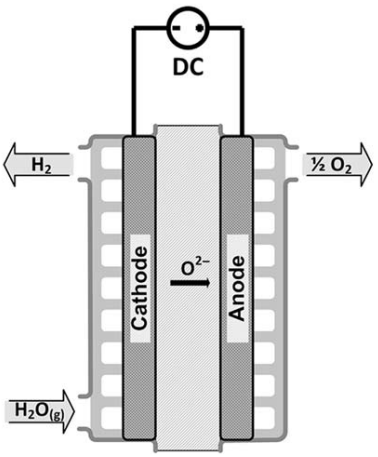
Spotřeba energie je v moderních elektrolyzérech asi 4,3 – 4,8 kWh/Nm^3, resp. 47,8 – 53,4 kWh/kg. Účinnost procesu se pohybuje okolo 70 – 80%, tato hodnota nicméně neuvažuje účinnost při získávání elektrické energie. Celková účinnost výroby vodíku elektrolýzou se

pohybuje okolo 25 – 35%, bereme-li v úvahu výrobu elektrické energie ze standardních zdrojů o účinnosti 20 – 30%.

Výhoda elektrolýzy je v možnosti použití elektrické energie, jež může pocházet z různých zdrojů. Při získávání energie z OZE by přebytečná energie mohla být využita právě k elektrolytickému rozkladu. Výhodná situace by mohla být ku příkladu v oblasti pobřeží, kde je vysoký výskyt větrných elektráren a zároveň dostatek vody. Další výhodou je samozřejmě vysoká čistota vyprodukovaného vodíku. Naopak nevýhodou může být velká spotřeba elektrické energie a její cena. [26]

4.2.3 Vysokoteplotní elektrolýza

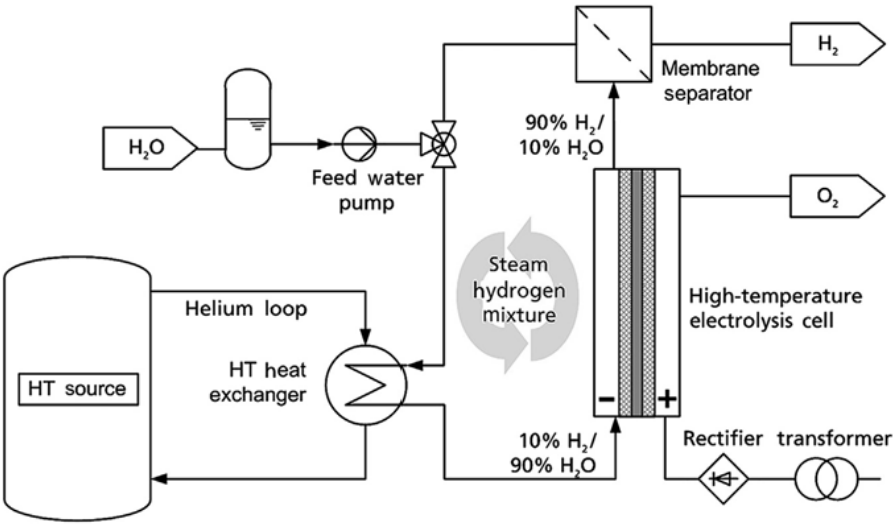
Při vysokoteplotní elektrolýze (HTEL) se vstupní energie skládá z energie elektrické a tepelné. Do elektrolyzéru (*Obr. 4.2-2*) vstupuje směs vodní páry a vodíku (cca 10% hm.). Přítomnost vodíku je nezbytná pro fungování elektrolýzy. Iont kyslíku O^{2-} prochází membránou, oxiduje na anodě a následně odchází ze systému. Na druhém výstupu vychází směs vodíku a vodní páry (cca 90% hm. vodíku). Voda se ze směsi odděluje v kondenzační komoře a část vodíku je navrácena zpět do systému.



Obr. 4.2-2: Elektrolyzér pro HTEL [15]

Provozní teploty při tomto procesu se pohybují v rozmezí 600 – 1000 °C. Při těchto teplotách se snižuje množství elektrické energie potřebné pro rozklad molekul vody. Celková potřebná energie je vyšší než u klasické elektrolýzy, nicméně při použití odpadního tepla z jiných procesů se může celková účinnost zvýšit až na 45%. [15; 26]

V následujícím schématu (*Obr. 4.2-3*) je zobrazen princip vysokoteplotní elektrolýzy. Voda je uložena v zásobníku, ve výměníku (*HT heat exchanger*) je kapalná voda přeměněna na páru. Médiem pro přenos tepla je v tomto případě helium; zdrojem tepla (*HT source*) může být například jaderný reaktor, solární nebo geotermální elektrárna. [15]



Obr. 4.2-3: Schéma vysokoteplotní elektrolýzy vody [15]

4.3 Skladování a logistika

Pro použití vodíku k akumulaci energie je třeba jej po výrobě nějakým způsobem uložit, aby ho bylo v případě potřeby možné použít. Toho lze dosáhnout několika způsoby; obecně lze mluvit o skladování čistého vodíku nebo o skladování vodíku vázaného v jiné látce. [1]

