

**ČESKÉ VYSOKÉ
UČENÍ TECHNICKÉ
V PRAZE**

**FAKULTA
STROJNÍ**



**BAKALÁŘSKÁ
PRÁCE**

2017

**ALBERT
BURÝŠEK**



ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE

I. OSOBNÍ A STUDIJNÍ ÚDAJE

Příjmení: **Burýšek** Jméno: **Albert** Osobní číslo: **439068**
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:

Moderní trendy a metody pro skladování elektrické energie

Název bakalářské práce anglicky:

Modern methods and trends for electricity storage

Pokyny pro vypracování:

Stručná rešerše tradičních metod pro skladování elektrické energie, jejich možností a úskalí. Detailní přehled nových metod a jejich perspektiva (baterie, palivové články, zásobníky pro stlačený vzduch, ukládání do vysokopotenciálního tepla,...). Práce bude obsahovat:

1. Rešerši jednotlivých metod skladování elektřiny včetně jejich klasifikace
2. Porovnání jednotlivých metod v rámci zvolené metodiky
3. Závěrečná doporučení a zhodnocení

Seznam doporučené literatury:

Jméno a pracoviště vedoucí(ho) bakalářské práce:

Ing. Václav Novotný, ústav energetiky FS

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

Datum zadání bakalářské práce: **12.04.2017**

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.

Datum převzetí zadání

Podpis studenta

Prohlašuji, že jsem bakalářskou práci s názvem: „Moderní trendy a metody pro skladování elektrické energie“ vypracoval samostatně pod vedením pana Ing. Václava Novotného, s použitím literatury, uvedené na konci mé bakalářské práce v seznamu použité literatury.

V Praze 20.9.2016

Podpis: Albert Burýšek

Poděkování

Chtěl bych poděkovat svému vedoucímu bakalářské práce, Ing. Václavu Novotnému, za odborné vedení, za pomoc a rady při zpracování této práce.

MODERNÍ METODY A TRENDY PRO SKLADOVÁNÍ ELEKTRICKÉ ENERGIE

AUTOR: ALBERT BURÝŠEK

VEDOUcí: ING. VÁCLAV NOVOTNÝ

Abstrakt:

Tato práce se zabývá tématem skladování (akumulace) elektrické energie. V úvodu je popsána metodika, základní problematika, význam a přínos tohoto tématu. Dále jsou stručně popsány již vyspělé, komerčně využívané technologie a následně podrobněji probrány technologie nové a perspektivní. Některé z těchto technologií jsou v závěrečné části srovnány dle různých hledisek.

Abstrakt:

This work discusses the topic of electrical energy storage. First, the main issues, the importance and the benefits of this topic are described. Then there is a quick look at mature/commercialized technologies. Afterwards new and perspective technologies are listed and described. In the final section, some of these technologies are compared.

Klíčová slova:

Akumulace elektrické energie, zdroj energie, baterie, setrvačnick, přečerpávací elektrárna, akumulátor, palivový článok, superkondenzátor, průtoková baterie, supravodivost, citelné teplo, skupenské teplo, elektřina, rozvodová síť.

Key words:

Electrical energy storage, power source, battery, flywheel, pumped-storage power plant, accumulator, fuel cell, supercapacitor, flow battery, superconductivity, sensible heat, latent heat, electricity, grid.

Obsah

| | |
|---|----|
| 1. Úvod..... | 8 |
| 2. Metodika | 9 |
| 2.1 Reverzibilní akumulace | 9 |
| 2.2 Nereverzibilní akumulace..... | 9 |
| 3. Vyspělé/komerčně využívané technologie | 10 |
| 3.1 Přečerpávací vodní elektrárny (PVE/PHS – Pumped Hydro Storage) | 10 |
| 3.2 CAES (Compressed air energy storage)..... | 11 |
| 3.3 Akumulátory | 12 |
| 3.3.1 Olověné akumulátory (Pb)..... | 13 |
| 3.3.2 Ni-Cd (Nikl – Kadmiové) akumulátory | 13 |
| 3.3.3 Ni-MH (Nikl – Metal Hydridové) akumulátory | 13 |
| 3.3.4 Na-S (Sodíkovo – Sírové) akumulátory | 14 |
| 3.3.5 Lithiové akumulátory..... | 14 |
| 4. Perspektivní technologie | 15 |
| 4.1 Mechanické | 15 |
| 4.1.1 Setrvačníky | 15 |
| 4.1.2 AA-CAES (Advanced adiabatic compressed air energy storage)..... | 16 |
| 4.2 Elektrochemické | 17 |
| 4.2.1 Průtokové baterie..... | 17 |
| 4.2.2 Metal-air (kov-vzduch) baterie | 20 |
| 4.2.3 Li-ion akumulátory | 20 |
| 4.3 Elektrické | 23 |
| 4.3.1 Superkondenzátory | 23 |
| 4.3.2 SMES (Superconducting magnetic energy storage, Supravodivý indukční akumulátor) | 23 |
| 4.4 Chemické..... | 25 |
| 4.4.1 Akumulace energie pomocí vodíku – Palivové články..... | 25 |
| 4.5 Termální | 27 |
| 4.5.1 “Citelné“ teplo..... | 27 |
| 4.5.2 Skupenské teplo | 28 |
| 4.5.3 Termochemická akumulace tepla | 28 |
| 4.5.4 LAES (Liquid air energy storage) – Akumulace energie pomocí kapalného vzduchu..... | 30 |
| 4.5.5 SiFES (Siemens Future Energy Solution)..... | 31 |
| 4.6 Hybridní | 32 |
| 5. Srovnání metod akumulace elektrické energie..... | 33 |
| 6. Závěr..... | 38 |

1. Úvod

Za posledních pár desetiletí se spotřeba i výroba elektřiny mnohonásobně zvýšila, a stále roste. Toto souvisí se zvyšující se úrovní života, s růstem počtu obyvatelstva, s ekonomickým a průmyslovým rozvojem a s mnoha dalšími faktory. Převážná většina elektrické energie se získává z neobnovitelných zdrojů energie, což ale začíná být problém. Zásoby těchto zdrojů totiž rychle docházejí. Cílem tedy je omezit využívání neobnovitelných zdrojů energie, upřednostňovat zdroje obnovitelné a celkově snížit spotřebu elektrické energie. Nejslibnějším způsobem, jak těchto cílů dosáhnout, je skladování elektrické energie. Skladování energie je velmi důležité především pro možné efektivní využívání obnovitelných zdrojů energie, jelikož výroba energie z těchto zdrojů silně závisí na přírodních podmínkách, což často neodpovídá momentální potřebě energie v rozvodové síti. [21, 36].

Pod procesem skladování elektrické energie se rozumí převádění elektrické energie v jinou, lépe uchovatelnou formu, její uskladnění pomocí různých metod a následné přeměnění zpět v libovolný okamžik [29].

Skladování elektrické energie je téma s velkým přínosem a potenciálem, které přináší spoustu výhod, jako např.: lepší využití energie, minimalizace odpadu a plýtvání, možnost dodání množství energie dle momentální potřeby, vyšší účinnost obnovitelných zdrojů energie, nové technologické možnosti, nezávislost na rozvodové síti a mnoho dalších [21, 27, 36].

Již v dnešní době se některé metody skladování elektrické energie běžně používají, ale na převážné většině metod se teprve pracuje. Toto téma má veliký potenciál a tudíž zažije v budoucnosti veliký rozvoj.

2. Metodika

Akumulaci elektrické energie lze obecně rozdělit na akumulaci reverzibilní a nereverzibilní.

2.1 Reverzibilní akumulace

Reverzibilní akumulací elektrické energie se rozumí akumulace „obousměrná“. U tohoto druhu akumulace nedochází k výrazným ztrátám při přeměně energie z jedné formy na jinou. Pod reverzibilní akumulaci spadá převážná většina metod uvedených v této práci.

2.2 Nereverzibilní akumulace

Nereverzibilní akumulace naopak není určena pro „obousměrný“ provoz. Trpí velkými ztrátami při přeměně formy energie. Tyto metody mají tudíž nízkou účinnost a používají se spíše pouze ve smyslu odložení spotřeby. Jejich hlavním zástupcem jsou metody termální ([4.5](#)). I u termálních metod se dá dosáhnout reverzibility, ale pouze za velmi vysokých teplot, což je drahé a tudíž se to moc nepoužívá. Většina termálních reverzibilních metod je stále ve výzkumu.

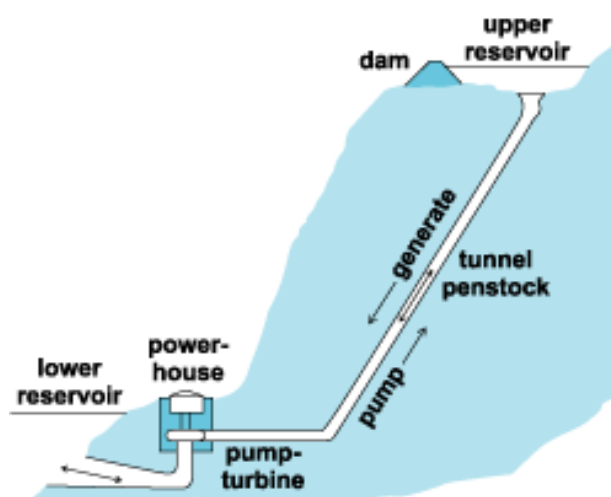
3. Vyspělé/komerčně využívané technologie

3.1 Přečerpávací vodní elektrárny (PVE/PHS – Pumped Hydro Storage)

Přečerpávací vodní elektrárny mají dlouhou historii. Byly to první technologie, které dokázali ukládat velké množství energie [25]. Díky dlouhému vývoji dosáhla tato metoda již téměř svého maximálního potenciálu.

Princip PVE je velmi jednoduchý (viz obr 1). Skládají se ze dvou nádrží, které jsou umístěny v různých výškách a jsou propojeny potrubím. Pokud není potřeba dodávky energie, je voda z dolní nádrže čerpána do nádrže horní, kde je poté připravena na další použití. Při potřebě energie se voda pustí potrubím zpět do dolní nádrže, při čemž pohání turbíny, které přes alternátor dodávají elektrickou energii do sítě. Množství uchované energie závisí především na výškovém rozdílu nádrží a na celkovém množství uskladněné vody. [19, 23, 25]

Existují PVE různých velikostí a výkonů. Jejich průměrná účinnost je 70-85% a mají dlouhou životnost (cca 40 let). Jsou schopny začít dodávat energii do sítě ve velmi krátkém čase a provozní náklady na 1 kWh jsou velmi nízké. Mezi nevýhody PVE patří vysoké náklady na výstavbu, dlouhá doba výstavby a vysoké nároky na umístění [23, 25, 29].



