

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
FAKULTA ELEKTROTECHNICKÁ

KATEDRA VÝKONOVÉ ELEKTRONIKY A STROJŮ

BAKALÁŘSKÁ PRÁCE

Akumulace elektrické energie

ZÁPADOČESKÁ UNIVERZITA V PLZNI
Fakulta elektrotechnická
Akademický rok: 2020/2021

ZADÁNÍ BAKALÁŘSKÉ PRÁCE (projektu, uměleckého díla, uměleckého výkonu)

Jméno a příjmení: **Lubomír KUGEL**
Osobní číslo: **E18B0072P**
Studijní program: **B2612 Elektrotechnika a informatika**
Studijní obor: **Elektrotechnika a energetika**
Téma práce: **Akumulace elektrické energie**
Zadávající katedra: **Katedra výkonové elektroniky a strojů**

Zásady pro vypracování

1. Uveďte význam akumulace elektrické energie obecně a zvláště v systémech s obnovitelnými zdroji energie.
2. Analyzujte různé možnosti a prostředky pro akumulaci elektrické energie, zpracujte jejich přehled.
3. Popište jednotlivé technologie pro ukládání elektrické energie, jejich princip a funkci. Zhodnoťte jejich vlastnosti z hlediska energetického, ekonomického a ekologického.
4. Uveďte příklady realizovaných technologií u nás i ve světě.

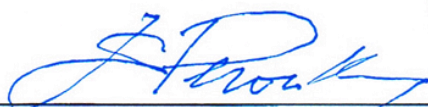
Rozsah bakalářské práce: **30 – 40 stran**
Rozsah grafických prací: **podle doporučení vedoucího**
Forma zpracování bakalářské práce: **tištěná/elektronická**

Seznam doporučené literatury:

Student si vhodnou literaturu vyhledá v dostupných pramenech podle doporučení vedoucího práce.

Vedoucí bakalářské práce: **Prof. Ing. Jan Škorpil, CSc.**
Katedra elektroenergetiky

Datum zadání bakalářské práce: **9. října 2020**
Termín odevzdání bakalářské práce: **27. května 2021**



Prof. Ing. Zdeněk Peroutka, Ph.D.
děkan



Prof. Ing. Václav Kús, CSc.
vedoucí katedry

Abstrakt

Bakalářská práce se v úvodu zabývá zdůvodněním akumulace elektrické energie a v následně jsou představeny příklady dnes známých možností akumulace, jejich technologie a princip činnosti. Jejich vlastnosti jsou posuzovány nejen z energetického, ale také z ekonomického a ekologického hlediska. K závěru práce jsou pro snazší porovnání shrnuty základní informace jednotlivých technologií akumulace energie a také uvedeny příklady realizovaných technologií v České republice a ve světě. Samotný závěr práce se věnuje využívání konkrétních akumulačních technologií ve spojení s různými druhy obnovitelných zdrojů energie a shrnutí ekologických dopadů.

Abstract

The bachelor's thesis deals with the rationale for the accumulation of electricity and then presents examples of today's known possibilities of accumulation, their technology and principle of operation. Their properties are assessed not only from an energy point of view, but also from an economic and ecological point of view. At the end of the work, for easier comparison, basic information about individual technologies of energy storage is summarized and examples of realized technologies in the Czech Republic and in the world are given. The very conclusion of the work is devoted to the use of specific storage technologies in conjunction with different types of renewable energy sources and a summary of environmental impacts.

Klíčová slova

Skladování energie, mechanická akumulace energie, baterie, akumulace do stlačeného vzduchu, redox, tepelná akumulace energie, superkapacitor, SMES

Key words

Energy storage, mechanical energy storage, batteries, compressed air energy storage, redox, thermal energy storage, supercapacitor, SMES

Prohlášení

Prohlašuji, že jsem tuto bakalářskou práci vypracoval samostatně a že jsem veškeré použité informační zdroje uvedl v seznamu literatury, který je součástí této práce.

V Plzni dne 23.5.2021

.....

Lubomír Kugel

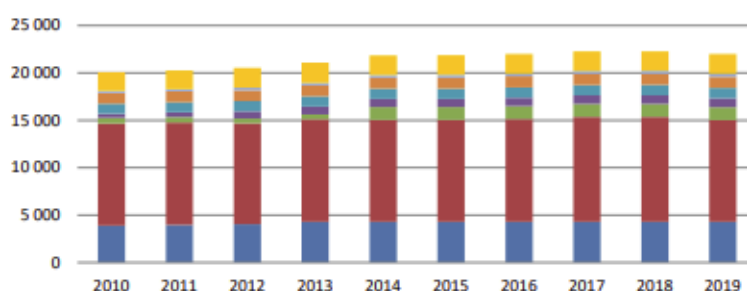
Obsah

Obsah.....	1
1. Úvod	3
2. Rozdělení systémů akumulace elektrické energie	5
3. Mechanická akumulace energie	6
3.1. Přečerpávací vodní elektrárna.....	6
3.2. Setrvačníky	7
3.3. Akumulace do stlačeného vzduchu	8
3.4. Akumulace do zkapalněného vzduchu	10
3.5. Akumulace přečerpáváním tepla	11
4. Elektrochemická akumulace energie.....	12
4.1. Baterie	12
4.1.1. Olověné baterie	12
4.1.2. Lithiové baterie.....	13
4.1.3. Sodíkové baterie	14
4.1.4. Niklové baterie	16
4.1.5. Metal-Air.....	17
4.2. Průtočné baterie.....	18
5. Chemická akumulace.....	22
5.1. Vodík.....	22
5.1.1. Akumulace	22
5.1.2. Palivový článek	23
5.1.3. Power to Gas	25
6. Tepelná akumulace energie	26
6.1. Akumulace citelného tepla.....	26
6.2. Akumulace latentního tepla	27
6.3. Chemická akumulace tepla.....	28
7. Elektrická akumulace energie.....	29
7.1. Superkapacitory.....	29
7.2. Akumulace do pole cívky	29
8. Porovnání akumulačních technologií	31
9. Realizované technologie.....	32
9.1. V České republice	32
9.2. Ve světě	32
10. Závěr	35

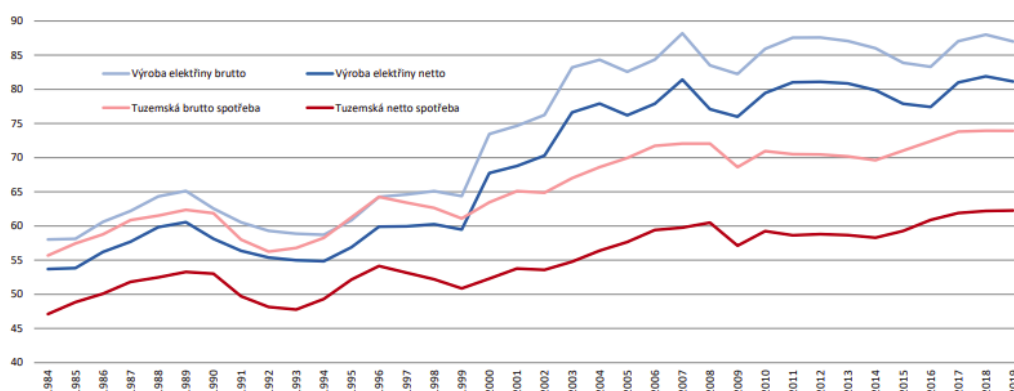
11. Literatura.....	36
Přílohy.....	40
Seznam obrázků a tabulek.....	40

1. Úvod

Je obecně známo, že výroba elektrické energie musí být pevně svázána se spotřebou. Od roku 1984 do roku 2019 vzrostla spotřeba v České republice o cca 15 TWh. S rostoucí spotřebou musí tedy nutně růst i instalovaný výkon elektráren, aby bylo možné spotřebu pokrýt. V roce 2010 bylo na území ČR instalováno cca 20 GW výkonu a do roku 2019 se instalovaný výkon navýšil o necelé 2 GW (viz obr. 1). Zvyšováním spotřeby se také zvyšují nároky na rychlý nárůst dodávky výkonu spotřebiteli. Vzhledem k tomu, že většina instalovaného výkonu je tvořena parními a jadernými elektrárnami, které nedokáží pohotově reagovat na změnu zátěže, je nutno využít akumulace elektrické energie z těchto zdrojů.



Obr. 1: Instalovaný výkon v ČR (ERÚ 2020)



Obr. 2: Vývoj výroby a spotřeby el. energie na území ČR (TWh) (ERÚ 2020)

Dnes se pro plošnou dodávku špičkového výkonu využívají především přečerpávací vodní elektrárny, které mají velký regulační rozsah a je do nich možno uložit velké množství energie, především levné noční nebo energie z obnovitelných zdrojů.

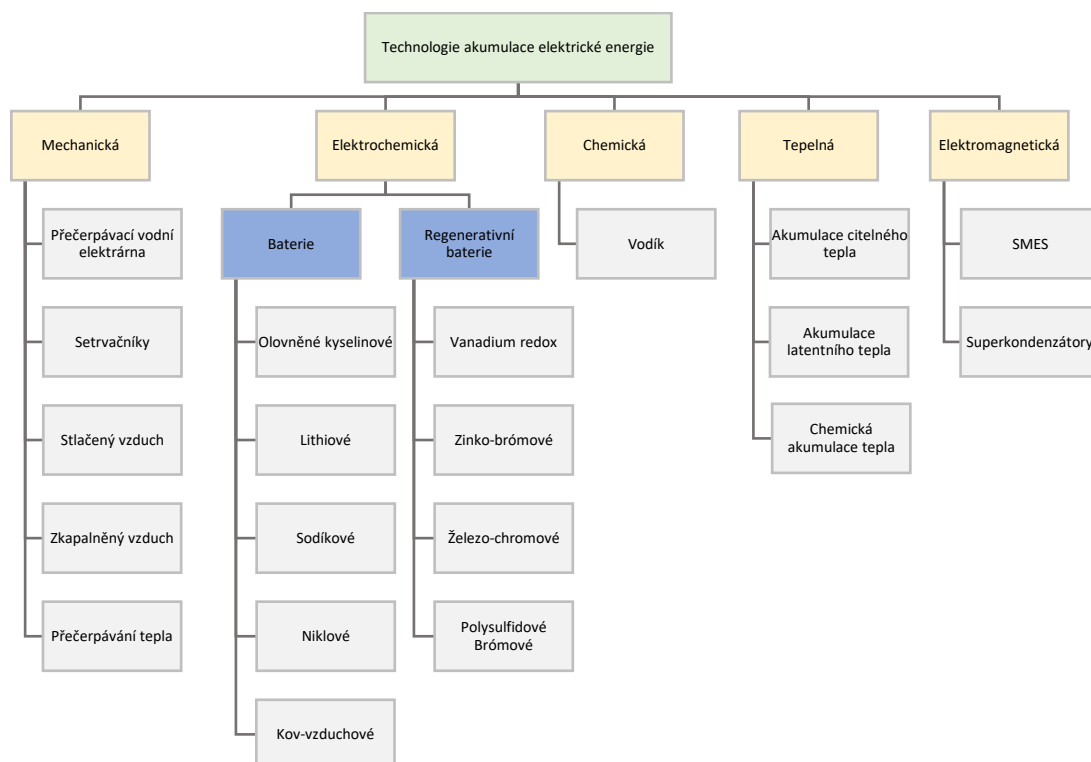
V roce 2019 byly cca 9 % instalovaného výkonu fotovoltaické elektrárny a zhruba 2% větrné elektrárny. Snaha přiblížit se bezemisní energetice tento podíl jistě navýší a právě tyto zdroje budou jedním z hlavních důvodů akumulace elektrické energie, neboť svou povahou jde o zdroje obtížně regulovatelné a bude potřeba akumulačních systémů, které jsou schopny reagovat v jednotkách desetin sekundy a rychleji pro eliminaci rychlých změn napětí. Tyto akumulační technologie nebudou jen v systémech VN jako přečerpávací elektrárny a v blízkosti decentralizovaných výroben el. energie z obnovitelných zdrojů energie (OZE), ale také u nn odběratelů. Dále bude snaha umísťovat akumulační

prvky do rozveden, kde budou sloužit jako náhrada bypassu a jako omezovač špiček proudu např. nabíjecích stanic pro elektromobily. Vzhledem k tomu, že se oblast výroby elektrické energie díky instalování fotovoltaických elektráren postupně posouvá do nižších úrovní napětí, bude nutno začlenit nové kontrolní a inteligentní prvky z vyšších do nižších vrstev napětí a tak plynule přejít na chytré sítě neboli Smart Grid, ve kterých se bez akumulace energie není možno obejít (Černý 2021).

2. Rozdělení systémů akumulace elektrické energie

Akumulační soustavy lze dělit podle různých parametrů jako je rychlost poskytnutí výkonu, akumulační kapacita, počet cyklů nabití/vybití nebo fáze přeměny, podle které dělíme systémy na homogenní (ukládání a odběr energie je shodný princip přeměny energie) a heterogenní (ukládání a odběr energie jsou dva odlišné typy přeměny energie) (Mastný 2011).

V této práci bych se rád přiblížil rozdělení podle technologie akumulace energie uvedeného v knize doc. Ing. Mastného Ph.D:

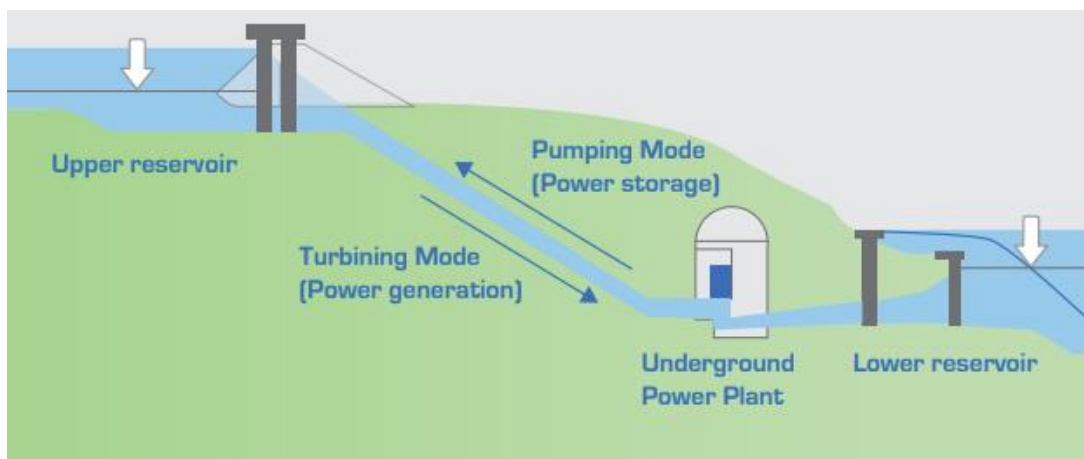


Obr. 3: Technologické rozdělení systémů akumulace energie (Mastný aj. 2011 - upraveno)

3. Mechanická akumulace energie

3.1. Přečerpávací vodní elektrárna

Přečerpávací vodní elektrárny (PVE) pracují na principu ukládání energie do potenciální energie vody. Jsou tvořeny dvěma nádržemi o rozdílné nadmořské výšce. Při dostatku elektrické energie (zejména v noci nebo při vysoké výrobě z obnovitelných zdrojů) je elektrárna v čerpacím režimu, čerpadlo mění elektrickou energii na kinetickou energii vody a ta se v horní nádrži mění na potenciální energii. Ve špičkách (např. večerní nárůst spotřeby) je možno tuto energii uvolnit v turbínovém režimu v přesně opačném pořadí změn energií. Díky tomu je možno přeměnit levnou noční energii na velmi cennou špičkovou energii. Současné elektrárny jsou schopné pracovat až se 75% účinností a dodávat plný výkon do 100 sekund od spuštění. Tato účinnost je vztažena ke vstupnímu transformátoru na straně VVN, zanedbávají se tedy ztráty vzniklé přenosem elektrické energie (Budín 2015).