4.3.1 Skladování v plynné formě

Zjevnou možností je skladovat vodík jako ostatní plyny, a sice v tlakových nádobách. Typickým materiálem takových nádob je ocel, ale díky moderním kompozitním materiálům lze vodík skladovat při tlaku až 69 MPa. [1] Energie uložená v nízkotlakých nádobách by se pohybovala okolo 150 MWh; při použití vysokotlaké nádoby o stejném objemu pak až 2250 MWh. [15]

Alternativně lze vodík skladovat jako vzduch při CAES technologii v podzemních kavernách a solných jeskyních. V takovém případě by podle velikosti prostoru mohlo být množství uložené energie až 240 GWh. [15]

4.3.2 Skladování v kapalné formě

Další možností skladování plynů, a tudíž i vodíku, je jeho zchlazení pod teplotu varu (cca -252 °C) a skladování v tepelně izolovaných nádobách. Tímto způsobem je možné uchovávat vodík v menším objemu než jen při jeho stlačení, nicméně vyžaduje více energie. Kapalnění vodíku může vyžadovat 30 – 40% ekvivalentu energie uložené ve vodíku. [1]

4.3.3 Skladování ve formě kovových hydridů

Třetí přístup spočívá v navázání vodíku do kovových hydridů. Vodík se reverzně váže do mnoha látek, v několika případech i ve velkých koncentracích. Je to umožněno tím, že vodík je v těchto látkách vázán jako proton, resp. iont H^+. Tyto ionty jsou velmi malé a mohou se tedy vmísti do mezer mezi atomy hydridů.

Příkladem může být slitina lanthanu a niklu $LaNi_5$, která může absorbovat až šest atomů vodíku na mol za vzniku $LaNi_5H_6$. Další příklad je slitina železa a titanu $FeTi$, která na každý mol dokáže absorbovat dva atomy vodíku a vytvořit $FeTiH_2$.

Hustota vodíku v těchto látkách pak může být $(5{,}5 \div 5{,}8) \cdot 10^{22}$ atomů na jeden kubický centimetr, což je více než v případě kapalného vodíku, jehož hustota je cca $4{,}2 \cdot 10^{22}$ atomů/cm^3. Z hlediska objemu je to velmi atraktivní poznatek.

Nevýhodou však je to, že všechny známé kovové hydridy mají příliš velkou hmotnost. Jinými slovy by bylo třeba velké množství určitého hydridu, aby v něm mohlo být uloženo účelné množství vodíku. [1]

4.4 Energetické využití vodíku

4.4.1 Palivové články

Palivové články (fuel cells) jsou zařízení, jež vytváří elektrickou energii elektrochemickým slučováním vodíku a kyslíku. Palivových článků je několik druhů, jež se liší použitým elektrolytem a provozními teplotami. [15]

Oproti tepelným strojům s generátorem elektrické energie dosahují palivové články při výrobě elektrické energie vysokých účinností a to až 60 % v laboratorních podmínkách. Reálná účinnost však dosahuje pouze 35 - 50 % dle zatížení a typu palivového článku. Vysoká účinnost je dána zejména tím, že přeměna energie je přímá, nikoliv přes mezistupně (tepelnou a mechanickou), jako je tomu např. u spalovacích motorů. [26]

4.4.1.1 Alkalický palivový článek (AFC)

V alkalickém palivovém článku je elektrolytem vodný roztok hydroxidu draselného (*KOH*). Normální provozní teplota se pohybuje okolo 80 °C. Použití alkalického (zásaditého) elektrolytu skýtá lepší kinetiku redukce kyslíku, z čehož plyne vyšší účinnost, a také umožňuje používat nevzácné (tj. levnější) kovové katalyzátory. Nicméně alkalický elektrolyt vyžaduje pečlivější údržbu a kontrolu správné čistoty a koncentrace. [15; 26]

4.4.1.2 Palivový článek s kyselinou fosforečnou (PAFC)

Z názvu je patrné, že elektrolytem PAFC je kyselina fosforečná. Operační teploty se pohybují v rozmezí 160 – 200 °C. Díky vyšším teplotám a kyselému elektrolytu nejsou chemické reakce ovlivněny nečistotami v elektrolytu a v palivu a nevyžaduje takovou údržbu jako AFC. [15]

4.4.1.3 Palivový článek s pevným oxidem (SOFC)

Hlavní rozdílem tohoto palivového článku je, že elektrolyt je v pevné formě. Jedná se o neporézní oxid kovu, nejčastěji ytria stabilizovaného zirkonem. Pracovní teplota se nachází v rozmezí 800 – 1000 °C. Skutečnost, že elektrolyt je pevný, má velký význam pro zjednodušení systému, vyskytují se zde na rozdíl od všech ostatních typů PČ pouze dvě fáze, pevná a plynná. [26]