Obr.1 Schéma PVE

(Převzato z: FatCatWatch. In: <https://pumpedstorage.wordpress.com/>: Pumped storage [online]. 2011 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z:

<https://pumpedstorage.files.wordpress.com/2011/04/image.gif?w=590>)

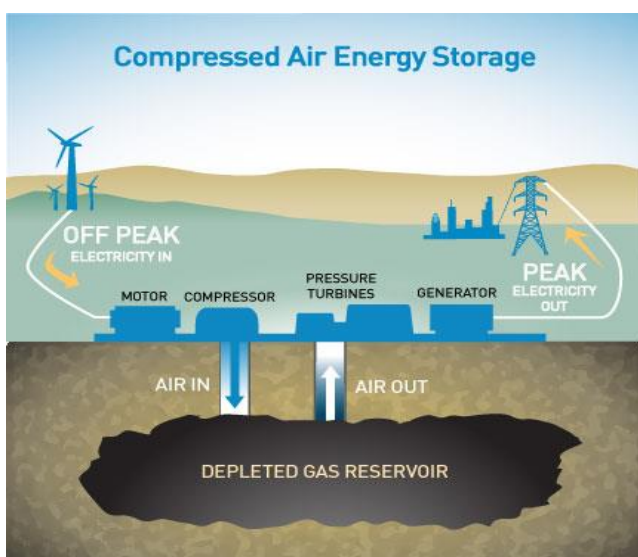
3.2 CAES (Compressed air energy storage)

CAES je druhou metodou, která dokáže skladovat velké množství energie. Tato technologie pracuje na principu stlačování vzduchu. První elektrárna na stlačování vzduchu byla postavena již v roce 1978 v německém Huntorfu [30].

Schematický princip metody CAES je zobrazen na obrázku 2. Vzduch je stlačován řadou kompresorů do úložiště (nejčastěji podzemního). Kompresory jsou poháněny motorem, který využívá přebytečnou energii v síti, v době nízké potřeby energie. Energie je tak uchovávána v podobě stlačeného vzduchu, který je umístěn ve velkých podzemních (/nadzemních) prostorech. Při potřebě energie je vzduch z úložiště vypouštěn, přičemž je ohříván teplem, které se získá např. spalováním fosilních paliv, a poté vstupuje do turbín. Tak je energie dodávána zpět do sítě [17, 18, 30].

Účinnost systému CAES je kolem 45 %. Dokáže skladovat velké množství energie (typicky 50-300 MWh) a to po velmi dlouhou dobu (díky nízkým ztrátám vzduchu z podzemního úložiště). Tato metoda také dokáže dodávat energii do sítě již za cca 10 minut, což je velmi krátká doba. Hlavní nevýhodou této technologie je potřeba obrovských podzemních prostorů pro uskladnění vzduchu. Používají se například solné jeskyně, staré doly nebo velké nadzemní nádrže [20, 23].

V dnešní době jsou již vyvíjeny různé vylepšené obdoby této technologie, jako LAES (viz 4.5.4) nebo AA-CAES (viz 4.1.2). Tyto metody budou podrobněji popsány později.



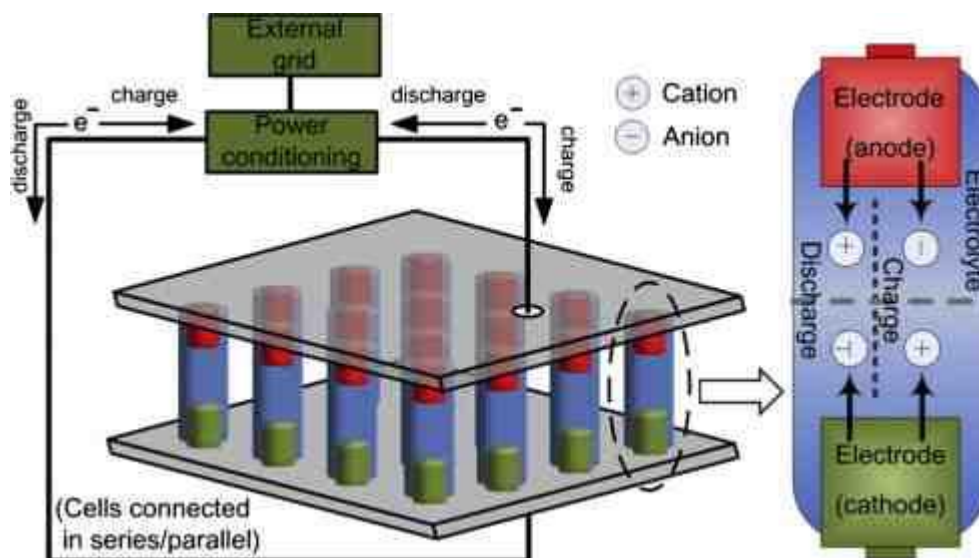
Obr.2 Schéma metody CAES
(Převzato z: [www.pge.com:
compressed-air-energy-storage](http://www.pge.com/compressed-air-energy-storage) [online].
2017 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z:

https://www.pge.com/pge_global/local/images/data/en-us/about-pge/environment/what-we-are-doing/compressed-air-energy-storage)

3.3 Akumulátory

Jde o velice rozsáhlou problematiku, s mnoha zástupci a různými principy. V této kapitole jsou pouze stručně uvedeny nejběžnější historické typy akumulátorů. Perspektivnější typy akumulátorů a baterií jsou následně uvedeny v kapitole [4.2](#).

Akumulátory fungují na principu chemické reakce, díky níž se uložená chemická energie přemění na energii elektrickou. Proces lze provést i opačně, čímž se akumulátor opět nabije. Akumulátory jsou sestaveny z několika jednotlivých elektrochemických článků, které produkují napětí a dají se spojovat dohromady do sérií (nebo paralelně), pro dosažení vyšších hodnot napětí. Každý článek se skládá z kladné elektrody (katody) a záporné elektrody (anody), které jsou umístěny v elektrolytu (pevném/tekutém). Při vybíjení probíhají elektrochemické reakce na obou elektrodách současně a elektrony jdou z anody na katodu. Při nabíjení dochází k opačným reakcím a akumulátor je opět nabit přivedením napětí z vnějšího oběhu na elektrody. Schematická funkce obecného akumulátoru je znázorněna na obrázku 3 [17, 19, 29].



Obr.3 Princip obecného akumulátoru

(Převzato z: LUO, Xing, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 2015, 137: 511-536)

3.3.1 Olověné akumulátory (Pb)

Tento typ akumulátorů je nejstarší (1859 – Gaston Plante), nejvyvinutější a také nejpoužívanější. Jsou složeny ze dvou olověných desek nebo trubek a jako elektrolyt je použit roztok kyseliny sírové. Mají vysokou účinnost, rychlou odezvu, jednoduchou výrobu a nízkou pořizovací cenu. Problémem těchto akumulátorů je ale použití olova, kvůli němuž jsou nebezpečné pro životní prostředí. Také nejsou schopny pracovat za vyšších teplot [17, 18, 29].

3.3.2 Ni-Cd (Nikl – Kadmiové) akumulátory

Ni-Cd jsou nejpoužívanější niklové akumulátory. Jednu elektrodu tvoří hydroxid niklu, druhou kadmium a elektrolytem je tekutý alkalický roztok. Dokážou pracovat i za vyšších teplot, mají dlouhou životnost a oproti olověným akumulátorům mají vyšší hustotu energie. Tyto akumulátory se ale poslední dobou přestávají používat, jelikož jak nikl, tak kadmium jsou toxické materiály, což představuje rizika pro naše zdraví i pro životní prostředí. Tyto akumulátory také trpí paměťovým efektem, který značně snižuje jejich kapacitu, pokud nejsou před nabíjením zcela vybity [17, 19, 29].

3.3.3 Ni-MH (Nikl – Metal Hydridové) akumulátory

Ni-MH je druhým nejpoužívanějším typem niklových akumulátorů, který je velice podobný typu Ni-Cd a často ho nahrazuje. Hlavní výhodou je, že neobsahují toxické kadmium, ale druhá elektroda je místo něj tvořena různými slitinami. Ni-MH mají oproti Ni-Cd výrazně vyšší objemovou hustotu energie a trpí menším paměťovým efektem. Nevýhodou těchto akumulátorů je poměrně vysoké samovybití a vyšší pořizovací cena. Používají se ve spoustě přenosných zařízeních a také v elektrických nebo hybridních vozidlech [19, 29].

3.3.4 Na-S (Sodíkovo – Sírové) akumulátory

Zde je na katodě roztavená síra a na anodě je roztavený sodík. Elektrolyt je pevný a je tvořen beta oxidem hlinitým. Tento typ akumulátoru musí pracovat při vysokých teplotách (kolem 300°C), čímž se zajistí správná vodivost elektrolytu. Výhodami jsou velmi vysoká účinnost, výborná objemová hustota energie, dlouhá životnost, minimální samovybíjení, výroba z levných netoxických materiálů a nízké nároky na údržbu. Mezi nevýhody patří právě potřeba vysokých operačních teplot a možnost koroze. Tyto akumulátory se používají především pro akumulaci větších množství energie [17, 19, 29].

3.3.5 Lithiové akumulátory

Tento typ akumulátorů má poměrně dlouhou historii, ale pořádného rozšíření se dočkává až v současnosti díky technologickým pokrokům a perspektivním výrobkům (konkrétně Tesla PowerWall a PowerPack), které budou popsány později v kapitole [4.2.3.1](#).

V těchto akumulátorech je anoda tvořena levným prvkem (karbidem uhlíku) a katoda je tvořena oxidem Lithia. Elektrolyt může být různý, podle něhož se rozlišují typy lithiových akumulátorů. Tyto akumulátory jsou téměř ve všech směrech lepší než předchozí typy akumulátorů. Disponují velmi vysokou účinností (téměř 100%) a vysokou hustotou energie. Hlavním problémem těchto akumulátorů je ale jejich vysoká cena, která je způsobena speciálními požadavky na jejich optimální funkci. Kvůli vysoké ceně se tyto akumulátory používají zatím většinou u malých spotřebičů [17, 19, 29].