Obr. 4: Princip PVE (EASE nedatováno)

Výkon PVE při zanedbání ztrát lze vypočítat jako:

$$P_{PVE} = \frac{E_p}{t} = \frac{m \cdot g \cdot h}{t} = Q \cdot \rho \cdot g \cdot h \quad [W] \quad (3.1)$$

kde

Q je průtok turbínou [m^3/s]

ρ je hustota vody [kg/m^3]

g je tíhové zrychlení [m/s^2]

h je výškový rozdíl nádrží (spád) [m]

E_p je potenciální energie vody [J, Ws]

Celkový regulační rozsah PVE:

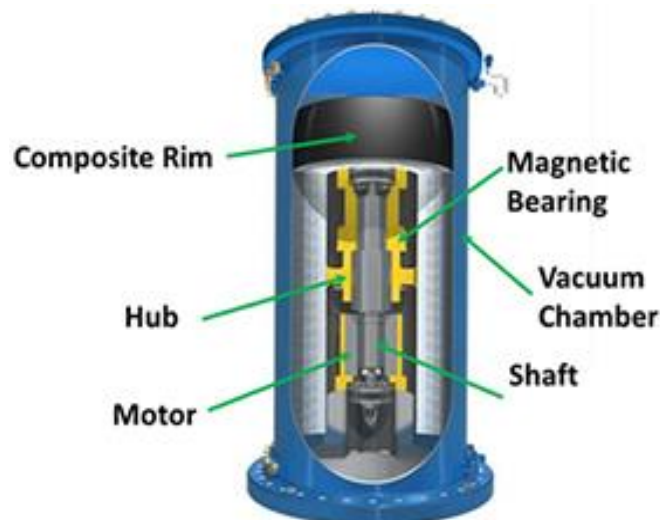
$$P_{reg} = P_{\check{c}} + P_t \quad (3.2)$$

Z energetického hlediska jsou PVE velmi žádané, avšak potýkají se s odporem ochránců přírody z důvodu přílišného zásahu do krajiny. Zásahy do přírody by bylo možno omezit použitím podzemní strojovny a nádrže. Například vybudováním strojovny a nádrže až 1000 m pod zemí by při stejném výkonu a desetkrát větším spádu bylo možné použít desetinu objemu vody, kupříkladu z přírodního jezera.

Celková cena výstavby PVE se pohybuje mezi 20-30 miliardami Kč za s výkonem od 500 do 1500 MW (Redakce Nazeleno.cz 2011). Cena PVE je přibližně 40-150 Eur/kWh. Životnost přečerpávací elektrárny může být teoreticky více jak 80 let (EASE nedatováno).

3.2. Setrvačníky

Setrvačníky fungují na principu přeměny elektrické na kinetickou energii a zpět. Jejich výhodou je jednoduchost konstrukce, která spočívá v upevnění co nejtěžšího setrvačníku na hřídel spojený převodovkou s elektromotorem. Při ukládání energie se napájí elektromotor a elektrická energie se mění v kinetickou energii hmoty setrvačníku. Při generátorickém chodu je tomu přesně naopak (Wagner 2018).



Obr. 5: Konstrukce setrvačnickového akumulátoru (ESA nedatováno)

Pro názornost uvádím výpočet energie v ideálním jednorozměrném setrvačnicku:

$$\begin{aligned} E &= \frac{1}{2}mv^2 = \frac{1}{2}m(r\omega)^2 = \frac{1}{2}mr^2\omega^2 = \frac{1}{2}mr^2\left(\frac{2\pi n}{60}\right)^2 \\ &= \frac{1}{1800}mr^2\pi^2n^2 \end{aligned} \quad (3.3)$$

kde

E je energie [J]

m je hmotnost [kg]

v je rychlost [m/s]

ω je úhlová rychlost [rad/s]

r je poloměr [m]

n je rychlost otáčení [otáčky/s]

Z rovnice je zřejmé, že energie uložená v setrvačnicku závisí na kvadrátu rychlosti otáčení a vzdálenosti hmoty od osy. U moderních zařízení je snaha dosáhnout co největší rychlosti při co největším poloměru. Dříve se pro konstrukci používala ocel a klasická ložiska, pro vyšší otáčky se dnes využívají setrvačnicku z uhlíkového kompozitu, rotující ve sníženém tlaku blížícím se vakuu na hřídeli s magnetickými ložisky nebo ještě lépe supravodivými ložisky. Díky tomu je možno dosáhnout až 100 000 otáček za minutu. Setrvačnicku umožňují rychlou reakci na změnu frekvence elektrické sítě (jednotky milisekund) a dokáží ji udržovat stabilní. Dokáží nashromáždit velké množství energie a po krátkou dobu poskytnout velký výkon až několik MW, například pro napájení výkonných laserů nebo fúzních tokamaků. Nejčastěji se používají zařízení s výkonem 2 kW a kapacitou 6kWh a pro větší výkony se z těchto jednotek sestavují farmy, které dokáží pokrývat spotřebu v síti několik minut (Wagner 2018). Cena za tuto technologii vychází přibližně na 330 dolarů za 1 kW (110 dolarů/kWh) s účinností až 98 % při 75 % zatížení (Andrews 2009).

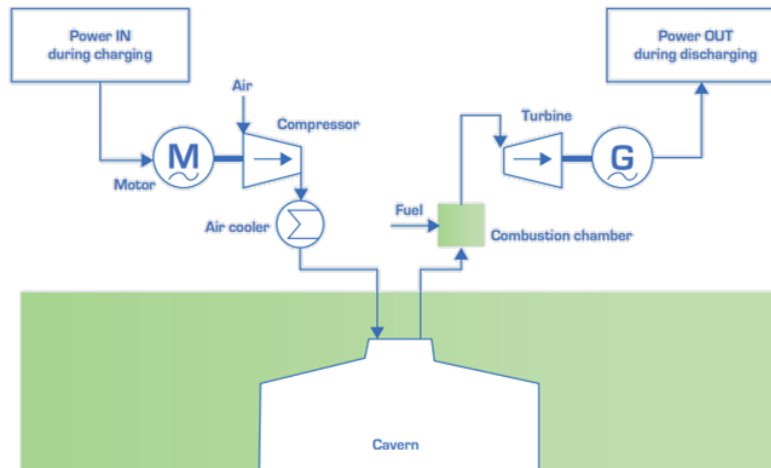
3.3. Akumulace do stlačeného vzduchu

CAES

Akumulace energie do stlačeného vzduchu neboli CAES (Compressed Air Energy Storage) se aplikací podobá přečerpávacím elektrárnám, kde se namísto čerpání vody do vyššího místa využívá stlačování a uskladňování vzduchu do tlakových nádob nebo solných kavern pod zemí, které se vyznačují flexibilitou a minimálními úbytky tlaku. Stlačování plynu až na 7 MPa vede k uvolnění tepla, které je při uskladňování odváděno chladiči do okolí. Při expanzi, je stlačený vzduch zahříván spalováním např. zemního plynu nebo methanu. Je možnost tento typ akumulace spojit s tepelnou elektrárnou a plyn ohřívát zbytkovým teplem plynu z turbíny. Samotný expandovaný vzduch je následně přiveden do vzduchové turbíny (ESA nedatováno). Účinnost takové metody je okolo 40 % (Wagner 2018).

D-CAES

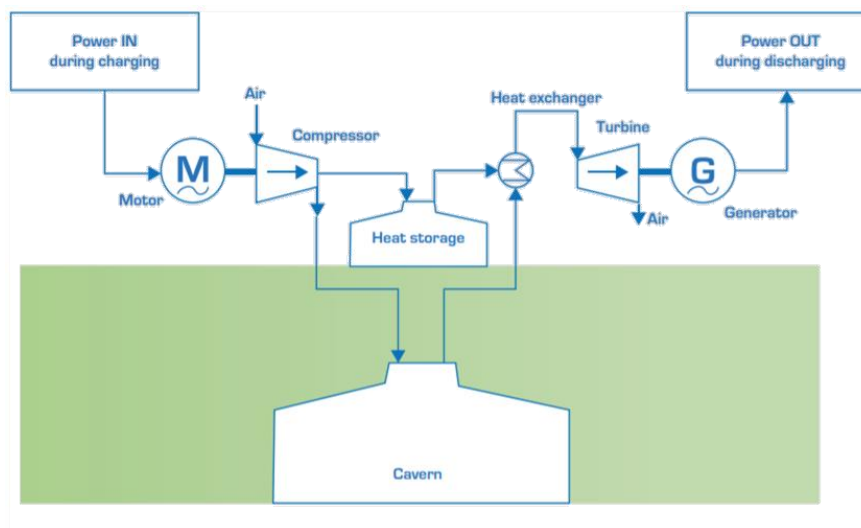
Další možností je diabatická CAES (D-CAES) metoda, kde turbíny jsou klasické plynové turbíny, ale namísto stlačení zemního plynu a vhánění do spalovací komory je plyn smíchán se stlačeným vzduchem a plyn se dále stlačovat nemusí. Díky tomu je možné snížit emise CO₂ o 40 až 60 % (ESA nedatováno). Efektivita takové elektrárny se pohybuje okolo 55 %. Elektrárna je schopna reagovat během několika minut od vydání povelu. Cena se pohybuje od 400 do 1200 Eur za kW výkonu (50-150 Eur/kWh). Životnost elektrárny je více jak 30 let (EASE nedatováno).



Obr. 6: Princip D-CAES (EASE nedatováno)

A-CAES

Dalším pokrokem v CAES metodě je adiabatický proces komprese a expanze (A-CAES), kdy je vzduch stlačován až na 7 MPa. Při stlačování vzduchu je teplo ukládáno do tepelného zásobníku (TES – Thermal Energy Storage) a při expanzi uvolněno do expandovaného vzduchu. Díky tomu není potřeba pro ohřev spalovat žádné palivo a je možno dosáhnout více než 70 % účinnosti. Po stlačení může teplota vzduchu vzrůst až na 600 °C. Tento vzduch je přiveden do TES, který vzduch ochladí. TES obsahuje keramiku, beton, různé horniny, termoolej nebo kapalnou sůl. Tímto způsobem je možno uložit až 10 GWh energie a do minuty poskytovat výkon 100MW až 10 hodin. Počet cyklů je neomezený, životnost je více jak 30 let. Cena této technologie se pohybuje od 1200 do 2000 Eur/kW (EASE nedatováno).



Obr. 7: Princip A-CAES (EASE nedatováno)

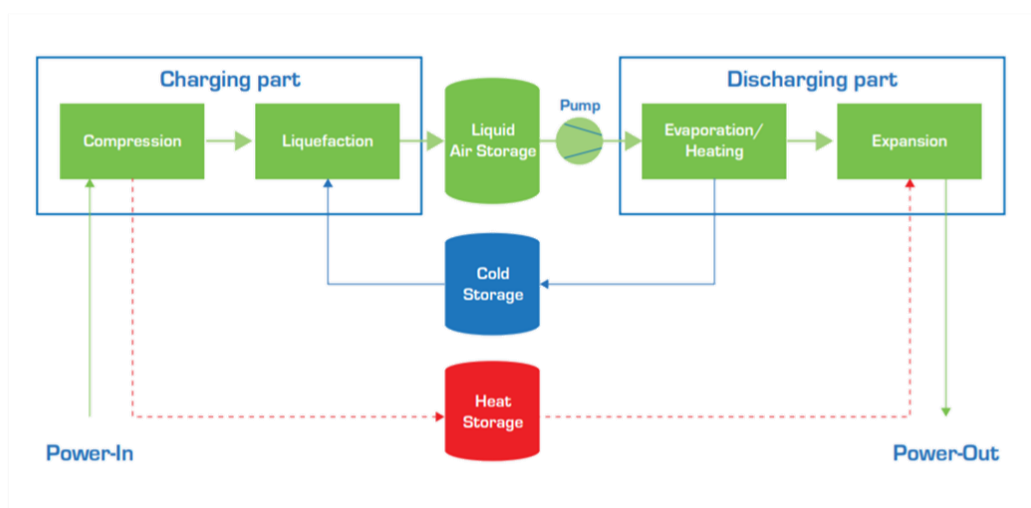
I-CAES

Pokud by teplo ze stačovaného vzduchu nebylo odváděno, teplota při stlačení na zmíněných 7 Mpa by vzrostla na 900 K a uložit vzduch při takové teplotě by se výrazně prodražilo. Proto se např. v A-CAES metodě ukládá stlačený vzduch a teplo odděleně a teplota stlačeného vzduchu se mění skokově průchodem přes chladič. Pro zvýšení účinnosti celého procesu je snaha zachovávat teplotu stále stejnou, což znamená odebírat teplo během celého stlačování a plynule ho také dodávat při expanzi. Takové CAES metodě říkáme Izotermická (I-CAES). Dnes zatím není v provozu žádná I-CAES elektrárna, ale jen několik pokusných zařízení, kde se izotermického stlačení snaží dosáhnout vstříknutím kapének vody do pístu při stlačování. Velký povrch kapek a vysoká tepelná kapacita vody způsobí zachování přibližně stejné teploty před a po stlačení. Tato voda je odvedena a následně z ní odebráno teplo, nebo je sama uchovávána a cyklus se opakuje. Tímto lze účinnost procesu zvýšit až na 80 % (ESA nedatováno).

3.4. Akumulace do zkvalněného vzduchu

LAES neboli Liquid Air Energy Storage funguje na podobném principu jako A-CAES, ale obsahuje navíc jednu fázi a tou je zkvalnění a uložení kapalného vzduchu. Po kompresi a odvedení tepla je vzduch ochlazen pomocí TES který je navržen tak, aby pracoval při extrémně nízkých teplotách, kterých dosáhne při zpětném odpaření kapaliny ve vybíjecím režimu. Počet cyklů tohoto zařízení je odhadována na 22 až 30 tisíc, což odpovídá zhruba 30-40 rokům. LAES dokáže dodávat do 5 minut výkon od 5 do 650 MW. Cena této technologie se pohybuje v rozmezí 60-600 Eur/kWh.

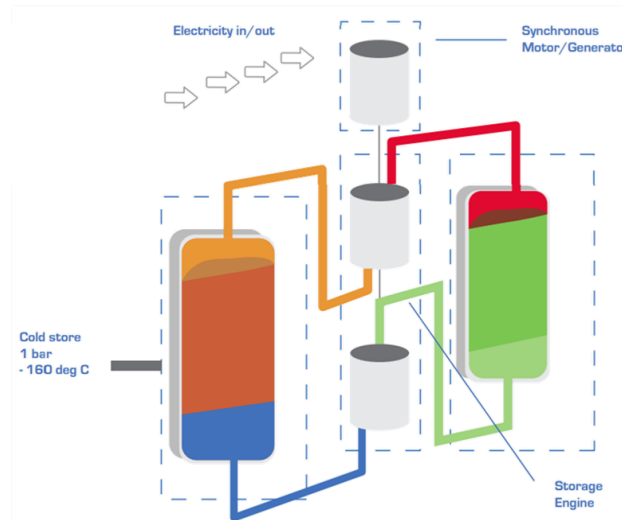
Tato metoda může být konstruována bez zásobníku tepla, zahřátí vzduchu při expanzi je pak realizováno jako u metod CAES nebo D-CAES (EASE nedatováno).