4.4.1.4 Palivový článek s tekutým uhličitanem (MCFC)

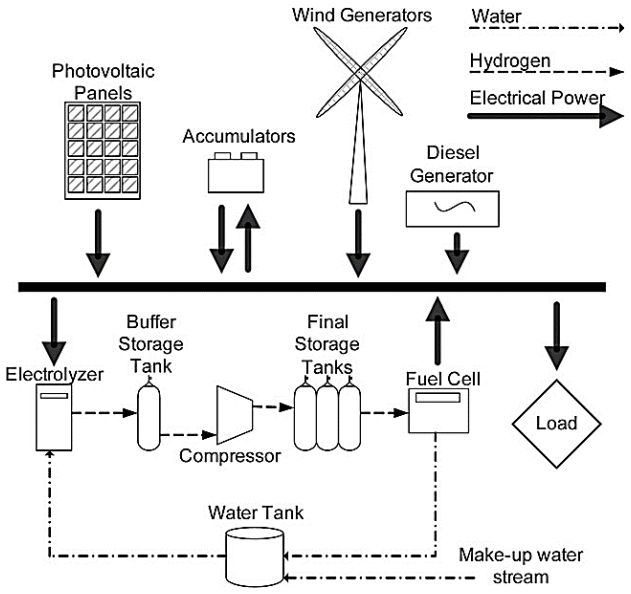
MCFC operují při teplotách okolo 650 °C. Jako elektrolyt je použita směs roztavených uhličitanů draslíku a lithia. V tomto teplotním rozmezí tvoří směs uhličitanů vysoce vodivou roztavenou taveninu, ve které zprostředkovávají vodivost uhličitanové ionty. [15; 26]

4.4.1.5 Palivový článek s polymerovou membránou (PEMFC)

Provozní teplota PEMFC je přibližně 80 °C a jako elektrolyt je použita tenká polymerová membrána schopná vedení iontů. Další částí elektrolytu je i voda, je třeba dbát na optimální hydrataci polymerové membrány, jež je klíčová pro správnou propustnost iontů. Kvůli použití platiny nebo rhodia jako katalyzátoru je také třeba zajistit velmi nízké koncentrace CO_2. [15; 26]

4.4.2 Regulace obnovitelných zdrojů a akumulace energie

Jak již bylo předesláno, vodíkové technologie můžou sloužit k akumulaci elektrické energie získané z obnovitelných zdrojů, jejichž hlavní nevýhodou je jejich časová nestálost. V místech produkce elektřiny z obnovitelných zdrojů by mohly být zbudovány integrované systémy pro výrobu vodíku. Takto získaný vodík by poté bylo možné využít dle lokálních podmínek buďto jako palivo pro dopravu, nebo pro opětovnou výrobu elektřiny, například ve stacionárních palivových článcích. Schéma takového integrovaného systému je zobrazeno v *Obr. 4.4-1*.



Obr. 4.4-1: Schéma systému pro regulaci OZE [30]

4.4.3 Výhody a nevýhody

Z předchozích kapitol se může zdát, že vodíkové hospodářství je ideální způsob pro akumulaci elektrické energie. Jako u všeho jsou však jeho výhody vyváženy řadou nevýhod.

Mezi hlavní výhody vodíkového hospodářství patří jeho čistota. Vodík není toxický a při jeho zpracování nedochází ke znečišťování životního prostředí. Další výhodou je jeho dostupnost; lze ho získávat z vody, které je na Zemi dostatek. Velkou výhodou je, že při spalování vodíku v motorech nebo palivových článcích je možné dosáhnout vyšších účinností než v klasických spalovacích motorech nebo generátorech.

Nevýhodou zůstává již zmíněný problém se skladováním a s tím i spojený problém s dopravou. Další významnou nevýhodou je cena a složitost samotného získávání vodíku, jmenovitě jde o vysokou cenu elektrolyzérů a velkou spotřebu nutné energie při elektrolýze. S tím souvisí i relativně nízká účinnost při výrobě vodíku elektrolýzou. V neposlední řadě je problém i vysoká cena palivových článků a také i bezpečnost vodíku vzhledem k jeho hořlavosti. [15; 26]

Množství nevýhod je důvod, proč již nedošlo k rozšíření používání vodíku a v nejbližší době k němu pravděpodobně ani nedojde.

5 Elektromagnetická akumulace energie

Elektrickou energii lze obecně ukládat dvěma způsoby. První operuje s akumulací ve formě elektrostatického pole, druhý využívá vztahu, který existuje mezi elektrickými a magnetickými jevy. V předchozích kapitolách byly popisovány technologie, které až na výjimky slouží k dlouhodobějšímu uskladnění energie. Z následující části vyplyne, že v obou případech elektromagnetické akumulace energie se jedná o krátkodobé uskladnění energie. [1]

5.1 Superkondenzátory

5.1.1 Princip

Klasický kondenzátor ukládá elektrickou energii ve formě elektrostatického pole a to tak, že na jedné desce kondenzátoru je kladný elektrický náboj a na druhé záporný. Desky jsou od sebe odděleny dielektrikem (izolantem), aby nedošlo k neutralizaci náboje. Kondenzátor je popsán charakteristikou kapacity *C*. Ta je definována jako velikost náboje uloženého na jednotku napětí. Kapacita a celková uložená energie je popsána rovnicemi:

$$C = \frac{Q}{U}\ [F]$$

$$E = \frac{1}{2} \cdot C \cdot U^2 = \frac{1}{2} \cdot Q \cdot U$$

Kapacita klasických kondenzátoru se pohybuje v jednotkách mikrofaradů, nanofaradů a pikofaradů, což je příliš málo na to, aby v nich mohlo být uloženo použitelné množství energie.