4. Perspektivní technologie

4.1 Mechanické

4.1.1 Setrvačníky

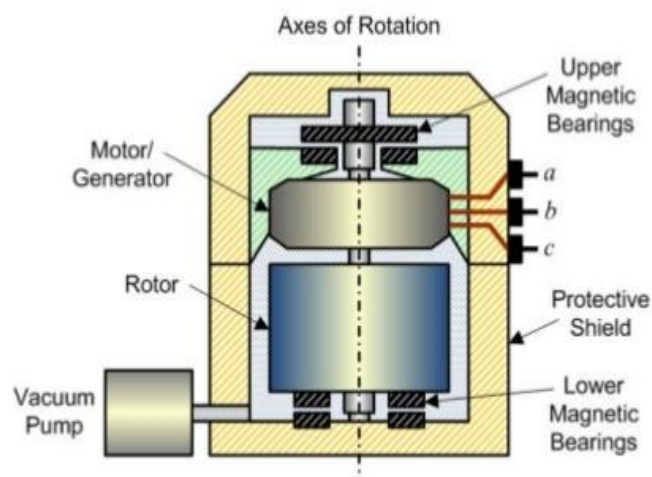
Setrvačníky byly jedním z prvních vynalezených způsobů na akumulaci energie. Jejich princip je velmi jednoduchý. Získává kinetickou energii roztáčením rotoru, který je poháněný elektrickou energií. V této fázi se chová jako motor a kinetickou energii uchovává. Při potřebě energie se naopak začne chovat jako generátor a elektrickou energii uvolňuje. Rotor je uložený ve vakuu, aby se snížil odpor vzduchu [24, 25].

Podle rychlosti rotace rotoru se setrvačníky dělí na vysoko-rychlostní a nízko-rychlostní. Vysokorychlostní setrvačníky dodávají nízký výkon po dlouhou dobu, a u nízko-rychlostních setrvačnicků je tomu naopak. Účinnost setrvačnicků je velmi výrazně ovlivněna jejich materiálem, geometrií a velikostí. [24, 29]

Setrvačníky mají velmi vysokou účinnost (až 95%), dlouhou životnost, nízké náklady na údržbu, nijak neznečišťují životní prostředí a dokáží pracovat i v nepříznivých podmínkách. Díky všem těmto výhodám by se setrvačníky mohli zdát jako ideální mechanismy na ukládání elektrické energie. Problémem setrvačnicků jsou však velké ztráty energie, způsobené především třením. Tyto ztráty se značně snížily díky vynalezení magnetických ložisek, silných, ale zároveň lehkých materiálů a také používáním kompozitů [24, 29].

Setrvačníky mají mnoho uplatnění, se kterými se ale stále experimentuje. Často se používají v provozech, kde i krátký výpadek proudu může mít velmi vážné následky. Mezi přední dodavatele setrvačnicků patří např. UPT, Piller, AFS-Trinity, Beacon power, Active Power, Caterpillar a Satcon [17].

Flywheel Energy Storage System



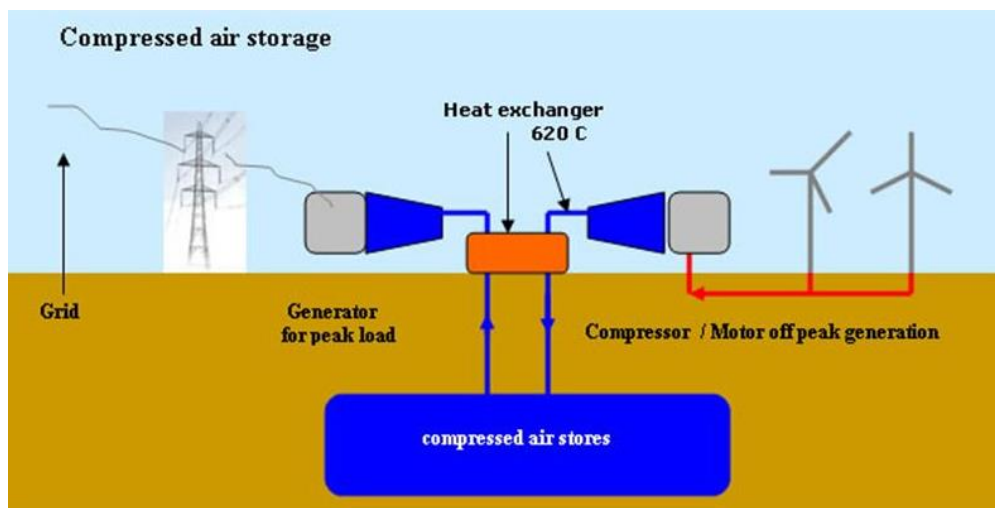
Obr.4 Schéma setrvačníku

(Převzato z: In: [www.slideshare.net : flywheel-energy-storage-system](http://www.slideshare.net/flywheel-energy-storage-system) [online]. 2014 [cit. 2016-10-19]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/asertseminar/flywheel-energy-storage-system>)

4.1.2 AA-CAES (Advanced adiabatic compressed air energy storage)

Metoda AA-CAES (“pokročilý adiabatický CAES”) je vylepšením klasického CAES. Princip je v podstatě stejný, ale rozdíl je v tom, že je zde integrovaný akumulátor tepelné energie, který akumuluje teplo při stlačování vzduchu do úložiště. Tímto teplem se následně vzduch opět ohřívá před vstupem do turbín. Díky tomu není potřeba ohřívát vzduch spalováním fosilních paliv, což výrazně zvýší účinnost celého systému na 70% [29, 30].

První demonstrační systém AA-CAES byl teprve nedávno postaven v Německém Stassfurtu s názvem ADELE. Má akumulační kapacitu 360 MWh, výkon 90 MW a účinnost cca 70% [29].



Obr.5 Schéma metody AA-CAES

(Převzato z: [www.climateandfuel.net: storage](http://www.climateandfuel.net:storage) [online]. 2015 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.climateandfuel.com/pages/storage.htm>)

4.2 Elektrochemické

4.2.1 Průtokové baterie

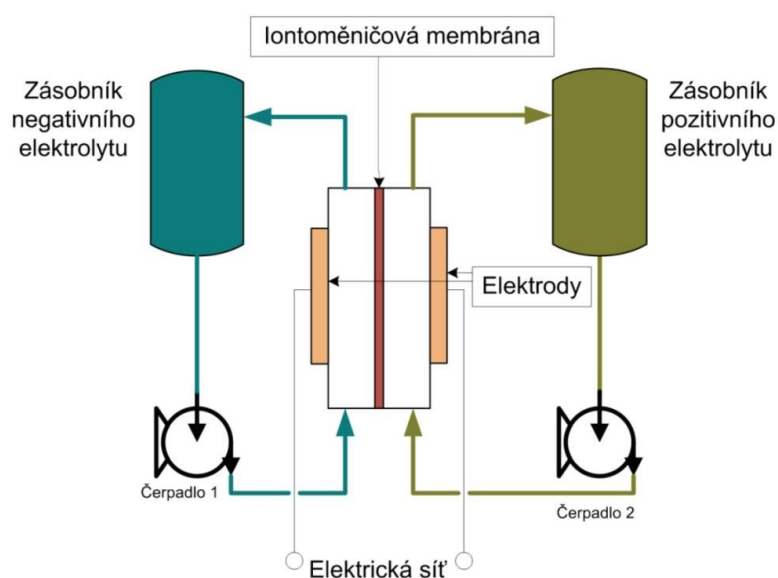
Průtoková baterie je jedním z pokročilejších typů akumulátorů. Liší se tím, že obsahuje dva elektrolyty, pozitivní a negativní, které jsou uloženy ve vnějších nádržích. Energie je uložena v rozpuštěných elektroaktivních prvcích obsažených v těchto elektrolytech. Každá nádrž je opatřena čerpadlem, které vhání elektrolyty do reakční části, kde jsou od sebe odděleny tenkou membránou propustnou pouze pro ionty. Zde probíhá chemická reakce. Při vybíjení se zde jeden elektrolyt zoxiduje na anodě a druhý se zredukuje na katodě, čímž se chemická energie z elektrolytů přemění na energii elektrickou. Při nabíjení se proces obrátí. Obr.6 schematicky znázorňuje tento princip [30, 34].

Výhodami průtokových baterií je, že mají velmi dlouhou životnost a počet cyklů se pohybuje až v řádech desetitisíců. Dochází také k minimálnímu samovybíjení. Hlavní předností těchto baterií však je to, že zatímco jejich výkon je dán velikostí reakční části a počtem článků spojených dohromady, tak jejich akumulací kapacita závisí pouze na množství a koncentraci elektrolytů. Tím pádem je zvýšení kapacity velice snadné. Účinnost průtokových baterií bývá 65-85%. Hlavní nevýhodou je nízká objemová hustota energie,

kteřá je pŕibliŕnĕ deset-krát menší, než u Lithiových akumulátorů. Dále je mechanismus těchto akumulátorů pomĕrnĕ sloŕitý, jejich cena je pŕiliš vysoká a také je výrazná potŕeba pŕáce ěerpadel vlivem tlakových ztrát mezi elektrodami. Tato technologie je stále ve fázi výzkumu a na vyřešení těchto problémů se pracuje [20, 29, 34].

Moderní pŕtokové baterie se dělí na dvě kategorie: redoxní a hybridní. U redoxních jsou všechny elektroaktivní prvky rozpuštěny v elektrolytech, zatímco u hybridních je jeden nebo více elektroaktivních prvků nerozpuštěný [30].

Mezi nejvyvinutĕjší typy těchto baterií patŕí Vanadium redoxní baterie (VRB), Zinko-bromidová baterie (ZnBR) a Bromido-sodíková baterie (PSB).



Obr.6 Schĕmatický princip pŕtokových baterií

(Pŕevzato z: REICHL, Tomáš. Pŕtoková-baterie. [Http://oenergetice.cz](http://oenergetice.cz) [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/>)

4.2.1.1 Vanadium redoxní baterie (VRB)

Tento typ průtokových baterií je nejspolehlivější a patří mezi redoxní průtokové baterie. Oba elektrolyty jsou na bázi vanadia. Mají velmi rychlou odezvu, dlouhou životnost a vysokou účinnost 85%. Nedostatečná rozpustnost a stabilita elektrolytů mají za následek nízkou hustotu energie. Mají širokou škálu uplatnění, ale většímu rozšíření brání především komplikovanost systému (potřeba čerpadel a senzorů). Dále je třeba zvýšit energetickou hustotu a celkově snížit cenu těchto baterií [13, 29].