Obr. 8: Princip LAES (EASE nedatováno)

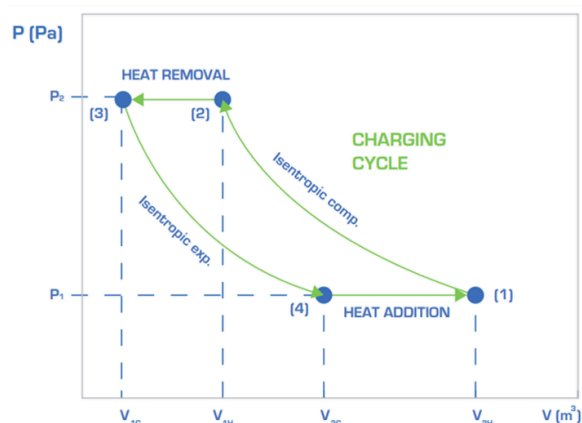
3.5. Akumulace přečerpáváním tepla

Tato metoda se zkratkou PHES (Pumped Heat Electrical Storage) funguje na stejném principu jako tepelné čerpadlo při vytápění/chlazení budovy s tím rozdílem, že se veškeré teplo skladuje a nevytrácí se do okolí. Opět je to metoda podobná PVE, ale namísto čerpání vody je čerpáno teplo pomocí Argonu.



Obr. 9: Princip PHES (EASE nedatováno)

Na začátku cyklu je Argon při normálním tlaku a teplotě. Motor roztáčí kompresor a ten tlakuje Argon na 12 bar (1,2 MPa), tím se zvýší jeho teplota na 500°C. Plyn následně pomalu prochází tepelným zásobníkem, který Argonu odebere teplo a při výstupu ze zásobníku má normální teplotu a tlak zůstává nezměněn. Následně je přiveden do expandéru, kde je snížen tlak na počáteční a tím se plyn ochladí na -160°C. Průchodem druhým tepelným zásobníkem je plyn ohřát na normální teplotu při normálním tlaku a cyklus se opakuje. Tak se do tepelných zásobníků pomocí tepla uloží elektrická energie. Vybíjení takového akumulátoru funguje v přesně opačném pořadí. Touto metodou je možno uchovat až 1 GWh a poskytovat výkon 200 MW po až 6 h s účinností až 75 %. Zařízení má životnost více jak 15 tisíc cyklů, tedy 20-30 let. Cena se pohybuje okolo 20 Eur/kWh (EASE nedatováno). Pro názornost přikládám PV diagram nabíjení (směr 1-2-3-4, vybíjení ve směru 4-3-2-1).



Obr. 10: PV diagram nabíjení PHES (EASE nedatováno)

4. Elektrochemická akumulace energie

4.1. Baterie

Baterie fungují na principu přeměny chemické energie na elektrickou a naopak. Každý bateriový článek obsahuje kladný pól (katodu) a záporný pól (anodu) v elektrolytu, který umožňuje přesun iontů mezi elektrodami (ESA nedatováno). V této práci uvádím baterie pro akumulaci, také je lze tedy nazývat akumulátory.

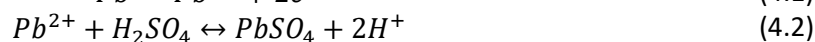
4.1.1. Olověné baterie

Zalévané

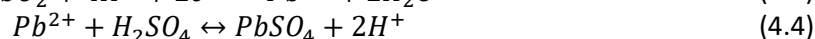
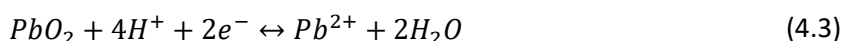
Olověné baterie jsou jedny z nejpoužívanějších dobíjecích baterií na světě především díky svojí vysoké spolehlivosti a bezpečnosti. Výhodou těchto baterií je až 90 % účinnost a recyklovatelnost. Skoro veškeré olověné baterie na světě jsou recyklovány a až 90 % materiálu je možno použít opakovaně. Nová baterie se skládá z 80 % z recyklátu. Špičkové baterie mají životnost až 5000 cyklů se 70% vybitím, což je při intenzivním používání skoro 15 let. Tyto baterie mají nízkou pořizovací cenu vzhledem k ostatním druhům baterií a jsou nehořlavé. Lze je použít pro regulaci frekvence sítě nebo ve spojení s fotovoltaickými elektrárnami (ESA nedatováno).

Olověné baterie jsou tvořeny dvěma druhy olověných mřížovaných desek zalitých vodným roztokem H_2SO_4 . Stejný druh desek je spojen a tvoří jednu elektrodu. Kladné desky (katoda) jsou vyplněny pastou PbO_2 a záporné (anoda) jsou vyplněny pastou čistého olova. Tyto desky jsou střídavě řazeny blízko sebe (Mastný 2011). Na elektrodách při průchodu proudu probíhají chemické reakce vypsány níže.

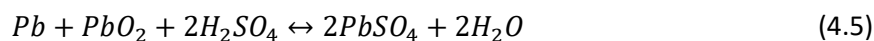
Na negativní elektrodě:



Na pozitivní elektrodě:



Celková reakce v baterii:



Olovo a oxid olovičitý reagují s kyselinou sírovou a vzniká síran olovnatý, který zabírá místo na katodě. Cykly jsou vratné, vybíjením se snižuje koncentrace kyseliny sírové a nabíjením naopak zvyšuje. Pokud dochází k nabíjení i po spotřebování veškerého síranu, začne se na elektrodách uvolňovat vodík (na Pb) a kyslík (na PbO_2), což může mít negativní vliv na následné vybíjení. Nevýhodou olověných baterií je vysoká hmotnost a dlouhá doba nabíjení. Energetická hustota se pohybuje okolo 35 Wh/kg, což odpovídá 80 Wh/l (Mastný 2011).

Existuje několik různých typů olověných baterií. Buďto mohou být klasického zalitého typu, který je popsán výše a do kterého je nutno čas od času doplňovat vodu, nebo typ VRLA (baterie řízené

ventilem), kde je vývoj vodíku potlačen, kyslík je chemicky rekombinován a tím je eliminována ztráta vody a dosaženo bezúdržbovosti (ESA nedatováno). Typ VRLA má dvě nejpoužívanější technologie: AGM a Gelové baterie.

AGM

První variantou jsou baterie s elektrodami s absorpční skelnou tkaninou (Absorptive glass mat – AGM), která obaluje kladné elektrody a je nasáklá elektrolytem. Tento typ má nízký vnitřní odpor a je schopen dodávat velký proud. Nabíjení je až pětikrát rychlejší než u zalitého typu a lze ho vybit až na 20 % kapacity, zatímco klasický jen na 50 %. Hojně se využívá jako startovací a trakční baterie (Šrubařová 2018).

Gelové

Druhým typem je gelový akumulátor. Kyselina sírová je smísená se silikagelem a díky tomu je elektrolytem polotuhá pasta. Tento typ má delší životnost hlavně díky lepšímu odvodu tepla. Gelové baterie obsahuje více kyseliny než typ AGM, tudíž vydrží více cyklů. Obvykle se používá pro malé i velké UPS zdroje (Šrubařová 2018).

4.1.2. Lithiové baterie

Li-ion

Lithium-iontové baterie se skládají z katody vyrobené z oxidu lithia a jiného kovu (koobalt, nikl nebo molybden) a anodou z uhlíku, které jsou do sebe svinuty a odděleny porézním polymerem, který je schopen propouštět jen ionty a elektrony. Jako elektrolyt jsou zde tekuté soli lithia (např. LiPF_6) (EASE nedatováno). Při vybíjení je z katody vytržen iont lithia, který se přes elektrolyt a polymer dostane k anodě, kde se spojí s vnějším elektronem uhlíku. Lithiové ionty se nespojují přímo s uhlíkem a tím se prodlužuje životnost článků. Nabíjení probíhá naprosto stejně, ale opačně. Baterie jsou bezúdržbové, lehké, nevybíjí se, lze je nabíjet mnohem rychleji (Mastný 2011). Vyrábějí se v podobě článků o jmenovitém napětí 3,6 V (ESA nedatováno). Z článků lze postavit zařízení s kapacitou desítek MWh, které dokáže během několika milisekund dodávat výkon až 50 MW. Tyto baterie vydrží 2000-10 000 cyklů, což znamená 15-20 let. Účinnost zařízení může dosahovat až 98 %. Dnes jsou to jedny z nejpoužívanějších baterií na světě. Tyto články jsou relativně bezpečné díky kovovému obalu. Lze je najít v mobilních elektronických zařízeních, elektromobilech a nově i jako akumulátory fotovoltaických a větrných elektráren. Díky stále klesající ceně této technologie se s Li-ion bateriemi počítá do budoucna jako s hlavními akumulačními prvky ve Smart Grid sítích (EASE nedatováno).

Li-pol

Elektrolyt Lithium-polymerových článků není kapalný, ale je tvořen polymerní sloučeninou, která je iontově vodivá. Články bývají obalené hliníkovou fólií a mohou být pružné. Jsou odolnější vůči nárazům a provozu s vibracemi, jejich deformace ale může způsobit vnitřní zkrat a destrukci baterie. Elektrody nejsou svinuty, nýbrž pokládány na sebe a baterie tak může mít jakýkoliv tvar (Tichý 2019).

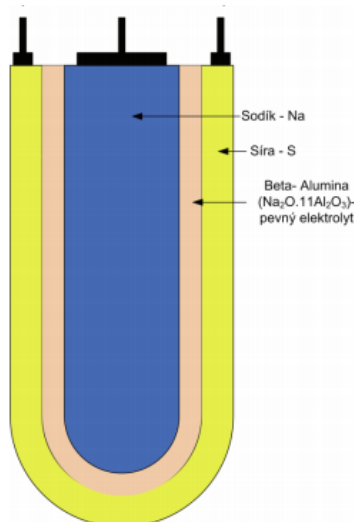
Jiné varianty

Všechny druhy lithiových baterií pracují na principu přesunu iontů lithia. Ve výzkumu jsou baterie LiFe, LTO (lithium-titan), Li-S (lithium-sulphur), LMP (lithium-metal-polymer), které obsahují přímo čistě lithium nebo Li-Air (viz kapitola 4.1.5 Metal-Air baterie). Tyto baterie by mohly v budoucnu nahradit dnes využívané Lithiové baterie.

4.1.3. Sodíkové baterie

NaS

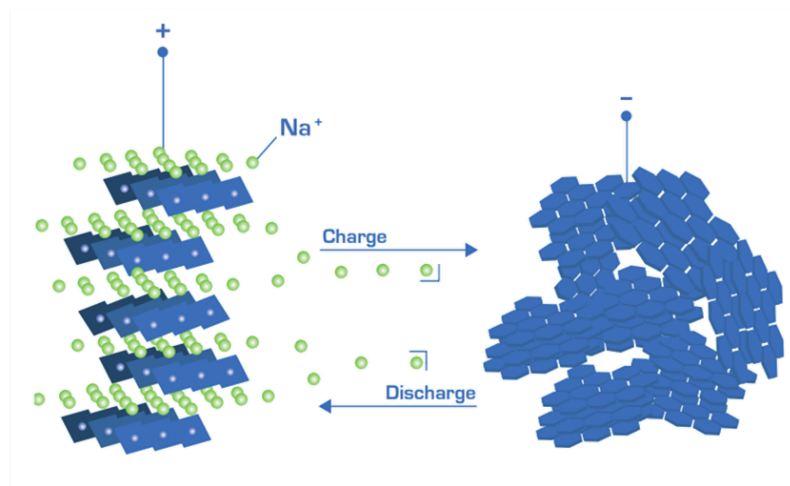
Sodíková neboli Sodium-Sulphur (NaS) baterie se skládá z katody tvořené sírou a anody z tekutého sodíku. Elektrody jsou odděleny pevným keramickým elektrolytem Sodium Beta Alumina ($\text{Na}_2\text{O} \cdot 11\text{Al}_2\text{O}_3$). Tento elektrolyt umožňuje průchod pouze kladným sodíkovým iontům. Baterii je nutno udržovat při teplotě okolo 350°C , kvůli roztavenému sodíku (EASE nedatováno). Baterie má až 11 krát vyšší hustotu energie na jednotku hmotnosti než olověná baterie (až 210 Wh/kg) (EASE nedatováno), až 3 krát větší hustotu energie vztahenou na objem (300 Wh/l) a díky tomu může být až 3 násobně menší. Je možné je přetěžovat (až šesti násobek normalizovaného výkonu), nevypouštějí žádné znečišťující látky. Nevýhodou je nemožnost přepravy nebo provozu s vibracemi právě kvůli roztavenému sodíku a síře uvnitř baterie. Vyrábí se v podobě článků s napětím okolo 2 V a následně se skládají do větších zařízení se sníženým tlakem nebo argonem pro zamezení tepelných ztrát (Mastný 2011). Účinnost zařízení se pohybuje okolo 80% . Životnost je více jak 4500 cyklů, tedy 15-20 let. Baterie dokáže dodávat výkon až 50 MW během několika milisekund. Je možno uložit až 400 MWh energie. Cena zařízení se pohybuje v rozmezí $300\text{-}450 \text{ Eur/kWh}$ (EASE nedatováno).



Obr. 11: Průřez Sodíkovou baterií (Mastný aj. 2011)

Na-ion

Katoda baterie je tvořena vrstveným materiálem obsahující sodík a anoda uhlíkem. Elektrolyt je vodný roztok sodíkové soli (např. Na_2SO_4). Elektrody jsou odděleny porézním materiálem, který umožňuje průchod iontů. Při nabíjení uvolňují sodíkové atomy na katodě elektrony do vnějšího obvodu a procházejí elektrolytem k anodě, kde přijímají elektrony z obvodu a reagují s materiálem anody. Vybíjení má přesně opačný průběh. Baterie je stále ve vývoji a použití je plánováno pro akumulaci v síti. (EASE nedatováno).



Obr. 12: Princip Na-ion baterie (EASE nedatováno)

$Na/NiCl_2$

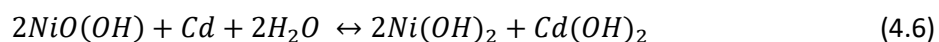
Jiným názvem ZEBRA je baterie, uvnitř které je katoda z niklu a chloridu sodného spolu s elektrolytem chloraluminátem sodným a anoda ze sodíku. Elektrody jsou odděleny keramikou stejnou jako v NaS baterii. Ta je propustná pro ionty sodíku ale ne pro elektrony a zastává i funkci elektrolytu. Elektrody jsou v roztaveném stavu, proto je nutno udržovat teplotu nad 300°C. Jediná baterie je schopna naakumulovat 4 až 25 MWh. Baterie netrpí samovybíjením, její účinnost je pak dána tepelnými ztrátami a pohybuje se okolo 90 % (EASE nedatováno). Při přebití baterie na katodě reaguje přebytek niklu s chloraluminátem sodným, který má vyšší potenciál než samotný článek a tím je zamezeno průchodu proudu. Díky tomu není třeba přidávat ochrany proti přebití. Články se vyrábějí s napětím 2,7 V (Lemaire-Potteau aj. 2009). Baterie byla vytvořena v EU jako náhrada za NaS baterie vyráběné jen v Japonsku. Dnes se využívá v nepřenosných úložištích energie a plánuje se využití ve Smart Grid sítích, UPS, elektromobilitě a obnovitelných zdrojích (EASE nedatováno).