Chování kondenzátoru se významně změní, pokud se v prostoru mezi elektrodami nachází navíc materiál, jež má vlastnosti elektrolytu. V takovém případě je náboj uložen v prostoru, kde se stýká elektron-vodivý materiál (elektroda) a ionto-vodivý materiál (elektrolyt). [1]

5.1.2 Typy kondenzátorů

Takovýmto kondenzátorům se říká elektrolytické a obecně je lze rozdělit do dvou kategorií. V prvním z nich je elektrický náboj uložen v elektrické dvojvrstvě na rozhraní elektrody a elektrolytu. Takovým zařízením se říká ultrakapacitory. Druhý typ využívá přechodné absorpce atomů do krystalické struktury elektrody a nazývají se superkapacitory. Oba tyto typy dosahují mnohem vyšších hodnot kapacity než klasické kondenzátory. [1]

5.1.2.1 Dvouvrstvý kondenzátor (EDLC)

EDLC (z angl. Electrical double-layer capacitor) je obecně vžité označení pro superkondenzátor. Množství kapacity, jež je možné uložit v takovém kondenzátoru, se

pohybuje v hodnotách 15-40 μF/cm^2. Pro uložení největší možné kapacity je třeba co nejvíce zvětšit plochu rozhraní, ale zároveň zachovat velmi nízkou tloušťku. Speciální struktury elektrod z materiálů na bázi uhlíku mohou mít plochu až několik tisíc metru čtverečních. Výsledná kapacita se tak může pohybovat i v řádu tisíců faradů. [1; 15]

5.1.3 Vlastnosti a použití

Superkondenzátory bývají označovány jako přechod mezi sekundárními články a kondenzátory. Oproti akumulátorům nemají tak vysokou energetickou hustotu; další nevýhodou je i problém samovybíjení. Nicméně jejich nespornou výhodou je čas potřebný k nabití a vybití akumulátoru a jejich životnost.

Využití superkondenzátorů ve spotřební elektronice se pravděpodobně v blízké době nedočkáme, především kvůli jejich ceně a nízké kapacitě. Naleznou však podobné uplatnění jako již zmíněné setrvačníky. Například v místech, kde je třeba zajistit nepřerušený přívod proudu nebo v elektromobilech pro snížení špičkového odběru proudu a tzv. regenerativní brzdění. [15; 14]

5.2 Supravodivé cívky

5.2.1 Princip

Akumulace energie v cívce spočívá v přeměně elektrické energie v magnetickou. Stejnosměrný proud procházející cívkou indukuje magnetické pole. Obecně při průchodu elektrické proudu vodičem, tedy i cívkou, dochází k přeměně elektrické energie na tepelnou a tím ke ztrátám. Tyto ztráty jsou úměrné procházejícímu proudu vnitřnímu odporu cívky podle rovnice:

$$Q_Z = R \cdot I^2 \text{ [1]}$$

V případě supravodivých cívek je však téměř veškerý odpor eliminován díky jevu zvanému supravodivost, kdy vodič neklade žádný zaznamenatelný odpor při průchodu elektrického proudu; k tomu dochází při teplotách blížících se absolutní nule (0 K, -273,15 °C). Díky tomu dochází v cívce jen k nepatrným tepelným ztrátám. Jakmile je tedy ustálen elektrický proud, může být zdroj energie odpojen. [1]

Celková energie uložená v cívkách může být vyjádřena vztahem:

$$E = \frac{1}{2} \cdot L \cdot I^2,$$

kde L je vlastnost cívky zvaná indukčnost. Pro indukčnost platí vztah:

$$L = \mu \cdot \frac{N^2 \cdot S}{l},$$

kde μ je permeabilita prostředí, N je počet závitů cívky, S je obsah průřezu cívky a l je délka cívky. [15]

5.2.2 Konstrukce a provedení

Systém pro akumulaci energie v supravodivých cívkách, zkráceně SMES (z angl. superconducting magnetic energy storage), se obecně skládá ze tří základních částí. První je samotná cívka, další je systém chlazení a poslední je soustava měničů a usměrňovačů. [15]

Jev supravodivosti je společný pro mnoho materiálů, liší se pouze teplotou, kdy k němu dochází. Samozřejmě je žádoucí, aby tato tzv. kritická teplota byla co nejvyšší. Nejvýhodnějším materiálem pro výrobu supravodivých cívek se prozatím prokázal být niob, resp. slitiny na bázi niobu; podle slitiny se kritická teplota supravodivosti pohybuje okolo 10-23 K. Dalším zajímavým materiálem je sloučenina $YBa_2Cu_3O_2$, jejíž kritická teplota je 93 K nebo sloučenina MgB_2, jejíž kritická teplota je 39 K a je velmi dobře zpracovatelná a nepříliš drahá. [1]

Další klíčovou částí je systém chlazení. Chlazení probíhá za pomoci tekutého hélia nebo dusíku. Právě chlazení je největším úskalím technologie SMES, protože se jedná o nejvíce energeticky náročnou část. Teoreticky je možné uchovávat energii v cívce dlouhodobě dokud je cívka chlazena, to je však v praxi nevýhodné. [1; 15]

5.2.3 Vlastnosti a použití

Největší výhodou SMES technologie, podobně jako u superkondenzátorů, je jejich rychlá odezva a možnost vydat velké množství během krátkého časového intervalu. Další charakteristickou výhodou je vysoká účinnost. Neuvažujeme-li energii potřebnou k chlazení, dochází k největším ztrátám v soustavě měničů a usměrňovačů; účinnost se tam může pohybovat kolem 85-90%. [14]

Největším záporem této technologie je již zmíněná nutnost chlazení. Tento problém by mohl vyřešit výzkum tzv. vysokoteplotní supravodivosti.