4.2.1.2 Zinko-bromidová baterie (ZnBr)

Toto jsou jediné zatím používané hybridní průtokové baterie, o jejichž vývin pro komerční využití se postarali korporace ZBB Energy a Premium Power [29]. Konkrétní produkt ZBM byl vyrobený např. firmou RedFlow, který má pracovní výkon 3kW, špičkový 5kW a kapacitu 8kWh [29]. Elektrolyty jsou vodní roztoky obsahující elektroaktivní prvky na bázi zinku a brómu. Disponují především vysokou energetickou hustotou. Mají však oproti ostatním typům nízkou účinnost (65-75%) a navíc korodují. S uplatněním těchto baterií se teprve experimentuje [29].

4.2.1.3 Bromido-sodíková baterie (PSB - polysulfide bromide battery)

PSB je dalším typem redoxních průtokových baterií, který jako elektrolyty používá solné roztoky bromidu sodného a polysulfidu sodného. Účinnost se pohybuje okolo 75%, výrobní cena je nízká a disponuje velmi rychlou odezvou, díky čemuž má také širokou škálu uplatnění. Bylo již demonstrováno mnoho funkčních PSB systémů, ale pouze v řádech několika stovek kW (např. 120 kW systém od firmy Innogy s účinností 75%). Pro skladování energie pomocí PSB baterií v řádech MW je zatím třeba ještě více praktických zkušeností a snížení nákladů. Několik takovýchto projektů již bylo spuštěno (např. jeden v Anglii s kapacitou 120MWh a další v USA s toutéž kapacitou, určený k akumulaci energie z větrné elektrárny) ale právě kvůli nedostatku finančních prostředků a také kvůli technologickým problémům byly projekty přerušeny [29].

4.2.2 Metal-air (kov-vzduch) baterie

Metal-air baterie je poměrně novou a velmi perspektivní technologií, která je ale stále v rané fázi vývoje. Jedná se o baterii, která má v článku pouze jednu elektrodu (anodu) vyrobenou z kovu (Zn, Li, Al). Jako druhá elektroda (katoda) slouží kyslík získaný z okolního vzduchu, přiváděný do baterie kanálkami ve vnější vrstvě. Jako elektrolyt je použita iontová kapalina [30, 33].

Tato baterie má ze všech největší hustotu energie, což je její největší předností. Dále je vyrobena z levných a navíc recyklovatelných materiálů. Hlavním problémem této baterie je, že se nedá znovu nabíjet. Kovová elektroda se totiž opotřebuje a je nutné jí úplně vyměnit, což značně snižuje aplikovatelnost baterie. I přesto se v této technologii vidí veliký potenciál a očekává se její rozvoj v blízké budoucnosti. Momentálně jsou nejrozvinutější dva typy: Zinková a Lithiová [20, 33].

4.2.3 Li-ion akumulátory

Obecné lithiové akumulátory byly již popsány v kapitole (3.3.5), ale jejich možnosti uplatnění se stále rozšiřují (konkrétně tohoto typu) a v dnešní době patří mezi nejvýznamnější akumulátory, proto jsou uvedeny znovu v této kapitole. Pro přehled zde jsou stručně uvedeny i další typy lithiových akumulátorů.

Li-ion (lithium-iontový) je jedním z druhů lithiových akumulátorů, který využívá kapalného elektrolytu. Jedná se o nejrozšířenější a nejpoužívanější typ těchto akumulátorů, který disponuje bezpečností a mechanickou odolností [17, 19, 29].

Nedávno byly firmou Tesla vyvinuty velmi významné produkty, jejichž technologie jsou založeny právě na Li-ion akumulátorech. Těmito produkty jsou Tesla PowerWall a Powerpack. Kvůli významnosti a atraktivnosti těchto produktů jsou zde uvedeny jako samostatná kapitola.

Li-pol (lithium-polymerový) je dalším velmi rozšířeným typem lithiových akumulátorů, který jako elektrolyt používá iontově vodivou polymerní sloučeninu. Mají výrazně vyšší hmotnostní energetickou hustotu než Li-ion (kvůli náhradě kovového obalu plastovým), ale jsou méně odolné [17, 19, 29].

Existují ještě dva typy používaných lithiových akumulátorů, konkrétně: **LiFePo (lithium-železo-fosfát)**, s vyšší proudovou zatížitelností, ale nižší energetickou hustotou a **LiTO (lithium-titan-oxid)**, které mají delší cyklickou životnost, mohou pracovat i při nízkých teplotách, ale mají nižší energetickou hustotu [17, 19, 29].

4.2.3.1 Tesla PowerWall a PowerPack

Jedná se o velmi moderní a dlouho očekávané produkty od firmy Tesla.inc, které byly uvedeny na trh v roce 2015. Jednalo se o první generaci těchto produktů, avšak již v roce 2016 byla na trh uvedena zdokonalená druhá generace. Jsou to systémy na akumulaci elektrické energie. Tesla PowerWall je menší verze určená pro domácnosti, zatímco PowerPack je určena pro větší aplikace.

Základem akumulátoru PowerWall jsou Li-ion akumulátory. Je jich mnoho spojených dohromady v moderním a elegantním balení, které se dá přimontovat na zeď nebo na podlahu v každé domácnosti. Pod obalem se skrývá i kapalně chlazení článků. Systém se používá především ve spojení se solárními panely, jejichž energii akumuluje (když svítí slunce) a následně uloženou energii využívá, když je potřeba. PowerWall však může akumulovat i energii přímo ze sítě. Princip je takový, že když je doba nízké spotřeby a energie je levná, tak se právě tato energie akumuluje a poté se využívá ve špičce (ráno/večer), aby nebylo třeba čerpat drahou energii ze sítě [32, 37].

Pracovní příkon druhé generace je 5kW a špičkový 7kW, což stačí na provoz celé domácnosti, ale je možné i dohromady spojit až devět těchto produktů, pro zvýšení příkonu. Kapacita je 13,5kWh. Účinnost celého cyklu je 92% a životnost se předpokládá velmi dlouhá, jelikož Tesla dává na tyto produkty desetiletou záruku. Pracovní teploty se pohybují od -20°C do 43°C [33, 37].

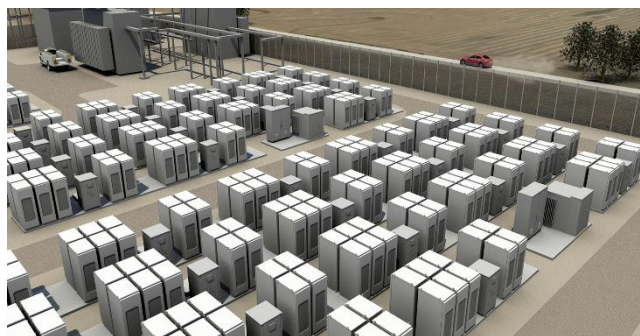
PowerPack je v podstatě větší PowerWall obsahující mnohem více Li-on článků, který je velký asi jako lednička a má kapacitu okolo 100kWh. Tyto bloky lze spojovat dohromady, pro dosažení vysokých akumulčních kapacit. Používá se pro akumulaci energie nejčastěji z fotovoltaických a větrných elektráren. Již v dnešní době je ve výstavbě několik takovýchto stanovišť, například v Jižní Kalifornii o kapacitě 80 MWh a na havajském ostrově Kauai o kapacitě 50 MWh [38].



POWERWALL
TESLA HOME BATTERY

Obr.7 Tesla PowerWall

(Převzato z: In: *Naturalsolar.com.au: Tesla-Powerwall-Home-Battery* [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <https://naturalsolar.com.au/wp-content/uploads/2015/11/Tesla-Powerwall-Home-Battery2.png>)



Obr.8 Tesla PowerPack

(Převzato z: In: *Http://www.startupers.sk: PowerPack* [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.startupers.sk/wp-content/uploads/2015/05/PowerPack.png>)

4.3 Elektrické

4.3.1 Superkondenzátory

Superkondenzátory jsou zařízení k akumulaci elektrické energie, kterým se také přezívá ultrakondenzátory, nebo EDLC (electric double layer capacitor). Skládají se ze dvou pórovitých elektrod (kladné a záporné), z tekutého nebo gelového elektrolytu mezi nimi a z tenké membrány. Po přiložení napětí na elektrody se ionty v elektrolytu přemístí k příslušným elektrodám (kladné ionty k záporné elektrodě a naopak). Pórovitost elektrod značně zvyšuje kapacitu superkondenzátorů [25, 35].

Superkondenzátory disponují velmi vysokou účinností (až 95%), téměř neomezenou životností (obrovským možným počtem cyklů) a dají se velmi rychle nabíjet. Bohužel ale mají malou energetickou hustotu, jsou příliš drahé a dochází u nich k velkým hodnotám samovybíjení (cca 5-40% denně) [29, 30].

Jsou tedy spíše vhodné pouze pro krátkodobou akumulaci malých množství energie. Tato technologie je ale poměrně nová a vyvíjí se velmi rychle. Experimentuje se s různými materiály a také se zde začínají užívat nanotechnologie. Údajně již byl vynalezený typ superkondenzátoru, který se svou objemovou energetickou hustotou vyrovná typickému NiMH akumulátoru, což je obrovským pokrokem [30].

4.3.2 SMES (Superconducting magnetic energy storage, Supravodivý indukční akumulátor)

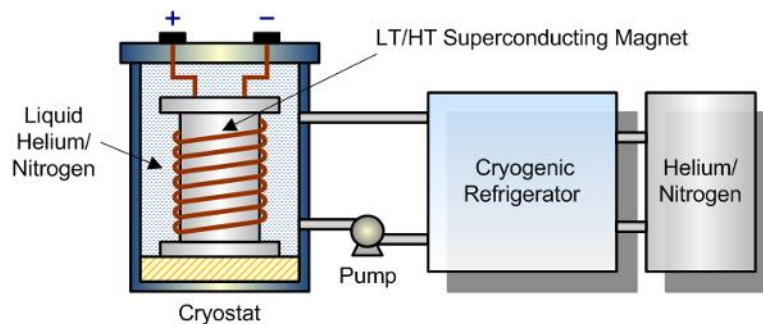
Tento způsob akumulace elektrické energie funguje na základě supravodivosti. Supravodivost je stav materiálu, dosažený poklesem teploty materiálu pod jeho kritickou hodnotu supravodivosti, při kterém je procházejícímu elektrickému proudu kladen nulový odpor a kolem materiálu se vytváří magnetické pole. Supravodivost byla objevena již v roce 1911 fyzikem Heike Kamerlingh-Onnesem [31].