4.1.4. Niklové baterie

NiCd

Nikl-kadmiové baterie jsou v nabitém stavu tvořeny katodou z oxid-hydroxidu niklitého a anodou z čistého kadmia. Elektrody jsou odděleny membránou propouštějící elektrony a ionty a zality vodným roztokem hydroxidu draselného (EASE nedatováno). Chemické reakce při vybíjení v baterii podle BATTEX, nedatováno:

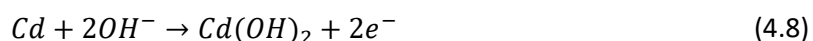
Proces vybíjení:



Reakce na katodě:

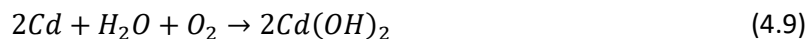


Reakce na anodě:



Proces nabíjení je stejný jako vybíjení, jen s reakcemi opačným směrem.

Při přebíjení nastává elektrolýza vody v elektrolytu a tím uvolňování kyslíku na kladné elektrodě a vodíku na záporné. Otevřené akumulátory plyn odvádějí do atmosféry, hermetické dokáží kyslík rekombinovat a zabránit vývoji vodíku. I při plném nabití musí být na záporné elektrodě nenabitý materiál, který oxiduje. Elektrická energie dodávána během přebíjení způsobuje zahřívání článku. Probíhá reakce podle rovnice:



Nevýhodou NiCd baterií je možný výskyt tzv. paměťového efektu neboli druhého vybíjecího stupně. Jde o jev vznikající opakovaným vybíjením baterie na stejně malou hloubku vybití. Je zapříčiněn změnou krystalové struktury anody. Problém lze odstranit plným vybitím akumulátoru. Při tomto jevu se vyskytuje náhlý pokles napětí zhruba o 50 až 100 mV na jeden článek (1,2 V), avšak kapacita zůstává stejná. Paměťový efekt vzniká jen u NiCd baterií rekrystalizací záporné elektrody, v klasickém provozu se s ním ale nesetkáme (BATTEX nedatováno). Na druhou stranu se NiCd baterie vyznačují nízkou hmotností a vysokou mírou bezpečnosti. Vyrábějí se různé typy článků od obyčejných pro využití v slaboproudé elektronice až po hermetické články využívané v letecké nebo vlakové dopravě. Hermetické, se navíc vyznačují odolností vůči vysokým i nízkým teplotám, vlhkosti nebo vibracím a využívají se pro akumulaci ze solárních a větrných elektráren, nebo na místech s obtížným přístupem nebo špatnými přírodními podmínkami. Akumulační zařízení z NiCd článků se vyrábějí s kapacitou do 10 MWh a s účinností 60-70 %. Vývoj této technologie baterií se zdá být u konce. Vzhledem k obsahu kadmia, které je klasifikováno jako látka škodlivá k životnímu prostředí, je použití těchto baterií omezeno zákonem 297/2009 Sb. a zároveň je nutné baterie recyklovat stejně jako olovené. Cena akumulátoru se pohybuje od 500 do 1500 Eur/kWh (EASE nedatováno).

NiMH

Nikl metal-hydridové baterie se začaly vyrábět jako náhrada za baterie typu NiCd. V těchto bateriích již nenajdeme škodlivé kadmium, je nahrazené slitinami různých kovů, které na sebe dokáží vázat vodík a vytvářejí tak kovové hydridy. Katoda tohoto typu baterie je stejná jako u typu NiCd, tím i chemické reakce na ní. Na záporné elektrodě probíhá vybíjení podle následující rovnice:

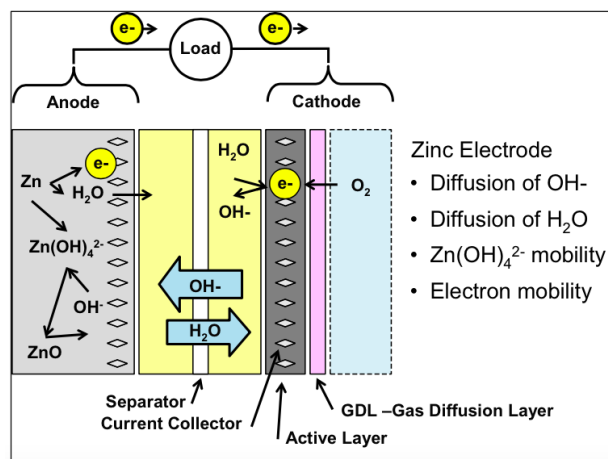


kde M je kovová slitina.

Při přebíjení se na kladné elektrodě uvolňuje kyslík, proto musí být část záporné elektrody nenabita, kyslík prochází přes membránu a redukuje s vodou na skupinu OH^- , která je vázána na kovovou slitinu, díky čemuž na ní nevzniká vodík a baterie může být vyráběna v hermetickém obalu stejně jako NiCd akumulátory. Oproti nim ale nesou tak odolné vůči klimatickým a mechanickým vlivům. Baterie trpí samovybíjením, které se projevuje nepatrně více než u NiCd baterií, oproti Li-ion je podstatně větší. Jsou těžší než NiCd a Li-ion baterie a lehce dražší než NiCd (BATTEX nedatováno). Cena zařízení větších kapacit se ale pohybuje na stejné úrovni jako NiCd baterie a to v rozmezí 500 - 1500 Eur/kWh. Dnes je tento typ využíván stejně hojně jako Li-ion baterie. Je snaha těmito bateriemi nahradit NiCd baterie obsahující kadmium, aplikace je tedy totožná (EASE nedatováno).

4.1.5. Metal-Air

Baterie typu kov-vzduch je nový typ baterie využívající pro zápornou elektrodu kovy jako je Zinek, Lithium, Železo, Sodík nebo Hliník. Kladnou elektrodu zastupuje vzduch, kde aktivní část tvoří kyslík. Elektrody jsou odděleny porézním uhlíkovým materiálem a katalyzátorem, který rozpouští vzduchovou elektrodu a produkuje hydroxylové ionty do kapalného elektrolytu u záporné elektrody. Záporná elektroda oxiduje a uvolňuje elektrony. Nabíjení funguje na obráceném principu, tedy vracení kyslíku do vzduchu. Při vybíjení vznikají na záporné elektrodě vedlejší produkty, které nelze navrátit do původního stavu, nabíjení je proto neefektivní, dnes je možno dosáhnout max 50% účinnosti nabíjení. Jednou z možností zvýšení účinnosti nabíjení je recyklace tohoto materiálu a záporné elektrody a znovuvyvoření nové anody. Hustota energie je až 3krát větší než u Li-ion baterií, do budoucna jsou tedy nejvíce konkurenceschopnou technologií (Reichl 2015). Plánovaná cena se odhaduje na cca 150 Eur/kWh (EASE nedatováno).



Obr. 13: Kov-vzduch baterie typu Zn-air (Akhil aj. 2013)

4.2. Průtočné baterie

Průtočná baterie (anglicky flow battery) nebo také redox (redukce-oxidace) baterie je zařízení pocházející ze 70. let minulého století z výzkumů NASA sloužící k akumulaci elektrické energie za pomoci oxidace a redukce dvou oddělených elektrolytů. Baterie obsahuje výměník, který je nejčastěji iontoměničovou membránou rozdělen na dvě poloviny. Negativní polovina je protékána negativním elektrolytem a pozitivní polovina pozitivním elektrolytem. Mezi rozdílně nabitými elektrolyty na membráně vzniká elektromotorické napětí, a tak i napětí na svorkách baterie. Celkové napětí baterie je možno měnit zapojením více výměníků do série. Na celkovou kapacitu má vliv množství elektrolytu v nádržích, baterie tak může mít kapacitu od jednotek kWh po desítky MWh. Velikost dodávaného výkonu je ovlivněna velikostí výměníků (ESA nedatováno). Výhodou těchto baterií je velmi dlouhá životnost, která se pohybuje v rozmezí 10-20 let, což je více než 12 tisíc cyklů hlubokého vybití (EASE nedatováno). Na životnost mají hlavní vliv použité komponenty jako jsou těsnění, separátory nebo trubky. Samotné elektrolyty nestárnou a je možno je používat neomezeně (Akhil aj 2013). Účinnost na DC/DC úrovních kvůli nutnému chodu čerpadel elektrolytů je průměrně 75 %. Z důvodu malé hustoty energie je potřeba velkých nádrží elektrolytů, tím je nemožné tuto technologii používat jako mobilní zdroj. Na druhou stranu nízké pořizovací náklady v rozmezí 100-400 Eur/kWh jsou vhodné pro využití jako stacionární akumulační systémy v distribučních a přenosových uzlech (EASE nedatováno).

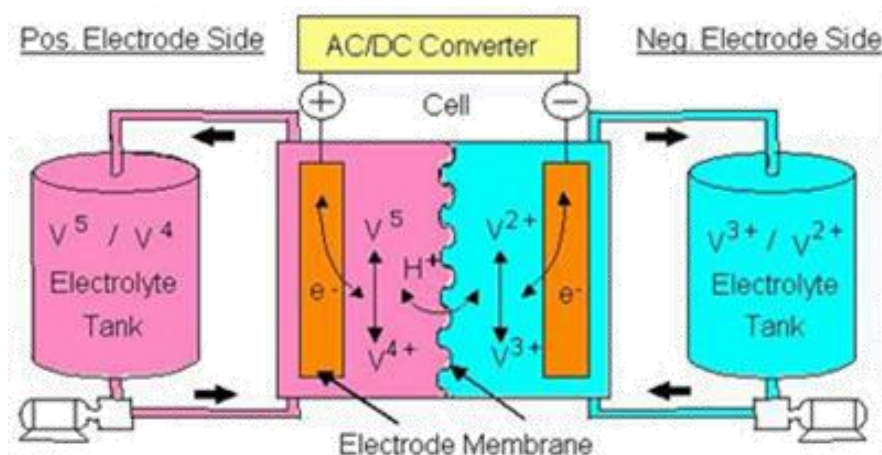
Průtočné baterie lze provozovat s různými elektrolyty a podle typu přeměn aktivních látek se dělí na pravé průtočné baterie (true redox flow battery) a hybridní průtočné baterie. Pravé hybridní baterie obsahují aktivní látky neustále rozpuštěné v elektrolytech, hybridní baterie před začátkem nabíjení mají také obě aktivní složky rozpuštěny, ale při nabíjení se alespoň jedna složka elektricky pokovuje na elektrodu (EASE nedatováno). Kladný elektrolyt se nazývá katolyt a záporný anolyt (Akhil aj. 2013).

Druhů průtočných baterií je mnoho, uvedu zde proto nejznámější technologie, které jsou již komerčně využívány, nebo jsou na konci vývoje a uvedení do provozu je čeká v nejbližší době. Kromě těchto baterií probíhá vývoj nízkonákladových průtočných baterií nové generace vyvíjené projektem FlowCamp. Jedná se o tři technologie. Zinek-vzduch průtočná baterie, která by měla podstatně navýšit již dnes velkou kapacitu baterie a čas vybití. H₂/Br₂ by se měla vyznačovat velkým výkonem a průtočná baterie s organickými elektrolyty, která by měla poskytnout ekologickou nezávadnost narozdíl od ostatních průtočných baterií (FlowCamp nedatováno).

VRB

Vanadová průtočná baterie (Vanadium Redox Battery) spadá do kategorie pravých průtočných baterií, kde jsou ionty vanadu rozpuštěné ve vodném roztoku kyseliny sírové o podobné kyselosti jako u olověných baterií. V katolytu jsou rozpuštěny kationty vanadu V⁴⁺ v podobě VO²⁺, které během nabíjení odevzdávají elektron a vnikají kationty V⁵⁺ (VO₂⁺). V anolytu jsou rozpuštěny čistě kationty V³⁺, které během nabíjení přijímají elektron a mění se na V²⁺ (ESA nedatováno). Při vybití probíhá výměna elektronů obráceně. Přes polopropustnou membránu procházejí ionty vodíku v rámci vyrovnání nábojů. Membránou mohou procházet i ionty vanadu, ale stává se tak v nepatrném množství, že na účinnost nebo samovybití projevující se zahříváním výměníku to nemá výrazný vliv. Pokud je baterie mimo provoz a elektrolyt je všechen v nádržích, k samovybití nemůže docházet. Nominální napětí jednoho článku se pohybuje okolo 1,35 V, energetická hustota 16-33 Wh/l. Baterie se konstruují s nádržemi pod výměníky, aby při vypnutých čerpadlech nabitý elektrolyt stekl do nádrží. Tím je ale prodloužena reakční doba dodávání výkonu, která se při zapnutých čerpadlech pohybuje v řádech milisekund. Výhoda této technologie je neomezenost hloubky vybití, oproti jiným bateriovým technologiím lze tuto vybití na absolutních 0 % a životnost se nijak nezhorší. Z ekologického hlediska je

nutné hlídat úniky tekutiny z nádrží a při demontáži je nutné dbát jednak na správnou likvidaci toxické iontoměničové membrány z výměníku a druhá na odstranění vanadu z elektrolytů, jehož dopady na životní prostředí se zkoumají (Akhil aj. 2013). Prozatím se baterie využívají při pokrývání denních špiček (EASE nedatováno).



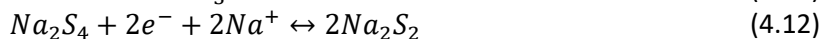
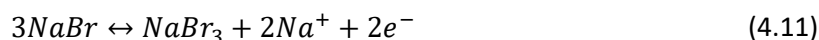
Obr. 14: Princip VRB (ESA nedatováno)

ICB

Železo-chromová baterie (Iron-chromium Battery) využívá stejný princip ukládání energie jako vanadová baterie. Jako rozpouštědlo je použit vodný roztok kyseliny chlorovodíkové a namísto vanadu jsou rozpuštěny ionty chromu Cr^{2+} odevzdávající elektron a ionty železa Fe^{3+} přijímající elektron. Iontoměničová membrána mezi elektrolyty je opět schopna propouštět ionty vodíku pro vyrovnání nábojů. U raných baterií tohoto typu docházelo při rozpouštění železa a chromu k nerovnováze mezi katolytem a anolytem. Moderní Fe-Cr průtočné baterie obsahují v obou elektrolytech jak železo tak chrom (elektrolyty jsou stejné) a díky tomu je možné používat levné porézní (polopropustné) membrány. Napětí jednoho článku je nižší než u vanadových baterií, pohybuje se okolo 1,18 V. Účinnost se pohybuje v rozmezí 70-80 %, blíže horní hranici je při teplotách 40-60 °C. V porovnání s jinými typy baterií se tato vyznačuje velmi malou škodlivostí vůči životnímu prostředí a téměř žádným odparem vody z elektrolytů. Tím se tato baterie řadí mezi nejšetrnější akumulční systémy vzhledem k životnímu prostředí. Nevýhodou je nižší energetická hustota než u vanadových baterií, proto se zatím využívají jen jako záložní zdroje, ale plánované nasazení je v místech nutnosti akumulace v jednotkách MWh (ESA nedatováno)

PSB

V polysulfid-bromidové průtočné baterii se vyskytuje bromid sodný jako pozitivní elektrolyt a polysulfid sodný jako negativní elektrolyt. Při nabíjení je v pozitivním elektrolytu uvolňován sodíkový iont, který prochází iontoměničovou membránou a v negativním elektrolytu reaguje s polysulfidem sodným a vzniká disulfid sodný. Pro správnou funkci je zapotřebí iontoměničové membrány umožňující průchod kationtů sodíku (Androsov aj. 2014). Popsáno rovnicemi podle knihy pana Mastného, 2011:



Všechny látky jsou i při nabití rozpuštěny, což znamená že se také jedná o pravou průtočnou baterii. Energetická hustota baterie se pohybuje od 20 do 30 Wh/l (Mastný 2011).