Možnost použití supravodivých cívek k akumulaci energie je vzhledem k podobnosti stejná jako u superkondenzátorů. Největší uplatnění prozatím nalezly ve výzkumu, pro napájení fúzních reaktorů nebo urychlovačů částic. [14]

6 Srovnání technologií

Z předchozích kapitol je zřejmé, že žádná technologie nedisponuje ideálními parametry. V *tabulce 6-1* jsou uceleně zobrazeny hlavní parametry jednotlivých technologií, kterými jsem se v této práci zabýval. Je tak možné si udělat představu o běžných hodnotách výkonu nebo kapacity. Zároveň je patrné, že technologie, která má například vysoký výkon, naopak zaostává v energetické hustotě apod.

Nejvýhodnější se pro akumulaci energie jeví kombinace různých technologií, jež by se navzájem doplňovaly. Díky rozdílným vlastnostem se každá technologie hodí pro různá využití. Kromě typu přeměny energie lze technologie akumulace energie rozdělit do tři skupin podle času vybíjení:

- **Krátká doba vybíjení** (sekundy až minuty): superkondenzátory, SMES, setrvačníky
  Krátkodobé technologie jsou vhodné pro tzv. peaks shaving, tedy vyrovnání chvilkových píků v přenosové síti, jež vedou ke zkvalitnění přenosu elektrické energie.
- **Střední doba vybíjení** (minuty až hodiny): sekundární články, průtokové baterie, PVE, CAES
  Střednědobé technologie mohou být použity v širším rozsahu. Lze použít k vykrývání výpadků energie nebo uskladnění momentálního přebytku energie v síti; zajišťují flexibilitu a možnost regulace v přenosové síti.
- **Dlouhá doba vybíjení** (hodiny až dny): PVE, CAES, ukládání vodíku
  Dlouhodobé technologie by mohly sloužit k vytvoření dlouhodobých rezerv a sezonnímu uskladnění energie.

Tabulka 6-1: Srovnání parametrů akumulačních technologií [27]

Technologie	Energetická hustota [Wh/l]	Běžné hodnoty výkonu [MW]	Běžné hodnoty kapacity [MWh]	Účinnost cyklu [%]	Životnost [10^3 cyklů]
PVE	0,5 – 1,5	100 – 5000	500 – 8000	70 – 85	10 – 30
CAES	3 – 6	< 300	< 1000	~54; 70*	8 – 12
Setrvačník	20 – 80	0,1 – 20	< 5	90 – 95	20+
Pb akumulátor	50 – 80	< 40	0,001 – 40	70 – 80	0,5 – 1
Li-ion akumulátor	200 – 500	1 – 100	~0,004 – 10	75 – 90	1 – 10
NiCd akumulátor	60 – 150	< 40	6,75	60 – 70	2 – 2,5
VRFB	16 – 33	~0,03 – 3	< 60	75 – 85	12+
Palivový článek	500 – 3000	< 50	< 40	45 – 66	1+
Superkondenzátor	10 – 30	< 0,3	~0,0005	90 – 97	100+
SMES	0,2 – 2,5	0,1 – 10	~0,0008	95 – 97	100+

** platí pro technologii AA-CAES*

7 Návrh přečerpávací vodní elektrárny

Tato část práce se zabývá zjednodušeným návrhem přečerpávací vodní elektrárny podle zadaných vstupních hodnot. Úkolem je navrhnout spád a velikost nádrže pro zajištění požadovaného výkonu a kapacity a dále pak graficky zpracovat závislost mezi spádem a velikostí nádrže, resp. průtokem.

Jako vstupní hodnoty pro zjednodušený návrh přečerpávací vodní elektrárny poslouží hodnoty definované tzv. minutovou zálohou pro 5 minut (MZ5). Tímto pojmem se rozumí podpůrná služba, do které spadají elektrárenské bloky, jež jsou schopné do 5 minut poskytnout sjednanou regulační zálohu. Parametry jsou stanoveny společností ČEPS a.s., jež v České republice zabezpečuje přenosovou síť. Minimální velikost výkonu regulační zálohy je 30 MW a minimální doba, po kterou musí být garantováno poskytování regulační zálohy, jsou 4 hodiny. [28]

Pro výpočet bude zapotřebí dvou základních rovnic. Rovnice pro výpočet potenciální energie a rovnice pro výpočet výkonu.

$$E = m \cdot g \cdot h = \rho \cdot V \cdot g \cdot h$$

$$P = \frac{E}{t} = \frac{\rho \cdot V \cdot g \cdot h}{t} = \dot{V} \cdot \rho \cdot g \cdot h$$

Podle hodnot udávaných ČEPS byl zvolen požadovaný výkon a čas, po který je nutné tento výkon dodávat následovně:

$$P = 35\ MW$$

$$t = 4\ h$$

Výkon 35 MW není pro přečerpávací vodní elektrárnu příliš velký výkon; pro srovnání, nejmenší přečerpávací vodní elektrárna v ČR je Štěchovice II, jež disponuje výkonem 45 MW. Výška spádu ve Štěchovicích je cca 220 m. Pro naši navrhovanou elektrárnu tedy byla zvolena výška spádu $h = 200\ m$.