Supravodivý indukční akumulátor se skládá z cívky vyrobené ze supravodivého materiálu, z kryogenního chladiče, z usměrňovače a střídače proudu. Princip je takový, že podchlazenou cívku pod její kritickou teplotu supravodivosti prochází stejnosměrný proud, přičemž se energie akumuluje v magnetickém poli okolo cívky. Cívka je na této teplotě neustále držena kryogennickým chladičem, aby po celou dobu byla zajištěna supravodivost a tím pádem i minimální odpor. Usměrňovač mění střídavý proud ze sítě na stejnosměrný, který je potřeba pro udržení stálého magnetického pole (při vybíjení se energie ve střídači mění zpět na střídavý proud). Naakumulovaná energie se v cívce může udržovat tak dlouho, dokud je cívka chlazená [17, 30].

Supravodivé materiály, z nichž je vyrobena cívka, se dělí na nízkoteplotní a vysokoteplotní. Nízkoteplotní mívají kritickou teplotu supravodivosti kolem hodnoty 5K, což je velmi nízká teplota, které se dá dosáhnout pouze chlazením héliem, což je poměrně drahé (dříve to kvůli nedostatečnému vybavení ani skoro nebylo možné). Naopak vysokoteplotní supravodivé materiály mají kritickou teplotu supravodivosti okolo hodnoty 70K, díky čemuž stačí chlazení dusíkem [17, 30].

Tento typ akumulace elektrické energie dosahuje výborné účinnosti, která přesahuje 95%, v čemž ale autoři nezahrnují chlazení. Ztráty jsou způsobeny střídačem proudu, usměrňovačem proudu, ale také právě chlazením. Dalšími výhodami je dlouhá životnost (cca 30 let), rychlá odezva, velmi rychlé úplné vybití a nabití a velká objemová energetická hustota. Téměř jedinou a hlavní nevýhodou této technologie je obrovská cena, způsobená především drahým kryogenním chlazením. Z těchto důvodů se supravodivé indukční akumulátory zatím používají pouze na krátkodobou akumulaci energie [31].

Nedávno bylo dosaženo značných pokroků, jako snížení cen chladicích systémů a supravodivých cívek a objevení lepších vysokoteplotních supravodivých materiálů. V dnešní době se tyto technologie ještě příliš nevyužívají, když už, tak pouze v řádech maximálně jednotek MW, ale do budoucna jsou připraveny projekty, dosahující kapacit až 100 MW [29].



Obr.9 Schéma technologie SMES

(Převzato z: BARBOUR, Edward. Superconducting-magnetic-energy-storage-smes. [Http://energystoragesense.com](http://energystoragesense.com) [online]. [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://energystoragesense.com/superconducting-magnetic-energy-storage-smes/>)

4.4 Chemické

4.4.1 Akumulace energie pomocí vodíku – Palivové články

Tato metoda se začala zkoumat již na začátku druhé poloviny 20. století a některé pokusy s vodíkem byly prováděny dokonce už v první polovině 19. století. Kvůli nedostatečnému vývinu této technologie se nikdy širšího použití nedočkala, ale v dnešní době jí začíná být věnováno čím dál tím více pozornosti. Objevují se nové perspektivní metody využití vodíku a očekává se, že právě vodík bude palivem budoucnosti [25].

Princip systémů tohoto typu je takový, že v prvním kroku se vyrábí vodík, v němž je energie akumulována, a poté v druhém kroku je energie z vodíku zpětně získávána. Tento princip schematicky znázorňuje Obr.10 [29].

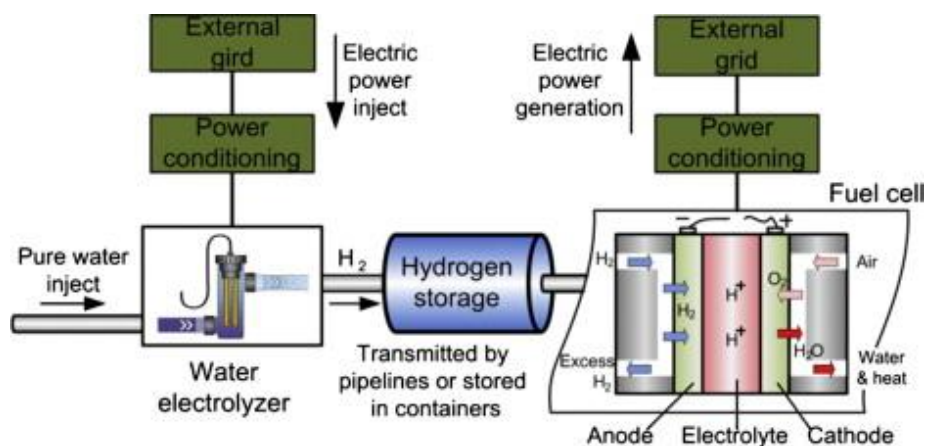
V prvním kroku se vyrobený vodík uskladní v nádrži nebo v potrubí, kde je připravený na další použití. Vodík se dá vyrábět elektrolýzou, přeměnou z fosilních paliv, nebo reakcí vodní páry s methanem. Elektrolýza je nejpoužívanější pouze v oblasti akumulace elektrické energie, ale jinak výrazně převažuje výroba vodíku pomocí vodní páry a methanu, jelikož je tento způsob o mnoho levnější [29, 30].

V druhém kroku je potřeba energii z vodíku uvolnit, což zajišťují právě palivové články. Palivové články jsou zařízení, které mění chemickou energii obsaženou ve vodíku a kyslíku na energii elektrickou, přičemž vzniká i malé množství tepla. Palivový článek se skládá ze dvou elektrod (anody a katody) a elektrolytu. Do palivového článku se přivádí vodík, kyslík (pomocí vzduchu) a odvádí se z něj voda i teplo, jenž vznikají při procesu

přeměny chemické energie na elektrickou. Existuje několik druhů palivových článků, mezi které patří: Palivové články s polymerní membránou (PEMFC), Alkalický palivový článek (AFC), Palivový článek s roztaveným uhlíčanem (MCFC), Palivový článek s pevným oxidem (SOFC), Kyselino fosforečný palivový článek (PAFC), Palivový článek s metanolem (DMFC). Tyto články se liší druhem použitého paliva a elektrolytu, tudíž se v nich odehrávají různé chemické reakce. Základní princip je u všech stejný [17, 30].

Vodík má největší výhřevnost ze všech druhů paliv. Na druhou stranu má ale velmi malou hustotu (potřeba větších nádrží), je vysoce výbušný a může difundovat do kovů. Celkově ale použití palivových článků je efektivnější i ekologičtější než spalování fosilních paliv. Účinnost těchto systémů není příliš vysoká, pohybuje se kolem 50% [25, 29].

Technologie palivových článků ještě nejsou dostatečně rozvinuté, očekává se ale, že v blízké budoucnosti budou hrát významnou roli. Hlavním problémem je, že vodík je příliš drahý. Ve vývoji jsou již články, které dosahují vyšších účinností (kolem 65%) a při zachycování uvolněného tepla můžou dosáhnout účinnosti až 85%. Používají se prozatím spíše pouze pro malé aplikace. V dnešní době je relativně rozšířené použití malých stacionárních DMFC v Japonsku jako mikrokogeneračních jednotek, nebo naopak v USA použití palivových článků v automobilech. Dokonce již bylo vybudováno mnoho čerpacích stanic, kde se dá vodík dotankovat. Kromě v některých zemích USA je ale zatím nemožné takovéto auta používat, právě kvůli nedostatku čerpacích stanic. Většího rozšíření se vodíkem poháněná auta zatím nedočkaly, z moderních možností se spíše upřednostňují auta elektrická [17, 29].



Obr.10 Princip akumulace energie pomocí vodíku a palivového článku

(Převzato z: LUO, Xing, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 2015, 137: 511-536)

4.5 Termální

Termální metody skladování elektrické energie patří k nejběžnějším metodám a mají velmi široké uplatnění. Prozatím se jedná především o nereverzibilní metody. Fungují na principu akumulace tepelné energie v izolovaném prostředí, která se při potřebě uvolní. Základní rozdělení termálních metod akumulace elektrické energie je na nízkoteplotní (ukládání do chladu - teplota je pod teplotou okolí) a vysokoteplotní (teplota je nad teplotou okolí). Nízkoteplotní metody jsou metody nereverzibilní, jsou již velmi vyvinuté a rozšířené, používají se především pro chlazení/ohřívání vzduchu v budovách, pro regulaci teploty vody a pro různé chlazení. Vysokoteplotní metody jsou naopak stále ve výzkumu, mají velký potenciál a používají se například u různých technologií akumulace energie z obnovitelných zdrojů a také pro zachycování odpadního tepla při různých procesech. Termální metody skladování energie se dále rozdělují na tři druhy: akumulace citelného tepla, akumulace skupenského tepla a termochemická akumulace tepla [13, 17, 20, 28, 29].

4.5.1 “Citelné“ teplo

U této metody se energie uchovává interně v akumulačním materiálu tím, že se teplota tohoto materiálu zvyšuje, aniž by prošel fázovou změnou. Tento materiál musí být izolovaný, aby mohl teplo efektivně uchovávat. Množství uskladněného tepla závisí především na množství materiálu, jeho tepelné kapacitě, jeho stabilitě a na celkové teplotní změně. Důležitým faktorem je taky cena materiálu. Jako akumulační médium se používá buď materiál tekutý, nebo pevný. Používá se například beton, roztavené soli, litá keramika, voda a oleje. Volba optimálního akumulačního materiálu pro danou aplikaci je klíčová. Každý materiál má své výhody i nevýhody. Například voda je velmi levná, má dobrou teplotní vodivost, slušnou kapacitu, ale bohužel jí lze používat jen ve velmi omezeném rozsahu teplot, jelikož by mohla zamrznout nebo se začít vypařovat. Oproti tomu pevné materiály mají mnohem větší pracovní rozsah teplot [13, 20, 28].

Tato metoda je z termálních metod nejrozšířenější a nejpoužívanější. Používá se především pro rozvod teplé vody do domácností. Je poměrně levná a prostá, což je dáno nízkou cenou používaných materiálů a jednoduchostí celého systému. Mezi nevýhody patří malá reverzibilita a tím způsobené poměrně velké ztráty tepla (únik do okolí), dále

nízká objemová hustota energie a tím pádem potřeba větších úložišť. To vše způsobuje nízkou efektivnost těchto systémů [20, 28].