Zn-Br

V zinko-brómové baterii je v průběhu nabíjení zinek pokovován na anodu a při vybíjení znovu rozpouštěn. Jedná se tedy o druh hybridní průtočné baterie. Hybridní průtočné baterie nejčastěji využívají zinek, díky němu mají velmi podobné principy fungování. Uvádím tedy nejznámější Zn-Br jako příklad.

Kapacita baterie závisí nejen na objemu elektrolytu ale také na plochách elektrod kvůli pokovování zinku. Elektrolyty jsou vodné roztoky bromidu zinečnatého, kladný elektrolyt navíc obsahuje organickou sloučeninu amin, jehož význam je zmíněn níže. Ve výměníku je používán mikroporézní separátor (polyolefin) kvůli průchodu jak aniontů, tak kationtů.

Elektrody jsou vyrobeny z uhlíkového plastu a jsou využívány bipolárně. Stejně jako separátor odděluje dva elektrolyty, tak zde jsou elektrolyty navíc odděleny elektrodami. Při nabíjení je zinek pokovován na zápornou stranu elektrody a molekuly brómu vytvářeny na kladné straně elektrody. Separátor umožňuje průchod iontů, zamezuje však průchodu elementárního brómu do negativního elektrolytu, což by mělo za následek samovybíjení baterie. (Akhil aj. 2013).

Pro lepší pochopení uvádím chemický průběh nabíjení podle pana Mastného 2011:

V obou elektrolytech:



V katolytu:

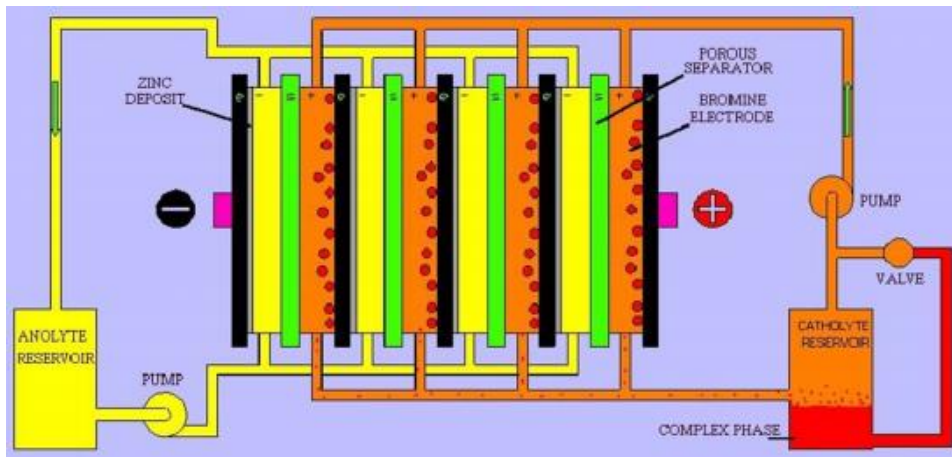


V anolytu:



kde (aq) značí vodný roztok a (s) pevnou látku.

Pro rozložení nebo vytvoření sloučeniny ZnBr_2 jsou potřeba dva elektrony. Tím má tato baterie vyšší energetickou hustotu než předešlé uvedené průtočné baterie, pohybuje se v rozmezí 60-90 Wh/l (Mastný 2011). Kvůli vysokému napětí článku a vysoce reaktivnímu brómu je zapotřebí materiálů elektrod a separátorů velmi odolných, tím se technologie prodražuje. Bróm je toxický, je nutno dbát na minimální úniky z baterie. Vzhledem k velmi malé rozpustnosti brómu ve vodě, je do kladného elektrolytu přidán amin, na který se bróm váže a vyvábí se bróm-aminový komplex, olej, který je odčerpán do nádrží (viz obr. 17). Baterie se konstruuje s aktivním chlazením, aby si bróm-aminový komplex udržel stabilitu i při teplotách vyšších než 35 °C (ESA nedatováno).



Obr. 15: Princip Zn-Br průtočné baterie (Akhil aj. 2013)

5. Chemická akumulace

5.1. Vodík

5.1.1. Akumulace

Vodík je možno vyrábět různými způsoby. Zatím nejrozšířenější je výroba z fosilních paliv, kde se účinnost pohybuje od 35 do 80 %. Hlavní nevýhodou takovéto výroby jsou vysoké emise z rozložených uhlovodíků, které mají zásadní dopad na životní prostředí. Druhým způsobem je výroba elektrolýzou vody. Tento postup patří mezi nejúčinnější. Klasická elektrolýza může dosáhnout účinnosti až 90 %, vysokoteplotní elektrolýza, kdy je část energie dodávána v podobě tepla, může účinnost narůst až na 95 %. Vzhledem k tomu, že dnes je stále většina elektrické energie vyráběna uhelnými a jadernými elektrárnami, jejichž účinnost je v průměru 40 %, je účinnost výroby vodíku maximálně okolo 50 %. V současnosti se takto vyrábí přibližně 4 % vodíku. Tento vodík většinou není hlavní surovinou, ale vzniká jako vedlejší produkt při výrobě hydroxidu sodného nebo draselného (Tkáč a Stehlík 2017). Účinnost celého procesu akumulace energie a následně uvolnění energie pomocí palivového článku (viz níže) se pohybuje okolo 20-40 % (EASE nedatováno).

Ve spojení s obnovitelnými zdroji je logické využití akumulace pomocí elektrolýzy. Přímou výrobu vodíku pomocí elektrolýzy lze provádět různými způsoby, které se dělí na nízkoteplotní a vysokoteplotní, nebo podle iontu přenášejícího náboj na kyselou (H^+), alkalickou (OH^-) a vysokoteplotní, kde náboj přenáší ionty O^{2-} (Tkáč a Stehlík 2017).

Kyselá elektrolýza

Nejčastěji se využívá tzv. PEM elektrolýza, která využívá proton propustnou membránu (Proton Exchange Membrane). Systémem protéká čistá voda, není tedy potřeba dalších speciálních nároků na materiály. Výkon výrobníku je možno plně regulovat. Nevýhodou je vysoká cena technologie, zvláště kvůli platinovému katalyzátoru (Tkáč a Stehlík 2017). Cena PEM elektrolýzérů se pohybuje od 1100-1800 dolarů/kW (Patel 2019).

Alkalická elektrolýza

Nejběžněji používaná technologie elektrolýzy vody s výkonem jednoho modulu až několik MW. Jako elektrolyt se využívá KOH s koncentrací 25-30 % hmotnosti při teplotě 90°C. Tento postup je nevýhodný zejména kvůli nižší účinnosti a malou flexibilitou, což je do budoucna požadováno ve spojení s obnovitelnými zdroji energie (Tkáč a Stehlík 2017). Cena alkalických elektrolýzérů je v rozmezí 500-1400 dolarů/kW (Patel 2019).

Vysokoteplotní elektrolýza

Tato elektrolýza je provozována při teplotách od 700 do 900°C. Díky tomu není potřeba používat platinové katalyzátory. Voda v podobě páry je přiváděna k porézní katodě a porézní anodě vyrobené z kompozitního materiálu zvaného cermet (keramika-kov), zde konkrétně spojení keramiky s niklem, odděleného iontově vodivým elektrolytem z tuhých oxidů. Vzniklý vodík prochází společně se zbytkem páry porézní katodou. Kyslíkový iont prochází přes iontově vodivý elektrolyt k anodě, kde vzniká kyslík a odchází přes póry anody. Do budoucna se plánuje spojení těchto elektrolytických článků se zdroji vysokopotenciálního tepla - např. reaktory 4. generace (HTGR), které jsou schopny pracovat při

teplotách 900°C (Tkáč a Stehlík 2017). Cena elektrolyzérů s tuhými oxidy začíná na 2800 dolarech/kW a může dosáhnout i 5600 dolarů/kW (Patel 2019).

Zatímco kyslík je uvolněn do okolního vzduchu, vodík může být skladován různými způsoby. Vodík lze skladovat stlačený v tlakových nádobách, v solných kavernách, v nanotrubicích nebo vytvořením kovových hydridů. Uskladněním v kavernách je možno akumulovat až 100 GWh energie. Díky tomu lze vyrovnávat delší časové úseky výroby, zejména pak výroby z obnovitelných zdrojů. Teoreticky by bylo možné vyrovnávat spotřebu a výrobu v řádu měsíců (ESA nedatováno).

Pro zpětné uvolnění energie vodík reaguje s kyslíkem, uvolňuje energii a vzniká voda. Takovéto uvolnění může probíhat v různých formách: spalování přeměněného vodíku na syntetický zemní plyn v plynové turbíně, spalováním amoniaku nebo methanolu v motoru nebo použitím čistého vodíku v palivových článcích (EASE nedatováno). Použití čistého vodíku v palivových článcích probíhá s účinností maximálně 60 %. Výhodou akumulace rozkladem vody je relativně nízká cena, která se pohybuje okolo 10 Eur/kWh a vysoká hustota energie, která u čistého uskladněného vodíku může dosáhnout až 2500 kWh/m³ (EASE nedatováno).

5.1.2. Palivový článek

Palivový článek funguje na principu slučování molekul vodíku ze zásobníku a kyslíku ze vzduchu, přičemž produkuje teplo, elektřinu a vodu, dokud je palivo (vodík a kyslík) dostupné. Palivový článek obsahuje dvě elektrody, mezi kterými je elektrolyt. K anodě je přiváděn vodík a ke katodě kyslík. Na anodě se nachází katalyzátor, který umožní rozštěpení atomu vodíku na elektron a proton (H⁺). Proton prochází elektrolytem ke katodě, kde se společně s elektronem přicházejícím z vnějšího obvodu katodou podílí na vzniku vody a tepla. Jeden článek poskytuje napětí 0,6-0,8 V. Větší napětí je možno dosáhnout složením článků do série pomocí kovové kostry (Buchmann 2021).

PEMFC

Základem funkčnosti článku PEMFC (PEM Fuel Cell) je membrána propouštějící pouze protony (angl. Proton Exchange Membrane - PEM). Na ni jsou z obou stran přidány vrstvy katalyzátoru, platiny, která na anodové straně umožňuje rozložení molekul vodíku a na katodové straně sloučení vodíku s kyslíkem. Tento katalyzátor je spojen s ionomerem, polymerem, umožňujícím průchod iontů, aby byl umožněn průchod protonů na kladnou stranu článku. Na vrstvách katalyzátorů jsou tenké vrstvy uhlíku, jehož vlákna jsou obaleny polytetrafluorethylenem (PTFE neboli teflon). Teflon je hydrofobní, póry uhlíku jsou stále otevřené a umožňují tak dodávku vodíku ke katalyzátorům a odvod vody na druhé straně článku (EERE nedatováno). Článek funguje při teplotě 80°C, což dovoluje rychlé nastartování, s účinností 50 % (oproti účinnosti spalovacího motoru 30 %). Nevýhodou je pořizovací cena zejména PEM, která se pohybuje mezi 800 až 100 dolary na m². Článek vyžaduje vodík o velmi vysoké čistotě, aby nedošlo k ucpaní membrány, a přesnou dodávku vody, kdy je článek nastartovaný, ale ne zaplavený. Poškození článku může způsobit také mráz i vysoké teploty. Nejčastější použití a také plánované využití do budoucna je v elektromobilitě. Životnost tohoto článku je cca 2000-4000 hodin při jízdách na krátkou vzdálenost, při nepřetržitém provozu článku je životnost až 40 000 hodin (Buchmann 2021).

AFC

Alkalický palivový článek (Alcaline Fuel Cell) má perspektivní využití v oblasti letectví a kosmonautiky. Cena tohoto článku je mnohem nižší než cena článku využívajícího PEM. Separátor používaný v alkalickém článku je totožný s membránou olovených baterií, cena se pohybuje okolo 5 dolarů/m². Alkalický článek je větší než PEMFC a potřebuje jak čistý vodík, tak i čistý kyslík. Výhodou je jednoduchá regulace vody, kterou lze provádět bez čerpadel. Účinnost se pohybuje okolo 60 % (Buchmann 2021). Jako elektrolyt se zde používá vodný roztok KOH. Články se mohou poškodit působením CO₂, proto je jejich použití velmi omezené a výzkum je směřován k větší odolnosti vůči oxidu uhličitému (EERE nedatováno).

PAFC

Palivové články využívající kyselinu fosforečnou jako elektrolyt (Phosphoric Acid Fuel Cell) a porézní uhlíkové elektrody s platinou jako katalyzátorem jsou nazývány první generací moderních palivových článků. Obvykle se využívá v nehybných zdrojích, dříve byl využíván v elektromobilitě pro velká vozidla. Tyto články dokáží fungovat i při mírném znečištění vodíku oxidem uhelnatým na rozdíl od PEMFC. Pokud je PAFC použit čistě pro výrobu elektřiny, jeho účinnost dosahuje okolo 40 %. Pokud je navíc využíván jako tepelný zdroj, účinnost se zvýší až na 85 %. Při stejném objemu jsou méně výkonné než PAMFC a navíc potřebují více platiny, což se negativně projevuje na ceně (EERE nedatováno).

MCFC

Molten Carbonate Fuel Cell neboli palivový článek s roztavenými uhličitany jako elektrolytem pracuje při vysoké teplotě okolo 650°C. Díky tomu nemusí být jako katalyzátor použity drahé kovy. Další výhodou vysoké teploty je možnost článku fungovat nejen s čistým vodíkem, ale i s lehkými uhlovodíky jako například zemní plyn nebo bioplyn. Methan v nich obsažený se uvnitř článku vlivem teploty rozloží na vodík procesem zvaným vnitřní reformování. Článek může dosahovat účinnosti 60 % a při využití zbytkového tepla přes 85 % (EERE nedatováno).

SOFC

Palivové články s tuhými oxidy (Solid Oxid Fuel Cell) se vyznačují vyšší teplotou jádra než MCFC. Jejich pracovní teplota je od 800 do 1000°C. Výzkum materiálů ale dokázal snížit teplotu na 500-600°C, což článku dovoluje použít místo drahé keramiky levnější nerezovou ocel. Stejně jako MCFC dokáže tento článek sám zpracovávat lehké uhlovodíky (Buchmann 2021). Články s teplotou 800-1000°C dokáží také zpracovávat plyny vytvořené z uhlí, které obsahují síru, jiné články by se tím zničily. Nevýhody takto vysoké teploty je pomalý start, nutná odolnost materiálů nebo kvalitní tepelná izolace. Článek při výrobě elektřiny dosahuje účinnosti 60 %, při využití zbytkového tepla např. v turbínách lze dosáhnout 85% účinnosti (EERE nedatováno).

DMFC

Přímá reakce methanolu je podstata nově vyvíjených článků (Direct Methanol Fuel Cell). Článek dokáže rozložit velmi čistý methanol (99,5%) na vodík a využít ho k výrobě elektřiny. Článek lze doplnit buď přímým vstříknutím methanolu do zásobníku nebo výměnou zásobníku. Prototypy článků pracují s výkonem 20 až 100 W pro notebooky a podobná zařízení s podobnou hustotou energie jako NiCd baterie. Životnost takového článku je nízká, cca 5000 hodin přerušovaného chodu 8 hodin denně.