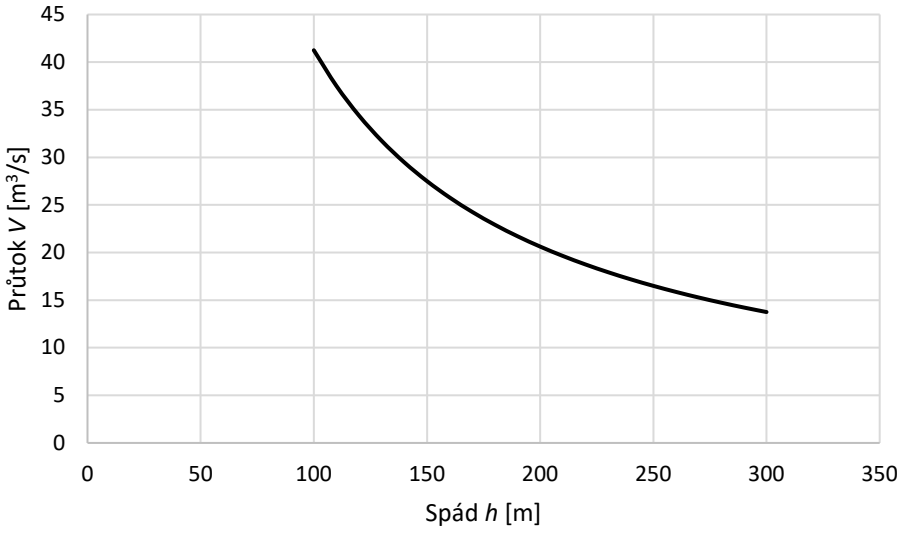
Nyní lze snadno dopočítat objemový průtok turbínou z rovnice pro výpočet výkonu turbíny, resp. generátoru. Při výpočtu je třeba vzít v úvahu celkovou účinnost soustrojí. Účinnost turbíny se pohybuje do 93%, účinnost generátoru 94% a účinnost převodového mechanismu 99%. Pro celkovou účinnost je třeba vynásobit dílčí účinnosti.

$$\eta_S = \eta_{turb} \cdot \eta_{gen} \cdot \eta_{př} = 0{,}93 \cdot 0{,}94 \cdot 0{,}99 = 0{,}865 = 86{,}5\%$$

$$P_G = \dot{V}_G \cdot \rho \cdot g \cdot h \cdot \eta_S$$

$$\dot{V}_G = \frac{P_G}{\rho \cdot g \cdot h \cdot \eta_S} = \frac{35 \cdot 10^6}{1000 \cdot 9{,}81 \cdot 200 \cdot 0{,}865} = \underline{20{,}62\ m^3/s}$$

Při volbě jiného spádu by se objemový průtok měnil nepřímo úměrně. Tato závislost je znázorněna v *grafu 7-1*.



Graf 7-1: Závislost průtoku na spádu

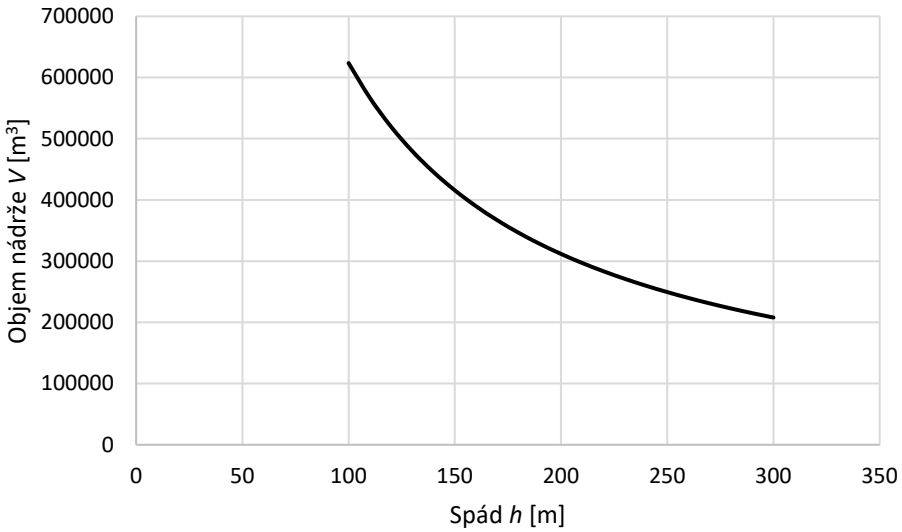
Pro získání minimálního nutného objemu horní nádrže stačí pouze objemový průtok vynásobit dobou vypouštění nádrže, v našem případě se jedná o 4 hodiny.

$$V' = \dot{V} \cdot t = 19{,}82 \cdot 4 \cdot 3600 = \underline{285\ 423{,}04\ m^3}$$

Z důvodu ztrát vlivem odparu a průsaku je nutno nádrž dále zvětšit. Ztráty byly odhadnuty na hodnotu cca 5%.

$$V = 1{,}05 \cdot V' = 1{,}05 \cdot 285\ 423{,}04 = \underline{299694{,}19\ m^3 \cong 300\ 000\ m^3}$$

Analogicky jako u průtoku se bude podle velikosti spádu měnit i výsledný objem nádrže.