4.5.2 Skupenské teplo

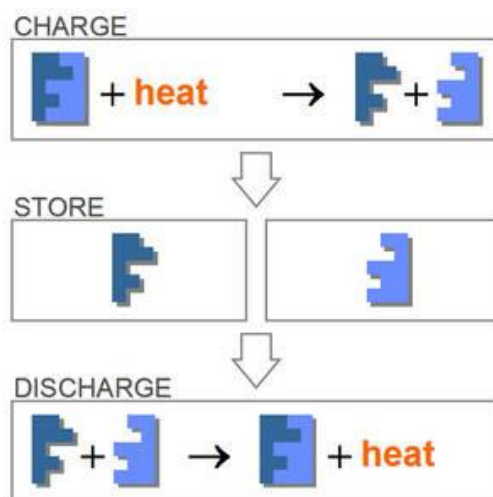
Tato metoda využívá skupenského tepla, což je teplo, které se uvolní nebo absorbuje při změně skupenství akumulčního materiálu. Nejčastěji se používá změna skupenství mezi pevným a kapalným stádiem, jelikož se při ní objem materiálu mění nejméně. Ke změně skupenství dochází při nabíjení i při vybíjení. Materiály používané při tomto druhu termálních metod se značí PCM (Phase change materials) a dělí se na organické (parafíny, tuky, oleje) a anorganické (kovy, litiny, soli, hydráty solí). Materiály se volí především na základě jejich měrného skupenského tepla. Nejpoužívanější je voda – led, což je metoda téměř nejlevnější a nejjednodušší, ale má nízkou účinnost kvůli její nevratnosti stavových změn. [13, 28].

Při této metodě se dosahuje podstatně větších objemových hustot energie než u metody předchozí, což je dáno právě skupenským teplem těchto materiálů. Cena těchto materiálů je však vyšší, stále dochází k úniku tepla do okolí, některé používané látky mohou být nestabilní (např. hydráty solí) a vyskytují se problémy se změnou objemu při změnách skupenství [20, 28].

4.5.3 Termochemická akumulace tepla

Tato technologie, stejně jako přechodí dvě, je sestavena ze tří kroků, jimiž jsou nabíjení, skladování a vybíjení. Na rozdíl od předchozích technologií, je tato doprovázena zpětnými chemickými reakcemi, konkrétně změnou molekulárních vazeb, při kterých se uvolňuje/pohlcuje energie. Při nabíjení se pomocí tepla vyvolá endotermická reakce, která rozdělí reaktant na jednotlivé části. Tyto části jsou uchovávány odděleně. Při potřebě energie se jednotlivé části mohou opět sloučit, čímž se uvolní teplo, které je použito jako zdroj energie. Toto slučování se děje při reakci exotermické. Obr.11 schematicky znázorňuje tento princip [13, 30].

Termochemická akumulace tepla je potenciálně lepší než předchozí dvě technologie ve všech směrech. Má mnohem větší energetickou hustotu, vyšší účinnost a díky nulovým tepelným ztrátám je doba akumulace prakticky neomezená. Oproti přechodným dvěma je tedy vhodná i pro dlouhodobou akumulaci. Problémem je složitost volby vhodného materiálu a vysoká sofistikovanost systému. Dalšími nevýhodami mohou být omezená životnost (dána počtem cyklů) a možná změna chování mezi jednotlivými cykly (způsobena degradací použitého materiálu vlivem chemických reakcí). Tato technologie je však teprve v raném stádiu výzkumu, je jednou z nejnovějších technologií akumulace elektrické energie. Vhodné materiály pro tuto technologii se volí na základě ceny, hořlavosti, toxicnosti, reaktivnosti, tepelné kapacity a na odolnosti vůči velkému počtu cyklů. Mezi zkoumané materiály patří mnohé oxidy, hydroxidy a uhličitany, dále hydridy kovů a amoniak [13, 30].



Obr.11 Princip termochemické akumulace tepla

(Převzato z: www.ecn.nl/seasonal-storage [online]. 2009 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://www.ecn.nl/nl/nieuws/newsletter-en/2009/june-2009/seasonal-storage/>)

4.5.3.1 Solární paliva

Solární paliva jsou novou perspektivní metodou a kvůli jejímu využívání sluneční energie se dají zařadit do termochemických metod akumulace elektrické energie. Jedná se o novou technologii v rané fázi výzkumu, které je věnována velká pozornost a je intenzivně vyvíjena. Díky rychlému vývoji bude tato metoda v blízké budoucnosti cenově dostupná pro malé aplikace [29].

Princip je založený na zachycování slunečního záření a jeho využití k realizaci endotermických chemických reakcí, čímž jsou následně vytvořena takzvaná solární paliva. Tato paliva se dají skladovat, transportovat a mohou následně být využívány ke generaci elektrické energie. Existují tři základní druhy těchto paliv: „solární vodík“, solární paliva na bázi kovů a „solární tepelné potrubí“ [17, 29].

Solární paliva mohou být vytvářeny třemi základními metodami: fotosyntézou, umělou fotosyntézou a termochemickými metodami [29].

U termochemického přístupu se využívá velkého množství tepla získaného ze slunečního záření k rozdělení vody na jednotlivé chemické prvky. Metoda je tím pádem vysoce závislá na intenzitě slunečního záření.

Při fotosyntéze je sluneční záření ukládáno v chemických vazbách. Je ho využíváno k rozkladu vody / oxidu uhličitého na kyslík a jiné prvky [29].

Umělá fotosyntéza je realizována vzácnými prvky, jako jsou Palladium, Rhenium a Ruthenium [29].

Mezi výhody patří především potenciální vysoká hmotnostní energetická hustota. Možná doba skladování se zatím pohybuje od několika hodin až po několik měsíců. Hlavními nevýhodami jsou potřeba velkých ploch pro zařízení zachycující sluneční záření a potřeba velmi drahých vzácných prvků pro umělou fotosyntézu [17, 29].

4.5.4 LAES (Liquid air energy storage) – Akumulace energie pomocí kapalného vzduchu

Tato metoda je velmi perspektivním vylepšením systému CAES (mechanická metoda akumulace elektrické energie), která spadá spíše pod metody hybridní, ale kvůli jejímu značnému využití termální akumulace je uvedena v této kapitole. Konkrétně spadá pod nízkoteplotní metody akumulace termální energie. Zásadní rozdíl metod je v tom, že zde je před uložením vzduch navíc zkapalněn. Uchovává se v tlakových nádobách a následně při potřebě energie je opět přeměněn do plynného stádia, přičemž se rozpíná a uvolňuje energii. Toto je zprostředkováno uchovaným odpadním teplem (odpadní teplo se uchovává stejně jako u metody AA-CAES) [13, 29].

Hlavní výhodou metody LAES je vysoká objemová energetická hustota zkapalněného vzduchu, která je výrazně větší než u vzduchu v plynném stádiu. Díky tomu již není potřeba obřích podzemních prostorů pro uchovávání vzduchu, ale stačí mnohem

menší tlakové nádoby pro úchovu zkapalněného vzduchu. Dále je při čerpání zkapalněného vzduchu možné ho používat jako chladicí prostředek. Díky akumulaci v tlakových nádobách není tato metoda na rozdíl od CAES a AA-CAES závislá na geografické poloze. Nevýhodou metody je prozatím poměrně nízká účinnost (40-70%), což je ale dáno tím, že metoda je teprve v rané fázi vývoje [13]. Tato účinnost se bude zvyšovat s vylepšením zkapalňujícího procesu a s lepším využitím odpadního tepla. Problémem je také vysoká cena zkapalňujícího procesu [20].

Ve Sloughu v Anglii je již postaveno demonstrační zařízení využívající této metody. Zařízení bylo postaveno a je vyvíjeno firmou Highview Power Storage [13].

4.5.5 SiFES (Siemens Future Energy Solution)

Jedná se o úplně novou metodu, která má akumulovat přebytečnou energii, získanou z větrných elektráren, ve formě tepla v obyčejných kamenech. Cílem je vytvořit levnou technologii, jejíž kapacita se může libovolně a téměř neomezeně zvyšovat. [26]

Technologie je vyvíjena firmou Siemens ve spolupráci s technickou univerzitou Hamburg a se společností Hamburg Energie. Dosavadní testovací systém je umístěný právě v německém Hamburgu. Zatím ale není plně funkční, předmětem výzkumu je momentálně přenos tepla uvnitř úložiště s kameny (snaha o porozumění a zdokonalení přenosu pro optimalizaci technologie a zvýšení účinnosti celého systému). [26]

Princip této technologie je velmi jednoduchý. Přebytečná energie získaná z větrných elektráren je přiváděna do nabíjecí jednotky, která ji mění na energii termální a poté je ukládána do kamenů (horký vzduch je foukán do izolované nádoby obsahující určité množství kamenů), umístěných v podzemním úložišti. Toto úložiště je vytvořeno z přírodních materiálů a je integrované do půdy na daném místě, nemá žádná geografická omezení. Při potřebě je tímto teplem ohříván proud vzduchu, který pohání parní turbogenerátor, jenž generuje elektřinu a dodává ji do sítě. [26]

Výstavba plně funkčního systému je očekávána na začátek roku 2018, jenž bude umístěný také v Hamburgu a měl by dosahovat účinnosti cca 25%. Očekává se ale, že větší systémy využívající metody SiFES budou dosahovat účinností kolem 50% a tím pádem budou hrát významnou roli v budoucí akumulaci energie. [26]

4.6 Hybridní

Pod hybridními metodami se rozumí zkombinování dvou a více jednotlivých metod do jednoho funkčního celku [29]. Cílem tohoto zkombinování je zlepšení vlastností akumulačního systému. Možnosti kombinací jsou libovolné, ale je třeba technicky zvládnout funkčnost takového systému. Hybridní systémy mohou mít například lepší účinnost, delší životnost, vyšší energetickou hustotu (hmotnostní i objemovou), rychlejší odezvu, nižší cenu a nižší nároky na geografické umístění. Hybridní metody jsou velmi atraktivní možností, se slibnou budoucností. Zatím je ale ještě třeba většího rozvoje jednotlivých metod a získávání praktických zkušeností v této oblasti, pro její větší rozšíření.

Několik takovýchto systému již bylo vymyšleno a demonstrováno. Mezi ně patří kombinace metody SMES s akumulací pomocí tekutého vodíku, nazýváno LIQHYSMES (Německo) [16]. Dále byly již dosaženy slibné výsledky u dvou metod kombinující superkondenzátory s akumulátory, obě vynalezeny v Anglii a sponzorovány firmami E.ON a UK EPSRC. Kombinace těchto dvou metod disponuje velkými akumulačními kapacitami a velmi rychlým vybíjením/nabíjením [29]. V Japonsku (Japan High Energy Accelerator Research Organization) byla vymyšlena kombinace metody SMES s vodíkovým palivovým článkem [29]. Za hybridní metodu se dá také považovat AA-CAES, jenž kombinuje obyčejný CAES s termální metodou akumulace elektrické energie [29].