Výhodou využití methanolu namísto čistého vodíku je snazší manipulace a absence jakýchkoliv čerpadel a ventilátorů. Účinnost takového článku se pohybuje okolo 20 % (Buchmann 2021).

RFC

Reverzibilní nebo regenerativní palivové články (Reversible Fuel Cell) fungují při výrobě elektřiny stejně jako ostatní články. Liší se ale v možnosti obrácení směru toku energie, dokáží pomocí elektrolýzy rozdělovat vodu na kyslík a vodík. Díky tomu je možno kompenzovat nejen nedostatky výkonu v síti, ale i přebytky jedním zařízením, což je velmi výhodná vlastnost ve spojení s obnovitelnými zdroji energie. Prozatím jsou vyvinuty 2 technologie – reverzibilní PEM články a reverzibilní články s tuhými oxidy. PEM články mohou pracovat také jako nízkoteplotní elektrolyzéry, SOFC dokáží pracovat jako vysokoteplotní elektrolyzéry (SOEC) (EERE nedatováno).

5.1.3. Power to Gas

Power to Methan

Tato akumulace elektrické energie je perspektivní ve směru elektromobility, methan pro spalovací motory se označuje názvem CNG, akumulace v rámci ročních období nebo nahrazení používaného zemního plynu v plynovodech syntetickým zemním plynem. Vodík produkovaný elektrolýzou vody a oxid uhličitý ze vzduchu nebo zachycený ze spalin kotlů jsou sloučeny a přeměněny na metan reakcí zvanou methanizace:



S využitím zbytkového tepla po reakci, použitím vhodného tlaku a teploty, je možno dosáhnout účinnosti okolo 50 % a methanu o objemové čistotě až 95 % (Technologie Power-to-Gas (P2G) nedatováno). Touto technologií lze akumulovat až několik GWh a životnost je při nepřetržitém provozu okolo 30 let (EASE nedatováno). Účinnost cyklu přeměny elektrické energie na methan a zpět je 28 % (ISPT 2017).

Power to Ammonia

Akumulace elektrické energie do amoniaku se omezuje na využití jen jako palivo v elektrárnách, které spalují zemní plyn. Výroba amoniaku probíhá nejprve elektrolýzou vody, při které vzniká vodík. Jednotka pro separaci vzduchu odebere ze vzduchu dusík. Pro syntézu vodíku s dusíkem je používán Harber Bosch reaktor, ve kterém plyny reagují a vzniká NH_3 . Účinnost akumulace do amoniaku je 50-55 % (EASE nedatováno), účinnost včetně zpětné přeměny na elektrickou energii se pohybuje mezi 30-39 % (ISPT 2017).

Power to Methanol

Metoda výroby methanolu má stejný základ jako výroba methanu. Vodík vzniklý elektrolýzou se slučuje v katalyckém reaktoru s oxidem uhličitým separovaným ze vzduchu nebo ze spalin a vzniká methanol. Pomocí destilace je dosaženo vyšší čistoty. Pro destilaci je využito ztrátové teplo z elektrolyzérova a díky tomu je dosaženo účinnosti až 55 %. Methanol může být buď využit v budoucnu jako palivo do palivových článků nebo přeměněn dále na syntetický benzín. Ten je následně frakční destilací oddělen od ropného plynu, tudíž produkty jsou dva – syntetický benzín a syntetický LPG (Liquid Petrol Gas).

Proces přeměny methanolu na benzin a LPG probíhá s účinností dosahující 93 %. Účinnost celkové přeměny elektrické energie na syntetický benzin nebo LPG se pohybuje okolo 50 % (EASE nedatováno).

6. Tepelná akumulace energie

6.1. Akumulace citelného tepla

Jedná se o nejjednodušší metodu akumulace tepla založenou na ohřívání kapaliny nebo pevné látky bez změny skupenství. Z anglického Sensible Heat Storage je využívána zkratka SHS. Nejčastěji se využívá vody, písku, kamenů nebo roztavených solí. Výhoda takového akumulace je nízká cena, jednoduchost systému a absence nebezpečných látek. Množství uloženého tepla závisí na hmotnosti akumulčního média a jeho měrné tepelné kapacitě (Sabru a Sebarchievici 2018):

$$Q = \int_{t_1}^{t_2} mc_p dt = mc_p(t_2 - t_1) \quad (6.1)$$

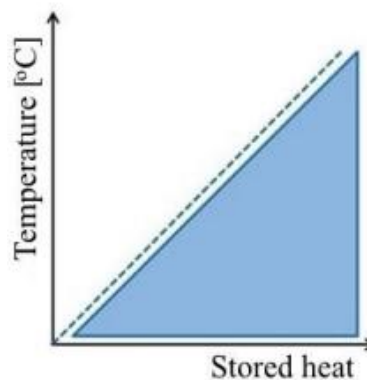
kde

Q je uskladněné teplo (J)

m je hmotnost akumulčního média (kg)

c_p je měrná tepelná kapacita (J/kg·K)

t_1 a t_2 je počáteční a koncová teplota (°C)



Obr. 16: Závislost teploty na uloženém teple systému SHS (Sabru a Sebarchievici 2018)

Voda

Nejpoužívanější látka pro tepelnou akumulaci citelného tepla je voda díky její nízké ceně a vysoké tepelné kapacitě. Voda je umístěna v nádrži v tepelné izolaci a zahřívána. Ohřívání je prováděno elektricky (z obnovitelných zdrojů nebo ze sítě), nebo spalováním např. plynu, dřeva nebo podobných materiálů (kogenerace v tepelných elektrárnách). Je ohřívána na teplotu mezi 55 až 65°C pro vytápění budov, voda pro zdravotnické využití na teplotu 60 až 70°C z důvodu zamezení výskytu bakterií. Vzhledem k omezeným možnostem výroby velkých tepelně izolovaných nádrží je také omezena kapacita akumulace, která u největších zařízení dosahuje maximálně 320 kWh. Výhodou je neomezená

životnost. Při dostatku výkonu lze systém aktivovat během několika sekund. Cena se pohybuje okolo 15 Eur/kWh. (EASE nedatováno). Tuto akumulaci je možno využít také pro přehřívání kondenzované vody v tepelných elektrárnách. Tato metoda je nazývána Ruths (Mastný aj. 2011).

Podzemní skladování

Médium pro přenos tepla je trubkami přivedeno hluboko pod zem, kde ohřívá horniny. Teplo z nich lze stejným způsobem odčerpát. Nejvíce využíváné je odčerpání tepla v zimě a následné klimatizování budov v letních měsících. Lze využívat jak vodu, tak vzduch (Sabru a Sebarčievici 2018).

6.2. Akumulace latentního tepla

Latent Heat Storage nebo také Phase Change Storage (LHS nebo PHS) je akumulace tepla neprobíhající za stálého skupenství, ale i při jeho změně z pevného na kapalné. Při přeměně skupenství je akumulováno teplo, ale teplota nestoupá (izotermický děj). Tím je dosaženo vyšší hustoty energie a menších rozměrů akumulátoru. Pro studenou akumulaci se využívá voda (led), pro střední teploty solné hydráty nebo různé polymery a pro vysokoteplotní akumulaci roztavené soli, kovové slitiny a vosky. (Sabru a Sebarčievici 2018). Celková tepelná kapacita se vypočte podobně jako u akumulace citelného tepla, je ale nutné připočítat skupenské teplo potřebné ke změně skupenství:

$$Q = \int_{t_1}^{t_t} mc_{pp} dt + ml_t + \int_{t_t}^{t_2} mc_{pk} dt \quad (6.2)$$

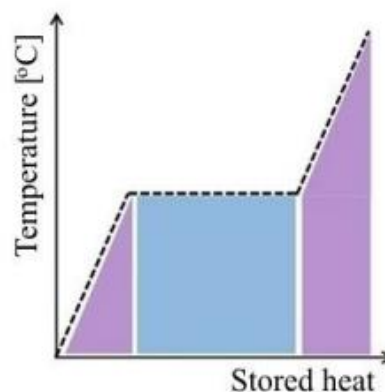
kde

t_t je teplota tání (°C)

c_{pp} je měrná tepelná kapacita pevného skupenství (J/kg·K)

c_{pk} je měrná tepelná kapacita kapalného skupenství (J/kg·K)

l_t je měrné skupenské teplo (J/kg)



Obr. 17: Závislost teploty na uloženém teple systému LHS

6.3. Chemická akumulace tepla

Chemická akumulace má označení TCS, neboli Thermo Chemical Storage. Tato technologie pracuje na principu endotermických a exotermických reakcí nejčastěji pomocí adsorpce. Adsorpce je jev nahromadění jedné látky (adsorbát) na povrchu druhé látky (adsorbent). Adsorpce je jev exotermický, uvolňuje tepelnou energii, oddělení látek od sebe je naopak proces endotermický, kdy musí být teplo dodáváno. Jako adsorbát se nejčastěji využívá vodní pára, adsorbent je buď písek (zeolit), kde je možno dosáhnout energetické hustoty 180 kWh/m^3 nebo silikagel, který se vyznačuje energetickou hustotou až 220 kWh/m^3 . Systém může fungovat dvěma způsoby – otevřený nebo uzavřený cyklus (EASE nedatováno).

Uzavřený cyklus

Voda je navázána na adsorbentu, ve kterém jsou umístěny výměníky tepla. Pro nabití je do adsorbentu výměníky dodáváno teplo a uvolňuje se vodní pára, která odchází do kondenzátoru, kde kondenzuje a uskladňuje se v nádrži. Pro vybití je nízkoteplotním zdrojem voda vypařována ve výparníku a přivedena k adsorbentu, který ji na sebe váže a tím se uvolňuje teplo. To je odvedeno tepelným výměníkem ven do zátěže (EASE nedatováno).

Otevřený cyklus

Pro nabití je přes adsorbent protlačován ohřátý vzduch z okolí a ze zařízení vystupuje vlhký vzduch. Při uvolňování energie je naopak do adsorbentu přiváděn vlhký vzduch, který opouští adsorbent přes tepelný výměník, kde předává tepelnou energii a ze zařízení vystupuje suchý vzduch. Výhoda tohoto systému je možnost fungování při atmosférickém tlaku a menší počet součástí. Nevýhodou je nutnost skladování vlhkého vzduchu (EASE nedatováno).

7. Elektrická akumulace energie

7.1. Superkapacitory

Superkapacitory, někdy pojmenovávány jako ultrakapacitory nebo dvouvrstvé kapacitory, se vyznačují, jak je možné z názvu odvodit, svou velkou kapacitou v jednotkách Farradů na rozdíl od běžných kapacitorů s hodnotami maximálně tisícin Farradů (Buchmann 2020). Kondenzátor se skládá z organického elektrolytu mezi elektrodami z uhlíku. Elektrody jsou odděleny separátorem. Přiložením napětí na svorky kapacitoru se kationty elektrolytu přemisťují k negativní elektrodě a anionty k pozitivní elektrodě. Tímto se vytvoří tzv. Hemholtzovy vrstvy. Na rozdíl od baterií se zde využívá jen elektrostatických vlivů k uložení energie (EASE nedatováno). Rovnice pro její výpočet:

$$E = \frac{1}{2} CU^2 \quad (7.1)$$

kde C je kapacita kapacitoru

U je napětí na svorkách kapacitoru

Maximální napětí mezi elektrodami je dáno použitým elektrolytem a separátorem. Při použití vodného elektrolytu se maximální napětí pohybuje kolem 0,9 V, při použití organického elektrolytu lze nabíjet na napětí až 2,7 V. Vyšší napětí snižuje životnost kapacitoru, která je okolo 1 milionu vybíjecích cyklů. Energetická hustota superkapacitorů se pohybuje okolo 4 kWh/kg až 8 Wh/kg, což je až 40 krát méně než Li-ion baterie. Velkou nevýhodou je vybíjecí křivka. Klasické baterie se vyznačují plochou křivkou. Před dosažením kritického napětí dokáží při konstantním proudu dodávat až 95 % výkonu plně nabitě baterie. Kapacitory mají prudkou lineárně klesající křivku. V okamžiku těsně před vypnutím ochranami je schopen kapacitor dodávat maximálně 45 % výkonu plně nabitěho kapacitoru. K optimalizaci jsou využívány DC/DC konvertory, které s klesajícím napětím odebírají více proudu. To ale zvyšuje cenu a ztráty. Naopak výhodou je absence ochran přebíjení. Pokud je kapacitor plně nabit na svoje napětí, klesne dodávaný proud na nulu. Nabíjení superkapacitoru probíhá během 1-10 sekund. Účinnost zařízení je velmi vysoká, dosahuje více než 95 %. Kapacitory trpí samovybíjením, které za 30 dní může být až 40 % kapacity (Buchmann 2020). Cena se pohybuje od 10 000 do 20 000 Eur/kWh (EASE nedatováno). Superkapacitory, jak již bylo zmíněno, mají nízkou hustotu energie, ultrakapacitory se svou energetickou hustotou blíží hustotě Li-ion baterií. Kapacitory nachází uplatnění v aplikacích, kde nabíjecí a vybíjecí čas nepřesahuje 1 minutu a je potřeba akumulovat nebo uvolnit během krátké doby velký výkon při minimálních ztrátách (Buchmann 2020) například ve spojení se startovacími bateriemi lokomotiv, kde je kapacitor nabit z baterie malým proudem a pak lokomotiva nastartována velkým výkonem z kondenzátorů.

7.2. Akumulace do pole cívky

Tato technologie využívá supravodivosti, kdy je do cívky přiveden proud, který v ní prochází dlouhou dobu téměř beze ztrát. Technologie je označována zkratkou SMES (Superconducting Magnetic Energy Storage). Spolu se superkapacitory se jedná se o technologii, která akumuluje elektrickou energii, aniž by ji měnila na mechanickou nebo chemickou. Díky tomu dosahuje účinnosti vyšší než 95 %. Energie se ukládá do elektromagnetického pole cívky. Lze využívat klasické supravodiče, které musejí být chlazeny tekutým heliem (přibližně 4 K) nebo vysokoteplotní supravodiče schopné dosáhnout supravodivosti při

40 K a využívat tekutý vodík. Vyšší teplota zvyšuje cenu zařízení, na druhou stranu se snižují kryogenní ztráty. SMES je možno využívat k vyrovnávání frekvenčních změn sítě, stabilizaci sítě nebo pro začlenění obnovitelných zdrojů do výroby (Sander aj. 2012). Energii pole cívky lze vypočítat:

$$E = \frac{1}{2}LI^2 \quad (7.2)$$

kde L je indukčnost cívky

I je proud cívkou

V provozu je několik zařízení s kapacitou až 20 MWh (Wagner 2018). Komerční využití tuto technologii zatím čeká.