Graf 7-2: Závislost objemu nádrže na spádu

Bude-li uvažována pro přečerpání daného objemu stejnou rychlost proudění, a tedy i stejný objemový tok, je možné spočítat příkon čerpadla, resp. výkon, který je třeba dodávat reverzní Francisově turbíně při zpětném chodu. Účinnost v tomto případě bude menší, byla zvolena hodnota $\eta_{\check{C}} = 80\%$.

$$P_{\check{C}} = \frac{\dot{V}_{\check{C}} \cdot \rho \cdot g \cdot h}{\eta_{\check{C}}} = \frac{20{,}62 \cdot 1000 \cdot 9{,}81 \cdot 200}{0{,}8} = 50\,570\,550\ \mathrm{W}$$

Srovnáním výkonu turbíny a příkonu čerpadla lze získat celkovou účinnost naší elektrárny.

$$\eta_C = \frac{P_G}{P_{\check{C}}} = \frac{35000000}{50570550} = 0{,}692 = 69{,}2\%$$

Kromě účinností při čerpání a vypouštění by v přesném výpočtu bylo třeba uvažovat i ztráty. Tyto ztráty lze obecně rozdělit do dvou kategorií – třecí ztráty a místní ztráty. Třecí ztráty závisí na typu voleného potrubí a rychlosti proudění. Místní ztráty rovněž závisí na rychlosti proudění. Dochází k nim například v místech, kde kapalina vstupuje do potrubí, v místech, kde se mění směr proudění nebo průměr potrubí apod. Rozsah této práce neobsáhl přesný výpočet těchto ztrát. Pro jejich určení by bylo třeba znát konkrétní konstrukční provedení celé potrubní soustavy.

8 Závěr

Cílem práce bylo popsat problematiku akumulace elektrické energie, jakožto možnosti pro lepší integraci obnovitelných zdrojů a zmírnění závislosti na fosilních zdrojích energie.

V rešeršní části práce jsem se zabýval rozdělením a popisem jednotlivých technologií včetně principu, kladů a záporů, použití aj. Možnosti akumulace byly z fyzikálního hlediska rozděleny do čtyř kategorií – mechanická, elektrochemická, chemická (vodíkové hospodářství) a elektromagnetická. Elektrickou energii lze skladovat i ve formě tepelné energie; v této práci jsem se touto možností nezabýval.

V další části jsem nastínil postup při návrhu přečerpávací vodní elektrárny ze zadaných parametrů. Ze vstupních hodnot a zvoleného spádu jsem vypočítal velikost nádrže a objemový průtok. Dále jsem graficky zaznamenal, jak se bude měnit velikost nádrže a objemový průtok při jiné hodnotě spádu. Vypočítal jsem, že pro spád 200 m a výkon 35 MW, jež je nutno dodávat po dobu čtyř hodin, je nutné postavit nádrž o minimálním objemu 300 000 m^3.

V České republice i ve světě zatím v akumulaci energie vítězí právě přečerpávací vodní elektrárny. Jejich atraktivita spočívá ve velkém výkonu a v možnosti ukládat energii na delší dobu při přijatelné účinnosti. Nevýhodou však zůstává jejich nízká energetická hustota a vysoké pořizovací náklady.

Má-li se lidstvo vyvíjet směrem k budoucnosti bez fosilních zdrojů energie, je třeba věnovat pozornost vývoji akumulace elektrické energie a hledat alternativy, jež by vedly k uspokojení energetických potřeb obyvatelstva.

Seznam použitých zdrojů a literatury

[1] HUGGINS, Robert. *Energy storage*. New York: Springer, 2010. ISBN 9781441910240.

[2] BARNES, Frank a Jonah LEVINE. *Large Energy Storage Systems Handbook*. Hoboken: CRC Press, 2011. ISBN 978-142-0086-010.

[3] TER-GAZARIAN, Andrei. *Energy storage for power systems*. Stevenage, Harts., U.K.: P. Peregrinus on behalf of the Institution of Electrical Engineers, 1994. ISBN 08-634-1264-5.

[4] Přečerpávací vodní elektrárna. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Přečerpávací_vodní_elektrárna

[5] Technologický plán akumulace energie. BUDÍN, Jan. *OEnergetice* [online]. 2015 [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/

[6] Přečerpávací vodní elektrárna – princip a uspořádání. BUDÍN, Jan. *OEnergetice* [online]. 2015 [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/typy-elektraren/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2/

[7] Přečerpávací vodní elektrárna Dlouhé stráně. *ČEZ* [online]. b.r. [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/dlouhe-strane.html

[8] Přečerpávací vodní elektrárna Dalešice. *ČEZ* [online]. b.r. [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/dalesice.html

[9] Vodní elektrárny Štěchovice. *ČEZ* [online]. b.r. [cit. 2017-02-06]. Dostupné z: https://www.cez.cz/cs/vyroba-elektriny/obnovitelne-zdroje/voda/stechovice.html

[10] Compressed Air Energy Storage (CAES). *EnergyStorageAssociation* [online]. b.r. [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: http://energystorage.org/compressed-air-energy-storage-caes

[11] Compressed air energy storage. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-02-07]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Compressed_air_energy_storage

[12] Advanced Adiabatic Compressed Air Energy Storage (AA-CAES). *EnergyStorageAssociation* [online]. b.r. [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: http://energystorage.org/advanced-adiabatic-compressed-air-energy-storage-aa-caes

[13] Flywheel energy storage. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: https://en.wikipedia.org/wiki/Flywheel_energy_storage

[14] *White paper: Electrical Energy Storage* [online]. Ženeva, 2011 [cit. 2017-03-11]. ISBN 978-2-88912-889-1. Dostupné z: http://www.iec.ch/whitepaper/energystorage/

[15] MOSELEY, Patrick, ed. a Jürgen GARCHE, ed. *Electrochemical Energy Storage for Renewable Sources and Grid Balancing*. Amsterdam: Elsevier, 2014. ISBN 9780444626165.