5. Srovnání metod akumulace elektrické energie

Každá metoda pro akumulaci elektrické energie má jak své výhody i nevýhody, tak i určitá omezení a možnosti použití. Metody je nutno volit podle konkrétní aplikace a podle řady dalších hledisek. Žádná metoda není dokonalá, tudíž je vždy pro danou aplikaci potřeba vybrat jednu vhodnou, nebo možnou kombinaci několika. V této kapitole bude uvedena rozsáhlá tabulka (rozdělena na tři části), která přehledně srovnává jednotlivé metody dle určitých hledisek (kapacita, energetická hustota, technologická vyspělost, účinnost, atd.).

V tabulkách nebude zmíněna nova metoda SiFES (kvůli prozatímní nedostupnosti většiny technologických dat) a z lithiových baterií bude zmíněn pouze hlavní zástupce Li-ion. U buněk, vyplněných znakem „-“, dané kritérium buď není dostupné, nebo pro danou metodu není specifikováno. Ve sloupci „Technologická vyspělost“ byly hodnoty (1 nejnižší až 5 nejvyšší) přiřazovány dle údajů o momentálním dosaženém stupni vývoje / dalším možným vývojem daných technologií. Všechny reference jsou uvedeny zvlášť ve sloupci v třetí části tabulky.

Tabulka 1 (1.část)

Srovnání technických parametrů metod pro akumulaci elektrické energie

| Technologie | Technologická vypělost (1 nejnižší, 5 nejvyšší) | Dopad na životní prostředí | Životnost [let] | Životnost [počet cyklů] | Účinnost [%] |
|---------------------------------|---|---|----------------------------|--|-------------------------|
| PVE | 5 | Negativní | 40-60 | 12000-30000+ | 70-85 |
| CAES (AA-CAES) | 5 3 | Negativní | 20-60 | 30000+ | cca 45 cca 70 |
| <u>Akumulátory</u> Pb | 5 | Negativní | 5-15 | 500-1000 | 70-85 |
| Ni-Cd | 4 | Negativní | 10-20 | 2000-2500 | 60-75 |
| Ni-MH | 4 | Střední | 3-15 | 200-1500 | 60-70 |
| Na-S | 4 | Střední | 10-15 | 2500-4500 | 75-90 |
| Li-ion | 4 | Střední | 5-20 | 1000-10000 | 80-95 |
| Metal-Air | 1 | Malý | - | 100-300 | 40-60 |
| Setrvačníky | 4 | Minimální | cca15 | 20000+ | 90-95 |
| <u>Průtokové baterie</u> VRB | 3 | Střední | 5-15 | 12000+ | 65-85 |
| ZnBr | 2 | Střední | 5-15 | 2000+ | 65-75 |
| PSB | 1 | Střední | 10-20 | - | cca 75 |
| Superkondenzátory | 3 | Střední | 20+ | 100000+ | 90-97 |
| SMES | 2 | Střední | 20+ | 100000+ | 95-97 |
| Palivové články | 2 | Střední | 5-15 | 1000+ | 30-85 |
| Citelné teplo | 5 | Malý | 10-20 | - | 30-60 |
| Skupenské teplo | 4 | Malý | cca 5-15 | - | 40-80 |
| Solární paliva | 2 | Blahodárný | - | - | 20-55 |
| LAES | 1 | Střední | 25+ | - | 40-70 |

Tabulka 1 (2.část)

Srovnání technických parametrů metod pro akumulaci elektrické energie

| Technologie | Objemová energetická hustota [Wh/L] | Hmotnostní energetická hustota [Wh/kg] | Kapacita [MWh] | Výkon [MW] | Míra samovybíjení [%/den] |
|--------------------------|--|---|-----------------------|-------------------|----------------------------------|
| PVE | 0,5-1,5 | 0,5-1,5 | 500-8000 | 100-5000 | cca 0 |
| CAES | 3-6 | 30-60 | <1000 | 3-400 | cca 0 |
| <u>Akumulátory</u> | | | | | |
| Pb | 50-80 | 35-50 | 0,01-40 | 0-40 | 0,1-0,3 |
| Ni-Cd | 60-150 | 50-75 | <7 | 0-40 | 0,2-0,6 |
| Ni-MH | 140-435 | 30-110 | <0,5 | 0,01-0,2 | 0,4-1,2 |
| Na-S | 150-250 | 150-240 | <100 | 0,05-34 | cca 0 |
| Li-ion | 200-500 | 75-200 | <100 | 0,1-50 | 0,1-0,3 |
| Metal-Air | 500-10000 | 110-3000 | - | 0,02-10 | - |
| Setrvačníky | 20-80 | 5-130 | <5 | 0-20 | 100 |
| <u>Průtokové baterie</u> | | | | | |
| VRB | 16-33 | 10-30 | <60 | 0,03-3 | Minimální |
| ZnBr | 30-60 | 30-85 | <4 | 0,05-2 | Minimální |
| PSB | 16-60 | 10-50 | <120 | 1-15 | cca 0 |
| Superkondenzátory | 10-30 | 2,5-15 | 0,0005 | 0-0,3 | 5-40 |
| SMES | 0,2-2,5 | 0,5-5 | 0,0008 | 0,1-10 | 10-15 |
| Palivové články | 500-3000 | 800-10000 | 0,3 | 0-50 | cca 0 |
| Citelné teplo | 80-200 | 10-50 | - | 0,001-10 | Značná |
| Skupenské teplo | 80-200 | 50-150 | - | 0,001-1 | Značná |
| Solární paliva | 500-10000 | 800-10000 | - | 0-10 | cca 0 |
| LAES | 50 | cca 210 | 2,5 | 10-200 | Malá |

Tabulka 1 (3.část)

Srovnání technických parametrů metod pro akumulaci elektrické energie

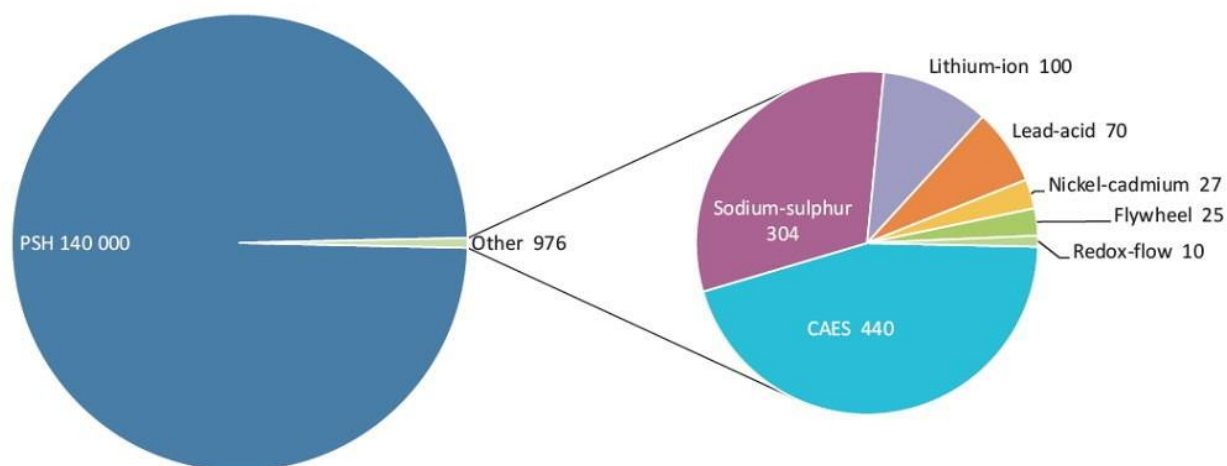
| Technologie | Doba odezvy | Vhodná doba akumulace | Cena [\$/kW] | Cena [\$/kWh] | Reference (pro všechny 3 části) |
|---------------------------------|--------------------|------------------------------|---------------------|----------------------|--|
| PVE | min | hodiny- měsíce | 600- 2000 | 5-100 | [16,17,19,20,29] |
| CAES | min | hodiny- měsíce | 400-800 | 2-50 | [16,17,19,20,29] |
| <u>Akumulátory</u> Pb | ms | minuty-dny | 300-600 | 200-400 | [16,17,19,20,24,29] |
| Ni-Cd | ms | minuty-dny | 500- 1500 | 800-1500 | [16,17,19,20,24,29] |
| Ni-MH | ms | minuty-dny | 600- 1800 | 960-1800 | [16,19,20] |
| Na-S | ms | minuty- měsíce | 1000- 3000 | 300-500 | [16,17,19,20,24,29] |
| Li-ion | ms | minuty-dny | 1200- 4000 | 600-2500 | [16,17,19,20,24,29] |
| Metal-Air | ms | - | 100-250 | 10-60 | [17,19] |
| Setrvačníky | s | sekundy- minuty | 250-350 | 1000- 5000 | [16,17,19,20,24,29] |
| <u>Průtokové baterie</u> VRB | ms | hodiny- měsíce | 600- 1500 | 150-1000 | [16,17,19,20,29] |
| ZnBr | ms | hodiny- měsíce | 700- 2500 | 150-1000 | [16,17,19,20,29] |
| PSB | ms | hodiny- měsíce | 330- 2500 | 120-1000 | [17,20,29] |
| Superkondenzátory | ms | sekundy- hodiny (<1h) | 100-300 | 300-2000 | [16,19,20,24,29] |
| SMES | ms | minuty- hodiny (<1h) | 200-300 | 1000- 10000 | [16,19,20,24,29] |
| Palivové články | s | hodiny- měsíce | 500- 1500 | 10-20 | [16,17,19,20,24,29] |
| Citelné teplo | min-h | dny-měsíce | 3400- 4500 | 0,1-10 | [20,24] |
| Skupenské teplo | min-h | hodiny-dny | 6000- 15000 | 10-50 | [20,24] |
| Solární paliva | - | hodiny- měsíce | 1000- 3000 | 8-100 | [17,29] |
| LAES | min | hodiny- měsíce | 900- 1900 | 260-530 | [20,29] |

Z tabulky je zřejmé, že všechny metody mají své přednosti i zápory a každá metoda vyniká v něčem jiném. „Ideální“ metoda, která by splňovala veškeré naše požadavky a byla vhodná pro každou situaci, bohužel neexistuje. Vždy je třeba vybírat metodu, nebo kombinaci metod, podle daných požadavků a kritérií. Navíc je v dnešní době také potřeba brát v potaz ekologičnost dané metody, jelikož je kladen čím dál tím větší důraz na ochranu životního prostředí. Ovšem existuje několik metod, která mají větší potenciál než jiné. Nejslibnějšími mechanickými metodami jsou pouze vylepšení metody CAES, konkrétně LAES a AA-CAES. Nějaký ohromující přínos se od nich ale neočekává. Lépe na tom už jsou metody elektrochemické, kde se významný přínos očekává od vylepšených průtokových baterií a baterií Metal-Air (kov-vzduch). Elektrické metody (superkondenzátory a SMES) mají sice zajímavé metody, ale velké rozšíření a významný přínos se od nich neočekává. U metod chemických jsou palivové články velmi slibným kandidátem, kterého by se dalo hojně využívat především v dopravních prostředcích. Z metod termálních vystupují pouze metody termochemické, konkrétně solární paliva, která by po zdokonalení mohla hrát významnou roli. Navíc se jako velmi perspektivní zdá nový typ termálních metod jako je SiFES, které sice jsou ve velmi raném stádiu vývoje, ale prozatím vypadají velmi slibně (především díky jejich výborné ekonomičnosti).