8. Porovnání akumulačních technologií

Technologie	Energetická hustota (Wh/l)	Výkon (MW)	Životnost (tisíc cyklů)	Samovybíjení (%/měsíc)	Účinnost (%)	Reakční čas	Cena (Eur/kWh)
Mechanická akumulace							
PVE	0,5-3	0,5-1,5	-	-	70-85	min	40-150
Setrvačnick	20-80	0,001-20	20-100	30-100	98	<s	90
Stlačený vzduch	2-6	několik 100	-	-	40-80	min	50-150
Zkapalněný vzduch	32-230	0,005-650	22-30	-	50	5 min	60-600
Přečerpávání tepla	0,03-0,06	0,1-200	>15	*	70-75	ms-s	20
Baterie							
Olověné kyselinové	80	0,001-100	5	3	75-85	ms	100-200
Lithiové	260-500	0,001-50	2-10	3-9	90-98	ms	700-1300
Sodíkové	150-300	0,2-50	>4,5	1,5-100	80	ms	300-450
Niklové	60-220	0,001-několik	1-5	*	60-70	ms	400-1500
Kov-vzduch	700-1500	několik	*	*	75	ms	160
Průtočné baterie							
Vanadové	10-25	<3	12	6	60-85	ms	100-400
Zinko-bromidové	60-90	<1	2				
Železo-chromové	<10	0,005-několik	*				
Polysulfidové Brómové	20-30	<15	*				
Chemická akumulace							
Vodík	30-2550	0,001-1000	-	0-100	20-40	s-min	1-10
Elektromagnetická							
SMES	*	až 20	-	*	>95	*	*
Superkondenzátory	*	několik	1000	20-40	>90	5 ms	10000-20000
Tepelná							
SHS, LHS, TCS	80-220	Až 400	-	*	50-95	Několik s	0,1-100

Obr. 18: Porovnání akumulačních technologií (podle dat ze zdrojů využitých v textu)

znaky v tabulce:

* údaj nenalezen

- životnost teoreticky neomezená/samovybíjení zanedbatelné nebo nulové

9. Realizované technologie

9.1. V České republice

PVE

V Česku jsou v provozu 3 přečerpávací elektrárny: Štěchovice II, Dalešice a Dlouhé stráně. Největší vzhledem k objemu vody jsou Dalešice se 127 mil. m³ vody a výkonem 480 MW dimenzovaným pro nahrazení jednoho bloku Dukovanské jaderné elektrárny při výpadku. Největší výškový rozdíl i výkon mají Dlouhé stráně – 534,3 m, 650 MW. Všechny uvedené PVE využívají Francisovy turbíny, které je možno provozovat i v čerpadlovém režimu (Vobořil 2017).

Baterie

Na našem území nalezneme 5 bateriových úložišť v provozu. Všechny využívají Li-ion baterie a napomáhají frekvenční stabilizaci. Jedná se o úložiště v obci Mydlovary (1 MW, 2 MWh, spuštěno v roce 2018), Prakšice (1 MW, 1,2 MWh, spuštěno v roce 2017) a Planá nad Lužnicí (4 MW, 2,5 MWh spuštěno v roce 2019). Zatím poslední vystavěné úložiště se nachází v areálu elektrárny Tušimice (4 MW, 2,8 MWh) (Zilvar 2019). Dalším menší úložiště se nachází v Obořišti (1 MW, 1 MWh, spuštěno v roce 2018) a ve fázi projektu je bateriové úložiště s kapacitou 10 MWh, které se bude nacházet u obce Ochoz (Publications Office of the European Union 2020).

Nejvyužívanějšími bateriemi jsou olověné baterie. Používají se jako startovací baterie dopravních prostředků, trakční baterie malých dopravních prostředků, jako záložní zdroje pro budovy s nutností nepřerušované dodávky elektrické energie (UPS) nebo úložiště energie z fotovoltaických a větrných elektráren. Zajímavou aplikací olověných baterií jsou bateriové posilovací stanice pro MHD. Jedna taková se nachází v Plzni a napomáhá vykrývat napájecí špičky v koncovém úseku trolejbusové trati vzdálenějším od měřírny. Trvání projektu je od dubna 2019 do března 2022. Po skončení se výsledky měření vyčíslí a úložiště bude přesunuto nebo pořízeno další (zdkre 2020).

9.2. Ve světě

PVE

Stejně jako v Česku je přečerpávací elektrárna zatím nejvyužívanější způsob akumulace elektrické energie vzhledem k výkonům a kapacitám se kterými se v energetice pracuje. Největší na světě se nachází ve Spojených Státech Amerických: The Bath Country Pumped Storage Station s výkonem 3 GW rozložený mezi šest 500 MW turbín a celkovou kapacitou 24 GWh. Stavba byla dokončena v roce 1985 s výkonem 2,1 GW a mezi roky 2004 a 2009 byly turbíny vyměněny na již zmíněné 500 MW (Pumping power: pumped storage stations around the world 2020).

Setrvačníky

Ve světě ale můžeme najít několik míst pro akumulaci elektrické energie pomocí setrvačnicků z nichž největší se nachází poblíž města Stephentown v USA. Tato setrvačnicková farma je v blízkosti New Yorku a přispívá ke stabilizaci frekvence zdejší sítě celkovým výkonem je 20 MW. Farma je tvořena setrvačníky o výkonu 2 kW s kapacitou 6 kWh (Wagner 2018).

Stlačený vzduch

Vzhledem k tomu, že je tato technologie v porovnání s jinými způsoby akumulace v celku cenově dostupná, ve světě můžeme najít pouze dvě místa kde se této technologie využívá. Jedná se o město Huntorf v Německu a McIntosh v Alabamě v USA. U obou projektů se setkáme s technologií CAES, tudíž

bez jakéhokoliv skladování tepla. Akumulátor ve městě Huntorf z roku 1978 dokáže dodávat výkon 290 MW po dvě hodiny. Kaverna je umístěna 600 m pod povrchem a má objem 310000 m³. Čerpání je provozováno kompresory o celkovém výkonu 60 MW a vzduch je stlačován na 10 MPa. Zařízení ve městě McIntosh dokončené roku 1991 skladuje vzduch při tlaku 7,5 MPa v kaverně o velikosti 500000 m³ 450 m pod povrchem. Zdejší zařízení sice neuskładňuje teplo ze stlačování vzduchu, ale obsahuje rekuperátory, které jsou na výstupu turbíny a společně s plynovými hořáky pomáhají ohřívat plyn, aby jej bylo možné expandovat (Chen aj. 2013).

Zkapalněný vzduch

Zatím žádné komerční využití této technologie není. Existuje jen testovací zařízení u města Bury v blízkosti Manchesteru. Prozatím je provozováno s výkonem 5 MW a je plánováno rozšířit poskytnutelný výkon až na 100 MW (Wagner 2018).

Přečerpávání tepla

PHES technologie je zatím ve výzkumu, jedno testovací zařízení dokončené v roce 2019 je na Newcastle University. Zřízení pracuje s výkonem 150 kW a dokáže uskladnit 600 kWh elektrické energie s účinností 60-65 %. Zdejší technologie je schopna přejít z vybíjení na nabíjení během několika ms oproti dřívějším pokusům, které se pohybovali v řádu sekund. (Off Grid Energy Independence 2019).

Olovené baterie

Olovené baterie mají ve světě stejné využití jako v České republice. V energetice se pro skladování velkých objemů energií nevyužívají, jejich možnosti jsou zde překonány Li-ion a jinými bateriemi.

Lithiové baterie

Lithiové baterie mají nejslibnější budoucnost nejen pro akumulaci menších objemů energie. Zatím největší bateriové úložiště vytvořené z bateriových kontejnerů dnes může dosahovat až 1200 MWh s výkonem 300 MW. Toto úložiště se nachází v Kalifornii. Bylo spuštěno v prosinci roku 2020 a právě díky skládání dalších akumulačních bloků se postupně navyšuje kapacita a výkon. V srpnu letošního roku by kapacita měla být o 400 MWh a výkon o 100 MW větší než při zahájení provozu (Colthorpe 2021).

Sodíkové baterie

Sodík uvnitř baterie se nachází v tekutém stavu, obsah baterie tudíž musí být zahříván. To předurčuje tuto baterii k použití v oblastech s vysokou teplotou, poněvadž nepotřebují žádné chlazení. Jedno NaS bateriové úložiště je v provozu ve Spojených Arabských Emirátech s výkonem 108 MW a kapacitou 648 MWh. Je složeno z deseti baterií postavených na různých místech, ale spojených a řízených jako jedna (Rathi 2019).

Niklové baterie

Díky své odolnosti vůči nízkým teplotám, je realizováno úložiště a Alijašce ve Fairbanks, kde teploty mohou dosahovat až -50°C. Úložiště bylo spuštěno v roce 2010, dokáže po dobu 15 minut dodávat výkon 27 MW, díky čemuž se lze vyhnout výpadkům sítě, které jsou v této oblasti časté. Zařízení obsahuje 4 bateriové bloky, ale může být rozšířeno o dva bloky a dodávaný výkon na 15 minut se zvýší na 40 MW (Dvorak 2011).

Metal-air

Zatím není baterie komerčně využívána, její použití je plánováno v elektromobilitě, použití jako akumulační prvek do sítí pro frekvenční vyrovnávání a akumulaci z obnovitelných zdrojů (EASE nedatováno). Tyto baterie budou bez škodlivých látek, velmi levné, plně recyklovatelné a s vysokou energetickou hustotou. To je předurčuje k mnoha aplikacím jako je elektromobilita nebo úložiště energie z obnovitelných zdrojů (Anon 2016).

Průtočné baterie

Komerčně využívané úložiště s využitím průtočných baterií v provozu zatím není. Existují jen experimentální zařízení. Nejbližší uvedení do provozu je však Čína, kde je ve výstavbě bateriové úložiště na s vanadovými elektrolyty poblíž města Ta-lien s plánovanou kapacitou 800 MWh a výkonem 200 MW a bude sloužit především pro akumulaci elektrické energie z velkého množství okolních větrných elektráren (Wagner 2018).

Vodík

Přestože je dnes vodík velmi diskutované téma, jeho využití k akumulaci elektrické energie je minimální. Prozatím je omezeno na několik typů automobilů využívajících palivové články. Největším projektem do budoucna je solární elektrárna nedaleko přístavu v Corpus Christi v USA s výkonem 210 MW připojená na baterie s výkonem 260 MW s kapacitou 840 MWh, které následně budou napojeny na elektrolyzéry. Plánovaná výroba vodíku je 9000 MT ročně, která by se postupem času měla zvyšovat, jak se budou vyvíjet technologie elektrolyzérů a výkon FVE. Dalším zajímavým projektem je akumulace z větrných farem v Chile s výkonem 3,4 MW. Generovaná elektřina bude přiváděna do PEM elektrolyzérů, vodík bude následně společně s oxidem uhličitým přeměněn na syntetický methanol nebo benzín. Tento projekt je společným projektem Enel Green Power Chile, Siemens a Porsche, kteří si od něj slibují nový pohled na elektromobilitu (Matalucci 2021).

Superkapacitory

Superkapacitory se využívají v aplikacích, kde je potřeba akumulovat nebo uvolnit energii během krátké doby při minimálních ztrátách (Buchmann 2020). Jedním z využití je rychlonabíjecí stanice pro elektrická vozidla. Jednou ze zajímavých aplikací jsou rychlonabíjecí stanice pro elektroautobusy, které jsou využívány na autobusové lince v Ženevě od roku 2016. Autobusová linka obsahuje třináct zastávek, na které autobus s Li-ion bateriemi přijede a přes troleje se během 15-20 s dobije výkonem 600 kW ze superkapacitorů. Plné dobítí je pak zajištěno na konečné zastávce klasickou dobíjecí stanicí. Superkapacitory mohou být napojeny na síť nebo na fotovoltaickou elektrárnu, vzhledem k tomu, že autobusy jezdí jen přes den. Výhodou je možnost pomalého řízeného nabíjení a následně rychlého předání energie (Tweed 2016).

SMES

Bylo vytvořeno mnoho testovacích zařízení, několik zařízení je připojených k elektrizační soustavě a je testován jejich vliv na síť. Jedním z nich je SMES systém na Houstonské univerzitě v USA od firmy SuperPower o výkonu 20 kW s kapacitou 0,55 kWh. Podobné zařízení je umístěno ve městě Upper Wisconsin v USA od firmy American Transmission o výkonu 3 MW a kapacitou 0,83 kWh (Shaw nedatováno).

Tepelná akumulace

Využití tepelné akumulace se nejčastěji využívá ke zvýšení účinnosti akumulací ztrátového tepla a jeho následného využití k vytápění budov. Zajímavým projektem je ovšem švédský projekt Azelio. Tepelný akumulátor s materiálem měnícím skupenství (hliníková slitina) je zahřátý na 600 °C a pomocí Stirlingova motoru je tepelná energie přeměňována na elektrickou. Zřízení dokáže poskytovat 13 kW výkonu až 13 hodin a nabít se během 4-6 hodin. Akumulátor bude připojen k FVE, nebude však sloužit přímo k napájení zátěže, ale k vyvažování sítě (Colthorpe 2020).

10. Závěr

V úvodu práce jsem uvedl důvod akumulace v dnešní době i důvod akumulace v budoucnu. Navázal jsem výčtem technologií, které jsou pro akumulaci již využívané nebo jsou na slibné cestě pro začlenění do komerčního provozu. V závěru tohoto výčtu jsem vytvořil tabulku shrnující vzhledem k tématu práce stěžejní vlastnosti jednotlivých technologií. Díky tomu lze jednotlivé technologie porovnat a hrubě roztřídit pro použití s obnovitelnými zdroji elektrické energie následovně:

FVE mají v porovnání s větrnými elektrárnami kratší cykly, proto technologie pro akumulaci musí být schopné častějšího vybíjení a nabíjení a mít velmi malý reakční čas. Dodnes se pro akumulaci využívají olovené baterie, jak s tekutým elektrolytem, tak i gelové, které nepotřebují údržbu a jsou bezpečnější. Z důvodu větší kapacity při stejné velikosti se u malých zdrojů, zejména u rodinných domů, začínají využívat Li-ion baterie. Využití sice nacházejí i v akumulaci větších objemů energií, jejich širšímu využití však brání vysoká cena. Další možnou technologií jsou setrvačnické, které cílí spíše na velké výrobní kapacity. Slibnou budoucnost mají také průtočné baterie, které lákají nízkou cenou a v některých případech také nezávadností k životnímu prostředí.

Větrné elektrárny mají delší cyklus a pozvolnější nástup výroby, tudíž lze využívat technologií, které mají reakční čas v řádu několika sekund jako například stlačování vzduchu, zkapalňování vzduchu, akumulace energie do vodíku a uhlovodíků nebo dnes již klasické přečerpávací elektrárny.

Dalšími obnovitelnými zdroji jsou vodní elektrárny, které ale akumulaci nevyžadují a biomasa, kde spalování vytváří teplo, které můžeme na výstupu turbíny pomocí tepelné akumulace (např. do vody) akumulovat a využít při další výrobě biomasy.

Posledním kritériem pro porovnání akumulačních systémů zůstává dopad na životní prostředí. Každou technologii lze posuzovat podle závažnosti zásahu do krajiny nebo obsahu nebezpečných látek. Z hlediska zásahu do krajiny se jedná především o přečerpávací vodní elektrárny, kdy musí být vybudovány dvě vodní nádrže, které na velmi dlouhou dobu mohou změnit ráz krajiny. Z mého pohledu lze z hlediska zásahu do krajiny posuzovat také akumulaci tepla do zemské kůry. Žádné důsledky takovéto akumulace ale zatím nejsou pozorovány. Druhým hlediskem je obsah nebezpečných látek. S tímto problémem bojují především elektrochemické systémy. Olovo, jak již v textu bylo zmíněno, je nebezpečný kov a olovené baterie musí být recyklovány. Velkou pozornost má dnes lithium, ne kvůli vysoké reaktivitě a tím i nebezpečnosti při kontaktu s kůží, ale zejména ve smyslu jeho získávání. Jeho nutnost těžby narůstá a je vyžadováno mnoha strojů, které vypouštějí zplodiny do ovzduší a zároveň ničí krajinu tam, kde by bez potřeby akumulace pomocí lithiových baterií mohla krajina zůstat nepoškozena. Sodík v sodíkových v bateriích je žíravý a hořlavý, kadmium v niklových bateriích velmi toxické a nebezpečné pro životní prostředí. Baterie potřebují elektrolyt, který má obvykle nízké pH, únik z baterie je tedy nežádoucí. Většina průtočných baterií také obsahuje elektrolyty nebezpečné pro životní prostředí, jejich objem je mnohokrát větší a tím nebezpečí kontaminace půdy nebo vody narůstá. Vzhledem k těmto problémům jsou ve vývoji technologie s co nejnižším dopadem na životní prostředí. Z této práce lze vybrat Metal-Air baterie, průtočné ICB, technologie s využitím stlačování a zkapalňování vzduchu, akumulaci do vodíku a uhlovodíků nebo elektrické způsoby akumulace.