[16] Galvanický článek. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Galvanický_článek

[17] Nickel-based Batteries. *BatteryUniversity* [online]. 2016 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/nickel_based_batteries

[18] Lithium Ion (LI-ION) Batteries. *EnergyStorageAssociation* [online]. b.r. [cit. 2017-02-12]. Dostupné z: http://energystorage.org/energy-storage/technologies/lithium-ion-li-ion-batteries

[19] How do Lithium Batteries Work?. *BatteryUniversity* [online]. 2016 [cit. 2017-02-17]. Dostupné z: http://batteryuniversity.com/learn/article/lithium_based_batteries

[20] Průtoková baterie. REICHL, Tomáš. *OEnergetice* [online]. 2015 [cit. 2017-02-10]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/

[21] Flow Batteries. *EnergyStorageAssociation* [online]. b.r. [cit. 2017-03-11]. Dostupné z: http://energystorage.org/energy-storage/storage-technology-comparisons/flow-batteries

[22] Tesla představila baterie Powerwall a Powerpack. In: *OEnergetice* [online]. b.r. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/tesla-predstavila-baterie-powerwall-a-powerpack/

[23] Powerwall. In: *Tesla* [online]. b.r. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://www.tesla.com/en_GB/powerwall

[24] Powerpack. In: *Tesla* [online]. b.r. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: https://www.tesla.com/en_GB/powerpack

[25] Tesla dodala na Havaj obří baterii o kapacitě 52 MWh, chce zachránit jih Austrálie. In: *Hybrid.cz* [online]. b.r. [cit. 2017-05-14]. Dostupné z: http://www.hybrid.cz/tesla-dodala-obri-baterii-o-kapacite-52-mwh-na-havaj-chce-zachranit-jih-australie

[26] DOUCEK, Aleš, Daniel TENKRÁT a Petr DLOUHÝ. Vodíkové hospodářství a možnosti využití vodíku k regulaci obnovitelných zdrojů energie. *Paliva* [online]. 2011, **3**(1), 1–7 [cit. 2017-03-16]. Dostupné z: http://paliva.vscht.cz/cz/archiv-clanku/detail/10

[27] LUO, Xing, Jihong WANG, Mark DOONER a Jonathan CLARKE. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy* [online]. 2015, **137**, 511-536 [cit. 2017-04-25]. DOI: 10.1016/j.apenergy.2014.09.081. ISSN 03062619. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0306261914010290

[28] *Minutová záloha 5minutová* [online]. b.r. [cit. 2017-04-15]. Dostupné z: https://www.ceps.cz/CZE/Cinnosti/Podpurne-sluzby/KategoriePpS/Stranky/MZ5.aspx

[29] Zvodeň. In: *Wikipedia: the free encyclopedia* [online]. San Francisco (CA): Wikimedia Foundation, 2001 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: https://cs.wikipedia.org/wiki/Zvodeň

[30] GIANNAKOUDIS, Garyfallos, Athanasios PAPADOPOULOS, Panos SEFERLIS a Spyros VOUTETAKIS. Optimum design and operation under uncertainty of power systems using renewable energy sources and hydrogen storage. *International Journal of Hydrogen Energy* [online]. 2010, **35**(3), 872-891 [cit. 2017-03-18]. DOI: 10.1016/j.ijhydene.2009.11.044. ISSN 03603199. Dostupné z: http://linkinghub.elsevier.com/retrieve/pii/S0360319909018138

Seznam obrázků

Obr. 2.1-1: Schéma přečerpávací vodní elektrárny [3] 10
Obr. 2.2-1: Schéma principu CAES [3] 13
Obr. 2.2-2: Kompresor pro izotermickou kompresi [11] 15
Obr. 2.2-3: Mapa Evropy s místy koncentrovanými na solné jeskyně [2] 16
Obr. 2.3-1: Tvar setrvačníku s konstantním napětím [1] 18
Obr. 2.3-2: Příklad provedení setrvačníku [13] 18
Obr. 3.1-1: Schéma galvanického článku [16] 20
Obr. 3.2-1: Schéma průtokové baterie [20] 23
Obr. 3.3-2: Tesla Powerwall 2. gen. [23] 25
Obr. 3.3-1: Tesla Powerwall 1. gen. [22] 25
Obr. 4.2-1: Rozložení zdrojů pro produkci vodíku [26] 27
Obr. 4.2-2: Elektrolyzér pro HTEL [15] 29
Obr. 4.2-3: Schéma vysokoteplotní elektrolýzy vody [15] 30
Obr. 4.4-1: Schéma systému pro regulaci OZE [30] 33

Seznam tabulek

Tabulka 2.3-1: Momenty setrvačnosti pro různé tvary [13] 17
Tabulka 2.3-2: Koeficienty tvaru setrvačníku [1] 17
Tabulka 6-1: Srovnání parametrů akumulačních technologií [27] 37