6. Závěr

V této rešeršní práci bylo nejprve obecně uvedeno téma akumulace elektrické energie, jeho významnost, potenciál a úskalí. Dále zde byly popsány veškeré metody pro skladování (akumulaci) elektrické energie. Byly uvedeny i metody již komerčně používané, ale důraz byl kladen především na metody nové a perspektivní. Nakonec byly téměř všechny tyto metody srovnávány formou tabulky dle důležitých technologických, ekonomických i ekologických hledisek a následně byly výsledky slovně zhodnoceny.

Akumulace elektrické energie je velmi významné téma, které by nemělo být podceňováno. Nejen, že nám umožňuje mnohonásobně lepší hospodaření s energií, ale také velmi výrazně podporuje využívání obnovitelných zdrojů energie, které by se díky lepším možnostem akumulace mohli stát velmi významným zdrojem energie. Toto téma má obrovský potenciál a pokroky v této oblasti jsou pro úspěšnou lidskou budoucnost nezbytné.



Obr.12 Světový instalovaný výkon metod akumulace elektrické energie
(Převzato z: BUDÍN, Jan. Technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-
energie. [Http://oenergetice.cz](http://oenergetice.cz) [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z:

<http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>)

Obr. 12 znázorňuje přehled instalovaných světových výkonů jednotlivých metod na akumulaci elektrické energie (hodnoty na obrázku jsou uvedeny v MW). Je zřejmé, jak obrovsky dominantní technologií jsou přečerpávací vodní elektrárny. Daleko za nimi následuje CAES, poté některé druhy baterií a nakonec setrvačníky a průtokové baterie. Dnešní nové perspektivní metody, popsané v této práci, mají většinou větší potenciál než stávající dominantní technologie, ale na větší rozšíření teprve čekají. I když je od těchto metod očekáván veliký vzrůst instalovaného výkonu a kapacity, přečerpávací vodní elektrárny budou i přesto ještě velmi dlouho výrazně dominantní technologií, jelikož jsou metodou pro ohromné množství s obrovskou kapacitou i výkonem, které se jiné technologie jen tak nevyrovnají.

Seznam obrázků

1. FatCatWatch. In: <https://pumpedstorage.wordpress.com/>: *Pumped storage* [online]. 2011 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: <https://pumpedstorage.files.wordpress.com/2011/04/image.gif?w=590>
2. www.pge.com: *compressed-air-energy-storage* [online]. 2017 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: https://www.pge.com/pge_global/local/images/data/en-us/about-pge/environment/what-we-are-doing/compressed-air-energy-storage
3. LUO, Xing, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 2015, 137: 511-536
4. In: [www.Slideshare.net](http://www.slideshare.net): *flywheel-energy-storage-system* [online]. 2014 [cit. 2016-10-19]. Dostupné z: <https://www.slideshare.net/asertseminar/flywheel-energy-storage-system>
5. In: www.climateandfuel.net: *storage* [online]. 2015 [cit. 2016-11-20]. Dostupné z: <http://www.climateandfuel.com/pages/storage.htm>
6. REICHL, Tomáš. Prutokova-baterie. [Http://oenergetice.cz](http://oenergetice.cz) [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/>
7. In: Naturalsolar.com.au: *Tesla-Powerwall-Home-Battery* [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <https://naturalsolar.com.au/wp-content/uploads/2015/11/Tesla-Powerwall-Home-Battery2.png>
8. In: [Http://www.startupers.sk](http://www.startupers.sk): *PowerPack* [online]. [cit. 2017-02-01]. Dostupné z: <http://www.startupers.sk/wp-content/uploads/2015/05/PowerPack.png>
9. BARBOUR, Edward. Superconducting-magnetic-energy-storage-smes. [Http://energystoragesense.com](http://energystoragesense.com) [online]. [cit. 2017-02-13]. Dostupné z: <http://energystoragesense.com/superconducting-magnetic-energy-storage-smes/>

10. LUO, Xing, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 2015, 137: 511-536

11. *www.ecn.nl: seasonal-storage* [online]. 2009 [cit. 2017-02-21]. Dostupné z: <https://www.ecn.nl/nl/nieuws/newsletter-en/2009/june-2009/seasonal-storage/>

12. BUDÍN, Jan. Technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie. *Http://oenergetice.cz* [online]. [cit. 2017-05-22]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/>

Seznam použité literatury

- [13] ANEKE, Mathew; WANG, Meihong. Energy storage technologies and real life applications—a state of the art review. *Applied Energy*, 2016, 179: 350-377.
- [14] BOCKLISCH, Thilo. Hybrid energy storage systems for renewable energy applications. *Energy Procedia*, 2015, 73: 103-111.
- [15] BUDÍN, Jan. Technologický plán akumulace energie. *Http://oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-03-10]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/technologicky-plan-v-oblasti-akumulace-energie/>
- [16] CHATZIVASILEIADI, Aikaterini; AMPATZI, Eleni; KNIGHT, Ian. Characteristics of electrical energy storage technologies and their applications in buildings. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25: 814-830.
- [17] CHEN, Haisheng, et al. Progress in electrical energy storage system: A critical review. *Progress in Natural Science*, 2009, 19.3: 291-312.
- [18] CHO, Jaephil; JEONG, Sookyung; KIM, Youngsik. Commercial and research battery technologies for electrical energy storage applications. *Progress in Energy and Combustion Science*, 2015, 48: 84-101.
- [19] FERREIRA, Helder Lopes, et al. Characterisation of electrical energy storage technologies. *Energy*, 2013, 53: 288-298.
- [20] GALLO, A. B., et al. Energy storage in the energy transition context: A technology review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2016, 65: 800-822.
- [21] HEMMATI, Reza; SABOORI, Hedayat. Short-term bulk energy storage system scheduling for load leveling in unit commitment: modeling, optimization, and sensitivity analysis. *Journal of advanced research*, 2016, 7.3: 360-372.

- [22] KLUMPP, Florian. Potential for large scale energy storage technologies—comparison and ranking including an outlook to 2030. *Energy Procedia*, 2015, 73: 124-135.
- [23] KOOHI-KAMALI, Sam, et al. Emergence of energy storage technologies as the solution for reliable operation of smart power systems: A review. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2013, 25: 135-165.
- [24] KOUSKSOU, Tarik, et al. Energy storage: Applications and challenges. *Solar Energy Materials and Solar Cells*, 2014, 120: 59-80.
- [25] KRATOCHVÍL, Tomáš. *Akumulace elektrické energie z obnovitelných zdrojů* [online]. Brno, 2010 [cit. 2016-10-17]. Dostupné z: https://www.vutbr.cz/www_base/zav_prace_soubor_verejne.php?file_id=30015. Diplomová práce. Vysoké učení technické v Brně. Vedoucí práce Doc. Ing. Jiří Pospěšil, Ph.D.
- [26] KREUTZER, Ulrich. A Lot More Than Just Hot Air. *Http://siemens.com* [online]. [cit. 2017-05-05]. Dostupné z: <https://www.siemens.com/innovation/en/home/pictures-of-the-future/energy-and-efficiency/smart-grids-and-energy-storage-more-than-hot-air.html>
- [27] LANDRY, Mathieu; GAGNON, Yves. Energy storage: Technology applications and policy options. *Energy Procedia*, 2015, 79: 315-320.
- [28] LEFEBVRE, Dominique; TEZEL, F. Handan. A review of energy storage technologies with a focus on adsorption thermal energy storage processes for heating applications. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2017, 67: 116-125.
- [29] LUO, Xing, et al. Overview of current development in electrical energy storage technologies and the application potential in power system operation. *Applied Energy*, 2015, 137: 511-536.

- [30] MAHLIA, T. M. I., et al. A review of available methods and development on energy storage; technology update. *Renewable and Sustainable Energy Reviews*, 2014, 33: 532-545.
- [31] MOLEK, Tomáš. Supravodivost – princip a využití. *Http://oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-02-08]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/supravodivost-princip-a-vyuziti/>
- [32] REICHL, Tomáš. Baterie pro domácnosti PowerWall pod drobnohledem. *Http://oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/baterie-pro-domacnosti-powerwall-pod-drobnohledem/>
- [33] REICHL, Tomáš. Metal-air (Kov-vzduchová) baterie. *Http://oenergetice.cz* [online]. 2015 [cit. 2017-01-30]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/elektrina/akumulace-energie/metal-air-kov-vzduchova-baterie/>
- [34] REICHL, Tomáš. Prutokova-baterie. *Http://oenergetice.cz* [online]. [cit. 2017-01-26]. Dostupné z: <http://oenergetice.cz/technologie/elektroenergetika/prutokova-baterie/>
- [35] PALIZBAN, Omid; KAUHANIEMI, Kimmo. Energy storage systems in modern grids—matrix of technologies and applications. *Journal of Energy Storage*, 2016, 6: 248-259.
- [36] SPATARU, Catalina, et al. Techno-Economic Assessment for Optimal Energy Storage Mix. *Energy Procedia*, 2015, 83: 515-524.
- [37] www.tesla.com: powerwall [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/powerwall>
- [38] www.tesla.com: powerpack [online]. [cit. 2017-02-04]. Dostupné z: <https://www.tesla.com/powerpack>