Na samém konci práce jsou představeny nejznámější nebo nejzajímavější aplikace z naší republiky i ze světa.

11. Literatura

- AKHIL, Abbas, HUFF, Georgianne, CURRIER, Aileen B. aj., 2013. *DOE/EPRI 2013 Electricity Storage Handbook in Collaboration with NRECA*. [online]. Albuquerque: Sandia National Laboratories [cit. 20.4.2021]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/sites/default/files/2013/08/f2/ElecStorageHndbk2013.pdf>
- ANDREWS, Dave, 2009. Active Power Article – Flywheel energy storage. In: *Claverton-energy.com* [online]. 21.6. [cit.4.4.2021]. Dostupné z: <https://claverton-energy.com/active-power-article-flywheel-energy-storage.html>
- ANDROSOV, Ashley, AMARNATH, Adithi, SCOTT, Michelle, HU, Ang, 2014. *Bromine-polysulfide Redox-flow Battery Design: Cost Analysis*. [online]. [cit. 26.4.2021]. Dostupné z: https://trace.tennessee.edu/cgi/viewcontent.cgi?article=2753&context=utk_chanhonoproj
- Anon., 2016. Metal-Air, a battery that breathes. *edf.fr* [online]. [cit. 15.5.2021]. Dostupné z: <https://www.edf.fr/en/the-edf-group/world-s-largest-power-company/activities/research-and-development/flagship-projects/metal-air-a-battery-that-breathes>
- BATTEX, nedatováno. NiCd akumulátory. *Články, baterie a akumulátory* [online]. [cit. 13.4.2021]. Dostupné z: <http://www.battex.info/hermeticke-akumulatory/nicd-akumulatory>
- BUCHMANN, Insidor, 2020. How does a Supercapacitors Work? *Batteryuniversity.com* [online]. Datum aktualizace: 8.12. 2020 [cit. 30.4.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/learn/article/whats_the_role_of_the_supercapacitor
- BUCHMANN, Insidor, 2021. How does the Fuel Cell Work? *Batteryuniversity.com* [online]. Datum aktualizace: 2.5.2021 [cit. 29.4.2021]. Dostupné z: https://batteryuniversity.com/index.php/learn/article/fuel_cell_technology
- BUDÍN, Jan, 2015. Přečerpávací vodní elektrárna - princip a uspořádání. In: *oEnergetice.cz* [online]. 3.3. [cit. 3.4.2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarna-princip-usporadani-2/>
- COLTHORPE, Andy, 2020. Long-duration thermal energy storage startup Azelio wins first commercial order. In: *Energy Storage News* [online]. 10.12.[cit. 15.5.2021]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/news/long-duration-thermal-energy-storage-startup-azelio-wins-first-commercial-o>
- COLTHORPE, Andy, 2021. At 300MW / 1,200MWh, the world's largest battery storage system so far is up and running. In: *energy-storage.news* [online]. 7.1. [cit. 14.5.2021]. Dostupné z: <https://www.energy-storage.news/news/at-300mw-1200mwh-the-worlds-largest-battery-storage-system-so-far-is-up-and>
- ČERNÝ, Radim, 2021. Digitalizace elektroenergetiky. In: *Youtube* [záznam přednášky on-line]. ČEZ. ČVUT FEL, 25.3.2021 [cit. 3.4.2021]. Dostupné z: <https://www.youtube.com/watch?v=osF2ektpWe0>
- ČTK, 2020. Přečerpávací vodní elektrárny ČEZ vyrobily v Q1 2020 o pětinu více elektřiny. In: *oEnergetice.cz* [online]. 4.5. [cit. 3.4.2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrarny-cr/precerpavaci-vodni-elektrarny-cez-vyrobily-o-petinu-vice-elektriny>
- DRTINOVÁ, Kateřina, 2018. *Akumulace elektrické energie a její využití v distribuční síti*. Praha. Bakalářská práce. České vysoké učení technické v Praze. Fakulta elektrotechnická. Katedra ekonomiky, manažerství a humanitních věd. Vedoucí práce Jan ŠVEC.

- DVORAK, Paul, 2011. Battery stores 40 MW for Fairbanks, Alaska emergencies. In: *Windpowerengineering.com* [online]. 6.7. [cit. 15.5.2021]. Dostupné z: <https://www.windpowerengineering.com/battery-stores-40-mw-for-ankorage-emergencies/>
- EASE [European Association for Storage of Energy], nedatováno. Technologies. European Association for Storage of Energy [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://ease-storage.eu/energy-storage/technologies/>
- EERE [Office of Energy Efficiency and Renewable Energy], nedatováno. Parts of a Fuel Cell, *Energy.gov*. [online]. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy [cit. 28.4.2021]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/parts-fuel-cell>
- EERE [Office of Energy Efficiency and Renewable Energy], nedatováno. Types of Fuel Cells, *Energy.gov*. [online]. Washington, DC: Office of Energy Efficiency and Renewable Energy [cit. 28.4.2021]. Dostupné z: <https://www.energy.gov/eere/fuelcells/types-fuel-cells>
- ERÚ [Energetický regulační ústav], 2020. *Roční zpráva o provozu elektrizační soustavy ČR 2019* [online]. [cit. 3.4.2021]. Dostupné z: https://www.eru.cz/documents/10540/5381883/Rocni_zprava_provoz_ES_2019.pdf/debe8a88-e780-4c44-8336-a0b7bbd189bc
- ESA [Energy Storage Association], nedatováno. TECHNOLOGIES of Energy Storage. Energy Storage Association [online]. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://energystorage.org/why-energy-storage/technologies/>
- FlowCamp, nedatováno. Research. *Redox Flow Battery Campus* [online]. Fraunhofer Institute for Chemical Technology. [cit. 27.4.2021]. Dostupné z: https://www.flowcamp-project.eu/?page_id=38
- CHEN, Haisheng, ZHANG, Xinjing, LIU, Jinchao, TAN, Chunqing, 2013. *Compressed Air Energy Storage*. [online]. 23.1. [cit. 13.5.2021]. ISBN 978-953-51-0951-8. Dostupné z: <https://doi.org/10.5772/52221>
- ISPT [Institute for Sustainable Process Technology], 2017. *Power to Ammonia* [online]. Institute for Sustainable Process Technology [cit. 29.4.2021]. Dostupné z: <https://www.topsectorenergie.nl/sites/default/files/uploads/Energie%20en%20Industrie/Power%20to%20Ammonia%202017.pdf>
- LEMAIRE-POTTEAU, E., PERRIN, M., GENIES, S., 2009. *Encyclopedia of Electrochemical Power Sources* [online]. [cit. 6.4.2021]. ISBN: 9780444527455 Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/B978-044452745-5.00885-6>
- MASTNÝ, Petr, DRÁPELA, Jiří, aj., 2011. *Obnovitelné zdroje elektrické energie*. Praha: České vysoké učení technické v Praze. 256 s. ISBN 978-80-01-04937-2.
- MATALUCCI, Sergio, 2021. The Hydrogen Stream: US port wants to produce 9,000 MT with 260 MW/840 MWh of solar-plus-storage. In: *pv-magazine.com* [online]. 14.5. [cit. 15.5.2021]. Dostupné z: <https://www.pv-magazine.com/2021/05/14/the-hydrogen-stream-us-port-wants-to-produce-9000-mt-with-260-mw-840-mwh-of-solar-plus-storage/>
- Off Grid Energy Independence, 2019. World's first grid scale pumped heat energy storage system operational. In: *OffGridEnergyIndependence.com* [online]. 11.1. [cit. 13.5.2021]. Dostupné z: <https://www.offgridenergyindependence.com/articles/16221/worlds-first-grid-scale-pumped-heat-energy-storage-system-operational>

- PATEL, Sonal, 2019. Why Power-to-Gas May Flourish in a Renewables-Heavy World. In: *powermag.com* [online]. 2.12. [cit. 29.4.2021]. Dostupné z: <https://www.powermag.com/why-power-to-gas-may-flourish-in-a-renewables-heavy-world/>
- Publications Office of the European Union, 2020. Database of the European energy storage technologies and facilities. [online]. 30.5. [cit. 14.5.2021]. Dostupné z: <https://data.europa.eu/data/datasets/database-of-the-european-energy-storage-technologies-and-facilities?locale=en>
- Pumping power: pumped storage stations around the world, 2020. *drax.com* [online]. Drax Group plc. 30.12. [cit. 13.5.2021]. Dostupné z: <https://www.drax.com/technology/pumping-power-pumped-storage-stations-around-the-world/>
- RATHI, Akshat, 2019. The world's largest "virtual battery plant" is now operating in the Arabian desert. In: *QUARTZ.com* [online]. 30.1. [cit.15.5.2021]. Dostupné z: <https://qz.com/1536917/the-uae-has-the-worlds-largest-virtual-battery-plant/>
- Redakce Nazeleno.cz., 2011. Výstavba nových vodních elektráren v ČR: Jaké jsou plány?. In: *Nazeleno.cz* [online]. 18.8. [cit. 3.4.2021]. Dostupné z: <https://www.nazeleno.cz/energie/vodni-energie/vystavba-novych-vodnich-elektren-v-cr-jake-jsou-plany.aspx>
- REICHL, Tomáš, 2015. Metal-Air (Kov-vzduchová) baterie. In: *oEnergetice.cz* [online]. 9.4. [cit. 20.4.2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/metal-air-kov-vzduchova-baterie>
- SHAW, Clive, nedatováno. *Superconducting Magnetic Energy Storage System - Commercialisation and Marketing Challenges* [online]. [cit. 15.5.2021]. Dostupné z: <http://www.energystorage-cdt.ac.uk/outputs/cohort-2/5.2+Shaw.pdf>
- SABRU, Ioan, SEBARCHIEVICI, Calin, 2018. *A Comprehensive Review of Thermal Energy Storage* [online]. 14.1. [cit. 15.5.2021]. ISSN 2071-1050. Dostupné z: <https://doi.org/10.3390/su10010191>
- SANDER, Michael, GEHRING, Rainer, aj., 2012. *LIQHYSMES storage unit* [online]. Vydání 19. International Journal of Hydrogen Energy [cit. 30.4.2021]. Dostupné z: <https://doi.org/10.1016/j.ijhydene.2012.07.019>
- ŠRUBAŘOVÁ, Petra, 2018. Pokročilé technologie olověných akumulátorů - gel a AGM. In: *tzb-info.cz* [online]. 18.1. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/16815-pokrocile-technologie-olovenych-akumulatoru-gel-a-agm>
- Technologie Power-to-Gas (P2G), nedatováno. *ujv.cz* [online] Řež: ÚJV Řež, a. s. [cit. 29.4.2021]. Dostupné z: <https://www.ujv.cz/cs/akordeonovy-seznam/technologie-power-to-gas-p2g-11354>
- TICHÝ, Jiří, 2019. Lithiové akumulátory. In: *tzb-info.cz* [online]. 15.7. [cit. 5.4.2021]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektřiny/13612-lithiove-akumulatory>
- TKÁČ, Martin a STEHLÍK, Karin, 2017. Centrální výroba vodíku. *Chemické listy* [online]. **111**(2), 121-128 [cit. 28.4.2021]. ISSN 1213-7103. Dostupné z <http://www.chemicke-listy.cz/ojs3/index.php/chemicke-listy/article/view/31/31>
- TWEED, Katherine, 2016. ABB Sells First Order for 15-Second Bus Charging. In: *businesswire.com* [online]. 26.7. [cit. 15.5.2021]. Dostupné z: <https://www.businesswire.com/news/home/20160715005154/en/ABB-Wins-First-Commercial-Order-for-Breakthrough-15-Second-Flash-Charging-Technology-to-Enable-Emission-Free-Public-Transport-in-Geneva>

VOBOŘIL, David, 2017. Přečerpávací vodní elektrárny v České republice. In: *oEnergetice.cz* [online]. 3.1. [cit. 13.5.2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/elektrina/precerpavaci-vodni-elektrarny-v-ceske-republice/>

WAGNER, Vladimír, 2018. Velký přehled: Využívané i perspektivní technologie akumulace energie. In: *oEnergetice.cz* [online]. 11.9. [cit. 4.4.2021]. Dostupné z: <https://oenergetice.cz/akumulace-energie/velky-prehled-vyuzivane-i-perspektivni-technologie-akumulace-energie>

zdkre, 2020. PMDP v rámci projektu INTERREG EfficienCE testují bateriovou posilovací stanici. In: *BUSportal.cz* [online]. 2.10. [cit 14.5.2021]. Dostupné z: <https://www.busportal.cz/clanky/pmdp-v-ramci-projektu-interreg-efficiencie-testuje-bateriovou-posilovaci-stanici-16729>

ZILVAR, Jiří, 2019. Velkokapacitní akumulátory v české energetice. In: *tbz-info.cz* [online]. 18.12. [cit. 13.9.2021]. Dostupné z: <https://oze.tzb-info.cz/akumulace-elektriny/20052-velkokapacitni-akumulatory-v-ceske-energetice>

Přílohy

Seznam obrázků a tabulek

Obr. 1: Instalovaný výkon v ČR (ERÚ 2020)	3
Obr. 2: Vývoj výroby a spotřeby el. energie na území ČR (TWh) (ERÚ 2020)	3
Obr. 3: Technologické rozdělení systémů akumulace energie (Mastný aj. 2011 - upraveno)	5
Obr. 4: Princip PVE (EASE nedatováno)	6
Obr. 5: Konstrukce setrvačnickového akumulátoru (ESA nedatováno)	7
Obr. 6: Princip D-CAES (EASE nedatováno)	9
Obr. 7: Princip A-CAES (EASE nedatováno)	9
Obr. 8: Princip LAES (EASE nedatováno)	10
Obr. 9: Princip PHES (EASE nedatováno)	11
Obr. 10: PV diagram nabíjení PHES (EASE nedatováno)	11
Obr. 11: Průřez Sodíkovou baterií (Mastný aj. 2011)	14
Obr. 12: Princip Na-ion baterie (EASE nedatováno)	15
Obr. 13: Kov-vzduch baterie typu Zn-air (Akhil aj. 2013)	17
Obr. 14: Princip VRB (ESA nedatováno)	19
Obr. 15: Princip Zn-Br průtočné baterie (Akhil aj. 2013)	21
Obr. 16: Závislost teploty na uloženém teple systému SHS (Sabru a Sebarchievici 2018)	26
Obr. 17: Závislost teploty na uloženém teple systému LHS	27
Obr. 18: Porovnání akumulačních technologií (podle dat ze zdrojů využitých v textu)	31